

Université Abou-Berk- Belkaid de  
TLEMCEM  
Faculté des sciences  
département de physique

Systemes photovoltaïques

présentée par le professeur  
Monsieur **N E. BIBI-TRIKI**

# LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne suffit pas, pour répondre à un besoin défini, il faut l'associer à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- un convertisseur DC/AC
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

# LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

1. Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques). Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- o soit directement en courant continu

- o soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - alternatif (onduleur)

2. Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil"). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

# LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

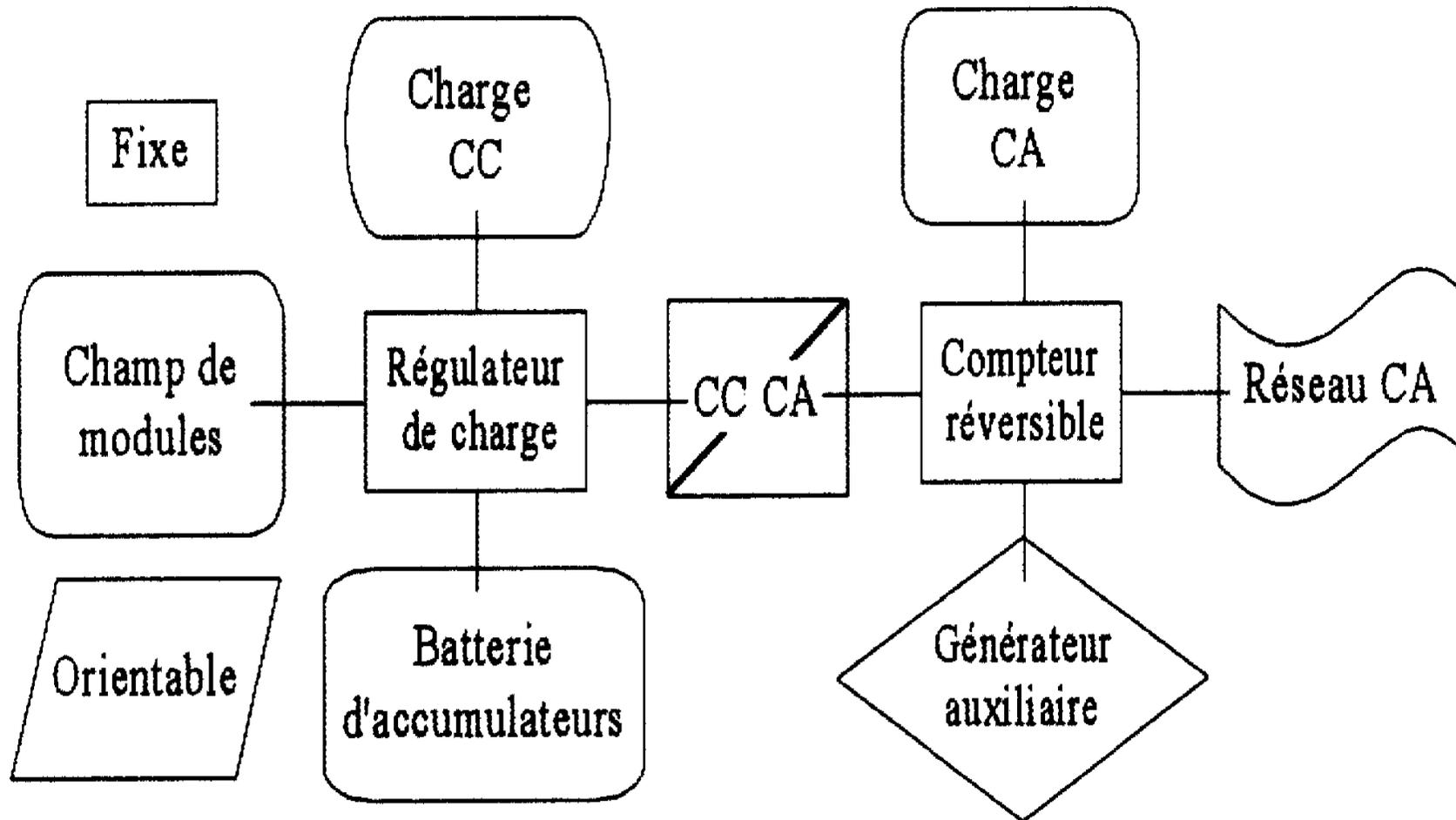
3. Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

## **Systemes photovoltaïques avec stockage électrochimique**

Parmi les solutions disponibles, le stockage électrochimique par batterie d'accumulateurs offrant une bonne réversibilité entre la décharge et la recharge, les batteries au Plomb acide, offrent un des meilleurs compromis entre service rendu et coût d'exploitation.

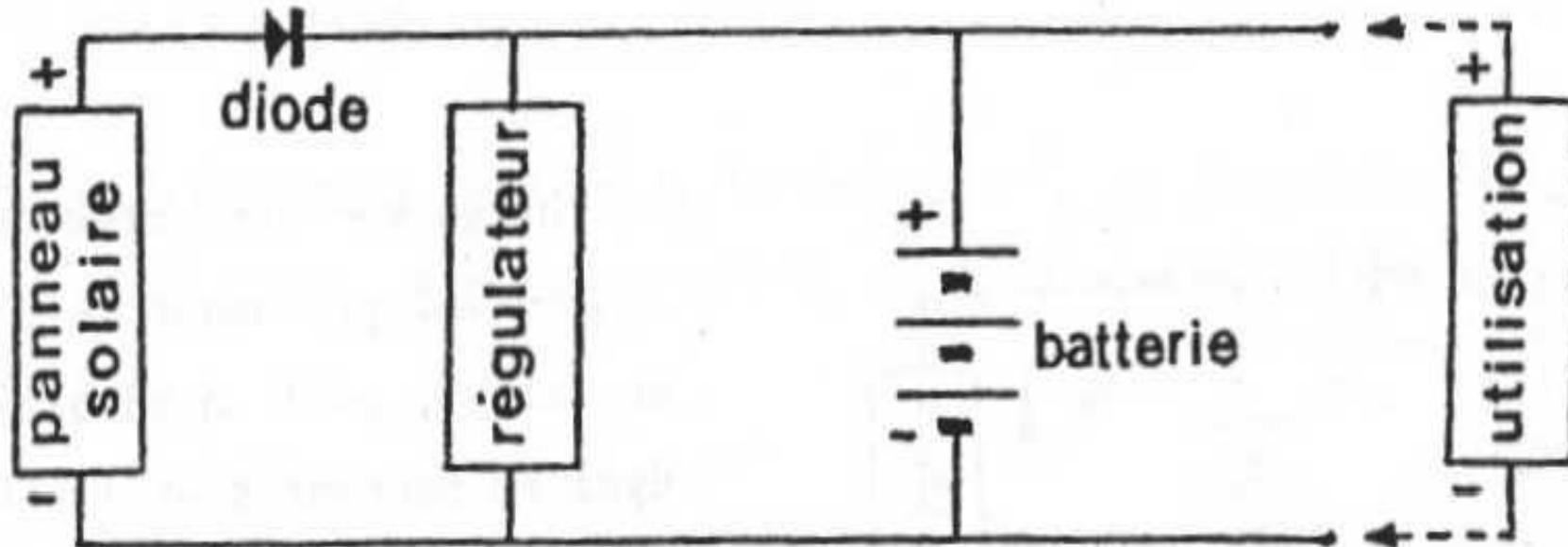
# LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES



# 1- Principe de fonctionnement

## 1.1 Schéma de principe.

Un générateur photovoltaïque avec batterie comprend généralement différents compome composants de base comme l'indique la figure suivante :



**Figure 1** : Schéma de principe d'un système PV avec batterie

Le panneau solaire charge la batterie en période d'ensoleillement.  
La batterie d'accumulateurs assure le stockage journalier et / ou saisonnier de l'énergie électrique.

# 1- Principe de fonctionnement

La diode anti-retour évite la décharge des accumulateurs à travers le panneau solaire en période d'obscurité.

Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge et éventuellement contre les décharges profondes occasionnelles.

Chaque composant du système devra être choisi en fonction des contraintes techniques et économiques.

## 1.2 Modes de fonctionnement.

Pour un système donné, 5 modes de fonctionnement peuvent exister en fonction de l'ensoleillement et du courant d'utilisation (hors régulation).

### 1.2.1 Premier mode : *déconnexion de la charge*

La charge est déconnectée. Le courant du panneau solaire, fonction de l'ensoleillement, charge la batterie

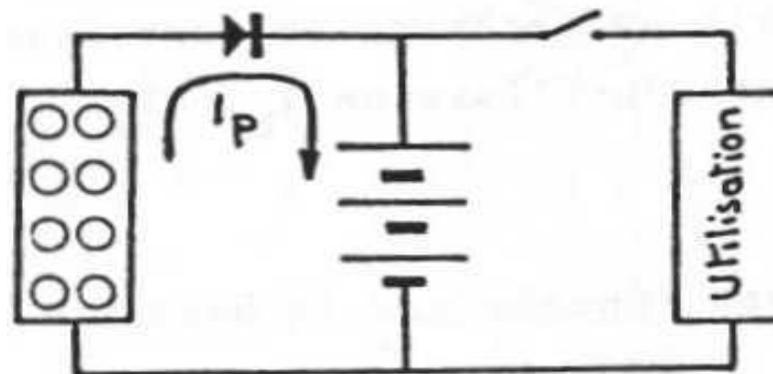


Figure 2 : Mode 1 – Charge déconnectée

# 1- Principe de fonctionnement

## 1.2.2 Deuxième mode de fonctionnement : excédent de courant

La charge est connectée. Le courant provenant du panneau solaire est supérieur au courant d'utilisation. Le courant excédentaire charge la batterie :

