

4.1 Nécessité et définition

L'énergie électrique est produite dans sa majorité par les énergies fossiles ou les énergies fissiles. Ces deux types présentent des inconvénients majeurs :

- Fossiles : Effet néfaste sur l'environnement
- Fissile : Insécurité.

Le recours aux énergies renouvelables peut remédier à ces problèmes. Mais elles ont aussi un problème qui se manifeste par la **production irrégulière et intermittente**. Chose qui représente l'un des obstacles à leur développement.

Le stockage est la solution. Il permet de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Donc il vise à répondre à quatre problématiques principales :

- a) la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment ;
- b) la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre ;
- c) la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel et
- d) la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local (cas des systèmes à injection aux réseaux).

Le stockage se caractérise par trois paramètres qui sont:

A) *la nature*

La nature du stockage est multiple et fonction du temps de décharge, de la puissance et de la durée requises. Le stockage peut être à usage:

- fixe (maisons);
- Mobile (moyens de transport).

B) *La capacité*

C'est la quantité d'énergie stockée; elle est liée directement à la durée de stockage. Elle peut varier de quelques heures (passage des nuages, le calme du vent, ...) à quelques jours (jours de faible ensoleillement, les jours de faible vent, ...).

- Le stockage est dit de faible capacité lorsque celle-ci est de l'ordre du kWh et de forte capacité si elle est au-delà de MWh. Dans ce cas, on parle de stockage massif de l'énergie.

C) *Le rendement*

Le rendement de stockage c'est le rapport de l'énergie cédée à l'énergie introduite.

4.2 Type de stockage

À ce jour, le stockage direct de l'énergie électrique n'étant pas possible, l'électricité est convertie en d'autres formes d'énergie qui est stockée puis récupérée et retransformée pour être utilisable. Selon la capacité de stockage et sa nature, on peut citer quelques types à savoir :

- D) Mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage (STEP), stockage par air comprimé (CAES);
- E) Electrochimique et électrostatique : batteries, condensateurs, supraconducteurs ;
- F) Chimique : hydrogène, méthanation, etc.

Dans ce cours on se limite au stockage par batterie au plomb.

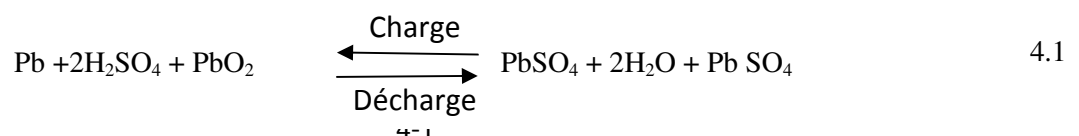
Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonome est en général assuré par les batteries dont les inconvénients majeurs sont la très forte valeur du rapport poids/énergie stockée (de 20 à 50 kg/kWh) et leurs coûts. Pour les systèmes de faible puissance, les batteries les plus utilisées sont en plomb-acide.

N. B. les autres types seront étudiés dans le semestre S9 dans le module de stockage .

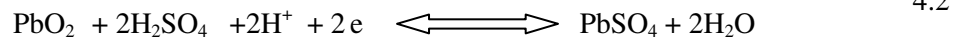
4.3 Batteries au plomb

4.3.1 Constitution

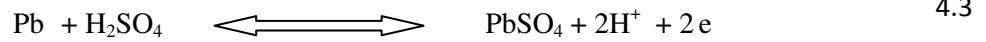
La batterie au plomb est constituée de deux électrodes. Le plomb pour l'électrode négative (Pb) et l'oxyde de plomb (PbO₂) pour l'électrode positive. Les électrodes sont plongées dans un électrolyte composé d'acide sulfurique dilué (H₂SO₄). Elle se comporte comme **une source** si on relie ses deux électrodes à une charge extérieure et on aura un courant qui circule. Elles se transforment en sulfate de plomb et l'acide se dilue; phénomène qui permet d'évaluer l'état de charge de la batterie en mesurant la densité d'acide. Elle se comporte comme **un récepteur (charge)** si on lui fournit un courant opposé au système, l'acide se concentre et les deux électrodes retournent à leurs états initiaux. Cette procédure peut être illustrée par les équations 4.1-4.3.



A l'électrode positive:



A l'électrode négative



4.3.2 Electrolyte

L'électrolyte constitue d'acide sulfurique dilué dans de l'eau distillée est un excellent transporteur d'ions. Comme il se transforme durant la charge ou la décharge, sa densité varie.

