

RESSOURCES POUR LES STI2D

Une installation photovoltaïque en site isolé

PATRICK HOUËT [1]

L'exploitation des énergies renouvelables constitue un des domaines technologiques importants des STI2D. Voici les éléments nécessaires à l'étude d'un système photovoltaïque non relié au réseau.

Une installation photovoltaïque (PV) en site isolé est composée de quatre éléments principaux [1] :

- le panneau solaire, dont le rôle est de délivrer l'énergie à la charge, ainsi qu'à la batterie ;
- la batterie, dont le rôle est de stocker l'énergie et de la restituer lorsque l'ensoleillement est insuffisant ;
- le régulateur, dont le rôle est de réguler la charge et la décharge de la batterie ;
- l'onduleur, dont le rôle est d'assurer la conversion continu-alternatif. Il permet d'alimenter les récepteurs en courant alternatif à partir du courant continu.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du système, il est nécessaire de connaître la structure technologique

[1] Professeur de génie électrique au lycée Joliot-Curie de Rennes (35).

mots-clés
développement durable, énergie, énergies renouvelables

et le fonctionnement de chacun de ces éléments.

Le panneau solaire

Le module photovoltaïque

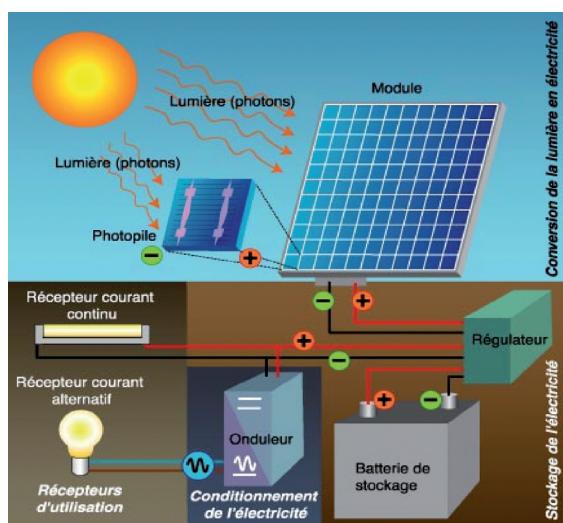
Un panneau solaire est constitué d'un assemblage en série de cellules individuelles encapsulées dans un support unique [2]. Le nombre de cellules fixe la tension nominale (pour un module comportant de 16 à 20 cellules, la tension nominale est de 6 V ; de 32 à 40 cellules, 12 V), alors que la taille des cellules impose le courant crête (une cellule de 5 cm × 5 cm délivre 600 mA ; de 11 cm × 11 cm, 2,5 A).

Les cellules individuelles constituant le module étant interconnectées en série, les tensions et courants qui en résultent suivent les lois des générateurs à courant continu.

Le courant de sortie et par voie de conséquence la puissance sont proportionnels à la surface du module.



[2] Un module photovoltaïque



[1] Une installation photovoltaïque en site isolé

Verre de protection
Couche antireflet
Maille conductrice (cathode)
Silicium dopé N (négatif)
Jonction N/P
Silicium dopé P (positif)
Support métallique (anode)

Le fonctionnement qualitatif d'une cellule est assez simple : les photons (particules de lumières) frappent la cellule, ils transfèrent leur énergie aux électrons du silicium. Le silicium est traité (dopé) de manière que tous les électrons se dirigent dans le même sens, vers la grille métallique du dessus, créant ainsi un courant électrique continu dont l'intensité est fonction de l'ensoleillement.

Les caractéristiques définies par les constructeurs sont obtenues dans les conditions de test standard (STC) suivantes :

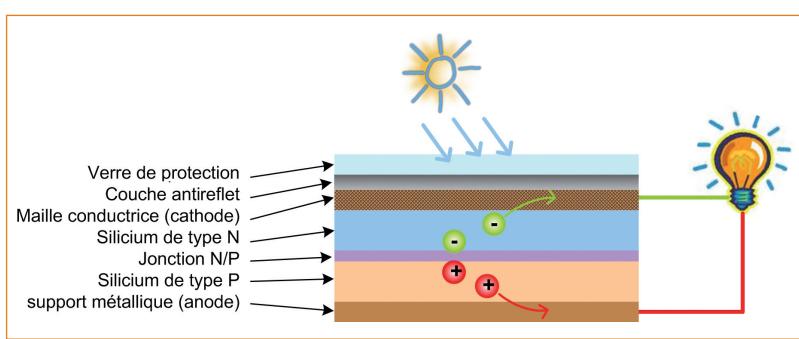
Température de jonction T_j : 25 °C
Irradiation ou éclairement E : 1 000 W/m² (100 mW/cm²)

Cela correspond approximativement à la puissance du rayonnement solaire à midi, par temps clair et sur une surface de 1 m² perpendiculaire à la direction du rayonnement solaire.

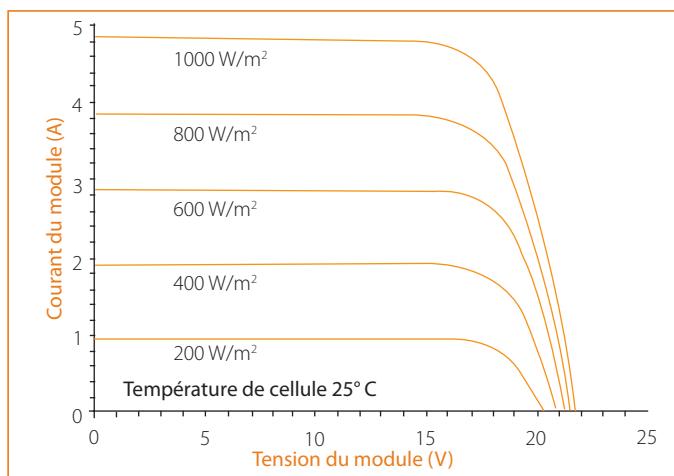
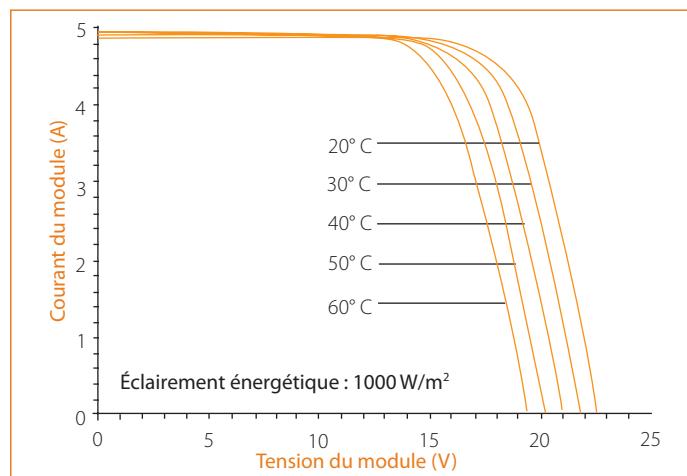
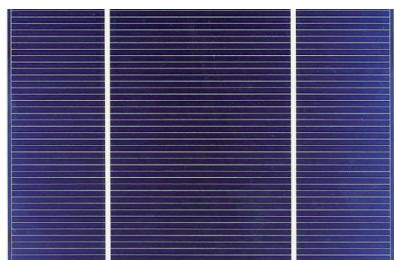
Masse d'air AM : lorsque le soleil est à son zénith

La « masse d'air » est la couche d'atmosphère que le rayonnement doit traverser.

La cellule
Une cellule est constituée d'un empilement de couches [3] :



[3] Les 4 couches d'une cellule solaire

4 La courbe caractéristique $I = f(U)$ du module Shell SQ805 L'influence de la température du module Shell SQ80 sur sa courbe caractéristique $I = f(U)$ 

6 Des cellules de silicium monocristallin



7 Des cellules de silicium polycristallin



8 Des cellules de silicium amorphe

● Les caractéristiques courant-tension

Une cellule génère du courant continu en fonction de la tension. La caractéristique $I = f(U)$ dépend principalement de deux paramètres : l'éclairage (E) et la température de la jonction de la cellule (T_j) **4**.

● La puissance crête (P_c)

En photovoltaïque, la puissance crête (P_c) désigne la puissance mesurée aux bornes d'une cellule photovoltaïque dans les conditions de test standard : $E = 1\ 000\ W/m^2$; $AM = 1,5$; $T_j = +25\ ^\circ C$. P_c (ou W_c) est donc la puissance théorique ($P = U \cdot I$) exprimée en watts que peut produire un module PV.

● L'influence de la température sur le fonctionnement

La température a des effets importants sur une cellule. Lorsque la température augmente, la puissance diminue, le courant augmente légèrement, mais la tension décroît (de l'ordre de $0,0023\ V^\circ C$ pour le silicium) **5**.

Les technologies

Differents types de silicium sont utilisés pour la fabrication des cellules :

monocristallin, polycristallin, amorphe, noir.

