

Le guide des installations solaires photovoltaïques

Composants
Dimensionnement
Mise en œuvre

Cythelia Energy
& Sylvain Brigand

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

 **cythelia**
ENERGY

5.2.1.7 Contraintes urbanistiques

Comme décrit au paragraphe 4.3.1.1, la future installation photovoltaïque peut être impactée par de nombreuses contraintes urbanistiques. Dès que possible, les acteurs du projet doivent vérifier les prescriptions pouvant s’y appliquer, se rapprocher des services compétents et consulter les documents réglementaires. Nous pouvons citer notamment les éléments ci-après.

Le plan local d’urbanisme communal ou intercommunal (PLU/PLUi)

Certains PLU émettent des prescriptions concernant de manière générale les couvertures (toitures) ou l’occupation du sol (ombrières et installations au sol), ou de manière spécifique les équipements photovoltaïques. Les préconisations peuvent être des limitations de surface, des règles d’intégration au bâti, notamment des couleurs d’éléments de couverture, ou des dispositions de récupération des eaux pluviales, etc.

La direction générale de l’Aviation civile (DGAC)

Les demandes d’urbanisme concernant toute installation photovoltaïque située dans l’emprise d’un aéroport ou une installation dont la surface de panneaux est supérieure à 2 500 m² et située à moins de 2 km d’un aéroport ou d’un héliport, de centre hospitalier universitaire (CHU) notamment, sont examinées par la DGAC (cf. § 4.3.1.1).

COMMENTAIRE

Les risques d’éblouissement

Comme indiqué au paragraphe cité ci-avant, l’étude du risque d’éblouissement des pilotes et des contrôleurs aériens, longtemps obligatoire, n’est plus requise depuis octobre 2024, ce risque ayant été considéré comme négligeable. En revanche, pour les installations situées à proximité d’aéroports militaires, de routes et de voies ferrées, les services instructeurs peuvent demander des études d’éblouissement. Ces études peuvent conduire à modifier les inclinaisons et/ou les orientations des modules photovoltaïques, voire à éliminer certaines zones d’implantation du fait des risques d’éblouissement, donc d’accident, générés.

L’architecte des bâtiments de France (ABF)

Lorsque l’installation photovoltaïque est située à moins de 500 m d’un monument historique, l’ABF compétent sur le territoire est systématiquement sollicité. S’il y a covisibilité entre le monument historique et l’installation photovoltaïque, l’avis de l’ABF est contraignant pour l’autorité qui délivre l’autorisation d’urbanisme, aussi appelé « avis conforme ». En l’absence de covisibilité, il s’agit d’un « avis simple ». L’ABF peut aussi émettre des avis architecturaux sur la future installation photovoltaïque. Ses préconisations peuvent par exemple se concrétiser par la limitation ou l’augmentation des surfaces couvertes, ou un choix spécifique des couleurs de modules ou des préconisations sur la forme globale. Il est donc recommandé de prendre contact avec l’ABF en amont du projet.

Le plan de prévention des risques inondation (PPRI)

Le PPRI peut prescrire des cotes d'inondation à respecter. Celles-ci peuvent impacter l'implantation des matériels, électriques notamment, qui doit être mise en œuvre au-dessus de cette cote. Pour les installations photovoltaïques, peuvent être impactés les logettes de raccordement Enedis, les locaux techniques et les postes de transformation HTA/BT.

D'autres risques, moins fréquemment rencontrés (sismique, explosif, nucléaire, cyclonique, d'atmosphère salée ou corrosive, de vol ou de dégradation, etc.) peuvent également conduire le concepteur de la centrale photovoltaïque à modifier le choix de son implantation, des matériaux, des procédés, de la maintenance, etc., afin qu'elle soit la plus résiliente possible.

Le service départemental d'incendie et de secours (SDIS)

Le SDIS est chargé de délivrer une autorisation pour chaque projet impliquant un ERP ou une ICPE. Pour les ERP, il se base sur les documents listés au paragraphe 4.3.5.2 (notice de sécurité, étude structure, etc.). Les installations photovoltaïques concernées doivent respecter les préconisations de la Commission centrale de sécurité et le matériel doit être certifié Broof t3. Enfin, le SDIS réalise une visite après travaux pour les ERP du 1^{er} groupe.

Les règles à respecter pour les ICPE, décrites au paragraphe 4.3.5.4., visent à limiter les risques de départ de feu, à en réduire les conséquences humaines et matérielles et à faciliter l'intervention des pompiers en cas d'incendie.

5.2.1.8 Encombrement en toiture

Lors de la conception des installations photovoltaïques sur bâtiments neufs, il est important de positionner de manière optimale les édicules en toiture. En effet, ils peuvent réduire les surfaces exploitables de la toiture (surface de l'élément + surface laissée libre autour de l'élément + accès libre à l'élément) et peuvent générer des masques qui vont réduire les performances de l'installation photovoltaïque. En revanche, pour les installations à réaliser sur des toitures existantes, le repositionnement des édicules n'est envisagé que s'il n'est ni trop coûteux ni compliqué techniquement. Dans le cas contraire, c'est l'implantation photovoltaïque qui est adaptée par rapport à l'emplacement des édicules. Le tableau 5.2 donne les règles pour chacun des éléments ou groupes d'éléments. Ces règles sont cependant secondaires par rapport aux normes d'implantation de ces équipements de toiture.

De manière générale et dans la mesure du possible, ces encombrements sont supprimés, déplacés sur les surfaces de toiture non utilisées (un pan nord par exemple), installés en bordure de toiture ou regroupés, et doivent être les moins hauts possible. Sur l'existant, les éléments constitutifs de la structure du bâtiment (acrotères, murs de refend) ne peuvent pas être modifiés. Seul le déplacement des éléments non maçonnés peut raisonnablement être envisagé.

Tab. 5.2. Règles d'implantation ou de modification des édicules en toiture en cas d'installation photovoltaïque

	Édicule	Impact et règles d'implantation	Illustration
Toiture-terrasse	Skydômes/ bouches de désenfumage	<ul style="list-style-type: none"> - Selon leur hauteur, peuvent générer des masques - Leur présence empêche l'utilisation optimale de la surface de la toiture - Les positionner le plus près possible des bords de la toiture et le plus au nord possible - Sur l'existant, supprimer ceux qui ne sont pas indispensables - Utiliser des miroirs pour conduire la lumière dans le bâtiment 	
	Sorties d'air extrait	<ul style="list-style-type: none"> - Assez hautes, elles génèrent des masques - Peuvent évacuer de l'air vicié ou corrosif - Les positionner le plus près possible des bords de la toiture, le plus au nord possible sur la toiture, et éviter de les tourner vers les modules 	
	Circuits de ventilation	<ul style="list-style-type: none"> - Peuvent générer des masques - Positionner les sorties et les tuyaux le plus près des bords et le plus au nord possible sur la toiture 	
	Acrotères	<ul style="list-style-type: none"> - Peuvent générer des masques - Doivent être les plus bas possible - Envisager l'installation de garde-corps escamotables à la place des acrotères 	
Toiture inclinée	Bouches de désenfumage	<ul style="list-style-type: none"> - Faible hauteur qui ne génère pas de masque significatif - Leur présence empêche une utilisation optimale de la surface de la toiture - Les positionner ou les déplacer, si possible, sur le pan qui n'est pas destiné à accueillir l'installation photovoltaïque - À défaut, les positionner ou les déplacer au maximum sur les extrémités de la toiture, au faîtage par exemple, et les aligner 	
	Sorties d'air extrait	<ul style="list-style-type: none"> - Peuvent générer des masques - Positionner ou déplacer les « chiens-assis » sur le pan qui n'est pas destiné à accueillir l'installation photovoltaïque - À défaut, les placer au plus proche du faîtage 	
	Cheminées	<ul style="list-style-type: none"> - Génèrent des masques - Les positionner ou les déplacer sur le pan qui n'est pas destiné à accueillir l'installation photovoltaïque - À défaut, les placer au plus proche du faîtage - Supprimer les souches (partie extérieure) lorsqu'elles ne sont plus utilisées 	

Les modules photovoltaïques étant de forme rectangulaire, il faut chercher systématiquement à dégager des espaces rectangulaires en regroupant et alignant les éléments techniques. La photo 5.18 présente une toiture équipée de cheminées, d'un puits de lumière et de chatières sur le pan sud. Tous ces éléments ont été supprimés ou déplacés lors de la pose de l'installation photovoltaïque, qui peut couvrir ainsi la majeure partie du toit (photo 5.19).



Photo 5.18. Toiture comprenant des cheminées, un puits de lumière et des chatières, avant les travaux photovoltaïques (source : Cythelia Energy)



Photo 5.19. Même toiture avec suppression des édifices, après les travaux photovoltaïques (source : Cythelia Energy)

5.2.1.9 Environnement proche (masques)

Dans un environnement maîtrisé du projet, c'est-à-dire lorsque les parcelles appartiennent au même propriétaire que celui des toitures, si un projet d'arborisation à proximité d'une installation photovoltaïque est envisagé, il faut privilégier une implantation et des essences d'arbres qui ne généreront pas de masque sur la centrale en grandissant. À défaut, un entretien régulier des arbres, du type étêtage, sera nécessaire pour éviter les masques sur l'installation photovoltaïque. De même, il faut éviter d'implanter des poteaux (mâts d'éclairage ou de surveillance, antennes) ou tout autre élément (enseignes, etc.) qui pourraient générer des masques proches.

Dans un environnement qui n'est pas maîtrisé, vérifier le PLU ou le PLUi, afin de connaître les constructions possibles autour du site, permet d'anticiper les masques potentiels futurs.

6.1.2 Présentation du projet

Nous présentons ci-dessous l'un des projets retenus, mené sur le magasin d'Avignon-Le Pontet, en Vaucluse (fig. 6.2.).

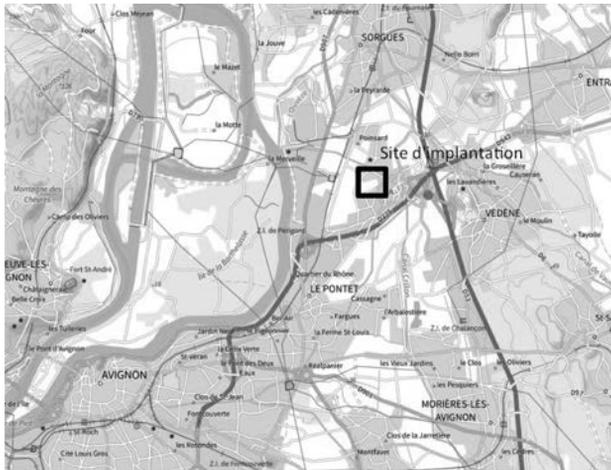


Fig. 6.2. Emplacement du site étudié près d'Avignon (source : Cythelia Energy)

La surface totale de toiture-terrasse, de près de 12 000 m², avec des pentes de 3° au maximum, permettait, malgré la présence de nombreux puits de lumière et de trappes de désenfumage, d'envisager largement la pose de 2 500 m² de modules photovoltaïques (photo 6.1).



Photo 6.1. Vue aérienne du magasin étudié, près d'Avignon-Le Pontet (source : Cythelia Energy)

Sur ce site, comme pour l'ensemble des projets en toiture, le maître d'ouvrage profita de la pose des panneaux solaires pour remettre à neuf l'étanchéité des toitures. En effet, même si les membranes existantes n'étaient pas totalement en fin de vie, il aurait été problématique et coûteux d'envisager, au bout de 5 ou 10 ans, une dépose-repose de la centrale photovoltaïque pour rénover l'étanchéité du bâtiment.

bâtiment avec une inclinaison de 10° et une orientation d'environ 60° vers l'ouest. En effet, cette disposition offre un choix plus important de dispositifs de fixation, conformes aux normes et possédant un avis technique ou une enquête de technique nouvelle (cf. § 4.3.4.4). Initialement, l'installation d'un millier de modules bifaciaux de 500 Wc, de $2,19 \times 1,10$ m, avait été envisagée pour ce projet.

La distance entre les rangées, pour une disposition des modules en mode paysage, fut calculée à 40 cm afin de limiter les pertes dites de *shed shading* (ombrage des rangées de modules les unes sur les autres). Enfin, comme le bâtiment est un ERP, l'avis de la Commission centrale de sécurité (CCS) de 2013 (cf. § 4.3.5.2) s'imposa. Des distances de 90 cm furent ainsi prévues vis-à-vis des acrotères et des équipements en toiture. Cela permettrait en outre de faciliter la circulation et la maintenance, et donc l'intervention éventuelle des pompiers sur le toit. De même, comme la CCS préconise de ne pas faire pénétrer de câbles alimentés en courant continu dans les locaux, le choix fut fait d'installer les onduleurs en toiture, sur un support à construire sur mesure, situé entre les modules photovoltaïques et le TGBT, où serait raccordée l'installation.

La maquette numérique obtenue est présentée en figure 6.4.

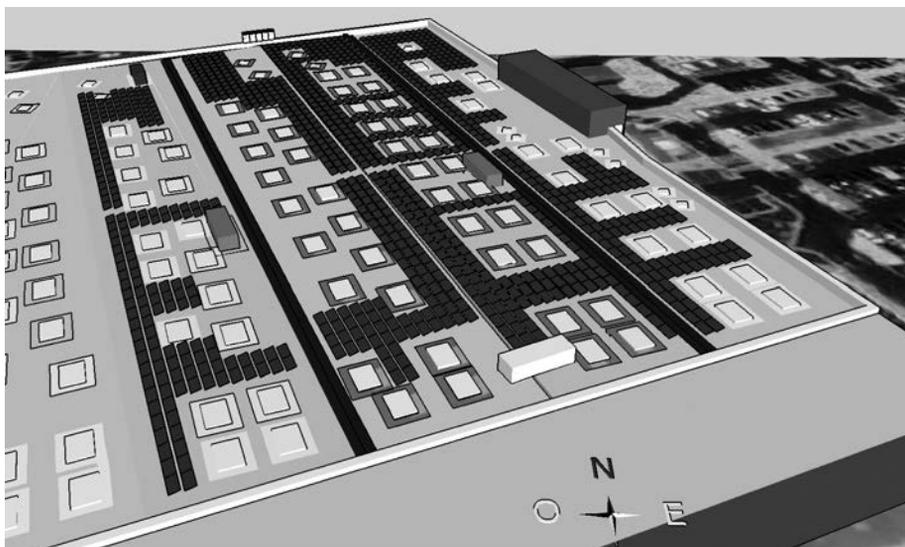


Fig. 6.4. Modélisation 3D des modules du magasin d'Avignon-Le Pontet
(source : Sketchup + archelios PRO – Cythelia Energy)

6.1.4.2 Validation du système de fixation

Comme pour tout ERP, il était nécessaire de confirmer à la fois la résistance de la toiture à l'ajout du système photovoltaïque, dans toutes ses composantes (charpente, bac acier, isolation, etc.), mais aussi de l'adaptation du système de fixation envisagé aux conditions réelles du site. Des calculs supplémentaires durent donc être effectués afin de supprimer tout risque d'effondrement ou d'arrachement (fig. 6.5). Le choix se tourna finalement vers une structure thermosoudée à l'étanchéité, pour limiter le poids additionnel (environ 15 kg/m^2).

Table des matières

Sommaire	5
Introduction	7
CHAPITRE 1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	13
1.1 Conversion photovoltaïque	13
1.1.1 Structure électronique des atomes	14
1.1.2 Principe du photocourant.....	15
1.1.3 Absorption de la lumière	19
1.1.4 Réponse spectrale.....	21
1.2 La cellule solaire photovoltaïque	23
1.2.1 Principes et technologies	23
1.2.1.1 Technologies à base de silicium cristallin.....	25
1.2.1.2 Technologie des couches minces	28
1.2.1.3 Pérovskites.....	31
1.2.1.4 Évolution des rendements	31
1.2.2 Courbe caractéristique courant-tension.....	32
1.2.2.1 Points de fonctionnement idéaux.....	32
1.2.2.2 Modélisation de la courbe I-V	34
1.3 Références	35
CHAPITRE 2 Composants du système photovoltaïque	37
2.1 Module photovoltaïque	37
2.1.1 Module photovoltaïque classique	37
2.1.1.1 Assemblage des cellules	38
2.1.1.2 Encapsulation des cellules.....	39
2.1.1.3 Boîte de connexion, diodes by-pass.....	41
2.1.1.4 Puissance crête	42
2.1.1.5 Flash test	43
2.1.2 Modules à demi-cellules	43
2.1.3 Modules bifaciaux.....	43
2.1.4 Caractéristiques techniques d'un module photovoltaïque	44
2.1.5 Rendement d'un module.....	47

2.1.5.1	<i>Influence de l'éclairement</i>	48
2.1.5.2	<i>Influence de la température</i>	49
2.2	Onduleur	50
2.2.1	Connexion au réseau.....	52
2.2.1.1	<i>Normes</i>	52
2.2.1.2	<i>Protection de découplage</i>	52
2.2.2	Caractéristiques techniques.....	52
2.2.2.1	<i>Puissance nominale</i>	52
2.2.2.2	<i>Puissance maximale</i>	52
2.2.2.3	<i>Tensions d'entrée</i>	53
2.2.2.4	<i>Tension de sortie</i>	53
2.2.2.5	<i>Rendement</i>	53
2.2.2.6	<i>Suivi du point de puissance maximale (MPPT)</i>	55
2.2.2.7	<i>Garantie et durée de vie</i>	56
2.2.3	Typologie des onduleurs connectés au réseau.....	56
2.2.3.1	<i>Micro-onduleur ou onduleur modulaire (puissance nominale jusqu'à environ 1 kW)</i>	56
2.2.3.2	<i>Onduleur de branche ou string (de quelques kilowatts jusqu'à quelques centaines de kilowatts)</i>	57
2.2.3.3	<i>Optimiseurs</i>	57
2.2.3.4	<i>Onduleur centralisé (puissance nominale de quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts)</i>	58
2.2.4	Transformateur.....	59
2.3	Stockage d'énergie	60
2.3.1	Le stockage au sein des systèmes photovoltaïques.....	60
2.3.1.1	<i>Systèmes autonomes</i>	60
2.3.1.2	<i>Systèmes connectés au réseau</i>	61
2.3.2	Batteries.....	62
2.3.2.1	<i>Définition</i>	62
2.3.2.2	<i>Technologies</i>	63
2.3.2.3	<i>Paramètres caractéristiques des batteries</i>	68
2.3.3	Régulateur de charge (BMS).....	74
2.3.4	Autres technologies de stockage.....	74
2.3.4.1	<i>Supercondensateurs, volants d'inertie</i>	74
2.3.4.2	<i>Air comprimé</i>	75
2.3.4.3	<i>Hydrogène</i>	75
2.4	Dispositifs de protection	76
2.4.1	Protection contre la foudre.....	76

2.4.1.1	<i>Protections primaires</i>	77
2.4.1.2	<i>Protections secondaires</i>	79
2.4.1.3	<i>Choix et mise en œuvre de parafoudres du côté CA</i>	82
2.4.1.4	<i>Choix et mise en œuvre de parafoudres du côté CC</i>	83
2.4.2	Protections spécifiques au photovoltaïque	84
2.5	Récapitulatif des composants d'une installation photovoltaïque	86
2.6	Références	87
2.6.1	Textes	87
2.6.2	Normes	87
2.6.3	Bibliographie	88
CHAPITRE 3	Conception et dimensionnement du système	89
3.1	Paramètres influant sur le dimensionnement	90
3.1.1	Gisement solaire	90
3.1.1.1	<i>Introduction</i>	90
3.1.1.2	<i>Données météorologiques</i>	97
3.1.1.3	<i>Irradiation dans le plan des modules</i>	98
3.1.1.4	<i>Modules fixes : inclinaison et orientation optimales</i>	101
3.1.1.5	<i>Suivi du Soleil (trackers)</i>	103
3.1.1.6	<i>Notion de nombre d'heures équivalentes</i>	104
3.1.2	Autres facteurs	105
3.1.3	Masques	105
3.2	Calcul de dimensionnement	110
3.2.1	Installation autonome	110
3.2.2	Installation raccordée au réseau	111
3.2.2.1	<i>Définition des surfaces disponibles</i>	112
3.2.2.2	<i>Prise en compte des masques</i>	113
3.2.2.3	<i>Sélection de la puissance crête cible</i>	114
3.2.2.4	<i>Choix de l'orientation des modules</i>	115
3.2.2.5	<i>Choix des modules</i>	117
3.2.2.6	<i>Choix de la structure de fixation</i>	117
3.2.2.7	<i>Choix des onduleurs et calepinage électrique</i>	118
3.2.2.8	<i>Implantation des onduleurs</i>	122
3.2.2.9	<i>Choix des protections électriques</i>	123
3.3	Calcul de productible	124
3.3.1	Nombre d'heures de fonctionnement équivalentes	124

3.3.2	Ratio de performance	124
3.3.3	Pertes énergétiques.....	125
3.3.3.1	<i>Pertes par salissure</i>	125
3.3.3.2	<i>Pertes par réflexion en face avant</i>	125
3.3.3.3	<i>Pertes au niveau des modules</i>	126
3.3.3.4	<i>Pertes au niveau des onduleurs</i>	127
3.3.3.5	<i>Pertes dans les câbles (CC et CA)</i>	127
3.3.3.6	<i>Autres pertes</i>	128
3.3.4	Incertitudes liées à l'évaluation du calcul de productible.....	129
3.4	Calcul économique	130
3.4.1	Coûts d'une centrale photovoltaïque	131
3.4.2	Coût actualisé de l'énergie.....	131
3.4.3	Cas des installations autonomes.....	131
3.4.4	Revenus en cas de vente totale.....	132
3.4.5	Cas de l'autoconsommation.....	132
3.4.6	Cas de l'autoconsommation collective.....	136
3.5	Norme NF C 15-100 et guide UTE C 15-712	138
3.5.1	Norme NF C 15-100	138
3.5.2	Guide UTE C 15-712-1	138
3.5.3	Guide UTE C 15-712-2.....	139
3.5.4	Norme XP C 15-712-3	139
3.6	Références	140
3.6.1	Normes.....	140
3.6.2	Bibliographie.....	140
CHAPITRE 4	Réglementation	141
4.1	Lois d'obligation et d'incitation	141
4.1.1	Décret Tertiaire	141
4.1.2	Loi Climat et résilience	141
4.1.3	Loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables (loi Aper).....	142
4.2	Modes de valorisation de l'énergie	144
4.2.1	Tarifs d'achat	144
4.2.1.1	<i>Historique</i>	144
4.2.1.2	<i>Le feuilleton de l'intégration au bâti</i>	144

Le guide des installations solaires photovoltaïques

En dix ans, le solaire photovoltaïque est passé d'une énergie émergente à la source d'électricité ayant la plus forte croissance en France et dans le monde.

La nouvelle édition de cet ouvrage vise à donner une information pratique et complète sur les aspects techniques du fonctionnement, du dimensionnement et de la mise en œuvre des installations solaires photovoltaïques, et en particulier des installations raccordées au réseau.

Les premiers chapitres expliquent les mécanismes physiques de conversion de la lumière en électricité et décrivent les différents composants d'une installation. Sont ensuite abordés la conception et le dimensionnement d'un système photovoltaïque. Puis l'ouvrage propose un état des lieux des principales lois et normes qui s'y rattachent, ainsi que les modalités de valorisation de l'électricité produite qui en découlent. La mise en œuvre des installations est traitée, étape par étape, en décrivant le rôle de chaque intervenant. Enfin, deux études de cas d'installations photovoltaïques, l'une en toiture, l'autre en ombrière de parking, permettent d'illustrer et de synthétiser toutes les étapes d'un projet, jusqu'à son bilan économique.

Cet ouvrage s'adresse aussi bien aux architectes et aux maîtres d'ouvrage qui souhaitent intégrer des installations solaires photovoltaïques dans un projet qu'aux maîtres d'œuvre et entreprises en charge de la conception et de la mise en place de ces systèmes.

Cythelia Energy

Entreprise spécialisée dans le photovoltaïque depuis plus de trente ans, Cythelia Energy, filiale du groupe Trace, intervient en tant que bureau d'études auprès des maîtres d'ouvrage sur tout type d'installation et à toutes les étapes des projets. Elle est pionnière et leader des cadastres solaires en France.

Ont participé à la rédaction de l'ouvrage : Benoit Lelong (directeur), Ismaël Lokhat (directeur scientifique), David Dumas (directeur opérationnel du bureau d'études) et Laurent Poussin (directeur technique).

Sylvain Brigand

Ingénieur spécialisé dans les domaines de l'eau et de l'environnement. Il est directeur général des services techniques et de l'urbanisme de la ville de Céret, directeur du syndicat des eaux du Soudour, et auteur de la première édition de cet ouvrage en 2011.

Sommaire

- ▶ **Chapitre 1.** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.
- ▶ **Chapitre 2.** Composants du système photovoltaïque.
- ▶ **Chapitre 3.** Conception et dimensionnement du système.
- ▶ **Chapitre 4.** Réglementation.
- ▶ **Chapitre 5.** Mise en œuvre des installations photovoltaïques.
- ▶ **Chapitre 6.** Études de cas.

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

 cythelia
ENERGY

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-14681-3



9 782281 146813