4.3.3 Système de batterie

Un système d'éléments de batterie à plomb est montré dans la figure 4.1a. Il est constitué de 12 éléments de 2V chacun.



Fig.4.1a : Système d'éléments de batterie

4.3.4 Association des batteries

Les éléments de batteries peuvent être associés soit en série ou en parallèle. Pour une association en série (fig. 4.1b) c'est la tension qui augmente tout en conservant la capacité globale égale à la capacité d'un élément. Pour une association en parallèle, la tension est la même que celle d'un rangé en série mais la capacité est égale à la somme des nombres de branches en parallèles (fig. 1.c).

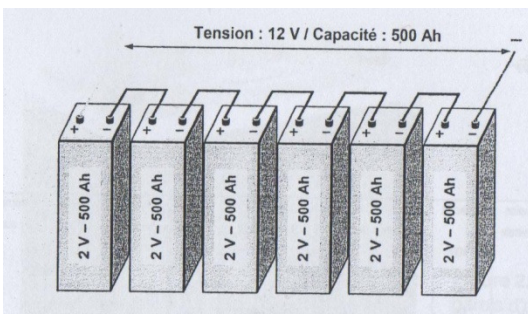


Fig. 4.1b : Association des éléments en série de la batterie

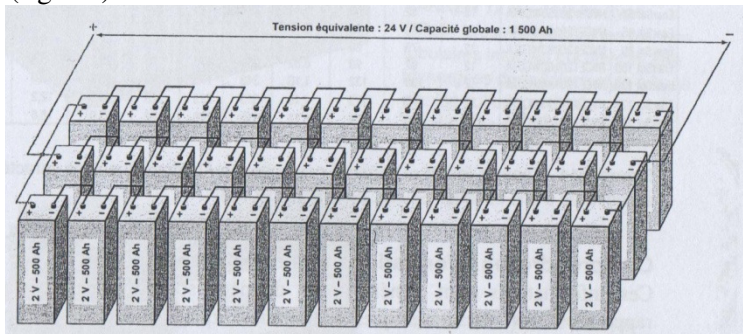


Fig. 4.1c Association des éléments en série/parallèle de la batterie

4.3.5 Technologie de la batterie

Les batteries utilisées dans les systèmes PV sont dites batteries stationnaires ou batteries à décharge profonde. Elles sont conçues pour restituer un courant stable pendant de longues périodes de décharge, tout en conservant leurs aptitudes à la recharge pendant un nombre élevé de cycles. Ces batteries repartissent en deux types (fig. 4.2):

- batteries ouvertes ;
- batteries étanches.

A) Batteries ouvertes

Dans cette catégorie on a les batteries à plaques classiques et batteries à plaques tubulaires. Cette catégorie se caractérise par la nécessité d'entretien du niveau de l'électrolyte (acide sulfurique dilué à une densité de 1.324kg/l à 1.28kg/l). Ces batteries ont des parois transparentes qui facilitent le contrôle du niveau de l'électrolyte.

B) Batteries étanches

Cette catégorie ne nécessite pas d'entretien du niveau de l'électrolyte et facile pour le transport. La qualité de l'électrolyte est contrôlée par le constructeur. Elle contient deux modèles les batteries à électrolyte libre et les batteries à électrolyte gélifié. Ce dernier modèle présente l'avantage de mieux supporter les variations de températures. Néanmoins quelques désavantages peuvent être mentionnés :

- un cout de fabrication légèrement plus élevé ;
- danger de séchage si la régulation n'est pas bien adaptée (éviter les surcharges).



Fig.4.2 Différentes types de batteries : a) ouvertes et b) étanches

4.4 Caractéristique de charge et de décharge.

Les accumulateurs sont caractérisés par deux variables fonction de l'état de charge Q : 1) la tension $V_a(Q)$ et 2) la résistance interne $r_a(Q)$. La tension diminue avec l'état de décharge de la batterie; par contre la résistance interne diminue avec l'état de charge de la batterie. La tension varie entre 1.7V et 2.4V par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. La variation de la résistance interne en fonction de l'état de charge/décharge de la batterie est donnée par la figure 4.3. En négligeant la mise en évidence de l'effet d'hystérésis on peut dire que la résistance varie entre deux valeurs limites r_{ac} et r_{ad} .

