

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Electronique



Mémoire
Pour l'obtention du titre
Master en Electronique

THEME :

Stockage de l'énergie
Solaire

Présenté par :
M.ZEGGAOUI Said

Encadré par :
M. C.LARBES (ENP)

Promotion : 201 3
Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hacén Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu de m'avoir donné la patience de terminer ce travail.

*Mes remerciements les plus particuliers vont à mon encadreur
Monsieur **LARBES Cherif**
pour son rôle majeur dans l'élaboration
de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions
pertinentes, qu'il trouve ici mon vif témoignage en reconnaissance de
son
rôle important dans l'amélioration du manuscrit de ce mémoire.
Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de
participer au jugement de ce travail.*

*Je tiens à témoigner toute ma gratitude à Monsieur
HADDADI Mourad
Et Monsieur*

AIT-CHEIKH Salah Mohamed

*Je réserve une pensée toute particulière à mes chers parents qui
m'ont toujours soutenu et guidé tout au long de mes études. Qu'ils
trouvent, en ce mémoire, le modeste témoignage de ma profonde
reconnaissance.*

*Enfin, j'aimerais remercier ma famille, ainsi que mes amis qui m'ont
aidé et encouragé tout au long de mon travail.*

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.

Mots clés :

Énergie solaire, stockage de l'énergie, batterie d'accumulateur.

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.

Keywords:

Solar energy, energy storage, accumulator battery.

ملخص

إن إنتاج الطاقة الفوتوضوئية مهم جدا وهو مرتبط اساسا بواسطة ظروف مناخية هذا ما يجعلنا ن فكر في تخزين هذه الطاقة لاستعمالها أثناء الليل أو الأيام بلا شمس « ومن اجل التحكم في النظام » الفوتوضوئي نقوم بتنشيت توتر الجهاز.

في بحثنا هذا سنقوم بدراسة نظرية على الطاقة الشمسية الفوتوضوئية إضافة إلى جهاز تخزين الطاقة كيميائيا باستعمال بطاريات سنقوم باستعراضها.

كلمات البحث:

الطاقة الشمسية .تخزين الطاقة .بطارية.

Sommaire

Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque

I-Introduction.....	02
I-1-Généralité sur soleil.....	03
I-1-1- Rayonnement solaire.....	03
I-1-2- Spectre du rayonnement.....	04
I-1-3- Différents types de rayonnement.....	04
I-1-4- Orientation et inclinaison	05
I-2- Les systèmes photovoltaïques.....	05
I.2-1- L'isolé	05
I.2-2- Le connecté au réseau.....	06
I-3- Générateur photovoltaïque.....	06
I-3-1-Semi-conducteur	06
I-3-2-La jonction N-P.....	07
I-4- Les cellules photovoltaïques.....	08
I-4-1-Principe de fonctionnement.....	09
I-4-2-Les différentes types des cellules photovoltaïques.....	10
a) Silicium monocristallin.....	10
b) Silicium poly (ou multi-) cristallin	11
c) Silicium amorphe	12
I-4-3-Paramètres des cellules photovoltaïques.....	13

Sommaire

a) Courant de court-circuit ICC	13
b) Tension à circuit ouvert VCO	13
c) Puissance maximale	14
d) Rendement d'une cellule.....	14
e) Le facteur de remplissage.....	15
I-4-4- Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	16
I-5- Conclusion.....	17
Bibliographie	

Chapitre I :
Etude et présentation d'un
système photovoltaïque

Chapitre I : Etude 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 autonome « stand - alone » et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

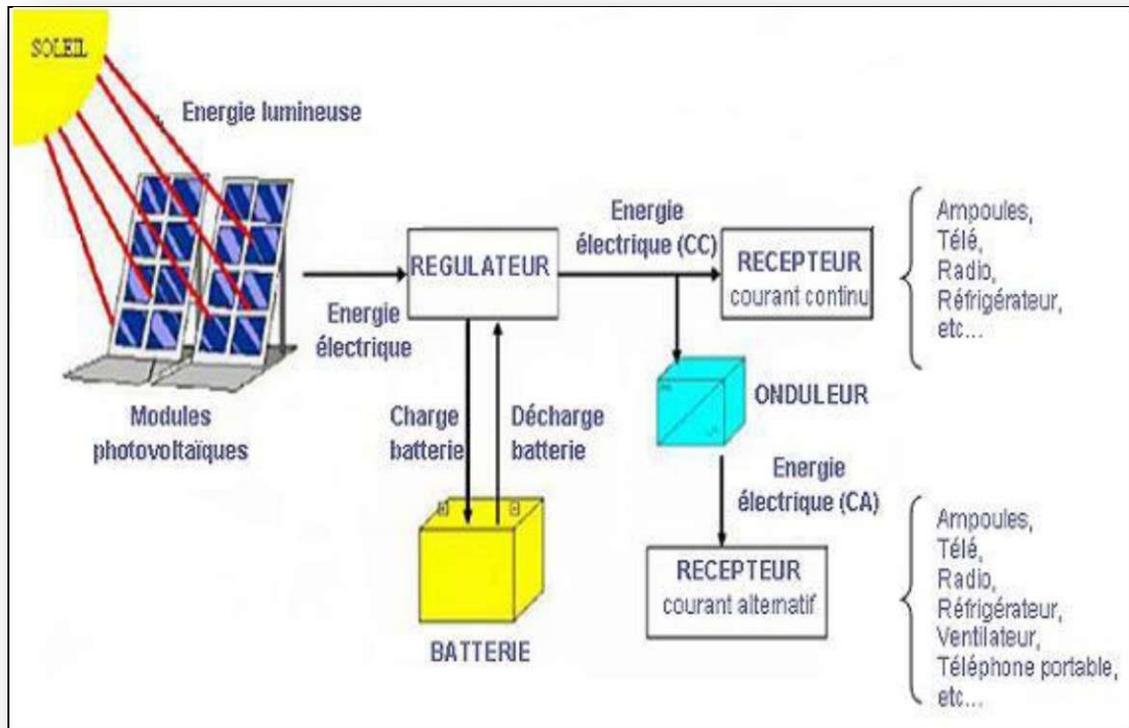


Fig. (I -1) : Système photovoltaïque autonome [2].