● Le silicium monocristallin **6**

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres. C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12 % et 16 %. L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et énergivore. Il est utilisé en extérieur pour les fortes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications...).

● Le silicium polycristallin **7**

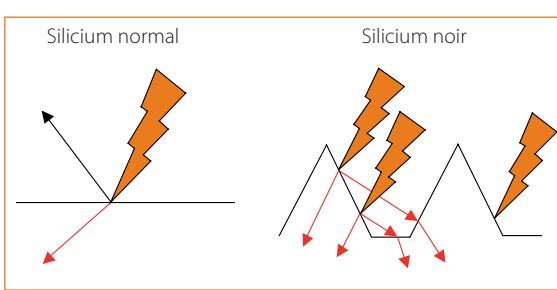
Les cellules de silicium polycristallin sont découpées dans des barres de silicium reconstitué ; les atomes ne sont pas tous cristallisés. Le rendement est moins bon, entre 11 % et 14 %. L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix, puisque leur fabrication, produisant peu de déchets, nécessite de 2 à 3 fois moins d'énergie et est plus rapide. Elles ont les mêmes applications que les cellules en silicium monocristallin.

● Le silicium amorphe **8**

Ce silicium est nettement moins puissant que les deux précédents, car les atomes sont disposés de manière désordonnée du fait que les cellules sont fabriquées par projection de silicium sur un autre matériau, comme du verre ou du plastique. Ce silicium en couche très mince répond néanmoins à de nombreux besoins liés à l'éclairage (extérieur ou intérieur). Son rendement est de 5 % à 7 %. Il est utilisé pour l'électronique, dans les calculettes par exemple.

● Le silicium noir **9 10**

Ce sont des chercheurs de l'université de Harvard qui en ont fait la découverte. Lorsqu'une plaquette de silicium est éclairée et que simultanément elle est en



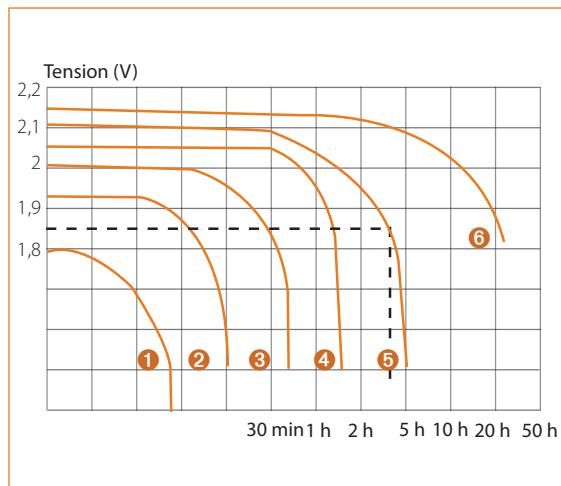
9 Comparaison des comportements du silicium normal et du silicium noir

contact avec certains gaz halogènes, le silicium forme des cônes qui piègent la lumière et donne à la plaque une couleur noire. Cette absorption permet d'obtenir un rendement plus élevé, qui pourrait être d'au moins 30 % et même atteindre les 60 %.

Il existe d'autres matériaux utilisés pour la réalisation de cellules photovoltaïques, comme l'arsénure de gallium, qui possède un très haut rendement, entre 20 % et 25 %, mais que son prix extrêmement élevé réserve à une utilisation marginale, presque exclusivement pour les satellites.

Les paramètres des panneaux solaires

Les paramètres à prendre en compte pour le choix des panneaux solaires sont les suivants :



12 Le dimensionnement de la capacité nécessaire à une application

Paramètres électriques

Puissance crête P_c (en Wc)
Tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide), de 18 à 22 V pour un panneau de 12 V
Tension en charge (qui dépend de l'ensoleillement)
Courant maximal de sortie
Courant de court-circuit I_{cc} (en A)

Paramètres physiques

Nombre de cellules
Température d'utilisation (de - 40 °C à + 80 °C)
Poids et dimensions
Durée de vie
Coût

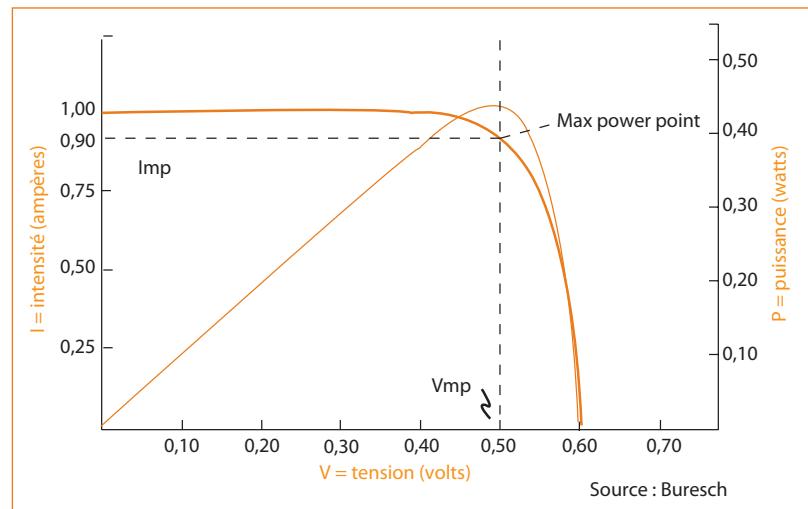
La puissance optimale (*MPP, Max Power Point*) correspond à la valeur maximale du produit $P = U \cdot I$ pour un éclairement et une température de jonction donnés, et sous les condi-

tions de test standard **11**. Ce point correspond à la puissance crête (P_c) du module.

La batterie

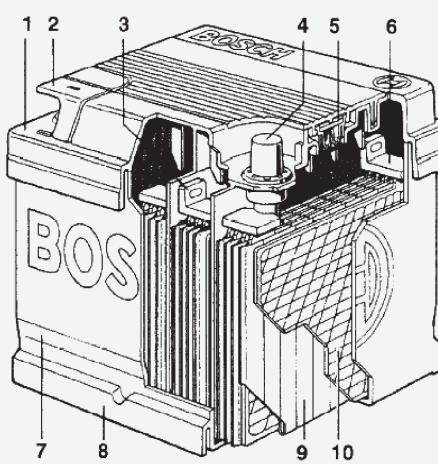
Son rôle
La batterie sert à stocker l'énergie électrique excédentaire produite par le ou les panneaux solaires. Cette énergie est stockée sous forme chimique.

La nuit, c'est la batterie qui fournit l'énergie. Le stockage est dimensionné pour une durée de plusieurs jours consécutifs sans soleil, permettant d'avoir une large plage de secours, prenant ainsi en compte les phénomènes de durée de vie et de perte de capacité liée au cyclage (charge et décharge).



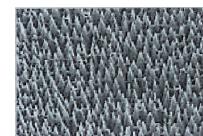
11 Le point de fonctionnement idéal

Batterie de démarrage sans entretien.
1 couvercle monobloc,
2 capot protège-borne,
3 barrette de connexion interélément,
4 borne,
5 bouchon sous couvercle,
6 barrette de jonction des plaques,
7 bac multiple,
8 rebord de fixation,
9 plaques positives sous séparateurs à feuilles,
10 plaques négatives.

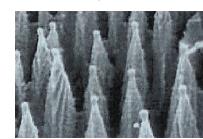


Source : Bosch

13 La constitution d'une batterie



Au microscope électronique



Encore plus détaillé



Un exemple de plaque de silicium noir

Le silicium noir

Sa capacité

La capacité représente la quantité d'électricité que la batterie peut délivrer pendant une période donnée, sous un régime de décharge et une température ambiante donnée. La capacité diminue à basse température, à fort taux de décharge et avec le vieillissement. Cette capacité s'exprime en Ah (ampères-heures).

La norme internationale définit de la façon suivante la capacité nominale d'un accumulateur au plomb : La capacité C_{20} est la valeur obtenue en ampères-heures lors de la décharge continue et ininterrompue pendant 20 heures jusqu'à une tension de fin de décharge de 1,75 V par élément à 20 °C. L'intensité nominale correspond à 1/20 de la capacité en ampères-heures.

● Exemple de calcul de l'intensité nominale : Batterie de capacité $C_{20} = 12$ Ah

Intensité = capacité/temps de décharge
 $I = 12 / 20 = 0,6$ A pendant 20 heures

La performance en décharge

Pour dimensionner la capacité nécessaire à une application, on utilisera les courbes de décharge [12].

● Exemple de calcul de capacité : Alimentation d'un moteur

$$U = 48 \text{ V}$$

$$P = 1200 \text{ W}$$

Autonomie : 4 heures

$$U_{\text{maxi}} = 48 \text{ V}$$

$$U_{\text{mini}} = 40 \text{ V}$$

Courant :

$$I = 1200 / 48 = 25 \text{ A}$$

Tension minimale d'un élément :

$$40 / 24 = 1,85 \text{ V}$$

La courbe de décharge donne pour 1,85 V : 0,2 C_{20} (0,2 $C_{20} = 25$ A) [12].

