



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID –TLEMCEEN-

*-Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables-*

*ECOLE DOCTORALE : énergies renouvelables*

*-mémoire de magister -*

*Thème*

*Modélisation et commande d'un système  
De stockage photovoltaïque*

*Présenté par : Bendjamâa Ibrahim.*

*-Devant le jury :*

*Président : M<sup>F</sup> :BOUMEDIENE.BENYOUCEF  
Encadreur : M<sup>F</sup> :CHEIKH.BELFEDAL  
Examineurs : M<sup>F</sup> : ABDELGHANI.KHEROUS  
M<sup>F</sup> :ALLCHERMITTI  
M<sup>F</sup> :TAYEB ALAOU*

*Professeur, Université de Tlemcen  
Maître de conférences, Université de Tiaret  
Maître de conférences, Université Tlemcen  
Maître de conférences, Université Tlemcen  
Maître de conférences, Université de Tiaret.*

2011-2012

# Remerciement

*Je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir  
Accordé La volonté et le courage pour réaliser  
ma thèse.*

*Je remercie très chaleureusement Mr **B. Benyoucef**  
Professeur à l'université de Tlemcen pour m'avoir fait  
L'honneur de présider ce jury.*

*Mes remerciements les plus élogieux à Mr **C.Belfdhal**  
Maître de conférences à l'université de Tiaret,  
à Mr **T.Alaoui** Maître de conférences à L'université de  
Tiaret et à Mr **A.KHEROUS** Maitre de Conférences à  
l'université de Tlemcen et à Mr **A.CHERMITTI**  
Maitre de Conférences à l'université de Tlemcen  
de m'avoir honoré Par leur présence au jury*

*Autant qu'examineurs*

*Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous  
les membres de l'«**URMER** », spécialement à  
monsieur **B. BENYOUCEF** sans oublier  
les étudiants de Magister.*

***B.ibrahim***

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail  
Particulièrement à ceux qui m'ont  
Apprise le sens de la vie ; m'ont  
encouragé, m'ont Soutenu durant  
mes études;*

*Mon très cher père : **TOUATI**.*

*Ma chère mère : **GHANIA***

*A mes frères.*

*A toute la famille **bendjamaa***

*Je tiens à remercier tous (tes)*

*Mes amis(es) qui m'ont aidé de loin*

*Ou De Près dans la réalisation  
de ce travail.*

***B.brahim***

# *Sommaire*

# *Sommaire.*

**Liste des figures.**

**Nomenclature.**

**Introduction générale** .....01

## **Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque**

I-introduction.....	06
I-1-Généralité sur le soleil.....	07
I-1-1- rayonnement solaire.....	07
I-1-2- Spectre du rayonnement.....	07
I-1-3- Différents types de rayonnement.....	09
I-1-4- orientation et inclinaison .....	10
I-2- Les systèmes photovoltaïques.....	11
I.2-1- <i>L'isolé</i> .....	11
I.2-2- <i>Le connecté au réseau</i> .....	12
I-3- Générateur photovoltaïque.....	13
I-3-1-semi-conducteur .....	13
I-3-2-La jonction N-P.....	13
I-4- Les cellules photovoltaïques.....	14
I-4-1-Principe de fonctionnement.....	15
I-4-2-Les différentes types des cellules photovoltaïques.....	16
a) Silicium monocristallin.....	16
b) Silicium poly (ou multi-) cristallin .....	17
c) Silicium amorphe .....	18
I-4-3-Paramètres des cellules photovoltaïques.....	18
a) Courant de court-circuit $I_{CC}$ .....	19
b) Tension à circuit ouvert $V_{CO}$ .....	19
c) Puissance maximale .....	19
d) Rendement d'une cellule.....	20
e) Le facteur de remplissage.....	20

I-4-4- Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	21
I-5- Le module photovoltaïque .....	22
I-5- Le module photovoltaïque .....	22
<i>a.1) Caractéristiques d'un module</i> .....	22
I-5-1-Association des modules photovoltaïques .....	23
I-5-2 Le panneau solaire.....	25
I-6- Système de conversion.....	26
I -6-1 <i>le convertisseur continu-continu</i> .....	26
I -6-2 <i>Le convertisseur continu- alternatif</i> .....	26
I-7- Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	27
a) Avantages .....	27
b) inconvénients.....	27
I-8- Conclusion.....	28
I-9- Bibliographie.....	29

## **Chapitre II : Stockage de l'énergie solaire**

II-1-Introduction.....	32
II-2- Stockage de l'énergie.....	33
II-2-1-Autonomie « sans apport solaire ».....	33
II-2-2-Principe du couplage photo-générateur batterie.....	34
II-2-3- Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système.....	34
II-2-4- Principales caractéristiques des accumulateurs.....	35
a)-Capacité en Ampère heure.....	35
b)-Rapports de chargement et déchargement.....	35
c)-Température.....	35
d)- La durée de vie.....	35
e)-Profondeur de décharge.....	35
f)-La tension d'utilisation.....	35

g)-Le rendement.....	36
h)-Le taux d'autodécharge.....	36
II-3- Technologies et Types d'accumulateurs.....	36
II-3-1-Les différents types de batteries au plomb.....	38
a)- Les accumulateurs au plomb «ouvert».....	38
b)-Principe de fonctionnement.....	40
c)-Processus de décharge.....	41
d)-Processus de charge.....	41
e)-Connexion d'une batterie.....	42
II-3-2-Les batteries au lithium.....	43
II-3-3-Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd).....	44
II-3-4-Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H <sub>2</sub> ).....	45
II-3-5- Les accumulateurs Nickel-Métal-Hybride (Ni-MH).....	45
II-3-6- Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn).....	45
II-3-7- Les accumulateurs Zinc-halogènes.....	45
II-3-8- Les piles à combustibles.....	45
II-4- Différents couples électrochimiques les plus utilisés.....	46
II-5- Contrôle de charge.....	47
II-5-1- Les diodes anti retour.....	47
II-5-2- Fonctions d'un régulateur de charge.....	48
II-5-3- calcul de d'un système avec stockage .....	51
II-5-4- Détermination de la capacité de l'accumulateur .....	51
II -6- Conclusion.....	52
II -7- Bibliographie.....	53

## Chapitre III : modélisation et commande des systèmes

III-1-Introduction.....	55
III -2 MODELE DE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	56
III -2 -1- Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	56
a) Rayonnement direct.....	56
b) Rayonnement diffus.....	56
c) Rayonnement réfléchi.....	56
d) Rayonnement global ( $\phi_G$ ).....	56
III -3- LA MODELISATION DU CHAMP PHOTOVOLTAIQUE .....	57
III -3 -1- la modélisation d'une cellule solaire .....	57
a- Cas idéal .....	57
b- Cas réel .....	57
III -3 -2- groupement des cellules solaires.....	60
III-3 -3- Module photovoltaïque.....	60
III-3 -4-Panneau photovoltaïque.....	60
III -4- Modèle de la température.....	61
a) Température de jonction.....	61
b) Température ambiante.....	61
c) Variation du courant de saturation.....	61
d) Variation du courant court circuit .....	62
e) Variation de la tension à circuit ouvert .....	62
III -5 - SYSTEME DE CONVERTESSEUR .....	63
III -5 -1- convertisseur continu – continu (hacheur) .....	63
III -5 -1-a) hacheur dévolteur.....	63
III -5 -1-b) hacheur survolteur.....	63
III -5 -1- convertisseur continu-alternative.....	64
III - 6- Modélisation de stockage.....	65
III - 6-1- Modélisation du stockage électrochimique.....	65



a) <i>Le modèle de la capacité</i> .....	67
b) <i>équation de la tension en décharge</i> .....	68
c) <i>équation de la tension en charge</i> .....	68
d) <i>Rendements de charge et de décharge</i> .....	68
III – 7- LA STRATEGIE DE COMMANDE .....	71
III -7-1- <i>commande (MPPT) des convertisseurs DC-DC</i> .....	71
III -7-2 <i>Principe de la commande MPPT</i> .....	71
III-8- CONCLUSION .....	76
III -9- Bibliographie.....	77

### **Chapitre IV : Résultat de simulation sur MATLAB**

IV -1-Introduction.....	80
IV -2- Générateur photovoltaïque .....	81
IV-2-a) <i>Cellule solaire</i> .....	83
IV-2-b) <i>Moule photovoltaïque</i> .....	83
IV-3) : Les caractéristiques I(V) et P(V) du module à l'état standard .....	84
IV- 4) influence des paramètres sur les caractéristiques.....	86
IV- 4 -1- <i>Flux lumineux</i> .....	86
IV- 4 -2- <i>la température</i> .....	85
IV- 5 –Groupement des modules pv.....	87
IV-5-1- Les caractéristiques I(V) et P(V) du groupement des modules pv.....	87
IV- 6- Hacheur DC/DC.....	88
IV -6-1- MODELE DE SYSTEME PV AVEC MPPT.....	80
IV- 7- Batterie.....	93
IV- 7-1-Résistance de Batterie.....	93
a-Résistance en décharge.....	95
b-Résistance en charge.....	95

IV- 8- Contrôleur .....	96
IV- 9- Résultat globale d'un système PV .....	98
IV-8- 1- pour la journée ensoleillée .....	99
IV-8-2- pour la journée nuageuse.....	100
IV- 10- CONCLUSION .....	102
IV- 11- Bibliographie.....	103

# Liste des figures :

## **Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque**

Fig. (I -1) : Système photovoltaïque autonome.....	06
Fig. (I -2) : le spectre du rayonnement solaire.....	08
Fig. (I -3) : composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo .....	09
Fig. (I -4): Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	12
Fig. (I -5): Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau.....	12
Fig. (I -6):dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) .....	14
Fig. (I -7):les différentes technologies.....	15
Fig. (I -8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	16
Fig. (I -9) : Cellule en silicium monocristallin.....	17
Fig. (I -10):Cellule en silicium polycristallin.....	17
Fig. (I -11):Cellule silicium amorphe.....	18
Fig. (I -12):Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m <sup>2</sup> .....	19
Fig. (I -13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur Photovoltaïque.....	21
Fig. (I -14): Un module photovoltaïque.....	22
Fig. (I -15): Association des modules photovoltaïques .....	24
Fig. (I -16): Composants d'un champ de modules PV.....	25

## **Chapitre II : Stockage de l'énergie solaire**

Fig. (II-1) : Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques.....	36
Fig. (II-2) : Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries.....	37
Fig. (II-3): les différents types de batteries au plomb.....	38
Fig. (II-4) : Construction d'une batterie monobloc.....	38
Fig. (II-5) : cellule électrochimique (charge).....	41
Fig. (II-6) : cellule électrochimique (décharge).....	42
Fig. (II-7) : Connexion des batteries.....	43
Fig. (II-8) : Accumulateur lithium de Varta.....	44
Fig. (II-9) : <i>Résumé des différents couples électrochimiques les plus utilisés</i> .....	44
Fig. (II-10) : Principe d'une diode anti-retour.....	47
Fig. (II-11) : <i>principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge</i> .....	49
Fig. (II-12) : <i>régulateur charge/décharge</i> .....	50

## **Chapitre III : modélisation et commande des systèmes**

Fig. (III - 1) : Cellule solaire idéale.....	57
Fig. (III - 2) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	58
Fig. (III - 3) : caractéristique $I_C(V_C)$ d'une cellule photovoltaïque.....	59
Fig. (III - 4) : Tension de sortie .....	63
Fig. (III - 5-a) : Hacheur survolteur.....	64
Fig. (III - 5-b) : Hacheur dévolteur.....	64
Fig. (III - 6-) : Modèle R-C de batterie.....	65
Fig. (III - 7) : Schéma électrique équivalent de $n_b$ éléments de batteries en séries.....	66
Fig. (III - 8) : description de fonctionnement des batteries .....	70
Fig. (III - 9) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.....	72
Fig. (III - 10) : Caractéristique ( $P_{pv}$ $V_{pv}$ ) d'un panneau solaire .....	73
Fig. (III - 11) : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode	

(Inc-Cond).....	74
Fig. (III - 12) : organigramme de l'algorithme de perturbation et observation.....	75

## **Chapitre IV : Résultat de simulation sur MATLAB**

Fig. (IV - 1) : Environnement MATLAB .....	75
Fig. (IV - 1) : organigramme de l'algorithme de perturbation et observation.....	75
Fig. (IV - 1) : organigramme de l'algorithme de perturbation et observation.....	75
Fig. (IV - 5) : caractéristique I(V) et P(V) du module pv BP 3135.....	75
Fig. (IV - 5) : Tableau des Caractéristiques électrique du module PV .....	75
Fig. (IV - 2) : caractéristique I(V) et P (V) du cellule pv idiale.....	81
Fig. (IV - 3) : Tableau des Caractéristiques électrique et image du module PV ...	82
Fig. (IV - 4) : module PV sous simulink.....	82
Fig. (IV - 5) : caractéristique I(V) et P(V) du module pv BP 3135.....	83
Fig. (IV - 6) : influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).....	84
Fig. (IV - 7) : <i>influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)</i> .....	85
Fig. (IV - 08) :: <i>influence de la température sur la caractéristique I(V)</i> .....	86
Fig. (IV - 09) :: <i>influence de la température sur la caractéristique P(V)</i> .....	86
Fig. (IV - 10) : groupement des modules PV sous simulink.....	87
Fig. (IV - 11) : les caractéristiques P(V) et I(V) du groupe des modules pv BP 3135....	87
Fig. (IV - 12) : Hacheur DC/DC sous simulink.....	88
Fig. (IV - 13) : Réponse en tension de l'hacheur .....	89
Fig. (IV - 14) Le diagramme de l'algorithme P&O.....	90
Fig. (IV - 15) : Modèle de développement de système PV sous MATLAB/Simulink...	91
Fig. (IV - 16) : <i>MPP T</i> courbes par méthode P&O pour différentes irradiation.....	91
Fig. (IV - 17) : Rendement de l'hacheur pour différente éclairement .....	91
Fig. (IV - 17) : Rendement de l'hacheur pour différente éclairement .....	92

Fig. (IV - 18) : MPP T courbes par méthode P&O pour irradiation constante. ....	92
Fig. (IV - 19) : Rendement de l'hacheur pour un éclairage constant.....	93
Fig. (IV - 20) : batterie plomb acid.....	93
Fig. (IV - 21) : a-Réponse en courant. b – tension. c - état de charge de la batterie .....	94
Fig. (IV - 22) : Résistance de batterie en décharge.....	95
Fig. (IV - 23) : Résistance de batterie en charge.....	95
Fig. (IV - 24) : <i>Le schéma fonctionnel pour le système étudié</i> .....	97
Fig. (IV - 25) : Block de régulateur en série.....	97
Fig. (IV - 26) : Le bloc de commande des commutateurs.....	98
Fig. (IV - 27) : Bloc globale d'un système PV autonome.....	98
Fig. (IV - 28) : A-Irradiation et Ppv – B. la puissance du module PV.....	99
Fig. (IV - 29) : C . Le courant Ipv et Ibatt – D. la tension Vbatt.....	99
Fig. (IV - 30) : A. Irradiation et Ppv – B. la puissance du module PV.....	100
Fig. (IV - 31) : C . Le courant Ipv et Ibatt – D. la tension Vbatt.....	100

## *Nomenclature*

$A$  : Le facteur d'idéalité de la jonction.

$I_D$  : Courant de diode (A).

$I_{ph}$  : Le photo courant (A).

$I_0$  : Courant de saturation (A).

$R_p$  : Résistance parallèle (shunt) (ohm)

$R_S$  : Résistance série (ohm).

$K$  : constant de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ ).

$q$  : la charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ )

$R_{Se}$  : résistance série du module

$R_{pe}$  : résistance parallèle du module (ohm)

$T_c$  : Température de jonction ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$G_0$  : L'éclairement de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

$T_0$  : La température de référence ( $298 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ).

$\alpha$  : Le coefficient de courant en fonction de température ( $\text{A}/^{\circ}\text{C}$ ).

$b$  : Le coefficient de la tension en fonction de température ( $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ).

$I_{cc}$  : Le courant de court circuit (A).

$V_{co}$  : La tension de circuit ouvert (V).

$FF$  : Facteur de forme.

$N_s$  : Nombre de modules dans le panneau en série.

$N_p$  : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

$P_m$  : La puissance maximale produite PV (W).

$V_{CO}$  : la tension à circuit ouvert (V).

$S$  : Surface de générateur ( $\text{m}^2$ ).

$I_{mp}$  : Le courant maximal sous conditions standards (A).

$V_{mp}$  : La tension maximale du module sous conditions standards (V).

$D$  : est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1

$R_b$  : Rapport de flux direct.

$S_B$  : Flux direct pour un plan d'inclinaison ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$H_s$  : Flux direct horizontal.

$W$  : Déclinaison du soleil.

$d$  : Angle horaire du soleil.

$K(i)T$  : Coefficient de sérénité.

$GH_f$  : Flux global horizontal.

$x$  : Albédo du sol.

$R_b$  : Rapport du flux direct.

$E_b$  : force électromotrice

$SOC$  : L'état de charge de batterie.

$C_{Bat\ min}$  : La capacité minimale.

$C_{Bat\ max}$  : La capacité maximale.

$C_{Bat}$  : La capacité de stockage de la batterie (Ah).

$N_a$  : Le nombre de jours d'autonomie.

$V_{bat}$  : La tension aux bornes de la batterie (V).

$E$  : La force électromotrice (V). $t$

$R_{bat}$  : La résistance interne de batterie (ohm).

$I_{bat}$  : Courant de charge de batterie (A).

$h_{bat}$  : Le rendement de la batterie (%).

$T$  : La température ambiante (°K).

$Q_{batt}$  : la quantité de charge électrique en Coulomb

$C$  : la valeur de la capacité en Farad



# ***Introduction générale***

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques années, la communauté scientifique est concentrée sur la menace présumée la plus préoccupante pour l'avenir de la planète : le réchauffement climatique. Ce phénomène est la conséquence de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine [1].

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi les moyens de production prometteurs (micro éolien, micro hydraulique...), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat [2].

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des microturbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV) avec un système de stockage, le stockage est assuré par des batteries. Ce système, appelé systèmes PV-Batteries.

Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales. L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus rapidement que cette capacité installée est faible. Afin de protéger les batteries contre une

recharge excessive, on doit les déconnecter de l'installation. Il est alors impossible d'utiliser la totalité de la ressource renouvelable. Finalement, le dimensionnement du champ photovoltaïque est surestimé par rapport aux besoins réels de l'utilisateur final.

Le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

A cet effet nous s'intéressons sur les modèles de ces composants, c'est à dire la modélisation du champ photovoltaïque, batterie, régulateur et le convertisseur [3].

Le but poursuivi dans le cadre de cette mémoire est de chercher des modèles Pour stocker l'énergie électrique à base du module PV pour la restituer pendant la nuit et les jours *sans soleil*.

A cet effet, nous avons fait dans notre étude :

Au premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de Chaque élément constituant le système photovoltaïque. Nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents types des cellules. Et finalement nous décrivons les avantages et les inconvénients.

Le second chapitre se caractérise par une étude sur Les accumulateurs et piles électrochimiques permettent de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Leur utilisation est très répandue et en plein essor. Le problème de ces éléments énergétiques est de réussir a les maintenir en état le plus longtemps possible bien qu'ils soient le siège de nombreux phénomènes électrochimiques non linéaires et qu'ils subissent une altération de leurs performances au cours du temps et des utilisations.

Le troisième chapitre est très important, car il présente la modélisation de chaque élément du Système.

Le quatrième chapitre est un résultat de simulation. Par logiciel **MATLAB/SIMULINK** Des différents composants.

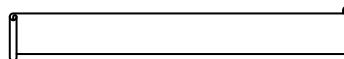
Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre Étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

**Bibliographie :**

[1] : IPCC, Intergouvernemental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>, 2009.

[2] : **YANN RIFFONNEAU** : GESTION DES FLUX ENERGETIQUES DANS UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE CONNECTE AU RESEAU-Application à l'habitat. Thèse doctorat l'université JOSEPH FOURIER 23 octobre 2009.

[3] : **Belhadj Mohammed**: Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2007-2008.



***Chapitre 01 :***  
***Étude et présentation d'un système  
photovoltaïque***

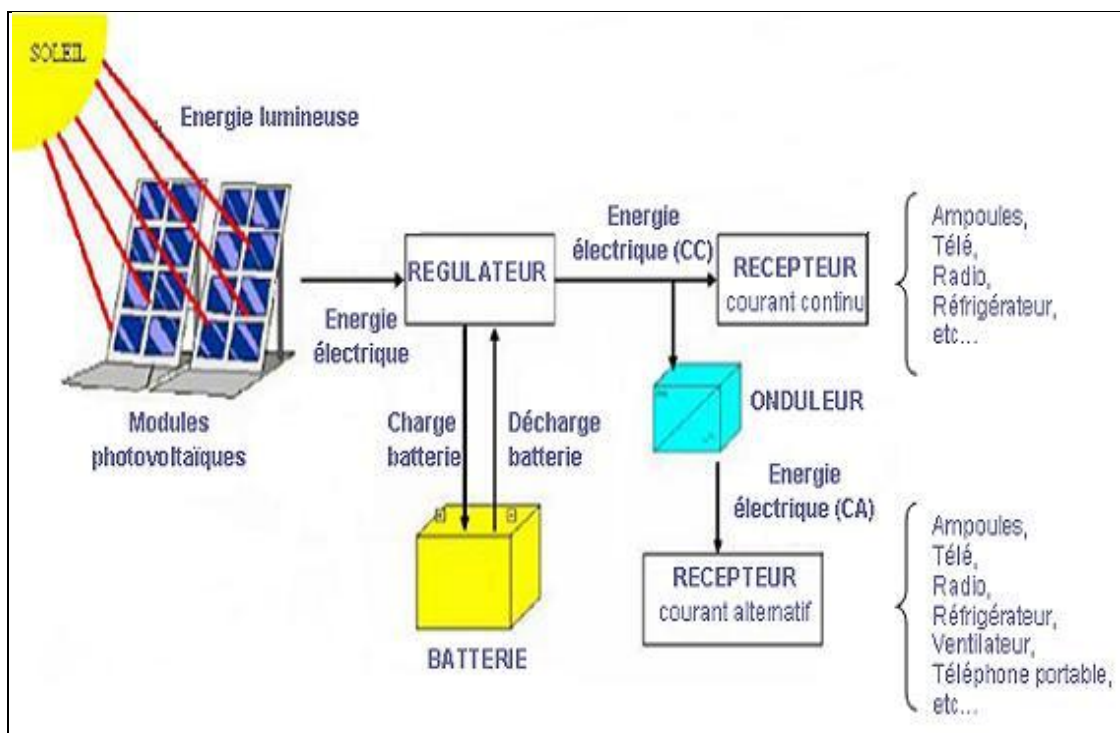
**Introduction :**

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. [1]

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque « stand-alone »

et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.



**Fig. (I-1) : Système photovoltaïque autonome [2].**

## I -Généralité sur le soleil:

### I -1-Rayonnement solaire:

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de **300000km/s**, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [3] :

- Diamètre de soleil **Ds = 1.39\* 10<sup>9</sup> m**
- Diamètre de la terre **Dt = 1.27\* 10<sup>7</sup> m**
- Distance moyenne soleil- terre **Lts = 1.5\* 10<sup>11</sup> m**

### I -1-1-Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde.

L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante:

$$E = h\nu = hc/\lambda \tag{I.1}$$

$h = 6,62 * 10^{-34} \text{ JS}^{-1}$  est la constante de Planck.

$C = 3 * 10^8 \text{ mS}^{-1}$  étant la vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en : [4].

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

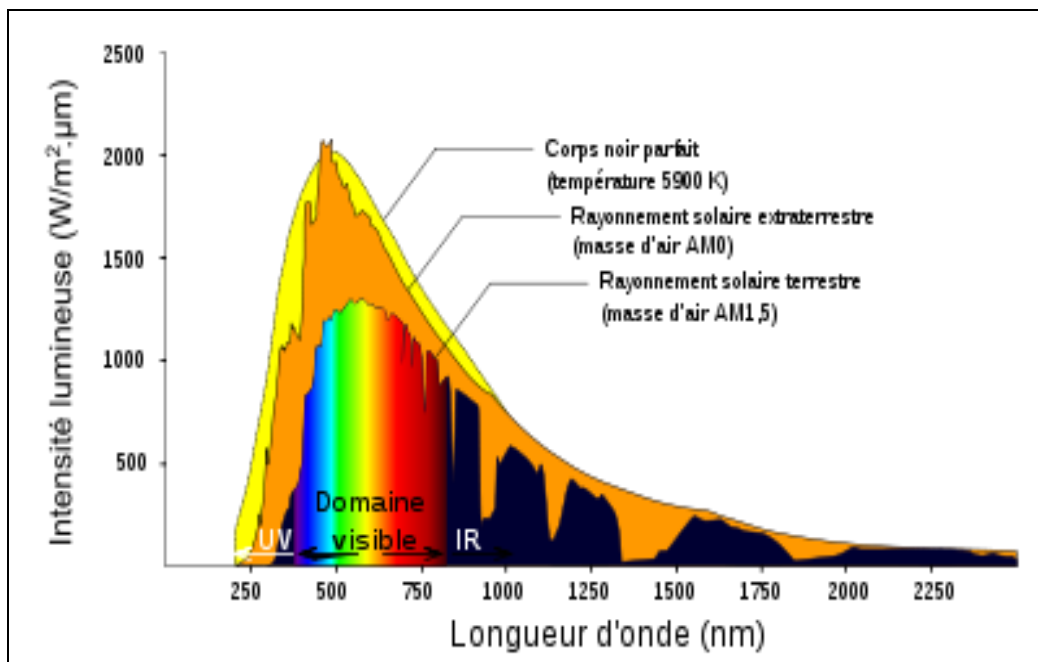


Fig. (I -2) : le spectre du rayonnement solaire [5].



**I-1-3-Différents types de rayonnement:**

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

**– Le rayonnement direct :**

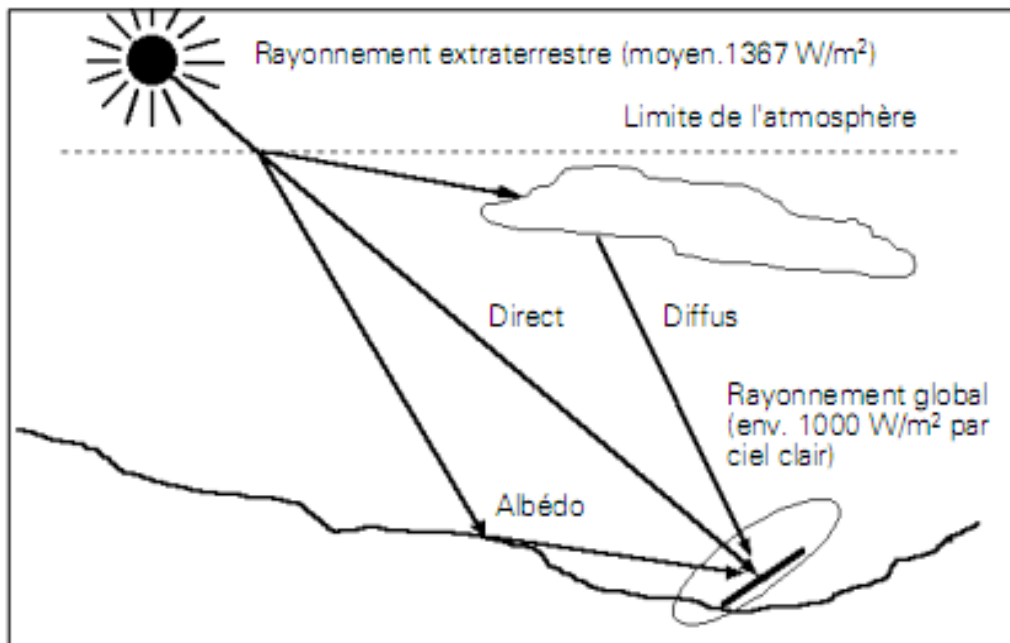
est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

**– Le rayonnement diffus :**

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

**– L'albédo :**

est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.



**Fig. (I-3) : composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo [6].**

#### I.1.4. Orientation et inclinaison:

La question qui vient immédiatement à l'esprit est: comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ?

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement.

En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante:

$$\textit{Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle} = \textit{Latitude du lieu} + 10^\circ$$

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus [7].

		ORIENTATION				
		O	SO	S	SE	E
INCLINAISON	0° —	93%	93%	93%	93%	93%
	30° /	90%	96%	100%	96%	90%
	45° /	84%	92%	96%	92%	84%
	60° /	78%	88%	91%	88%	78%
	90°	55%	66%	68%	66%	55%

Fig. (I -3): l'orientation et l'inclinison (Alsace-Lorraine) [8].

## I.2. Les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée:

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau.

### I.2-1. L'isolé :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.4) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

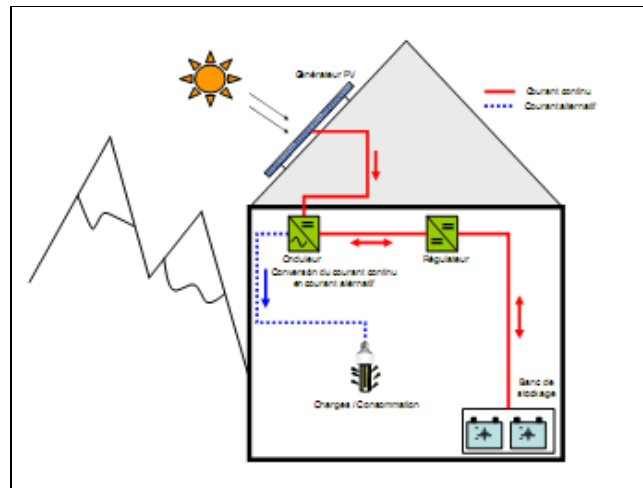


Fig. (I -4): Exemple de la structure d'un système PV autonome.

**I.2-2. Le connecté au réseau :**

La Figure (I.5) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les Charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation Instantanée est injecté sur le réseau. Le réseau est utilisé en appoint à la production PV.

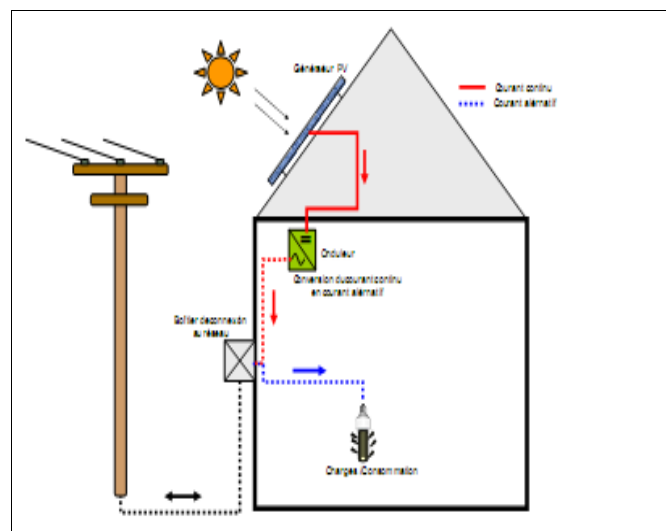


Fig. (I -5): Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [9]

### I-3-Générateur photovoltaïque (PV) :

#### I-3-1-Semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de **0 K (-273°C)** chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

Par exemple, à la température de **300 K (27°C)**, il y a  **$1.45 \cdot 10^{10}$**  paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur [10].