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 Lavoisier et Laplace, 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 présente 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 $D_s = 1.39 \cdot 10^9 \text{ m}$

✚ Diamètre de la terre $D_t = 1.27 \cdot 10^7 \text{ m}$

✚ Distance moyenne soleil- terre $L_{ts} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

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:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (1.1)$$

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

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

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

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

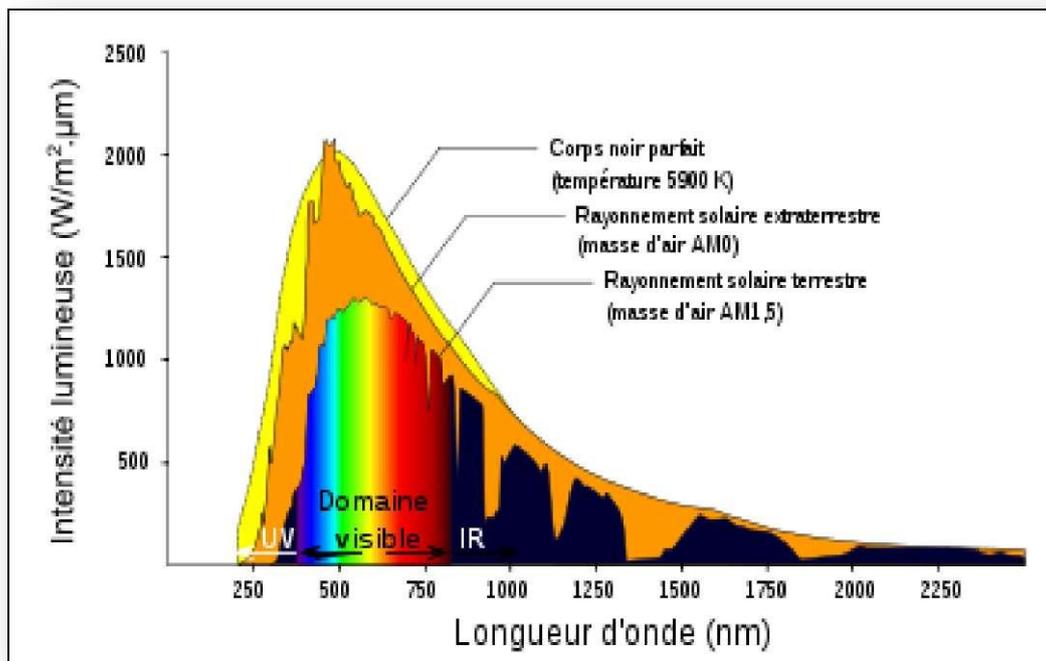


Fig. (I -2) : Le spectre du rayonnement solaire [5].

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-

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

✚ L'albédo :

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

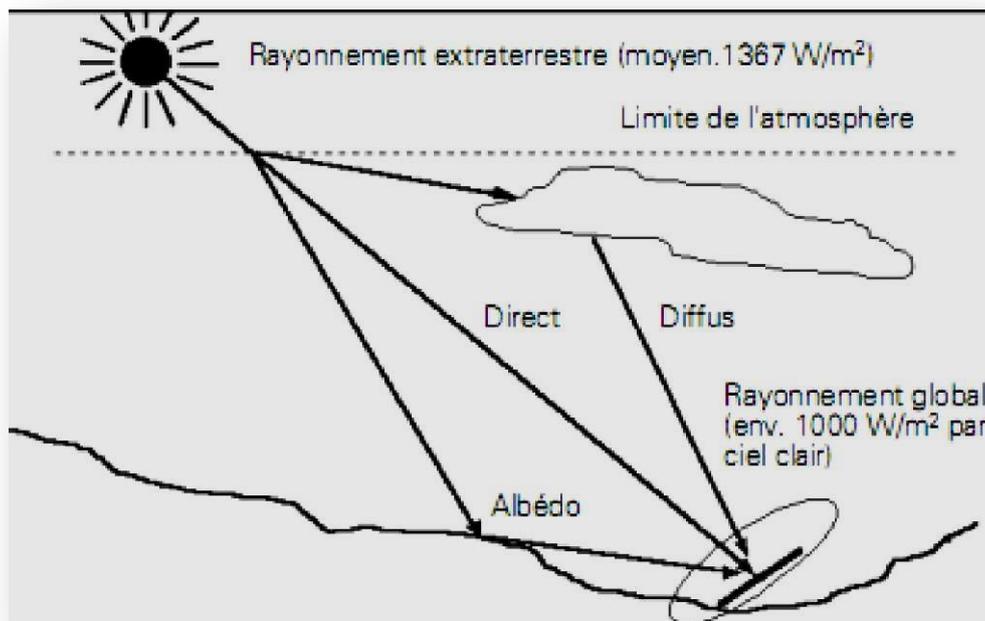


Fig. (I -3) : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale=direct diffus +albédo [6].

I.I.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.

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

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:

Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle = Latitude du lieu + 10°

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'inclinaison (Alsace-Lorraine) [8].

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

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 qui se situent 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.

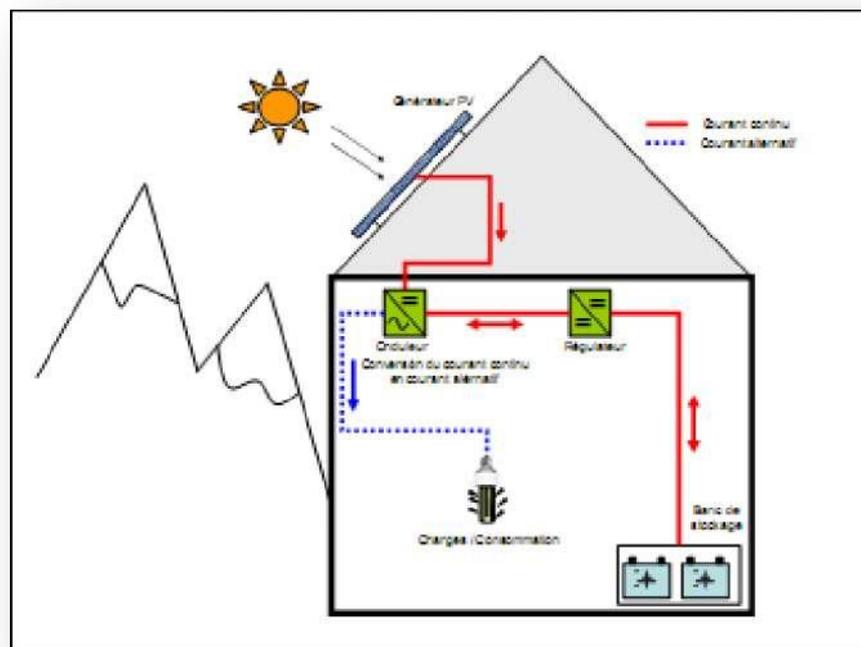


Fig. (I -4): Exemple de la structure d'un système PV autonome.

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.

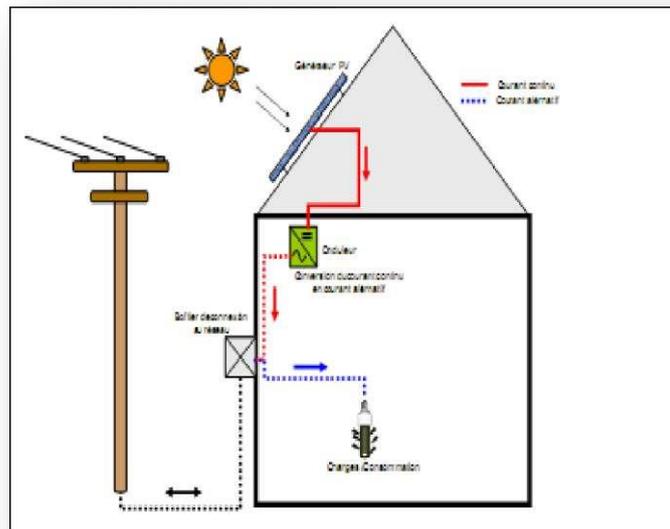


Fig. (I -5): Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [9]

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

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

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 recombiner 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].

