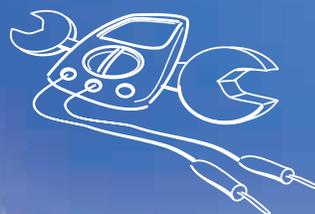


PERACOD



Programme pour la promotion des énergies renouvelables, de l'électrification rurale et de l'approvisionnement durable en combustibles domestiques

Le manuel du TECHNICIEN PHOTOVOLTAÏQUE



2011

Mansour Assani Dahouénon

du



Ministère en charge
de l'Énergie

Appuyé par



Ministère fédéral de la
Coopération économique
et du Développement

À travers

giz

en collaboration avec



Ministère des Énergies
Renouvelables

www.peracod.sn



Le manuel du TECHNICIEN PHOTOVOLTAÏQUE

Publication

PERACOD

Hann Maristes – BP 3869

Dakar, Sénégal

Tél. : (221) 33 832 64 71

Fax : (221) 33 832 64 79

Du

Ministère en charge de l'Énergie

En collaboration avec

Ministère des Énergies Renouvelables

Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

www.giz.de

Rédaction

Mansour Assani Dahouenon (PERACOD)

Crédits photos

PERACOD, GIZ/Kamikazz

Design

Graphimatic

Ce document est disponible sur le site www.peracod.sn.

Dakar, Avril 2011

Avant-propos

L'exploitation des énergies renouvelables, en particulier de celle issue de l'astre solaire, aux fins d'assurer un approvisionnement durable en services énergétiques, s'est considérablement accrue durant ces dernières décennies.

Les équipements photovoltaïques sont, au fil du temps, devenus fiables. Par ailleurs les installations sont plus durables grâce notamment à la qualité de la réalisation des ouvrages mais aussi de leur maintenance. Il est donc important, afin de préserver ces acquis, d'avoir des techniciens bien formés et dotés de supports pouvant les assister dans leurs travaux quotidiens.

Ainsi, ce manuel du technicien photovoltaïque se veut un support qui accompagne le technicien au cours de la mise en œuvre des équipements, mais aussi des interventions d'entretien et de maintenance des installations.

Après avoir élaboré plusieurs supports de formation dans le cadre de multiples enseignements que nous avons eu la charge de prodiguer, il nous a été donné de constater un manque de manuel didactique destiné aux techniciens de terrain.

Ce manuel est donc le fruit de plus de deux décennies d'expériences liées à la formation des techniciens mais aussi à leur suivi lors de la réalisation des tâches d'installation et de maintenance.

Le manuel du technicien photovoltaïque contient l'essentiel de ce qu'il faut savoir pour réaliser une installation de qualité et une maintenance optimale. Nous l'avons voulu pratique et simple afin qu'il puisse constituer un guide du technicien aussi bien débutant qu'expérimenté.

Il est constitué de 5 parties thématiques :

La partie 1 : qui présente les principes de base sur l'électricité ;

La partie 2 : qui traite de la conversion photovoltaïque en présentant les caractéristiques fonctionnelles des différents sous-systèmes ainsi que les conditions

optimales de leur fonctionnement ;

La partie 3 : qui donne des prescriptions indispensables pour une installation des équipements selon les normes ;

La partie 4 : qui fournit la démarche pour une réalisation optimale des tâches de maintenance préventive des installations ; et

La partie 5 : qui donne la démarche pour une recherche rapide des pannes courantes, ainsi que les méthodes pour remédier à ces pannes.

Nous pensons ainsi, par la publication de ce manuel, pouvoir contribuer à consolider la fiabilité des installations, en appuyant une formation de qualité mais aussi en fournissant un support aux techniciens de terrain qui leur permette de répondre plus aisément aux différentes questions d'entretien et de maintenance qu'ils se posent au quotidien.

Mansour Assani Dahouenon

Conseiller Technique en électrification rurale
et énergies renouvelables
PERACOD

1. Principe de l'électricité à courant continu	7
1.1 Circuit électrique	7
1.2 Générateurs	7
1.3 Conducteurs	7
1.4 Récepteurs	7
1.5 Définition	8
1.5.1 Tension électrique	8
1.5.2 Intensité de courant électrique	8
1.5.3 Résistance électrique	8
1.5.4 Puissance électrique	9
1.5.5 Loi d'Ohm	9
1.5.6 Circuit Parallèle	10
1.5.7 Circuit Série	10
1.5.8 Energie Electrique	11
2. Conversion photovoltaïque	12
2.1 L'effet photovoltaïque	13
2.2 Les panneaux photovoltaïques	13
2.2.1 La cellule photovoltaïque	13
2.2.2 Les modules photovoltaïques	14
2.2.3 Protections des cellules : diodes by-pass et diode anti-retour	16
2.2.4 Paramètres principaux	19
2.3 Batteries d'accumulateurs au plomb	20
2.3.1 Constitution et paramètres caractéristiques	20
2.3.2 Principe de fonctionnement	23
2.3.3 Précautions d'exploitation	25
2.3.4 Différentes causes de la défaillance des batteries	25
2.4 Régulateur de charge	27
2.4.1 Principaux types de régulateur de charge	28
2.5 Groupement des modules et des batteries	32
2.5.1 Montage des modules en série	32
2.5.2 Montage des modules en parallèle	32
2.5.3 Montage des modules en série parallèle	33
2.5.4 Montage des batteries en série	35
2.5.5 Montage des batteries en parallèle	35
2.5.6 Montage des batteries en série-parallèle	36

Sommaire

2.6	L'onduleur	38
2.7	Quelques exemples d'applications photovoltaïques.....	39
3.	Procédure d'installation des systèmes	42
3.1	Module photovoltaïque	42
3.2	Installation du régulateur de charge	47
3.3	Installation de la batterie	47
3.4	Installations intérieures (câblage)	48
4.	Mise en œuvre des équipements.....	52
4.1	Préparation de la batterie.....	52
4.2	Déroulement de la charge préalable.....	53
5.	Entretien et maintenance.....	56
5.1	Entretien trimestriel	56
5.2	Entretien annuel	62
6.	Recherche et réparation des pannes	66
6.1	Symptômes de dysfonctionnement.....	66
6.2	Diagrammes de recherche de pannes	67
6.3	Procédures d'opération de dépannage	70

1. Principe de l'électricité à courant continu

1.1 Circuit électrique

Un circuit électrique est composé de générateur(s) et de récepteurs reliés entre eux par des conducteurs. Par convention, le courant circule dans ce circuit des bornes positives vers les bornes négatives.

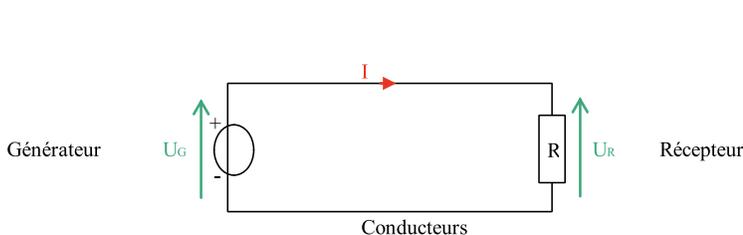


Schéma 1-1
Circuit électrique de base

Par convention, les signes sont établis selon la règle suivante
 $U_G > 0 // U_R > 0 // I > 0$

1.2 Générateurs

Les générateurs sont des appareils qui transforment de l'énergie sous une forme donnée en énergie électrique.

Exemple : Panneau solaire : transforme l'énergie solaire en énergie électrique

Groupe électrogène : transforme l'énergie mécanique en énergie électrique

1.3 Conducteurs

Les conducteurs sont des matériaux qui permettent le passage du courant électrique. Ces conducteurs relient les générateurs aux récepteurs.

Exemple : Câble électrique

1.4 Récepteurs

Les récepteurs sont des appareils d'utilisation qui consomment de l'énergie électrique avec ou sans dissipation de chaleur.

Exemple : Lampes, radio ; radiocassettes, téléviseurs, moteurs...

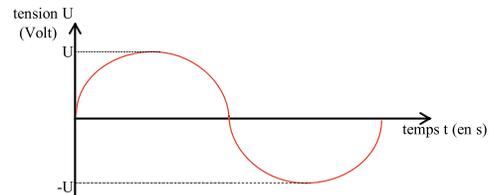
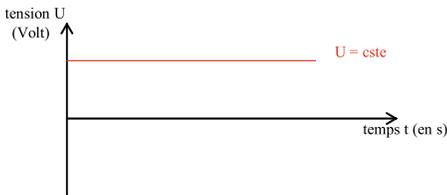
1.5 Définition

1.5.1 Tension électrique

Pour que l'électricité se propage dans les conducteurs (câbles) du générateur aux récepteurs, il faut qu'il existe une différence de niveau (potentiel) aux bornes du générateur. Cette différence de niveau est appelée tension électrique. Le symbole de la tension est «U», l'unité de mesure est le Volt «V». Quand la tension électrique «U» aux bornes d'un générateur est constante, on dit que ce générateur délivre du courant continu. Quand la tension est changeante on dit que la tension est alternative.

Schémas 1-2 et 1-3

Evolution de la tension en fonction du temps (tension constante et tension alternative).