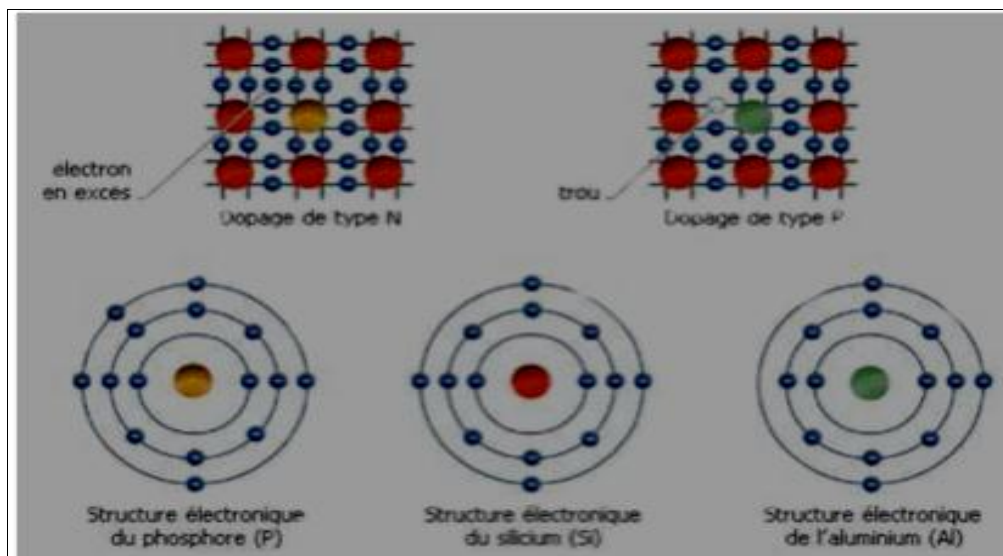
#### I-3-2- La jonction N-P :

La jonction **N-P** est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée **N** et l'autre dopée **P**, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région **N** au pôle négatif d'un générateur et la région **P** au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région **N**, ainsi que les trous libres de la région **P**, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région **P** et les trous dans la région **N**. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse.

Les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction **N-P** joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région **P** ; ces électrons ont tendance à se recombinier avec les trous présents en grand nombre dans cette région **P** ; ils le font au bout d'un temps  $t$  appelé durée de vie des porteurs minoritaires [11].



*Fig. (I -6):dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) [12].*

#### I-4-Les cellules photovoltaïques:

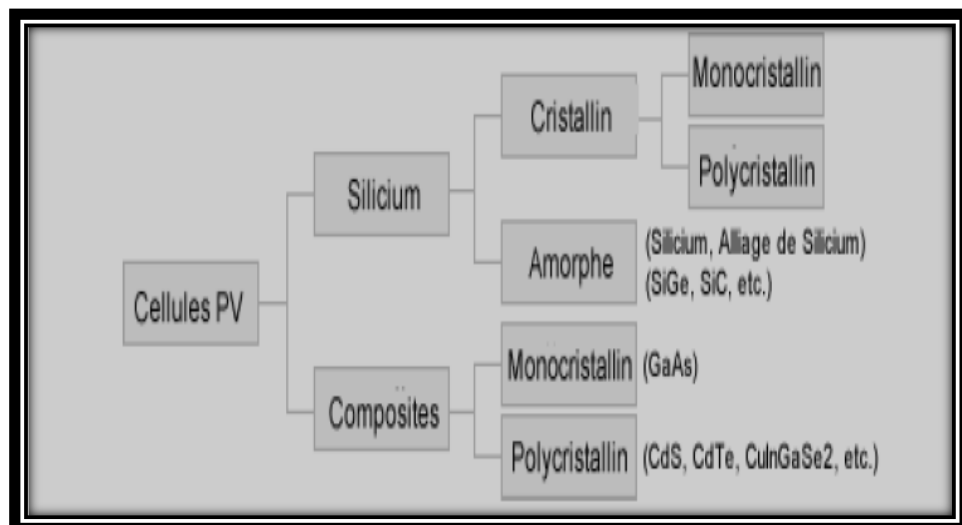
Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », ont été découvertes par **E. Becquerel en 1839** [13]. Elles sont réalisées à

l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [14].

Les matériaux les plus connus sont:

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (Cds)
- l'arséniure de gallium (As Ga)
- le tellure de cadmium (Cd Te)
- le germanium (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)

La figure suivant représente les différentes technologies des cellules PV :



*Fig. (I -7):les différentes technologies [15]. :*

#### **I-4-1-Principe de fonctionnement:**

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux

semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ( $E_{ph} = h\nu$ ) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron-trou». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel .

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. Figure (I -8) [16].



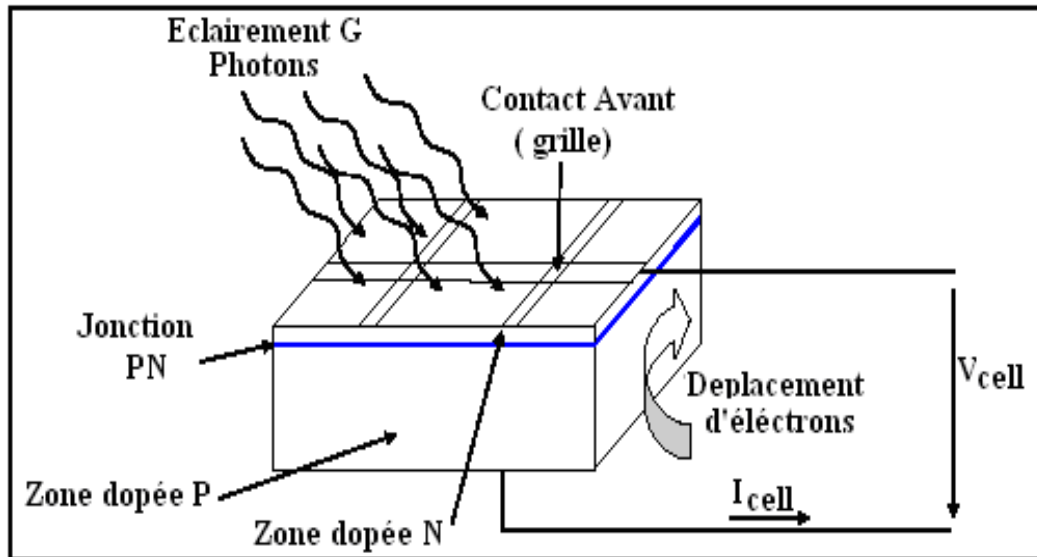


Fig. (I -8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [17].

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6 V) [18].

#### I-4-2-Les différents types des cellules photovoltaïques:

Il existe trois types principaux des cellules :

##### a) Silicium monocristallin :

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

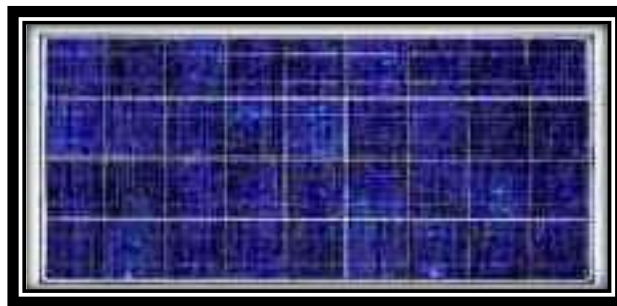


Fig. (I -9) : Cellule en silicium monocristallin [19].

**Avantages :**

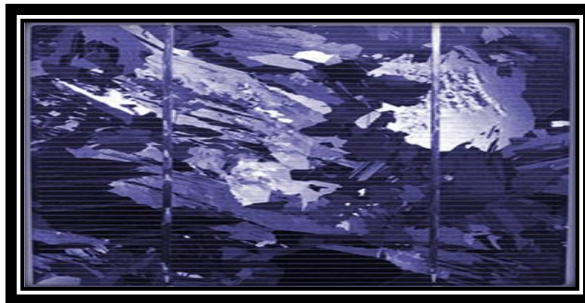
- Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Première génération de photopiles.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

**b) Silicium poly (ou multi-) cristallin :**

Cousin germain du précédent (composés de multicristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.



*Fig. (I -10):Cellule en silicium polycristallin [19].*

**Avantages :**

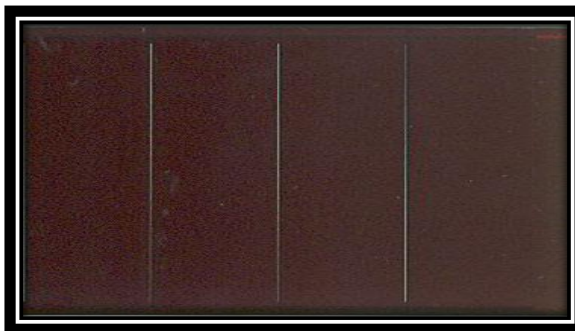
- Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage identique à celui du silicium cristallin.

**Inconvénients:**

- Rendement faible sous un faible éclairement.

**c) Silicium amorphe :**

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.



**Fig. (I -11):Cellule silicium amorphe[19].**

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc.
- Gamme d'éclairément : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m<sup>2</sup> (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.

**I-4-3- Paramètre des cellules photovoltaïques :**

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{cc}$ ,  $V_{c0}$ ,  $P_{max}$ ,  $A$ ,  $ff$  et  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit  $I_{CC}$  :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V=0$ ) Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire :  $I_{CC}(V=0) = I_{ph}$

b) Tension à circuit ouvert  $V_{CO}$ :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse :

On peut écrire :

$$V_{CO}(I=0) = AU_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

(1.4)

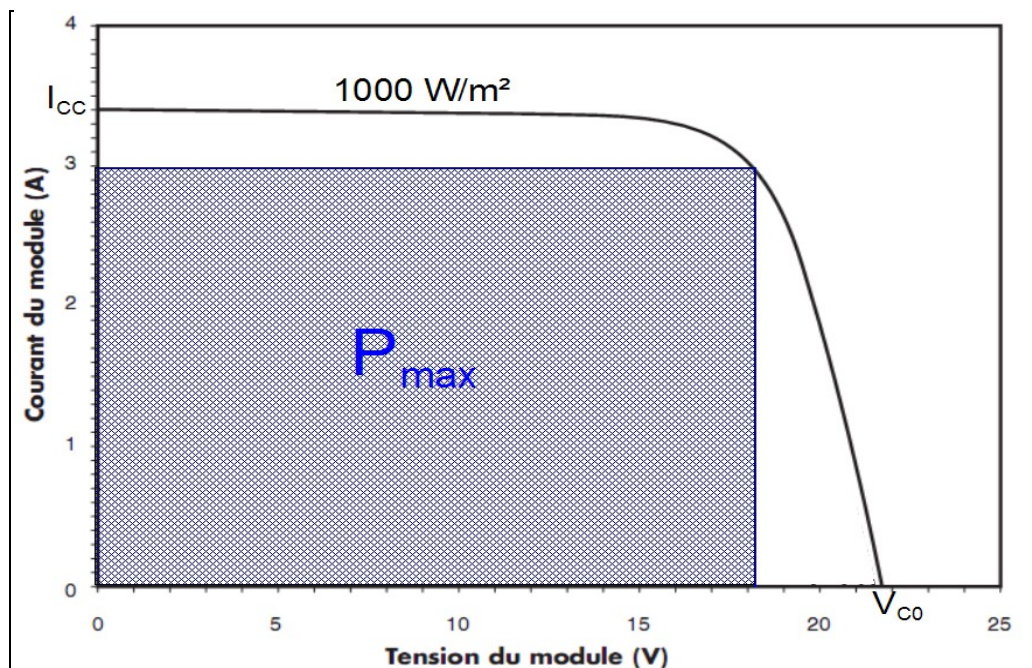


Fig. (I -12): Courbe  $I(V)$  à  $T=25$  et un éclairement de  $1000W/m^2$ .

**c) Puissance maximale :**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée **P<sub>max</sub>**) pour un point de fonctionnement **P<sub>max</sub>(I<sub>max</sub>, V<sub>max</sub>)** de la courbe courant-tension (courants compris entre **0** et **I<sub>cc</sub>** et tension comprise entre **0** et **V<sub>co</sub>**).

**d) Rendement d'une cellule :**

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente

$$(1.5) \quad \text{Avec :} \quad \eta_c = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{solaire}}$$

**P<sub>s</sub>** : est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1., une température de **25°C**, et un éclairage de **1000W/ m<sup>2</sup>**.

**e) Le facteur de remplissage :**

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise ( Fill Factor ) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit **V<sub>co</sub>\*I<sub>cc</sub>**, correspondant à la puissance maximale idéale.

$$(1.6) \quad ff = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}}$$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de **10 à 20%**. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium **AsGa** donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%. D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

- Le courant de court circuit  $I_{cc}$ , soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photo courant  $I_{ph}$ .
- La tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance  $P_{max}$  ou **MPP**(Maximum Power Point).

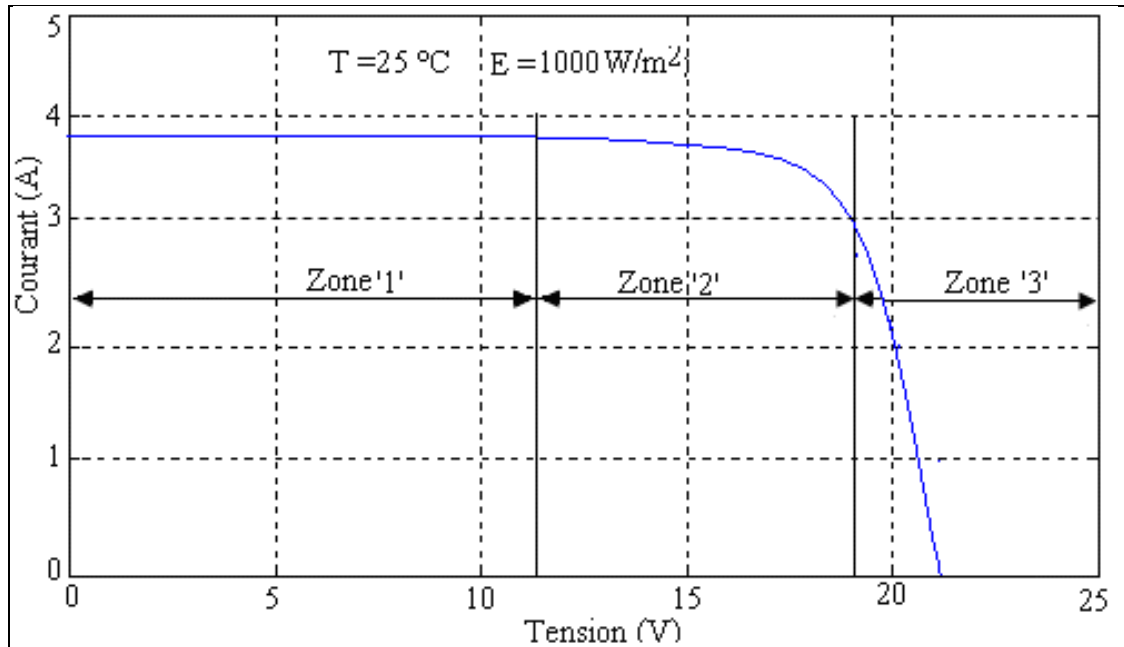
#### **I-4-4- Les zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque :**

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n' impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée.  $C'$  est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (1.4.3) représente trois zones essentielles :

**a) La zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**b) La zone (2) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**c) La zone (3):** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.



*Fig. (I -13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque [20].*

### I-5-Le module photovoltaïque:

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est 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 1,5 selon les technologies .Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [21].



**Fig. (I -14): Un module photovoltaïque [22].**

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), polycristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100 Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [23].

#### **b.1) Caractéristiques d'un module :**

Voici la description des paramètres d'un module:

- **La puissance crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans

les conditions standard (25°C et un éclairement de (1000 W/m<sup>2</sup>).

**La caractéristique  $I(V)$** : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$



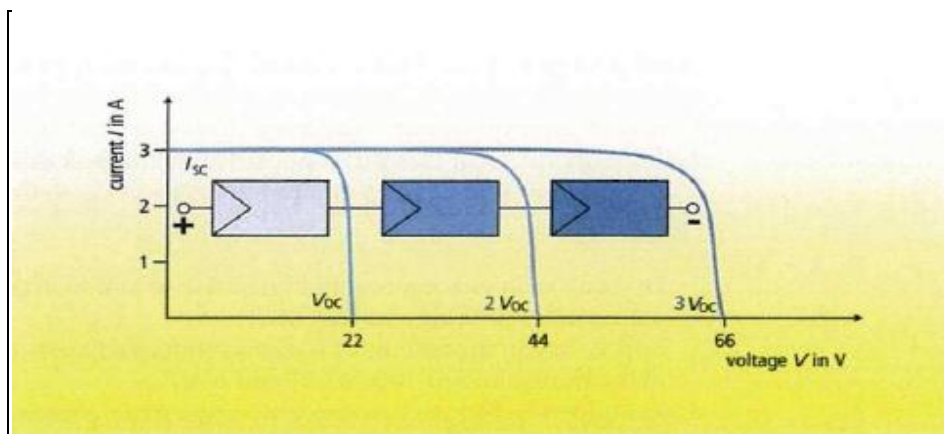
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$  [24].

#### **I-5-1-Association des modules photovoltaïques :**

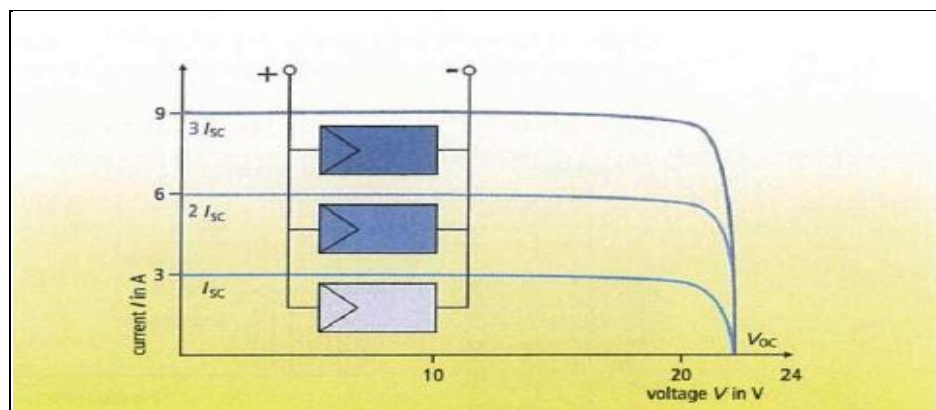
Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur en, associe “ $N_p$ ” modules en parallèle comme montrer dans les figures (I.15-b) et (I.15-a). pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en, associe “ $N_s$ ” modules en série comme Le montrent les figures précédentes.

Afin d’obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d’associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l’on appelle un générateur photovoltaïque Figure (I.15-c).

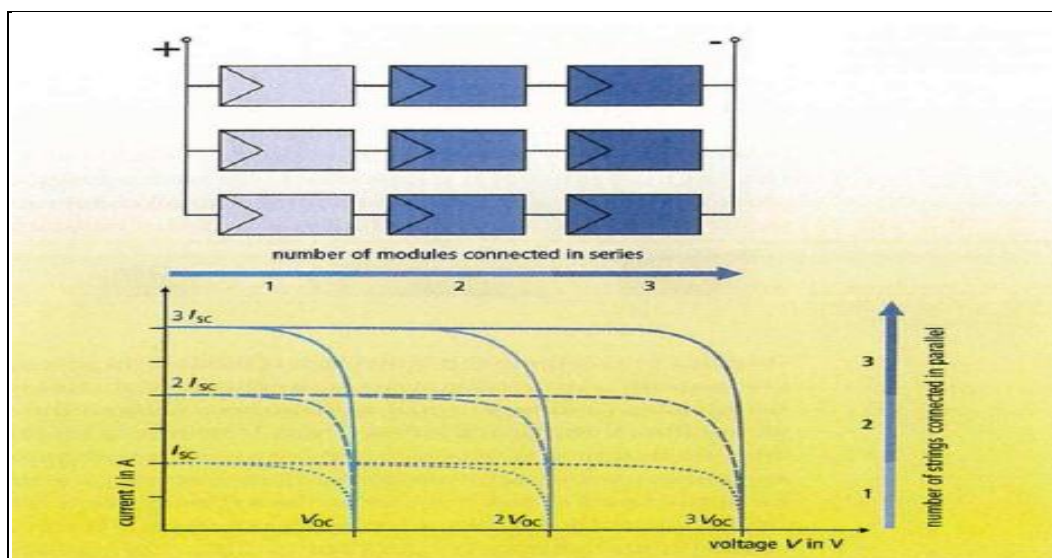
[25].



a) Association en série



b)-Association en parallèle



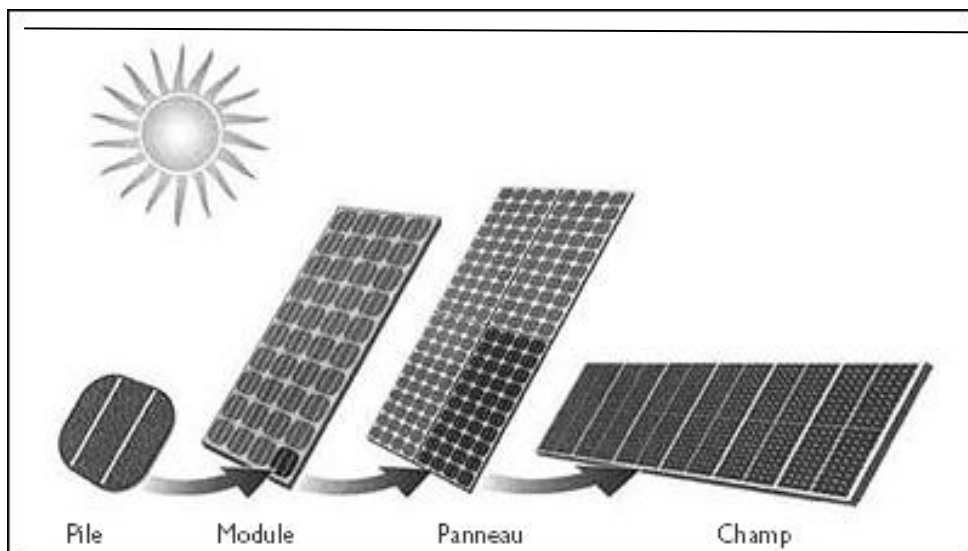
c) Association mixte (Série + Parallèle)

Fig. (I -15): Association des modules photovoltaïques .

### I-5-2 Le panneau solaire:

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [26].

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure [27].



*Fig. (I -16): Composants d'un champ de modules PV*

---

**I -6- Système de conversion :**

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil .

**I -6-1 le convertisseur continu-continu :**

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

**I -6-2 Le convertisseur continu- alternatif :**

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).
- **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :
  - Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
  - De faibles pertes à vide [28].

**I-7- Avantages et inconvénients d'une installation PV [29] :****a) Avantages :**

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

**b) Inconvénients :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
  - Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

**I-8- Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Et une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs associations.

---

---

**Bibliographie :**

[1] : **A. Zerga** : 'Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p', Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.

[2]:[www.aes-tunisie.com/fr/photovoltaique-hors-re...](http://www.aes-tunisie.com/fr/photovoltaique-hors-re...)

[3]: **Belhadj Mohammed**«Modelisation D'un Systeme De Captage photovoltaïque Autonome », Memoire de Magister2007/2008, Universitaire De Bechar.

[4]:**Akassewa Tchapo Singo** « Systeme d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat energetiquement autonome », These de Doctorat de l'Universite Henri Poincare, Nancy-I.

[5]: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/>

[6]: Centrales photovoltaïques – Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs Programme d'action PACER – Energies renouvelables Office fédéral des questions conjoncturelles Berne, juin 1996

[7]: **Bellala Djamel** :« Contribution a l'Optimisation des Systemes de conversion d'Energie. Application aux Systemes Photovoltaïques These Doctorat en sciences, Universite de Batna.

[8]: [www.voltasoler.com/medias/](http://www.voltasoler.com/medias/)

[9]: **Yann.Riffonneau**: «gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », thèse de doctorat ,L'université josph fourier, octobre 2009.

[10] :**R. Maouedj**, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.

[11]: **Bendjellouli Zakaria** « Contribution a la modelisation d'une cellule solaire » Memoire de Magister, Universite de Bechar. 2008/2009,

[12] : [http:// gloq69.free.fr/images/tpe/dopage.jpg](http://gloq69.free.fr/images/tpe/dopage.jpg)

[13]:« Les piles solaires,le composant et ces applications » Edition.Masson (1985).

[14]:A. buyers«les système photovoltaïques» guide, Canada 2002 .ARTICLE PDF.

[15] : Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07

[16] :**M<sup>me</sup>. ZAAMTA SOUAD**: « Réalisation d'un régulateur solaire à base de Microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des Accumulateurs » MIMOIRE de magister Centre Universities Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi 20 / 02 /2008.

---

[17] : M Angel .C.Pastor, «conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » Thèse de doctorat de l'Institut National des sciences Appliquées de Toulouse ,septembre 2006

[18] : Y. Pankow Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension ». Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers Décembre 2004.

[19] : <http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>.

[20] : **Bouden Abdelmalek** « Analyse optimisee de systeme de pompage photovoltaïque », Memoire de Magister 2008,Universite Mentouri de Constantine.

[21]: Anne Laburet, Michel Viloz : énergie solaire photovoltaïque 3<sup>e</sup> édition dunod paris 2006

[22]: [www.ohmeo.com/composition-panneau-PV](http://www.ohmeo.com/composition-panneau-PV).

[23]: [solarelectripower.org](http://solarelectripower.org)

[24]: F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.

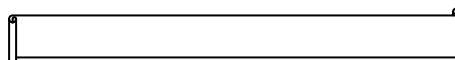
[25]: **Frank Jackson** : Planning and Installing Photovoltaic Systems Green Dragon Energy, A guide for installers, architects and engineers second edition Berlin October 2007.

[26]: C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger »,2006

[27]: [www.cmhc-schl.gc.ca/](http://www.cmhc-schl.gc.ca/)

[28]: D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003

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





*Chapitre II :*  
*Stockage de l'énergie*  
*Solaire*

**II-1-Introduction:**

Notre niveau de vie et de confort nous a habitués à disposer instantanément et facilement d'énergie. Cette disponibilité a généralement été obtenue grâce à des réseaux de transport sophistiqués (électricité, gaz naturel) ou à un stockage (principalement sous forme de carburants et, à une moindre échelle, dans des batteries électrochimiques). Si les ressources énergétiques fossiles se raréfient, il est hautement probable que nous ayons davantage recours au stockage d'énergie que ce soit sous forme thermique, chimique ou électrique (stockage stationnaire).

L'apparition de nouveaux concepts de production décentralisée d'électricité et le développement des sources renouvelables suscitent un vif intérêt pour les techniques de stockage de l'énergie.

Le stockage contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale, tout en réduisant les émissions polluantes.

Dans ce chapitre nous nous proposons d'étudier les accumulateurs électrochimiques et plus particulièrement la batterie, l'objectif étant de créer une base de connaissances sur ce type d'accumulateur et permettre une analyse pertinente de ses performances.

---

---

## II-2- Stockage de l'énergie:

Les photo-générateurs, comme on l'a vu, ne produisent de l'énergie que s'ils sont exposés à la lumière et le courant produit dépend de la valeur de l'éclairement.

- S'il y a concordance entre la présence de la lumière et le besoin d'énergie, il n'est pas nécessaire de la stocker (exemples : une calculette, un ventilateur...).

- Si l'on stocke l'énergie sous une autre forme, on peut également se passer de stockage électrique (exemple: une pompe alimentée par énergie solaire stocke l'eau dans un réservoir: la pompe fonctionnera à débit variable, en fonction de l'ensoleillement et sur une journée, ou une autre base de temps, elle aura stocké suffisamment d'eau pour les usagers).

Dans ces deux cas, on parle de fonctionnement «au fil du soleil» : il y a de la lumière, cela fonctionne ; il n'y en a plus, cela s'arrête.

Mais le plus souvent, on souhaite disposer d'énergie électrique dans l'obscurité pour de multiples raisons, et on doit alors la stocker :

- La montre ne doit pas s'arrêter la nuit (ni quand on la laisse un certain temps dans un tiroir).
- On s'éclaire plutôt quand il fait nuit.
- Une surveillance de barrage doit être active 24 h/24, ... etc.

### II-2-1 -Autonomie « sans apport solaire » :

C'est la durée pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur sans recevoir aucune charge de la part du photo-générateur. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photo-générateur. Le besoin en autonomie, dépend du type de récepteur et de son usage.

Pour une montre solaire, on peut décider de garantir un fonctionnement d'un mois dans l'obscurité (au-delà, il faudra la remettre à l'heure).

- L'autonomie sans apport solaire sera donc de 30 jours.

Pour une alimentation de haute sécurité en extérieur, on choisira de maintenir 15 jours de fonctionnement dans la batterie pour pallier une succession de journées mal ensoleillées (ce n'est qu'un exemple, cela dépend bien sûr du climat).

L'autonomie sans apport solaire sera donc de 15 jours.

➤ Pour un usage domestique de week-end, on se contentera de 3 jours si c'est la durée maximale de séjour des occupants. L'autonomie sans apport solaire sera alors de 3 jours.

➤ Pour une calculatrice, même si elle fonctionne au fil du soleil, il faut fournir un pic de courant au démarrage des circuits, on pourra alors mettre un condensateur qui se chargera hors des périodes d'utilisation et fournira ce courant plus élevé sur une très courte durée. Dans ce cas, l'autonomie sans apport solaire sera de quelques microsecondes

En général, pour un usage extérieur, la batterie doit faire fonctionner le système en cas de successions de journées mal ensoleillées.

### **II-2-2-Principe du couplage photo-générateur batterie :**

Certains pensent qu'il faut utiliser l'énergie issue directement du photo-générateur quand la lumière est présente, et «basculer» sur le stockage dans l'obscurité : c'est inutile.

Le plus rationnel est de monter le photo-générateur, la batterie, et le récepteur en parallèle avec des composants de régulation. Ainsi, la batterie sera le «réservoir d'énergie», que l'on remplira d'un côté par le photo-générateur et videra d'un autre par le récepteur. Ces deux événements peuvent être simultanés ou non, peu importe, pourvu que la batterie ne soit jamais déchargée.

Autre avantage de ce montage photo-générateur/batterie/récepteur en parallèle.

La batterie jouera le rôle de régulateur de tension pour alimenter le récepteur ; car le photo-générateur, n'est en fait qu'un générateur de courant qui peut travailler sur une large plage de tension (de  $0\text{ V}$  à sa tension de circuit ouvert). La batterie impose la tension du montage parallèle et stabilisera ainsi la tension fournie au récepteur, ce qui est un avantage évident pour certains d'entre eux. Un tube fluorescent en  $12\text{ V}$  continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible ( $<10\text{V}$ ).

### **II-2-3- Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système :**

Les règles de montage série et parallèle s'appliquent également aux accumulateurs. Deux batteries de  $100\text{ Ah}$  de  $12\text{ V}$  en série donneront  $100\text{ Ah-24 V}$ , et les mêmes en parallèle donneront  $200\text{ Ah-12 V}$ . Mais pour les montages en parallèle, il est impératif que les deux batteries soient des «sœurs jumelles» (même capacité), sinon on risque de voir la plus faible dépérir au profit de l'autre: sa résistance interne augmentera et la batterie «en meilleure santé» prendra la plus grande part du courant de charge, ce qui ne fait qu'accentuer le déséquilibre.