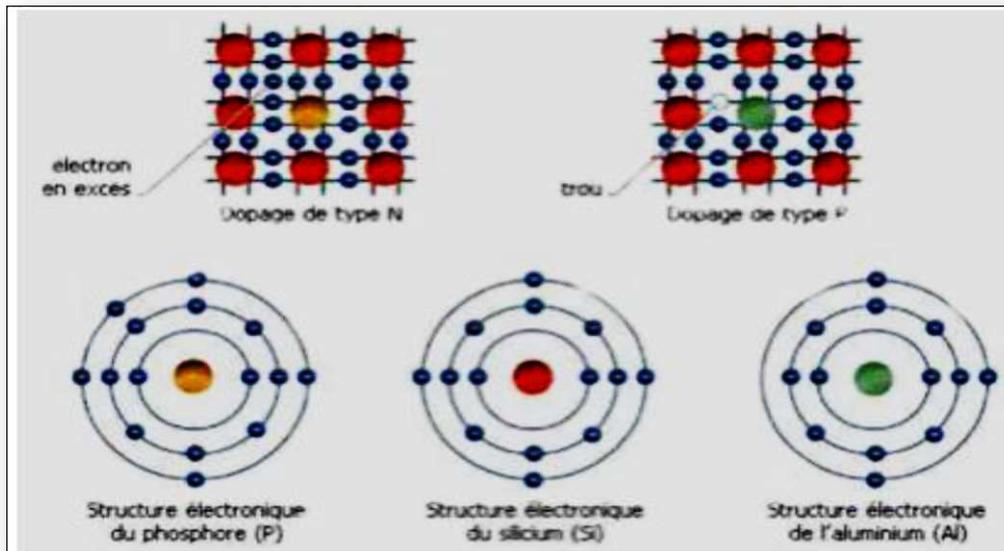


Fig. (I-6): Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) [12].

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)
-  tellure de cadmium (Cd Te)
-  le germanium (Ge)
-  le phosphore d'indium (InP)

Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque

La figure suivant représente les différentes technologies des cellules PV :

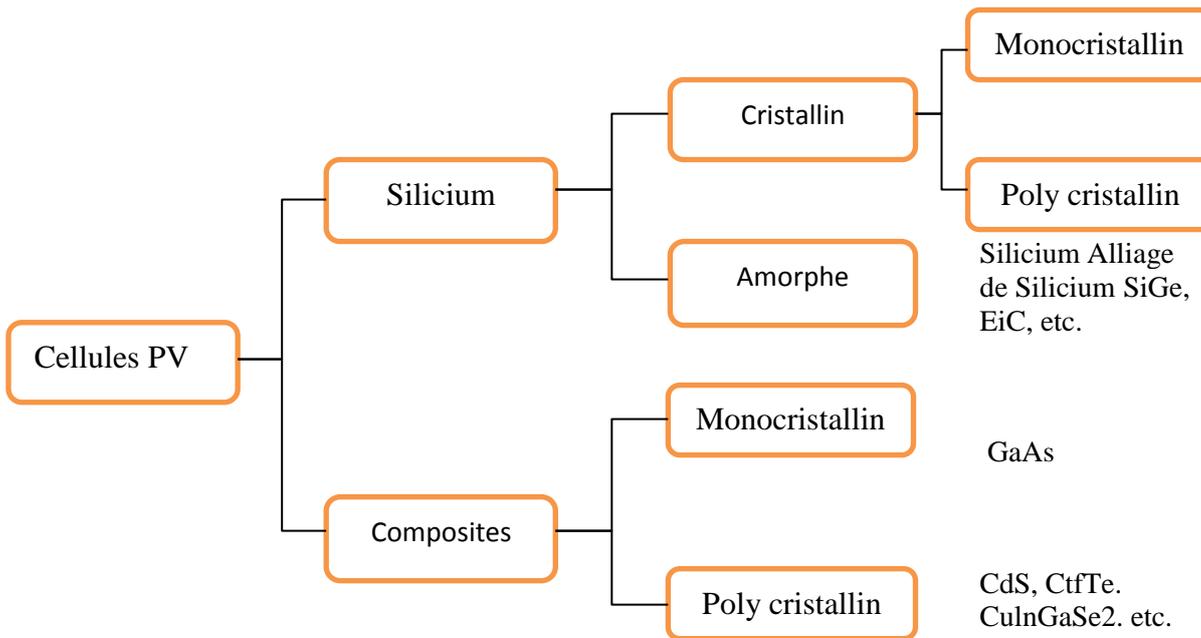


Fig. (I-7):Les différentes technologies [15].

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

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

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 qui circule. Figure (I -8) [16].

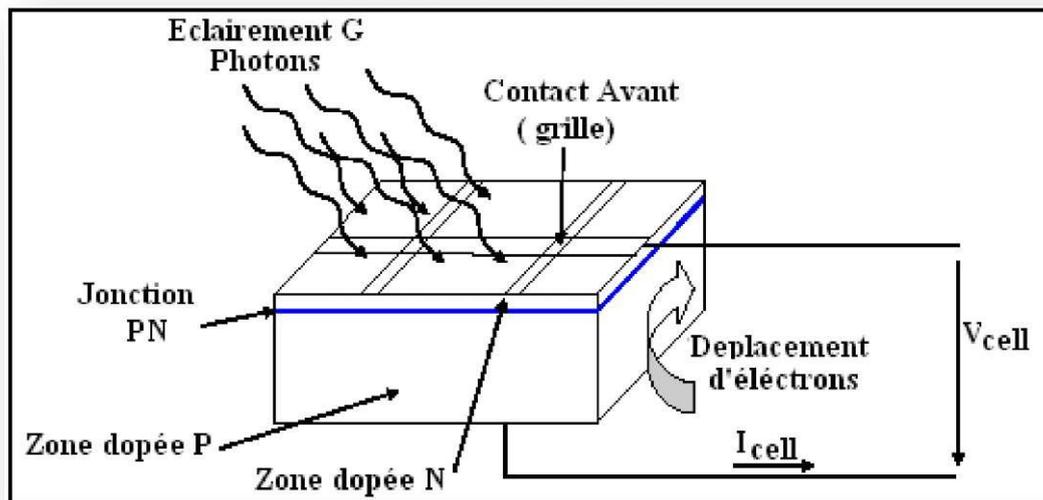


Fig. (I -8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [17].

Les cellules les plus répandues 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.

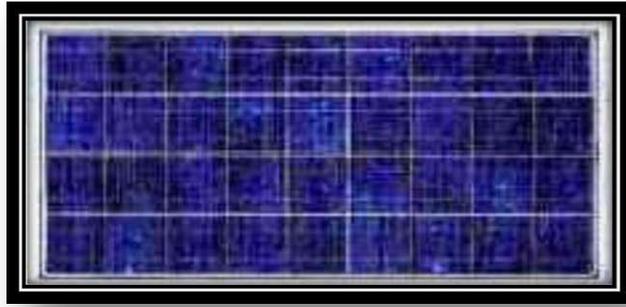


Fig. (I -9) : Cellule en silicium monocristallin [19].

Avantages :

- ✚ Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.
- ✚ Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- ✚ Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- ✚ 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.