1.5.2 Intensité de courant électrique

L'intensité du courant électrique est la quantité d'électricité qui circule en un temps donné à travers un conducteur. Le symbole de l'intensité du courant électrique est «I», l'unité de mesure est l'Ampère «A».

1.5.3 Résistance électrique

L'opposition que présente le conducteur au passage du courant électrique est appelée résistance électrique. Son symbole est R et l'unité de mesure est l'Ohm (Ω). La résistance d'un conducteur dépend de la nature de ce conducteur soit sa résistivité (ρ), de sa longueur (L) et de sa section (S).

$$R = \rho \times \frac{L}{S}$$

Avec : R [Ω]
 ρ [Ω.mm².m⁻¹]
 L [m]
 S [mm²]

Exemple : Un conducteur en cuivre mesure 10 mètres de longueur (L) et a une section S de 2,5 mm². Sa résistivité est ρ = 0,01786 Ω.mm²/m à 25°C.

La résistance de ce conducteur est :

$$R = 0,01786 * \frac{10}{2,5} = 0,0714 \Omega \quad \text{donc: } R = 0,0714 \Omega$$

1.5.4 Puissance électrique

La puissance électrique est le produit de l'intensité de courant et de la tension. Son symbole est P, son unité le Watt (W).

$$P = U \times I$$

Avec : P en [W]
 U en [V]
 I en [A]

Exemple : Si un générateur d'une tension de 12 Volts alimente un récepteur qui appelle un courant de 5 Ampères. La puissance débitée par le générateur est :

$$P = U \cdot I = 12 * 5 = 60 \text{ W}$$

1.5.5 Loi d'Ohm

La loi d'Ohm exprime la relation entre la tension électrique, l'intensité de courant et la résistance électrique. Cette loi peut s'exprimer des façons suivantes :

$$U = R \times I \quad R = \frac{U}{I} \quad I = \frac{U}{R}$$

Avec : U en Volt [V]
 R en Ohm [Ω]
 I en Ampères [A]

Connaissant deux de ces valeurs (R, U ou I), la troisième peut être déduite par l'une des formules indiquées ci-dessus.

Exemples :

$$\begin{array}{l}
 R = 3 \Omega \\
 I = 5 \text{ A}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} R \\ I \end{array}} \right\} \longrightarrow U = R \times I = 3 \Omega \times 5 \text{ A} = \underline{15 \text{ V}}$$

$$\begin{array}{l}
 U = 12 \text{ V} \\
 I = 3 \text{ A}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} U \\ I \end{array}} \right\} \longrightarrow R = U / I = 12 \text{ V} / 3 \text{ A} = \underline{4 \Omega}$$

$$\begin{array}{l}
 U = 24 \text{ V} \\
 R = 4 \Omega
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} U \\ R \end{array}} \right\} \longrightarrow I = U / R = 24 \text{ V} / 4 \Omega = \underline{6 \text{ A}}$$

1.5.6 Circuit Parallèle

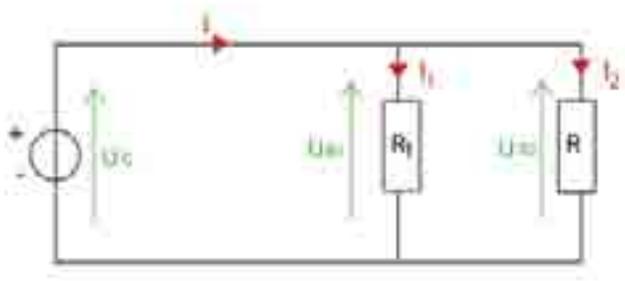


Schéma 1-4
Circuit parallèle

Quand les récepteurs sont placés en parallèle, alors les caractéristiques du circuit sont les suivantes :

- $I = I_1 + I_2$ (Loi des nœuds : la somme des courants arrivant à un nœud est égale à la somme des courants qui en sortent)
- $U_G = U_{R1} = U_{R2}$
- La tension résultante est égale à la tension aux bornes de chacune des résistantes.

1.5.7 Circuit Série

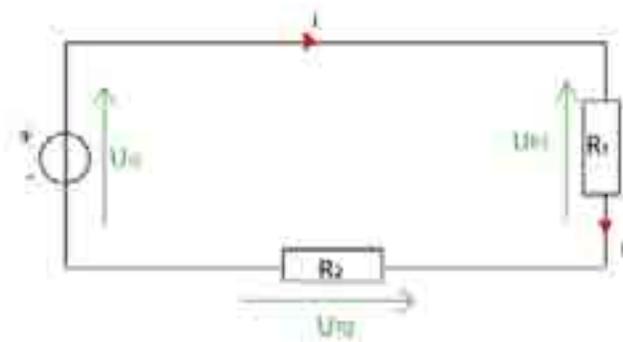


Schéma 1-5
Circuit série

Quand les récepteurs sont placés en série, alors les caractéristiques du circuit sont les suivantes :

- L'intensité est la même dans tout le circuit.
- $U_G = U_{R1} + U_{R2}$
- La tension résultante est la somme des tensions aux bornes des résistances

1.5.8 Energie Electrique

L'énergie électrique est le produit de la puissance par le temps. Son symbole est E et son unité est le Wattheure [Wh]

$$E = P \times t$$

Avec : E en [Wh]
P en [W]
t en [h]

Le courant continu peut être transformé en courant alternatif.

Pour cela on utilise un appareil appelé onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif

Cet appareil est donc alimenté à son entrée par du courant continu. On obtient à sa sortie du courant alternatif qui permet d'alimenter des récepteurs en courant alternatif

2. Conversion photovoltaïque

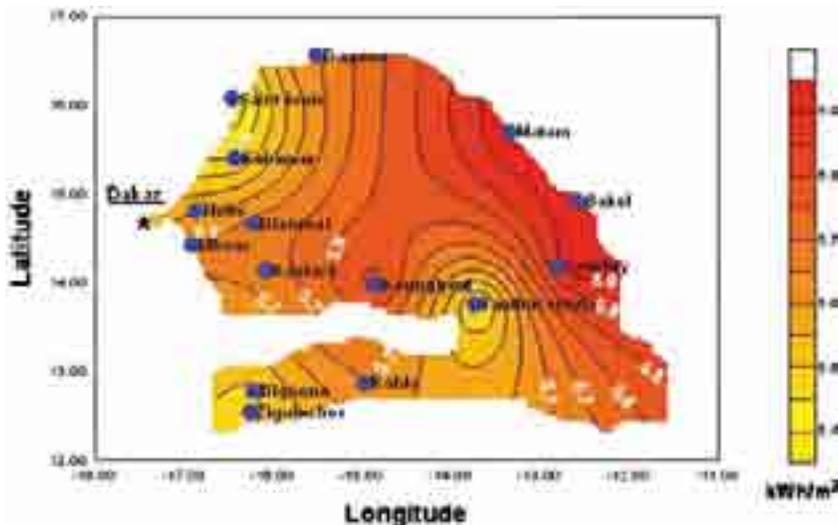
Malgré la grande distance qui le sépare de la terre, le soleil lui fournit une énergie importante. Cette énergie est dispersée puisque que la durée d'ensoleillement varie d'une région à une autre de la terre. Cette énergie change aussi selon les saisons et les caractéristiques climatiques du site.

Le rayonnement solaire change en outre suivant les conditions météorologiques du moment (nébulosité, poussière, humidité, etc.) et la position du soleil dans le ciel (heure).

On appelle **ensoleillement** ou **rayonnement** la puissance du rayonnement solaire reçue par une unité de surface : Ensoleillement moyen annuel). Il s'exprime en Watt par mètre carré [W/m²].

On appelle **irradiation** l'énergie reçue pendant un intervalle de temps. Si cet intervalle de temps est le jour, elle s'exprime en Wattheure par mètre carré par jour [Wh/m²/j].

Carte 2-1
Carte préliminaire de
l'ensoleillement moyen
(kWh/ m²/ j) du Sénégal



2.1 L'effet photovoltaïque

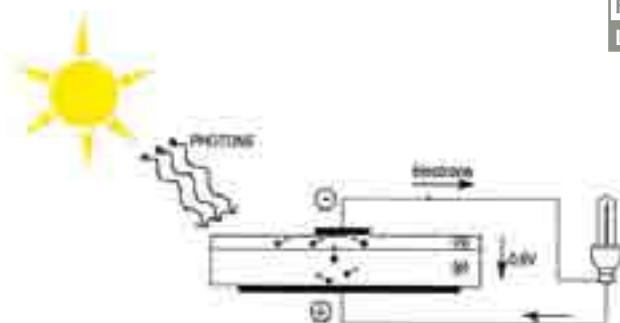


Figure 2-2
L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique.

2.2 Les panneaux photovoltaïques

2.2.1 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composantes électroniques qui transforment les rayons lumineux du soleil en électricité.

Ces cellules ont des puissances unitaires assez faibles (de l'ordre de 1 W).



Figure 2-3
Cellule photovoltaïque

2.2.2 Les modules photovoltaïques

Association des cellules

Afin d'obtenir des modules de puissances élevées, les cellules sont associées en série ou en série / parallèle. Pour cela les connexions des pôles négatives situées sur les faces avant des cellules sont connectées aux pôles positifs situés sur les faces arrière des cellules suivantes.



