

PRÉFACE

Le solaire photovoltaïque connaît une forte croissance à l'échelle mondiale depuis 2007. Cette croissance soutenue a été initiée par les politiques de soutien en Europe aux systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux électriques. Ces politiques ont fortement contribué au développement actuel à grande échelle des systèmes et à la baisse du coût de l'électricité photovoltaïque. Le photovoltaïque raccordé au réseau devient désormais compétitif par rapport aux énergies conventionnelles, dans certaines zones géographiques.

Mais historiquement, ce sont les systèmes en sites isolés qui représentaient le principal marché, permettant à des zones rurales éloignées de tout réseau électrique de bénéficier d'un moyen de production d'électricité facile à mettre en œuvre et ne présentant pas d'impacts environnementaux en phase d'exploitation.

Le photovoltaïque entre désormais dans une ère nouvelle. Tous les scénarios prospectifs de développement des énergies renouvelables s'accordent à montrer que le photovoltaïque représentera une des principales sources de production d'électricité à l'horizon 2030/2050 :

- pour les pays industrialisés, l'un des principaux défis à venir sera le développement des smart-grids, permettant l'intégration sur le réseau d'une production massive d'électricité d'origine renouvelable photovoltaïque ;
- pour les pays en voie de développement et le reste du monde, le développement de l'électrification rurale décentralisée (ERD) constitue un des principaux enjeux pour notre société, puisque l'accès à l'électricité se pose encore à deux milliards d'hommes. Les systèmes autonomes ou hybrides associant généralement le solaire photovoltaïque avec d'autres sources renouvelables ou non se positionnent désormais comme des solutions performantes et compétitives, contribuant à la réduction des impacts sur l'environnement.

Le concept d'ERD n'est pas nouveau et les moyens de production basés sur les systèmes photovoltaïques autonomes, ou hybrides au sein des miniréseaux, contribuent à l'amélioration des conditions de vie des populations, en leur facilitant l'accès à l'eau et au confort d'un habitat digne de notre siècle (éclairage, froid nécessaire et médias). La fiabilité et le bon dimensionnement des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides constituent des éléments clefs pour l'aménagement et la pérennisation des zones en voie de développement et l'amélioration des modes de vie des populations rurales.

Cet ouvrage présente de façon très complète les caractéristiques techniques des systèmes photovoltaïques. Il ne s'attache pas seulement à décrire les règles de conception des installations et des miniréseaux, gages de qualité et de performance, mais propose également plusieurs études de cas et retours d'expérience ciblés. Celles-ci permettent d'identifier les points de vigilance et les bonnes pratiques à mettre en œuvre lors des phases de réalisation et d'exploitation des installations autonomes ou hybrides. Tous ces éléments en font un guide technique incontournable pour les concepteurs, installateurs et exploitants reconnus et qualifiés de systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau.

Merci à Gérard Moine pour cet ouvrage unique, riche de ses expériences professionnelles et personnelles, de ses conseils avisés et d'illustrations, qui couvre l'ensemble des aspects liés aux systèmes photovoltaïques. Ce guide contribuera à coup sûr au déploiement de nombreuses installations d'électrification rurale décentralisée performantes, dans l'objectif vertueux de pérenniser la compétitivité/qualité de la filière pour un « mieux » de solidarité.

Rodolphe Morlot et Yvonnick Durand,
ingénieurs Ademe

AVANT-PROPOS

En 1973, je pars en coopération enseigner pendant 2 ans en Afrique. Jeune étudiant en électronique, je réalise que l'énergie photovoltaïque, encore balbutiante dans les années 70, peut être une chance pour les populations dépourvues d'électricité et habitant généralement dans des régions très ensoleillées. Cette expérience sera à la base de mon choix de vie professionnelle. De retour en France, passionné par les énergies renouvelables, je choisis de travailler dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, choix quelque peu audacieux à l'époque ! Entièrement vouée à l'électricité solaire, ma carrière professionnelle restera une belle aventure humaine et technique. En effet, j'ai l'occasion de voyager dans le monde entier : de l'Amazonie à la jungle de Bornéo, en passant par l'Afrique et les îles du Pacifique... L'occasion de rencontrer des populations de culture différente et de partager avec elles leur émotion lorsqu'une lampe s'éclaire pour la première fois grâce à l'énergie solaire. L'évolution rapide de la technologie photovoltaïque permet de répondre aux demandes des populations en attente d'une énergie susceptible d'améliorer leurs conditions de vie (éclairage, réfrigération, télécommunication, pompage de l'eau...). A ce titre ma participation aux groupes de travail de normalisation des installations photovoltaïques est très enrichissante sur le plan technique.