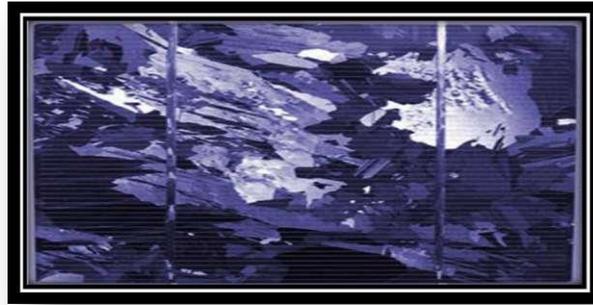


Fig. (I -10): Cellule en silicium polycristallin [19].

Avantage :

- ✚ Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC.
- ✚ Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- ✚ Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².
- ✚ 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.

- ✚ 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.

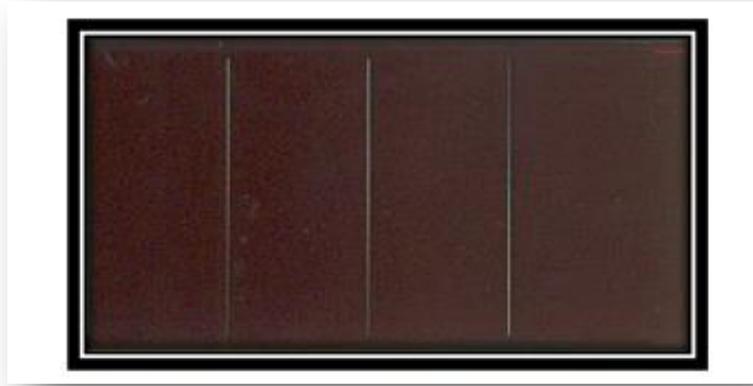


Fig. (I -11): Cellule silicium amorphe [19].

- ✚ Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (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_{CO} , P_{max} , A , ff et η), 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 :

$$V_{co}(I=0) = AU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (1.4)$$

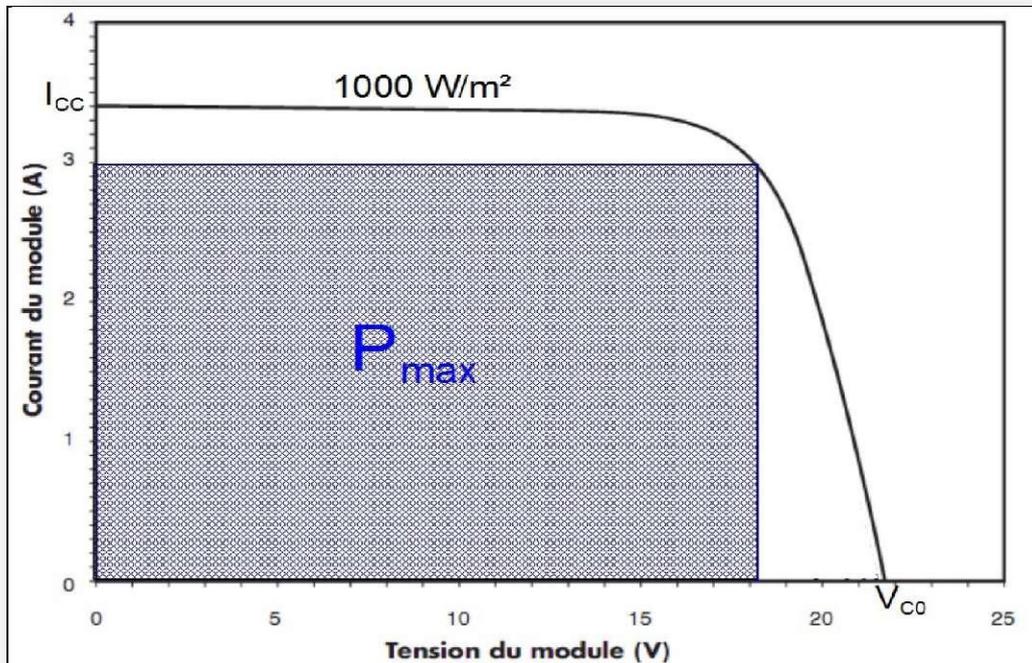


Fig. (I -12): Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m²

c) Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée **P_{max}**) pour un point de fonctionnement **P_{max}(I_{max}, V_{max})** de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}).

d) Rendement d'une cellule :

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

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

d) Rendement d'une cellule :

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

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

P s: 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 éclairement de **1000W/ m²**.

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 $V_{co} * I_{cc}$, correspondant à la puissance maximale idéale.

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

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).

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

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.

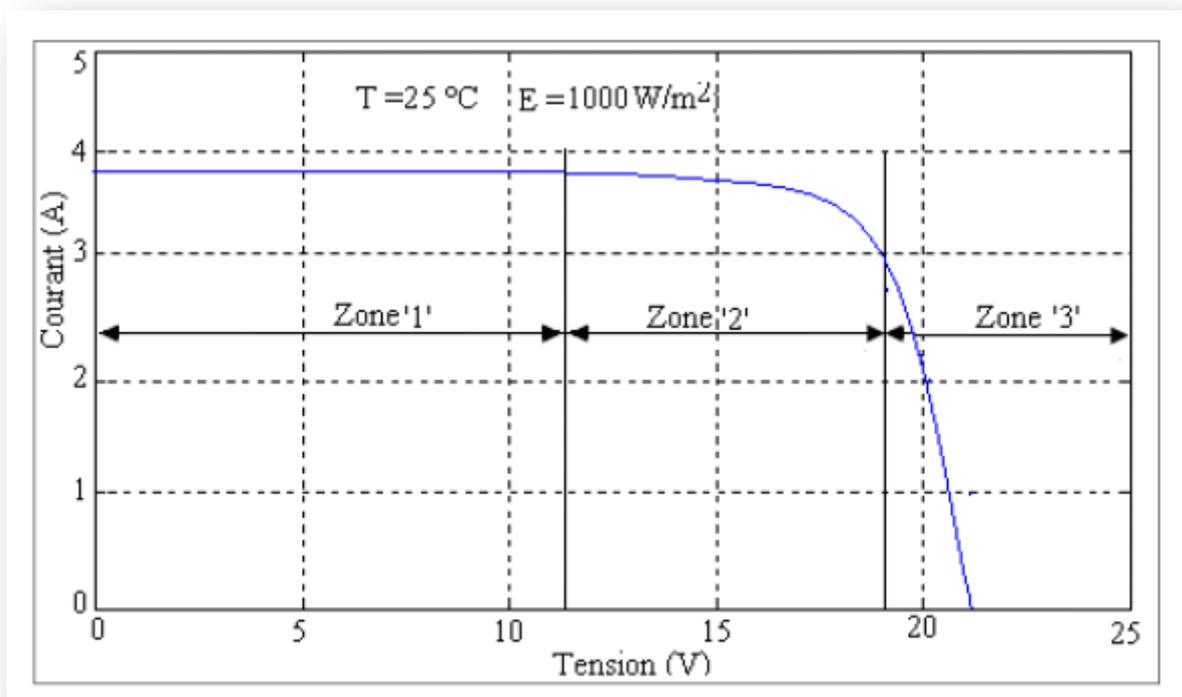


Fig.(I -13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque [20].

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.

