

INSTALLATIONS
SOLAIRES
PHOTOVOLTAÏQUES
AUTONOMES

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



ÉDITEUR DE SAVOIRS

Mark Hankins

INSTALLATIONS SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES

Conception et installation d'unités
non raccordées au réseau

Traduit de l'anglais par Daniel Gouadec

DUNOD

L'ouvrage original de Mark Hankins a paru en langue anglaise en 2010 sous le titre *Stand-Alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*

First published in 2010 by Earthscan

Copyright © Mark Hankins 2010

All rights reserved

Authorised translation from the English language edition published as an Earthscan title by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group

Cet ouvrage est la traduction en langue française, par les éditions Dunod, de l'ouvrage de Mark Hankins publié sous le titre *Stand-Alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*

Traduction : Daniel Gouadec

Photo de couverture : © hopewei – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2012, pour la traduction française
ISBN 978-2-10-057299-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	1
Abréviations utilisées	3
Chapitre 1 : Introduction : Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire	5
1.1 Usages courants de l'électricité solaire photovoltaïque	5
1.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques autonomes	10
1.3 Contenus du présent guide de conception et réalisation de systèmes photovoltaïques	11
Chapitre 2 : L'énergie solaire	15
2.1 La ressource solaire	15
2.2 Conversion de l'énergie solaire	16
2.3 Principes du rayonnement solaire	18
2.4 Rayonnement direct et rayonnement diffus	20
2.6 Irradiance solaire	22
2.7 Insolation	23
2.8 Utilisation des archives météorologiques	24
2.9 Angles, orientation et poursuite du soleil : optimiser l'énergie solaire	26
2.10 L'énergie solaire	28
2.11 Technologies solaires thermiques	31
Chapitre 3 : Les modules photovoltaïques	37
3.1 Effet photoélectrique	37
3.2 Technologie des cellules photovoltaïques	38
3.3 Modules photovoltaïques et panneaux solaires	43
3.4 Puissance des modules photovoltaïques	46
3.5 Choix des modules photovoltaïques	52

Chapitre 4 : Les batteries	55
4.1 Stockage de l'énergie	55
4.2 Quelques points importants	56
4.3 Principe et fonctionnement des batteries	57
4.4 Batteries nickel-hydrure métallique, cadmium-nickel et lithium-ion	58
4.5 Batteries au plomb	60
4.6 Capacité de stockage nominale	60
4.7 Charge et décharge	62
4.8 Cycle, cycle de vie, profondeur de décharge et courant de décharge maximal	68
4.9 Auto-décharge	70
4.10 Stratification	71
4.11 Surcharge et régulateurs de charge	71
4.12 Types de batteries au plomb	72
4.13 Choix de la batterie	77
4.14 Mise en service, gestion et entretien des batteries	78
4.15 Remplacement des batteries	79
4.16 Cellules défaillantes	79
4.17 Alternatives à la charge par l'énergie solaire	80
Chapitre 5 : La gestion de la charge : régulateurs de charge et onduleur	81
5.1 Fonctions du régulateur de charge	81
5.2 Déconnexion à basse tension	82
5.3 Régulateurs de charge et protection anti-surcharge	84
5.4 Régulateurs de charge et connexions	87
5.5 Autres fonctions des régulateurs de charge et dispositifs de gestion des charges	89
5.6 Choix du régulateur de charge	91
5.7 Gestion d'installations ne comportant pas de régulateur de charge	93
5.8 Onduleurs	94
5.9 Convertisseurs de tensions	99

Chapitre 6 : L'éclairage et le choix des appareils électriques	103
6.1 Installations solaires photovoltaïques non raccordées au réseau, tension, éclairage et appareils	103
6.2 L'éclairage	105
6.3 Lampes à incandescence et lampes à incandescence halogènes	107
6.4 Lampes fluorescentes et onduleur/ballast	108
6.5 Lampes à diode électroluminescente	111
6.6 Éclairer ce qui doit l'être	112
6.7 Choix des lampes, accessoires et techniques de montage	114
6.8 Applications courantes	115
6.10 Appareils	117
6.11 Tension de l'installation : 12 VCC ou 110/230 VAC ?	117
6.12 Choix des éclairages et des appareils	119
6.13 Consommation d'énergie des appareils électriques	123
Chapitre 7 : Le câblage et les appareillages	125
7.1 Fils de câblage	126
7.2 Interrupteurs, prises et fusibles	129
7.3 Connexions	134
7.4 Section des fils, chute de potentiel et longueur maximale de câbles	138
7.5 Chute de potentiel	140
7.6 Utilisation de la fiche de calcul 5 pour calculer la chute de potentiel	141
7.7 Calcul arithmétique de la chute de potentiel	143
7.8 Mise à la terre et protection contre la foudre	146
Chapitre 8 : Planification d'une installation solaire photovoltaïque non raccordée	151
8.1 Le processus de planification/conception	151
8.2 Quelques avertissements	153
8.3 Tension de l'installation	154
8.4 Tension de distribution	155

8.5 Fiche de calcul 1 : Besoin énergétique journalier total de l'installation et tension de l'installation	156
8.6 Fiche de calcul 2 : Dimensionnement et choix des modules	163
8.7 Fiche de calcul 3 : Dimensionnement et choix de la batterie	170
8.8 Fiche de calcul 4 : dimensionnement et choix du régulateur de charge/de l'onduleur	175
8.9 Fiche de calcul 5 : Choix des câbles et des appareillages	180
Chapitre 9 : Réalisation de l'installation	183
9.1 Outils, instruments et matériaux	185
9.2 Sécurité	187
9.3 Pose des câbles	190
9.4 Guide de câblage pour installations solaires photovoltaïques de faible puissance non raccordées au réseau	190
9.5 Câblage 12/24 VCC	192
9.6 Installation des modules photovoltaïques/du panneau	194
9.7 Installation de la batterie et du régulateur	201
9.8 Tests et ultimes raccordements	207
9.9 Formation des utilisateurs	210
Chapitre 10 : Gestion, maintenance et entretien des installations solaires photovoltaïques non raccordées au réseau	213
10.1 Gestion des flux d'énergie dans les installations solaires photovoltaïques non raccordées au réseau	213
10.2 Gestion active de l'énergie solaire captée	216
10.3 Quelques solutions techniques pour réduire la consommation d'énergie	220
10.4 Entretien périodique	223
10.5 Dépannage	228
Chapitre 11 : Principes de base des installations autonomes de forte puissance	233
11.1 Passage aux installations de forte puissance	233
11.2 Charges et appareils	234

11.3 Installations solaires photovoltaïques de faible puissance pour institutions	239
11.4 Installations PV résidentielles de plus forte puissance	242
11.5 Installations hybrides	246
11.6 Pompage d'eau PV	255

ANNEXES

Annexe 1 : Énergie, puissance et efficacité énergétique	263
Annexe 2 : Notions de base se rapportant au courant continu extra basse tension	265
Annexe 3 : Adresses utiles	269
Annexe 4 : Fiches de calcul	271

Glossaire	279
------------------	------------

Index	287
--------------	------------

Avant-propos

Le présent ouvrage s'adresse à quiconque souhaite maîtriser la conception et la réalisation d'installations solaires photovoltaïques autonomes de faible puissance. Il reprend du matériel déjà présent dans un ouvrage que j'ai publié au milieu des années 1980 (*Solar Electric Systems for Africa*). L'ensemble a été refondu et mis à jour pour tenir compte des évolutions technologiques intervenues dans les domaines du solaire, des batteries, des régulateurs de charge, des onduleurs et de l'éclairage.

Le photovoltaïque autonome est un choix de vie : il est particulièrement agréable de pouvoir s'éclairer, écouter de la musique, utiliser un portable ou consulter l'Internet dans des lieux éloignés, loin de tout réseau électrique ou groupe électrogène. Et la satisfaction sera d'autant plus intense que vous aurez réalisé l'installation (pose du panneau, création des circuits, remplissage des batteries et montage du régulateur de charge) vous-même. Si vous vous lancez, sachez que le virus du solaire ne vous lâchera plus. Vous allez devenir d'ardents propagandistes et de remarquables praticiens du photovoltaïque ! Ne boudez pas votre plaisir, mais n'oubliez pas que vous rencontrerez de nombreux écueils !

Je voudrais remercier Frank Jackson, l'éditeur technique également formateur, personne-ressource, et photographe, pour son aide et ses conseils, Michael Fell, Claire Lamont, Hamish Ironside et le personnel d'Earthscan pour leur patience et leur professionnalisme et, bien sûr, ma femme Gladys et ma fille Ayanna pour leur soutien sans réserve au projet.

Je dédie le présent ouvrage à trois « lions solaires » – Walt Ratterman, Gaspar Makale et Harry Burris –, qui ont tant fait pour promouvoir la technologie photovoltaïque autonome. Chacun d'entre eux a partagé son expérience et son enthousiasme avec des milliers de techniciens et de profanes et, ensemble, ils ont posé les fondations du présent ouvrage.

Walt Ratterman a installé du photovoltaïque et formé des utilisateurs dans les endroits les plus reculés de la planète. Il était aussi à l'aise avec du 50 Wc qu'avec du 50 kWc et, bien qu'il soit venu tardivement au solaire, il avait la curiosité et l'enthousiasme d'un adolescent. Nous avons travaillé en étroite coopération

au Rwanda et, pendant la rédaction du manuscrit du présent ouvrage, il m'a transmis ses commentaires du Lesotho, d'Haïti, de l'Oregon et de Palestine. Il est décédé à Port-au-Prince dans l'effondrement de son hôtel lors du tremblement de terre du 12 janvier 2010.

Technicien du solaire, homme d'affaires et formateur, Gaspar Makale a contribué (avec Frank Jackson et moi-même) à créer le centre de formation KARADEA en Tanzanie où, de 1993 à 2001, nous avons formé des centaines de techniciens du solaire photovoltaïque venus de l'Afrique entière. Sa bonne humeur nous faisait oublier le manque d'outils et d'argent. Il est décédé chez lui, à Kagera, en Tanzanie, en 2007.

C'est à Harry Burris que je dois de m'être intéressé au photovoltaïque en 1983. Il a été, plus que tout autre, à l'origine du développement des marchés de l'électricité solaire photovoltaïque au Kenya, au Zimbabwe et en Tanzanie. Il a introduit le concept du solaire domestique en Afrique occidentale, construisant des chaînes d'approvisionnement, contactant les fournisseurs, convainquant le fabricant de batteries de produire une batterie « solaire » et persuadant les sociétés locales d'électronique de produire des lampes 12 Vcc. Voyageant à bicyclette et en bus, dormant dans des hôtels miteux et vivant comme les gens du cru, Harry – surnommé « Baba solar » dans les dernières années de sa vie –, et son équipe ont implanté en cinq ans des milliers d'installations solaires photovoltaïques dans des maisons, des écoles et des centres de soins éloignés de tout en même temps qu'ils formaient des douzaines de techniciens. Il a dirigé en 1995, au Zimbabwe puis plus tard en Tanzanie, le premier projet des Nations-Unies en Afrique dans le domaine du photovoltaïque. En 1985, nous avons rédigé, sur sa machine à écrire de correspondant de guerre de la seconde guerre mondiale, ce qui allait devenir le cœur du présent ouvrage.

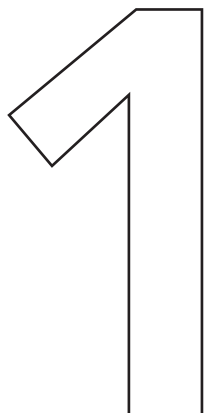
Mark Hankins

Nairobi, avril 2010

Abréviations utilisées

ca	courant alternatif
AGM	(absorbed glass mat) batteries au plomb AGM
BoS	balance of systems
CdTe	tellure de cadmium
CIGS	cuivre-indium-gallium-sélénium
CSP	énergie solaire concentrée
cc	courant continu
DEA	démarrage – éclairage – allumage
DEL/LED	diode électroluminescente (light-emitting diode)
DoD	profondeur de décharge
GPL	gaz de pétrole liquéfié
HEM	heures d'ensoleillement maximal (PSH pour <i>peak sun hours</i> en anglais)
HVD	déconnexion à haute tension
Isc	courant de court-circuit
LVD	déconnexion à basse tension
MLI	modulation en largeur d'impulsion (PWM, <i>pulse-width modulation</i> en anglais)
MPPT	système de recherche de point de puissance maximale
nicad	cadmium nickel
NOCT	température normale de fonctionnement des cellules

PV	photovoltaïque
SSI	système solaire individuel
SoC	état de charge
STC	conditions normales d'essai
Vco	tension en circuit ouvert
Wc	watt-crête



Introduction : Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

Le photovoltaïque autonome, non raccordé aux réseaux, répond aux besoins en électricité de ceux qui – trop éloignés –, n'ont pas accès aux réseaux de distribution comme de ceux qui souhaitent s'affranchir de la contrainte du « branchement ». Le présent ouvrage explique comment concevoir et installer un système répondant aux besoins spécifiques de l'utilisateur qui souhaite électrifier sa cabane en rondins au fond des bois, son voilier, ou son abri de jardin. Il explique également la notion de flux de l'électricité – un concept particulièrement critique dans un monde où la pénurie d'énergie se fait de plus en plus fortement sentir et où il est important que chacun puisse dire qu'il récolte sa propre énergie.

Les pages qui suivent expliquent ce que sont les installations solaires photovoltaïques et décrivent, dans les grandes lignes, la technologie de l'électricité solaire photovoltaïque et ses principales applications. Elles présentent les avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques et de leurs composants (modules, batteries, régulateurs de charge, onduleurs et appareils électriques). Les notions fondamentales et la terminologie correspondante sont présentées en fin de chapitre.

1.1 Usages courants de l'électricité solaire photovoltaïque

L'électricité « solaire » est obtenue par conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ou transformation du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de modules photovoltaïques. Elle constitue une alternative bon marché au groupe électrogène au diesel, à l'électricité du secteur et même aux piles. La technologie s'est rapidement développée à la fois dans des applications autonomes (non raccordées) et dans des applications raccordées aux réseaux. Les systèmes

photovoltaïques (PV) équipent aujourd'hui des millions d'habitations rurales, aussi bien dans les pays développés que dans les pays en voie de développement.

Les petites installations solaires photovoltaïques autonomes diffèrent des installations raccordées ou avec groupes électrogènes en ce sens que :

- ▶ le courant généré est un courant continu très basse tension et non un courant alternatif basse tension à 230 volts (voir glossaire),
- ▶ l'électricité est généralement stockée dans des batteries,
- ▶ l'électricité est produite sur place au moyen de modules photovoltaïques,
- ▶ leur rentabilité n'est garantie qu'au prix d'une utilisation efficace de l'électricité produite.

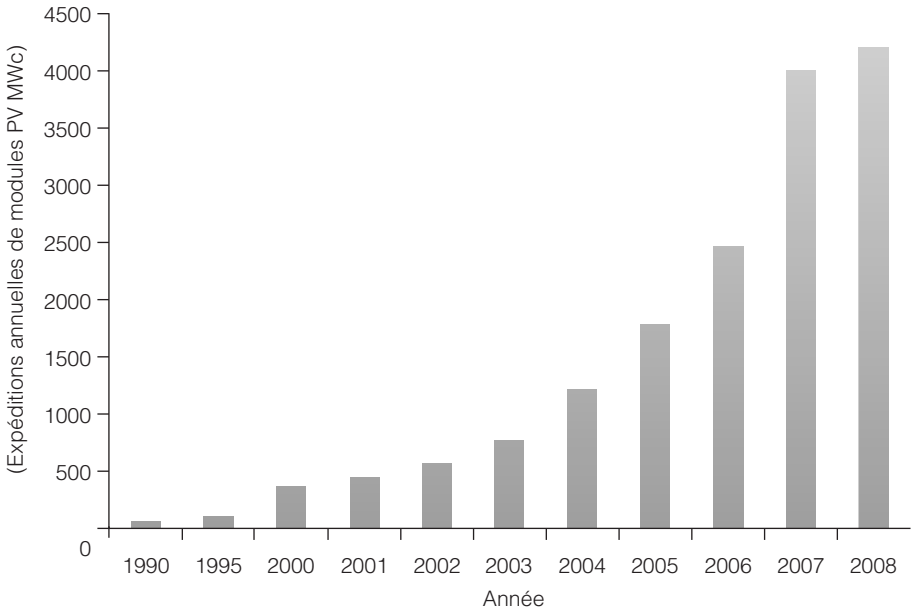


Figure 1.1 Expéditions annuelles de modules PV, 1990-2008 (MWc)

Le photovoltaïque se développe très rapidement et se répand dans le monde entier à mesure que les coûts des autres formes d'énergie augmentent. Avant 1990, la technologie était nouvelle et généralement confinée aux systèmes de communication hors réseau, à la signalisation routière, au pompage de l'eau et à l'approvisionnement électrique de centres de soins éloignés de tout.

Depuis le milieu des années 1990, la production mondiale de modules photovoltaïques augmente à un rythme soutenu sous l'effet de deux facteurs :

1.1 Usages courants de l'électricité solaire photovoltaïque

- ▶ l'augmentation de la demande liée à multiplication des installations raccordées en Europe, aux États-Unis et au Japon, et
- ▶ la chute du prix du Wc (divisé par 25 entre 1974 et 2008).

La baisse des coûts a dopé la demande en milieu rural. Aujourd'hui, l'électricité photovoltaïque est souvent la meilleure source d'énergie, en termes économiques, pour quantité d'applications dans les zones rurales non électrifiées.

Les installations solaires photovoltaïques non raccordées et les installations solaires photovoltaïques raccordées au réseau diffèrent considérablement, à la fois dans leurs composants et dans leur conception. Les installations non raccordées – qui doivent garantir un approvisionnement adéquat pendant les longues périodes nuageuses –, stockent généralement l'électricité dans des batteries, alors que les installations reliées au réseau n'utilisent pas de système de stockage car elles peuvent réinjecter sur le réseau l'électricité qu'elles ne consomment pas.

Le présent ouvrage est destiné aux concepteurs et installateurs de systèmes non raccordés d'une puissance inférieure à 1 kilowatt-crête qui devront bien entendu se conformer systématiquement et scrupuleusement aux spécifications des composants (présentées dans la documentation accompagnant ces composants), aux réglementations nationales, et aux codes locaux. Les installations de plus de 500 Wc sont traitées au chapitre 11. L'installation doit toujours être réalisée (ou supervisée) par des techniciens qualifiés.



(a) Modules photovoltaïques sur un pensionnat de jeunes filles en Tanzanie



(b) Panneaux montés sur des mâts dans un centre de santé Rwandais (Walt Ratterman second à partir de la droite)

Figure 1.2 Applications PV courantes Sources : (a) Frank Jackson ; (b) Mark Hankins



(c) Système photovoltaïque dans une réserve au Kenya



(d) Pompe solaire fonctionnant depuis 10 ans à Puntland, Somalie



(e) Petit système d'éclairage au Bangladesh

Figure 1.2 Applications PV courantes
Sources : (c et d) Mark Hankins ;
(e) MicroEnergy International

Les applications de l'électricité photovoltaïque non raccordée sont nombreuses et variées. La liste ci-après en donne un aperçu et le chapitre 11 propose des études de cas correspondantes.

Électricité domestique : éclairage, télévision, musique, radio et petits équipements

Souvent appelées « systèmes solaires individuels » (SSI), les petites installations solaires photovoltaïques assurent l'éclairage et le fonctionnement de petits appareils électriques. L'éclairage nocturne est crucial pour l'éducation, le commerce, l'artisanat et la vie sociale. Soucieuses de se distraire et de s'informer, les populations rurales non desservies par des réseaux de distribution attachent beaucoup d'importance aux accès à la télévision, à la musique, à l'informatique et à la communication.

Entreprises et institutions

Les écoles et les petites entreprises en milieu rural ont besoin d'électricité pour alimenter l'éclairage, les outils et équipements, les calculatrices et ordinateurs, le petit équipement, les machines à écrire, les outils de communication et les équipements de sécurité.

Télécommunications

Les systèmes de télécommunication étant souvent installés dans des lieux isolés sans accès à l'énergie, il est fréquent que les radios, les répéteurs distants, les relais de réseaux de téléphonie mobile et les stations météo soient alimentés par des installations solaires photovoltaïques autonomes.

Conservation de vaccins et éclairage des centres de santé

L'électricité solaire photovoltaïque est fréquemment utilisée pour réfrigérer les vaccins et le plasma et refroidir les paquets de glace dans les centres de santé ruraux. L'Organisation mondiale de la santé soutient des programmes d'installation de réfrigérateurs électriques et de systèmes d'éclairage solaire dans des centres de santé dans le monde entier.

Pompage

On utilise des batteries de modules photovoltaïques pour alimenter des pompes équipant des puits ou des forages. L'eau sert à l'alimentation, à la lessive, à tous les besoins domestiques, et, à petite échelle, à l'irrigation (l'utilisation du photovoltaïque pour une irrigation à l'échelle commerciale est excessivement coûteuse). L'électricité solaire photovoltaïque est également utilisée pour purifier l'eau.

Clôtures électriques et autres

L'électricité photovoltaïque est également utilisée pour alimenter des clôtures électriques dans les réserves naturelles afin de confiner les animaux dans

certaines zones et de leur interdire l'accès aux zones cultivées. Elle sert aussi à l'éclairage public, à la signalisation routière, et à la protection des pipelines contre la corrosion.

1.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques autonomes

Au moment de choisir le système, il faut peser les avantages et les inconvénients à la lumière des contraintes, besoins et spécifications du projet (tableau 1.1).

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque

Avantages	Inconvénients
<p>Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.</p> <p>Absence de bruit, de pollution et d'émissions.</p> <p>Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).</p> <p>Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).</p> <p>Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.</p> <p>Sécurité absolue si l'installation est conforme. Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.</p>	<p>Le coût initial des systèmes PV est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée. Ils sont donc parfois hors de portée des personnes à faibles revenus.</p> <p>Dans la plupart des installations, l'électricité doit être stockée dans des batteries. Or, les batteries : (i) requièrent une maintenance régulière, (ii) doivent être remplacées périodiquement et (iii) peuvent avoir un impact sur la performance du système (lorsque les produits locaux sont de mauvaise qualité ou ne peuvent pas être remplacés)</p> <p>Les systèmes photovoltaïques de faible puissance requièrent souvent des équipements à courant continu dont l'efficacité énergétique est supérieure à celle des équipements à courant alternatif, mais dont le coût est souvent plus élevé.</p> <p>Les systèmes PV doivent être conçus et installés par des techniciens car toute erreur de conception ou de réalisation conduirait à créer une installation d'un rendement inférieur à celui des solutions alternatives.</p> <p>Les systèmes PV de forte puissance nécessitent souvent un système de secours (éolien ou au fuel) pour les périodes de forte demande ou de fort ennuagement</p> <p>L'électricité solaire photovoltaïque n'est pas économiquement viable pour les charges thermiques de type cuisson, chauffage, ou repassage.</p>

1.3 Contenus du présent guide de conception et réalisation de systèmes photovoltaïques

Le présent guide de conception et réalisation de systèmes photovoltaïques explique les principes de base puis présente, chapitre par chapitre, les composantes des installations solaires photovoltaïques. Il analyse ensuite la conception, la planification, la réalisation et la maintenance de ces installations. Il évoque le cas particulier des systèmes photovoltaïques de forte puissance (hybrides) et inclut plusieurs annexes, notamment :

- ▶ une série de feuilles de calcul pour le dimensionnement des installations,
- ▶ une liste d'adresses utiles,
- ▶ un glossaire.

Principe de base : quantité d'énergie disponible et modalités d'utilisation (chapitre 2)

La question fondamentale est la suivante : l'énergie solaire disponible est-elle suffisante ?

En fait, la quantité d'énergie produite par le module dépend de la quantité du rayonnement qu'il reçoit. Il faut, pour connaître la quantité du rayonnement, consulter les données météorologiques connues (archives) et surtout déterminer si l'ensoleillement est suffisant durant toute l'année. Le chapitre 2 présente également, dans les grandes lignes, les principes de l'énergie solaire et les équipements photovoltaïques.

Modules solaires photovoltaïques : captation de l'énergie solaire (chapitre 3)

Les modules solaires photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en électricité. Le module retenu doit être choisi avec soin pour tenir compte des paramètres locaux et de la nature exacte du besoin, puis installé de manière à capter un maximum d'énergie.

Batteries : stockage de l'énergie solaire (chapitre 4)

On utilise le plus souvent les équipements électriques après le crépuscule, alors que le module photovoltaïque ne produit plus d'électricité. Les batteries stockent l'énergie captée pendant les périodes d'ensoleillement pour la restituer la nuit et en période nuageuse. Il existe divers types et tailles de batteries. Le choix doit tenir compte à la fois des besoins et du budget de l'utilisateur. La longévité des batteries dépend de la qualité de l'entretien et des contrôles effectués.

Régulateurs de charge et onduleurs : gestion de l'énergie solaire (chapitre 5)

La quantité d'énergie fournie par les modules photovoltaïques est limitée. Il faut donc que la demande énergétique des charges (éclairages et appareils) ne soit pas supérieure à la quantité d'énergie fournie par le panneau. Le régulateur de charge empêche la surcharge ou la décharge profonde des batteries, prévenant ainsi tout risque de dommage aux batteries et à l'ensemble de l'installation. Il peut également signaler les dysfonctionnements du générateur ou de la batterie. Les onduleurs convertissent le courant continu fourni par les batteries en courant alternatif nécessaire à l'alimentation de nombreux appareils ou équipements. Le régulateur de charge et l'onduleur doivent être parfaitement adaptés au système.

Lampes et appareils électriques : utilisation optimale de l'énergie solaire (chapitre 6)

Contrairement aux groupes électrogènes traditionnels ou au « secteur » (qui fournissent du courant alternatif en 230 ou 110 volts), les modules photovoltaïques fournissent un courant continu à très basse tension (TBT). Il faut donc, dans les installations solaires photovoltaïques, utiliser des lampes et appareils spéciaux à courant continu et généralement des lampes fluorescentes ou à diodes électroluminescentes (DEL/LED) dont la consommation est bien inférieure à celle des lampes à incandescence. Le choix des lampes et appareils destinés à une installation solaire photovoltaïque appelle le plus grand soin et se fonde sur des critères de consommation et d'efficacité énergétique.

Câblage et appareillages (chapitre 7)

Le câblage des installations solaires photovoltaïques est similaire à celui des systèmes raccordés au réseau, à ceci près que la très basse tension de l'électricité photovoltaïque impose l'utilisation de fils de plus grande section et que certains appareillages diffèrent de ceux utilisés en 230 Vca. Il faut surtout prévenir les chutes de potentiel en choisissant avec le plus grand soin les sections des câbles et les appareillages.

Conception et planification des systèmes PV (chapitre 8)

Pour bien concevoir une installation solaire photovoltaïque, il faut :

- ▶ déterminer la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter les lampes et appareils prévus en multipliant la consommation de chacun par sa durée d'utilisation journalière et en additionnant le tout ;

1.3 Contenus du présent guide de conception et réalisation ...

- ▶ faire une estimation de la quantité journalière d'énergie solaire disponible sur le site ;
- ▶ faire une estimation des déperditions d'énergie dues à des défauts d'efficacité de l'installation ;
- ▶ déterminer la taille de l'ensemble de modules, du régulateur et des batteries nécessaires ;
- ▶ établir un plan d'approvisionnement de tous les composants et appareillages.

Réalisation des installations solaires photovoltaïques (chapitre 9)

Si la planification a été bien conduite, l'installation des composants ne pose en principe aucun problème. Elle doit, pour prévenir tout problème de sécurité et tout risque de dommage aux équipements, se faire dans le strict respect des procédures et des normes applicables. Attention ! Les sites d'installation étant généralement loin de tout, il faut surtout n'oublier aucun composant ni aucun outil.

Maintenance et entretien des installations (chapitre 10)

La maintenance est cruciale. Elle inclut l'entretien régulier des batteries et des circuits et le nettoyage des modules photovoltaïques. Les propriétaires et opérateurs doivent maîtriser les règles d'exploitation et de maintenance de tous les composants de leur système.

Systèmes solaires photovoltaïques spécialisés non raccordés et de forte puissance (chapitre 11)

Le chapitre 11 traite des besoins spécifiques des systèmes hybrides spécialisés ou de forte puissance. Des études de cas annotées concernant des applications pour centres de santé, écoles, pompes et ensembles résidentiels sont proposées pour éclairer les concepteurs de systèmes. Les appareils utilisés dans les installations de forte puissance sont également présentés.

Le courant électrique

Pour bien installer et concevoir des systèmes photovoltaïques, il faut maîtriser les concepts de base et la terminologie associée. Les éléments du tableau ci-dessous visent à faciliter la compréhension des chapitres suivants. Quiconque a l'habitude de travailler avec du 230 Vca constatera que le courant continu TBT présente moins de risques de choc électrique et est plus facile à installer.

Le courant électrique (suite)

L'Annexe 1, destinée à ceux qui n'ont pas l'habitude de l'électricité, approfondit les notions de base et propose des exemples. En tout état de cause, quiconque manque d'expérience dans le domaine doit demander conseil à un électricien qualifié ou à un technicien du photovoltaïque.

Tableau 1.2 Les concepts de base

Terme	Symbole	Unité (Abréviation)	Définition
Courant (intensité)	I	ampères (A)	Débit d'électrons dans un conducteur
Courant continu	cc	ampères (A)	Courant électrique unidirectionnel (qui ne change pas de sens). Les modules photovoltaïques produisent toujours un courant continu
Courant alternatif	ca	ampères (A)	Courant électrique qui change de sens (où les électrons circulent alternativement dans une direction puis dans l'autre à intervalles réguliers appelés cycles)
Tension ou différence de potentiel	U	volts (V)	Différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit, qui détermine le débit d'électrons
Résistance	R	ohms (Ω)	Aptitude d'un conducteur (fil ou appareil) à s'opposer au passage du courant et convertir l'énergie électrique en chaleur
Puissance électrique	P	watts (W)	Énergie électrique par unité de temps

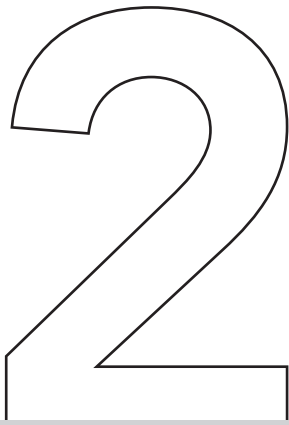
Un « circuit » est un ensemble de conducteurs (câbles et appareils) parcouru par des électrons. Le courant circule lorsque le circuit est fermé. La « charge » est l'ensemble des équipements et appareils alimentés par le courant fourni par une source (module ou batterie). Les batteries et la charge sont montées en série ou en parallèle (voir Annexe 2).

La puissance (en watts) est égale à la tension (U, en volts) multipliée par l'intensité (I, en ampères).

$$\text{Puissance (watts)} = \text{Tension (volts)} \times \text{Intensité (ampères)}$$

La tension du circuit est égale à l'intensité (en ampères) multipliée par la résistance (en ohms). Cette loi, dite loi d'Ohm, permet de calculer la chute de potentiel dans les longs câbles.

$$\text{Tension (volts)} = \text{Intensité (ampères)} \times \text{Résistance (ohms)}$$



L'énergie solaire

Le présent chapitre présente les concepts de base de l'énergie solaire : rayonnement solaire direct et indirect, éclairage, insolation/exposition énergétique (quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface). Il explique comment les archives météorologiques permettent d'estimer l'énergie disponible en un point donné et comment on peut optimiser le rendement de l'installation grâce à un système de poursuite de la trajectoire apparente du soleil. La dernière section explique comment optimiser la captation de l'énergie solaire en exploitant la part réfléchie, ainsi que la concentration et l'effet de serre, puis présente quelques utilisations non électriques de l'énergie solaire comme le séchage des récoltes, la production d'eau chaude, et la cuisson des aliments.

2.1 La ressource solaire

Les réactions se produisant à la surface du soleil génèrent $3,8 \times 10^{23}$ kW. Même si l'essentiel se perd sans l'espace, la minuscule fraction atteignant la terre ($1,73 \times 10^{16}$ kW) couvre plusieurs milliers de fois les besoins en énergie de l'humanité tout entière.

L'énergie que nous tirons du bois, du pétrole et de ses dérivés, du charbon, de l'hydraulique provient indirectement du soleil – tout comme nos aliments, d'ailleurs. Les plantes captent et emmagasinent l'énergie solaire, que nous utilisons lorsque nous brûlons du bois ou consommons des aliments. Le soleil gouverne également le cycle des pluies alimentant les rivières qui produisent l'énergie hydroélectrique. Le pétrole et le charbon proviennent de restes de plantes et d'animaux fossilisés qui ont capté l'énergie du soleil il y a des milliers d'années.

Le présent ouvrage traite essentiellement de la transformation de l'énergie solaire en électricité via des générateurs photovoltaïques (cellules PV) dans