La capacité doit donc être telle que :

$$C_{20} = 25 / 0,2 = 125 \text{ Ah}$$

La profondeur de la décharge

Une batterie ne doit jamais être laissée dans un état de décharge profonde pendant une longue période ; il y a risque, dans ce cas, de détérioration rapide de sa capacité de stockage. La profondeur de décharge maximale représente en pourcentage la capacité nominale au-

délà de laquelle la décharge n'est pas souhaitable.

Dans une installation avec panneau solaire, la décharge journalière correspond au déficit entre la production et la consommation journalière.

La profondeur de décharge maximale autorisée est toujours supérieure à la profondeur de décharge journalière (de 5 à 30 % de la capacité nominale) ; elle dépend aussi de la température d'utilisation la plus basse.

Sa constitution

Une batterie se présente sous la forme d'un bac étanche dans lequel sont plongées deux électrodes de métaux différents constituant l'accumulateur.

Elle est composée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée [12]. Ces éléments sont formés de plaques positives et négatives, assemblées en alternance. Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface ainsi que la quantité d'acide disponible dans l'électrolyte (composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges de la batterie) sont les paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour la batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères-heures, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définies).

Le principe de fonctionnement d'une batterie au plomb-acide

L'accumulateur au plomb est constitué d'un bac d'électrolyte (acide sulfurique) dans lequel sont plongées deux électrodes. L'anode (électrode positive) est en plomb ; la cathode (électrode négative) est elle aussi en plomb, mais recouverte d'une couche de dioxyde de plomb.

Analysons ce qui se passe lorsqu'on relie les deux électrodes par une charge résistive. À l'anode, le plomb réagit avec l'acide sulfurique : l'atome de plomb libère 2 électrons ($2 e^-$) et devient un ion Pb^{++} ; de son côté l'acide (H_2SO_4) se dissocie en 2 ions positifs $2 H^+$ et 1 ion négatif SO_4^{--} . À l'issue

Le photovoltaïque en chiffres

- Plus de 16 000 MWc, c'est la puissance photovoltaïque qui a été installée dans le monde en 2010. La filière photovoltaïque continue son ascension : c'est plus du double par rapport à 2009 (environ 7 000 MWc).
- Près de 38 000 MWc, c'est la puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde.
- 22,5 TWh, c'est la production d'électricité photovoltaïque européenne estimée en fin 2010.
- 80 MWc, c'est la puissance de la centrale photovoltaïque Sarnia au Canada, la plus puissante en activité en 2010.

Source : baromètre photovoltaïque EurObserv'ER

de la réaction, on obtient du sulfate de plomb ($PbSO_4$), résultat de l'association Pb^{++} avec SO_4^{--} . Les deux électrons libres parcourent le circuit extérieur pour rejoindre l'autre électrode. Tel est le courant électrique fourni par l'accumulateur.

Du côté de la cathode, le dioxyde de plomb, l'acide sulfurique de l'électrolyte, les $2 H^+$ de la réaction précédente ainsi que les 2 électrons arrivés de l'anode produisent là aussi du sulfate de plomb et 2 molécules d'eau ou H_2O (selon la réaction $PbO_2 + H_2SO_4 + 2 H^+ + 2 e^-$ donne $PbSO_4 + 2 H_2O$).

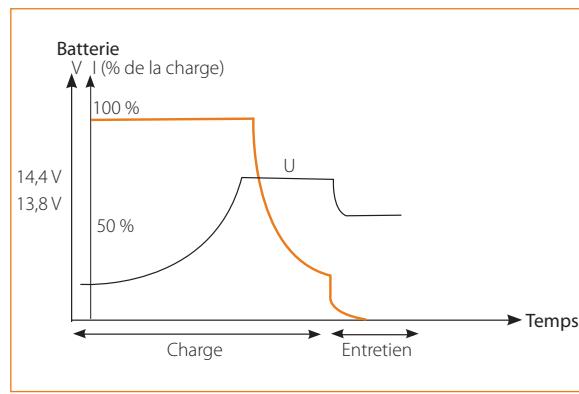
Au bout d'un certain temps de décharge, une bonne partie de l'électrolyte est devenue sel + eau, et la couche de PbO_2 finit par s'éliminer. Résultat : le courant fourni devient de plus en plus faible, il faut recharger. On procède alors à l'opération inverse : au lieu de tirer de l'énergie de l'accumulateur, on lui en fournit, en le mettant sous tension inverse. $PbSO_4$ se redécompose pour donner Pb et H_2SO_4 (selon la réaction $PbSO_4 + 2 H^+ + 2 e^-$ donne Pb + H_2SO_4) sur la première électrode ; sur l'autre, $PbSO_4$ redonne PbO_2 et H_2SO_4 (selon la réaction $PbSO_4 + SO_4^{--} + 2 H_2O + 2 e^-$ donne $PbO_2 + 2 H_2SO_4$).

La charge et la décharge d'une batterie d'accumulateurs sont donc des phénomènes réversibles.

Limites et réversibilité

Si l'on continue à charger une batterie qui a atteint sa capacité maximale, le courant décompose l'eau de l'électrolyte, produisant un dégagement gazeux d'oxygène et d'hydrogène.

En cas de décharge importante et prolongée, le sulfate de plomb cristallise. L'accumulateur est alors



14 Une courbe de charge

définitivement endommagé, car cette cristallisation est irréversible. Les échanges sont rendus plus difficiles entre les plaques et l'électrolyte. On ne doit jamais stocker une batterie déchargée.

En résumé, lorsqu'un élément est déchargé, la plaque positive se couvre de sulfate de plomb par prélèvement de l'acide contenu dans l'électrolyte, et il se forme de l'eau. La plaque négative aussi prélève l'acide et se couvre de sulfate de plomb. La quantité d'électrolyte reste pratiquement égale, mais son acidité et donc son poids spécifique diminuent. Lors de la charge, la réaction chimique est inverse. Les deux plaques libèrent de l'acide, la plaque positive se transforme en oxyde de plomb et la plaque négative en plomb spongieux. Dès que la batterie est chargée, elle n'accepte plus d'énergie et l'excédent décompose l'eau en hydrogène et en oxyde, un mélange hautement inflammable et explosif ! C'est pourquoi il est si important de tenir une batterie en cours de charge à l'écart de toute flamme ou étincelle, et dans un endroit correctement ventilé.

Les différents types

Les batteries au plomb-acide

Les accumulateurs les plus couramment utilisés pour le stockage d'énergie sont les accumulateurs au plomb. Ils ne disposent que d'une tension de 2 V, c'est pourquoi on les associe en série pour constituer une batterie d'accumulateurs. Ainsi les batteries 12 V de voiture sont constituées de 6 éléments accumulateurs au plomb mis en série. Les batteries au plomb sont les moins chères, mais leur durée de vie est relativement courte. L'électro-

Caractéristique	Batterie plomb-acide ouverte/scellée	Batteries au nickel nickel-cadmium (Ni-Cd), nickel-hydride métallique (Ni-MH)	Batteries au lithium lithium-ion lithium-polymère
Tension d'élément	2 V	1,2 V	De 3 à 4 V
Rendement énergétique sans chauffage/ refroidissement	De 75 à 85 %	De 35 à 85 %	De 85 à 90 %
Puissance volumique	De 100 à 200 W/kg	De 100 à 500 W/kg	De 300 à 1 500 W/kg
Durée de vie en cycles	De 600 à 900	> 1 000	> 1 000 (à l'avenir)
Température normale de fonctionnement	De 10 à 55 °C	De - 20 à 55 °C	De - 10 à 50 ou 60 °C

15 Les données techniques des différentes batteries

lyte peut être liquide, comme pour les batteries de démarrage des voitures, mais aussi gélifié.

Pour rendre les plaques plus résistantes, on utilise des alliages de plomb et d'antimoine ou de cadmium (avec d'autres éléments en quantité moindre comme le sélénium, un antioxydant).

Il est important de savoir que les batteries aux alliages à l'antimoine ont une autodécharge plus importante que celles au cadmium.

Les batteries se distinguent aussi entre elles par leur construction mécanique, par la forme de leurs plaques et par le type d'électrolyte :

● La batterie de démarrage à plaques planes

C'est la batterie qui est utilisée dans toutes les voitures. Capable de délivrer très brièvement de fortes intensités, elle supporte mal les décharges profondes.

● La batterie semi-stationnaire à plusieurs plaques

Les plaques de ces batteries sont plus épaisses, et les séparateurs sont de meilleure qualité pour éviter des déformations lors d'une utilisation en cyclage, qu'elles supportent mieux.