---

---

On préférera donc les montages sériels (addition de tensions), plutôt que les montages en parallèle (addition de capacités) [1].

#### **II-2-4- Principales caractéristiques des accumulateurs:**

##### **a)-Capacité en Ampère heure :**

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de **200 Ah** peut fournir **200 A** pendant une heure, ou **50 A** pendant **4 heures**, ou **4 A** pendant **50 heures**.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

**b)-Rapports de chargement et déchargement :** Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

**c)-Température :** Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement.

Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [2].

**d)- La durée de vie :** Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [3].

**e)-Profondeur de décharge :** La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

**f)-La tension d'utilisation :** C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

**g)-Le rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

**h)-Le taux d'autodécharge** : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

### II-3- Technologies et Types d'accumulateurs :

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont [4].

Le choix de la technologie d'accumulateur va dépendre du coût d'investissement (en €/kWh et en €/kW) et de la durée de vie des batteries dans les conditions de fonctionnement correspondent à l'application choisie. Les coûts de chaque technologie sont présentés sur la Figure (II-1) tandis que la durée de vie et les rendements sont illustrés sur la Figure (II-2)

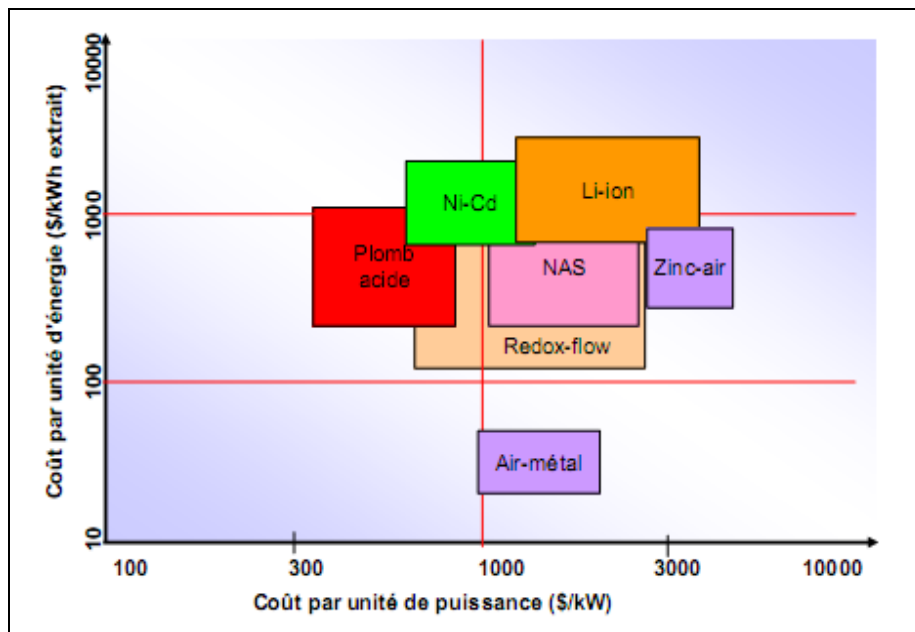


Fig. (II-1) : Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques [5]

Les batteries de technologie Plomb acide sont actuellement les plus utilisées pour les applications photovoltaïques. Elles sont principalement avantagées par leurs faibles coûts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées. La technologie Nickel-Cadium (Ni-Cd) présente un

cout plus élevé que les batteries au Plomb, pour une durée de vie supérieure mais un rendement plus faible. Des efforts sont nécessaires pour faire du Ni-Cd une technologie concurrentielle pour l'application photovoltaïque. La technologie Lithium-ion (Li-ion) s'annonce comme la concurrente la plus prometteuse. Sa durée de vie et son rendement sont parmi les meilleurs des accumulateurs électrochimiques. Le cout est encore important par rapport à la technologie Plomb mais une baisse significative dans les prochaines années est attendue de sorte que le Li-ion devienne la technologie la plus intéressante pour les applications PV.

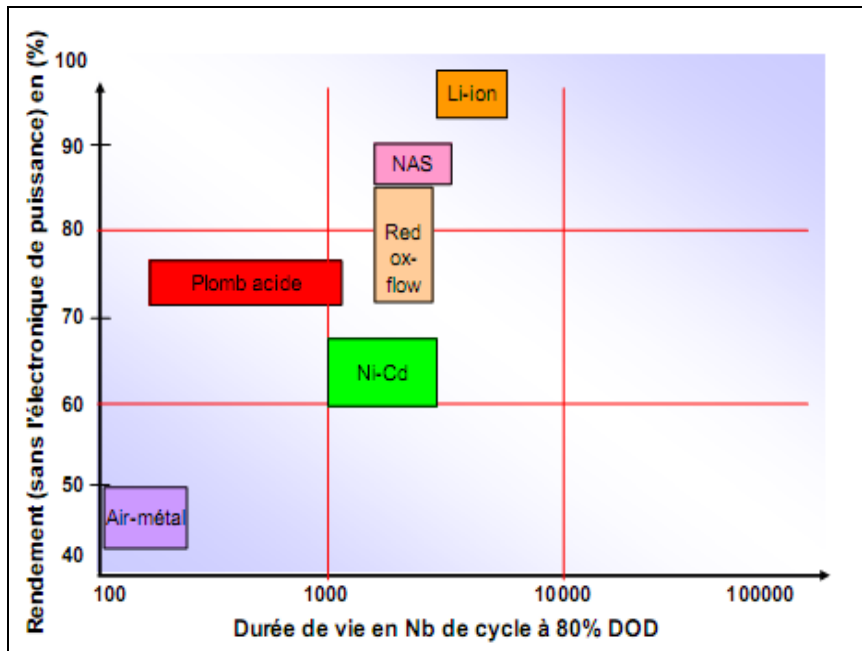


Fig. (II-2) : Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries [5]

### II-3-1-Les différents types de batteries au plomb :

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vented Batteries) et les batteries scellées (Valve Regulated Lead Acid Batteries).

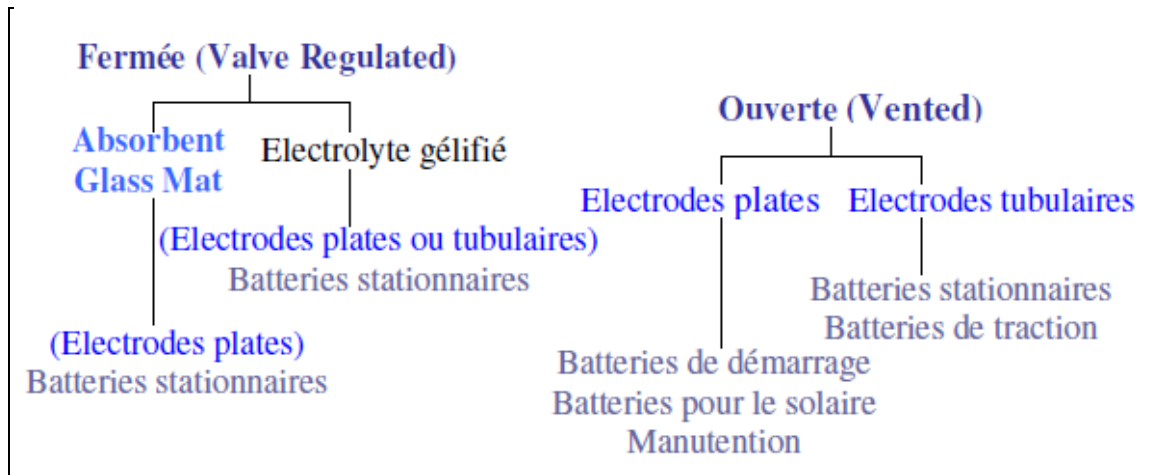


Fig. (II-3): les différents types de batteries au plomb [6].

#### a) Les accumulateurs au plomb «ouvert» :

Pour ce type de batteries, la cellule n'est pas fermée. Elle perd donc de l'électrolyte (composé typiquement de 65% d'eau et 35% d'acide sulfurique) [7].

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

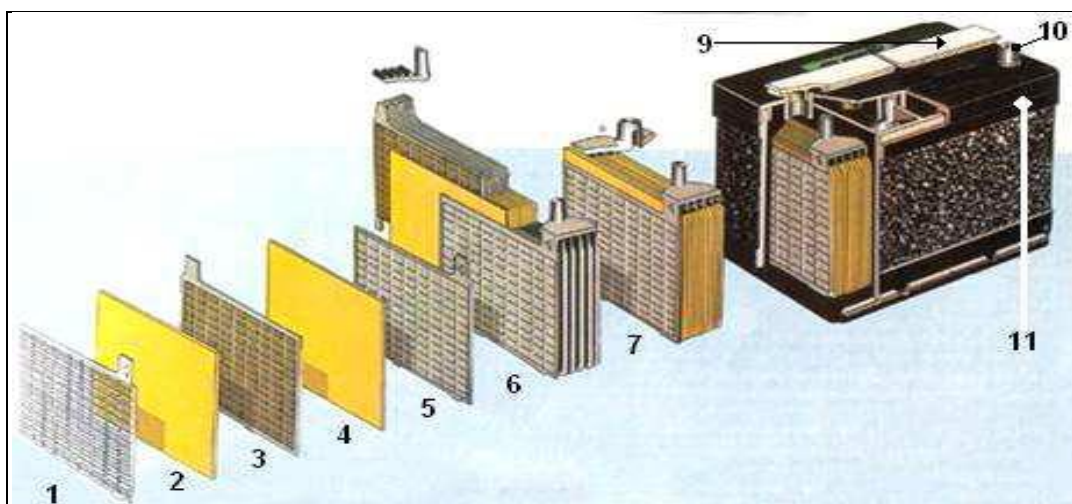


Fig. (II-4) : Construction d'une batterie monobloc [8].



---



---

1 : Grille	5.Barrette	9 : Rampe de bouchons
2 : Séparateur	6 : Faisceau négatif	10 : Borne
3 : Plaque positive.	7 : Élément complet	11.bac.
4 : Plaque négative	8 : Pont	

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie [8].

Peut être l'alliage est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge. Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb- Antimoine sont de type de "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées.

Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont des manchons, ouverts par en haut, qui sont uniquement placés sur les plaques positives.

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie.

Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir.

Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conduction nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%.(pour plomb- Acide)

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6.

Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte.

Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime.

**b) Principe de fonctionnement :**

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge ; on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale [9] :

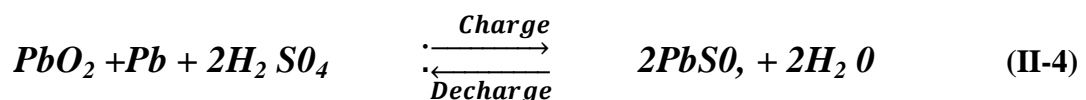
Electrode Positive:



Electrode negative:

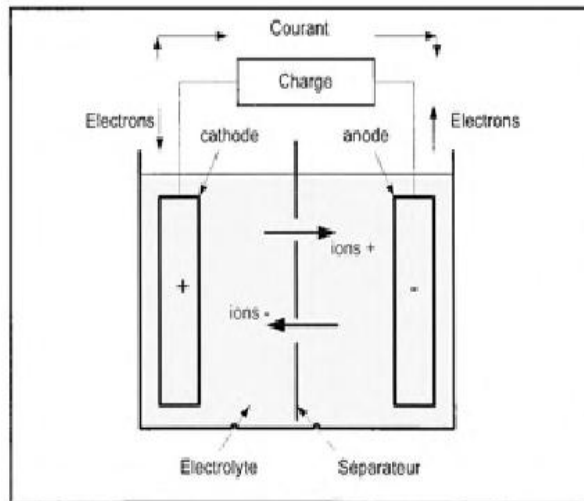


Reaction:



### c) Processus de décharge :

Quand l'accumulateur est complètement chargé, l'anode possède un surplus d'électrons et la cathode un manque d'électrons. Le déplacement des électrons à travers une charge, connectée entre les deux électrodes, va créer ainsi le courant comme le montre la figure (II-5). Lorsque les deux électrodes auront le même nombre d'électrons, l'accumulateur ne débitera plus de courant, ce qui indique la fin de la décharge .

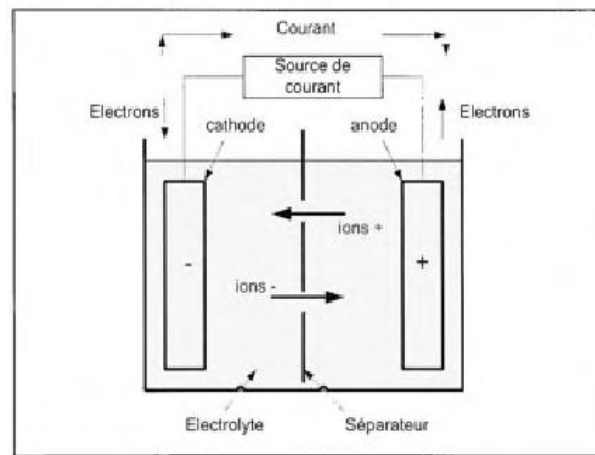


*Fig. (II-5) : cellule électrochimique (charge)*

### d) Processus de charge :

La charge est le processus inverse de la décharge. L'accumulateur est chargé par un courant constant, ce qui va causer le déplacement des électrons de l'anode (borne positive dans ce cas) vers la cathode (borne négative) .

. La figure (II-6) illustre le processus de charge d'une cellule électrochimique [10] .



*Fig. (II-6) : cellule électrochimique (décharge)*

#### **e) Connexion d'une batterie :**

La batterie est l'élément le plus fragile d'une installation photovoltaïque ou éolienne. C'est également l'un des organes essentiel à son bon fonctionnement. Il est donc très important de bien choisir sa batterie et d'en prendre soin, notamment lors du montage.

Avant d'être raccordées, les batteries doit être installées à leur emplacement définitif. Pour les branchements, il faut se munir de câbles électriques adaptés à leur puissance: la section du câble doit être plus ou moins grande en fonction de l'intensité pour limiter les pertes par « effet de Joule ». Il est recommandé d'intégrer un fusible externe entre la batterie et le régulateur, et/ou entre la batterie et les consommateurs pour empêcher tout risque de court-circuit. Ce fusible devra être au plus près des pôles de la batterie.

Si les batteries sont plusieurs et qu'elles nécessitent un branchement en série ou en parallèle, il faut les connecter entre elles avant tout. Elles pourront ensuite être raccordées au régulateur (on connecte toujours les batteries en premier, avant les modules photovoltaïques/éoliennes ou les consommateurs) [11].

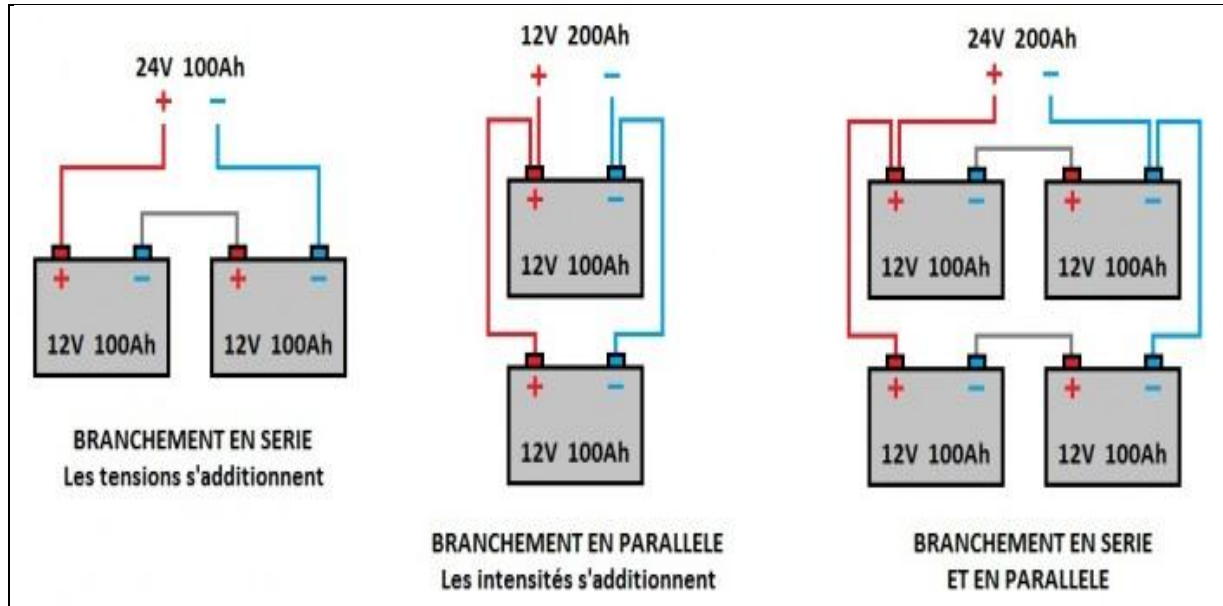


Fig. (II-7) : Connexion des batteries

### II-3-2-Les batteries au lithium :

L'utilisation et la diversité sans cesse grandissantes des applications électriques ont conduit au développement de nouvelles technologies de stockage.

Les efforts menés en matière de recherche et de développement ont permis de voir apparaître de nouvelles technologies de stockage électrochimique comme les systèmes Redox, les systèmes de stockage via l'hydrogène (développé dans le chapitre suivant), ou les batteries au lithium, développées dans ce paragraphe.

L'élément lithium présente des caractéristiques physico-chimiques intéressantes :

- fort potentiel redox :  $E_{Li/Li^+} = -3,04 \text{ V}_{/ENH}$  ;
- masse molaire faible :  $M = 6,94 \text{ g/mol}$  ;
- capacité massique =  $3,87 \text{ Ah/g}$ .

Utilisé comme matière active à l'anode, il permet d'obtenir des batteries à fort potentiel énergétique. Mais sa réactivité avec le milieu ambiant (notamment avec l'air) en fait un matériau difficile à manipuler à l'état métallique.

Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère [12].



Fig. (II-8) : Accumulateur lithium de Varta [13].

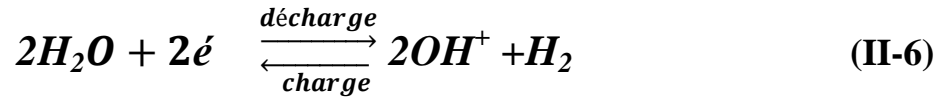
### II-3-3-Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd) :

Ils offrent des performances supérieures au plomb en terme de capacité et durée de vie. Ils demandent cependant une alimentation de charge très propre et leur prix est nettement plus élevé que les batteries plomb (environ 1,5 fois). [14].



### II-3-4-Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H2) :

Depuis 1964, les piles H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> sont couramment utilisées dans les applications spatiales (satellite et navette). Sur les satellites, ils servent d'accumulateur pour stocker le surplus d'électricité fournit par des panneaux solaires pour le restituer lors des éclipses (grand nombre de cycles). Cet accumulateur est très supérieur au Ni-Cd car il offre une très grande résistance au cyclage (plus de 10000 cycles avec des décharges à 40% de la capacité). Les ions actifs pour les échanges sont les ions hydrogène H<sup>+</sup> et l'électrode positive est à base d'hydroxyde de nickel, analogue à celle utilisée dans les accumulateurs NiCd. Durant la décharge, l'hydrogène se recombine en eau avec l'oxygène de l'hydroxyde de nickel. Mais durant la recharge, il se produit un fort dégagement d'hydrogène sous forme gazeuse et la pression à l'intérieur de la batterie peut atteindre 70 bars, d'où son allure de bonbonne de gaz. Ce type d'accumulateur conserve de bonnes caractéristiques à basse température (encore 400Wh/kg à -18°C avec un nombre de cycle jusqu'à 30000). Certains modèles sont capables de fournir 500Wh/Kg pour des démarrages d'avions à réaction.



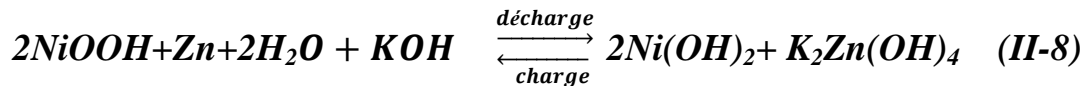
### II-3-5- Les accumulateurs Nickel-Metal-Hybride (Ni-MH) :

Ils sont une forme dérivée des batteries Nickel-Hydrogène. La batterie Ni-MH recombine les gaz comme l'hydrogène sur des alliages métalliques pour former des oxydes. Ils offrent des performances encore supérieures au Ni-Cd (capacité environ 1,8 fois supérieure) mais son prix est encore dissuasif pour les applications industrielles habituelles [15].



### II-3-6- Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn) :

Ce couple a l'avantage d'être moins coûteux que le Ni-Cd et d'avoir une tension d'utilisation 25% plus élevée. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage (environ 600 à 1000 cycles).



### II-3-7- Les accumulateurs Zinc-halogènes :

Les avantages des électrodes en nickel sont un coût relativement faible, sa légèreté et produit potentiel élevé. Pour améliorer le cycle de vie de ce type d'accumulateur, des études ont conduit au remplacement de l'électrolyte alcalin par une solution acide. Les couples les plus prometteurs sont Zinc- Chlore (Zn-Cl<sub>2</sub>) et Zinc-Brome (Zn-Br<sub>2</sub>). Ce dernier donne une FEM de 1,9V. Ce type de pile est adapté au régime de décharge soutenu sur un faible intervalle de temps [16].

### II-3-8- Les piles à combustibles :

On parle de pile à combustible lorsqu'il y a consommation d'un élément (d'une ou des deux électrodes), ce qui rend le phénomène irréversible (électrode comburante et combustible). La charge de la pile est réalisée en remplaçant les éléments usés (électrode comburante) et le combustible. Il est cependant possible de remplacer une ou les deux électrodes par des gaz. Les électrodes sont alors composées d'alliage inattaquable plongé dans

l'électrolyte. Ce sont des concurrents sérieux pour les accumulateurs où la recharge s'effectue par inversion des phénomènes électrochimiques [17]



**II-4- Différents couples électrochimiques les plus utilisés :**

Type	Energie massique Wh/kg	Energie volumique Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en pointe (massique) en W/kg	Durée de vie de (nombre recharges)	Autodécharge par mois
<b><u>Plomb/acide</u></b>	30 - 50	75 - 120	2,25 V	700	400 - 800	5 %
<b><u>Ni-Cd</u></b>	45 - 80	80 - 150	1,2 V		1 500 - 2 000	> 20 %
<b><u>Ni-MH</u></b>	60 - 110	220 - 330	1,2 V	900	800 - 1 000	> 30 %
<b><u>Ni-Zn</u></b>	70 - 80	120 - 140	1,65 V	1 000	> 1 000	> 20 %
<b>Na-NiCl<sub>2</sub> (ZEBRA)</b>	120	180	2,6 V	200	800	→ 100 % (12 %/jour)
<b><u>Pile alcaline</u></b>	80 - 160		1,5 - 1,65 V		25 à 500	< 0,3 %
<b><u>Li-ion</u></b>	90 - 180	220 - 400	3,6 V	1 500	500 - 1 000	10 %
<b><u>Li-Po</u></b>	100 - 130		3,7 V	250	200 - 300	10 %
<b><u>Li-PO<sub>4</sub> (lithium phosphate)</u></b>	120 - 140	190 - 220	3,2 V	800	2 000	5 %
<b><u>LMP (lithium métal polymer)</u></b>	110	110	2,6 V	320		
<b><u>Li-Air</u></b>	1 500 - 2 500		3,4 V	200		
<b><u>Ni-Li</u></b>	935		3,49 V			

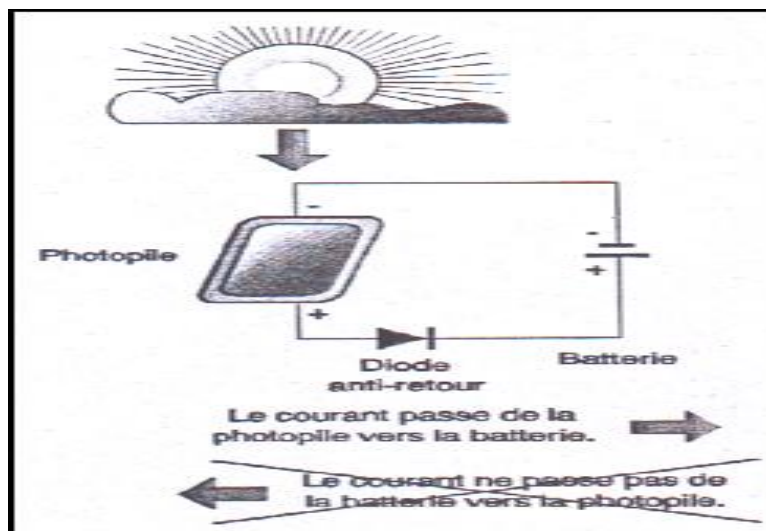
**Tableau (II-1) : Résumé des différents couples électrochimiques les plus utilisés [18] .**

## II-5- Contrôle de charge :

### II-5-1- Les diodes anti retour :

Le courant circule naturellement du point de tension le plus fort vers le plus faible.

Lorsque la batterie est en période de charge ou déjà chargée, la tension de la batterie a tendance à dépasser la tension délivrée par le photo-générateur. Le courant passerait alors de la batterie vers le photo-générateur, si on ne mettait pas une diode qui bloque le passage du courant dans ce sens. Cela pourrait l'endommager. Cette diode au rôle d'une valve qui évite la décharge de la batterie dans le photo-générateur lorsque la lumière est faible donc la tension du photo-générateur est basse.



*Fig. (II-8) : Principe d'une diode anti-retour.*

Les batteries ont, la plupart du temps, en extérieur tout au moins, une durée de vie inférieure aux photo-générateurs. Il faut donc tout faire pour les «ménager» afin qu'elles durent le plus longtemps possible, et surtout faire en sorte qu'aucun événement ne leur soit fatal.

- Durée de vie des panneaux solaires : 10-20 ans.
- Durée de vie des batteries: 2 à 10 ans (voire 15 ou 20 ans pour les plus haut de gamme).

---

---

### II-5-2- Fonctions d'un régulateur de charge :

L'objectif d'un régulateur de charge est de protéger la batterie pour lui assurer une meilleure durée de vie, pour que l'application autonome le soit pendant longtemps.

Améliorer la durée de vie d'une batterie plomb (les plus utilisées), c'est empêcher :

- la surcharge: que la tension dépasse un certain seuil.
- la décharge profonde: que la batterie soit vidée de plus de **90 %** de sa charge.

On réalise ces deux fonctions avec un régulateur charge/décharge connecté avec les panneaux, la batterie et l'utilisation. Quand la tension aux bornes de la batterie atteint **14,5 V** (seuil haut typique pour une batterie au plomb de **12 V** nominale), le régulateur coupe la liaison avec le panneau, ce qui implique que la batterie n'est plus chargée. Cette charge est rétablie vers **13,5 V**.

De même, quand la tension atteint **11,5 V** (seuil bas typique pour **12 V**), le régulateur coupe la liaison avec le récepteur, ce qui ne permet plus son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de **12,5 V**. Il rétablit alors l'utilisation.

Notons que la protection surcharge est presque toujours indispensable, car une alimentation solaire est excédentaire en énergie une partie du temps (l'été surtout). Il n'en est pas de même de la protection décharge, qui est davantage une sécurité en cas d'incident en effet, si le dimensionnement est bon et les composants bien adaptés, la batterie ne doit pas entrer en décharge profonde. Si cela se produit, ce ne peut être qu'accidentel.

On mettra une protection décharge lorsqu'il y a un risque de surconsommation (appareil laissé allumé par erreur, par exemple), ou une batterie très onéreuse. Dans ce cas, on préférera interrompre l'utilisation plutôt que d'endommager la batterie par décharge profonde en cas d'incident.

En pratique, ces fonctions anti retour et régulation de charge sont réalisées par des boîtiers électroniques avec une logique à relais ou à transistors. Ils peuvent être de type shunt (pour les basses puissances) ou de type série (pour les puissances élevées).

Entre autres caractéristiques, ils sont déterminés par le courant d'entrée (courant maximal des panneaux) et le courant de sortie (courant maximal de l'utilisation) qu'ils supportent.

S'ils ne comportent pas de protection décharge, ils sont appelés limiteurs de charge ou régulateurs de surcharge, se placent entre le panneau et la batterie, et donc seul le courant du panneau solaire conditionnera leur ampérage.

La figure suivante montre le principe d'un régulateur charge/décharge de type série.

Ce système mesure en permanence la tension batterie et agit en conséquence, selon son état de charge [19].

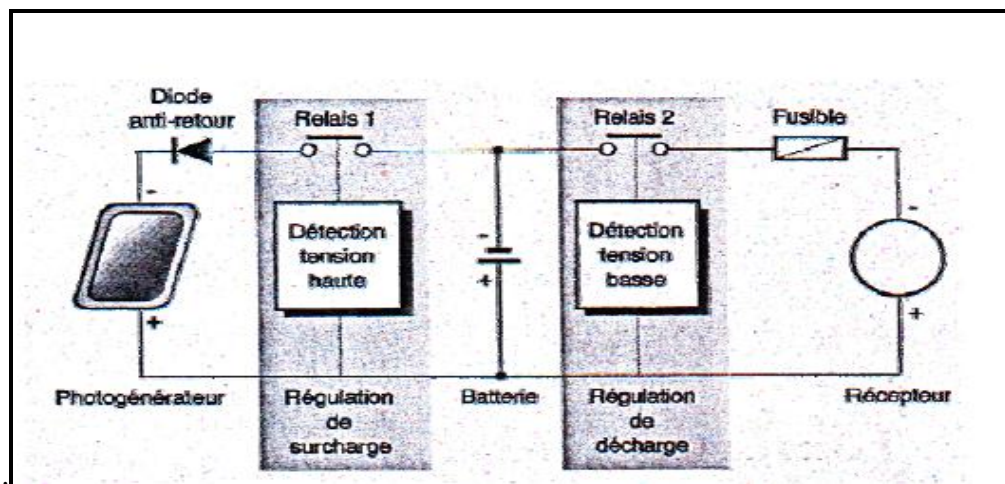


Fig. (II-9) : principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge [19].