Figure 2-4
Association des cellules

Le module photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Il joue donc le rôle de générateur dans le système photovoltaïque. L'énergie produite par un module photovoltaïque dépend du niveau de l'énergie solaire. Ainsi, durant la journée, l'énergie produite va varier en fonction de la variation de l'énergie solaire. Le module photovoltaïque est obtenu après association des cellules avec les éléments constitutifs ci-après :

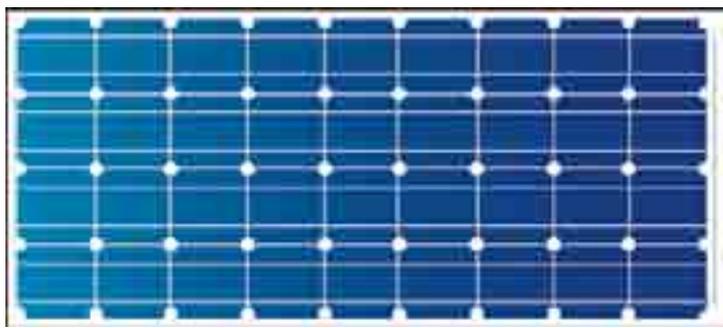
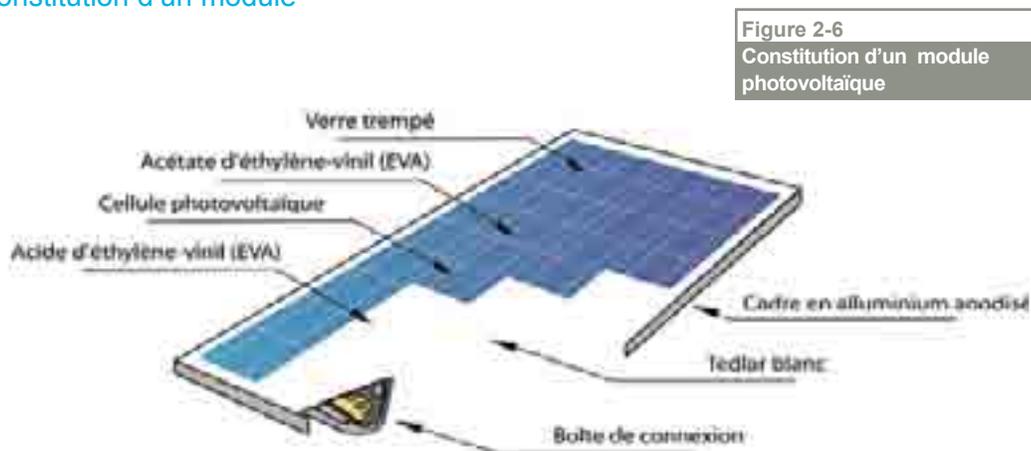


Figure 2-5
Module photovoltaïque

Constitution d'un module



Un module est constitué des cellules associées en série/parallèle encapsulées et protégées par :

En Face avant du module

La face avant du module doit être en verre ayant les caractéristiques suivantes :

- bonne transparence
- résistance à l'impact et à l'abrasion (grêle, jet de pierres, vent de sable, nettoyage au chiffon).
- étanchéité à l'humidité.

L'enrobage des cellules ayant les caractéristiques suivantes :

- transparence (à l'avant)
- souplesse pour «enrober» les cellules et connexions.
- adéquation aux indices optiques du verre et des cellules.

Le matériau généralement utilisé est de l'Acétate d'éthylène-vinyl (EVA).

En Face arrière, un matériau ayant les caractéristiques suivantes :

- Protection mécanique contre le poinçonnement et les chocs (risque de mise à nu et de bris des cellules).
- étanchéité à l'humidité.
- bonne évacuation de la chaleur.
- La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (plus fragile).

Un Boîtier de connexion qui permet :

- le repérage des sorties (+, -, éventuellement point milieu),
- la connexion et le passage des câbles de liaison,
- le logement des diodes de protection,
- l'étanchéité à l'humidité.

Un joint périphérique

Il évite les pénétrations d'humidité entre la face avant et la face arrière.

Un cadre

- Il permet le montage et la fixation mécanique, tout en participant si nécessaire à la rigidité du module. Il doit résister à la corrosion (inox, aluminium...) et la visserie doit être choisie afin d'éviter des problèmes de corrosion.
- Le cadre est généralement en aluminium ou en aluminium anodisé avec une visserie en matériau inoxydable.

2.2.3 Protections des cellules : diodes by-pass et diode anti-retour

Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque.

- La protection par diodes parallèles (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.
- La diode série placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour.

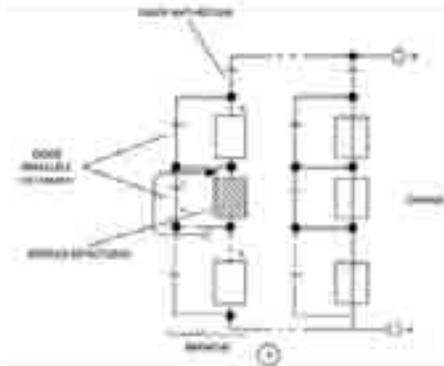
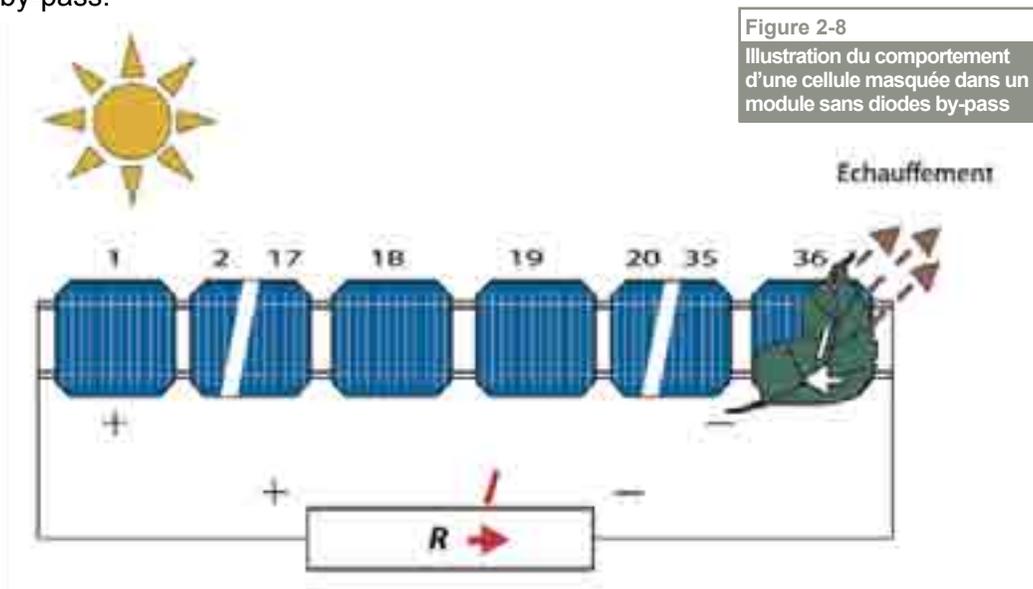
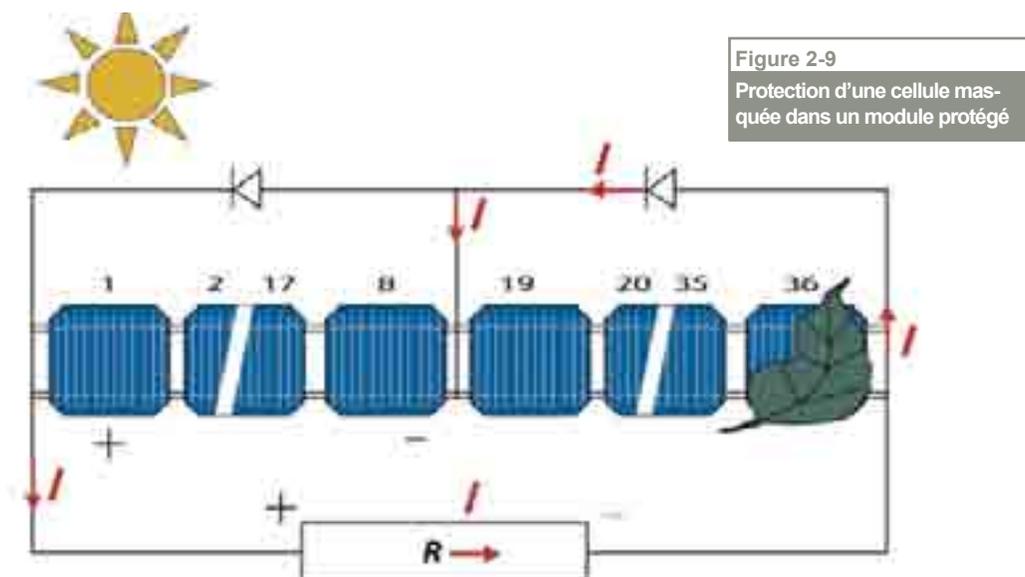


Figure 2-7
Protections des modules :
diodes by-pass et anti-retour

Comme le montre la figure ci-après, quand une cellule des 36 d'un module est masquée, elle s'échauffe anormalement si le module n'est pas équipé de diodes by-pass.