I-5- 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/photovoltaïque-hors-re...

[3]: Belhadj Mohammed : «Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque

Autonome »,Mémoire .de.Magister2007/2008,Universitaire.De.Bechar.

[4]:A.kassewa , Tchapo.Singo : « Système d'alimentation photovoltaïque avec, stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri-Poincaré, Nancy-I-2006.

[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 Systèmes de conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse Doctorat en sciences,Université;deBatna.

[8]: 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.modélisation.d'une.cellule.solaire.», mémoire.de. magister,Université ;de.Bechar. 2008/2009,

[12]:<http://glloq69.free.fr/images/tpe/dopage.jpg> .

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

- [13]: «Les piles solaires, le composant et ces applications » Edition. Masson (1985).
- [14]: A. buyers : «les système photovoltaïques» article pdf guide, Canada 2002 .
- [15]: Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07 .
- [16]: M^{me}. Zaamta souad: « Réalisation d'un régulateur solaire à base de Microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des Accumulateurs » mémoire de magister Centre Universités.Larbi-BenM'hidi-OumEl-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 abdelmaliek : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister 2008, Université Mentouri de Constantine.

Sommaire

Chapitre II : Stockage de l'énergie Solaire

II-1-Introduction.....	2
II-2- Stockage de l'énergie.....	2
II-2-1 -Autonomie « sans apport solaire »	3
II-2-2-Principe du couplage photo-générateur batterie	4
II-2-3- Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système.....	4
II-2-4- Principales caractéristiques des accumulateurs.....	5
II-3- Technologies et Types d'accumulateurs	6
II-3-1-Les différents types de batteries au plomb	8
II-3-2-Les batteries au lithium	16
II-3-3-Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	17
II-3-4-Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H ₂)	18
II-3-5- Les accumulateurs Nickel-Métal-Hybride (Ni-MH)	18
II-3-6- Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn)	18
II-3-7- Les accumulateurs Zinc-halogènes.....	18
II-3-8- Les piles à combustibles.....	18
II-4- Différents couples électrochimiques les plus utilisés	19
II-5- Contrôle de charge.....	20
II-5-1- Les diodes anti retour	20
II-5-2- Fonctions d'un régulateur de charge	21
II-6- calcul d'un système avec stockage	23
Conclusion :	24

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 calculatrice, 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.

Stockage de l'énergie Solaire

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 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 V** continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible (<**10V**).

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 Ah** de **12 V** en série donneront **100 Ah-24 V**, et les mêmes en parallèle donneront **200 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 série (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, quel que 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)

Stockage de l'énergie Solaire

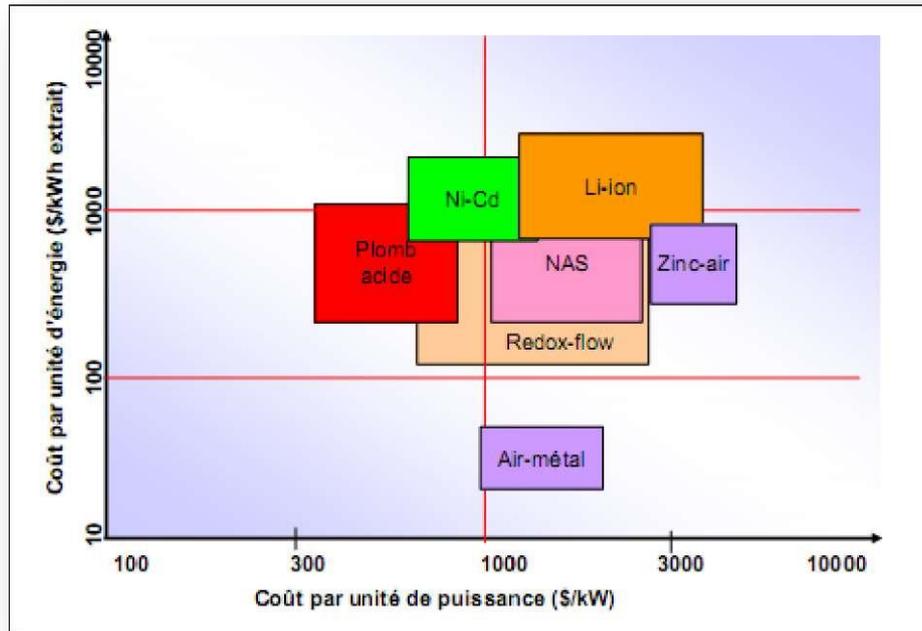


Fig. (II-1) : Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques [5]

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 coût 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 coût 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 l'application PV.

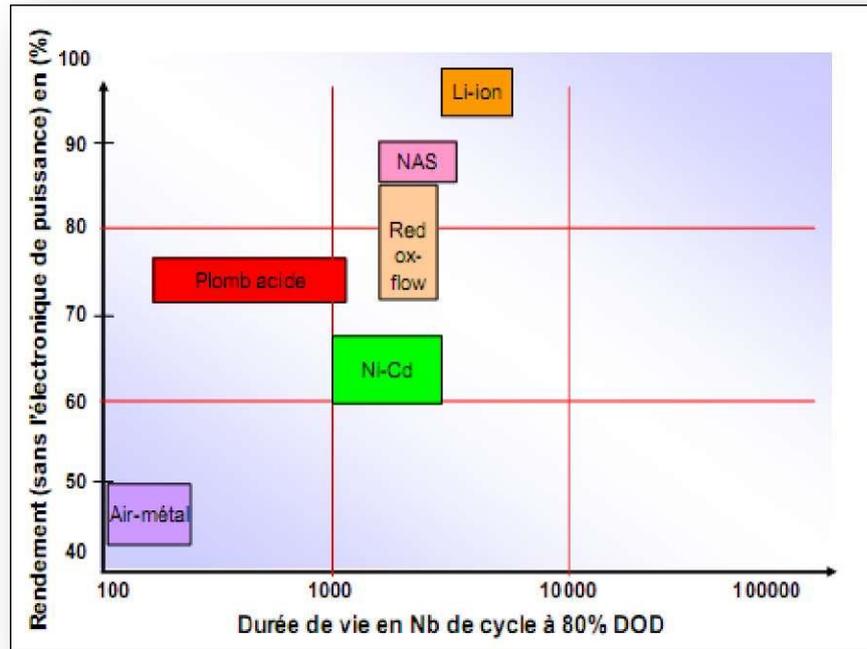


Fig. (II-2) : Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries [5]

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).