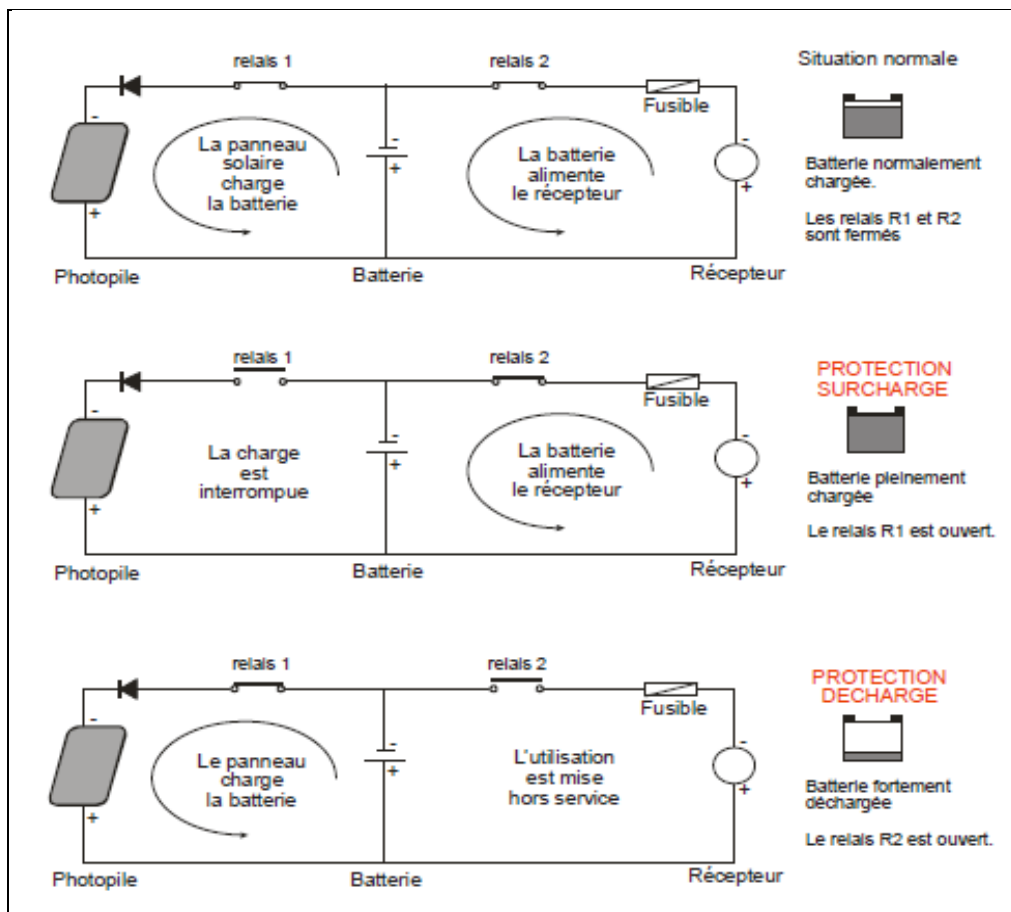


Fig. (II-9) : régulateur charge/décharge [19].

## II-6- calcule d'un système avec stockage :

Si l'application doit fonctionner en direct sans stockage, on prendra un photo générateur dont la puissance maximale à l'éclairement de travail correspond à la puissance de l'appareil.

### 2.8.1-Détermination de la capacité de l'accumulateur :

Pour déterminer la capacité de l'accumulateur, multiplier la consommation électrique en Ah de l'application par la durée d'autonomie désirée, et appliquer un coefficient de sécurité:

$$C (Ah) = \frac{\text{Conso du système 24h (Ah)} * \text{Durée d'auto.en jours}}{0.6}$$

Le coefficient de 0.6 est une valeur typique, qui dépend énormément de la technologie de l'accumulateur, et surtout de la réduction de sa capacité de stockage aux températures basses. Introduire ce coefficient revient à dire que la capacité réellement disponible sur le terrain est à tout moment égale à 60 % de la capacité nominale. On appelle capacité utile cette capacité réduite [14]:

$$\text{Capacité utile} = \text{Capacité nominale} * \text{pourcentage utile}$$

**Conclusion :**

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. C'est la raison pour laquelle nous avons essayé de dégager, de façon critique, un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de coût qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un supercondensateur.

---

---

### **Bibliographie :**

- [1]: **Bendjellouli Zakaria** « Contribution a la modelisation d'une cellule solaire »  
« Memoire de Magister2008/2009, Universite de Bechar
- [2]: **N. Achaibou, A Malek , N Bacha** « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [3]: **I. Tsuda, K . Kurokawa ,K.Nozaki**, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 –508,1994.
- [4]: **A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef** « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin »Rev .Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [5]: « Technologies and comparions », Energy Storage Association,  
<http://electricitystorage.org/>, 2007
- [6]: **Ter-Gazarian A**, “Energy storage for power systems”, ISBN 0863412645, Peter Peregrinus Ltd., 1994
- [7]: **A. Ould Mahmoud** « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixe »  
These de doctorat Université Cheikh Anta Diop de Dakar2008
- [8]: **Dirk Uwe Sauer**, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.
- [9]: **Belhadj Mohammed** « Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister2007/2008, Universitaire De Bechar.
- [10]: **Linden. D. & Reddy, Thomas B.** *Handbook of Batteries*. 3<sup>^</sup> Edition. McGraw-Hill,1200 p.



---

---

[11]: [www.arebor-energie.fr/encyclopedie](http://www.arebor-energie.fr/encyclopedie)

[12]: **Julien LABBÉ** :hydrogène L'électrolytique comme moyen de stockage D'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés .l'école des mines de paris .décembre 2006 .

[13]: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Lithium-Ionen-Accumulator.jpg>

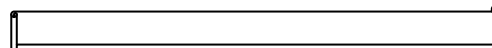
[14]: BIBLIOGRAPHIE PDF CHAPITRE 5 THESE *Le stockage de l'énergie : l'accumulateur électrochimique* .

[15]: **JONES R.***Bringing Nickel-Hydrogen Down to earth* Batteries International Avril 1993

[16]: **WROBLOWA H.S.***Modern aspects of electrochemistry* New York, Plenum Press, Vol. 16 , 1985 Power sources 8, 1981

[17]: **LINDEN D.***HANDBOOK OF BATTERIES AND FUEL CELLS* McGraw-Hill, New York ;

[18]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur\\_%C3%A9lectrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique)



***Chapitre III :***  
***Modélisation et Commande***  
***Des Systèmes***

**III -1- Introduction :**

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle d'un générateur photovoltaïque, le modèle de l'hacheur et du système de stockage (batterie).

L'objectif de cette étude consiste à obtenir par simulation, les caractéristiques dynamiques de la cellule photovoltaïque, l'hacheur et la batterie sous l'environnement Simulink/Matlab.

**III -2 MODELE DE RAYONNEMENT SOLAIRE :****III -2-1 Rayonnement solaire sur un plan horizontal :**

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

**a) Rayonnement direct :**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Après des mesures pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct.

$$S_H(t)=1369 .C(j).Sin[h(i) .exp(\frac{-T_L}{0.9 \times 9.41 \times M(i)})] \quad (\text{III -1})$$

Avec :

$S_H$  : Flux direct horizontal.

$C(j)$  : La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$  : Hauteur du soleil.

$T_L$  : Facteur de trouble.

$M(i)$  : Nombre d'aire masse.

**b) Rayonnement diffus :**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subimultiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par l'heure i est statistiquement donné par.

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} .C(j) - Sin[h(i) - 2] .exp[-0.5 .log^2(\frac{T_c}{22.M(i)^{-0.65}})] \quad (\text{III -2})$$

**c) Rayonnement réfléchi :**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...).Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo ( $\xi$ ) :  $0 \leq \xi \leq 1$

**d) Rayonnement global ( $\phi_G$ ) :**

un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [1]:

$$\phi_G = S + D + R \quad (\text{III - 3})$$

### III -3 LA MODELISATION DU CHAMP PHOTOVOLTAIQUE :

#### III -3-1 la modélisation d'une cellule solaire :

##### a- Cas idéal :

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme [2]:

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0 (e^{qV/KT} - 1) \quad (\text{III - 4})$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

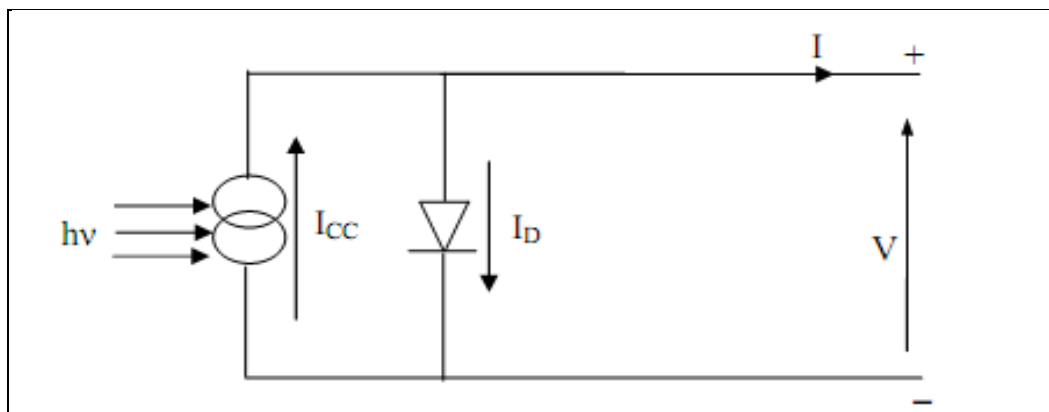


Fig. (III - 1) : Cellule solaire idéale

$I, V$  : Courant et tension fournis par la cellule.

$I_D$  : Courant de diode donnée par [3]:

$$I_D = I_0 (e^{qV/KT} - 1) \quad (\text{III - 5})$$

##### b- Cas réel :

La figure suivante (figure II-2) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série  $R_s$ . la première diode D1 décrit les propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde D2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [4].

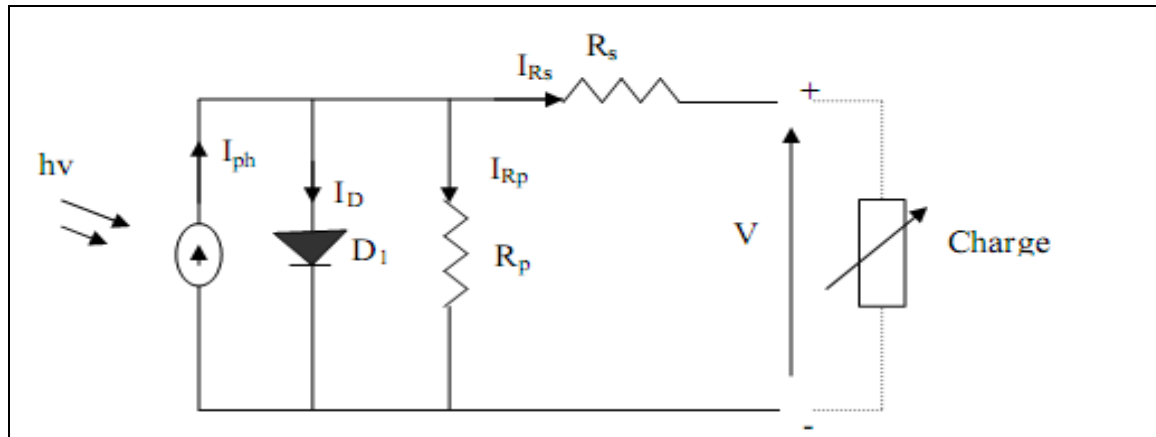


Fig. (III - 2) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation [5]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \left( e^{C_1(V+R_S I)} - 1 \right) \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (\text{III -6})$$

avec :

$$C_1 = \frac{q}{A K T_c}$$

**A** : le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 3$ ).

**I<sub>ph</sub>** : photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

**I<sub>0</sub>** : courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

**R<sub>sh</sub>** : résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

**R<sub>s</sub>** : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmique et de contact au niveau des connexions des cellules.

**q** : la charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

**K** : constant de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

**T<sub>c</sub>** : température de jonction (K).

La figure montre la caractéristique Courant- tension pour une cellule photovoltaïque .ainsi, si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique ( $I_c - V_c$ ) de la cellule avec la courbe de la charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente  $1/R$ . Par conséquent, si la résistance  $R$  est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe. Le courant  $I_c$  varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance  $R$  est grande, la cellule fonctionne dans la région CD. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant  $I_c$ : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement.

Au contraire, dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixes d'éclairement et de température.

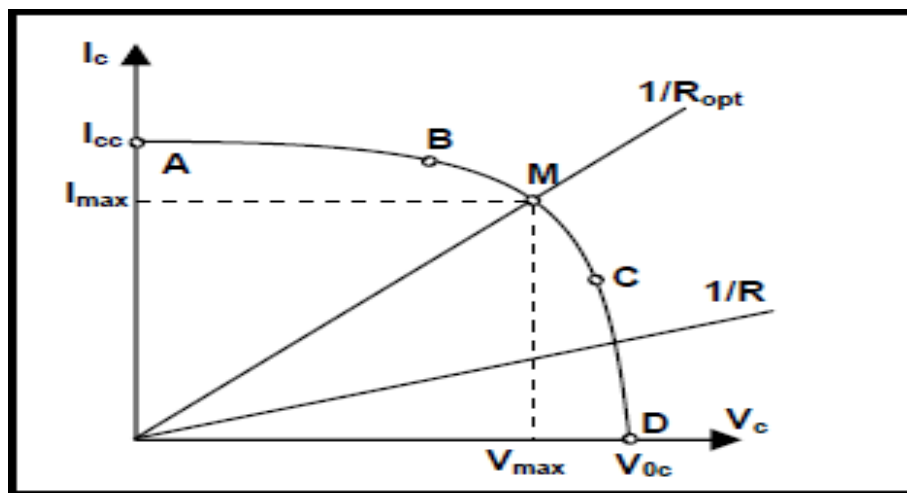


Fig. (III - 3) : caractéristique  $I_c(V_c)$  d'une cellule photovoltaïque

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux, présentés aussi dans la figure (II-3).

- **Le courant de court-circuit** :  $I_{CC} = I_{ph}$  est proportionnel à l'éclairement et présente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court-circuit ( $V_c = 0$ )

- **La tension à vide** : correspond à la chute de tension sur la diode quand elle est traversée par le photocourant  $I_{Ph}$  ( $I_D = I_{Ph}$ ),  $I_C = 0$ . Cette tension peut être exprimée mathématiquement par :

$$V_{tv} = \frac{mKT_e}{e} \ln\left[\frac{I_{Ph}}{I_0}\right] = V_t \ln\left[\frac{I_{Ph}}{I_0}\right] \quad (\text{III -7})$$

$$\text{Ou : } V_t = \frac{mKT_e}{e}$$

$V_t$  est la tension thermique et  $T_c$  est la température absolue de la cellule .

- **Le point de puissance Maximale** : est le point de fonctionnement  $M (V_{max}, I_{max})$  dans la figure , pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale [6].

### III -3-2 groupement des cellules solaires :

#### III -3-2-1 Module photovoltaïque :

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante :

$$I_{module} = I_{Ph} - I_0 \exp\left[\frac{q}{nAKT} (V + R_{se}I) - 1\right] - \frac{V + IR_{se}}{R_{pe}} \quad (\text{III -8})$$

Avec  $R_{se}$  et  $R_{pe}$  résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = n \cdot R_s \quad \text{et} \quad R_{pe} = n \cdot R_p$$

#### III -3-2-2 Panneau photovoltaïque :

La modélisation d'un panneau composé de  $N_s$  modules en série et  $N_p$  modules en parallèle est :

$$I_{panneau} = N_p \cdot I_{Ph} - N_p \cdot I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{nAKTN_s} (V + R_s I_{mod}) - 1\right) \right] - N_p \frac{I_{mod} R_{se}}{R_{pe}} \quad (\text{III -9})$$

Avec :  $R_{se}$  et  $R_{pe}$  résistance série et parallèle du module défini par [7]:

$$R_{se} = n \cdot (N_s / N_p) \cdot R_s \quad \text{et} \quad R_{pe} = n \cdot (N_p / N_s) \cdot R_p$$



---



---

**III -4 Modèle de la température :**
**a) Température de jonction :**

La température du jonction  $T_c$  de la cellule est donnée par la relation suivant [9] :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} E_G \quad (\text{III -10})$$

Avec NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature ) et  $T_a$  est La température ambiante.

**b) Température ambiante :**

Le modèle de la température ambiante est représenté grâce aux données de température maximale et minimale de la journée .Nous supposons que la température maximale se produit toujours deux heures après midi et la température minimale quand il commence à faire jour (levé de soleil). Entre ces deux points extrêmes ,une fonction a été utilisée pour caractériser la variation de cette température.

Le profil journalier de température ambiante est déterminé à partir des températures minimale et maximale de la journée, cette température s'exprime à une heure  $TL$  de la journée par l'équation suivante [10] :

$$T_a = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos \left[ \frac{14 - TL}{14 - TL_L} \pi \right] + T_{moy} \quad (\text{III -11})$$

$TL_L$  : l'heure du lever de soleil et  $T_{moy}$  : la température moyenne journalière

$T_{max}$  : la température maximale journalière et  $T_{min}$  : la température minimale journalière

cette relation valable avec les grandeurs moyennes mensuelles d'un site.

**c) Variation du courant de saturation :**

Le courant de saturation  $I_0$  dépend de la température de jonction et peut être exprimé par La relation suivant [10] :

$$I_0 = A_0 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_c}\right) \quad (\text{III -12})$$

Pour le silicium monocristallin  $A_0 = 2.110 \cdot 10^3$

**d) Variation du courant court circuit :**

La variation de courant de court-circuit  $I_{cc}$  dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante [10] :

$$I_{CC} = K_1 \cdot G \cdot [ 1 + K_2(G - G_0) + K_3(T_C - T_0) ] \quad (\text{III -13})$$

Avec :

$G_0$  : l'éclairement de référence (**1000 w/m<sup>2</sup>**)

$T_0$  : la température de référence (**298 K**)

$K_1, K_2$  et  $K_3$  sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

**e) Variation de la tension à circuit ouvert :**

La variation de la tension de circuit ouvert dépend de la température du module et de l'éclairement ,elle donnée par l'équation suivant [10] :

$$V_{CO} = V_{CO0} + \beta \cdot \Delta T + \alpha (G - G_0) \quad (\text{III -14})$$

Avec :

$V_{CO}$ : la tension à circuit ouvert de référence (V).

$\alpha$  : coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température (A/C°).

$\beta$  : coefficient de variation de la tension de court circuit en fonction de la température (V/C°).

$\Delta T$  : la variation de la température (C°).

**III -5 SYSTEME DE CONVERTESSEUR :****III -5-1 convertisseur continu – continu (hacheur) :****III -5-1-a hacheur dévolteur :**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et en série avec la source figure II-8.b et une diode de roue libre, [11]. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $DT$ , avec :

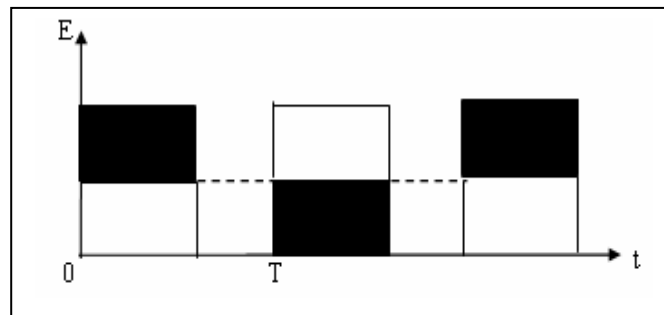
$D$ : est appelé rapport cyclique, et compris entre  $0$  et  $1$

Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de  $DT$  à  $T$ .

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{Ch} = DE \\ I_{Ch} = (1/D).I \end{cases} \quad \text{(III-15)}$$

Avec :  $D = \frac{t_f}{T}$  ,  $0 < t < t_f$  .



*Fig. (III - 4) : Tension de sortie.*

**III -5-1-b hacheur survolteur :**

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, voir figure. (III-5-a).

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance  $R$  pendant une durée  $t = DT$  bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.

De 0 à  $t_f$   $V_{Ch} = 0, i_{ch} = 0$

De  $t_f$  à T  $V_{Ch} = R \cdot i_{ch} = R \cdot I_{ch}$

$$\begin{cases} V_{ch} = E \left( \frac{1}{1-D} \right) \\ I_{ch} = (1-D) I \end{cases} \quad \text{(III -16)}$$

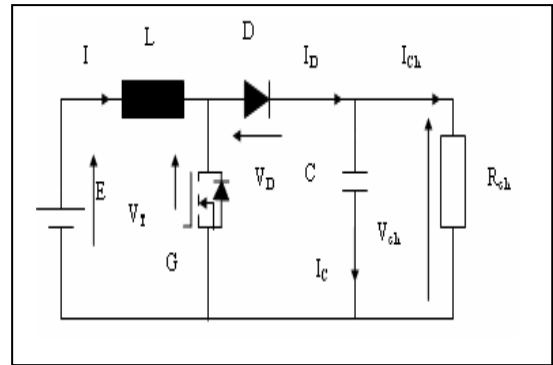
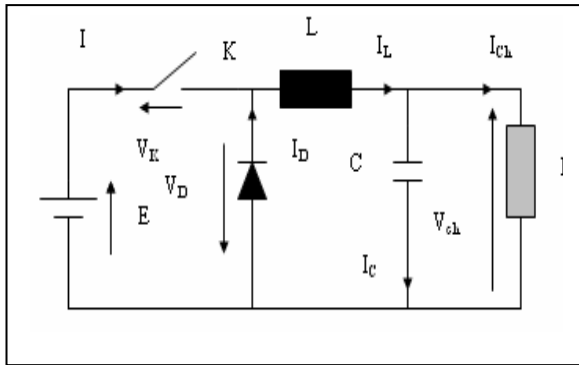


Fig. (III – 5-a) : Hacheur survolteur

Fig. (III –5-b) : Hacheur dévolteur.

**III -5-2 convertisseur continu-alternative :**

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à la l'onduleur à celle entrante. Cette caractéristique est représentée par la onction [12] :

$$\eta_o = f(P_{ch}) \text{ ou encore } \eta_o = f(\text{taux de charge})$$

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge. Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée.

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV. De tels dispositifs devraient délivrer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible.

Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. Le modèle de rendement se traduit par la relation empirique suivante [13] :

$$\eta_{ond} = a \cdot (1 - \exp(b \cdot \tau)) \quad (\text{III -17})$$

Où :

**a** et **b** sont des constantes (  $a = 0,9559$  ;  $b = -609164$  )

$\tau$  : Taux de charge, donnée par :  $P_{Ch} / P_n$ .

$P_n$  : puissance nominale de l'onduleur.

$P_{Ch}$  : puissance à la sortie de l'onduleur.

### III -6- Modélisation de stockage :

Actuellement, la technologie la plus largement utilisée pour les applications photovoltaïques est la technologie au Plomb (Pb). C'est encore la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée. Cependant, les nouvelles technologies, et plus particulièrement le Nickel-Cadium (Ni-Cd) et le Lithium-ion (Li-ion), proposent de meilleures performances pour moins de contraintes, ce qui en fait des concurrentes de plus en plus sérieuses au fur et à mesure que leurs coûts diminuent [14].

.Nous présentons ici le modèle d'un accumulateur au Plomb la plus utilisée pour les applications photovoltaïques.

#### III -6-1- Modélisation du stockage électrochimique :

##### ➤ Le modèle électrique simple de la batterie

Le modèle électrique simple comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne ( $R_s$ ).

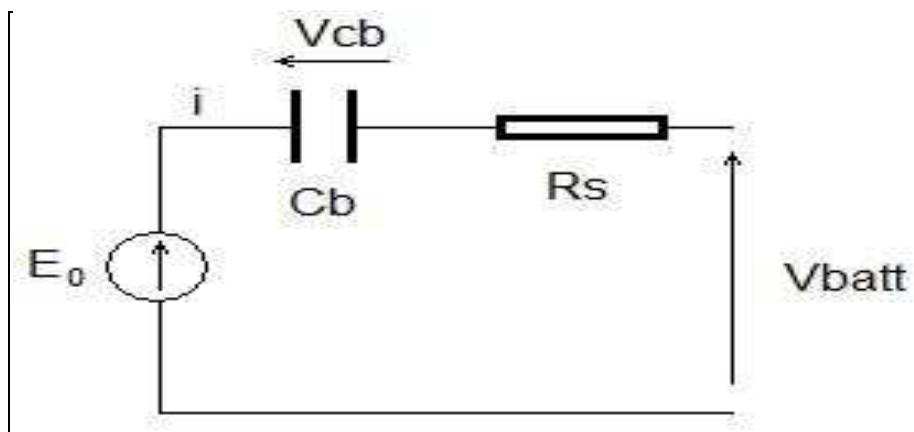


Fig. (III - 6) : Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{Cbatt} \quad (\text{III -18})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{III -19})$$

Avec  $C_{bat}$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ . [15].

D'après le modèle R-C de la batterie présentée au Fig. (III - 6) la capacité en ampères heure est modélisée par  $C_{bat}$  dont la valeur est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{batt} = I * t_{batt} \quad (\text{III -20})$$

$$C = \frac{Q_{batt}}{V} \quad (\text{III -21})$$

Avec:

$Q_{batt}$  : la quantité de charge électrique en Coulomb,

$I$  : le courant à travers la capacité,

$t$  : le temps de fonctionnement,

$C$  : la valeur de la capacité en Farad,

$V$  : la différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie allant de 0% à 100%. Nous considérons  $V=2V$  pour une batterie au plomb de 12V.

➤ *Le modèle «CIEMAT »*

Le modèle est basé sur le schéma électrique de la Figure (III-6), dans lequel les éléments électriques (fem et résistance) dépendent de l'EDC et du courant.

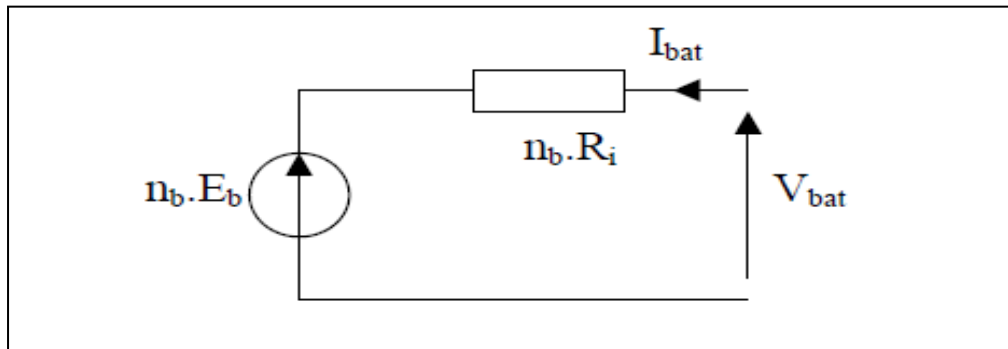


Fig. (III -7) : Schéma électrique équivalent de  $n_b$  éléments de batteries en séries

Pour  $n_b$  cellules en séries, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (\text{III -22})$$

Où «  $V_{bat}$  » et «  $I_{bat}$  » sont la tension et le courant batterie (en convention récepteur), «  $E_b$  » la force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie noté EDC, «  $R_i$  » la résistance interne d'un élément.

a) *Le modèle de la capacité :*

Le modèle de la capacité donne la quantité de charge théorique «  $C_{bat}$  » que peut restituer la batterie, en fonction du courant moyen de décharge ( $(I_{bat})_{moy}$ ). son expression est établie à partir du courant ( $(I_{bat})$ ) caractéristique correspondant au régime de fonctionnement ( $(C_{10})$ )

$I_{10} = C_{10}/10$ , l'expressin de  $I_{bat}$  est la suivant :

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1+0.67\left(\frac{I_{bat.moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} \cdot (1 + 0.005 \cdot \Delta T) \quad (\text{III -23})$$

Où «  $\Delta T$  » est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante de 25°Celsius (non pris en compte dans cette étude).

La capacité «  $C_{bat}$  » sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie. Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie, «  $Q_d$  ».

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C} \quad (\text{III -24})$$

L'évolution temporelle de «  $Q_d$  » dépend du mode de fonctionnement de la batterie (croît en décharge, décroît en charge, en convention récepteur). L'évaluation de  $Q_d$  est effectuée par coulométrie. :

$$Q_b = I_{bat} \cdot t$$

Avec «  $t$  » la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant «  $I_{bat}$  ».

#### B) EQUATION DE LA TENSION EN DECHARGE :

L'expression de la tension de batterie est élaborée à partir du schéma électrique de la Figure (III-6). Les deux éléments internes à la batterie (force électromotrice et résistance interne) sont donc fortement variables :

$$V_d = n_b (2.085 - 0.12 (1 - EDC)) - n_b \frac{|I|}{C_{10}} \left[ \frac{4}{|I|^{1.3}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right] \quad (\text{III -25})$$

#### C) équation de la tension en charge :

L'expression de la tension aux bornes de la batterie en charge est décrite par deux équations, l'une avant la décharge profonde et l'autre après (surcharge ou Gassing). L'équation de la tension en charge avant l'apparition du phénomène de Gassing est similaire à celle obtenue en décharge. En effet, elle présente la même structure faisant apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne.

$$V_{bat_c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) \cdot (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (\text{III - 24})$$



En charge, la résistance interne dépend encore de l'état de charge. Sa valeur devient d'autant plus importante lorsque nous approchons de la pleine charge. Dans un raisonnement à courant constant, il y aura d'autant plus de pertes que nous nous approchons de la pleine charge et le rendement en charge de l'accumulateur sera donc plus faible dans cette zone.

**d) Rendements de charge et de décharge :**

Le rendement global résulte du produit des rendements coulombien et du rendement Joule. Le rendement Joule correspond aux pertes résistives. En décharge, le rendement coulombien de la batterie est supposé être de 100%.

$$\eta_{cb-d} = 1$$

En charge, il dépend fortement du taux de charge. Il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge [16].

$$\eta_{cb_c} = 1 - \exp \left[ \frac{20,73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0,55} \cdot (EDC - 1) \right]$$

- la tension de circuit ouvert : est exprimée comme un logarithme

de la fonction de l'état de charge. [17]:

$$V_{co} = E + b \cdot \log (soc(t)).$$

Où  $E$ , est la force électromotrice ;  $b$  est un constant empirique.

- La variation de la résistance interne d'une batterie,  $R(t)_{bat}$ , est principalement dû à deux composants, à savoir, la résistance de électrode,  $R_{electrode}$ , et la résistance de électrolyte  $R_{electrolyte}$ .

$$R_{bat} = R_{electrode} + R_{lectrolyte}$$

La variation de  $R_{\text{électrode}}$  et  $R_{\text{électrolyte}}$  en fonction de l'état de charge SOC peut être exprimée

$$\text{par : } R_{\text{électrode}} = r_1 + r_2 \cdot (\text{soc}(t)) \quad \text{et} \quad R_{\text{électrolyte}} = r_3 + r_4 \cdot I / (\text{soc}(t))$$

Où  $r_1, r_2, r_3$ , et  $r_4$  sont des constants empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge [17]:.

➤ **Courant de batterie :**

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par :

$$I_{\text{Bat}} = \frac{P_{\text{pv}}(t)}{V_{\text{Bat}}(t)} - \frac{E_L(t) / \eta_{\text{inv}}}{V_{\text{Bat}}(t)}$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est [18] :

$$I_{\text{Bat}} = \frac{E_L(t) / \eta_{\text{inv}}}{V_{\text{Bat}}(t)} - \frac{P_{\text{pv}}}{V_{\text{Bat}}(t)}$$

Nous pouvons résumer ces phénomènes en général, pour les systèmes de stockage sous forme de tableau de description de fonctionnement des batteries (**Tableau 1**).

Tension de batterie	Zone de fonctionnement	Conditions de fonctionnement	
$V_{\text{sc}}$	Saturation	$I > 0$	$V = V_{\text{ec}}$ $\eta_c = 0$
	Gazage		$V_{\text{ec}} \geq V \geq V_g$
$V_c$	Charge		$V < V_g$ $0 < \eta_c < 1$
$V_{\text{edc}}$	Transition	$I = 0$	$V_c \geq V \geq V_{\text{dc}}$
	Charge / Décharge		
$V_{\text{dc}}$	Décharge	$I < 0$	$V > 0.9 V_N$
	sur décharge		$V_N \geq V \geq 0.7 V_N$
	Décharge profonde		$V < 0.7 V_N$

Fig. (III - 8) : description de fonctionnement des batteries

---

---

L'importance de cette modélisation sur l'étude de l'état interne des batteries du point de vue du processus physico – chimique est de permettre une meilleure gestion des transformations énergétiques. Le processus de transformation de  $\text{PbSO}_4$  en  $\text{Pb}$  et  $\text{PbO}_2$  au sein de la batterie est accompagné d'un dégagement de l'acide dans l'électrolyte.