● La batterie stationnaire

C'est une batterie à plaques tubulaires. Elle sert par exemple sur les chariots élévateurs, où elle est déchargée chaque jour de 60 à 80 %, puis rechargée pendant la nuit : c'est l'exemple type d'une utilisation en cyclage.

Cette batterie doit être chargée avec une tension relativement élevée, selon la durée disponible. Cette tension élevée est surtout nécessaire pour éviter la

stratification (disposition en couches superposées) de l'électrolyte.

L'acide sulfurique qui se forme lors de la charge a en effet tendance à descendre au fond de la batterie, et l'électrolyte y deviendra beaucoup plus acide que dans le haut. Lorsque la tension de gazage est atteinte, on poursuit la charge avec un courant et une tension élevés. Les bulles de gaz ainsi formées mettent l'électrolyte en circulation et rendent le mélange homogène. Ce procédé est d'autant plus indispensable que les batteries à plaques tubulaires sont généralement très hautes.

● La batterie étanche à électrolyte gélifié (VRLA)

Ici l'électrolyte est immobilisé sous forme de gel. Les gaz qui se dégagent lors de la charge sont recombinés en électrolyte, ils ne s'échappent donc pas de la batterie, sauf si pendant le gazage le courant de charge est trop important pour permettre une recombinaison complète. Dans ce cas, les gaz sont évacués par une soupape de sécurité, d'où l'appellation anglo-saxonne de ce type de batterie, *valve regulated lead acid* (VRLA).

● La batterie étanche (VRLA) AGM

AGM est l'abréviation d'*absorbed glass mat* (fibre de verre absorbante). Dans cette batterie, l'électrolyte est retenu (« absorbé ») dans un séparateur en fibre de verre entre les plaques. Dans une batterie AGM, les porteurs de charge – ions d'hydrogène et de sulfate – se déplacent plus facilement que dans des batteries au gel. C'est pourquoi une batterie AGM est plus à même de délivrer des courants instantanés très élevés qu'une batterie à électrolyte gélifié.

Type de batterie	Utilisation	Nombre de cycles		Réaction à une décharge de 100 %	Durée de vie en utilisation floating à 20 °C de température ambiante
		DOD 80 %	DOD 60 %		
Démarrage	Démarrage			Pas utilisable en cyclage	5
Semi-traction	Batterie de service Jusqu'à environ 1 000 Ah	200	350	Sulfatage irrémédiable en quelques jours	5
VRLA gélifiée Dryfit A200	Batterie de service Jusqu'à environ 600 Ah	250	450	Supporte 1 mois en état de décharge	4-5
VRLA AGM GNB Champion	Batterie de service Jusqu'à environ 600 Ah	350	600	Supporte 1 mois en état de décharge	7

16 Les cycles de décharge-recharge supportés par les différentes batteries de 12 V

Les batteries étanches ont l'avantage d'un grand confort d'utilisation : sans entretien, n'émettant pas de gaz dangereux, elles peuvent s'installer dans des endroits difficiles d'accès. Par contre, elles sont plus sensibles aux surcharges, qui provoquent des pertes d'eau. Aucune remise à niveau n'étant possible, ces pertes entraînent des pertes de performances irrémédiabes et un vieillissement prématûr. Comparativement, des batteries ouvertes modernes à plaques planes et à faible teneur en antimoine (1,5 %) dégagent si peu qu'un complément d'eau 2 ou 3 fois par an est suffisant.

Les batteries au nickel

Les batteries au nickel possèdent une durée de vie plus longue que les batteries au plomb, mais chaque élément ne procure qu'une tension de 1,2 V. Elles sont de type nickel-cadmium (Ni-Cd) ou nickel - hydrure métallique (Ni-MH) à électrolytes alcalins. Moins nocives pour l'environnement, les batteries nickel-hydrure sont amenées à remplacer progressivement les batteries nickel-cadmium qui devraient disparaître.

Les batteries au nickel sont plus chères, en raison du coût plus important des matières premières et de la plus grande complexité du processus de fabrication.

Les batteries au lithium

Les batteries au lithium (lithium-ion et lithium-polymère) se caractérisent par des densités énergétiques supérieures à 100 Wh/kg et par des puissances volumiques supérieures à 300 W/kg. La tension par élément peut dépasser 4 V. Leur inconvénient réside dans la nécessité de mise en œuvre de moyens de protection complexes.

La charge

La caractéristique de charge la plus employée sur les batteries de voiture est la caractéristique W. Elle est typique des appareils exempts de régulation. En raison des résistances internes de la batterie et de l'appareil, le courant de charge diminue constamment à mesure que la tension de la batterie augmente (temps de charge de 12 à 24 h).

Sur les appareils IU, la courbe de charge montre que le courant de charge est maintenu constant jusqu'à l'obtention de la tension de dégagement gazeux de la batterie au plomb (2,4 V par élément) 14. La tension de charge reste ensuite constante et le courant de charge diminue fortement. Si le courant de charge est suffisamment élevé, il est possible d'atteindre des temps de charge inférieurs à 5 h (jusqu'à obtention de 80 % de la charge totale).

La recharge s'effectue sous 14,4 V jusqu'à ce que la batterie ait atteint 80 % de sa capacité, puis on passe en mode floating au-dessous de 14 V.

Le courant de charge

La charge « normale » d'une batterie s'effectue avec un courant représentant 10 % de la valeur numérique de sa capacité nominale (Ah). Dès que la tension de dégagement gazeux est atteinte, le chargeur doit soit couper le courant soit l'abaisser en basculant sur une autre caractéristique de charge (par exemple IU).

La charge à 3 états

Les dispositifs évolués de charge de batterie sont souvent à trois états correspondant à l'utilisation successive de trois caractéristiques de charge :

Type de batterie	Durée de vie en utilisation floating (années)		
	20 °C	25 °C	30 °C
Démarrage	5	3,6	2,5
Semi-traction	5	3,6	2,5
VRLA gélifiée Dryfit A200	4-5	3,6	2,5
VRLA AGM GNB champion	7	5	3,5

17 La durée de vie de 3 types de batteries à différentes températures

- La charge rapide (*boost*) permet une restitution de la capacité (80 % du nominal) dans un minimum de temps. La charge se fait à puissance constante.
- L'égalisation (*absorption*) complète la charge, jusqu'à son maximum, en diminuant petit à petit l'intensité de la charge. La charge se fait à tension constante.
- La charge d'entretien (*floating*) compense la consommation permanente, tout en maintenant une charge optimale de la batterie. Il est nécessaire de maintenir la batterie sous tension constante et stable.

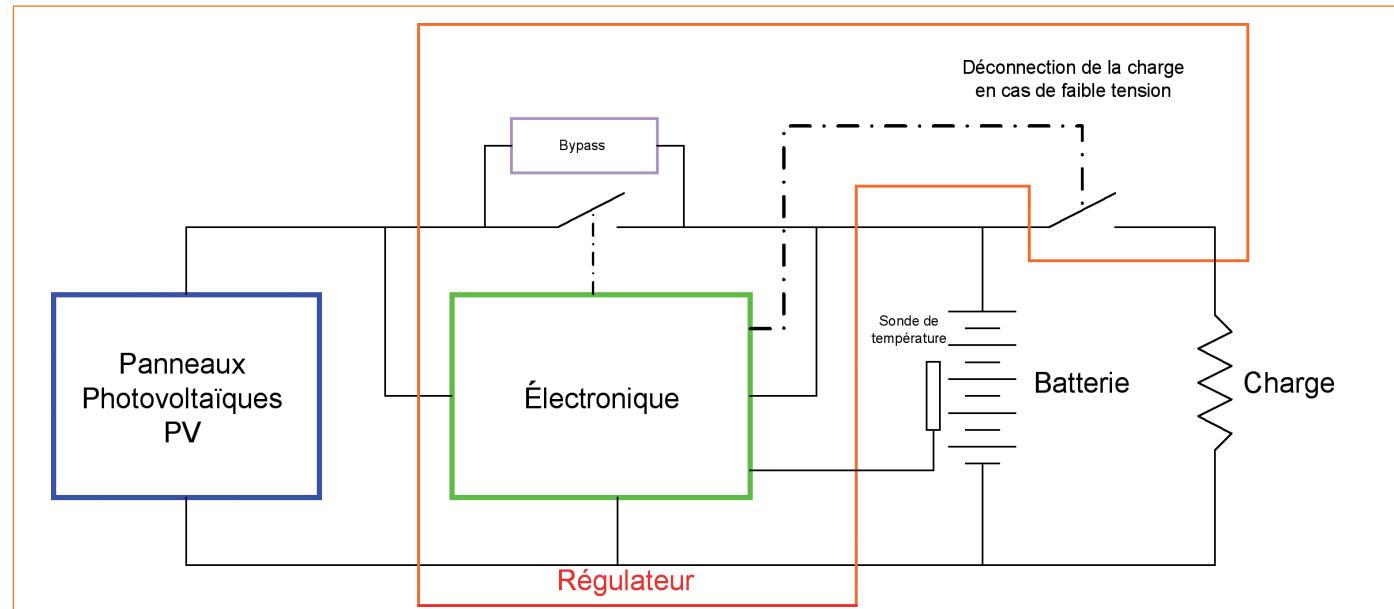
Les chargeurs à découpage

Le principal intérêt des chargeurs à découpage haute fréquence est la qualité de la charge. Ils apportent le maximum d'énergie à la batterie pendant la durée de la charge, pour ensuite maintenir simplement une tension d'entretien évitant la surchauffe de la batterie. Ces chargeurs peuvent donc rester branchés sur la batterie sans danger. Ils sont utilisés pour la recharge des batteries gélifiées.