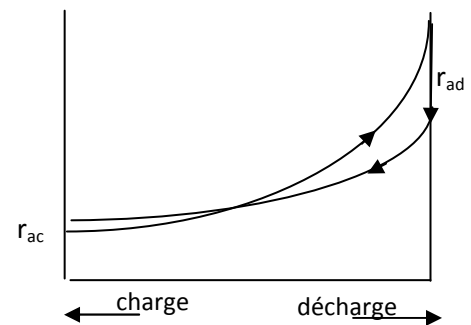


Figure 4.3: Variation de la résistance interne

4.4.1 Caractéristique de Charge

Pendant la charge la batterie se comporte comme un recepteur. Le courant rentre par l'anode et sort par la cathode ce qui produit une fabrication d'acide et augmente ainsi la densité de l'électrolyte. En conséquence la densité d'ions augmente également, ce qui fait baisser la résistance série R_{Bi} et augmente la tension V_{Bi} . Vers la fin de la charge le courant tend à électrolyser l'eau produisant de l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 sur l'électrode négative). Ce phénomène est appelé gazéification. En cas de surcharge, la batterie perdra de l'eau qui devra être remplacée.

La fig. 4.4 montre la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps. Le proces est comosé de trois phase : phase d'un court regime transitoire, phase de la stabilisation de la tension aux environs de 2,2V (fin de charge point M). La phase trois commence à partir du point M et la tension croit rapidement. Les plaques complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygene et l'hydrogene dégagés. La fin de charge est atteinte et limiter par le système de regulation (présence d'un regulateur).

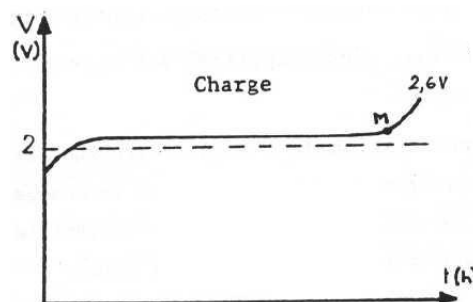


Figure 4.4 : Caractéristique de charge d'une batterie au plomb

- *Etat de charge*

On définit l'état de charge d'une batterie E_{ch} comme suit:

$$E_{ch} = \frac{Q_E}{C_n} \quad 4.4$$

où Q_E la quantité d'énergie encore disponible en Ah et C_n la capacité nominale de la batterie.

$E_{ch} = 1$ si la batterie est pleine et

$E_{ch} = 0$ si la batterie est vide.

On note par la profondeur de décharge P_D le complément de l'état de charge. d'où

$$P_D = 1 - E_{ch} \quad 4.5$$

On note par C_t , la capacité d'une batterie pour une décharge pendant t heures. Exemple C_{10} c'est la valeur de la capacité pour une décharge de 10 heures.

4.4.2 Caractéristique de décharge

La décharge est la transformation du PbO_2 et du Pb , les matériaux actifs, en $PbSO_4$ accompagné par l'absorption d'acide de l'électrolyte. Pendant la décharge, la tension varie en fonction du temps comme l'indique la figure 4.5a. Le proces est composé de trois phase : phase d'un court regime transitoire (la tension baisse), phase de la stabilisation de la tension aux environs de 2V (fin de décharge point N). La phase trois commence à partir du point N et la tension dimunie brusquement (jusqu'au 1,8V). La décharge ne doit pas dépasser une certaine limite afin d'éviter le phénomène de sulfatation de la batterie (formation de grands cristaux permanents) qui empêche le passage du courant. La sulfatation des plaques entraine une perte de capaité et une augmentation de la résistance interne d'où une baisse tension selon l'équation suivante :

$$V_B = V_{Bi} - I.R_{Bi} \quad 4.6$$

La figure 4.5b montre les courbes de décharges à différents courants. On remarque que plus que le courant de décharge est plus important plus que la durée de décharge est très courte.

Typiquement la fin de décharge nominale d'un élément de batterie est d 1.85V.