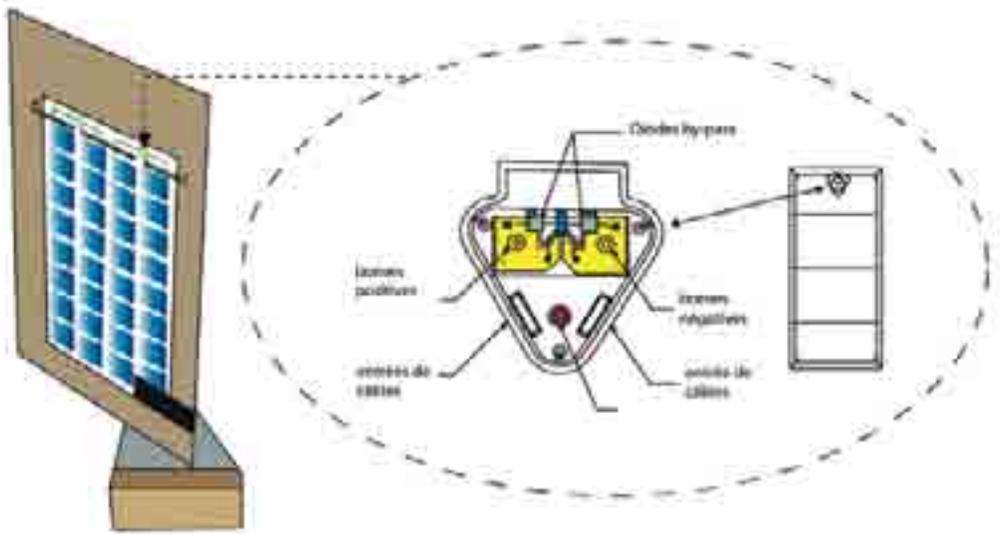


Quand le module est équipé de diodes by-pass la cellule masquée est protégée contre l'échauffement comme le montre la figure ci-après :



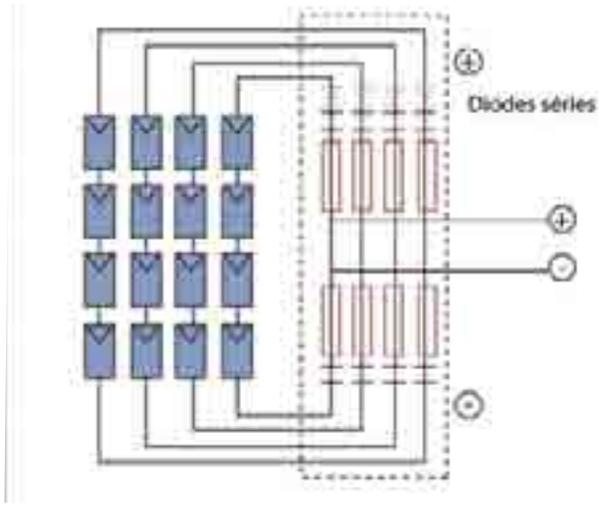
Par commodité, les cellules d'un module sont protégées par deux diodes placées dans la boîte de connexion du module

Figure 2-10
Disposition des diodes by-pass dans un module



Dans le cas de deux ou plusieurs modules branchés en parallèle, les diodes série empêchent le courant de traverser le module qui devient récepteur (par défaut ou par occultation).

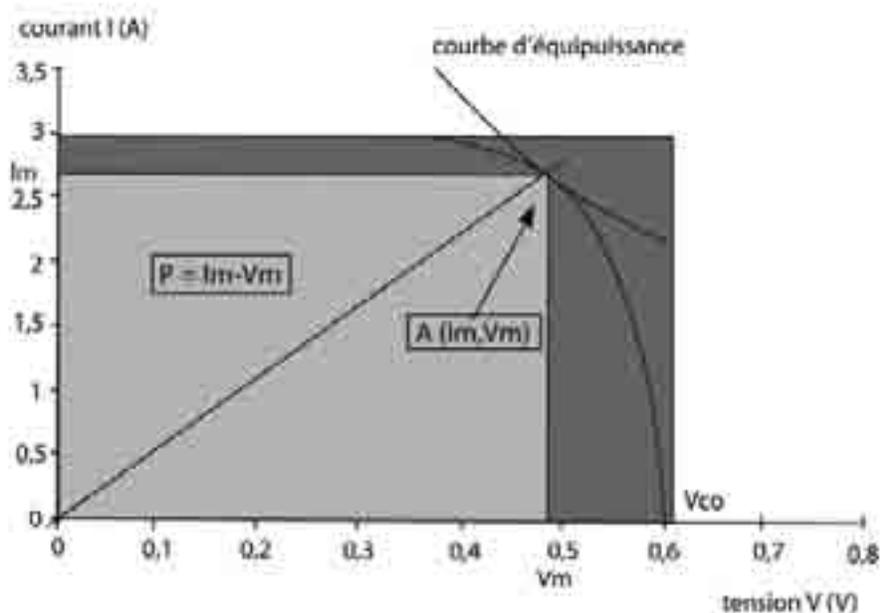
Figure 2-11
Diodes anti-retour



2.2.4 Paramètres principaux

La caractéristique fonctionnelle d'un module est illustrée par sa caractéristique Courant-Tension ci-dessous.

Graphe 2-12
Caractéristique courant-tension
d'un module photovoltaïque



Les principaux paramètres qui caractérisent un module sont :

- le courant de court-circuit : I_{cc}
- la tension de circuit ouvert : V_{co}
- le courant correspondant au point de puissance maximale : I_m
- la tension correspondant au point de puissance maximale V_m
- Puissance crête : qui est la puissance maximale : $P = V_m \cdot I_m$: pour une température des cellules $T_j = 25^\circ\text{C}$, un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une distance optique AM 1,5

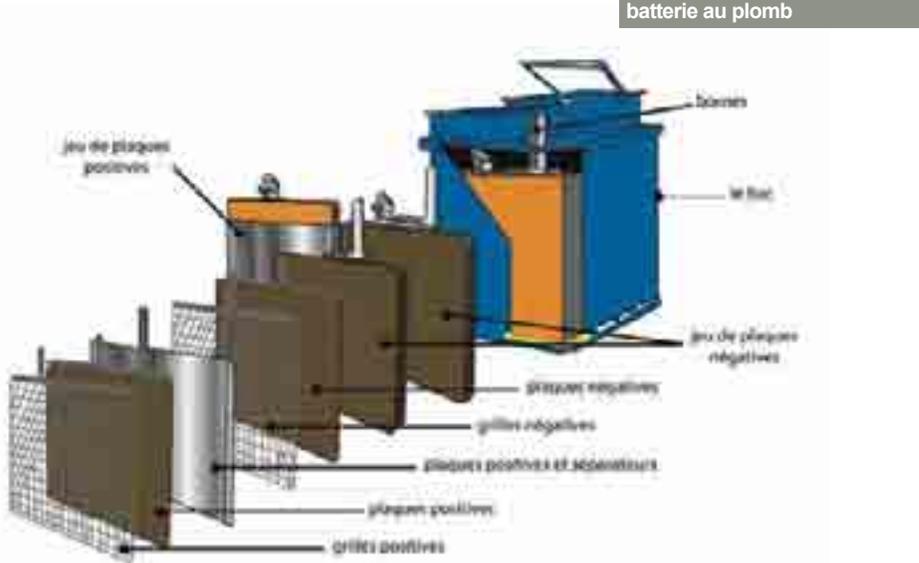
La tension qui correspond à la puissance maximale sous un ensoleillement donné représente 75 à 90 % de la tension de circuit ouvert. Elle diminue en fonction de la température.

Le courant maximal que peut débiter un module (IM) représente 90 à 94 % du courant de court-circuit sous un ensoleillement donné

Le courant de court-circuit et le courant maximal en charge que peut débiter un module sont presque exclusivement dépendants de l'ensoleillement.

2.3 Batteries d'accumulateurs au plomb

2.3.1 Constitution et paramètres caractéristiques



Quatre éléments sont indispensables pour le fonctionnement d'une batterie au plomb. Il s'agit d'une électrode positive, d'une électrode négative, d'un électrolyte et d'un séparateur :

- l'électrode négative est constituée de plomb spongieux (Pb),
- l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb (PbO₂),
- l'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄),
- le séparateur en matière poreuse isolante a les propriétés suivantes :
 - * grande résistivité électrique,
 - * grande résistance chimique à l'acide sulfurique,
 - * bonne porosité aux ions.

Le séparateur a pour but d'éviter un court-circuit interne entre deux électrodes. En effet, pour des raisons d'encombrement et de réduction de la résistance interne, les plaques positives et négatives d'un accumulateur sont très proches les unes des autres ($d \leq 10$ mm).

L'électrolyte est fabriqué à partir de l'acide sulfurique hautement concentré en le versant dans de l'eau purifiée

La densité nominale de l'électrolyte pour les accumulateurs au plomb est spécifiée selon les applications par le fabricant de batterie et par rapport à une température nominale

Les caractéristiques principales des batteries au plomb sont :

a) Tension nominale : multiple de 2 V (6, 12, 24 ...)

b) La capacité nominale de la batterie

La capacité d'une batterie détermine pendant combien de temps cette batterie peut être déchargée à courant constant. Ainsi une batterie de 50 Ah peut être déchargée avec un courant constant de 5 A pendant 10 heures ($5 \text{ A} \times 10 \text{ h} = 50 \text{ Ah}$). La capacité C d'une batterie est donc le produit du courant de décharge I par le temps de décharge t.

$$\begin{aligned} C &= I \cdot t \\ [\text{Ah}] &= [\text{A}] [\text{h}] \end{aligned}$$

Exemple : Pendant combien de temps une batterie de 100 Ah peut-elle être déchargée avec un courant constant de 10 A ?

$$\begin{aligned} \text{Si : } C &= I \cdot t \\ C &= 100 \text{ Ah} \\ I &= 10 \text{ A} \end{aligned}$$

Une batterie de 100 Ah peut donc être déchargée avec un courant constant de 10 A pendant 10h.

NOTE :

C_{10} = Capacité (Ampères-heures) restituée lors d'une décharge en 10 heures.
 C_{100} = Capacité (Ampères-heures) restituée lors d'une décharge en 100 heures. Cette batterie est mieux adaptée aux conditions de charge-décharge rencontrées en utilisation photovoltaïque

c) **La densité de l'électrolyte**

d) **Autodécharge**

L'autodécharge est la perte de capacité en pourcentage de la capacité nominale lorsque la batterie n'est pas utilisée.

e) **Rendement énergétique**

Le rendement est le rapport entre la quantité d'énergie débitée à la décharge et la quantité d'énergie fournie lors de la charge.

Quelques définitions utiles :

- **La tension de fin de charge :** Est la tension d'un élément ou d'une batterie à laquelle le processus de charge est arrêté par la source chargeante.
- **Tension de fin de décharge :** La tension d'un élément ou d'une batterie à laquelle la décharge est terminée. Cette tension dépend du courant de décharge.
- **Profondeur de décharge : DOD :** Quantité de charge restituée par une batterie pleinement chargée et exprimée en pourcentage par rapport à la capacité nominale de la batterie.
- **Tension de Gassing :** Tension à laquelle s'enclenche le phénomène de dégagement gazeux sur chaque électrode de la batterie. Ce phénomène est corrélé à la tension. La valeur de la tension de gassing est elle-même presque uniquement dépendante de la température.
- **Charge d'égalisation :** La continuation de la charge d'une batterie au delà de la tension de fin de charge en vue d'obtenir l'égalisation des charges des différents éléments de la batterie.

Quelques exemples de batteries les plus utilisées pour les applications photovoltaïques :

- **Batteries formées d'éléments stationnaires à plaque positive tubulaire (2 V) et grande réserve d'électrolyte. Capacités courantes : de 100 à 3.000 AH. Ce type de batterie est le mieux adapté aux cycles journaliers et saisonniers rencontrés dans les systèmes PV.**
- **Batteries formées d'éléments stationnaires à plaques planes (2 V) et grande réserve d'électrolyte. Capacités courantes : de 10 à 300 AH. Ces batteries sont moins performantes que celles ci-dessus en nombre de cycles (durée de vie).**
- **Batteries plomb étanche sans entretien (2, 6 et 12 V). Capacités courantes : 10 à 100 AH. Ces batteries ont une aptitude au cyclage beaucoup moins élevée et ne doivent donc être spécifiées que pour des applications où la durée de vie n'est pas primordiale par rapport au coût initial.**

NOTE : Les batteries dites de «démarrage» (utilisées pour les automobiles et les camions) et celles dite «de traction» (utilisées par exemple pour les chariots élévateurs) ne sont pas du tout adaptées à un usage photovoltaïque.

2.3.2 Principe de fonctionnement

En décharge

Au cours de la décharge. Il y a formation de cristaux (sulfate de plomb) sur chacune des électrodes. La densité devient faible et ceci en fonction de la quantité déchargée.

La densité de l'électrolyte décroît en fonction de la quantité déchargée.

La tension de fin de décharge est fortement liée au courant de décharge

En charge

- Durant la charge, le sulfate de plomb est transformé au niveau des plaques, en plomb (Pb) pour l'électrode négative et en oxyde de plomb (PbO₂) pour l'électrode positive. Cette formation s'accompagne de la formation d'acide sulfurique. La densité augmente.

- La charge d'une batterie dans un système photovoltaïque s'effectue généralement selon la caractéristique de charge IU. La première phase s'effectue à courant «quasiment» constant jusqu'à l'atteinte de la tension de fin de charge à partir de laquelle commence la deuxième phase de charge qui s'effectue à tension constante. Durant cette deuxième phase, le courant de charge sera réduit à niveau correspondant au maintien de la charge dans le but de conduire à une charge complète de la batterie.

Au cours de la charge de la batterie, on note :

- Que la densité croît lentement en début de charge pour remonter brusquement en fin de charge. Cette remontée brusque de la densité est le résultat de l'homogénéisation de l'électrolyse qui fait suite à son bouillonnement causé par l'apparition d'un dégagement gazeux.
- Que le phénomène de dégagement gazeux appelé «gassing» est lié à la tension de charge qui est elle même quasiment dépendante de la température selon la formule :

$$(2) V_g = V_{gt0} - 0,005XT$$

V_g = tension de gassing correspondant à la température T

V_{gt0} = tension de gassing à $T = 20^\circ\text{C}$

T = température actuelle en $^\circ\text{C}$

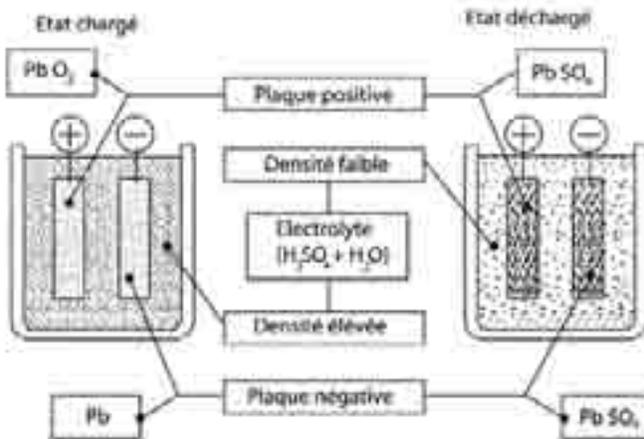


Figure 2-14
Principe de fonctionnement
d'une batterie au plomb

2.3.3 Précautions d'exploitation

Des caractéristiques fonctionnelles des batteries au plomb présentées ci-dessus découlent certaines dispositions à prendre qui sont indispensables au bon fonctionnement de ces batteries:

- **La tension de fin de charge** doit être fixée en tenant compte de la température :
 - Soit au niveau du régulateur qui doit être équipé d'un dispositif appelé compensateur de température qui fixe automatiquement la tension de fin de charge en fonction de la température mesurée.
 - Soit en prévoyant une tension fixe calculée à partir de la formule (2) En utilisant une température maximale du site.
- Il faudra veiller à ce que la durée du gassing ne dépasse pas 10 heures par mois.
- La fixation du seuil de tension de fin de décharge doit tenir compte du courant moyen de décharge
- Des charges d'égalisation doivent être prévues au moins deux fois par an(si le régulateur ne dispose pas d'une activation automatique de la charge d'égalisation) pour éviter la formation prolongée de sulfate sur les plaques des batteries.

2.3.4 Différentes causes de la défaillance des batteries

a) Surcharge des batteries

Les surcharges des batteries engendrent non seulement la corrosion de ses plaques positives, mais aussi un dégagement excessif de gaz pouvant arracher des plaques, les matières actives qui se déposent aussi bien au fond du bac, qu'entre les séparateurs et les plaques. Les surcharges des batteries génèrent en outre une augmentation de la température de ces dernières, ce qui peut conduire à la destruction des plaques et des séparateurs.

b) Décharges profondes

Les décharges profondes sont, à côté des surcharges, les premières causes de la détérioration d'une batterie. Les résultats des décharges profondes prolongées sont entre autre la diminution de la densité de l'électrolyte, le dépôt au fond du bac

de sédiments fins de cristaux de sulfate de plomb et la décoloration des plaques, ainsi que leur sulfatation.

c) Sulfatation

La sulfatation consiste en la formation sur les plaques de larges cristaux de sulfates de plomb, en lieu et place des fins cristaux qui y sont normalement présents. Les causes de la sulfatation sont :

- la non-utilisation de la batterie durant une longue période, après sa charge complète ou partielle,
- le fonctionnement de la batterie durant des jours à un état de charge partielle, sans charge d'égalisation,
- la variation de la température dans la batterie.

Les manifestations de la sulfatation sont l'augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui entraîne une diminution de la décharge et une augmentation de la tension de charge.

d) Courts-circuits

Les courts-circuits des éléments sont générés par :

- la destruction des séparateurs,
- l'accumulation excessive des sédiments au fond du bac,
- la formation de structures arborescentes de plomb, de la plaque négative vers la plaque positive.

Les manifestations du court-circuit des éléments sont les suivants :

- une densité d'électrolyte faible, en dépit de la réception normale de charge,
- une perte rapide de capacité après une pleine charge,
- une tension à vide faible.

e) Autres causes de la diminution de la durée de vie des batteries

Outres les phénomènes décrits plus haut, d'autres causes que nous présentons ci-dessous peuvent contribuer à la diminution de la durée de vie des batteries.

Il s'agit :

- des phénomènes de vibrations.
- des salissures.

2.4 Régulateur de charge

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les charges excessives et les décharges profondes.

Au plan fonctionnel, le régulateur de charge :

- Collecte les informations relatives à l'état de charge de la batterie (tension, état de charge)
- Compare ces informations aux seuils de régulation pré-fixés :
 - V_{min} : tension de déconnexion de la charge (utilisation) : protection décharge profonde.
 - V_{max} : tension de déconnexion des modules : protection à la sur-charge.
- Opère la protection de la batterie.

Le processus de régulation est consigné dans le tableau ci-dessous :

ETAT BATTERIE	COMMANDE
$V_b > V_{max}$	Déconnecte les modules PV
Si 1) est vrai et $V_b < V_{t1}$	Reconnecte les modules
PV $V_b < V_{min}$	Déconnecte la charge (utilisation)
Si 3) est vrai et $V_b > V_{t2}$	Reconnecte la batterie à la charge

Avec : V_{t1} la tension de reconnexion des modules.

V_{t2} la tension de reconnexion des récepteurs (utilisation).

V_b la tension de la batterie.

V_{max} : tension de fin de charge, V_{min} : tension de fin de décharge

Exemple de processus de régulation : cas du régulateur LEO01 à (25°C) :

Tension de déconnexion modules	14,50 V
Tension de déconnexion utilisation	11,40 V
Tension de reconnexion utilisation	12,50 V

Le régulateur Léo ne possède pas de seuil de reconnexion des modules. A partir de la tension de déconnexion des modules, le courant des modules est diminué jusqu'à la charge complète de la batterie.

2.4.1 Principaux types de régulateur de charge

Il existe deux types de régulateurs de charge dans les applications photovoltaïques.

a) Régulateur parallèle ou Shunt

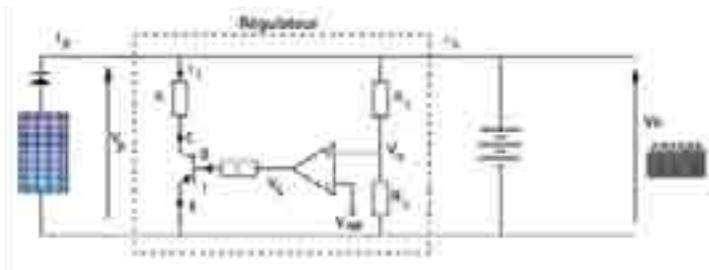


Figure 2-15
Schéma de principe d'un régulateur parallèle

Le régulateur shunt régule la charge de la batterie en l'interrompant par un court-circuit du générateur photovoltaïque. L'utilisation d'une diode série est indispensable entre la batterie et l'organe de commutation (transistor) afin d'éviter un court-circuit simultané de la batterie.

Hors régulation, la tension V_b de la batterie est inférieure à la tension V_{lim} correspondant à la tension de fin de charge de la batterie. Dans ce cas $V^+ < V_{ref}$, $V_s = 0$ et $i = 0$.

Le transistor est bloqué ($I_r = 0$), le module débite et charge la batterie.

En régulation, le début de la régulation correspond à la condition $V_b > V_{lim}$. Dans ce cas $V^+ > V_{ref}$ et $V_s > 0$. Le transistor T conduit à $I_r > 0$ avec $I_p = I_r + I_b$. I_r absorbe le courant de charge I_p , ce qui génère la diminution de la tension V_b de la batterie.

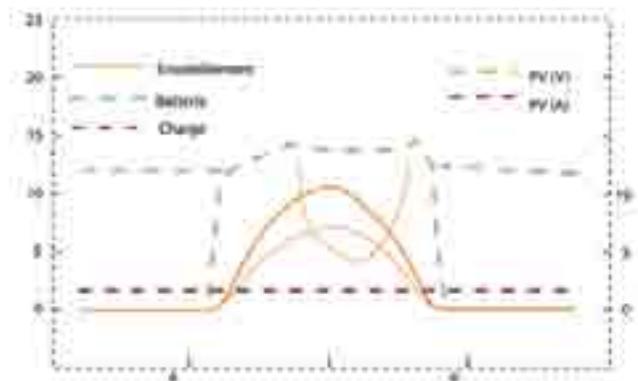


Figure 2-16
Schéma de principe d'un
régulateur parallèle

Avantages du régulateur shunt

- Aucune chute de tension dans l'unité de charge.
- Consommation du régulateur négligeable durant la période de non régulation.
- La défectuosité du régulateur n'entraîne pas l'interruption de la charge de la batterie.

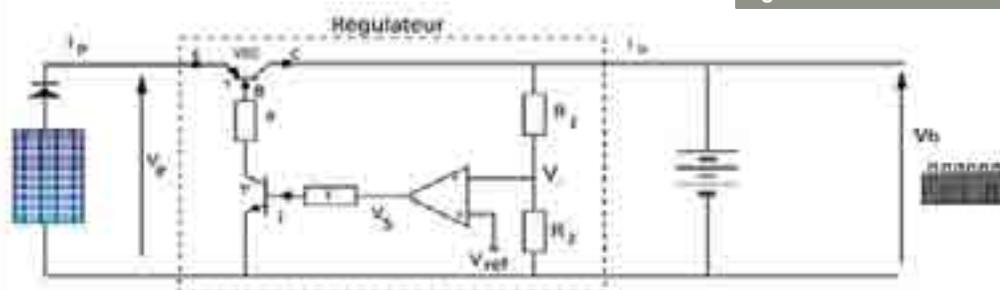
Inconvénient

- Nécessité d'un dispositif de dissipation thermique adéquat.

b) Régulateur série

Dans le cas du régulateur série, l'organe de commutation est en série dans le circuit du générateur.

Figure 2-17
Schéma de principe d'un
régulateur Série



Hors régulation, la tension de la batterie V_b est inférieure à la tension V_{lim} . Dans ce cas, $V^- < V_{ref}$; $V_s > 0$ et $i > 0$. Dans ces conditions le transistor est saturé. Le module débite et charge la batterie.

En régulation, on a $V_b > V_{lim}$. Dans ce cas $V^- > V_{ref}$ et $V_s = 0$, $i = 0$, $I_b = 0$. Le transistor ne conduit pas $I_p = 0$. La tension de la batterie diminue due à l'absence de courant de charge. L'équilibre est atteint avec $V^- = V_{ref}$ et $V_b = V_{lim}$.

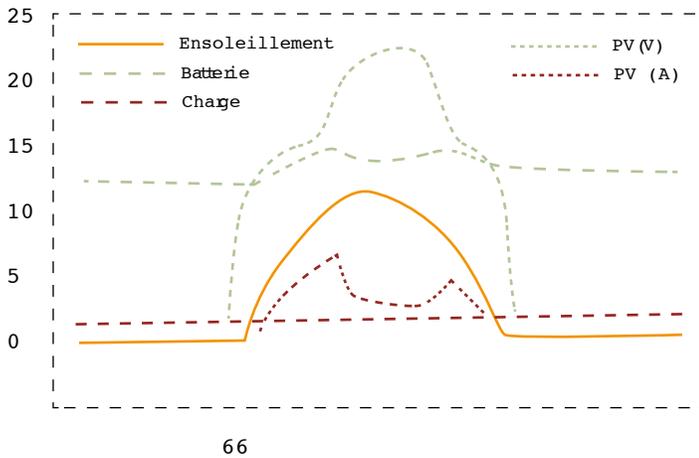


Figure 2-18
Caractéristique de fonctionnement d'un système avec un régulateur série

Avantages du régulateur série

- La diode de blocage n'est pas indispensable.

Inconvénients

- Chute de tension dans l'unité de charge.
- Consommation du régulateur durant la période de non régulation.
- La défectuosité du régulateur entraîne l'interruption de charge de la batterie.

Guide pour le choix d'un régulateur de charge

Pour le choix d'un régulateur, les caractéristiques suivantes sont indispensables :

- **La tension nominale** : elle peut être de 12 V, 24 V, 48 V etc. en fonction de la tension du système dans lequel il sera inséré,
- **Le courant de court-circuit maximal** du générateur photovoltaïque,
- **Le courant de fonctionnement maximal** du générateur photovoltaïque,
- **Le courant de charge maximal** continu de la charge (récepteurs),
- **La tension de circuit ouvert maximale** du générateur.

En outre, les critères suivants sont indispensables pour le choix d'un régulateur de charge :

- **Rendement du régulateur** : le rendement caractérise les pertes au niveau du régulateur de charge. Le rendement d'un bon régulateur doit être le plus élevé possible entre 90 et 95 %,
- **Protections** : les protections suivantes doivent être exigées :
 - Protection contre la surtension : l'entrée du générateur doit être protégée contre la surtension (atmosphérique),
 - Inversion de polarité de la batterie : le régulateur doit être protégé contre l'inversion de polarité aux bornes de la batterie,
 - Protection contre les courts-circuits : le régulateur doit être protégé contre les courts-circuits (exemple par des fusibles),
 - Boîtiers : les boîtiers des régulateurs, tout en permettant une bonne dissipation de la chaleur, doivent être assez étanches.

2.5 Groupement des modules et des batteries

Pour obtenir une tension et une puissance suffisante, il est nécessaire de connecter plusieurs modules entre eux. Dans ce cas, plusieurs batteries doivent être aussi connectées entre elles.

2.5.1 Montage des modules en série

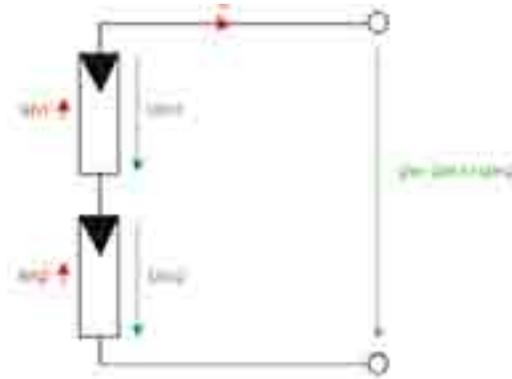


Schéma 2-19
Schéma de principe d'un
régulateur parallèle

Pour obtenir une tension plus élevée que celle d'un seul module, on connecte deux ou plusieurs modules en série. Dans le cas de la connexion de deux modules en série, la borne positive (+) du premier module est connectée à la borne négative (-) du deuxième module.

Ainsi, la tension totale est : $U_t = U_1 + U_2$

Le courant total est : $I_t = I_1 = I_2$

2.5.2 Montage des modules en parallèle

Pour obtenir une puissance (un courant) plus élevée que celle d'un module, il faut brancher deux ou plusieurs modules en parallèle. Dans le cas de la connexion de deux modules en parallèle, la borne positive (+) du premier module est connectée à la borne positive (+) du deuxième module. Les bornes négatives (-) sont reliées entre elles.

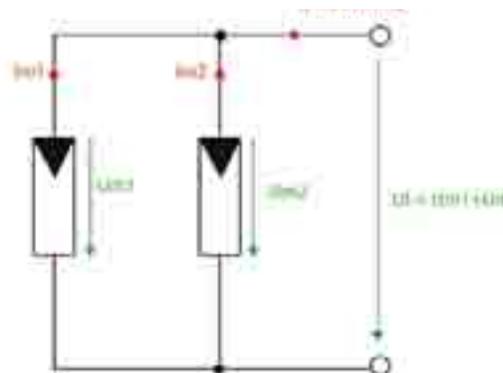


Schéma 2-20
Association de modules en
parallèle

La tension totale du branchement est égale à la tension d'un module :

$$U_t = U_{m1} = U_{m2}$$

Le courant total est égal à la somme des courants des deux modules :

$$I_t = I_{m1} + I_{m2}$$

2.5.3 Montage des modules en série parallèle

Les modules peuvent être aussi connectés en série et les séries connectées en parallèle.

$$\begin{aligned} U_t &= U_{m1} + U_{m2} \\ &= U_{m3} + U_{m4} \\ I_t &= I_{m12} + I_{m34} \end{aligned}$$

Avec : U_t = tension totale
 U_{m1} = tension module 1
 U_{m2} = tension module 2
 I_t = courant total
 I_{m1} = courant module 1
 I_{m2} = courant module 2

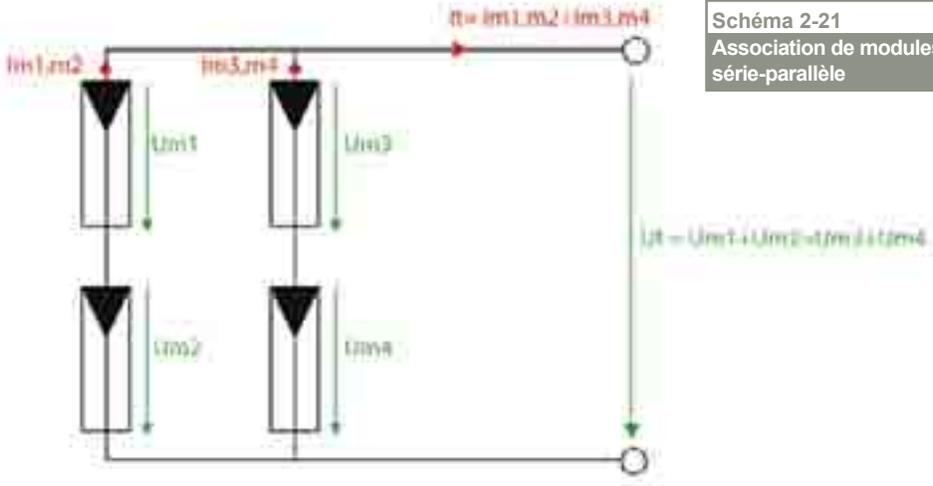


Schéma 2-21

Association de modules en
série- parallèle

Exemple :

a) Connecter en série deux modules A75

- Courant de court-circuit d'un module A75 = 4,80 A
- Tension de circuit ouvert d'un module A75 = 21 V

$$\begin{aligned} U_{coT} &= U_{coM1} + U_{coM2} \\ U_{coT} &= 21 \text{ V} + 21 \text{ V} &= 42 \text{ V} \\ I_{ccT} &= I_{ccM1} = I_{ccM2} &= 4,80 \text{ A} \end{aligned}$$

b) Connecter en parallèle deux modules A75

$$\begin{aligned} U_{coT} &= U_{coM1} = U_{coM2} &= 21 \text{ V} \\ I_{ccT} &= I_{ccM1} + I_{ccM2} \\ I_{ccT} &= 4,80 \text{ A} + 4,80 \text{ A} &= 9,60 \text{ A} \end{aligned}$$

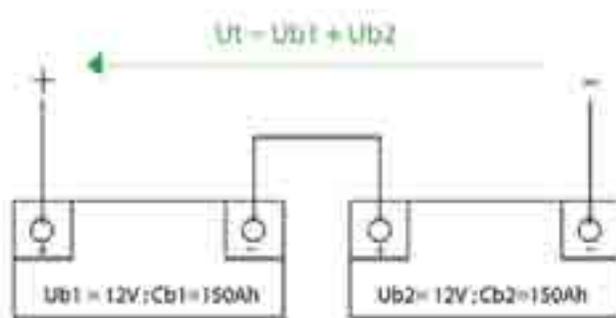
c) Connecter quatre modules A75 en série de deux modules et les deux séries en parallèle.

$$\begin{aligned} U_{coT} &= U_{coM1,M2} = U_{coM3,M4} \\ U_{coT} &= 21 \text{ V} + 21 \text{ V} &= 42 \text{ V} \\ I_{ccT} &= I_{ccM1,M2} + I_{ccM3,M4} \\ I_{ccT} &= 4,8 \text{ A} + 4,8 \text{ A} &= 9,60 \text{ A} \end{aligned}$$

2.5.4 Montage des batteries en série

Pour augmenter la tension des batteries, une ou plusieurs batteries doivent être montées en série. Dans le cas de deux batteries, la borne positive (+) de la première batterie est connectée avec la borne négative (-) de la deuxième batterie.

Schéma 2-22
Montage des batteries en série



La tension totale U_t est égale à $U_{B1} + U_{B2}$.

La capacité en Ah reste la même : $C_t = C_{B1} = C_{B2}$

Exemple :

Monter en série deux batteries de 12 V de capacité 150 Ah.

$$\begin{aligned} U_t &= U_{B1} + U_{B2} \\ U_t &= 12 \text{ V} + 12 \text{ V} = 24 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_t &= C_{B1} = C_{B2} \\ C_t &= 150 \text{ Ah} \end{aligned}$$

2.5.5 Montage des batteries en parallèle

Pour augmenter la capacité Ah de deux ou plusieurs batteries, on les monte en parallèle. Dans le cas de deux batteries, la borne positive (+) de la première batterie est connectée avec la borne positive (+) de la deuxième batterie. La borne négative (-) de la première batterie est connectée avec la borne négative (-) de la deuxième batterie.

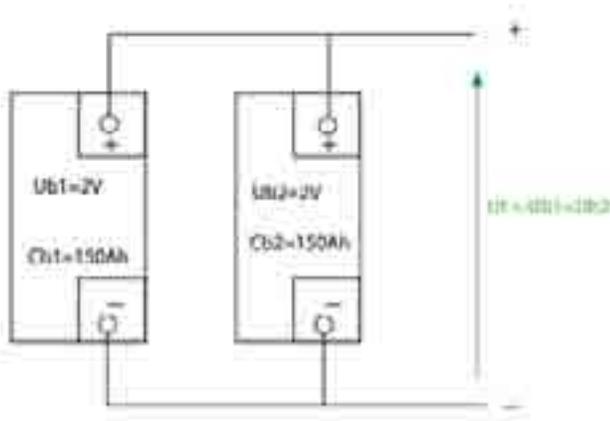


Schéma 2-23
Montage des batteries en
parallèle

La tension reste la même : $U_t = UB1 = UB2$
 La capacité totale devient : $C_t = CB1 + CB2$

Exemple :

Monter en parallèle deux batteries de 12 V de capacité de 150 Ah.

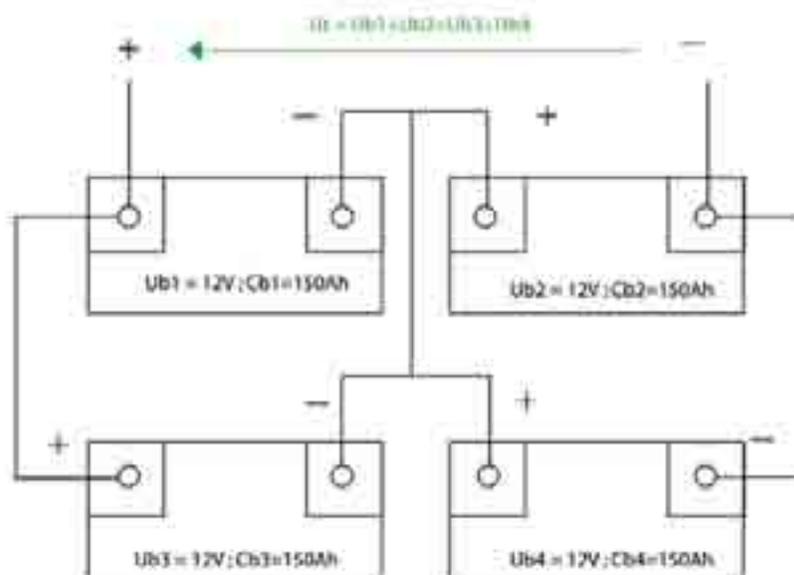
$$\begin{aligned}
 U_t &= UB1 = UB2 \\
 U_t &= 12 \text{ V} \\
 C_t &= CB1 + CB2 \\
 C_t &= 150 \text{ Ah} + 150 \text{ Ah} = 300 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

2.5.6 Montage des batteries en série-parallèle

Plusieurs batteries peuvent être montées en série parallèle.

Dans le cas de 4 batteries montées en série-parallèle, la tension totale est la tension obtenue par la mise en série des batteries ; la capacité totale est la capacité des batteries en parallèle.

Schéma 2-24
Montage des batteries en
série-parallelè



Exemple :

4 batteries 12 V de capacité de 150 Ah chacune.

$$\begin{aligned}
 U_t &= U_{B1} + U_{B2} \\
 U_t &= U_{B3} + U_{B4} \\
 U_t &= 12 \text{ V} + 12 \text{ V} = 24 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_t &= C_{B1,B2} + C_{B3,B4} \\
 C_t &= 150 \text{ Ah} + 150 \text{ Ah} = 300 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

Principes à respecter pour les groupements des batteries

a) Les batteries à monter en série doivent :

- **être de même type (fabrication),**
- **avoir les mêmes capacités (Ah),**
- **avoir une densité d'électrolyte égale (état de charge égal).**

b) Les batteries à monter en parallèle doivent :

- **être de même type (fabrication),**
- **avoir la même tension nominale,**
- **avoir une densité d'électrolyte égale (état de charge égal).**
- **les capacités nominales des batteries ne doivent pas être trop différentes**

Eviter de monter plus de deux batteries en parallèle

2.6 L'onduleur

L'onduleur est alimenté directement par la batterie et débite sur des récepteurs en courant alternatif. L'onduleur transforme la tension continue des batteries en tension alternative qui alimente les récepteurs en courants alternatifs : téléviseurs, vidéo ou réfrigérateur.

Les onduleurs diffèrent par la forme d'onde du courant électrique qu'ils délivrent : carrée, sinus reconstitué, ..., la forme sinusoïdale étant la norme habituelle de l'électricité fournie par le réseau électrique.

Les onduleurs à onde « non sinus » génèrent des harmoniques qui peuvent endommager dans les cas extrêmes certains appareils électriques. Un convertisseur DC / AC peut être couplé soit au régulateur soit directement à la batterie, il doit alors être muni d'un dispositif anti-décharge profonde.

Les caractéristiques principales d'un onduleur sont les suivantes :

- Puissance nominale à 20°C en VA.
- Tension nominale d'entrée en Vcc.
- Plage de la tension d'entrée en V.
- Protection tension d'entrée basse en V.
- Puissance de démarrage admissible en %
- Intensité maximale admissible en A.
- Tension nominale de sortie en Vca.
- Plage de tension de sortie.
- Onde de sortie
- Fréquence nominale de sortie en Hz.
- Rendement maximal, généralement de l'ordre de 90%.

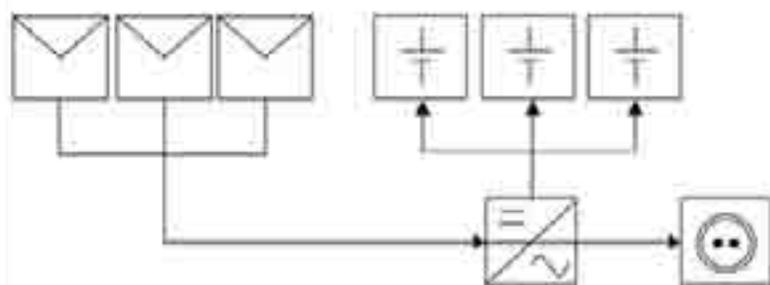


Figure 2-25
Générateur autonome DC/AC

2.7 Quelques exemples d'applications photovoltaïques

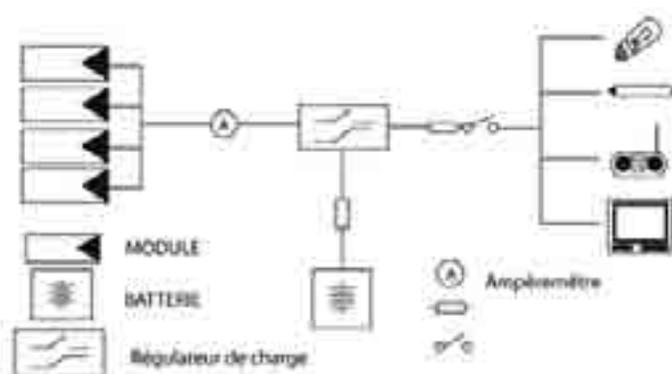


Figure 2-26
systèmes en courant continu

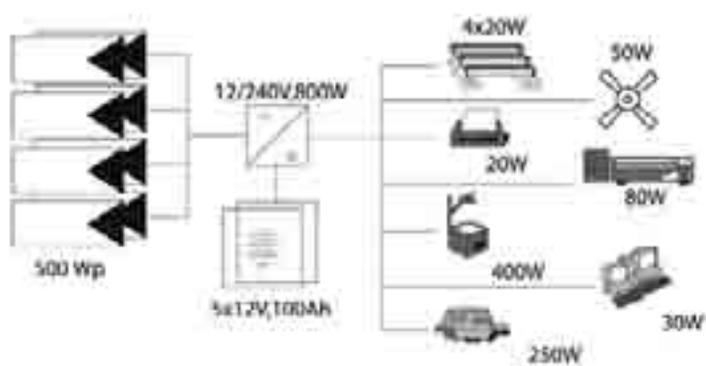


Figure 2-27
système en courant alternatif
avec onduleur Central



Figure 2-28
configuration d'un système
photovoltaïque autonome sur
toit (hors réseau)

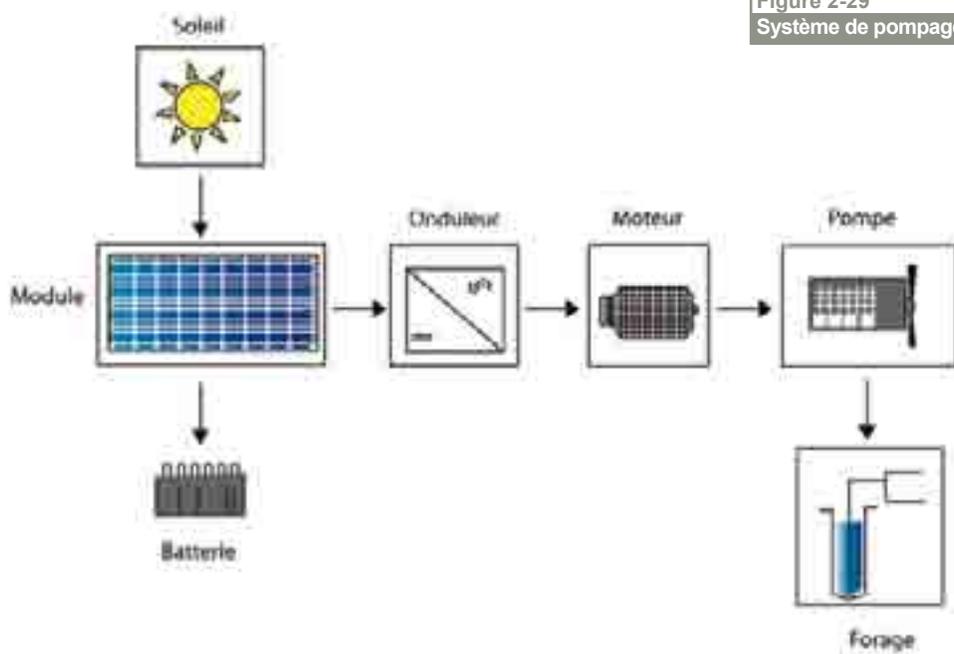


Figure 2-29
Système de pompage