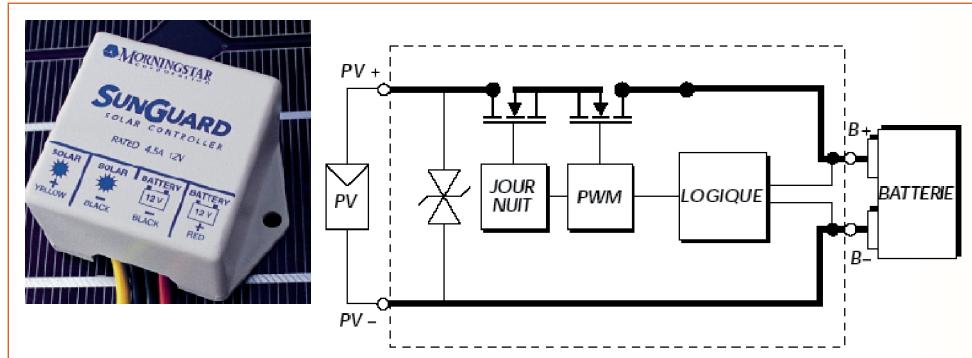
Comparaison des différents types de batteries

Le tableau 16 regroupant les données techniques des différentes batteries permet une comparaison des différentes technologies.

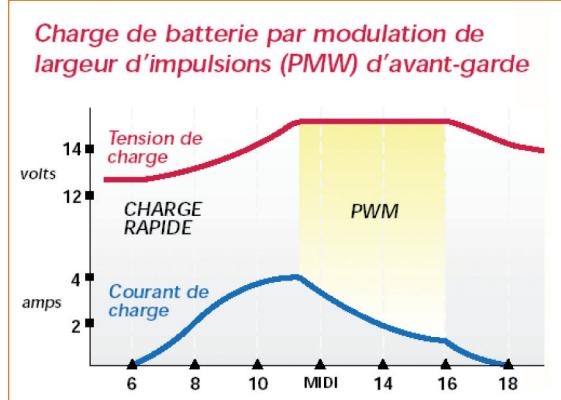
Le tableau 16 donne le nombre de cycles décharge-recharge que peuvent supporter les différentes batteries de 12 V. On considère que les batteries sont en fin de vie lorsque leur capacité est réduite à 80 % de la capacité nominale. Le nombre maximal de cycles de décharge possibles dépend fortement de la profondeur de décharge (DOD, Depth Of Discharge).



18 Le schéma de principe d'un régulateur



19 Le régulateur SunGuard



20 Les caractéristiques du régulateur SunGuard

Le tableau 17 précise l'ordre de grandeur de la durée de vie à différentes températures des différents types de batteries.

La température joue également un rôle important lors de la charge. La tension de gazage et avec elle les tensions idéales *boost* et *floating* sont inversement proportionnelles à la température de la batterie. Cela implique qu'avec des tensions fixes une batterie froide sera insuffisamment chargée

et une batterie chaude le sera trop. Les deux cas sont dommageables à la batterie, et sur une batterie trop chaude il peut même se produire un « emballement thermique ». L'abaissement de la tension de gazage fera augmenter le courant de charge *boost* ou *floating*, provoquant une élévation de température supplémentaire, et ainsi de suite. L'emballement thermique détruit rapidement une batterie, et les dégazages, les éventuels courts-circuits internes font courir de sérieux risques d'explosion.

Les constructeurs donnent généralement des tensions de charge pour une température de 20 °C, qui peuvent raisonnablement être appliquées entre 15 et 25 °C.

Des écarts de plus de 1 % de la bonne tension de charge entraînent de fortes réductions de durée de vie, jusqu'à 30 % selon certaines études, surtout lorsque la température est trop basse et que la batterie est donc mal chargée, ce qui provoque un sulfatage des plaques.

Les causes de vieillissement prématûre

Il existe plusieurs causes de vieillissement prématûre :

- Décharge trop profonde : perte de capacité
- Charge incomplète : perte de capacité
- Surcharge : gazage trop fort (perte d'eau), donc corrosion des plaques
- Température : charge et décharge rapides entraînent un échauffement par la résistance interne $P = R \cdot I^2$. La durée de vie d'une batterie diminue de moitié pour chaque 10 °C d'élévation.

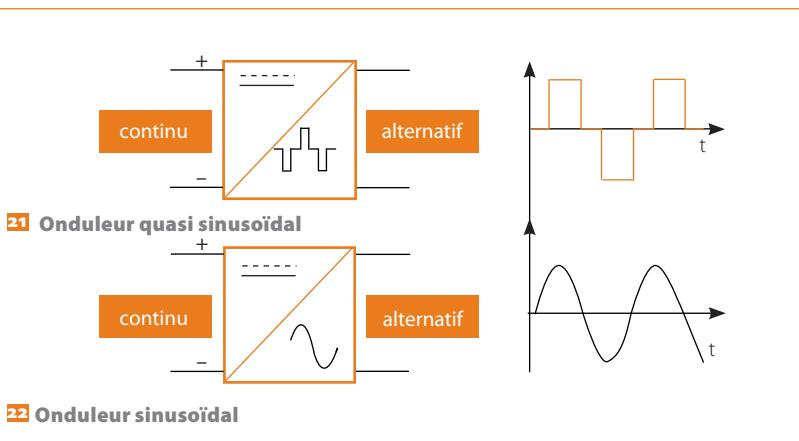
Le régulateur

Son rôle

Le régulateur a pour fonction de gérer la charge et la décharge de la batterie. Il permet un transfert optimal d'énergie entre le générateur solaire et la batterie tout en minimalisant la profondeur de décharge et en protégeant la batterie de la surcharge, qui provoquerait un vieillissement prématûre.

Sa structure

Le régulateur possède un élément de commutation – relais, transistor bipolaire, transistor Mosfet, thyristor – placé entre le panneau solaire et la batterie. Il est commandé par une logique basée sur le contrôle de la tension de la batterie, et peut facilement commuter des courants forts sans dissipation interne d'énergie.



La structure caractéristique d'un régulateur est donnée par le schéma de principe 18.

Ses caractéristiques

Le régulateur possède en général plusieurs caractéristiques techniques :

- Protection contre les inversions de polarités (panneau solaire ou batterie)
- Diode antiretour intégré (évite le retour du courant vers le générateur)
- Fonction alarme tension en cas de tension de batterie trop basse
- Visualisation des états de charge par leds
- Protection contre la foudre, les courts-circuits
- Afficheur de la tension de la batterie et des courants de charge et de décharge
- Le choix s'effectue en général en fonction de la tension (12 V, 24 V) et du courant maximal venant des panneaux solaires.

Un exemple de régulateur du commerce

Le régulateur SunGuard 19 charge les batteries par modulation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation). Il présente des avantages par rapport aux régulateurs solaires marche/arrêt 20 :

- **Emmagasinage quotidien de 30 % de plus de courant d'origine solaire dans la batterie**
- **État de charge moyen de la batterie de 90 à 95 % contre de 55 à 60 % pour les régulateurs marche/arrêt**

L'onduleur

Son rôle

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif qui transforme le 12 V ou 24 V continu en 230 V alternatif.

En site isolé, l'onduleur permet d'alimenter des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. On utilise actuellement des onduleurs ayant un signal de sortie alternatif quasi sinusoïdal.

En site non isolé, on peut utiliser un onduleur pour renvoyer de l'énergie sur le réseau. Dans ce cas, on utilise un onduleur sinusoïdal, qui coûte de 4 à 5 fois plus cher qu'un onduleur quasi sinusoïdal. La différence vient du fait que le signal est pur (forme sinusoïdale) et que pour arriver à ce niveau il a fallu employer des filtres.