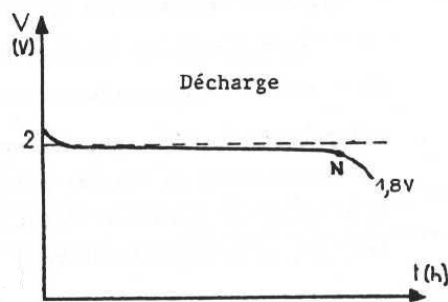


Figure 4.5a : Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb

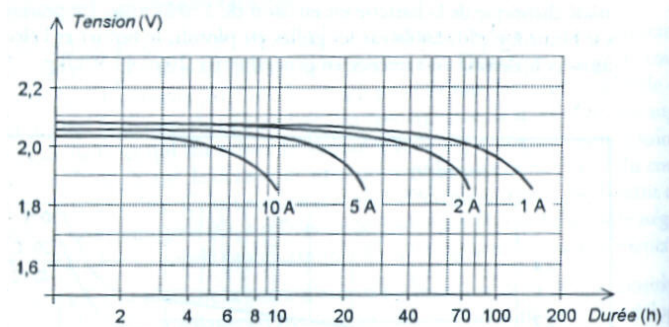


Figure 4.5b: Caractéristiques de décharge typiques d'une batterie au plomb de 100 Ah pour différentes valeurs de courant de décharge

4.5 Couplage d'une batterie au générateur PV

4.5.1 Paramètres

G) *Autonomie*

L'autonomie est la période durant laquelle la batterie est capable de fournir de l'énergie sans avoir besoin d'être rechargée ni subir de dommages. En général, elle est donnée en nombre de jours.

H) *Courant de surcharge*

La batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants c'est à dire un courant plus élevé que celui peut fournir le générateur PV. Ce cas se présente pour le démarrage des moteurs et des appareils qui ont un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

I) *Stabilisation de la tension*

Une batterie permet de fournir une tension constante tout en éliminant les fluctuations de tension dues au générateur PV et de fonctionner à une tension constante optimale.

J) *Profonde de décharge*

C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. La batterie ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur afin de prolonger sa durée de vie. Plus que la profondeur de décharge est profonde plus que sa durée de vie démunie. En général la profondeur de décharge est entre 20 et 30%.

K) Température

La variation de la température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C.

L) Cycle et durée de vie

Le cycle est le nombre de séquences de charge et décharge que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.

4.5.2 Couplage

La figure 4.6a montre le couplage direct d'une batterie au générateur PV et la fig. 4.6b la zone de fonctionnement d'une batterie de 12 V à un module de 50W_c. On remarque que la présence de la batterie fait fonctionner pratiquement le module dans sa zone optimale. Le branchement de la batterie se fait avec la présence d'un régulateur afin d'éviter les charges et décharges profondes de la batterie.

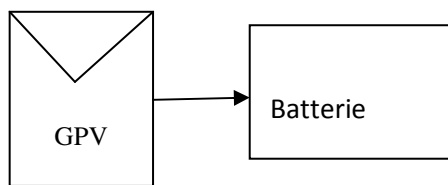


Fig. 4.6a Couplage direct de la batterie au GPV

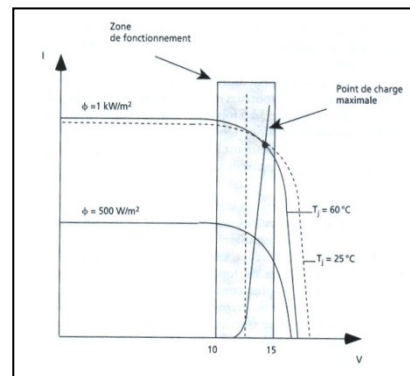


Figure 4.6b: Courbes I(V) d'un module avec une batterie de 12V

4.5.3 Expressions de la capacité

a) Capacité utile

Pour une charge quotidienne (E_{ch} en Wh), la capacité utile d'une batterie représente la capacité que l'on peut utiliser. Elle est définie comme suit :

$$C_u(Wh) = E_{ch} \times N_a \tag{4.7}$$

$$C_u(Ah) = \frac{E_{ch}}{U_b} \tag{4.8}$$

Avec

N_a le nombre de jours d'autonomie et U_b la tension aux bornes de la batterie

b) Capacité nominale

La capacité nominale est la quantité maximum d'énergie que contient une batterie sous température idéale de 25°C. Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).

$$C_N = \frac{E_{ch} \times N_a}{U_b \times P_D \times C_p} \tag{4.9}$$

Où

P_d est la profondeur de décharge et C_p le coefficient de pertes.

4.6 Bibliographie

[1] G. N. Tiwari and Swapnil Dubey, Fundamentals of photovoltaic modules and their applications, RSC Energy Series, 2010.
 [2] Anne Labouret et Michel Viloz, Energie Solaire Photovoltaïque, Edition DUNOD, 2005.
 [3] Alain Ricaud, Systèmes photovoltaïques, Polytech'Savoie, Ecole d'Ingénieurs, Octobre 2011.