Il est exigé que le courant entre dans la batterie par l'anode, en raison de la diffusion et de la densité de l'électrolyte qui est plus grande à l'intérieur des électrodes que dehors.

Dans le cadre des applications photovoltaïques, il doit y avoir une certaine considération de l'influence des paramètres { (f.e.m) et R (résistance interne de la batterie) } suivants : E

- Le dégagement de l'acide qui provoque une augmentation de et une diminution de et ainsi une diminution du courant de charge avec. L'augmentation de la tension à travers les bornes de la batterie est exprimée par l'équation de la décharge (3).  $E_{RchIR}$
- Lorsque la charge est presque complète, la matière active commence à devenir rare. Le courant continue à passer, bien que la batterie ne conduit plus à des réactions chimiques. Au lieu de cela, le courant provoque une simple électrolyse de l'eau, en le décomposant en oxygène à l'électrode positive et en hydrogène à l'électrode négative.

Les inconvénients, les avantages et les conséquences de ce processus du point de vue intérêt pour la gestion de fonctionnement du système de stockage peuvent se résumer comme suit :

- Les inconvénients incluent la perte d'eau de l'électrolyte et de la corrosion de la grille positive. Si le gazage est très important, de la matière active peut être perdue des plaques par la drague créée par les bulles,
- Les avantages incluent l'action de l'agitation des bulles, qui tendent à homogénéiser l'électrolyte et par conséquent à éliminer la stratification de l'électrolyte. La stratification signifie un gradient de densité croissant vers le fond de la batterie. Elle cause la corrosion des grilles, particulièrement les parties inférieures.
- Les conséquences, si l'eau est perdue, alors la batterie est intoxiquée. Du point de vue maintenance, il faut rajouter de l'eau dans les éléments de batterie. Autrement dit, si n'importe quelle pièce des plaques cesse d'être couverte par le liquide, les dommages irréversibles peuvent apparaître. Par conséquent, l'entretien est donc nécessaire, la fréquence dépend de l'ampleur de la perte [19].

### III -7 LA STRATEGIE DE COMMANDE :

#### III -7-1 commande (MPPT) des convertisseurs DC-DC :

Les panneaux solaires de premier génération sont généralement dimensionnés pour que leur (PPM) correspond à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 V. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module PV et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques.

L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergétiques à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée [20].

#### III -7-2 Principe de la commande MPPT :

La commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale [21], le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $D$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.

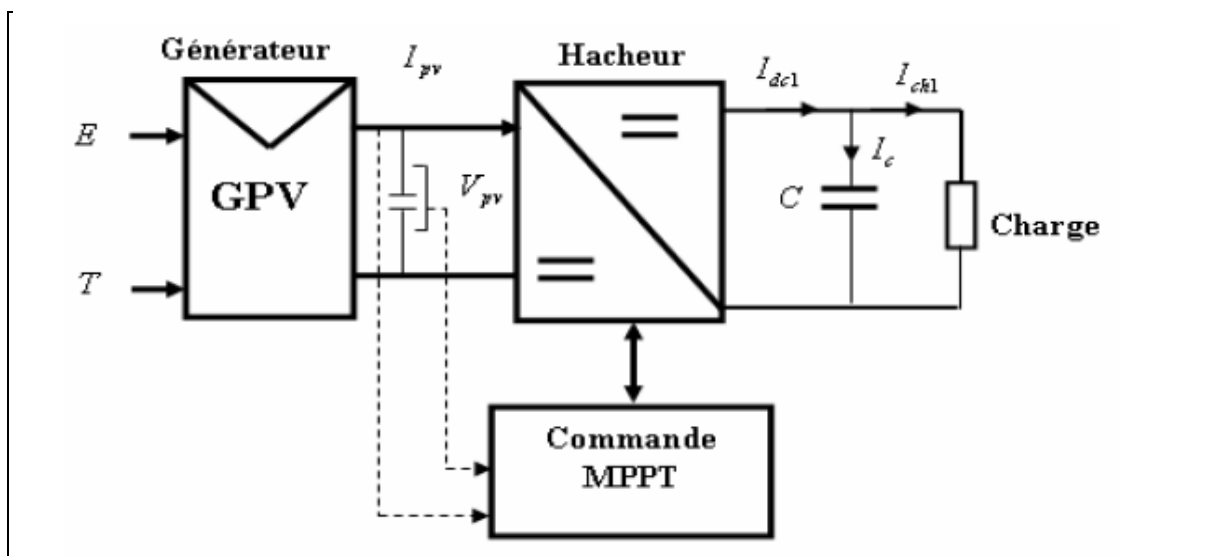


Fig. (III - 9) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

#### III -7-3 Les algorithmes du point de puissance maximale :

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT.

Nous avons fait une classification des différentes *MPPT* existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement *Hill Climbing*, *Perturb & Observ (P&O)*, *l'incrément de Conductance (IncCond)* et *par intelligence artificielle* (logique floue, réseaux de neurones) [22].

Le principe des commandes *MPPT* de type *P&O* consiste à perturber la tension  $p_v V$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $p_v P$  qui en résulte. Ces méthodes, aujourd'hui largement utilisées de par leur facilité d'implémentation, présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du *PPM* qu'elles engendrent en régime établi car la procédure de recherche du *PPM* doit être répétée périodiquement [23].

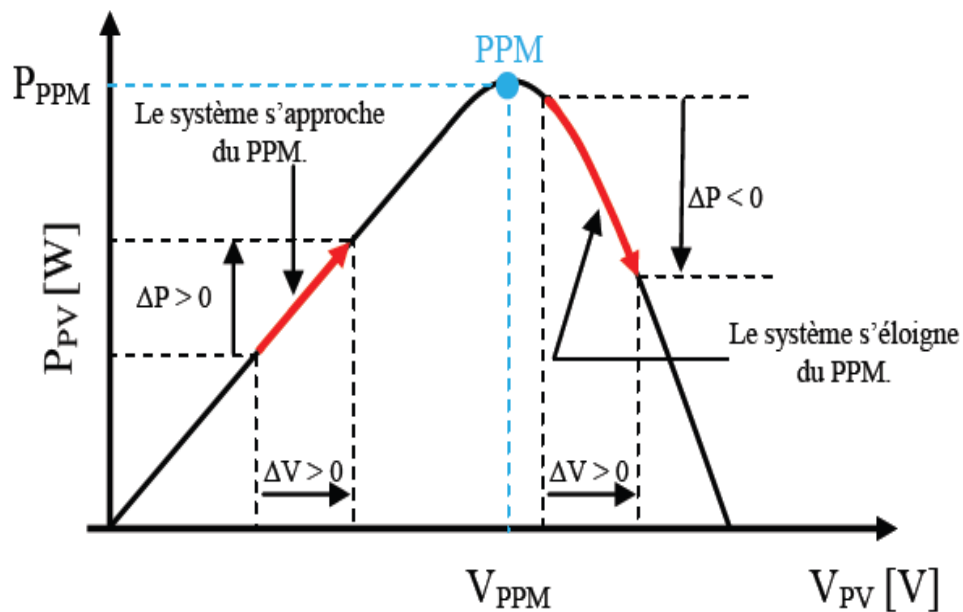


Fig. (III -10) : Caractéristique ( $P_{pv}$   $V_{pv}$ ) d'un panneau solaire

La technique de contrôle nommée *Hill Climbing* [24], consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique. Mathématiquement, le *PPM* est atteint lorsque  $dP / dV_{pv}$  est forcé à zéro par la commande.

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [25]. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

La technique des réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes [26].

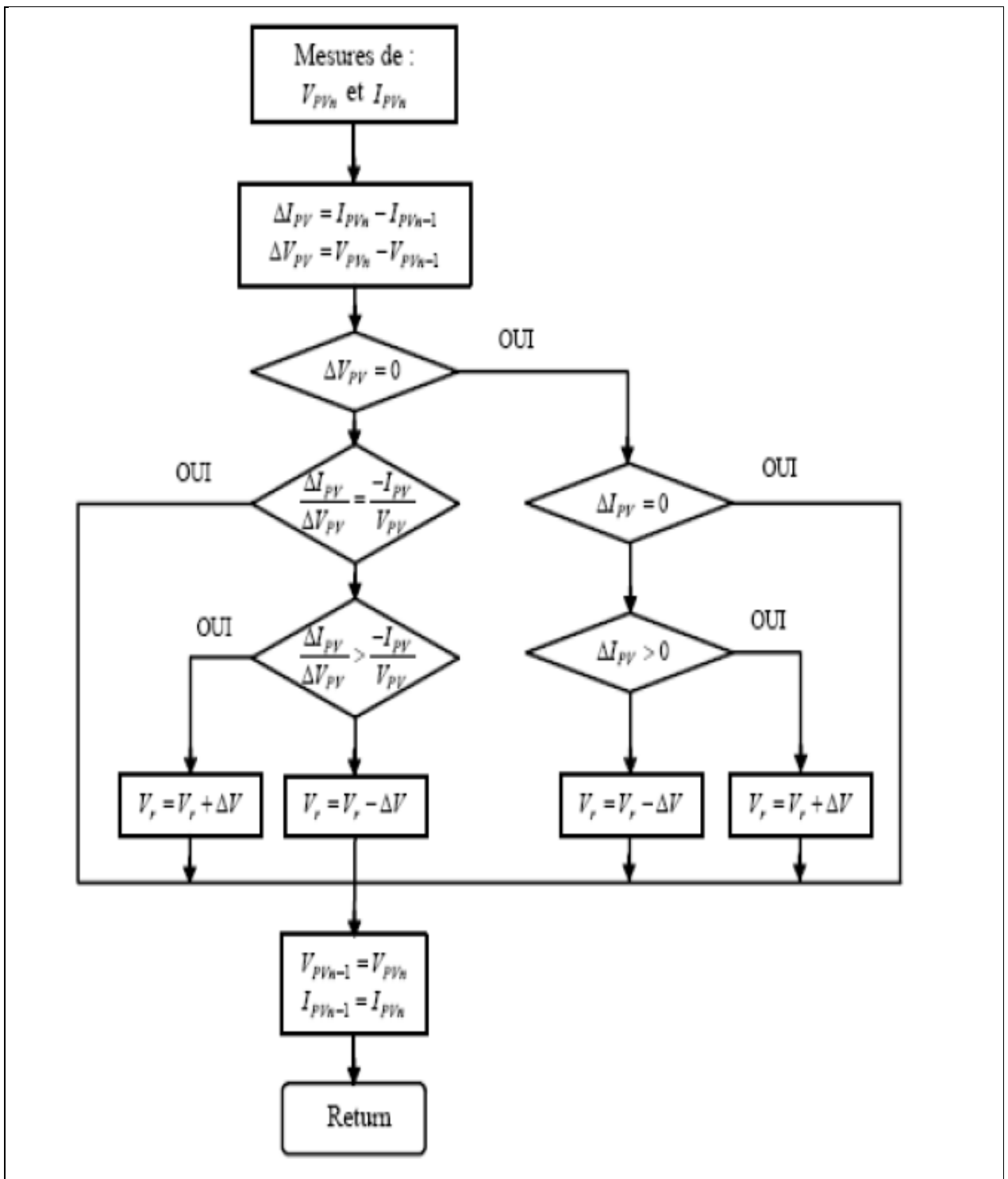


Fig. (III - 11) : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode (Inc-Conduct)

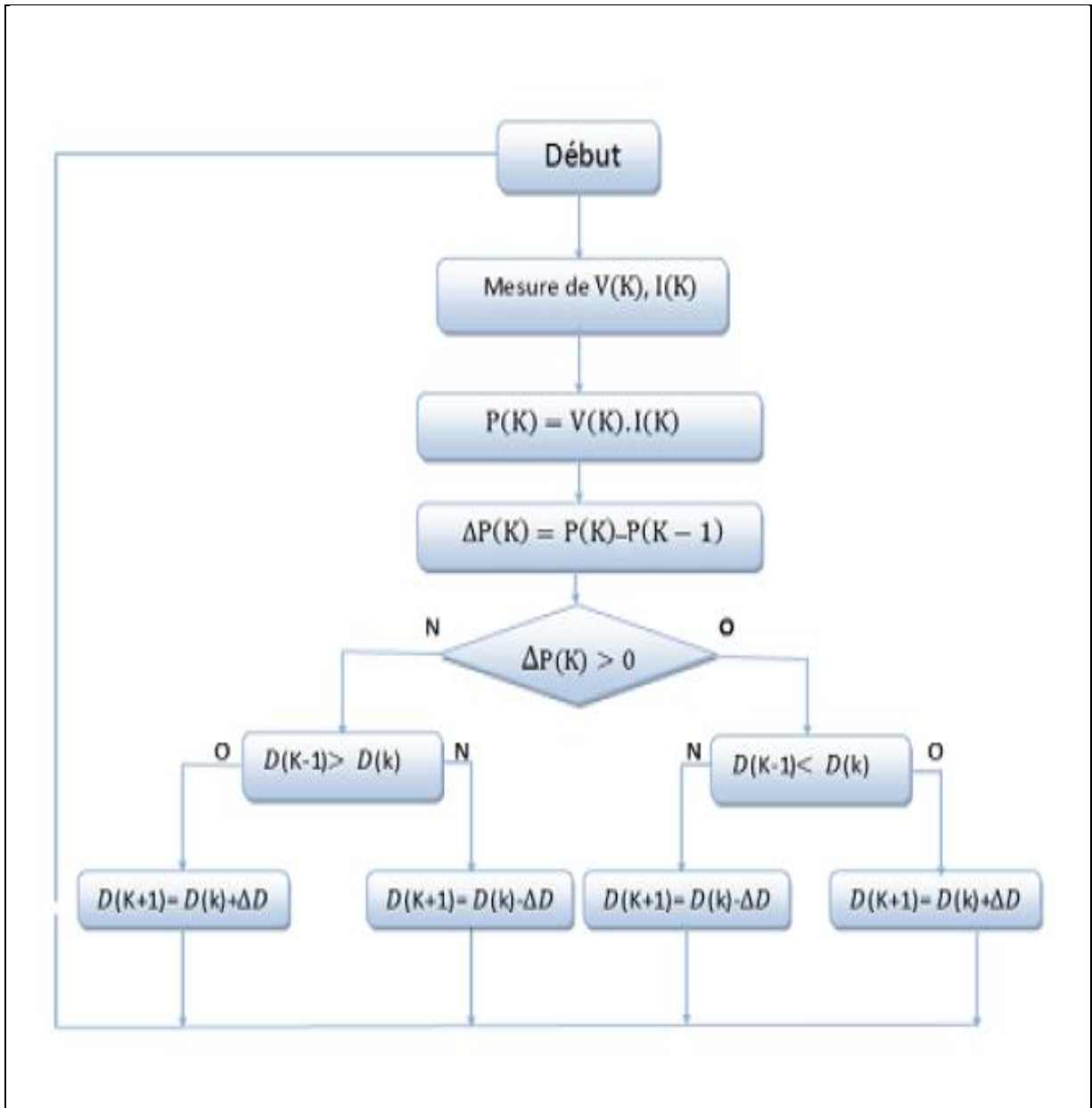


Fig. (III - 12) : organigramme de l'algorithme de perturbation et observation [26]



**III-8- CONCLUTION :**

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, le stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite.

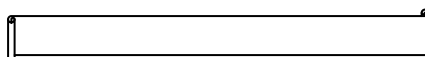
---

---

**Bibliographie :**

- [1]: **Belhadj Mohammed** :Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome .*Mémoire de Magister Centre Universitaire De Bechar Année Universitaire 2007-2008.*
- [2] : [www.abcelectronique.com](http://www.abcelectronique.com).
- [3] : [www.21404.gel.ulaval.ca](http://www.21404.gel.ulaval.ca).
- [4] : **A. Bentaïlah**, « étude expérimental et de simulation des performance d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique,Tlemcen, 1994.
- [5] : **R.P. Mukund**, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [6] : **Ionel Vechiu** :MODELISATION ET ANALYSE DE LINTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS UN RESEAU AOTONOME. these doctorat –Université de Havere ,decembre 2005.
- [7] : **Maouedj Rachid** : *APPLICATION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE AU OMPAGE HYDRAULIQUE SUR LES SITES DE TLEMCEN ET DE BOUZAREAH*. Mémoire De magister Université Abou Bekr Belkaïd . *TLEMCEN* .décembre 2005
- [8] : **Chedid, R., Saliba, Y., 1996.** «Optimization and control of autonomous renewable energy systems ». International Journal of Energy Research 20, 609–624.
- [9] : **F.Benyarou**, « Conception Assistée Par Ordinateur des Système PV Modélisation,dimensionnement et simulation », thèse de doctoral en physique énergétique, Tlemcen,2004.
- [10] : **G. Séguier et F. Labrique**. "Les Convertisseur de L'électronique de Puissance, et Comportement Dynamique", Tome5, Technique et documentation –Lavoisier, 1998.
- [11] : **M. Dahbi** « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [12] : **A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef** « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin »Rev .Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [13] : **YANN RIFFONNEAU** :GESTION DES FLUX ENERGETIQUES DANS UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE CONNECTE AU RESEAU .THESE DOCTORAT UNIVERSITE JOSEPH FOURIER ; Le 23 octobre 2009 .
- [14] : **F Bernard MULTON** : ( Générateur électrique combinant les ressources du soleil, du vent, de la houle et comprenant un dispositif de stockage). *Rapport SATIE-LMF Contrat financé par l'ADEME (convention no 03 05 C 0017) 2003.*

- [15] : **O.Gergaud**, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur" Ecole Normale Supérieure de Cachan, Thèse soutenue le 9 septembre 2002.
- [16]: **Chaurey, C and S Deambi. 1992**, « Battery storage Power systems: an overview ». *Renewable Energy* 2 (3):227-235.
- [17]: **H.X.Yong, LU, J. Burnett**, « Weather data and probability analysis of hybrid PV wind power generation systems in Hong Kong ». *Renewable Energy* 28 (2003) :1813-1824
- [18]: **A. Ould Mohamed Yahya<sup>1</sup>, A. Ould Mahmoud<sup>1</sup> et I. Youm<sup>2</sup>** :  
Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Éolien / Diesel) *Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214*
- [19]: **M.Seddik Bacha**, Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie». Thèse de doctorat laboratoire d'électronique de Grenoble Ikerlan (Mondragon, Espagne) ; septembre 2003.
- [20] : **K. Kassmi<sup>1</sup>, M. Hamdaoui<sup>1</sup> et F. Olivié**, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique" *Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462*.
- [21] : **C. Cédric**, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat université Toulouse, 2008.
- [22] : **N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli**, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.
- [23] : **W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'Sullivan**, " A new maximum power point tracking system", *IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993, PESC'93*, pp. 833-838, Jun. 1993.
- [24] : **M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato**, " Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV systems using fuzzy controller ", *IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 3, pp. 969-981, Jul. 2002.
- [25] : **J. S. ko, B. J. Jung, K. T. Park, C. H. Choi and D. H. Chung**, " Maximum power point tracking control of PV system for DC motors drive with neural network ", *Smart Manufacturing Application, IEEE ICSMA 2008*, pp. 514-519, Apr. 2008.
- [26] : **H ; N Zainudium, S. Mekhilef** : comparison study of the Maximum power point tracker techniques for PV systems . *Proceedings of the 14th International Middle east power systems conference (MEPCON '10)*, cairo university ,Egypt, decembre 19-21,2010 .



***Chapitre IV :  
Résultats de simulation  
sur MATLAB***

## IV -1- INTRODUCTION :

Rappelons que dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté les bases qui ont permis de développer sous l'environnement logiciel de programmation.

Dans ce cadre nous avons utilisé un outil informatique Matlab qui permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement et la caractérisation des différents éléments qui constitue le système PV.

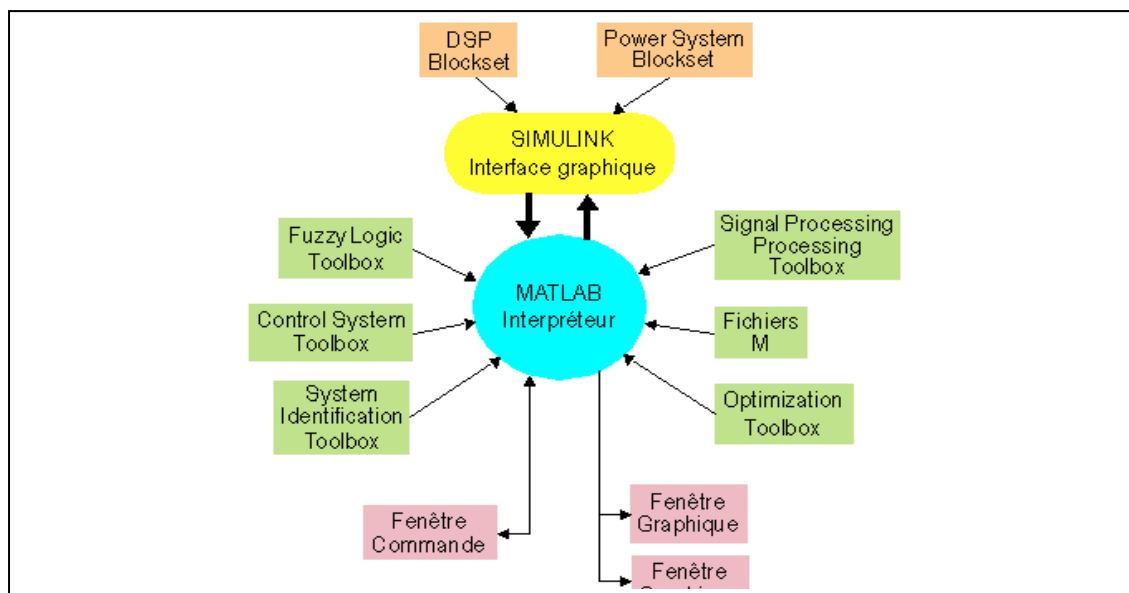
MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées,

MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.

MATLAB est un interpréteur: les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne.

Il existe deux modes de fonctionnement:

1. mode interactif: MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
2. mode exécutif: MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage (MATLAB)).



**Fig. (IV - 1) : Environnement MATLAB**

Simulink est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes.

Dans ce chapitre, on utilise le programme du Matlab 7.10 pour simuler les composants suivants :

- cellule solaire.
- Module PV.
- hacheur.
- Batterie Pb-acide.

#### IV-2- Générateur photovoltaïque :

Nous présentons ci-joint la simulation d'un générateur photovoltaïque (cas d'une cellule pv dans un premier cas et cas d'un module photovoltaïque dans un second cas) pour un modèle idéal avec l'influence des différents paramètres.

##### IV-2-a) Cellule solaire :

D'après les conditions initiale : ( $\Psi = 1000W/m^2$ ,  $T = 25C^\circ$ ). On trouve les résultats de simulation suivants :

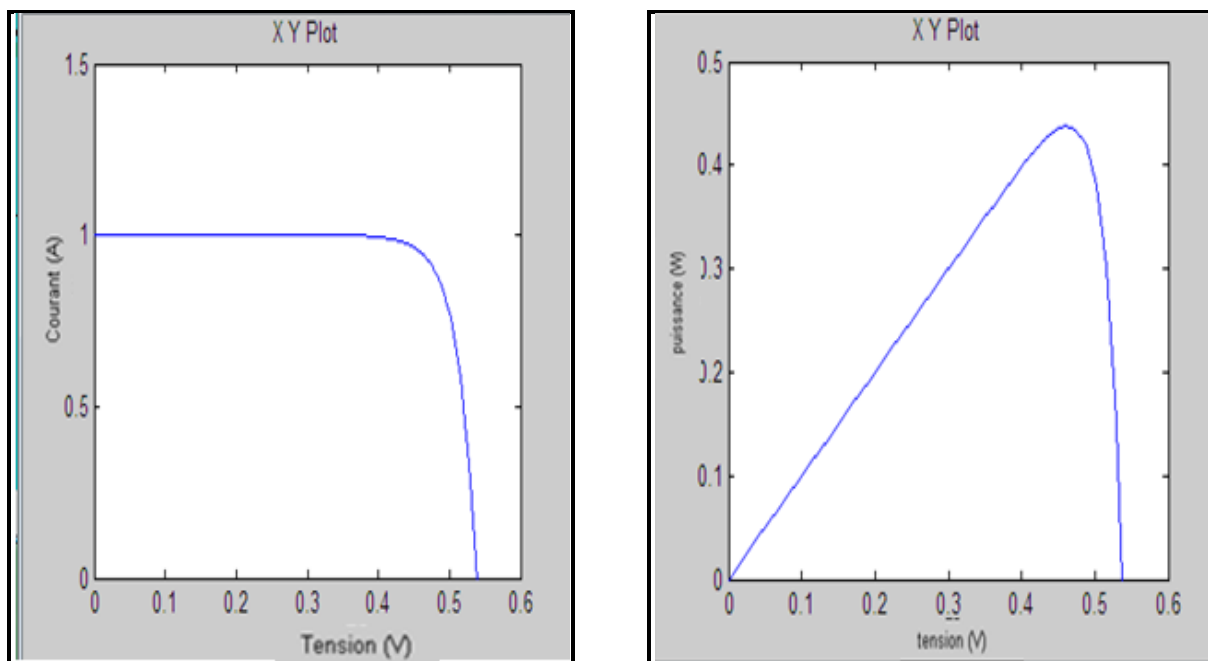


Fig. (IV - 2) : caractéristique  $I(V)$  et  $P(V)$  du cellule pv idéale

D'après l'interprétation des courbes on constat les résultats suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cs} = 1 \text{ A.} \\ V_{oc} = 0.65 \text{ V.} \\ P = 0.45 \text{ W.} \end{array} \right.$$

## IV-2-b) Module photovoltaïque :

Pour notre travail on vas choisis une module photovoltaïque de type polycristallin parce que il contient des avantages pour (les prix des modules mois cher et le rendement moyen). BP Solar BP **3135** module PV, illustrée à la figure (IV - 3) , est choisi pour une MATLAB modèle de simulation. Le module est composé de 36 cellules de silicium multi-cristallin solaires en série et fournit 135W de puissance nominale maximale [1].

Le tableau montre ses spécifications électriques.

Caractéristiques électrique	valeurs
Puissance Maximum	135W
Tension à $P_{\max}$	17.4V
Courant à $P_{\max}$	7.7A
Tension à circuit-ouvert $V_{oc}$	22.1V
Courant à court-circuit $I_{sc}$	8.4A



Fig. (IV -3) : Tableau des Caractéristiques électrique et image du module PV [1]

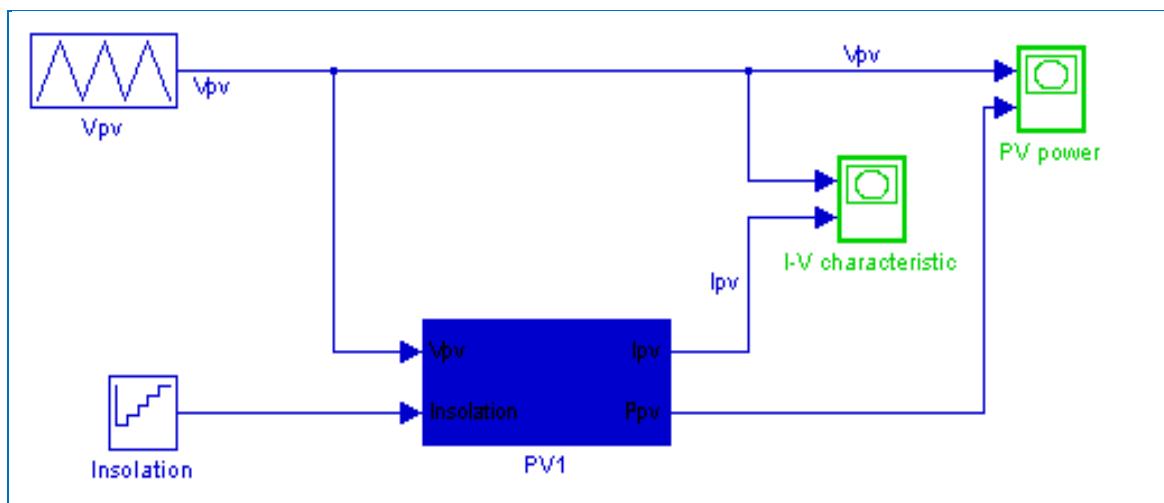


Fig. (IV -4) : module PV sous simulink

### IV-3) : Les caractéristiques I(V) et P(V) du module à l'état stander :

$$(T=25C^{\circ} \text{ et } E =1000W/m^2)$$

Les résultats obtenu lors de la simulation sous MATLAB peut être représenté comme suit :

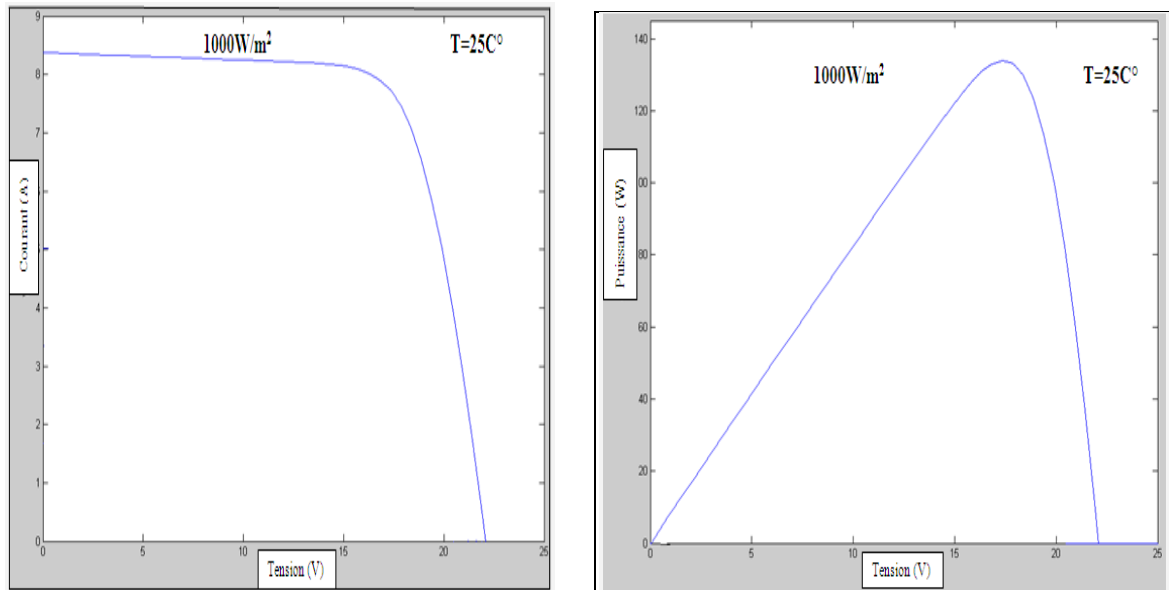


Fig. (IV - 5) : caractéristique I(V) et P(V) du module pv BP 3135 ( $T=25C^{\circ}$ ,  $E=1000W /m^2$ )

$$I_{cs} = 8.4 A \quad . V_{oc} = 22.1 V . \quad P = 135 W.$$

### IV- 4) influence des paramètres sur les caractéristiques :

#### IV- 4 -1- Flux lumineux :

Le photo-courant est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux  $\Psi$ . Le courant  $I_d(v_d)$ , étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface  $S$  de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. [3].