De 1980 à 2015, soit en 35 ans, la production mondiale des cellules solaires a connu une croissance exponentielle (de quelques MW à 57 GW), le prix des modules photovoltaïques a été divisé par 50, la puissance des installations solaires est passée de quelques dizaines de kW, pour les plus puissantes, à plusieurs centaines de MW. Ce développement très rapide du photovoltaïque est essentiellement dû

aux installations raccordées au réseau électrique. Toutefois, il s'agit de ne pas oublier les populations encore privées d'électricité. L'énergie photovoltaïque est en mesure d'apporter une réponse sérieuse et compétitive à la problématique d'alimentation électrique des sites isolés à partir d'une énergie renouvelable largement répartie sur notre planète et disposant de nombreux atouts. Néanmoins, si la mise en œuvre de générateurs photovoltaïques paraît très simple (plug and play !), le retour d'expérience montre qu'un certain nombre de systèmes autonomes ou hybrides, installés dans des environnements difficiles, rencontrent des problèmes de fonctionnement ou n'ont pas de dispositifs de protection appropriés. Au-delà des risques encourus pour les personnes et les biens, il en va de la crédibilité de la filière photovoltaïque si les installations ne sont pas pérennes.

Cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui conçoivent, mettent en œuvre ou exploitent des installations photovoltaïques non raccordées au réseau. Il se veut, avant tout, un guide technique pratique s'appuyant sur plusieurs dizaines d'années d'expérience de conception et de terrain. Il a pour objectif de rendre accessible les normes en vigueur à respecter pour assurer la qualité et la sécurité des personnes et des biens.

Cet ouvrage se décompose en 14 chapitres :

- **le chapitre 1** introduit la filière photovoltaïque dans le panel des différentes ressources énergétiques avec son historique et ses principales applications
- **le chapitre 2** aborde les notions de base (le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque et les principales caractéristiques des cellules solaires) qu'il convient de connaître pour bien comprendre le fonctionnement des systèmes photovoltaïques

- **le chapitre 3** traite, sur le plan fonctionnel, de l'ensemble des composants susceptibles de former un système photovoltaïque autonome ou hybride
- **les chapitres 4, 5 et 6** présentent, sur le plan fonctionnel, les différentes solutions techniques d'électrification solaire avec leurs points forts et leurs points faibles
- **le chapitre 7** présente les règles de conception indispensables à connaître pour réaliser des installations sûres et de qualité
- **le chapitre 8** aborde les miniréseaux aussi bien au niveau des moyens de production que de la distribution de l'énergie
- **le chapitre 9** intéressera plus particulièrement les installateurs et exploitants de systèmes
- **le chapitre 10** présente des études de cas relatives au dimensionnement des composants pour des systèmes de puissance allant de 20 Wc à 100 kWc. Elles sont données à titre indicatif et ne sauraient faire référence
- **le chapitre 11** rassemble des retours d'expérience sur des aspects techniques, énergétiques, économiques, sociologiques dont on peut s'inspirer pour la mise en œuvre de nouveaux projets
- **le chapitre 12** aborde succinctement les enjeux environnementaux et sociaux du photovoltaïque afin de mettre en évidence l'intérêt de cette technologie
- **le chapitre 13** rappelle, en guise de conclusion, les conditions de réussite d'un projet en dehors des aspects techniques
- **le chapitre 14** rappelle les notions d'électricité indispensables à connaître pour appréhender les systèmes photovoltaïques

Je tiens à remercier toutes les personnes morales ou physiques qui m'ont soutenu dans ce projet :

- l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) pour son soutien moral et financier
- les membres de l'association Solaire sans frontières pour leurs encouragements et leurs conseils
- mes amis experts qui, chacun dans leur domaine, ont accepté de relire certains chapitres tout en apportant des suggestions ou des compléments : Raymond Alazard, Jean-Pierre Bresson, Jean-Robert Costes, Almadidi Diallo, Sébastien Duraffourg, Philippe Feint, Jean-Luc Fraisse, Jean-Philippe Lansard, Philippe Leloire, Christian Meric, Rémi Ollivier, Victor Penas, Marion Perrin, Gilles Pescarmona, Régis Reeb, Joseph Rocher, Ludovic Rocher, Alain Rousseau, Claude Ruchet, Etienne Sauvage, Christian Vuillot
- les personnes, pour le témoignage de leur vécu photovoltaïque : Aminata Bodian, Claude Chautagnat, Moboutou Diédhiou, Catherine Frizon et Marc Jedliczka, Yves Maigne, Etienne Sauvage, Juliette Talpin
- mon épouse et mes proches pour leur soutien indéfectible

Si cet ouvrage peut contribuer à la réalisation d'installations photovoltaïques de qualité au profit du plus grand nombre, alors mon objectif sera atteint.

Gérard MOINE

Juin 2016

L'ÉLECTRIFICATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

SYSTÈMES AUTONOMES • SYSTÈMES HYBRIDES • MINIRÉSEAUX

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	12
1.1 Contexte	12
1.2 Historique	15
1.3 Les différents systèmes photovoltaïques et leurs applications	16
2. NOTIONS DE BASE	36
2.1 Le rayonnement solaire	36
2.2 La conversion photovoltaïque	46
2.3 Propriétés électriques des cellules photovoltaïques	55
2.4 Groupement de cellules photovoltaïques	61
3. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTÈME PV AUTONOME OU HYBRIDE	70
3.1 Les modules photovoltaïques	70
3.2 Les accumulateurs	79
3.3 Le régulateur de charge/décharge	108
3.4 L'onduleur autonome	128
3.5 Le chargeur de batterie	138
3.6 Le convertisseur multifonctionnel	142
3.7 L'onduleur photovoltaïque	147
3.8 Le groupe électrogène	156
3.9 Le monitoring	182
3.10 Les récepteurs	190
4. GÉNÉRALITÉS SUR LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'ÉLECTRIFICATION	214
4.1 Les besoins des utilisateurs	214
4.2 Les solutions techniques d'électrification	219
5. LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES	224
5.1 Introduction	224
5.2 Systèmes avec contrôleurs de charge à couplage direct (PWM)	225
5.3 Systèmes avec contrôleurs de charge à adaptation d'impédance (MPPT)	231
6. LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES HYBRIDES AVEC STOCKAGE	234
6.1 Introduction	234
6.2 Architectures électriques des systèmes hybrides	235
6.3 Caractéristiques de fonctionnement des systèmes hybrides	243

7. RÈGLES DE CONCEPTION DES SYSTÈMES AUTONOMES OU HYBRIDES	246
7.1 Choix de l'architecture électrique	246
7.2 Dimensionnement des systèmes	250
7.3 Protection des personnes et des biens	282
7.4 Choix des composants et spécifications techniques	336
8. LES MINIRÉSEAUX	376
8.1 Architectures électriques des centrales de production électrique	376
8.2 Miniréseaux électriques de distribution	400
9. MISE EN ŒUVRE, EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES SYSTÈMES	416
9.1 Introduction	416
9.2 Sécurité des personnes	417
9.3 Identification du site	423
9.4 Implantation des équipements	424
9.5 Installation	432
9.6 Mise en service	452
9.7 Exploitation	460
9.8 Maintenance	464
10. ÉTUDES DE CAS	482
10.1 Alimentation d'un panneau de signalisation (20 Wc)	482
10.2 Electrification d'un cabanon en région lyonnaise (80 Wc)	486
10.3 Electrification d'un collège au Burkina Faso (750 Wc)	492
10.4 Electrification d'une auberge en Auvergne (3 kWc)	498
10.5 Alimentation d'un relais de télécommunications au Bangladesh (4,32 kWc)	505
10.6 Electrification d'un village en Guyane (100 kWc)	509
11. RETOURS D'EXPÉRIENCE	514
11.1 Aspects techniques	514
11.2 Aspects énergétiques	542
11.3 Aspects économiques	552
11.4 Témoignages	564
12. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, SOCIAUX ET SOCIÉTAUX	582
12.1 Enjeux environnementaux	582
12.2 Enjeux sociaux	585
12.3 Enjeux sociétaux	587
13. CONCLUSIONS	588
14. ANNEXES	592
14.1 Glossaire	592
14.2 Rappels d'électricité	592
14.3 Rappels de protection électrique	609
14.4 Rappels de protection contre les surintensités	618
14.5 Rappels de calcul de chutes de tension	621
14.6 Rappels de protection contre la foudre	622