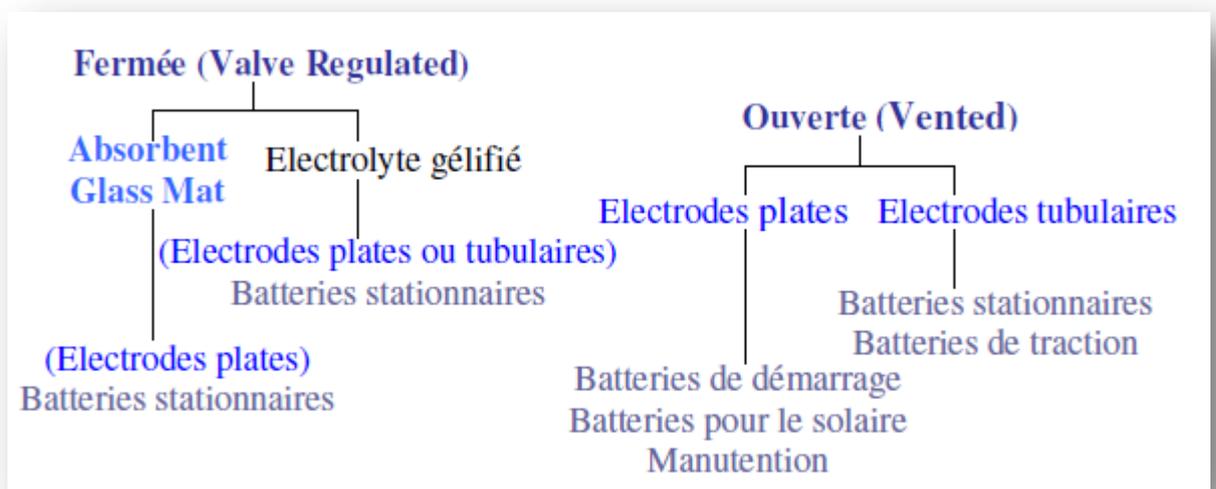


Fig. (II-3): les différents types de batteries au plomb [6].

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.

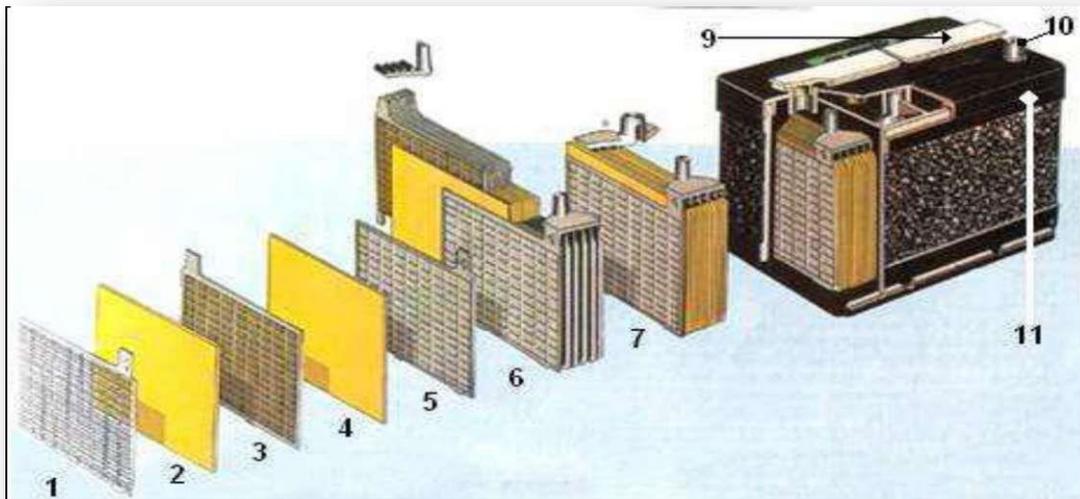


Fig. (II-4) : Construction d'une batterie monobloc [8].

1 : Grille.

2 : Séparateur.

3 : Plaque positive.

4 : Plaque négative.

Stockage de l'énergie Solaire

5 : Barrette.

6 : Faisceau négatif.

7 : Élément complet.

8 : Pont.

9 : Rampe de bouchons.

10 : Borne.

11 : bac.

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.

Stockage de l'énergie Solaire

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 quel que 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] :

Stockage de l'énergie Solaire

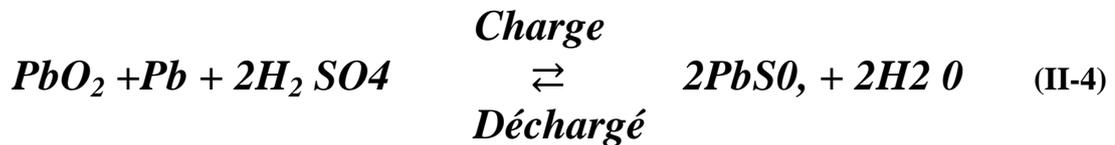
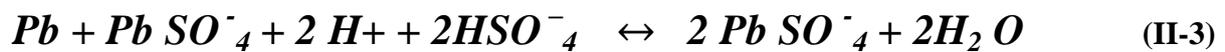
Electrode Positive:



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.

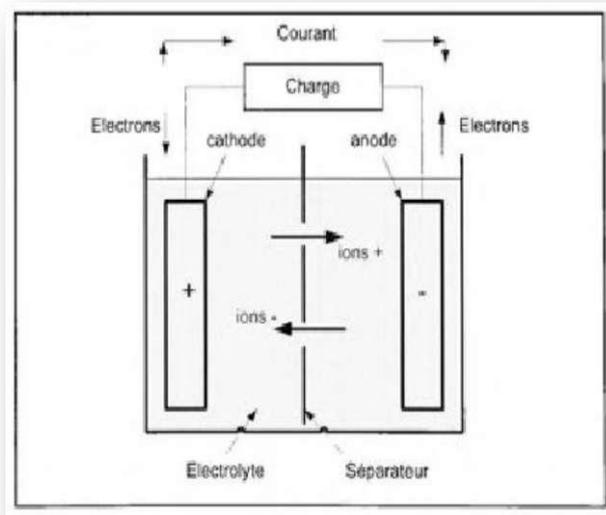


Fig. (II-5) : Cellule électrochimique (décharge)

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].

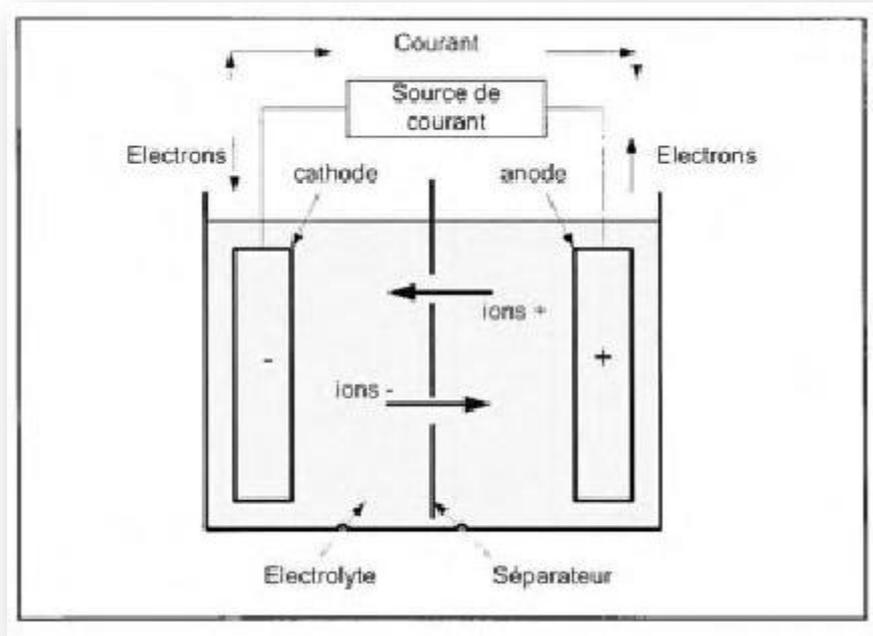


Fig. (II-6) : cellule électrochimique (charge)

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 essentiels 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 doivent 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].