A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert  $v_{co}$  suite à une chute du flux lumineux.

Les paramètres de simulation suivant: ( $\Psi = 1000W/m^2, 800W/m^2, 600W/m^2, 400W/m^2, 200W/m^2$ ). à  $T= 25 C^\circ$ .

On permet de trouver une courbe courant tension évoluant au fil du soleil ainsi que l'illustre l'image dans laquelle le courant de court circuit diminue avec l'éclairement, alors que la valeur de la tension à vide reste la même et le point de fonctionnement optimale se déplace sur une droite à peu près constante.

La figure (IV - 6) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

Les paramètres de simulation suivant: ( $\Psi = 1000W/m^2, 800W/m^2, 600W/m^2, 400W/m^2, 200W/m^2$ ). à  $T= 25 C^\circ$ .

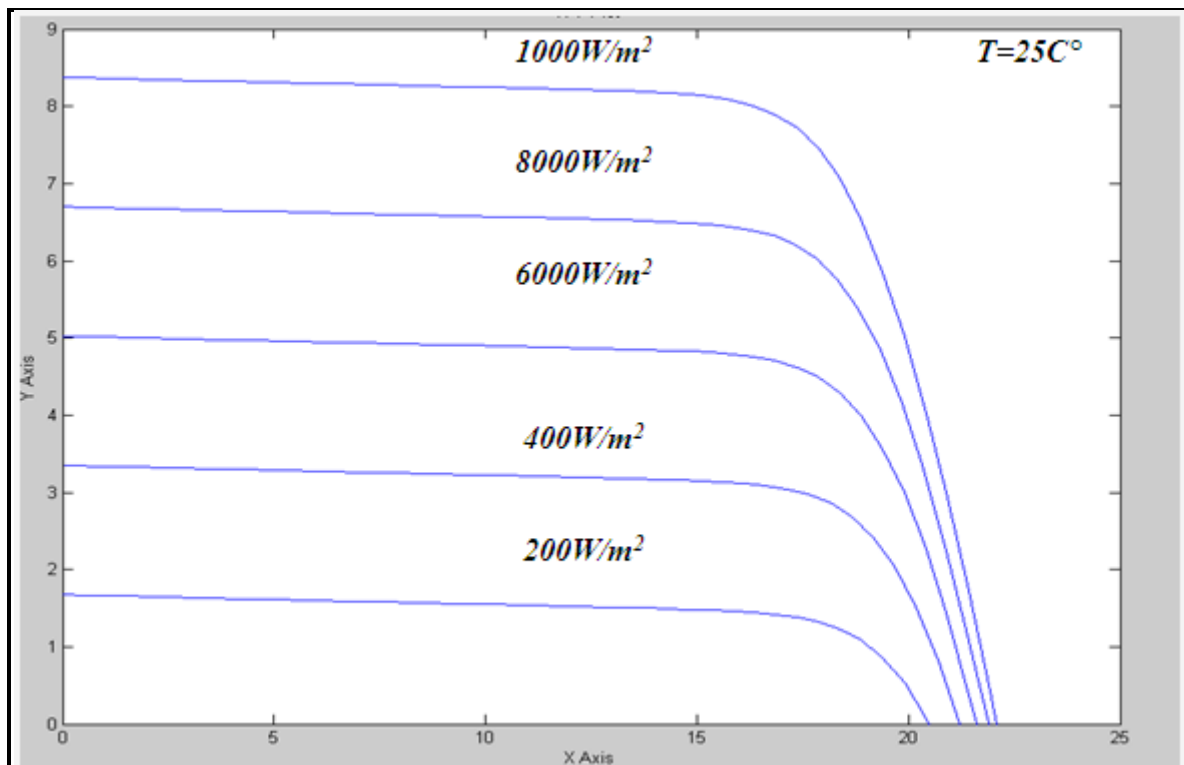


Fig. (IV - 6) : influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$

La figure (IV - 7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .

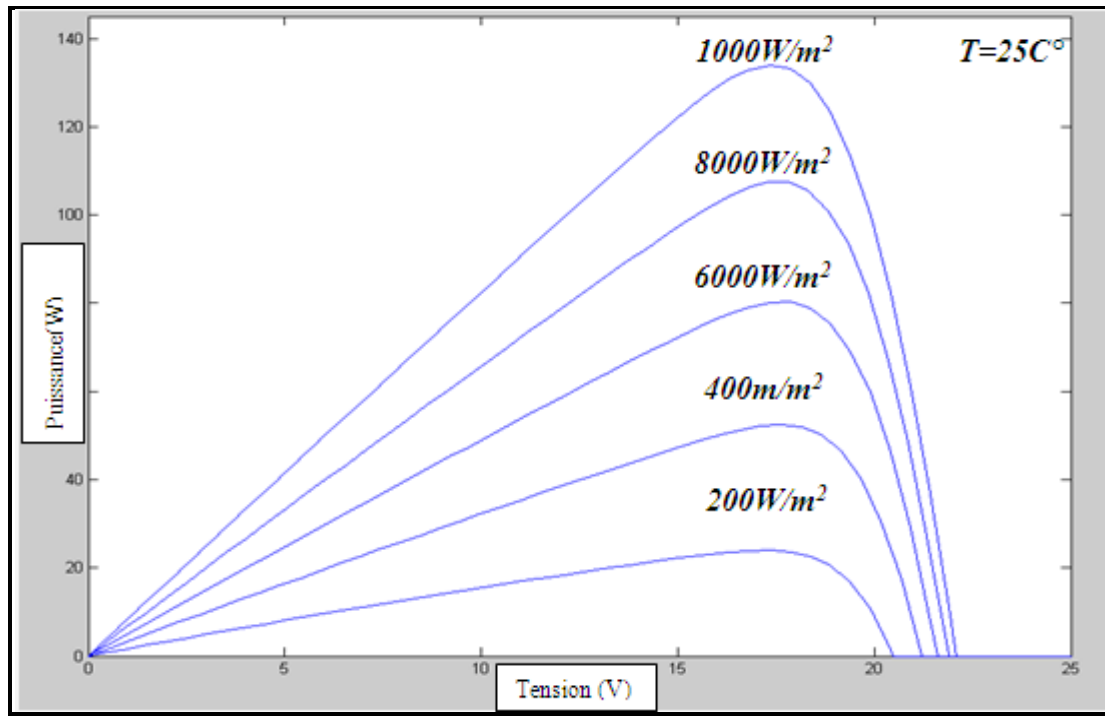


Fig. (IV - 7) : influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$

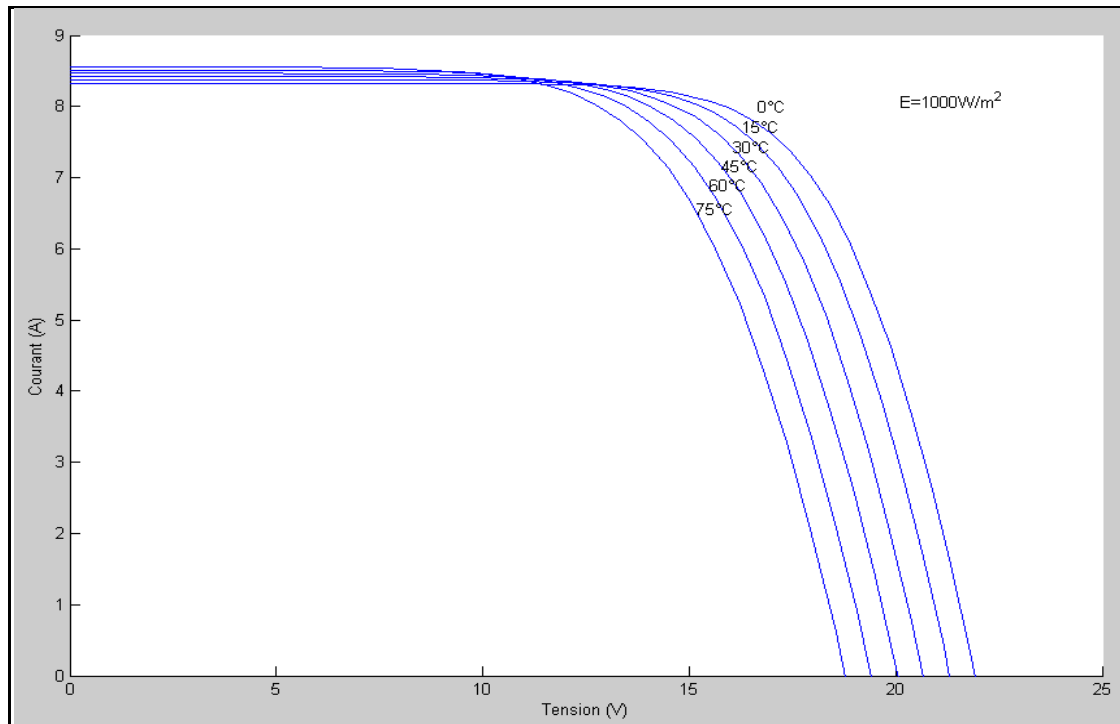
#### IV- 4 -2- la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne d'une part, une augmentation du courant photonique, en raison, principalement, de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau et d'autre part, une diminution de la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ . L'augmentation de la température entraînerait figure (IV - 8):

- Une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06 % par  $^{\circ}\text{C}$ ).
- Une augmentation du courant (0.4 % par  $^{\circ}\text{C}$ ).
- Une diminution du rendement et de facteur de forme FF.

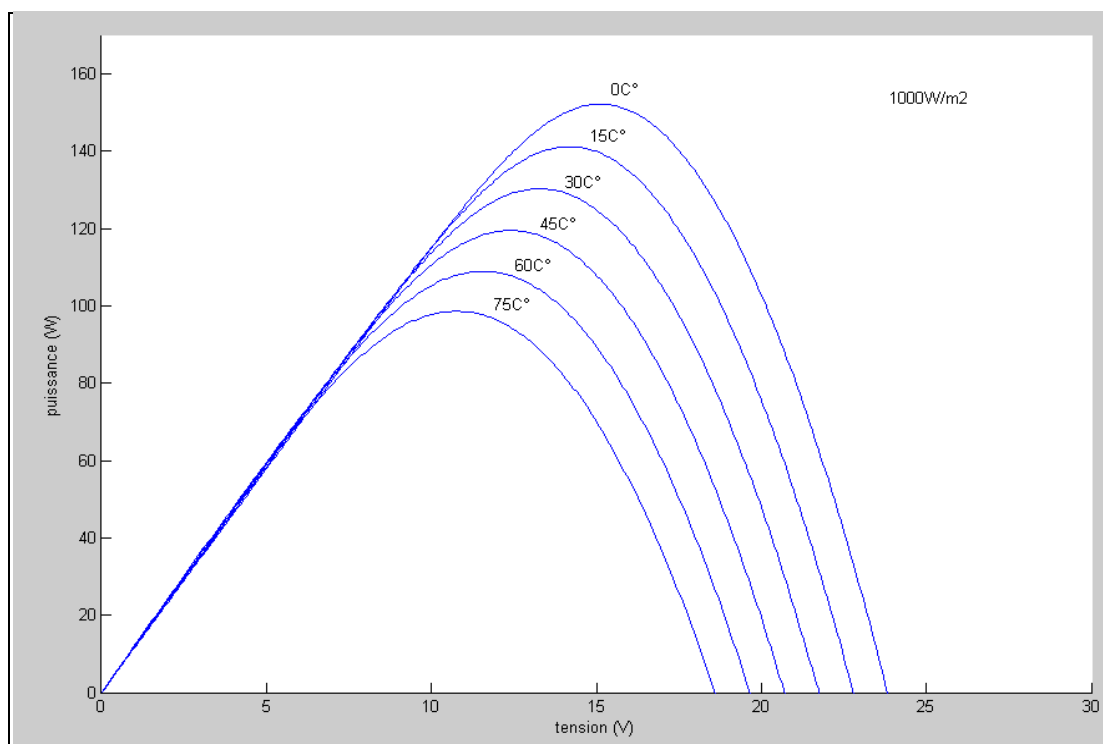
L'influence de la température sur la caractéristique du module PV est représentée sur les figures (IV - 8):

Les paramètres de simulation suivant: ( $\theta = 75^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ).  
 $E = 1000\text{W/m}^2$ .



**Fig. (IV - 8) : influence de la température sur la caractéristique I(V)**

La figure (IV - 9) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de températures, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P(V)$ .



**Fig. (IV - 9) : influence de la température sur la caractéristique P(V)**

### IV- 5) Groupement du module PV :

Pour augmenté la puissance délivré par le module PV en fait une association des modules en parallèle, La figure (IV - 13) illustre , le groupement des modules PV.

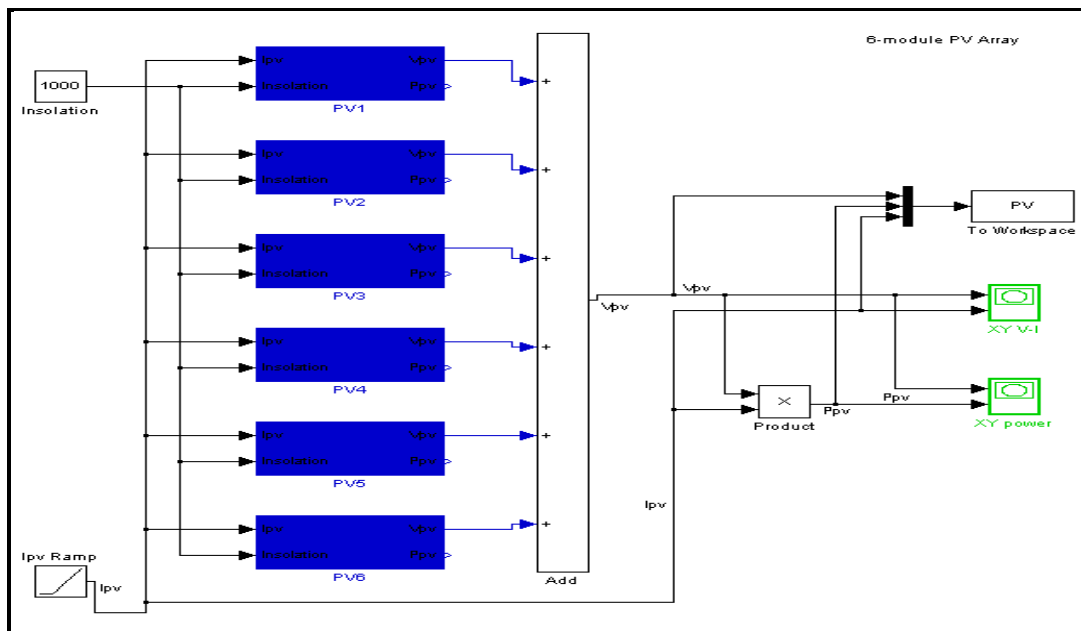


Fig. (IV - 10) : groupement des modules PV sous simulink.

#### IV-5-1 : Les caractéristiques I(V) et P(V) du groupes des modules à létat stander :

Les figures (IV - 11) illustre la caractéristique P(V) et I(V) du groupes des modules ,

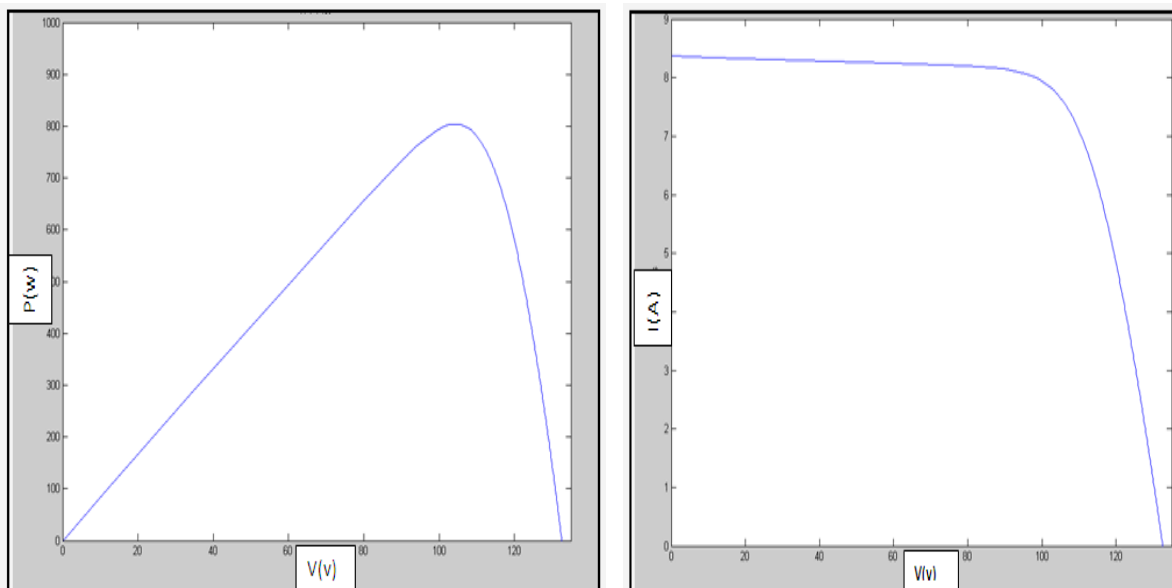


Fig. (IV - 11) : les caractéristiques P(V) et I(V) du groupe des modules pv BP 3135

### IV- 6- Hacheur : DC/DC :

Deux types de topologies des convertisseurs *DC/DC* convertisseur buck ou convertisseur « boost » sont les plus généralement employés par la majorité des concepteurs du suiveur de puissance Maximum dans le travail actuel, le convertisseur « boost » est choisi puisqu'il a d'excellentes caractéristiques telles que les possibilités des tensions élevées et de rendement important ; la petite taille et le bas prix.

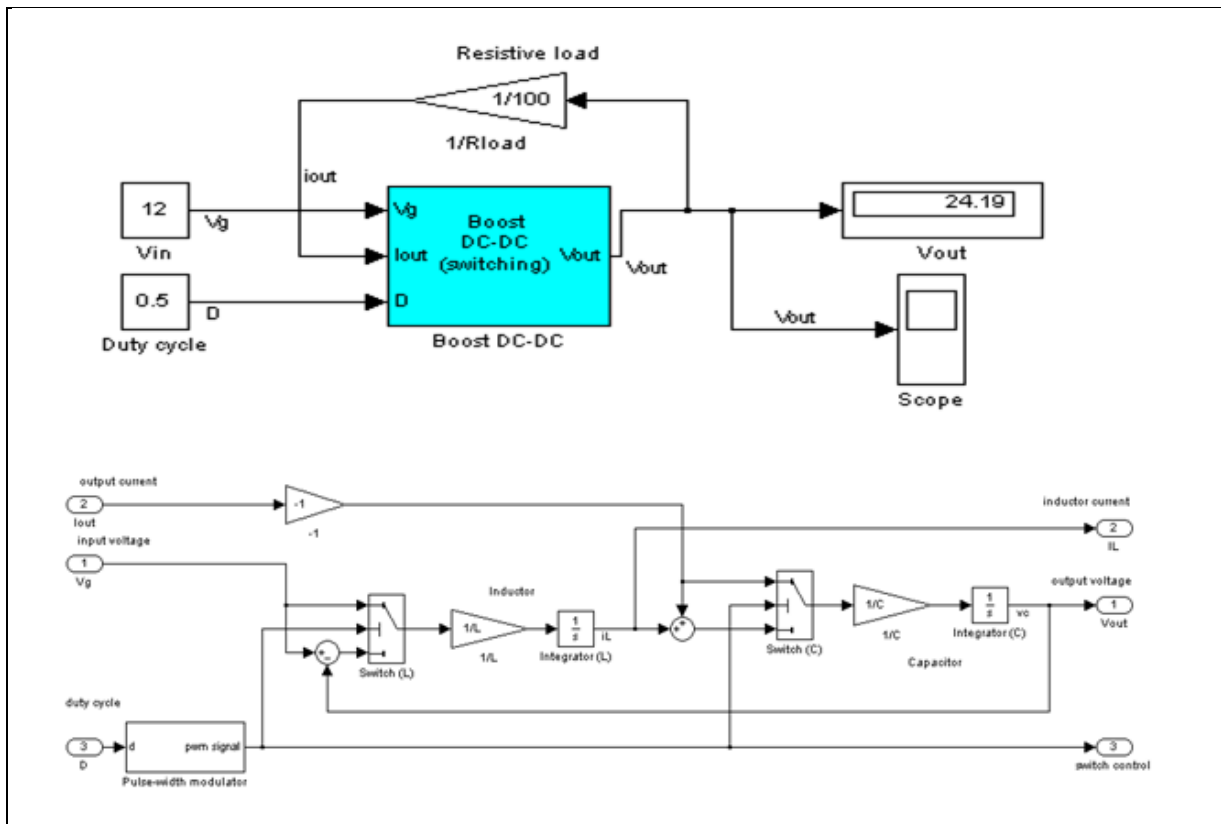
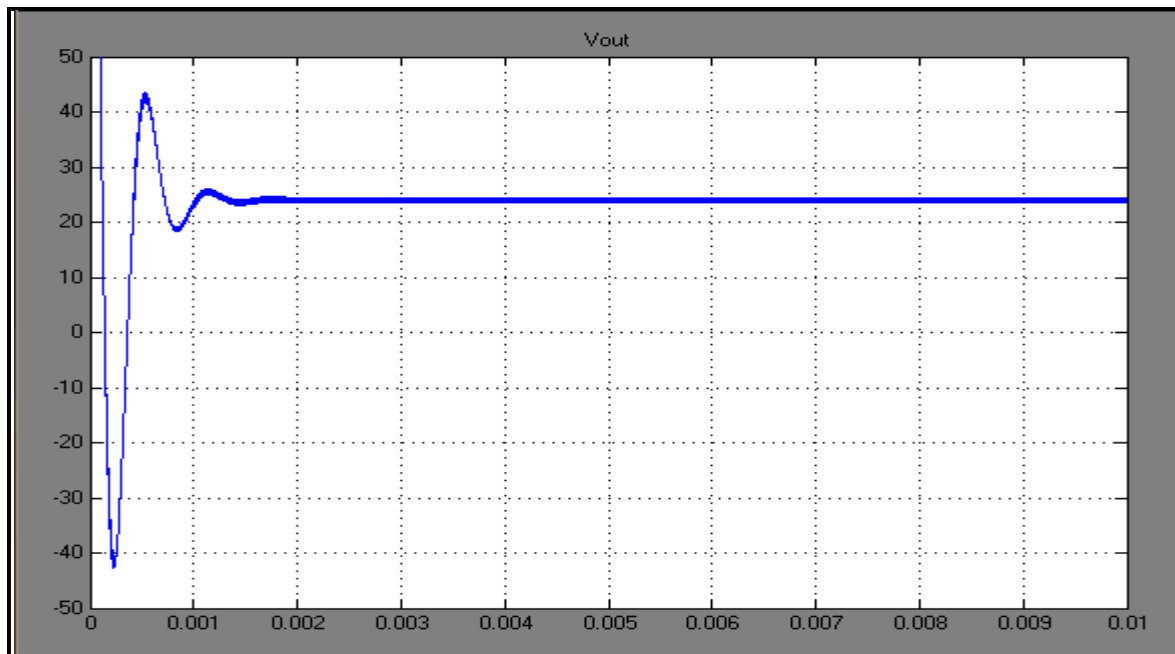


Fig. (IV - 12) : Hacheur DC/DC sous simulink.

D'après la simulation et pour une valeur de tension d'entrée ( $V_{in}=12V$ ), la sortie de hacheur deviendra ( $V_{out}=24V$ ).

Et la figure (IV – 13) représente la tension délivré par hacheur pour une tension d'entrée  $V_{in}=12V$



*Fig. (IV - 13) : Réponse en tension de l'hacheur*

#### IV- 6-1: MODELE DE SYSTEME PV AVEC MPPT:

La méthode Perturbé & Observe (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte. Dans sa mémoire en fait une analyse intéressante que nous reprenons dans la suite.

Comme indique précédemment, le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP.

La figure (IV - 18) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type

P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du MPP. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation.

Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPP, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le MPP évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau MPP.

La figure (IV - 14) Présente le diagramme de l'algorithme P&O.

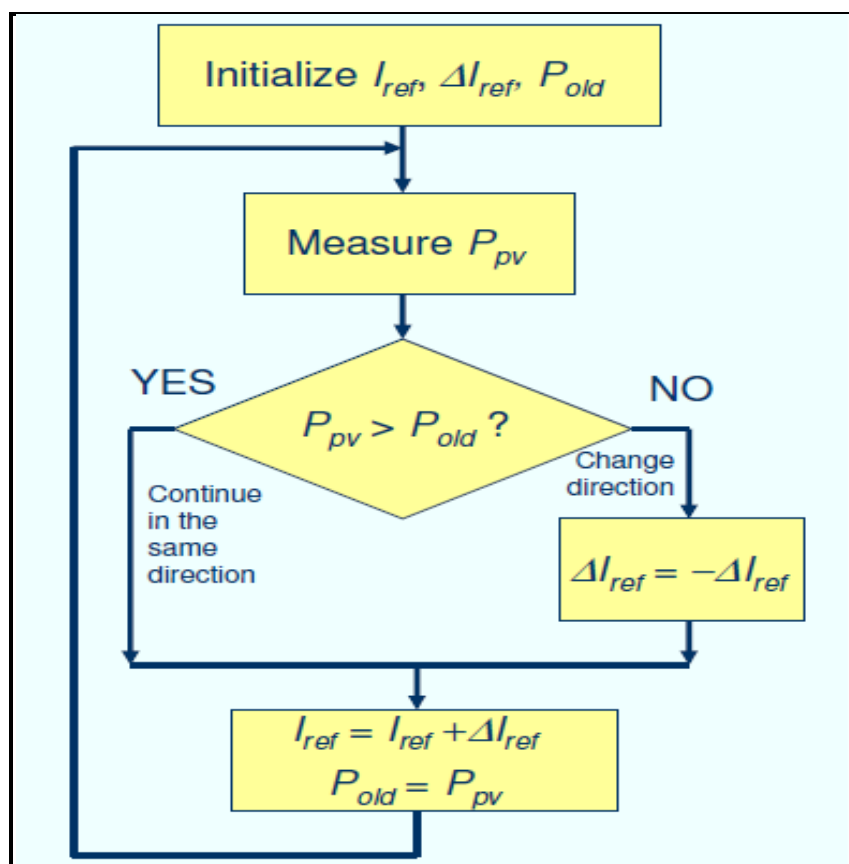


Fig. (IV - 14) : Le diagramme de l'algorithme P&O.

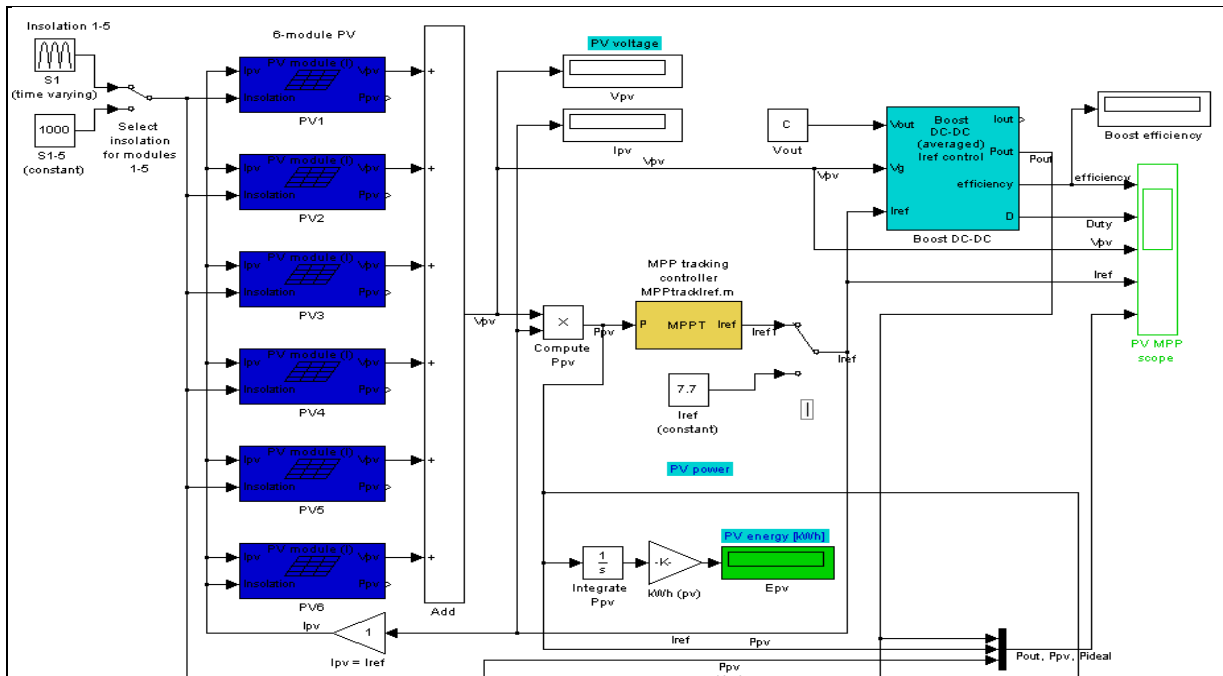


Fig. (IV - 15) : Modèle de développement de système PV sous MATLAB/Simulink

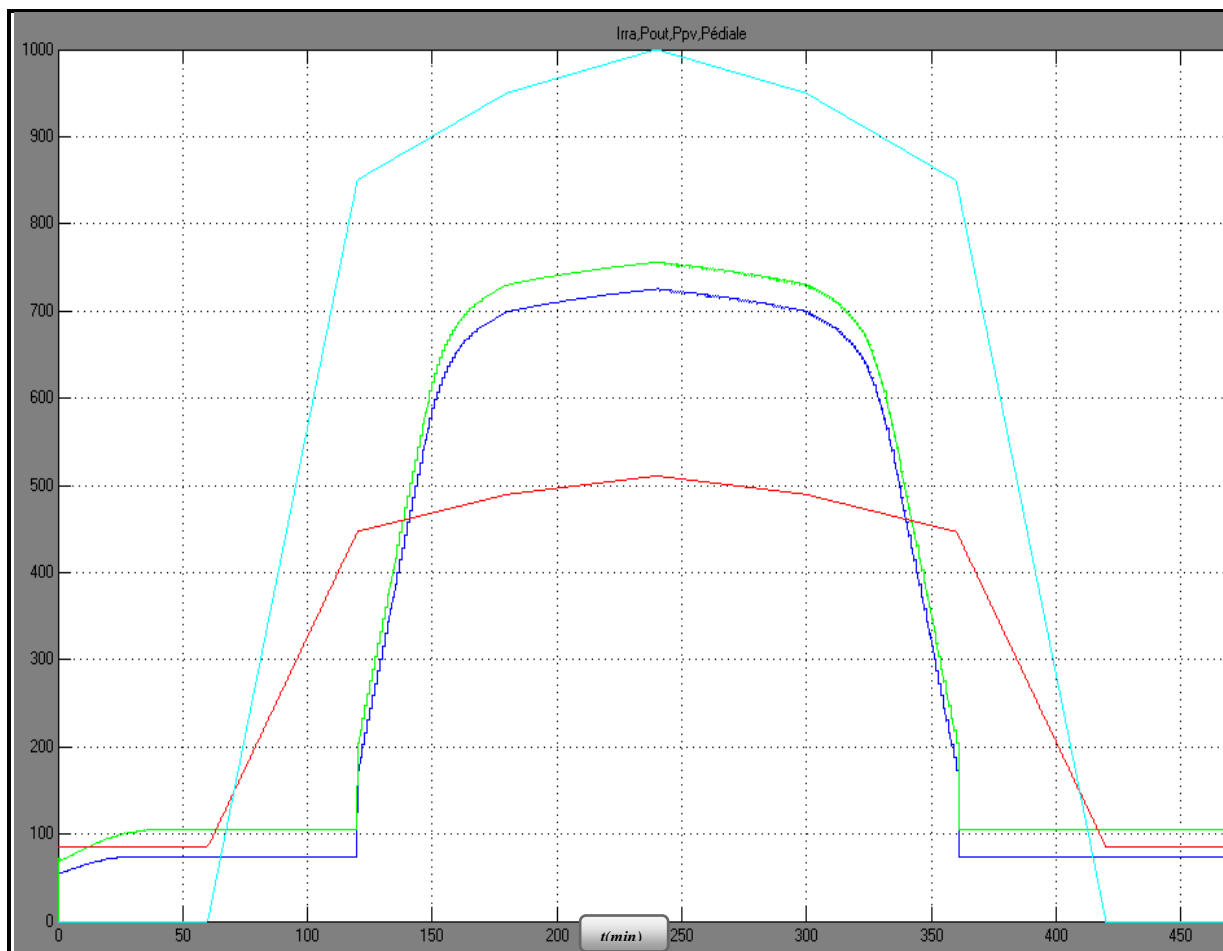


Fig. (IV - 16) : MPP T courbes par méthode P&O pour différentes irradiation.