$$I_P = I_B + I_U$$

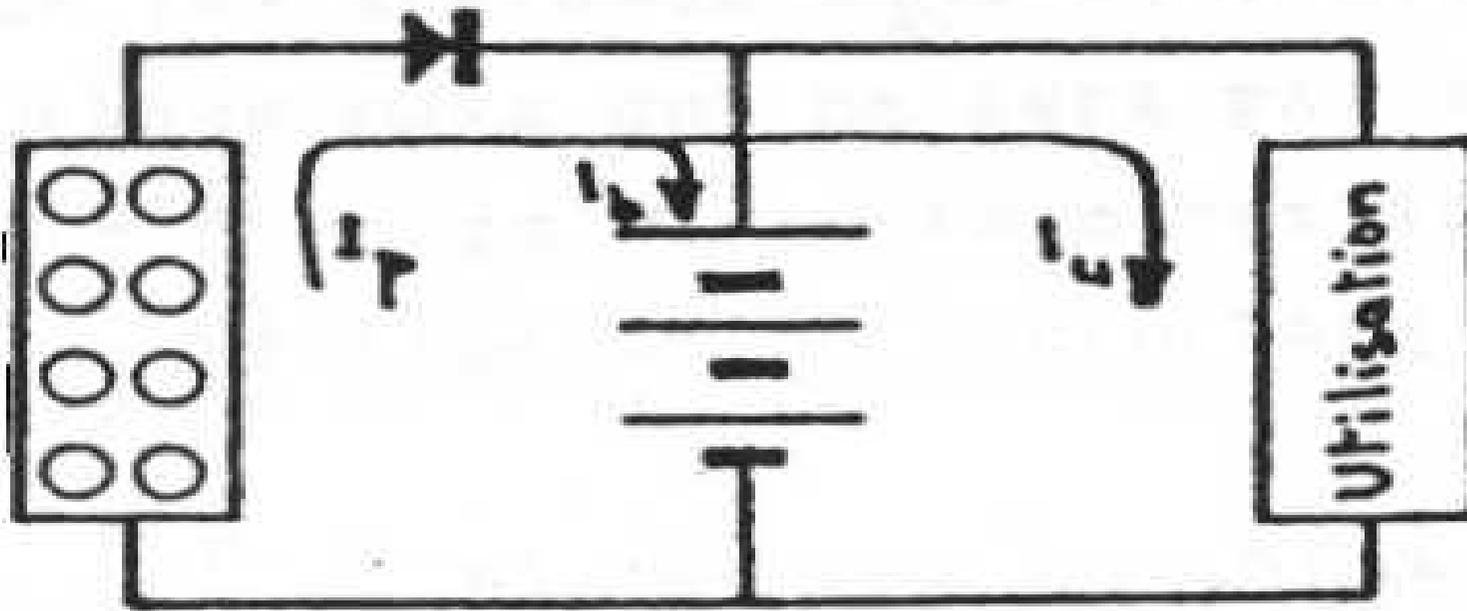


Figure 3 : Mode 2 – Batterie chargée par le courant excédentaire

# 1- Principe de fonctionnement

## 1.2.3 Troisième mode de fonctionnement : courant nul

La charge est connectée. Le courant provenant du panneau solaire se trouve, pour un ensoleillement donné, égal au courant d'utilisation :  $I_P = I_U$ . Aucun courant ne traverse la batterie :  $I_B = 0$

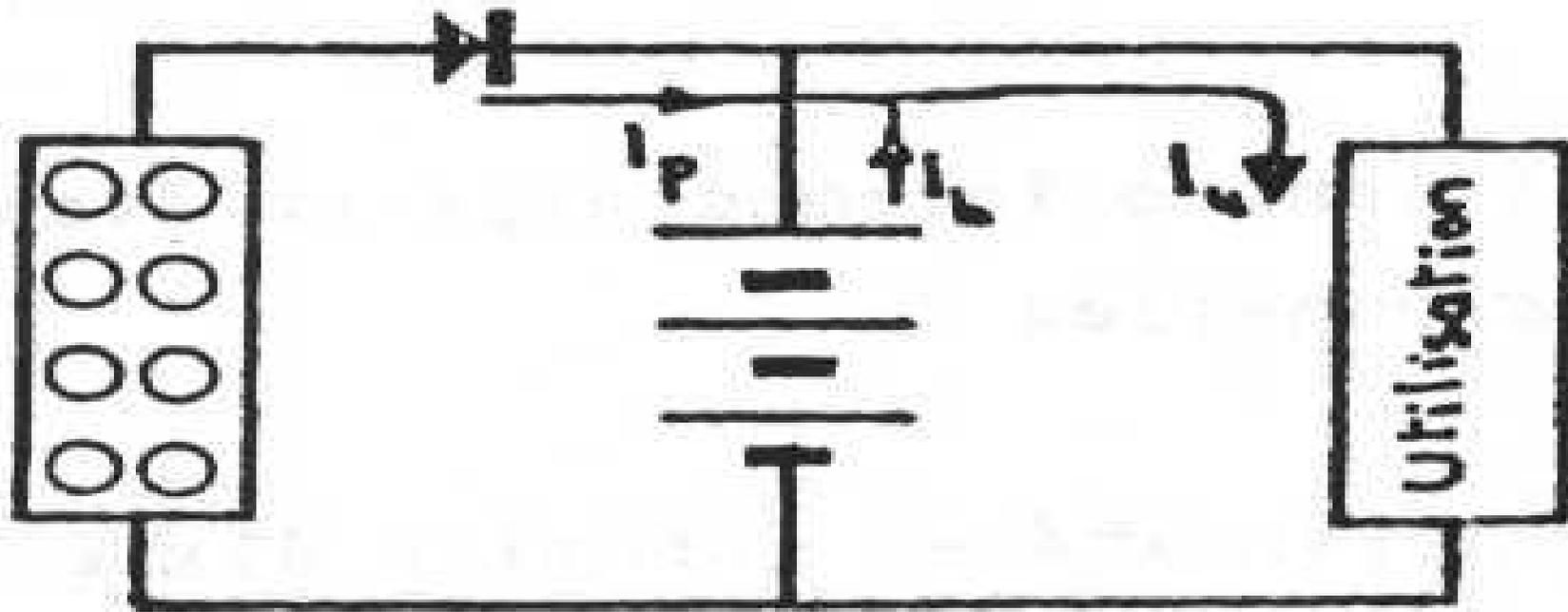


Figure 4 : Mode 3 – Courant nul dans la batterie

# 1- Principe de fonctionnement

## 1.2.4 Quatrième mode de fonctionnement : déficit de courant

La charge est connectée. Le courant provenant du panneau solaire est inférieur au courant d'utilisation. La batterie se décharge en fournissant le courant déficitaire :  $I_B = I_U - I_P$

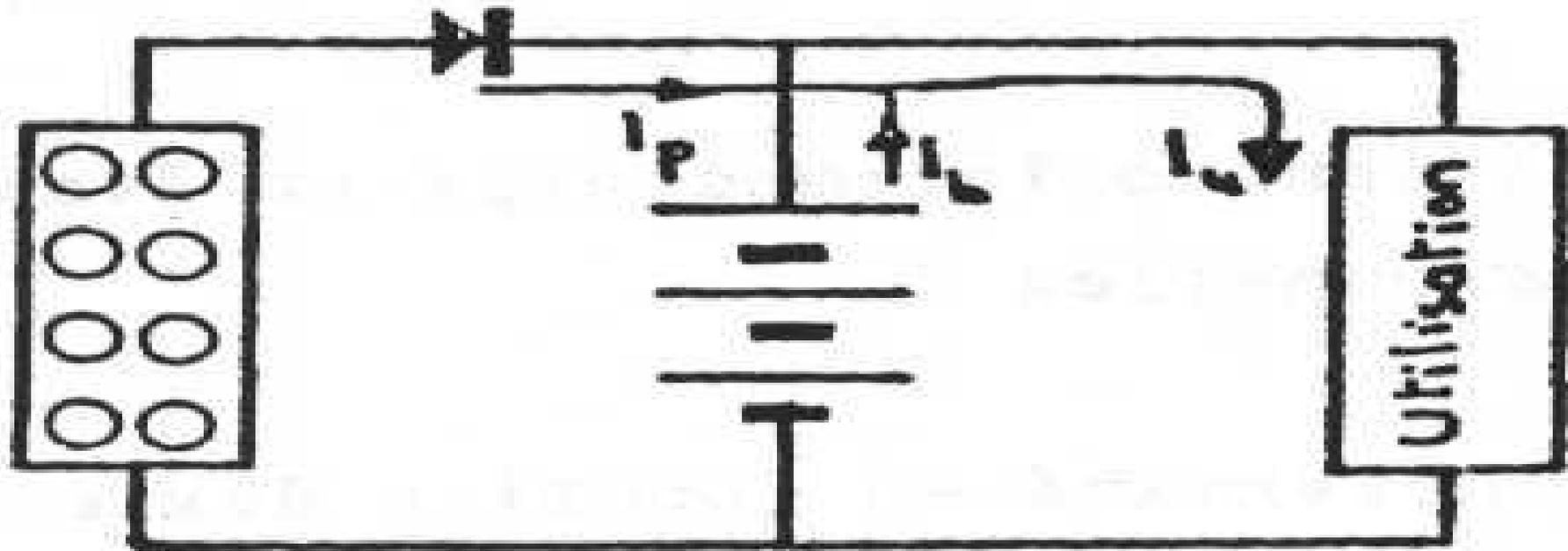


Figure 5: Mode 4 – La batterie se décharge dans le circuit

# 1- Principe de fonctionnement

## 1.2.5 Cinquième mode de fonctionnement : nuit

La charge est connectée. Le courant provenant du panneau solaire est nul  $I_P = 0$  (période d'obscurité). La diode anti-retour est bloquée. La batterie se décharge en fournissant le courant d'utilisation  $I_B = I_U$ .

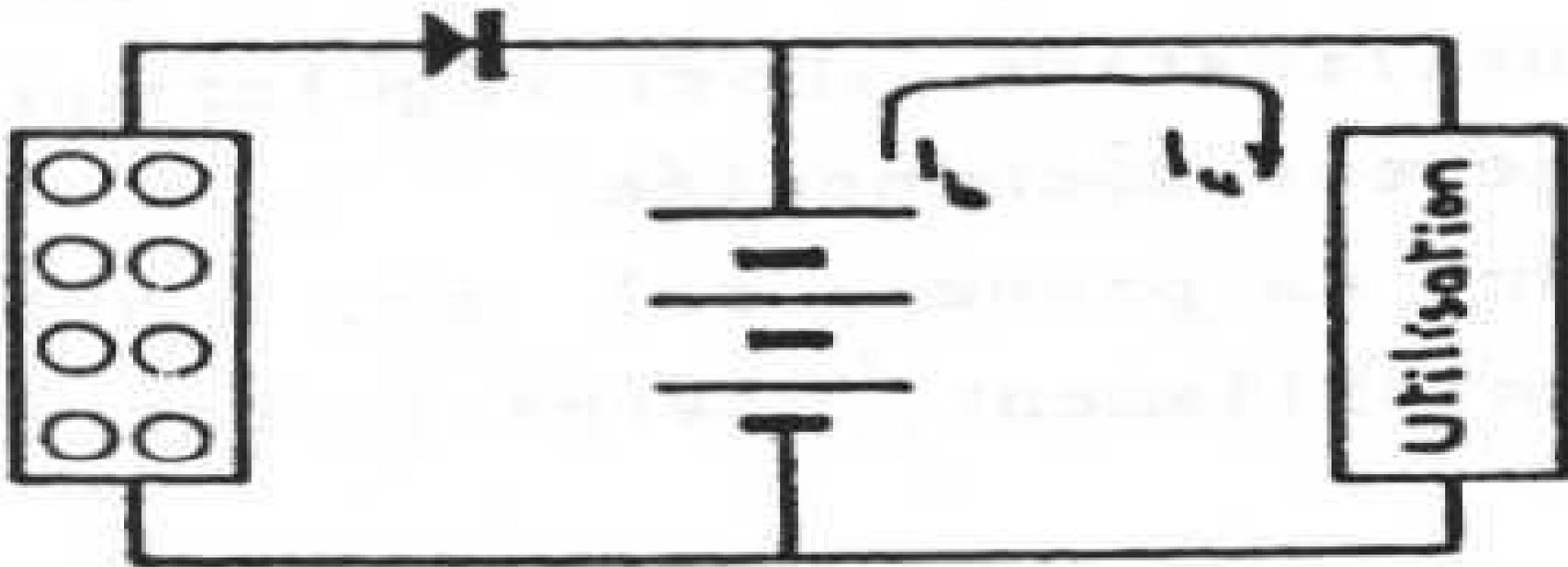


Figure 6 : Mode 5 – La batterie fournit tout le courant d'utilisation

***N.B. : Dans tous les cas, la tension du système est imposée par la batterie.***

# 1-Principe de fonctionnement

## 1.3 Caractéristiques de fonctionnement.

L'étude d'adaptation d'un module PV branché sur une batterie revient à superposer les caractéristiques courant - tension du module PV et de la batterie en charge.

En première approximation; on peut considérer qu'un accumulateur se charge sous une tension presque constante en dehors des courtes périodes de début et fin de charge.

On peut exprimer la tension de la batterie  $V_b$  vue par le module en fonction de 2 paramètres : la force contre électromotrice  $E_0$  et la résistance interne  $r$  qui est très faible.

**On a la relation :** 
$$V_b = E_0 + rI$$

# 1-Principe de fonctionnement

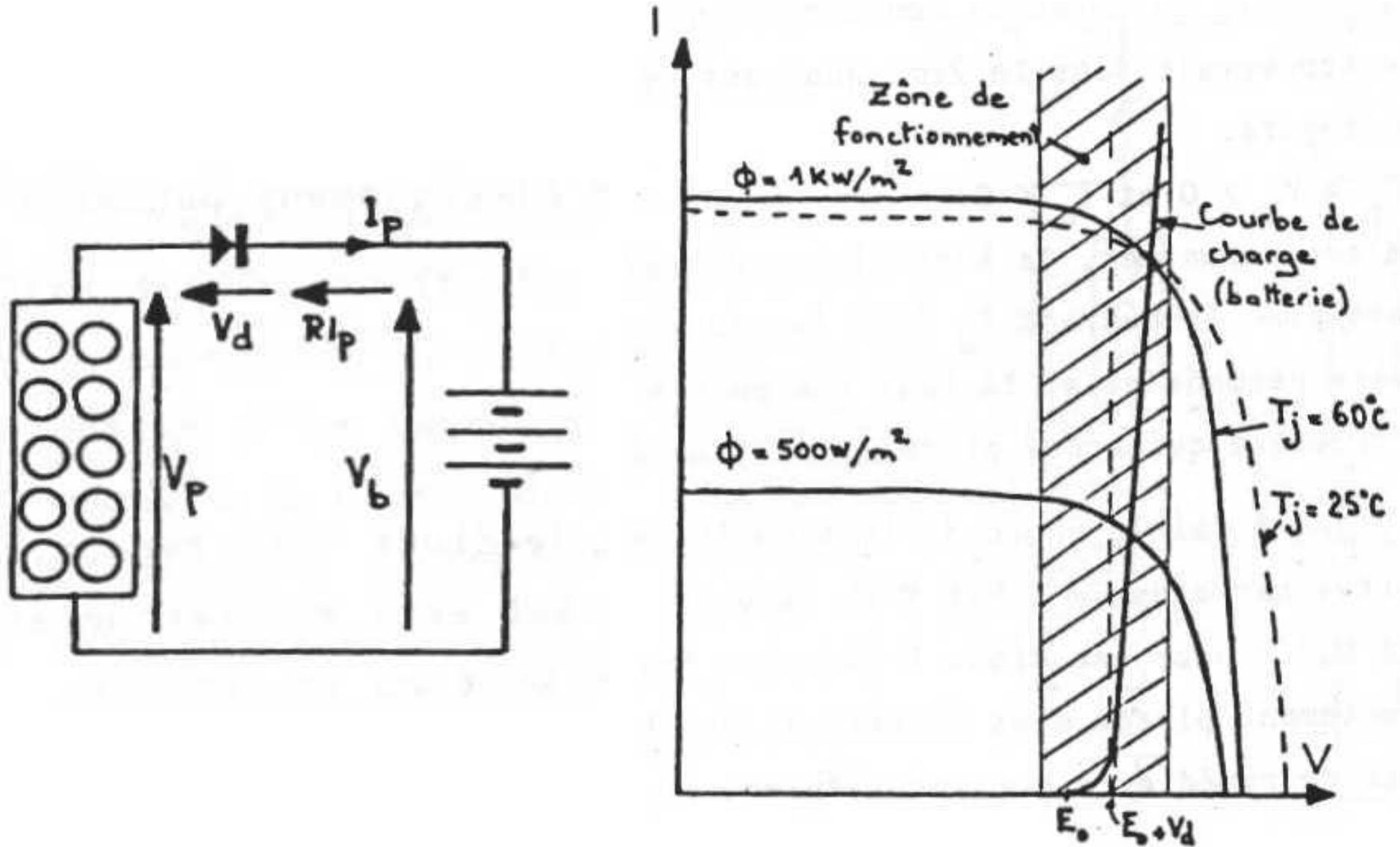


Figure 7 : Caractéristiques de fonctionnement

# 1-Principe de fonctionnement

En réalisant la liaison module - batterie, le point de fonctionnement du module sera déterminé par l'intersection des 2 courbes.

$$I_p = f(V_p) \quad : \text{caractéristique du module}$$

$$V_p = V_b + RI_p + V_d = E_0 + V_d + (r + R)I_p$$

Avec  $V_d$  : chute de tension dans la diode,

r résistance interne de la batterie,

R : résistance électrique des câbles.

Une bonne adaptation est obtenue lorsque la caractéristique de charge est pratiquement perpendiculaire à l'axe des tensions dans la zone des puissances optimales.

Cette condition justifie le nombre de 33 à 36 cellules pour les modules adaptés à la recharge d'une batterie de tension nominale 12 V.

# 1-Principe de fonctionnement

• En effet la tension correspondante aux points de puissance maximale (14,3 V à 60 °C) est égale à la chute de tension dans les câbles et diodes (0,8 V) additionnée à la tension de fin de charge de la batterie (6 x 2,25 V / élément pour le plomb).

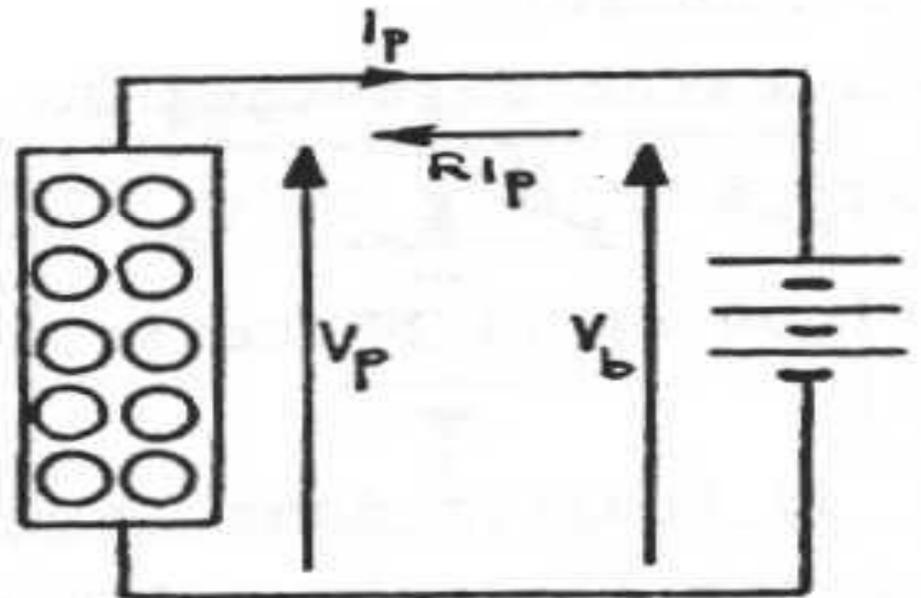
## *En résumé :*

- Le point de fonctionnement du module solaire est déterminé par la tension de la batterie et l'ensoleillement
- La tension aux bornes du module solaire est légèrement supérieure à celle de la batterie (en période de charge)
- Dans ces conditions, on peut considérer le module solaire comme un générateur de courant dont la valeur est proportionnelle à l'ensoleillement

# 1-Principe de fonctionnement

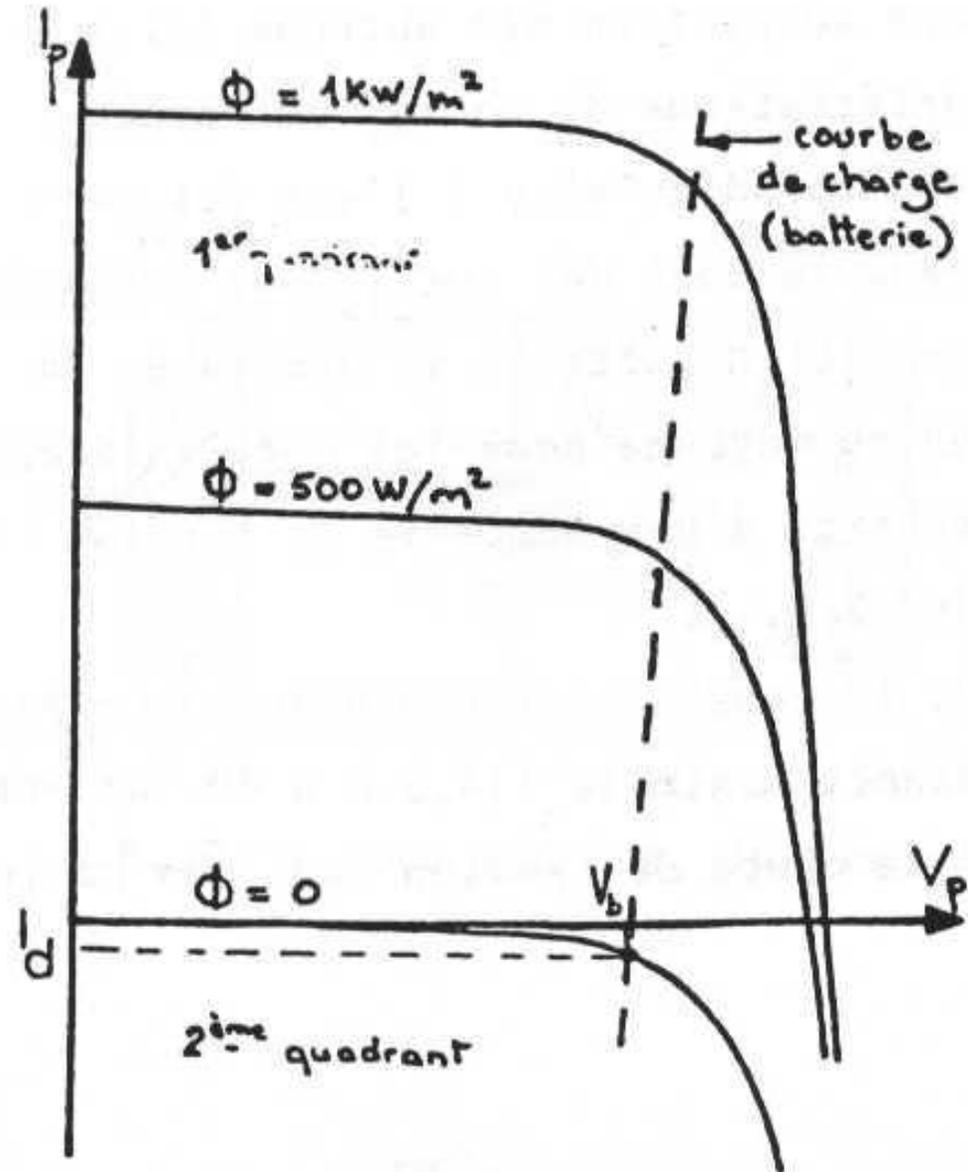
## 1.4 Intérêt de la diode anti-retour.

La diode anti-retour est là pour éviter que la batterie ne se décharge dans le module pendant la nuit. Sans cette diode, le courant de décharge dépendrait bien sûr de l'impédance vue depuis la batterie. Cette impédance est très élevée pour les modules au silicium monocristallin à haut rendement, légèrement plus faible pour les modules au silicium multi-cristallin, et franchement plus faible pour les modules, en couches minces en général (silicium amorphe en particulier).



**Figure 8 :** Protection par une diode anti-retour

# 1-Principe de fonctionnement



**Figure 9** : Protection par une diode anti-retour

# 1-Principe de fonctionnement

En période d'obscurité ( $I_{cc} = 0$ ), le point de fonctionnement se trouve dans le 2ème quadrant de la figure et la batterie se décharge avec le courant  $I_d$  dans le module perdant ainsi la nuit une partie de l'énergie produite pendant la journée.

Une diode à faible chute de tension, correctement placée dans le circuit de charge permet de remédier à cet inconvénient au prix d'une petite perte de puissance; soit, l'équivalent d'une cellule solaire.

## 2- Les panneaux

Pour obtenir des puissances importantes, les modules solaires doivent être associés en série - parallèle pour constituer un panneau solaire. Ceux-ci sont reliés électriquement et assemblés sur un châssis. On a l'habitude de donner la taille d'un panneau solaire par sa puissance crête. Mais ce paramètre n'est pas suffisant pour définir le système, aussi est-il nécessaire de définir le mode de groupement des modules.

Selon la puissance de l'utilisation, la tension de la batterie peut être différente (6, 12, 24 ou 48 V par exemple). Un module de 36 cellules au silicium monocristallin étant adapté pour la charge d'une batterie de 12 V, la tension d'utilisation détermine le nombre de modules à mettre en série (2 pour 24 V, 4 pour 48 V). Le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de branches à mettre en parallèle pour un fonctionnement satisfaisant de l'ensemble en fonction de la consommation de l'utilisation et de l'ensoleillement du lieu.

## 2- Les panneaux

### **2-1 Le châssis.**

Dans la plupart des systèmes isolés, le panneau solaire est constitué de modules photovoltaïques assemblés sur un support généralement métallique. Cette charpente est réalisée le plus souvent en aluminium ou en acier galvanisé. Ce choix de matériau est justifié par des contraintes telles que :

- o Résistance mécanique (vent)
- o Tenue à la corrosion
- o Conductivité thermique
- o Facilité d'assemblage
- o Poids, etc.

De nombreux types de châssis existent et sont fonction du nombre de modules et de leur taille, du support d'implantation (dalle, mur, toit, ...), de leur hauteur, et de leur inclinaison.

Leur hauteur doit être telle que les modules solaires soient hors de portée d'éléments indésirables (flore, faune ...). Leur inclinaison est généralement fixe et déterminée par le dimensionnement.

## 2- Les panneaux

### 2.2 Le câblage.

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série. La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage de l'installation. Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie.

## 2- Les panneaux

La chute de tension dans les câbles est donnée par la formule:

$$U = 2 R L I, \text{ avec } U \text{ en volts, } R \text{ en Ohm/m, } L \text{ en m, } I \text{ en A}$$

<b>Section (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>1,5</b>	<b>2,5</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>16</b>
<b>Résistance 2R en Ω/m</b>	<b>0,0267</b>	<b>0,0160</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0067</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0025</b>

**Tableau 1** : Résistance de câbles de type H07RNF

Les sections de câbles doivent être calculées de façon à limiter la perte de puissance à 1%.

$$\Delta P = I_N^2 [(2 \cdot \rho) / A]$$

Delta P = Perte de puissance [W]

$I_N$  = Courant nominal [A]

$\rho$  = Résistance spécifique -  $\rho_{cu} = 0,02 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$

L = Longueur totale du câble [m]

A = Section de câble [mm<sup>2</sup>]

## 2- Les panneaux

### 2.3 Règles d'installations des champs de panneaux

Un certain nombre de règles dans les installations de champs de panneaux photovoltaïques se dégagent de plusieurs années d'expérience de terrain :

- appairer les modules en usine pour en tirer la puissance maximale une fois interconnectés en panneaux.
- l'inclinaison optimale pour un usage annuel avec des besoins permanent doit être calculée à l'aide d'un logiciel, tant il est vrai que le pourcentage de diffus et l'albedo du sol peuvent avoir un rôle important.
- les modules doivent être installés à une hauteur suffisante pour ne pas être atteints par les animaux, résistante aux vents, loin de l'ombrage tout en restant accessibles pour un nettoyage annuel
- la structure porteuse si elle est métallique, ne doit pas présenter de couple électrochimique avec les cadres des modules.
- les cadres et structures en aluminium anodisé ou en acier galvanisé ne doivent pas être percés ou retravaillés sur le site, car l'endommagement des couches protectrices est une voie ouverte à la corrosion.

## 2- Les panneaux

- tenir compte des dilatations différentielles induites par les grandes variations de température (typiquement  $-20^{\circ}$  à  $+80^{\circ}$ ).
- éviter les occultations parasites et partielles du champ de modules (arbres, immeubles)
- protéger chaque sous station contre la foudre à l'aide de para-surtenseurs.
- soigner les mises à la terre de l'ensemble des structures métalliques en évitant les « boucles ».

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.1 Généralités

Il y a nécessité de stockage électrique chaque fois que la demande électrique est décalée dans le temps par rapport à l'apport solaire. Une demande énergétique est caractérisée par une courbe de charge; celle-ci peut être constante au cours de la journée et variable au cours de l'année. Elle peut être totalement aléatoire, mais avec des périodes de maxima et de minima statistiquement connues. Dans tous les cas on peut tout de même ramener la puissance moyenne consommée sur une période donnée en watts permanents équivalents.

Les durées de stockage peuvent être très variables, de quelques heures pour compenser des passages nuageux, de 12h pour les utilisations nocturnes, de plusieurs jours pour un usage

L'intérêt des accumulateurs électrochimiques quotidien répétitif, de plusieurs mois pour le lissage inter-saisonnier. est la disponibilité d'une tension quasi-constante qui fixe le point de fonctionnement sur une droite verticale qui peut être aussi proche que possible de la droite qui définit la charge optimale d'un générateur photovoltaïque.

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.1.1 Définitions et paramètres utiles

Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs “réversibles” c’est-à-dire pouvant stocker l’énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Contrairement aux photopiles où il n’y a qu’un transport d’électron ne donnant lieu à aucune « usure », dans les accumulateurs électrochimiques il y a transfert de matière de l’électrolyte vers les électrodes et par conséquent une « usure » incontournable qui limite leur durée de vie.

De nombreux types d’accumulateurs électrochimiques existent (Pb, CdNi, NiZn,) toutefois un des plus anciens et des plus utilisés dans l’automobile est l’accumulateur au Plomb-acide.

Dans le domaine industriel, trois applications principales donnent à l’accumulateur au Pb des caractères spécifiques:

- les batteries de démarrage
- les batteries de traction
- les batteries stationnaires de secours à grande réserve d'électrolyte.

## 3 Les accumulateurs électro-chimiques

L'arrivée des applications photovoltaïques a imposé de nouveaux critères auxquels les fabricants de batteries ont dû s'adapter. L'accumulateur au Pb a donc subi des avancées constantes pour améliorer ses performances grâce au photovoltaïque.

Il est utile de redéfinir les principaux paramètres des accumulateurs afin d'en classer les différents types suivant leur conformité aux exigences des applications solaires.

### 3.1.1.1 Rendement d'utilisation

Rendement faradique: le rendement en ampère-heures (ou faradique) est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge  $Q_d$  et la quantité d'électricité fournie lors de la charge  $Q_c$  (Ah récupérés lors de la décharge/ Ah fournis pendant la charge).

$$\eta = Q_d/Q_c \quad \text{Pb: } > 90 \%, \text{ Ni-Cd: } < 80\%$$

**Rendement énergétique** : Sachant que la tension de charge est en général supérieure de 15 % (Pb) à 30 % (Ni-Cd) à la tension de décharge, **le rendement énergétique utile** est le produit du rendement faradique par le rendement de tension. Généralement il vaut 56 % pour le Ni-Cd et 77 % pour le Pb.

## 3 Les accumulateurs électro-chimiques

### ***3.1.1.2 Résistance interne***

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible (de l'ordre de quelques centièmes d'ohm) et négligeable en général, dans les applications numériques. Cette faible résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient quand les deux bornes sont accidentellement, réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible l'intensité du courant débité est considérable, peut provoquer un incendie et l'accumulateur, mis ainsi en court-circuit, est rapidement hors d'usage.

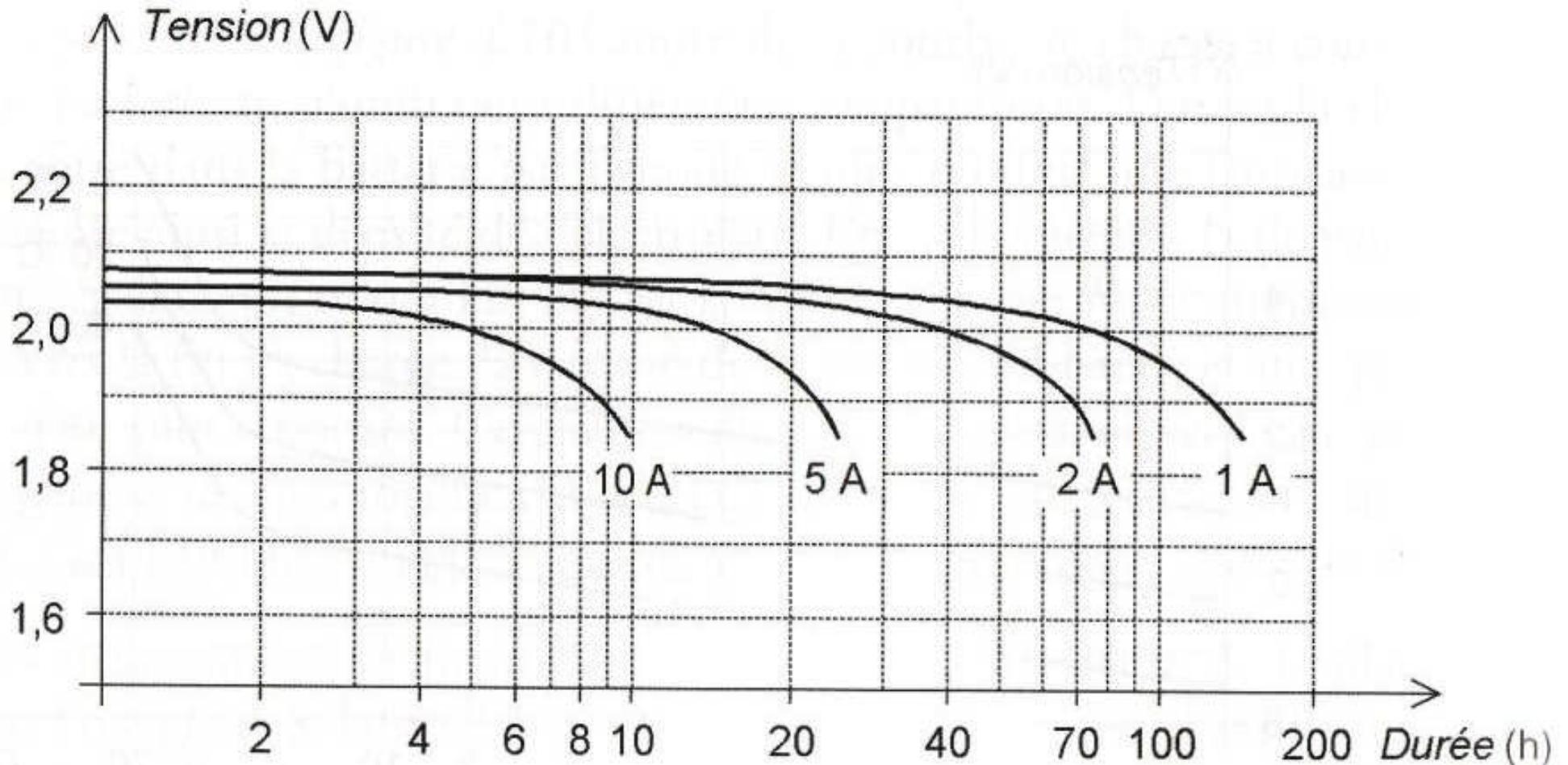
### ***3.1.1.3 Capacité***

On appelle capacité la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères-heures (Ah), qu'un accumulateur pleinement chargé peut faire circuler pendant une période de décharge donnée jusqu'à une tension d'arrêt et une température définies.

La capacité d'une batterie est toute relative et dépend considérablement des conditions d'utilisation. Pour les applications automobiles on définit la capacité pour une décharge en 5 ou 10h.

### 3 Les accumulateurs électro-chimiques

Pour les applications solaires. La capacité de décharge varie de 50 à 100 h. c



**Figure 10** : Caractéristique de décharge type d'une batterie au Plomb de 100 Ah

La capacité nominale augmente avec la température de 0,7 % /°C dans la plage de température autorisée. Elle se détériore avec le vieillissement et avec le nombre de cycles.

## 3 Les accumulateurs électro-chimiques

### 3.1.1.4 Capacité massique

On l'exprime en Wh / kg. De 28 Wh/kg pour le Ni-Cd, elle peut varier de 12 (Plomb pur) à 50 Wh/kg pour le Pb-Ca.

### 3.1.1.5 Auto-décharge

Le taux d'autodécharge d'un accumulateur représente la perte moyenne relative de capacité par mois et pour une température donnée.

$$\tau(\%) = \frac{Q_{AS} - Q_{PS}}{n \cdot Q_{AS}}$$

$Q_{AS}$  = capacité avant stockage,

$Q_{PS}$  = capacité après stockage,

$n$  = durée de stockage en mois

## 3 Les accumulateurs électro-chimiques

L'autodécharge est une caractéristique interne découlant de la technologie utilisée et est généralement donnée pour une température de 20°C. Les valeurs typiques sont de 3 à 15%/mois pour le Pb et jusqu'à 30 % /mois pour le Ni-Cd.

### ***3.1.1.6 Charge d'égalisation***

On appelle charge d'égalisation une charge excédentaire appliquée pendant 5 à 7 heures à une batterie déjà pleinement chargée. Cette surcharge se fait à courant constant à un régime proche de C20. Les éléments présentent alors une meilleure homogénéité dans leur état de charge. Dans les batteries Pb-acide, la charge d'égalisation a pour effet de prévenir ou de résorber en partie la sulfatation dure résultante d'un état de décharge prolongé.

### ***3.1.1.7 Profondeur de décharge***

Sans importance pour le Ni-Cd qui peut se décharger complètement, ce paramètre revêt une considérable importance pour les batteries au Pb puisqu'elles survivent rarement à une décharge totale. On limite en général la décharge à 80% de la capacité nominale. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 40 %, les accumulateurs étant souvent surdimensionnés afin d'augmenter leur durée de vie .

## 3 Les accumulateurs électro-chimiques

### ***3.1.1.8 Tenue en cycles***

Dépendant beaucoup de la profondeur de décharge, ce paramètre varie de 400 cycles à 80 % de décharge à 2000 cycles à 40 % de décharge.

### ***3.1.1.9 Durée de vie***

Les contraintes sont si nombreuses qui agissent sur ce paramètre que les constructeurs sont obligés de préciser le mode de fonctionnement pour pouvoir donner des valeurs approximatives: les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C.

La durée de vie varie de 2 à 7 ans pour les batteries au Pb et de 10 à 25 ans pour les Ni-Cd. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10 °C de la température d'utilisation.

### ***3.1.1.10 Autonomie***

Dans le cas du Pb, il y a usure de l'électrolyte, d'autant plus prononcée que l'on surcharge les batteries. Même au repos, l'évaporation de l'eau est inévitable. Cependant, les constructeurs ont trouvé un moyen de la limiter en utilisant un électrolyte gélifié et des bouchons catalysant la réaction de recombinaison des gaz dans les accumulateurs étanches dits sans entretien. D'éventuelles surpressions dans la batterie sont éliminées par des soupapes de sécurité.

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.2 Les accumulateurs au Plomb acide

Une batterie est constituée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. La valeur usuelle de la tension d'une batterie de démarrage est de 12 V. Elle peut être de 24 ou 48 V, selon les applications. En photovoltaïque pour des sites isolés, on adopte généralement les batteries de 24 V.

### 3.2.1 Description.

L'élément de 2V est constitué de plaques positives et négatives assemblées en alternance, le nombre de plaques de chaque polarité et leur surface définissant la capacité en courant de l'élément. Pour éviter les court-circuits entre plaques, un séparateur micro-poreux isolant est disposé entre elles.

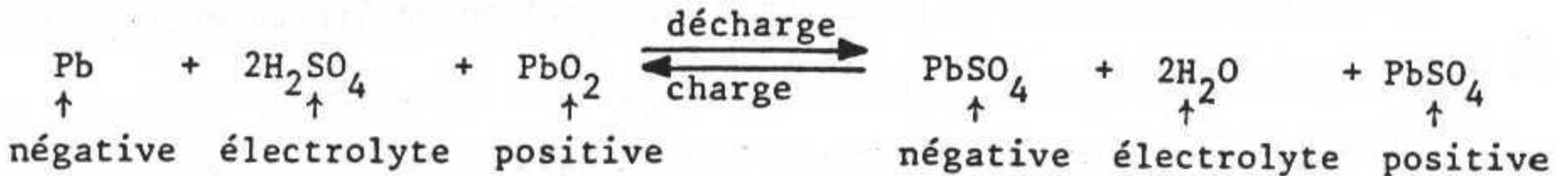
*L'électrode positive est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des lamelles ou des tubes constitués par des oxydes de plomb ( $PbO_2$ ).*

*L'électrode négative est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnies de plomb spongieux.*

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

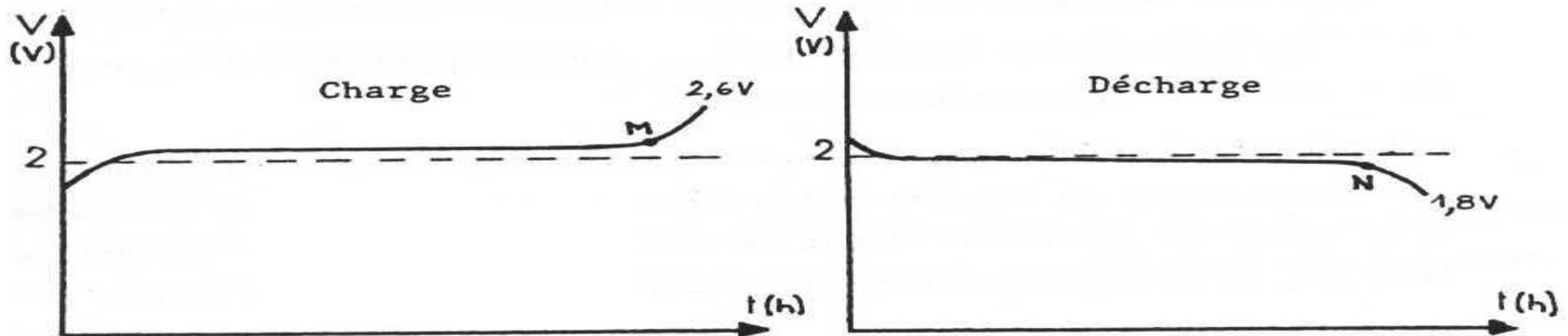
*L'électrolyte est une solution aqueuse (eau distillée) d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.*

La réaction réversible mise en jeu est donnée par



## 3.2.2. Tension

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.



**Figure 11** : Tension de charge des accumulateurs

### 3 Les accumulateurs électro-chimiques

**Charge.** Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel aux bornes en fonction du temps, on constate (cf Figure 11) qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V. En fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V ou 2,7 V en charge cyclique. En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

**Décharge.** Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la figure. Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2 V environ. A partir du point N, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques. En pratique, on ne descend pas en général au-dessous de 20% ou davantage de la capacité batterie. Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où une baisse de tension.

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## **3.2.3. Rendement.**

Le rendement faradique du Pb est de l'ordre de 90%. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70 à 80%.

## **3.2.4. Autodécharge.**

Elle est de l'ordre de 10 % par mois à  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , pour les plaques au plomb - antimonieux (on a vu que cet alliage a pour but d'augmenter la tenue mécanique). Elle est de l'ordre de quelques % par mois pour le plomb doux (à faible teneur d'antimoine) ou le plomb - calcium mais les éléments sont plus fragiles. L'autodécharge varie très rapidement avec la température. Elle double de valeur tous les 10 °C.

## **3.2.5. Durée de vie.**

En limitant la profondeur de décharge journalière ( $< 15\% \text{ Cn}$ ) et la profondeur de décharge saisonnière ( $< 60\% \text{ Cn}$ ), on estime la durée de vie des accumulateurs au Pb à 6 ou 7 ans, ceux-ci étant protégés contre la surcharge.

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.3 Les accumulateurs Cadmium - Nickel

### 3.3.1 Description.

Les accumulateurs Cadmium-Nickel sont réalisés à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et Cadmium) immergés dans une solution de potasse.

La réaction réversible globale est la suivante:



**dans le sens de la décharge.**

L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative. L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V.

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.3.2 Caractéristiques

- La tension nominale est de 1,2 V mais elle varie entre 1,15 V et 1,45 V par élément suivant l'état de charge.
- Les éléments sont par construction, plus robuste et moins lourds que ceux au plomb
  - Pour les petites capacités, ils se présentent sous forme cylindrique (comme les piles) en version étanche
  - Ils peuvent fonctionner sur une grande plage de température
  - Ils nécessitent un entretien réduit ce qui leur confère, en pratique une grande durée de vie.

En revanche

- Le rendement de l'accumulateur est faible (rendement faradique 70%)
- L'autodécharge est plus élevée que celle des accumulateurs au plomb (> 15%)
- Les écarts de tension entre charge et décharge sont plus importants
- Leur coût est élevé.

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.3.3 Applications

Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants:

- très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
- ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.
- supportent les décharges totales
- pas d'émanation toxique

Technologie	Applications	Densité de puissance	Coût	Avantages / défauts
<b>Pb acide</b>	Stationnaire	0-35 Wh /kg	# 30 € /kWh	Faible coût/ faible capacité
Ni MH	Froid, embarqué	50-80 Wh /kg	# 300 € /kWh	Robustesse/prix
<b>Li -ion</b>	Embarqué	100-200 Wh/kg	# 600 € /kWh	Capacité / sécurité ; prix

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des principales technologies de batteries

# 3 Les accumulateurs électro-chimiques

## 3.4 Utilisation des accumulateurs dans les systèmes solaires.

### 3.4.1 Stockage - tampon

Dans les systèmes solaires avec batterie, on utilise les accumulateurs en tampon, autrement dit le générateur solaire et l'utilisation restent branchés en permanence sur la batterie.

### 3.4.2 Durée de stockage

Le stockage électrique caractérisé par sa capacité (en Ah) détermine directement la durée du stockage si on rapporte cette énergie stockée à l'énergie moyenne consommée.

Les durées de stockage peuvent être très variables : quotidiennes (par exemple pour les pays à fort ensoleillement) ou de plusieurs jours ou semaines (par exemple pour les pays à plus faible ensoleillement).

La capacité du stockage est déterminée par le dimensionnement du système en fonction de critères techniques et économiques.

### 3.4.5 Conditions de charge.

La batterie est branchée en permanence sur le générateur solaire. La surcharge est évitée en utilisant un régulateur de charge qui maintient la batterie dans un état voisin de la pleine charge.

### 3 Les accumulateurs électro-chimiques

Cette condition de fonctionnement dite “batterie flottante” ou “floating” est obtenue en limitant la tension à une valeur constante de l’ordre de 2,25 V à 2,35 V par élément.

D’autre part, on augmentera considérablement la durée de vie si on limite la profondeur de décharge de la batterie. Différents systèmes électroniques sont envisageables pour limiter la charge et la décharge des accumulateurs, rôle généralement réalisé par le régulateur de charge associé.

# 4 Régulation électronique de la charge

## 4.1 Généralités

On a vu que les accumulateurs sont caractérisés par deux variables électriques fonction de leur état de charge et de la température et de la résistance interne  $r$ . Dans les accumulateurs au Pb, on doit limiter la tension de décharge à 1.75 V par élément, et la tension de charge à 2.35 V par élément. *La résistance interne peut varier du simple (pleine charge) au double (décharge profonde).*

La diode anti-retour est là pour empêcher que la batterie ne se décharge dans le module

La régulation de la charge d'une batterie se fait de de trois manières différentes: l'autorégulation, la régulation shunt et la régulation série,

## 4.2 Autorégulation

Le principe de l'autorégulation consiste à déterminer le nombre de cellules du module de sorte que la région verticale à droite du coude de la caractéristique corresponde (à la température de fonctionnement), avec la zone critique de fin de charge de la batterie (voir Figure 12).

## 4 Régulation électronique de la charge

Certains fabricants ont proposé dans leur catalogue pour des petites applications où l'on veut faire l'économie du régulateur, des modules dits autorégulés de 30 cellules. En fait ces modules ne s'adaptent, que pour des conditions de température limitées.

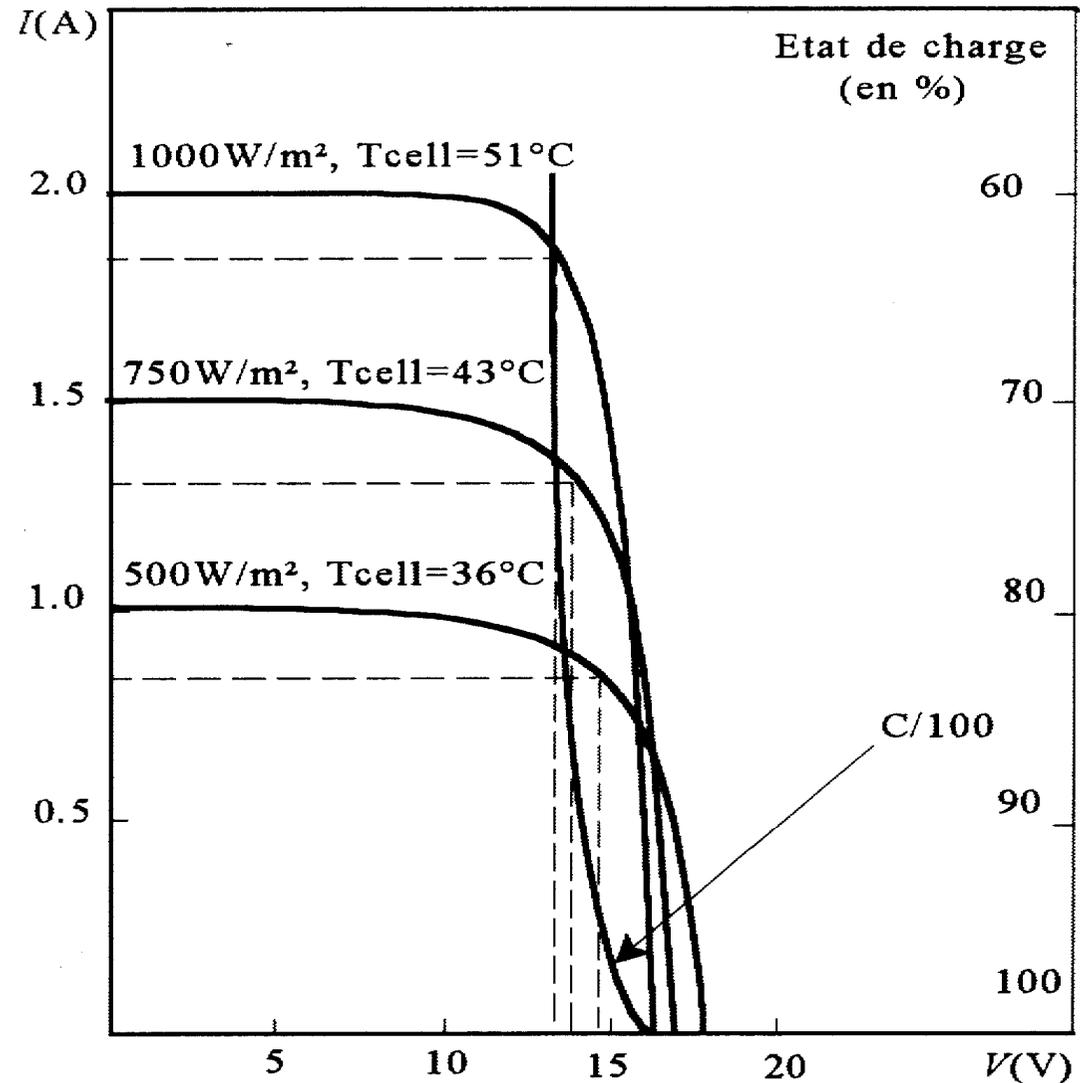


Figure 12 : Charge autorégulée d'un accumulateur au plomb.

# 4 Régulation électronique de la charge

## 4.3 Régulation parallèle (ou shunt)

Le régulateur de charge intervient en dérivation sur le panneau solaire pour dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique, grâce à des composants de puissance.

## 4.4 Régulation série électronique.

Le régulateur de charge intervient en série avec le panneau solaire. Le transistor se comporte comme une résistance variable en fonction de l'état de charge de la batterie.

## 4.5 Régulation série électromécanique.

Le régulateur de charge intervient en série avec le panneau solaire. Il interrompt la charge de la batterie par coupure électromécanique lorsqu'elle atteint un seuil maximum. La remise en charge est automatique à partir d'un seuil de tension inférieur.

# 5 Dimensionnement

Le dimensionnement d'un générateur PV a pour but de déterminer l'optimum technico-économique entre la puissance crête du champ de panneaux solaires et la capacité de batterie associée à partir des besoins électriques de l'utilisateur d'une part, des données d'ensoleillement du site d'autre part et du prix et de la qualité des composants dont on peut disposer sur le marché.

La détermination de la taille des composants doit permettre de garantir une fourniture d'énergie tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée.

## 5.1 Données d'ensoleillement.

Les données d'ensoleillement pour une région déterminée sont généralement disponibles mois par mois<sup>6</sup> dans les atlas solaires et correspondent à l'irradiation globale quotidienne moyenne sur un plan horizontal. Les unités sont exprimées soit en  $cal / cm^2$ , soit en kWh/m<sup>2</sup> sachant que les valeurs de l'ensoleillement sont évidemment fonction de la latitude mais aussi des conditions climatiques locales et des masques naturels ou artificiels.

Pour déterminer l'énergie incidente heure par heure et mois par mois sur le plan des panneaux, on effectue le calcul à partir des données d'ensoleillement sur un plan horizontal<sup>8</sup> et de l'inclinaison donnée aux panneaux solaires.

# 5 Dimensionnement

Si les panneaux doivent rester fixes, l'inclinaison et l'orientation optimales sont déterminées en fonction de la saisonnalité de la demande, de l'irradiation correspondante et de la capacité correspondante des batteries de stockage.

## 5.2 Principe de calcul.

A partir des données de consommation fournies par l'utilisateur, on détermine l'énergie annuelle qui lui est nécessaire et l'énergie journalière moyenne consommée.  $W_U$

On fait comme première hypothèse qu'en moyenne, sur une année, l'énergie journalière fournie par le champ de panneaux solaires ( $W_S$ ) doit être au moins égale, à un coefficient correctif K près, à l'énergie journalière moyenne consommée par l'utilisation ( $W_U$ ).

Pour déterminer l'énergie quotidienne moyenne incidente dans le plan des modules, on effectue le calcul à partir des données d'ensoleillement sur un plan horizontal et de l'inclinaison donnée aux modules à l'aide du programme de calcul de l'apport solaire passif tenant compte des masques.

Ceci ne peut être obtenu de façon précise qu'avec un logiciel de dimensionnement solaire.

## 5 Dimensionnement

Dans le cas d'un système avec stockage par batterie, la méthode proposée est de comparer les Ah/ jour consommés par l'utilisation avec les Ah/jour fournis par les panneaux solaires dans des conditions d'ensoleillement et de température bien définis. Cette méthode permet de s'affranchir de la tension qui dépend de deux paramètres : son état de charge et sa température.

Lorsqu'on fait du stockage inter-saisonnier, en été l'énergie moyenne fournie par le panneau est supérieure à l'énergie consommée : la batterie se charge. En hiver, l'énergie moyenne fournie par le panneau est inférieure à l'énergie consommée : la batterie se décharge.

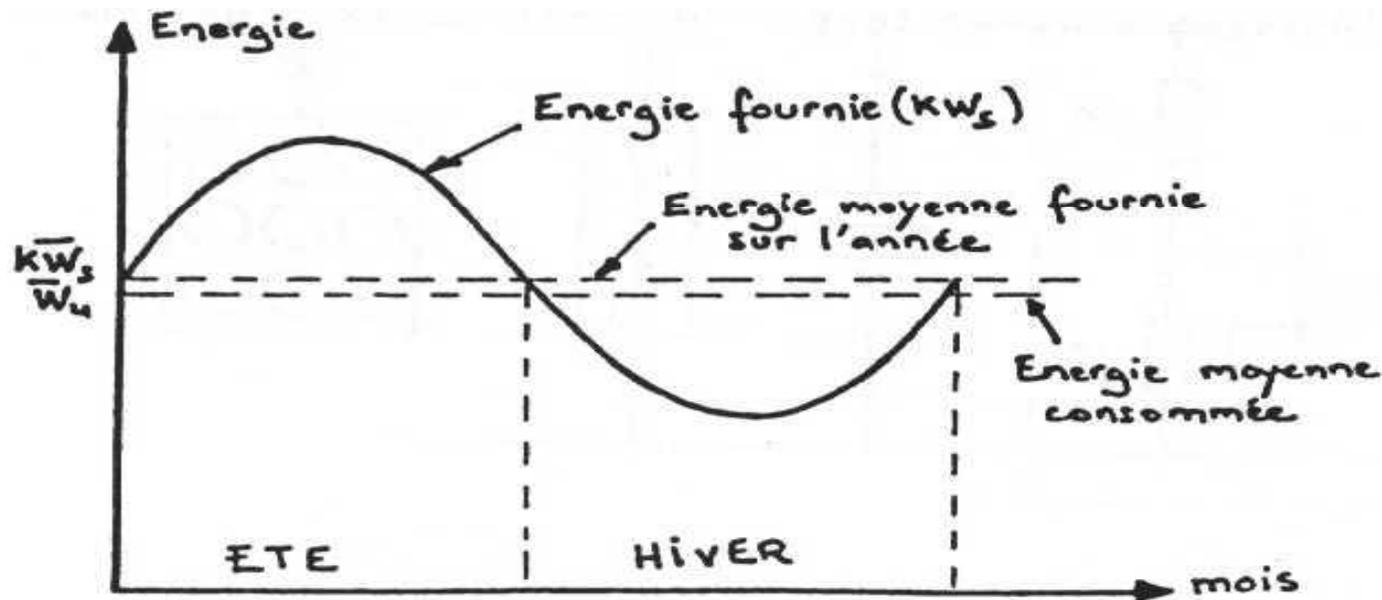


Figure 13 : Evaluation de la consommation journalière

# 5 Dimensionnement

$$W_0 \leq K.W_s \quad \text{où } K : \text{coefficient correctif de l'installation}$$

## 5.2.1 Coefficient correctif (K).

Pour déterminer l'énergie nette disponible à la sortie de la batterie, il faut faire intervenir le coefficient correctif global K qui tient compte :

- o De l'incertitude météorologique (de l'ordre de  $\pm 5 \%$ )
- o De l'encrassement des modules dans le temps (de l'ordre de  $5 \%$ )
- o De l'intégrale de la traversée du vitrage du module sous tous les angles (de l'ordre de  $5\%$ )
- o Du vieillissement des modules (de l'ordre de  $5 \%$ )
- o De la dispersion des caractéristiques des modules lorsqu'ils sont montés en série (de l'ordre de  $5 \%$ )
- o Du rendement faradique de la batterie (perte de l'ordre de  $10 \%$ ).

# 5 Dimensionnement

La prise en compte de tous ces paramètres amène un coefficient correctif global (K) compris entre 0,65 et 0,75. Retenons pour l'instant la valeur de 0,70 .

## 5.2.2 Calcul de la puissance module requise.

Pour déterminer l'énergie nette disponible à la sortie de la batterie, il faut faire intervenir le coefficient correctif global K qui tient compte :

- o De l'incertitude météorologique (de l'ordre de  $\pm 5 \%$ )
- o De l'encrassement des modules dans le temps (de l'ordre de 5 %)
- o De l'intégrale de la traversée du vitrage du module sous tous les angles (de l'ordre de 5%)
- o Du vieillissement des modules (de l'ordre de 5 %)
- o De la dispersion des caractéristiques des modules lorsqu'ils sont montés en série (de l'ordre de 5 %)
- o Du rendement faradique de la batterie (perte de l'ordre de 10 %).

La prise en compte de tous ces paramètres amène un coefficient correctif global (K) compris entre 0,65 et 0,75. Retenons pour l'instant la valeur de 0,70

# 5 Dimensionnement

## 5.2.3 Calcul de la puissance module requise.

La détermination de la puissance crête du champ de panneaux revient à déterminer le nombre total de modules c'est-à-dire le nombre connecté en série multiplié par le nombre de branches en parallèle.

Le nombre de modules en série est connu dès lors que la tension de l'utilisation est spécifiée.

Le nombre de branches parallèles peut être rapidement déterminé par un calcul simple.

**N.B: La tension de charge de la batterie se trouve dans la partie verticale de la caractéristique du champ de modules, autrement dit que le courant de charge soit très inférieur à la valeur  $I_{pmax}$ .**

**On fait l'hypothèse que la perte de puissance dans les câbles de connexion n'affecte pas le point de fonctionnement.**

## 5 Dimensionnement

Il est commode de multiplier l'irradiation en  $\text{cal/cm}^2/\text{j}$  par le facteur 0,0116 pour convertir l'énergie incidente totale reçue sur une journée en un nombre d'heures d'ensoleillement équivalent à  $1 \text{ kW/m}^2$ . En effet, la puissance d'un module exprimée en  $W_c$  est donnée pour un ensoleillement de  $1 \text{ kW/m}^2$ . Ainsi, en première approximation, la production journalière d'énergie (en  $\text{Ah/j}$ ) pour une branche est obtenue en multipliant le courant de module  $I_{pmax}$  par le nombre d'heures (h) d'ensoleillement équivalent à  $1 \text{ kW/m}^2$ .

En fait, les conditions STC de mesure de la puissance crête d'un module ( $1 \text{ kW/m}^2$  à une température de cellules de  $25^\circ\text{C}$ ) sont irréalistes; si elle sont données par le constructeur, il vaut mieux prendre des valeurs de mesure réalisées et vérifier que la tension  $V_{pnoct}$  est toujours supérieure à la tension requise pour la fin de charge de batterie :  $15,1 \text{ V}$ .

Si la consommation journalière de la charge (en  $\text{Ah/j}$ ) est satisfaite tout au long de l'année, on somme sur l'année les productions journalières d'énergie obtenues. Le nombre de branches en parallèle est obtenu simplement, au coefficient K correctif près, en divisant la consommation annuelle de l'utilisation (en  $\text{Ah/j}$ ) par la production annuelle (en  $\text{Ah/j}$ ) délivrée par une branche.

# 5 Dimensionnement

L'inclinaison optimale du champ de module est d'abord fixée par la minimisation du nombre de branches parallèles nécessaires. Elle est en général proche de la latitude

## 5.2.4. Calcul de la capacité de batterie requise.

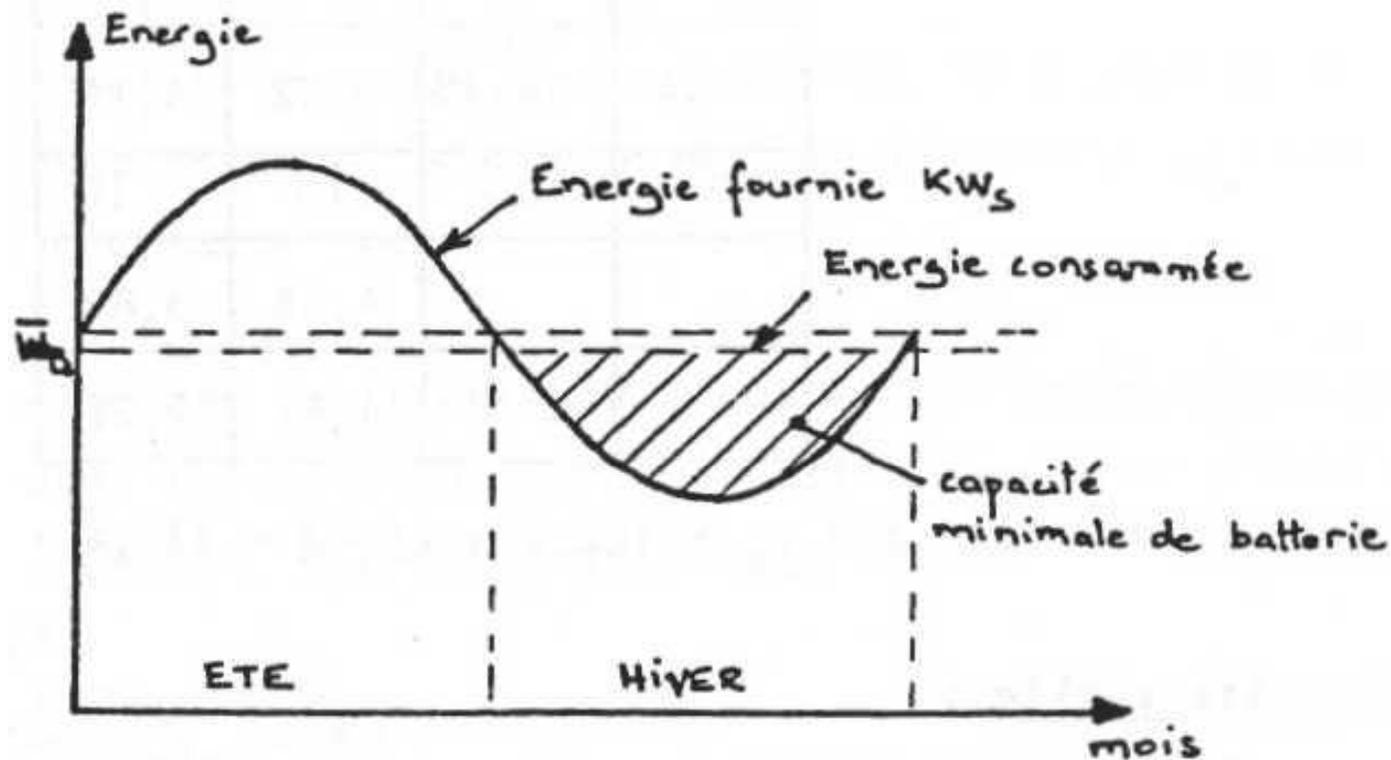


Figure 14 : Stockage saisonnier de la batterie

# 5 Dimensionnement

Si le besoin est permanent sur l'année et qu'il y a un déficit hivernal, le programme de dimensionnement prendra directement en compte la capacité correspondante minimale des batteries de stockage.

## 5.2.5 Calcul économique.

On fait alors un premier calcul de coût prenant en compte : Coût modules, Coût installation modules, Coût batteries, Coût installation batteries, Coût régulateur de charge.

Puis dans un deuxième temps, on corrige l'inclinaison des modules jusqu'à minimiser le déficit.

Si le déficit reste tel qu'il nécessite encore un parc de batteries important et donc trop coûteux, on augmentera le nombre de modules, quitte à générer une forte surproduction en été, jusqu'à

## 5.3.4 Détermination de la capacité batterie.

l'obtention d'un minimum pour le coût global de l'installation.

## 5.2.6. Détermination de la capacité batterie.

Le rôle premier de la batterie est de stocker pendant la journée l'énergie nécessaire pendant la nuit ; sa capacité minimale pour satisfaire cette fonction peut être calculée simplement ;

# 5 Dimensionnement

elle doit servir de tampon de sécurité (surtout pour les systèmes sensibles tel que les relais pendant les périodes de plusieurs journées consécutives sans soleil ; enfin, elle doit combler pendant l'été le déficit hivernal (stockage saisonnier).

## ***5.2.7. Calcul de la capacité minimale.***

La capacité minimale de la batterie peut être calculée en déterminant le cumul d'ampère-heures déficitaires sur les mois d'hiver. La capacité réelle est obtenue en tenant compte des limitations dues aux caractéristiques réelles des accumulateurs. La capacité effective ne doit pas dépasser environ 60 % de la capacité réelle

## ***5.2.8. Calcul de la capacité nominale***

Le type de batterie est choisi en tenant compte du régime de charge et de décharge (le plus souvent à C100) et de la température d'utilisation. Le cycle journalier ne doit pas dépasser 10 à 15 % de la capacité nominale de la batterie pour préserver sa longévité. Enfin, le nombre de jours d'autonomie garantis sans soleil, impose une capacité minimum.

# 5 Dimensionnement

## 5.2.9. Optimisation technico-économique

Le principe de calcul repose sur la détermination d'un générateur (puissance-crête, capacité batterie) satisfaisant aux critères techniques. Toutefois, le dimensionnement d'un système vise aussi, à déterminer un générateur au coût le plus réduit. L'analyse des coûts montre qu'il est judicieux de réduire la capacité batterie (éléments aux coûts élevés et non négligeables).

Pour cela, deux solutions sont possibles pour diminuer l'importance du stockage

### **a) Inclinaison des modules.**

Pour diminuer la capacité minimale de la batterie, une autre solution consiste à augmenter le nombre de modules par rapport à celui déterminé par la moyenne annuelle d'ensoleillement. Pour diminuer la capacité minimale de la batterie, on a intérêt à favoriser les mois déficitaires en inclinant davantage les panneaux afin d'augmenter l'énergie solaire reçue.

### **b) Nombre de modules.**

Toutefois, une inclinaison différente peut être retenue en fonction d'autres critères (esthétique, albedo-neige, etc....).

## 5 Dimensionnement

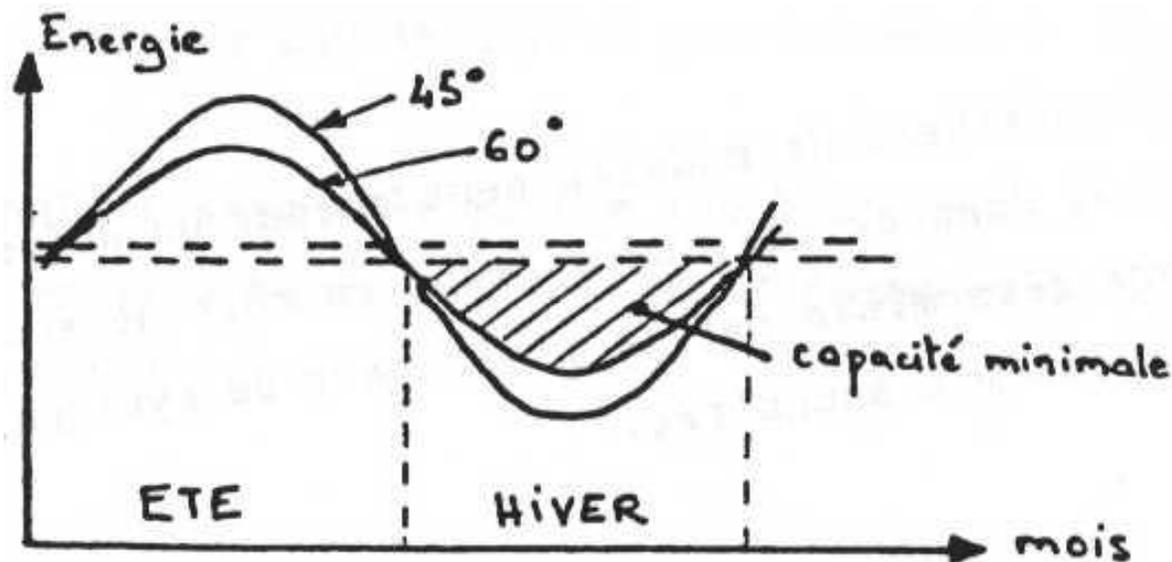


Figure 15 : Influence de l'inclinaison des modules sur le stockage saisonnier des batteries

Ainsi le déficit hivernal diminue et peut éventuellement se réduire à quelques semaines. Un nombre suffisant de modules peut même amener un déficit saisonnier nul. La batterie aura, dans ce cas, uniquement un rôle de stockage journalier. Sa capacité sera déterminée par la profondeur de cycles journalier (10 à 15 %) et de l'autonomie souhaitée.

# 5 Dimensionnement

## Le couplage direct

La charge est alimentée directement par le champ de panneaux "au fil du soleil". Il existe plusieurs cas importants pour lesquels le stockage sous forme d'énergie électrique n'est pas nécessaire:

- l'électrolyse de l'eau avec stockage sous forme d'hydrogène.
- le pompage de l'eau et on stockage dans des réservoirs.
- les réfrigérateurs et le stockage du froid sous forme pas de stockage.

Comme il n'y a pas de batterie interposée pour fixer la de glace.

- le séchage des végétaux par ventilation, qui ne nécessite tension de travail, c'est l'impédance de la charge qui fixe le point de fonctionnement. Il faut donc adapter du mieux qu'il est possible le groupement de modules à la charge.

# 5 Dimensionnement

## Raccordement au réseau

*Partout où le réseau de distribution électrique est à disposition il est possible de se passer de l'élément de stockage par un couplage au réseau. Dans ce cas c'est le réseau qui joue le rôle de stockage.*

Ceci, consiste à compenser les différences entre la production et la consommation grâce à un échange d'énergie avec le réseau. De cette façon, les installations photovoltaïques peuvent se dispenser d'un système de stockage par batteries et injecter dans le réseau tous les surplus d'énergie produits.

La mise en service de centrales photovoltaïques dans un réseau de distribution électrique élargit le rôle du distributeur. En plus de sa fonction traditionnelle de répartiteur de l'énergie. Le distributeur assure maintenant le rôle de compensateur entre les excédents et les insuffisances de la production d'électricité d'origine solaire.

Il est absolument nécessaire de s'assurer que les conditions de reprise du courant "solaire" souvent très favorables à un moment donné soient garanties au moins pendant la durée d'amortissement de l'installation.

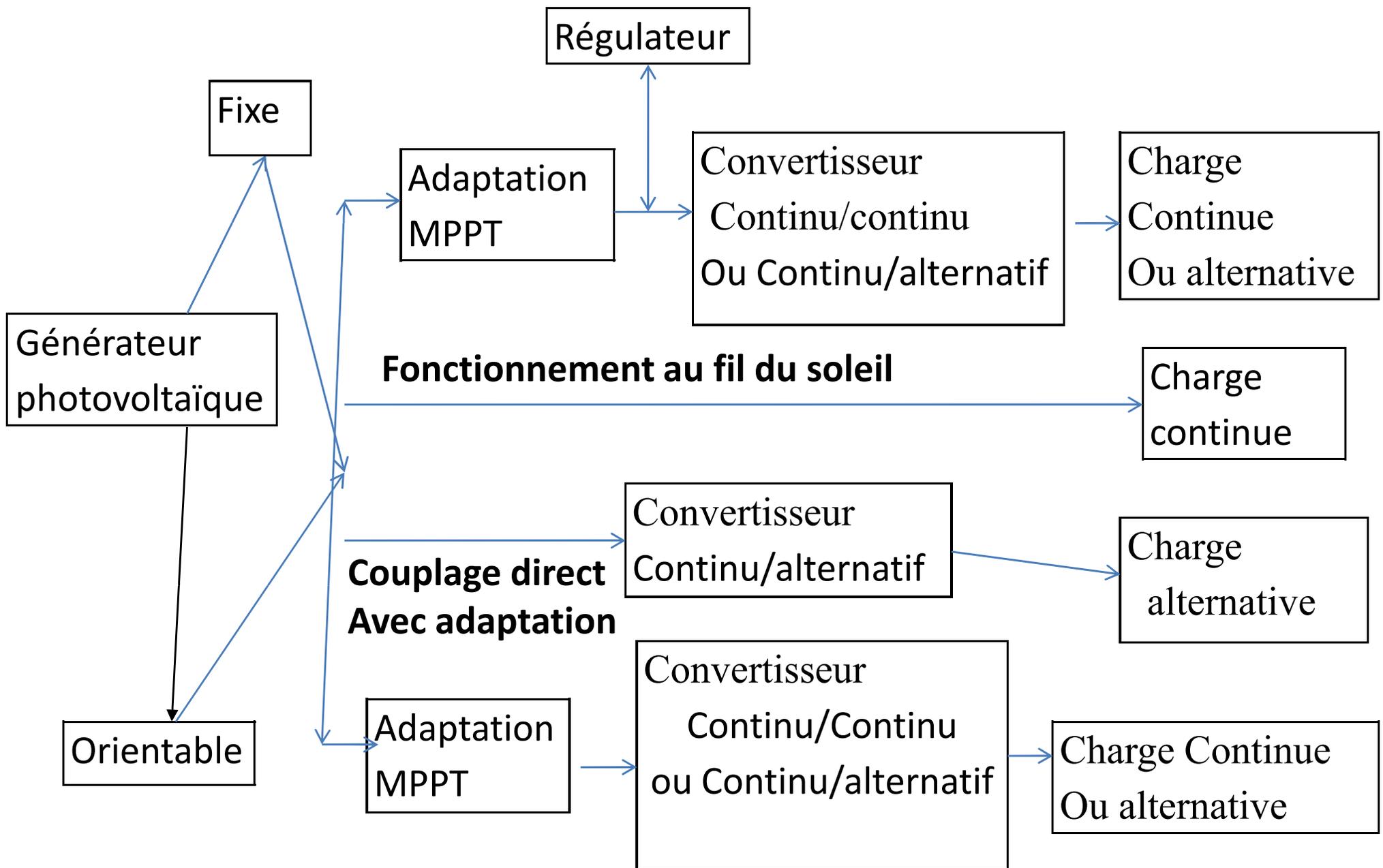


Figure 0. : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

Couplage direct  
Avec adaptation