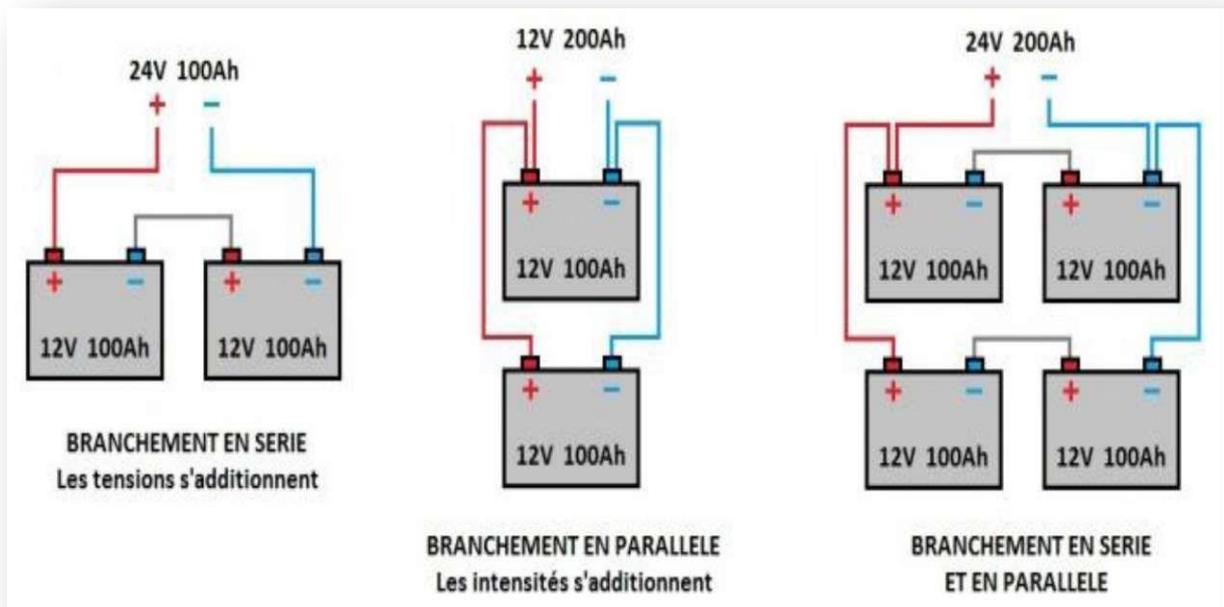


Fig. (II-7) : Connexion des batteries

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 : $ELI/LI^+ = - 3,04 \text{ V/ENH}$;
- ✚ 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.

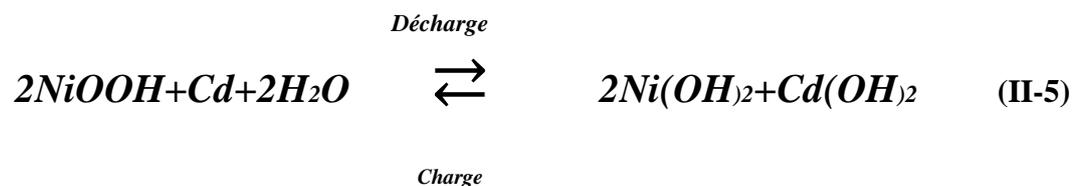
Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère [12].



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

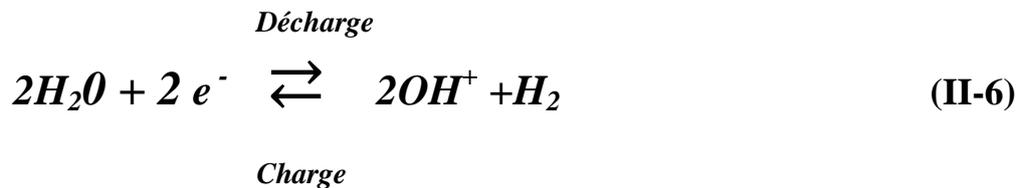
II-3-3-Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd) :

Ils offrent des performances supérieures au plomb en termes 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].



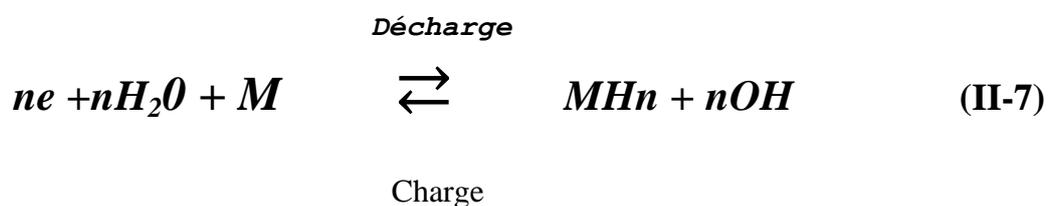
II-3-4-Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H₂) :

Depuis 1964, les piles H₂/O₂ 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⁺ 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.



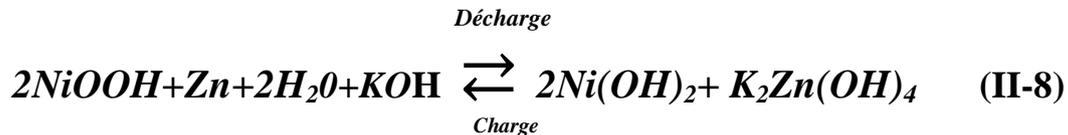
II-3-5- Les accumulateurs Nickel-Métal-Hybride (Ni-MH) :

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-Cl₂) et Zinc-Brome (Zn-Br₂). 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 en Wh/kg	Energie volumique en Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en pointe (massique) en W/kg	Durée de vie (nombre de recharges)	Autodécharge par mois
Plomb/acide	30 - 50	75 - 120	2,25 V	700	400 - 800	5 %
Ni-Cd	45 - 80	80 - 150	1,2 V		1 500 - 2 000	> 20 %
Ni-MH	60 - 110	220 - 330	1,2 V	900	800 - 1 000	> 30 %
Ni-Zn	70 - 80	120 - 140	1,65 V	1 000	> 1 000	> 20 %
Na-NiCl₂ (ZEBRA)	120	180	2,6 V	200	800	100 % (12 %/jour)
Pile alcaline	80 - 160		1,5 - 1,65 V		25 à 500	< 0,3 %
Li-ion	90 - 180	220 - 400	3,6 V	1 500	500 - 1 000	10 %
Li-Po	100 - 130		3,7 V	250	200 - 300	10 %
Li-PO₄ (lithium phosphate)	120 - 140	190 - 220	3,2 V	800	2 000	5 %
LMP (lithium métal polymer)	110	110	2,6 V	320		
Li-Air	1 500 - 2 500		3,4 V	200		
Ni-Li	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.