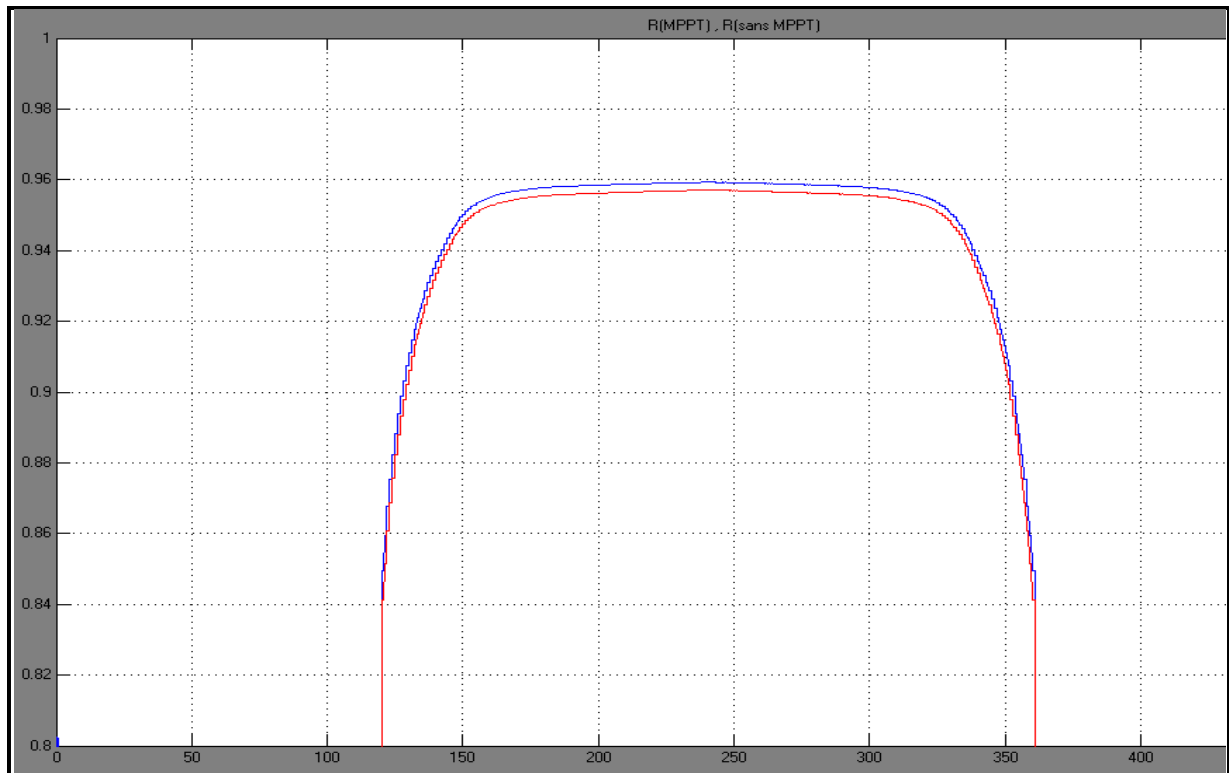


Fig. (IV - 17) : Rendement de l'hacheur pour différente éclaircement

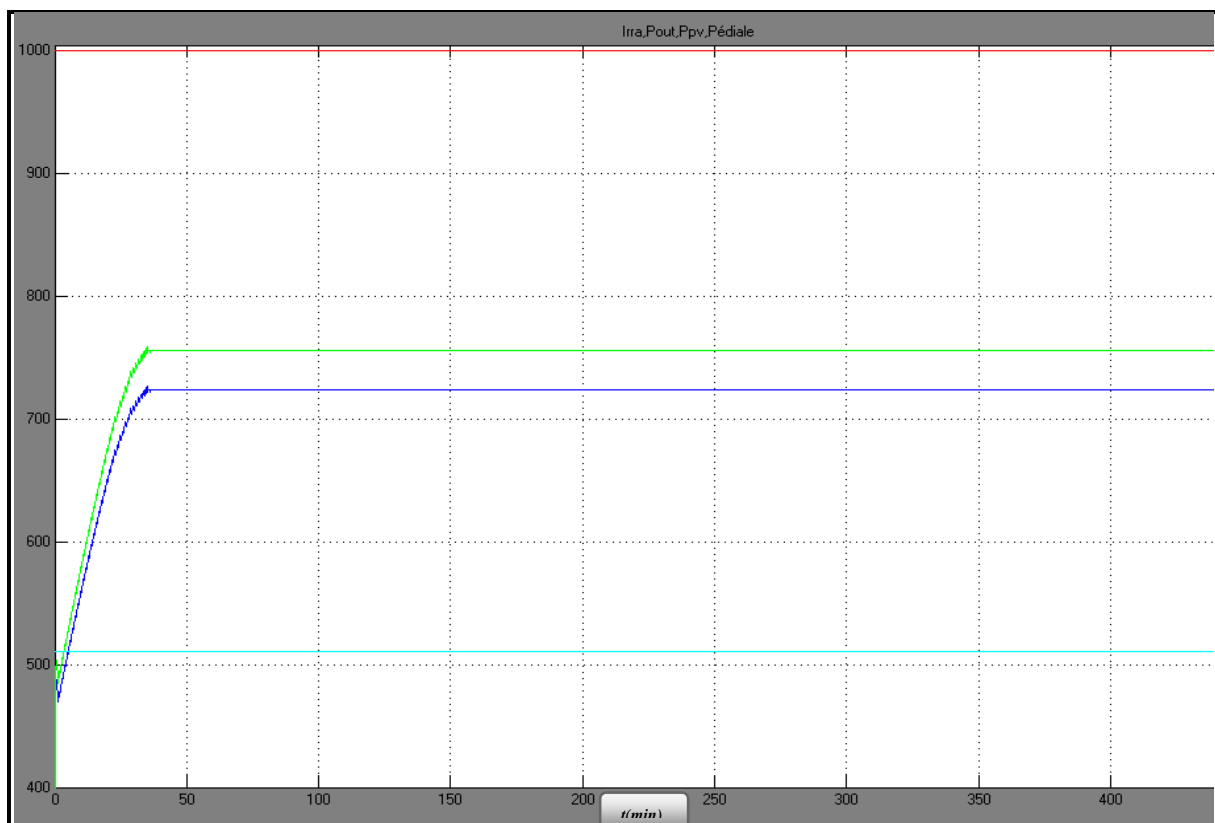


Fig. (IV - 18) : MPP T courbes par méthode P&O pour irradiation constante.

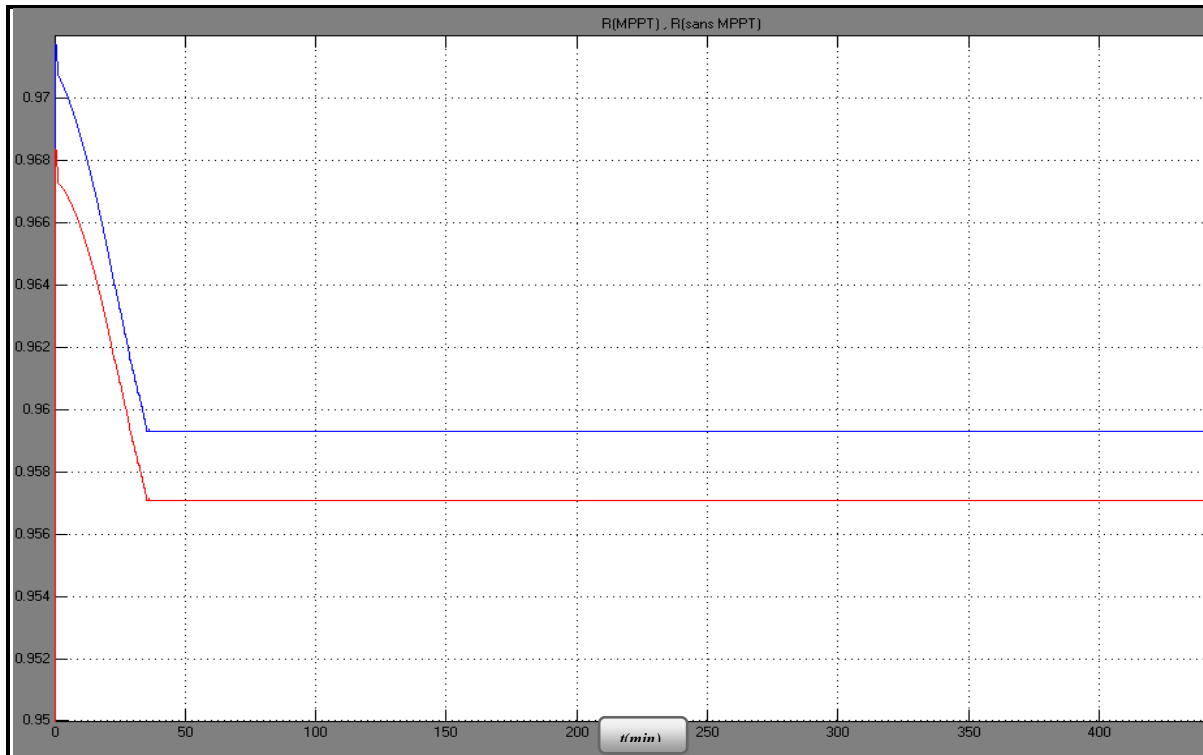


Fig. (IV - 19) : Rendement de l'hacheur pour un éclairement constant

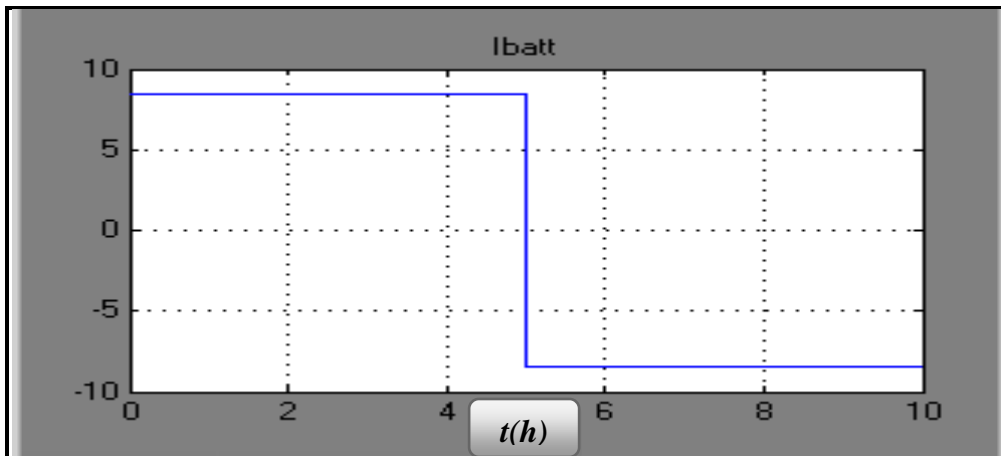
Les résultats des simulations montrent que le MPPT proposé permet de suivre le MPP rapide par rapport à la traditionnelle méthode de P & O.

#### IV- 7- Batterie :

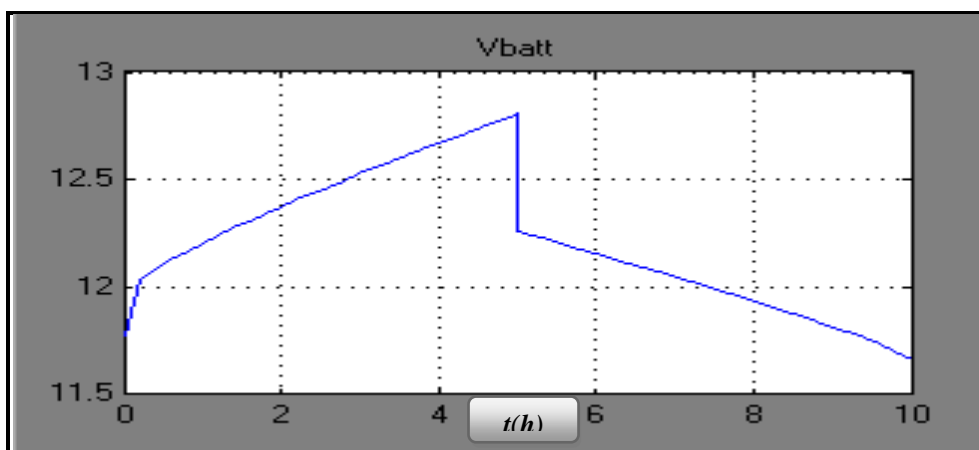
Le but des simulations est d'effectuer une charge puis une décharge de la batterie à courant constant ( $I=8.4A$ ). en considérant les données d'accumulateurs de marque AGM plomb acide ayant une capacité  $C=66Ah$ .



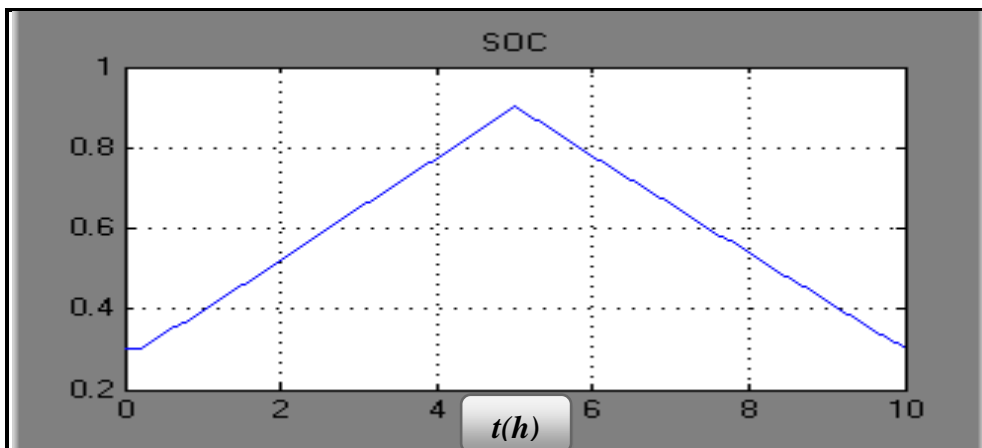
Fig. (IV - 20): batterie plomb acid.



a



b



c

Fig. (IV - 21) : a- Réponse en courant, b - tension, c - état de charge de la batterie

**IV- 7- 1-Résistance de la batterie :****a) Résistance en décharge :**

D'un point de vue électrique nous pouvons tirer les conclusions suivantes: D'un point de vue électrique, l'intoxication correspond à l'augmentation substantielle de la résistance parce que le courant ne peut passer facilement dans la batterie. La résistance interne est directement liée à l'état de décharge de l'accumulateur. Lorsque la batterie est chargée, la résistance interne est faible et elle devient importante pour un état de décharge proche de 0, ce qui dégradera fortement le rendement en décharge dans cette zone de fonctionnement. L'image montre l'évolution de la résistance interne pour notre accumulateur de 6 éléments en série

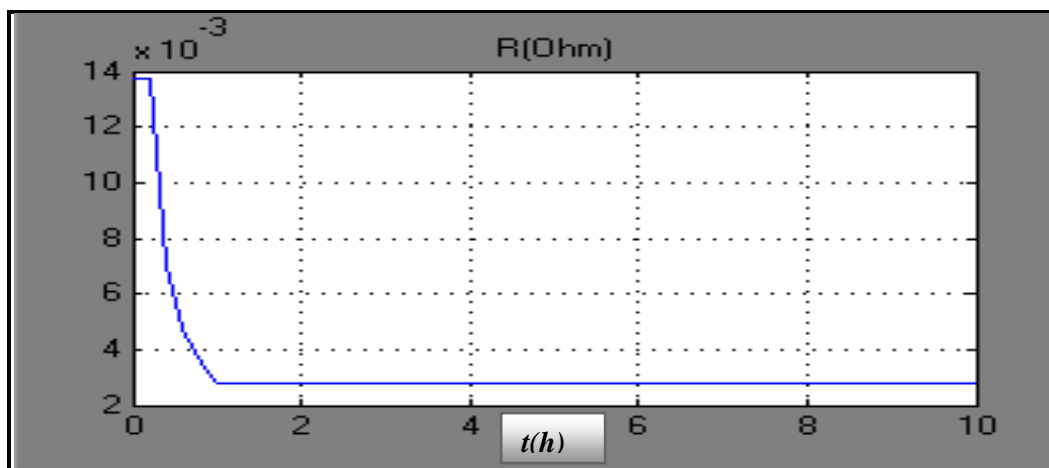


Fig. (IV - 22): Résistance de batterie en décharge

**b) Résistance en charge :**

La résistance interne dépend encore de l'état de charge. Sa valeur devient d'autant plus importante lorsque nous approchons de la pleine charge. Dans un raisonnement à courant constant, il y aura d'autant plus de pertes que nous nous approchons de la pleine charge et le rendement en charge de l'accumulateur sera donc plus faible dans cette zone de l'image.

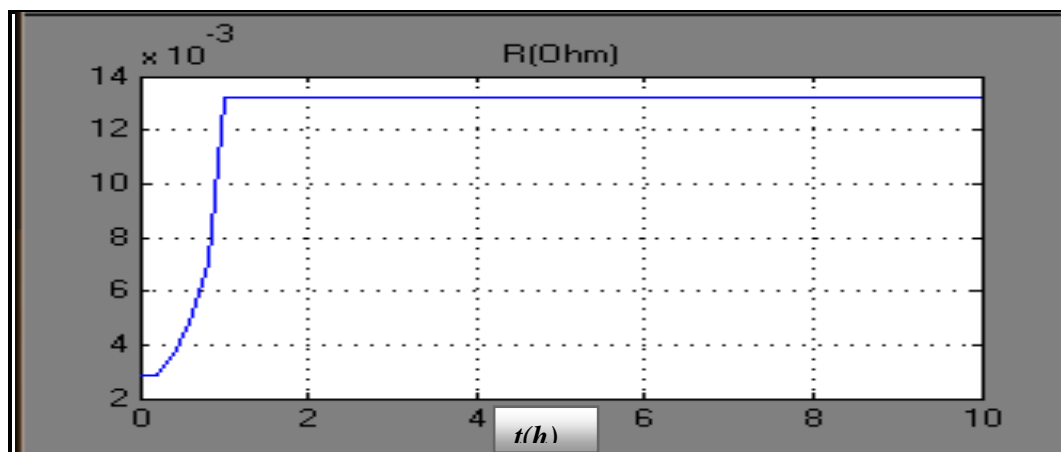


Fig. (IV - 23) : Résistance de batterie en charge

Nous montrent que le modèle propose et utilise, permet de reconstituer correctement l'état de charge et de décharge du système de stockage (batteries).

#### IV-8-Contrôleur :

Tous les systèmes d'alimentation doit inclure une stratégie de contrôle qui décrit les interactions entre ses composants. L'utilisation de la batterie comme une forme de stockage implique ; donc la présence d'un régulateur de charge. Le régulateur de charge est utilisé pour gérer l'énergie flux pour système photovoltaïque, les batteries et les charges par la collecte informations sur la tension de batterie et de connaître les minimum ( $V_{min}=11.6$  approximation 22% chargé) et maximale ( $V_{max}= 12.95$  .approximation 100% chargé) des valeurs acceptable pour la tension de la batterie. Il se compose de deux commutateurs.

Le premier interrupteur, sur le côté du module PV, est ouvert que si la tension de la batterie devient plus grande que  $V_{max}$  et restera ouvert jusqu'à ce que la tension de la batterie a chuté à la tension critique.

Le deuxième interrupteur, sur le côté de la charge, est ouvert si la tension de batterie descend en dessous de  $V_{min}$  et restent dans cet état jusqu'à ce que le tension a rebondi à la tension critique .

Pour protéger la batterie contre le courant supplémentaire quand la batterie est complètement chargée, une faible résistance et un interrupteur qui est ouvert à moins que la batterie soit complètement facturée et le module PV est la prestation actuelle. L'état des interrupteurs:

Etat de l'interrupteur ouvert = 0 et ;état de l'interrupteur fermé = 1.

Le schéma fonctionnel pour le système étudié est montré dans la Fig. (IV - 24)

Le schéma pour Block de régulateur en série est montré dans la Fig. (IV - 25)

Le bloc de commande des commutateurs peut être vu dans la Fig. (IV - 26) .

La tension de la batterie est passé à travers Plusieurs comparer aux blocs constante, dont la sortie 1 si la condition est vraie et 0 si la condition est fausse.

Ces valeurs sont ensuite entrés dans la table de vérité le long avec l'état antérieur de l'interrupteur

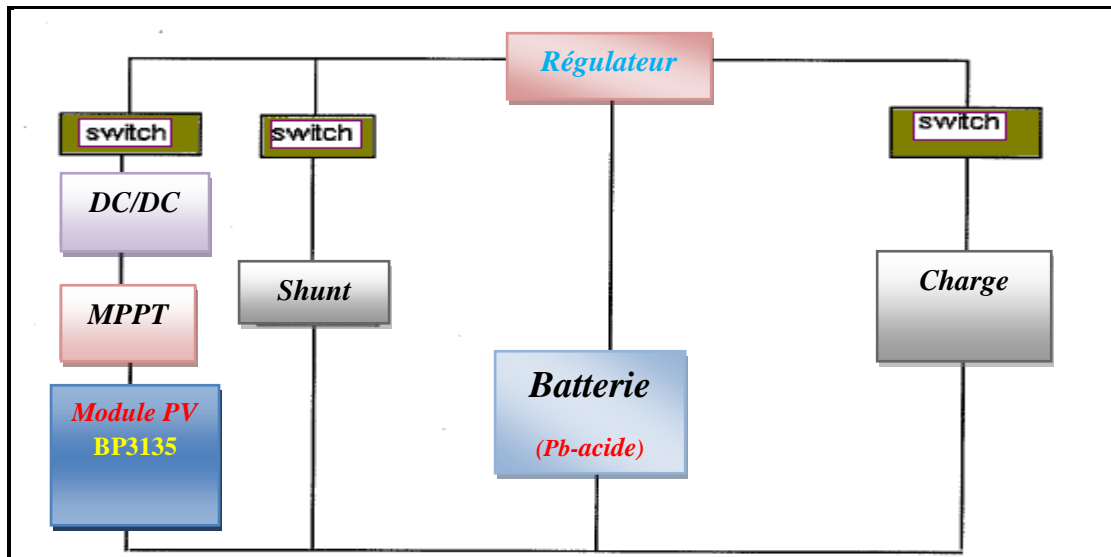


Fig. (IV - 24) : Le schéma fonctionnel pour le système étudié.

La figure suivante représente la position des interrupteur (Switch A et B) au niveau de régulateur ;

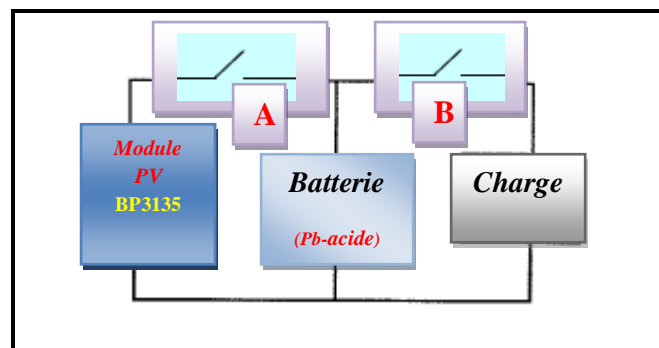


Fig. (IV - 25) : Block de régulateur en série

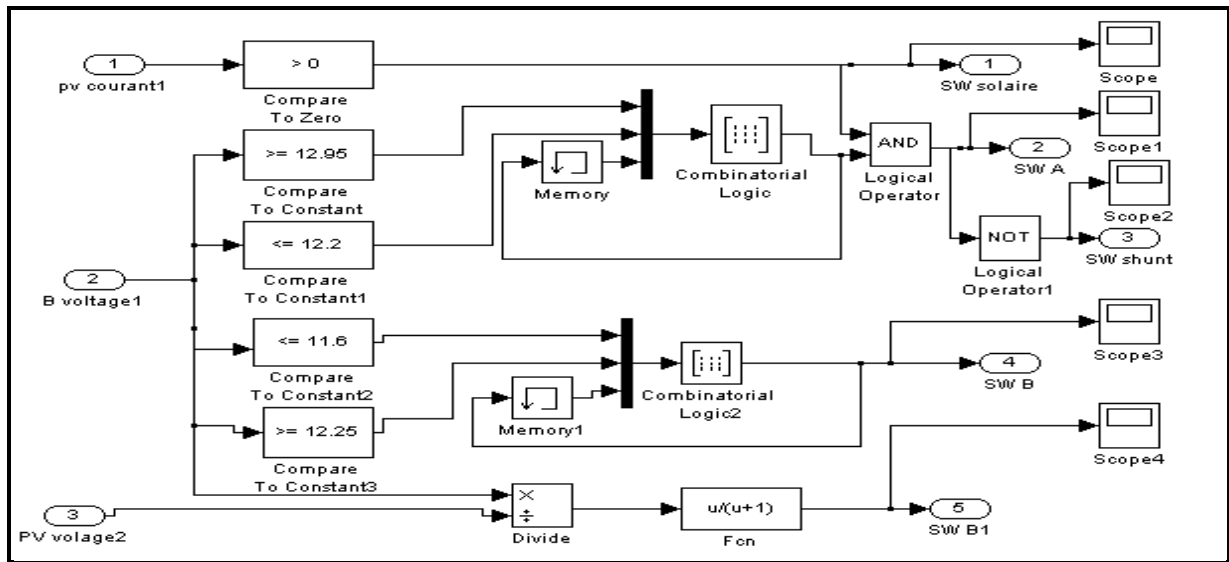


Fig. (IV - 26) : Le bloc de commande des commutateurs

### IV-9- Résultat globale d'un système PV :

Pour cette étape on va prendre les conditions de simulation suivant :

Première étape : pour un jour ensoleillé (irradiation varie entre 0 à 1000 W /m<sup>2</sup>)

Deuxième étape : pour un jour moins ensoleillé (irradiation varie entre 0 à 400 W /m<sup>2</sup>)

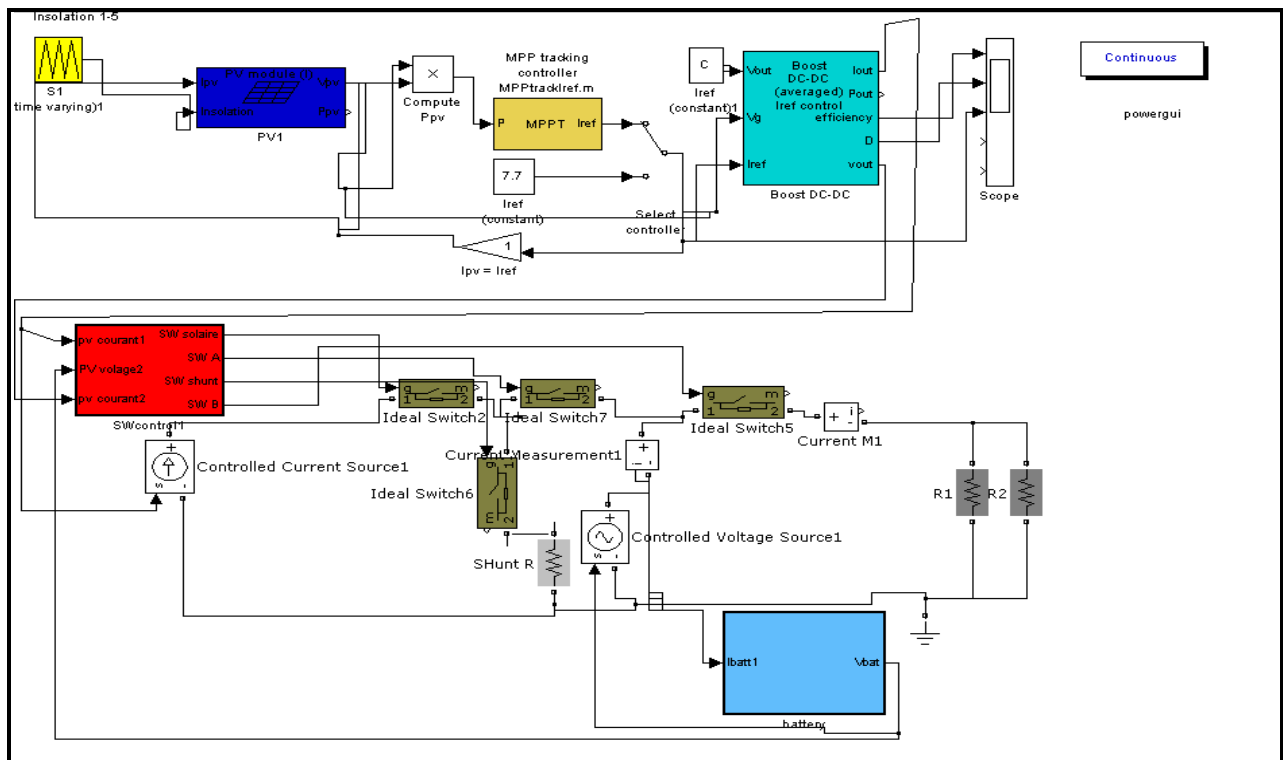


Fig. (IV - 27) : Bloc globale d'un système PV autonome

**IV-9- 1- pour la journée ensoleillée :** D'après les conditions initiale : ( $\Psi$  compris entre  $(0W/m^2$  ET  $1000W/m^2$ ),  $T= 25C^\circ$ ). On trouve les résultats de simulation suivants :

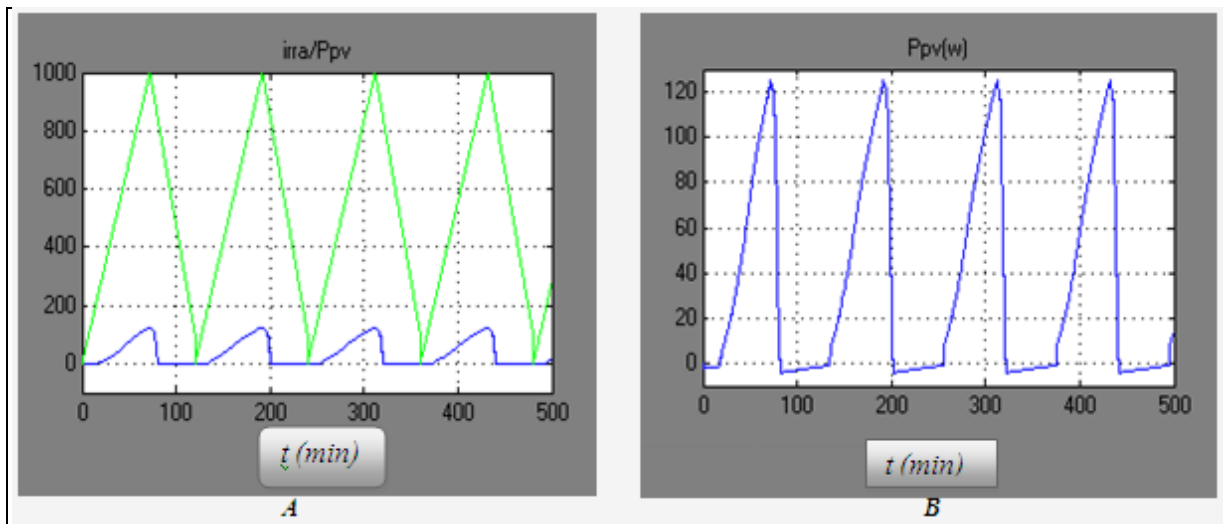


Fig. (IV - 28) : A. Irradiation et Ppv – B. la puissance du module PV

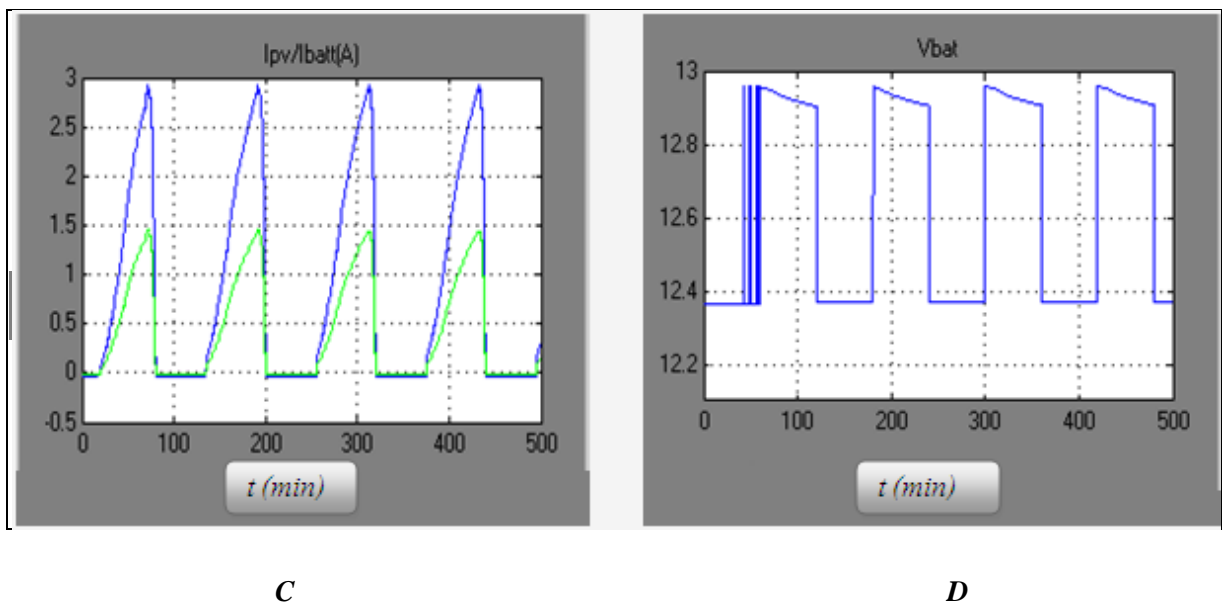


Fig. (IV - 29) :C . Le courant Ipv et Ibatt – D. la tension Vbat



## IV-9-2- pour la journée nuageuse :

D'après les conditions initiale : ( $\Psi$  compris entre  $(0W/m^2$  ET  $400W/m^2$ ),  $T= 25C^\circ$ ). On trouve les résultats de simulation suivants :

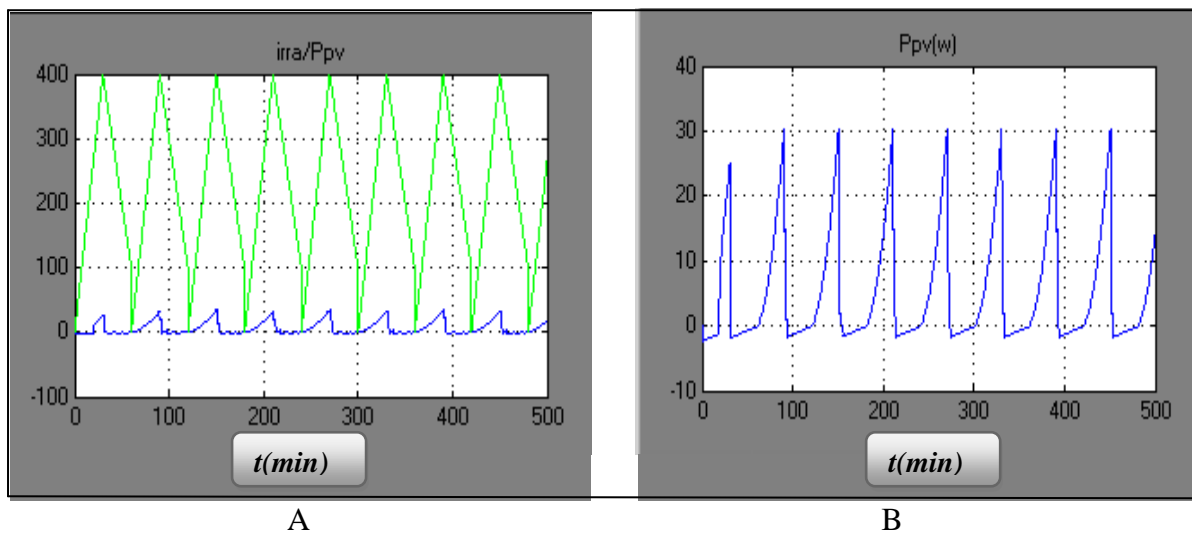


Fig. (IV - 30) : A. Irradiation et Ppv – B. la puissance du module PV

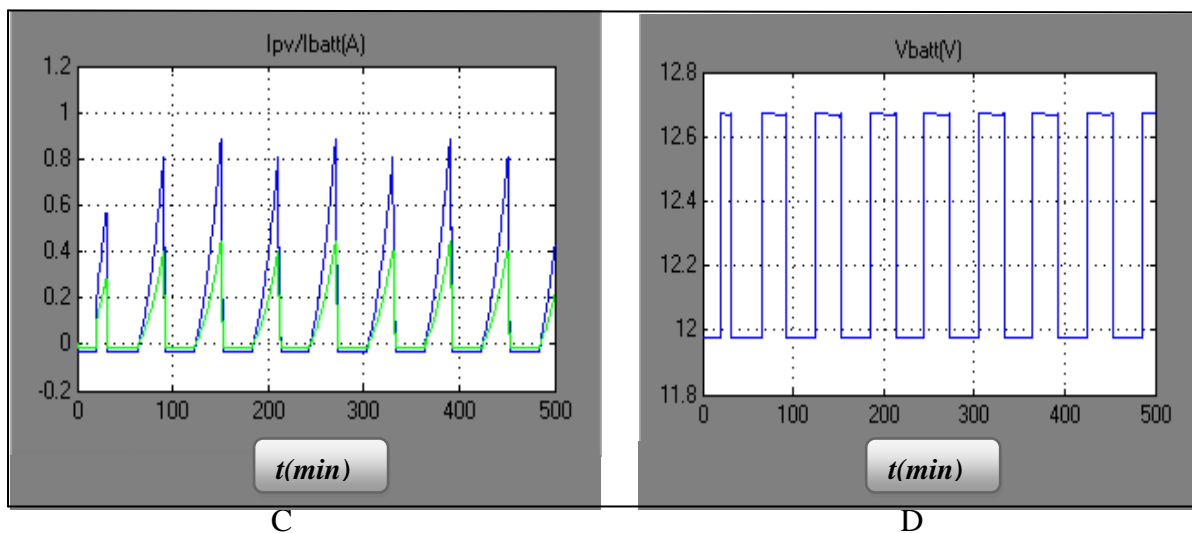


Fig. (IV - 31) : C. Le courant Ipv et Ibatt – D. la tension Vbatt

D'après les résultats de simulation on remarque que pendant la journée ensoleillée et d'après l'augmentation d'irradiation à  $(1000 w /m^2)$ , il y a une augmentation de puissance et le courant fournie par le module PV Qui arrive jusqu'à  $(135 w$  et  $3A)$ , qui correspond aussi une augmentation de la tension de batterie (étape de charge de batterie jusqu'à  $12.95 V$  ),et d'alimentation de la charge ou les consommateurs (les deux résistances d'après l'ouverture de l'interrupteur entre le module et la batterie. Pendant la décroissant de l'éclairement la batterie

décharge et alimenté les consommateurs. Pour la journée moins ensoleillé on remarque aussi les mêmes étapes mais à des valeurs faible.

**IV- 10- Conclusion :**

Globalement la simulation a permis d'évaluer le comportement général de l'ensemble des Composants. A première vue, il semble que le fonctionnement de cette chaîne énergétique soit Possible.

L'utilisation d'un régulateur permet de faire fonctionner les GPV à leur meilleur rendement, cependant il nécessite l'utilisation d'un convertisseur DC/DC aux bornes des batteries.

Les résultats obtenus semblent cohérents, montrent que le fonctionnement conjoint des éléments est possible, mais ne permettent pas encore de conclure sur la définition du système le plus performant.

**Bibliographie :**

[1]: Hoang Le-Huy : Introduction à MATLAB et Simulink : Université Laval, Québec, CANADA, Septembre 1998.

[2]: BP Solar BP SX150 - 150W Multi-crystalline Photovoltaic Module Datasheet, 2001. [3] : Yann Pankow : « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », thèse de doctorat, Ecole doctorale de L'ENSAM ED 432, Lille, 2004.

**Conclusion générale :**

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avéré une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque.

Dans la première partie, nous avons exposé les fondements nécessaires à la Compréhension du sujet. Nous avons rappelé des notions sur le rayonnement solaire, les multiples types et leur application dans le champ photovoltaïque. Puis nous avons expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques, leurs particularités essentielles ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. En plus d'une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement. Nous n'avons pas omis aussi de signaler les modules photovoltaïques et leurs associations

En ce qui concerne la deuxième partie, le caractère intermittent de l'énergie solaire étant un des ses principaux inconvénients pour son utilisation permanente ainsi il s'avère indispensable

d'emmagasiner une partie de l'énergie produite.

De ce fait, nous avons tenté de mettre en exergue, de manière critique un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de coût

qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Pour réaliser cela, on dénombre plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur.

Dans la troisième partie, l'élaboration de chaque composant du système photovoltaïque Complet a été élaboré à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, le stockage batteries).

Cette modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les Paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours Travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les Pertes en énergie produite.

Dans la dernière partie, nous avons exposé les résultats de simulations obtenus par la modélisation de la cellule, du module pv, du hacheur et de la batterie.

# ANNEX : 01



## BP 3135

135 Watt Photovoltaic Module

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride multicrystalline silicon cells.

### Performance

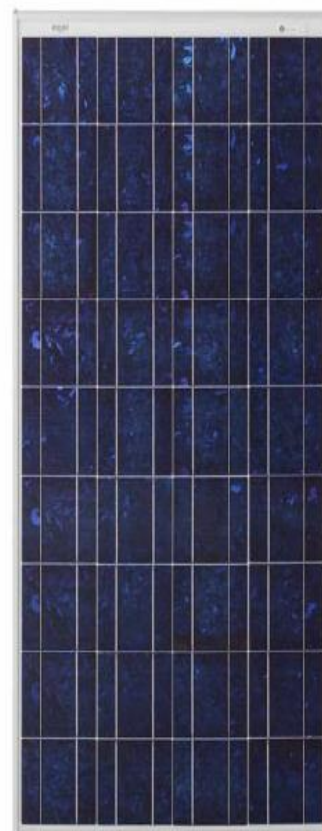
Rated power ( $P_{max}$ )	135W
Power tolerance	$\pm 5\%$ (BP3135) $\pm 3\%$ (BP3130 & BP3125) and $\pm 3\%$ (BP3115 & BP3110)
Nominal voltage	12V
Limited Warranty <sup>1</sup>	25 years

### Configuration

<b>S</b> BP 3125S	Clear universal frame with LoPro J-Box and polarized Multicontact (MC) connectors
<b>J</b> BP 3125J	Clear universal frame and standard J-Box

### Electrical Characteristics<sup>2</sup>

	BP3135	BP3130	BP3125	BP3115	BP3110
Maximum power ( $P_{max}$ ) <sup>3</sup>	135W	130W	125W	115W	110W
Voltage at Pmax ( $V_{mp}$ )	17.4V	17.4V	17.4V	17.1V	16.9V
Current at Pmax ( $I_{mp}$ )	7.7A	7.5A	7.2A	6.7A	6.5A
Warranted minimum $P_{max}$	128.2W	126.1W	121.3W	109.3W	104.5W
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	8.4A	8.2A	8.1A	7.5A	7.4A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	22.1V	22.0V	22.0V	21.8V	21.6V
Temperature coefficient of $I_{sc}$	(0.065 $\pm$ 0.015)%/°C				
Temperature coefficient of $V_{oc}$	-(80 $\pm$ 10)mV/°C				
Temperature coefficient of power	-(0.5 $\pm$ 0.05)%/°C				
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m <sup>2</sup> ; wind 1m/s)	47 $\pm$ 2°C				
Maximum series fuse rating	15A (S); 20A (J)				
Maximum system voltage	600V (US NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating) 1000V (IEC 61215 rating)				



### Mechanical Characteristics

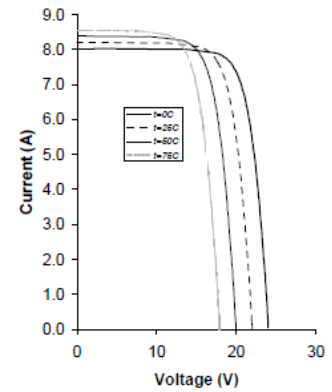
Dimensions	<b>S,J</b>	Length: 1510mm (59.4")	Width: 674mm (26.5")	Depth: 50mm (1.97")
Weight	<b>S,J</b>	12.0 kg (26.5 pounds)		
Solar Cells	<b>S,J</b>	36 cells (156mm x 156mm) in a 4x9 matrix connected in series		
Output Cables	<b>S</b>	RHW AWG# 12 (4mm <sup>2</sup> ) cable with polarized weatherproof DC rated Multicontact connectors; asymmetrical lengths - 900mm (-) and 800mm (+)		
Junction Box	<b>J</b>	J-Version junction box with 6-terminal connection block; IP 65, accepts PG 13.5, M20, ½ inch conduit, or cable fittings accepting 6-12mm diameter cable. Terminals accept 2.5 to 10mm <sup>2</sup> (8 to 14 AWG) wire.		
Diodes	<b>S,J</b>	<b>IntegraBus™</b> technology includes Schottky by-pass diodes integrated into the printed circuit board bus		
Construction	<b>S,J</b>	Front: High-transmission 3mm (1/8 <sup>th</sup> inch) tempered glass; Back: Polyester; Encapsulant: EVA		
Frame	<b>S,J</b>	Clear anodized aluminum alloy type 6063T6 Universal frame; Color: silver		

1. Module Warranty: 25-year limited warranty of 80% power output; 12-year limited warranty of 90% power output; 5-year limited warranty of materials and workmanship. See your local representative for full terms of these warranties.
2. These data represent the performance of typical BP 3125 products, and are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (STC.)
3. During the stabilization process that occurs during the first few months of deployment, module power may decrease by up to 3% from typical  $P_{max}$ .

## Quality and Safety

<b>ESTI</b>	Module power measurements calibrated to World Radiometric Reference through ESTI (European Solar Test Installation at Ispra, Italy)
<b>CE</b>	Manufactured in ISO 9001-certified factories; conforms to European Community Directives 89/33/EEC, 73/23/EEC, 93/68/EEC; certified to IEC 61215
<b>TUV</b>	Framed modules certified by TÜV Rheinland as Safety Class II (IEC 60364) equipment for use in systems up to 1000 VDC
<b>UL</b>	Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating)
<b>FM</b>	Approved by Factory Mutual Research in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations (U)

BP 3130 I-V Curves

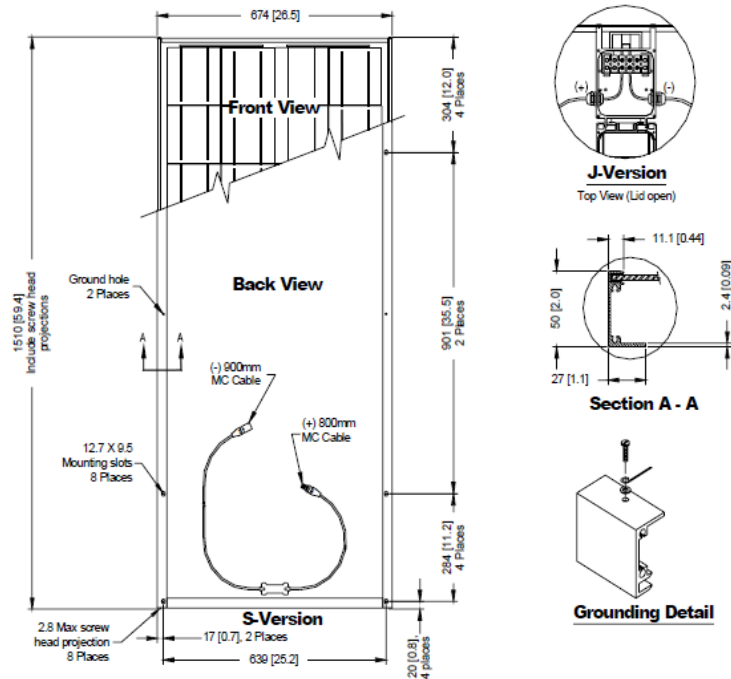


## Qualification Test Parameters

Temperature cycling range	-40°C to +85°C (-40°F to 185°F)
Humidity freeze, damp heat	85% RH
Static load front and back (e.g. wind)	2,400 pa (50psf)
Front loading (e.g. snow)	5,400 pa (113psf)
Hailstone impact	25mm Ø (1 inch) at 23 m/s (52mph)

## Module Diagram

Dimensions in brackets are in inches. Un-bracketed dimensions are in millimeters. Overall tolerances ±3mm (1/8")



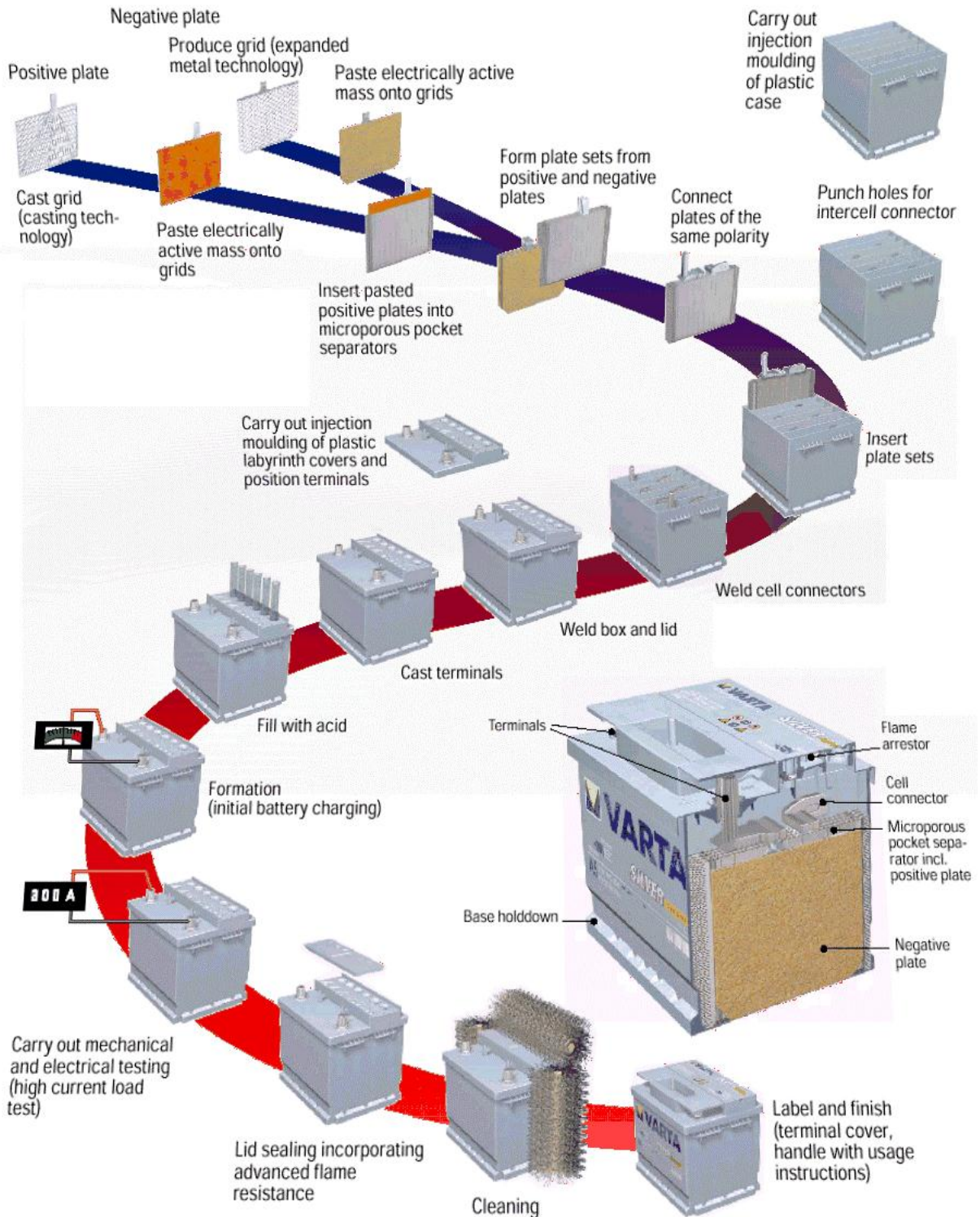
Included with each module: self-tapping grounding screw, instruction sheet, and warranty document.

Note: This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject to change without notice. Additional information may be found on our web site: [www.bpsolar.com](http://www.bpsolar.com)

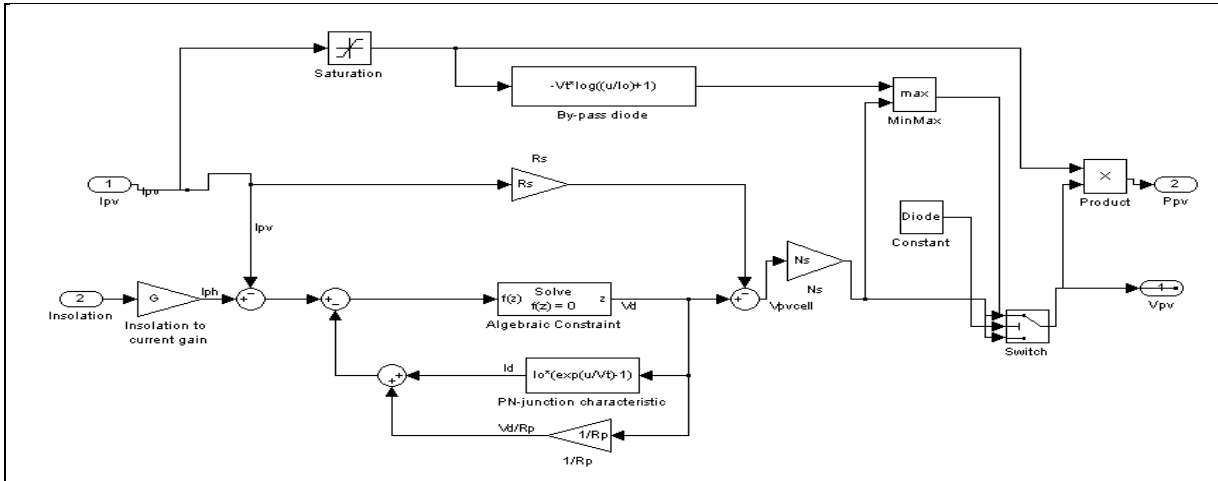


# ÉTAPES DE FABRICATION D'UNE BATTERIE

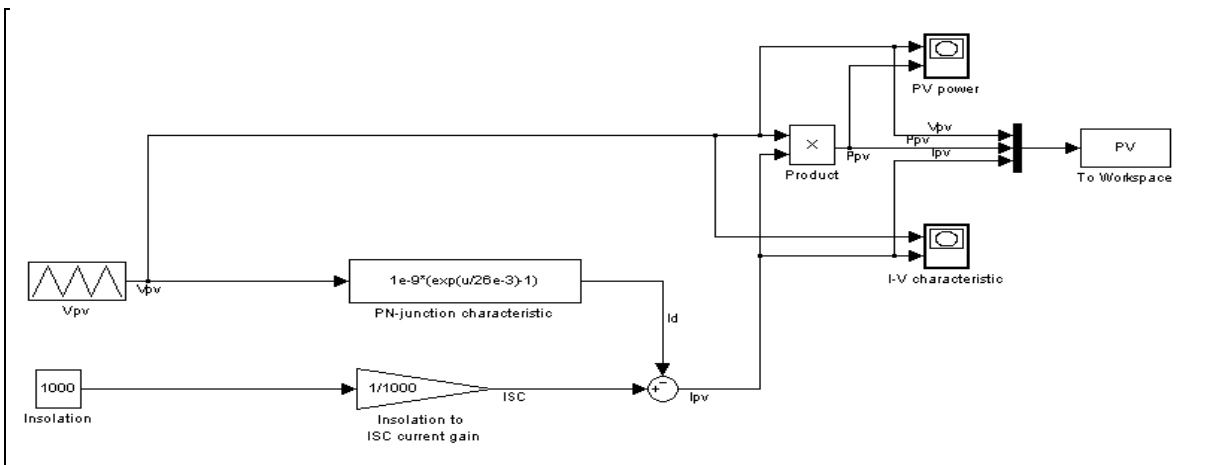
## Assembly and Construction of a Starter Battery



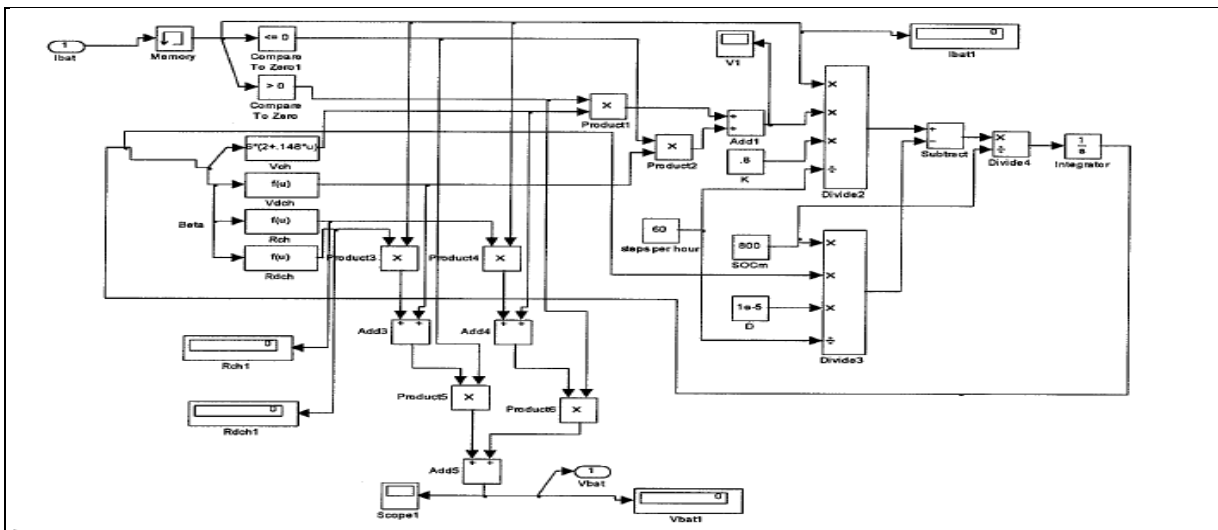
# ANNEX : 03



*Block de module pv sous simulink*



*Block de cellule pv édiale sous simulink*



*Block de batterie sous simulink*

**Résumé** : la production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours « sans soleil » et pour mieux adapter le système pv en fixant la tension de système. Dans ce mémoire, une étude théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le système de stockage électrochimique à l'aide de batterie d'accumulateur sera présenté. la deuxième partie est une modélisation des différents éléments qui constituent le système. Une stratégie de commande avancée est adaptée pour contrôler le système. Une simulation sous environnement du Logiciel MATLAB de la structure proposée.

**Abstract**: The energy production by the photovoltaic systems is very fluctuating and depends enormously on the weather conditions. This is why it will be necessary to think of storing this energy to restore it during the night and the days "without sun" and for better adapting generator statement by fixing the tension system says.

In this work a theoretical study on photovoltaic solar energy, as well as the system storage of the latter to knowing electrochemical storage using accumulators will be presented.

The second part is modeling the various components of the system. An advanced strategy is adapted to control the system. A simulation environment in MATLAB for the proposed structure.

**Key Words**: solar energy, energy storage, boost, accumulator battery.

**Mots Clés** : énergie solaire, stockage de l'énergie, hacheur, batterie d'accumulateur.

**ملخص** :

إن إنتاج الطاقة الفوتوضونية مهم جدا وهو مرتبط أساسا بواسطة ظروف مناخية هذا ما يجعلنا نفكر في تخزين هذه الطاقة لاستعمالها أثناء الليل أو الأيام «بلا شمس» ومن اجل التحكم في النظام الفوتوضوني نقوم بتثبيت توتر الجهاز.

في بحثنا نقوم بدراسة نظرية على الطاقة الشمسية الفوتوضونية إضافة إلى جهاز

تخزين الطاقة كيميائيا باستعمال بطاريات سنقوم باستعراضها.

الجزء الثاني تمثيل رياضي لمختلف العناصر التي تشكل هذا الجهاز تقنيات تحكم متطورة للتحكم في النظام .

وفي الاخير عرض بواسطة الماتلاب للنظام المقترح .

**كلمات دالة**: الطاقة الشمسية. تخزين الطاقة. بطارية محولات.