Son schéma de principe

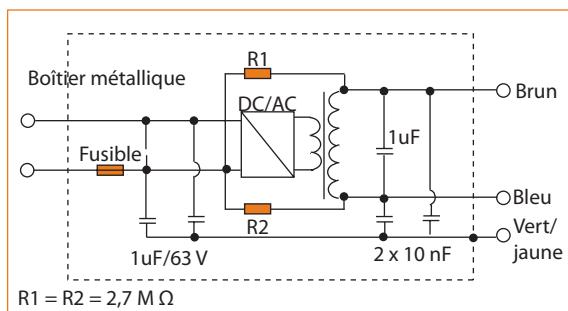
Le signal de sortie obtenu peut être quasi sinusoïdal 21 ou sinusoïdal 22. Pour ce dernier cas, un exemple de structure interne est donné en 23.

Les différents types

Il existe dans le commerce différents modèles d'onduleurs ; leurs caractéristiques sont liées aux applications auxquelles ils sont destinés 24.

Application A : TV 36 cm et éclairage basse consommation ou chargeur

Application B : TV 36 cm + lecteur DVD



- + appareil électrique d'une puissance inférieure à 100 W + éclairage
- Application C : TV 36 cm + lecteur DVD + décodeur numérique + éclairage
- + micro-ordinateur ou appareil électrique < 350 W
- Application D : réfrigérateur ou sèche-cheveux ou lecteur DVD + décodeur numérique + éclairage
- Application E : micro-ordinateur + système de communication ou réfrigérateur + éclairage ou micro-ondes
- Application F : applications A, B, C, D, E + application spécifique

Une application d'installation autonome

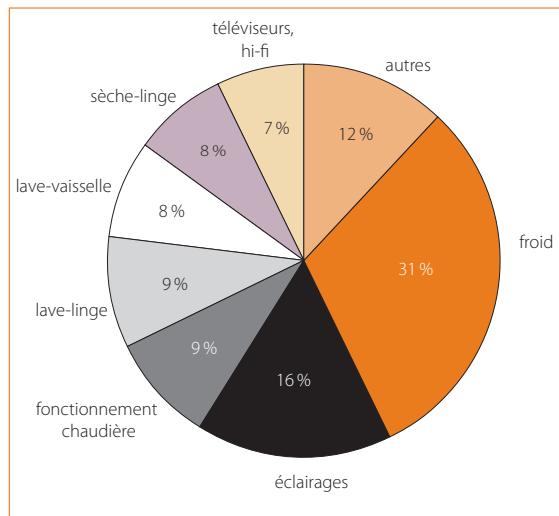
Mise en situation

Pour les sites isolés (hors réseau), l'utilisation de panneaux photovoltaïque est très concurrentielle par rapport à l'extension du réseau. Nous proposons de décrire les étapes de dimensionnement d'une installation autonome en site isolé.

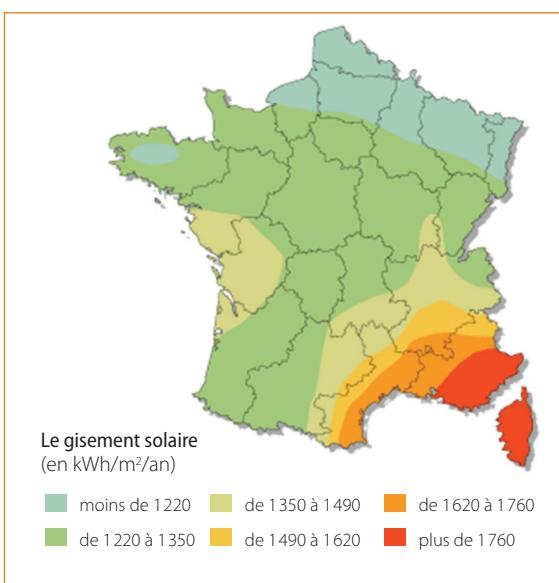
Dans un tel cas, l'énergie produite pendant la période ensoleillée doit être stockée afin de couvrir les besoins pendant la nuit. Le stockage étant assuré par une batterie au plomb, un régulateur de charge doit être installé pour la protéger contre les surcharges ou

N°	Réf.	Puissance en watts	Tension en volts	Qualité du signal	Applications					
					A	B	C	D	E	F
1	466110	150	12	Pseudo-sinusoïdal	X					
2	466210	250	12	Pseudo-sinusoïdal	X	X				
3	466225	250	12	Pseudo-sinusoïdal	X	X				
	467225	250	24	Pseudo-sinusoïdal	X	X				
4	466211	200	12	Sinusoïdal	X	X	X			
5	466212	1 000	12	Pseudo-sinusoïdal	X	X			X	
6	466104	400	12	Sinusoïdal	X	X	X		X	X
7	466107	800	12	Sinusoïdal	X	X	X	X	X	X

24 L'utilisation des onduleurs



25 La répartition moyenne des consommations dans l'habitat



26 Carte d'ensoleillement de la France

la décharge profonde. Il est également souhaitable de s'équiper d'un groupe électrogène et d'un chargeur de batterie pour pallier le manque de soleil sur une période assez longue.

● Matériel nécessaire :

- Panneaux solaires photovoltaïques
- Batterie d'accumulateurs
- Onduleur
- Régulateur de charge
- Chargeur de batterie

La gestion de l'énergie

Gérer la consommation de l'énergie produite est essentiel dans le cas d'une installation autonome. On doit donc penser à économiser l'énergie, et cela passe par un choix réfléchi des appareils électriques. Le choix

des luminaires se portera donc plutôt vers des lampes de type fluocompact qui consomment en moyenne cinq fois moins de puissance que les lampes à incandescence pour un éclairage identique. Quand aux appareils ménagers, très gourmands en énergie électrique, il faudra veiller à acheter ceux dont l'étiquette énergie indique qu'ils sont de classe A ou B. De plus, il ne faut pas oublier d'éteindre réellement les appareils plutôt que de les laisser en veille.

rendement de l'ordre de 5 % à 10 % pour une durée de trente ans. Quant aux panneaux de type amorphe, leur durée de vie n'est pas aussi longue.

● **L'onduleur** : Les appareils de nouvelle génération sont très fiables. D'après les fabricants, ils doivent tenir dix ans en moyenne avant leur première panne.

● **Le régulateur** : Ce matériel est en général assez fiable. Sa durée de vie dépend généralement de l'utilisation des batteries.

● **La batterie** : La batterie est un gros investissement dans une installation solaire. C'est elle qui fournit l'énergie en cas d'ensoleillement moindre ou la nuit. Sa durée de vie en moyenne est de cinq ans.

Le dimensionnement

Analyser ses besoins en électricité

Dans un premier temps, il est nécessaire d'analyser ses besoins en électricité. Le plus simple pour connaître sa consommation annuelle est de faire la somme des kilowattheures facturés sur une année par EDF. Il est aussi possible de mesurer la consommation de chaque appareil, ce qui permet de savoir quels sont les plus gourmands en énergie et ainsi de gérer au mieux la production d'électricité.

La répartition moyenne des consommations d'électricité dans une maison est présentée en 25.

Évaluer la production annuelle d'électricité

La production annuelle d'électricité dépend de plusieurs facteurs :

● **l'ensoleillement annuel** du site, qui peut être évalué assez précisément ;

● **l'orientation**. Le soleil ayant son point le plus haut au sud dans l'hémisphère Nord, c'est la meilleure orientation pour les panneaux ;

● **l'inclinaison**, qui est choisie en fonction de la hauteur du soleil pendant les mois les moins ensoleillés pour une récupération optimale. En pratique, l'inclinaison est obtenue en prenant la latitude du lieu majoré de 10° ;

● **le rendement** de l'onduleur (de l'ordre de 90 %).

Dimensionner la puissance des équipements

● Gisement solaire E_i

L'énergie solaire disponible est exprimée en $\text{Wh/m}^2/\text{j}$ ou en $\text{kWh/m}^2/\text{j}$. Elle dépend de la localisation du site **26**. En voici quelques valeurs indicatives :

$E_i = 6 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$: très ensoleillé (Koweït)

$E_i = 5 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$: ensoleillé (Buenos Aires)

$E_i = 4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$: moyen (Calcutta)

$E_i = 4 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$: couvert (Lyon)

$E_i = 3 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$: très couvert (New York)

● Consommation journalière E_j

Elle dépend de la puissance des appareils et de leur durée d'utilisation. Elle est exprimée en Wh/j ou en kWh/j . C'est le produit de la puissance P (en W ou kW) par le temps T de fonctionnement journalier (en h/j) :

$$E_j = P \cdot T$$

● Dimensionnement solaire (panneau)

La puissance crête P_c (en Wc ou kWc) des panneaux dépend des consommations, du gisement solaire et d'un coefficient de pertes au niveau des panneaux :

$$P_c = E_j / 0,6 E_i$$

0,6 : coefficient de pertes

● Dimensionnement de la batterie (capacité)

La capacité C (en Ah) dépend des consommations journalières, du nombre de jours d'autonomie, de la tension et du type de batteries utilisé :

$$C = N_j E_j / D_p V$$

V : tension de la batterie

D_p : coefficient de décharge profonde

0,8 pour les batteries solaires

0,6 pour les batteries standard

0,5 pour les batteries de voiture

N_j : nombre de jours d'autonomie

5 pour les sites ensoleillés (Afrique, DOM-TOM)

de 7 à 10 pour les sites tempérés (Europe du Sud et France)

de 15 à 20 pour les sites plus défavorables (Europe du Nord)

● Dimensionnement des protections et des sections des câbles

On doit tenir compte du courant circulant dans l'installation, du courant de court-circuit, de la longueur de l'installation et de la tension (se référer à la norme NF C 15-100, UTE C 15-712).

Des exemples de dimensionnement

Les exemples suivants permettent de concrétiser la démarche de dimensionnement proposée.

● 1^{er} exemple : L'alimentation d'une radio

Quel générateur (panneau solaire) faut-il pour alimenter une radio de 50 W sous 12 V fonctionnant 24 h/24 à Lyon pour une autonomie de 7 jours avec une batterie solaire ?

Gisement solaire $E_i = 4 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$

Consommations journalières :

$$\begin{aligned} E_j &= P \cdot T = 50 \times 24 \\ &= 1200 \text{ Wh} = 1,2 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Dimensionnement solaire :

$$\begin{aligned} P_c &= E_j / (0,6 E_i) = 1,2 / (0,6 \times 4) \\ &= 0,5 \text{ kWc} = 500 \text{ Wc} \end{aligned}$$

Capacité de la batterie :

$$\begin{aligned} C &= (N_j E_j) / (D_p V) \\ &= (7 \times 1200) / (0,8 \times 12) \\ &= 875 \text{ Ah} \end{aligned}$$

● 2^d exemple : L'alimentation d'un portail automatique

La puissance du moteur est de 120 W et la tension d'alimentation est de 12 V. La durée de fonctionnement est de 0,03 h.

Le récepteur, d'une puissance de 0,48 W, est alimenté sous 12 V également. La durée de fonctionnement est de 24 h / 24. On désire une autonomie de 10 jours.

Le portail est installé à Paris. La batterie est standard.

Le rayonnement solaire donne pour Paris avec inclinaison à 60° par rapport à l'horizontale en $\text{kWh/m}^2/\text{j}$:

Décembre : 1,12

Mars : 3,23

Juin : 4,43

Septembre : 3,98

Quel générateur et quelle batterie faut-il installer ?

Gisement solaire $E_i = 1,12 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ (cas le plus défavorable)

Consommations journalières pour le moteur :

$$\begin{aligned} E_{jm} &= P \cdot T = 120 \times 0,03 \\ &= 3,6 \text{ Wh/j} \end{aligned}$$

Consommations journalières pour le récepteur :

$$\begin{aligned} E_{jr} &= P \cdot T = 0,48 \times 24 \\ &= 11,52 \text{ Wh/j} \end{aligned}$$

Consommations journalières pour l'ensemble :

$$E_j = E_{jm} + E_{jr} = 3,6 + 11,52$$

$$= 15,12 \text{ Wh/j}$$

Dimensionnement solaire :

$$\begin{aligned} P_c &= E_j / (0,6 E_i) \\ &= 0,01512 / (0,6 \times 1,12) \\ &= 0,0225 \text{ kWc} = 22,5 \text{ Wc} \end{aligned}$$

Capacité de la batterie :

$$\begin{aligned} C &= (N_j E_j) / (D_p V) \\ &= (10 \times 15,12) / (0,6 \times 12) \\ &= 21,04 \text{ Ah} \end{aligned}$$

Le choix du matériel

Les panneaux photovoltaïques

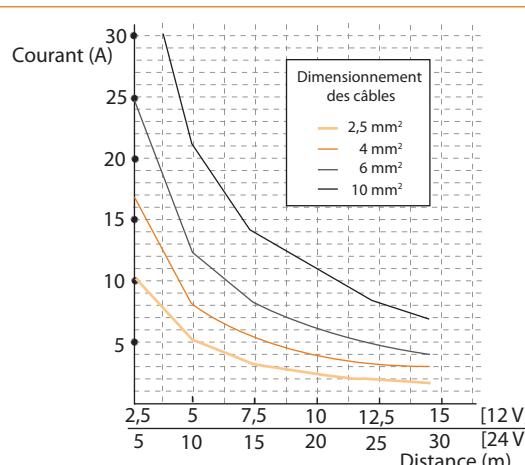
Comme nous l'avons vu, il existe différents types de panneaux, avec des rendements variables. Actuellement, le meilleur compromis entre efficacité, fiabilité et prix doit être recherché du côté des modules cristallins. Outre la technologie, de nombreux paramètres peuvent influer sur le choix des panneaux : opaques ou translucides, avec ou sans cadre aluminium, couleur... D'autre part, des produits comme les tuiles ou les ardoises solaires s'intègrent plus facilement dans certaines constructions, mais avec un surcoût par rapport aux modules classiques qui peut s'élever jusqu'à 50 %.

Les éléments de connexion

Une installation de panneaux photovoltaïques doit résister aux intempéries, c'est pourquoi les câbles électriques extérieurs doivent être à double isolation, résistants aux UV, et les connexions des différents éléments réalisées avec soin afin d'assurer une très bonne étanchéité. Les panneaux photovoltaïques produisent un courant élevé, les pertes dans les câbles peuvent donc être importantes. Pour les limiter, il faut faire attention aux points suivants :

● La section des câbles doit être correctement calculée pour que les pertes ne dépassent pas 3 % (NF C 15-100) **27**.

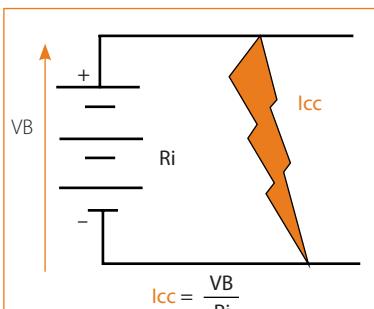
● Une disposition des panneaux en série sera préférable à une disposition en parallèle ; elle augmentera la tension nominale, ce qui générera moins de pertes **28**. Mais si un seul panneau est occulté ou défaillant, c'est la puissance de toute l'installation qui diminue.



Exemple

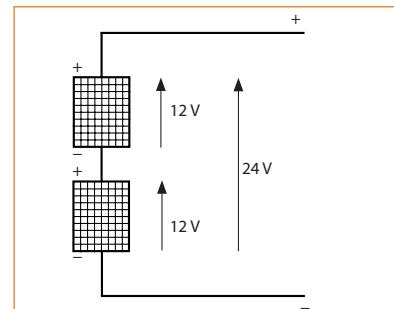
- Installation 12 V
- Distance modules-batterie de 10 m
- Courant de 6 A (2 modules PWX500 en //)
- câble de $2 \times 6 \text{ mm}^2$

29 Le cas du courant de court-circuit



VB : tension maximale de décharge (batterie chargée à 100 %)
 Ri : résistance interne équivalente à l'ensemble (valeur donnée par le constructeur en fonction de la capacité de la batterie). Si la valeur n'est pas connue, on peut utiliser une formule approchée :
 $I_{cc} = K \cdot C$
 C : capacité (Ah)
 $10 < K < 20$

27 Le dimensionnement des câbles



28 Le raccordement de panneaux en série

La protection des installations en courant continu

En courant continu, il existe des différences par rapport au courant alternatif quant au calcul du courant de défaut (court-circuit ou défaut d'isolation) et au choix des matériels de protection, qui doivent être adaptés au courant continu.

Le courant de court-circuit

La batterie

Lors d'un courant de court-circuit, une batterie d'accumulateurs débite un courant fixé par la loi d'Ohm 29.

● Exemple : Icc d'une batterie en court-circuit

Capacité : 500 Ah
 Tension de décharge : 240 V
 Courant de décharge : 300 A
 Autonomie : 1/2 h
 110 éléments de 2,2 V
 Ri d'un élément : 0,5 mΩ

$$R_{i\text{total}} = 110 \times 0,5 \times 10^{-3} \\ = 55 \times 10^{-3} \Omega$$

Courant de court-circuit :

$$I_{cc} = VB / R_{i\text{total}} \\ = 240 / 55 \times 10^{-3} = 4363 \text{ A}$$

Les caractéristiques des défauts d'isolation et de l'appareillage de protection

Les dispositifs de coupure sont sensibles au niveau de tension continue à leurs bornes lorsqu'ils doivent éliminer un court-circuit. Le tableau 30 permet de déterminer ces tensions, qui dépendent de la tension de la source et de son régime de liaison à la terre.

Le choix du dispositif de protection

Le choix du dispositif de protection dépend des paramètres suivants :

- la tension de défaut susceptible d'apparaître suivant les différents cas

	Réseaux mis à la terre			Réseaux isolés de la terre
	La source a une polarité reliée à la terre	La source comporte un point milieu relié à la terre		
Schémas et différents cas de défauts				
Analyse de chaque défaut	Défaut A	Le pôle doit couper l'Icc maximal sous U	Le pôle doit couper l'Icc voisin de l'Icc maximal sous U/2	Sans conséquence
	Défaut B	Les 2 pôles doivent couper l'Icc maximal sous U	Les 2 pôles doivent couper l'Icc maximal sous U	Les 2 pôles doivent couper l'Icc maximal sous U
	Défaut C	Sans conséquence	Idem défaut A, mais c'est la polarité négative qui est concernée	Sans conséquence
Cas le plus défavorable	Défaut A		Défauts A et C	Défaut B (ou défauts A et C)
Cas d'un dijoncteur	Tous les pôles devant participer effectivement à la coupure sont placés en série sur la polarité positive (ou négative si c'est la polarité positive qui est reliée à la terre). Prévoir un pôle supplémentaire sur la polarité à la terre si l'on veut réaliser le sectionnement		Prévoir sur chaque polarité le nombre de pôles nécessaires pour couper les max sous la tension U/2	Répartir le nombre de pôles nécessaires à la coupure sur chaque polarité

30 Les différents types de défauts d'isolation

L'onduleur

L'onduleur assume une fonction de liaison directe avec le réseau électrique, et il est susceptible de créer de graves dommages. Il doit donc répondre à des impératifs concernant la qualité du courant (tension, fréquence), de sécurité et de fiabilité.

Actuellement, il n'existe pas de norme européenne pour les onduleurs, il faut donc s'assurer de la compatibilité de l'onduleur avec les normes du pays. D'autres éléments doivent permettre de s'assurer de sa qualité :

- Le rendement doit être de 90 % pour un fonctionnement à une puissance supérieure de 5 % à la puissance nominale.

● Les paramètres internes doivent être réglables pour s'adapter au réseau électrique local et pouvoir être réajustés après quelques mois de fonctionnement.

● Une protection contre les surtensions venant par le réseau doit être prévue dans l'onduleur, car il s'agit de la principale cause de panne de cet appareil.

Type	Calibres (A)	Pouvoir de coupure ($L/R \leq 0,015 \text{ s}$) (entre parenthèses, le nombre de pôles devant participer à la coupure)				Protection contre les surcharges thermiques	Coefficient de surclassement des seuils magnétiques	
		$\leq 60 \text{ V}$	$\leq 125 \text{ V}$	250 V	500 V			
C32HDC	1 à 40		10 (1 p)	20 (2 p)	10 (2 p)		Spécial CC	spécial CC
C60a	6 à 40	10 (1 p)	10 (2 p)	20 (3 p)	25 (4 p)		Idem CA	1,38
C60N	6 à 63	15 (1 p)	20 (2 p)	30 (3 p)	40 (4 p)		Idem CA	1,38
C60H	1 à 63	20 (1 p)	25 (2 p)	40 (3 p)	50 (4 p)		Idem CA	1,38
C60L	1 à 63	25 (1 p)	30 (2 p)	50 (3 p)	60 (4 p)		Idem CA	1,38
NC 100H	10 à 100	20 (1 p)	30 (2 p)	40 (3 p)	20 (4 p)		Idem CA	1,42
NC 100L	10 à 63				25 (1 p)	25 (3 p)	Idem CA	1,42
NC 100LS	10 à 63				36 (1 p)	36 (3 p)	Idem CA	1,42
NC 100 LH	10 à 63				50 (1 p)	50 (3 p)	Idem CA	1,42
C101N	15 à 100	25 (1 p)	25 (1 p)		25 (2 p)	25 (4 p)	Idem CA	
C101H	15 à 100	50 (1 p)	50 (1 p)		50 (2 p)	25 (4 p)	Idem CA	
C101L	15 à 100	100 (1 p)	100 (1 p)		100 (2 p)	100 (4 p)	Idem CA	
C161N	80 à 160	25 (1 p)	25 (1 p)		25 (2 p)	50 (4 p)	Idem CA	
C161H	80 à 160	25 (1 p)	25 (1 p)		25 (2 p)	85 (4 p)	Idem CA	
C161L	80 à 160	100 (1 p)	100 (1 p)		100 (2 p)	100 (4 p)	Idem CA	
C250N	160 à 250	50 (1 p)	50 (1 p)		50 (2 p)	50 (4 p)	Idem CA	
C250H	160 à 250	85 (1 p)	85 (1 p)		85 (2 p)	85 (4 p)	Idem CA	
C250L	160 à 250	100 (1 p)	100 (1 p)		100 (2 p)	100 (4 p)	Idem CA	
C401N	P1/P2/P3-401	50 (1 p)	50 (1 p)		50 (2 p)	50 (4 p)		
C401H	P1/P2/P3-401	85 (1 p)	85 (1 p)		85 (2 p)	85 (4 p)		
C401L	P1/P2/P3-401	100 (1 p)	100 (1 p)		100 (2 p)	100 (4 p)		
C630N	P1/P2/P3/P4-401/630	50 (1 p)	50 (1 p)		50 (2 p)	50 (4 p)		
C630H	P1/P2/P3/P4-401/630	85 (1 p)	85 (1 p)		85 (2 p)	85 (4 p)		
C630L	P1/P2/P3/P4-401/630	100 (1 p)	100 (1 p)		100 (2 p)	100 (4 p)		

31 Le pouvoir de coupure des protections

du tableau 30. Il faut pour un disjoncteur procéder à la détermination du nombre de pôles à mettre en série sur chaque conducteur pour atteindre le niveau indiqué sur le tableau :

- le courant assigné (courant nominal de la protection) ;
- le courant de court-circuit au point d'installation, qui permet de déterminer le pouvoir de coupure ;
- la constante de temps L/R en millisecondes, qui pour le courant continu remplace le facteur de puissance.

● 1^{er} exemple : Comment réaliser la protection d'un départ 80 A sur un réseau 125 V à courant continu dont la polarité négative est mise à la terre et d'Icc = 15 kA ?

Le tableau 30 indique que la pleine tension de défaut apparaît sur les pôles insérés dans la polarité négative pour assurer le sectionnement.

Le tableau 31 indique que le NC 100H (30 kA, 2 pôles, 125 V) convient. Pour améliorer le pouvoir de coupure, on placera un pôle supplémentaire sur la polarité positive 32.

● 2^d exemple : Comment réaliser la protection d'un départ 100 A sur un

réseau 250 V à courant continu dont le point milieu est relié à la terre et d'Icc = 15 kA ?

Le tableau 30 indique qu'il faut que chaque pôle coupe sous une tension 250 V / 2 = 125 V.

Le tableau 31 indique que le NC 100H (30 kA, 2 pôles, 125 V) convient. On insère donc 2 pôles de NC 100H dans la polarité positive et 2 autres dans la polarité négative 32. On vérifie dans la colonne 250 V que 4 pôles du NC 100H coupent 20 kA sous cette tension.

La protection des personnes

Les règles de protection des personnes sont celles du courant alternatif. Toutefois, les tensions conventionnelles ($UI = 120 \text{ V}, 60 \text{ V}, 30 \text{ V}$) et les temps de déconnexion pour la coupure automatique sont différents.

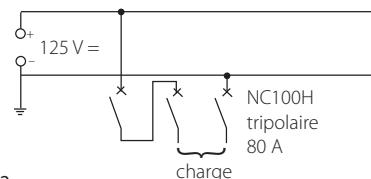
On précise que :

- les masses sont interconnectées et mises à la terre ;
- l'ouverture automatique est faite dans les temps spécifiés ;
- les DDR (différentiels) ne sont pas utilisables.

On utilise le principe des schémas de liaison à la terre (TN). Il faut donc

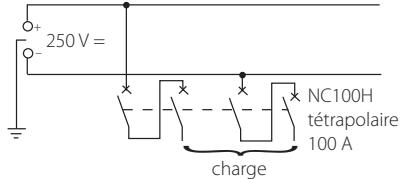
Exemple 1

Comment réaliser la protection d'un départ 80 A sur un réseau 125 V à courant continu dont la polarité négative est mise à la terre et d'Icc = 15 kA ?



Exemple 2

Comment réaliser la protection d'un départ 100 A sur un réseau 250 V à courant continu dont le point milieu est relié à la terre et d'Icc = 15 kA ?



32 Les schémas des exemples 1 et 2

que le courant de défaut soit suffisant pour solliciter le dispositif magnétique du disjoncteur dans un temps inférieur au temps maximal de contact (se référer à la norme NF C 15-100).

Bibliographie

- Labouret (A), Cumunel (P), Braun (J.-P.), Faraggi (B), *Cellules solaires – Les bases de l'énergie photovoltaïque*, Dunod, coll. ETSF, 2010
Systèmes solaires, hors-série Le Journal du photovoltaïque n° 5, avril 2011