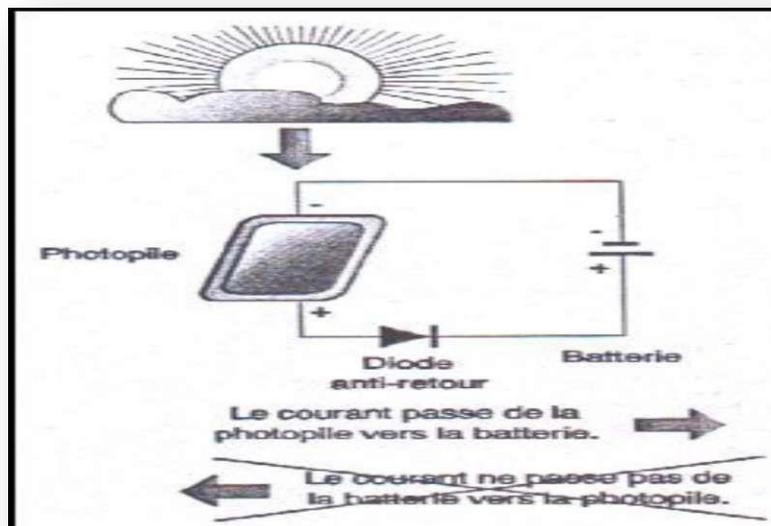


Fig. (II-8) : Principe d'une diode anti- retour.

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 allumer 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.

Stockage de l'énergie Solaire

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 suivant 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].

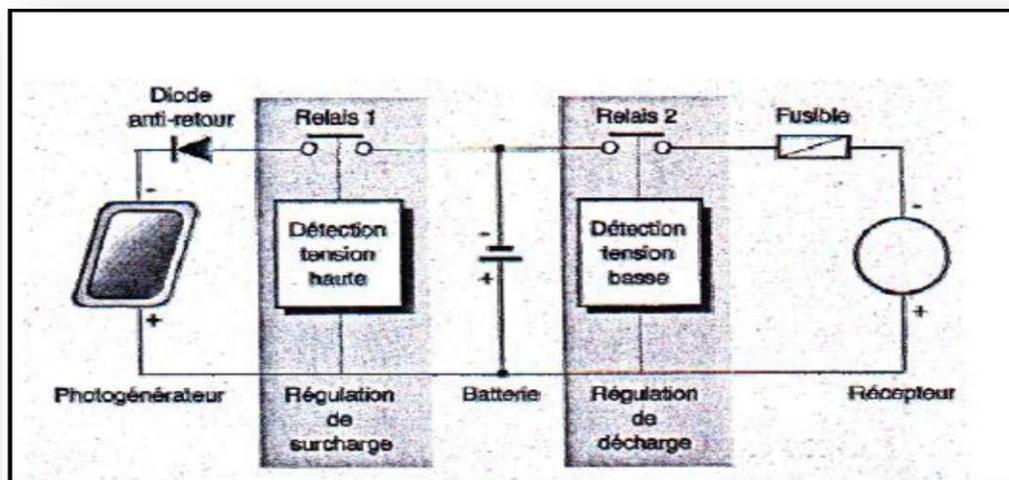


Fig. (II-9) : principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge [19].

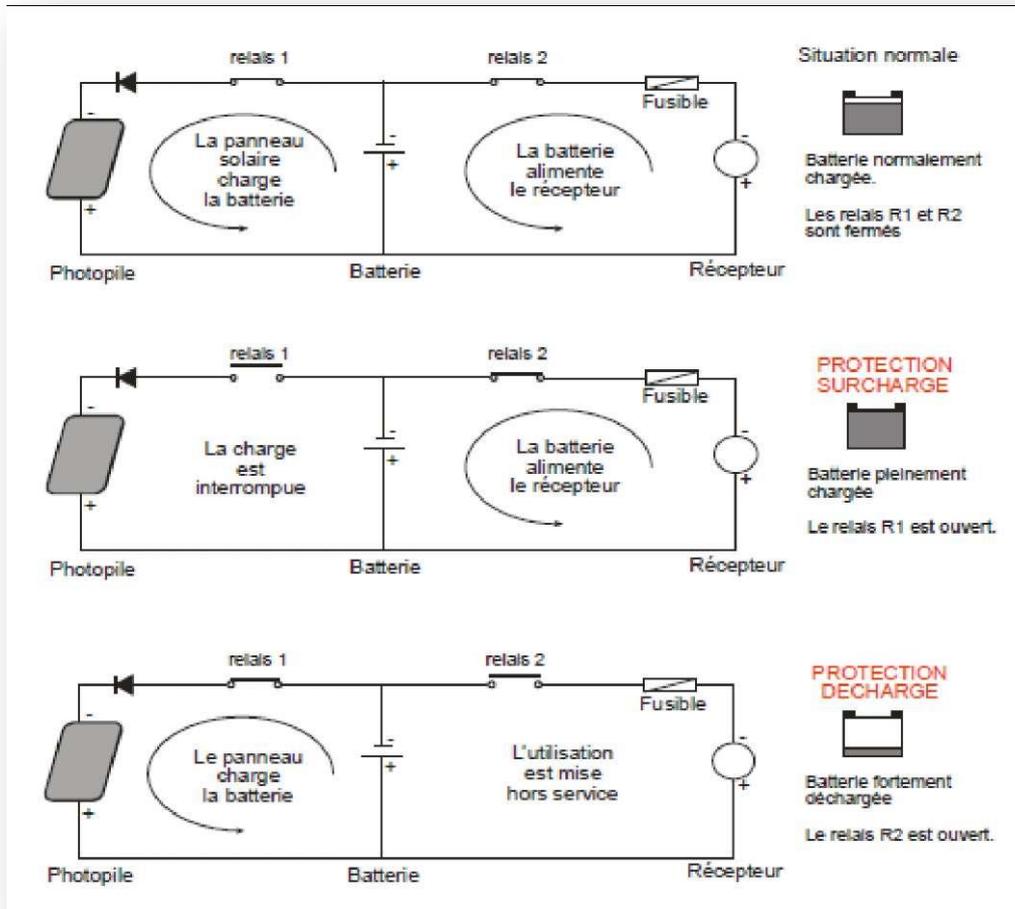


Fig. (II-9) : régulateur charge/décharge [19].

II-6- calcul 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.

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:

Stockage de l'énergie Solaire

$$C \text{ (Ah)} = \left(\frac{\text{conso du systeme 24 h (Ah)} * \text{Duree d auto en jours}}{0.6} \right)$$

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]:

Capacité utile = Capacité nominale * 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 super condensateur.

Bibliographie :

- [1]: Bendjellouli Zakaria : « Contribution a la modélisation d'une cellule solaire » Mémoire de Magister. Université de Bechar. 2008/2009,
- [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. Benyoucef : « 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 », Thèse 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 Magister, Universitaire De Bechar. 2007/2008,
- [10]: Linden. D. & Reddy, Thomas B. Handbook of Batteries. 3ème Edition. McGraw-Hill,1200 p.
- [11]: www.arebor-energie.fr/encyclopedie
- [12]: Julien labbé : « hydrogène L'électrolytique comme moyen de stockage D'électricité pour systèmes photovoltaïques isoles », l'école des mines de paris .décembre 2006.

Stockage de l'énergie Solaire

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

[14]: Bibliographie PDF chapitre 5 thèses 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.

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

[18]: http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique