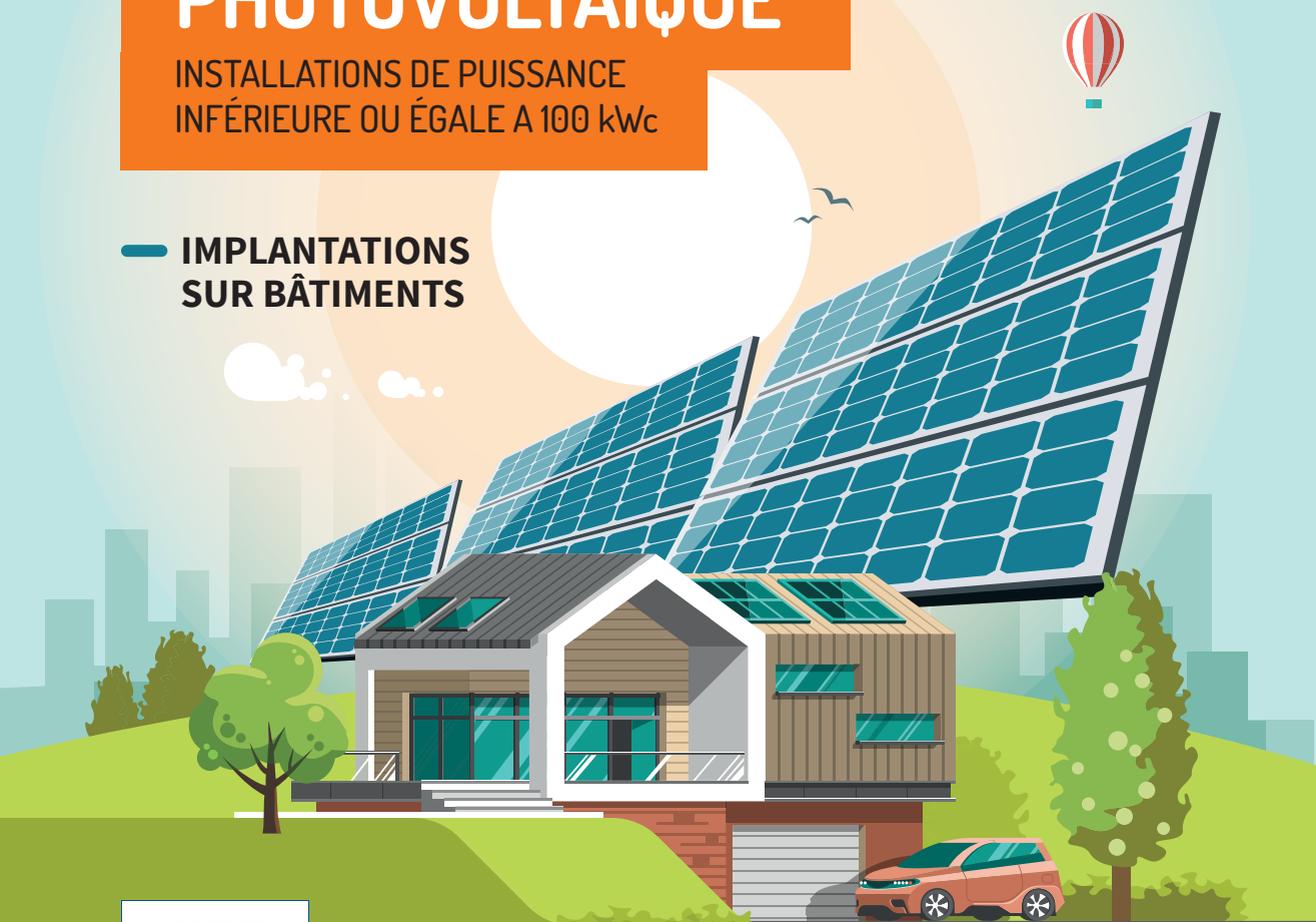




# GUIDE DE RECOMMANDATIONS À DESTINATION DES PORTEURS DE PROJET PHOTOVOLTAÏQUE

INSTALLATIONS DE PUISSANCE  
INFÉRIEURE OU ÉGALE A 100 kWc

## — IMPLANTATIONS SUR BÂTIMENTS



ADEME



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

**Ce document est édité par l'ADEME**

**ADEME**

20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

**Coordination technique :** ADEME - Céline MEHL

**Coordination édition :** ADEME - Véronique DALMASSO

**Rédacteurs :**

Mélodie DE L'EPINE, Anne-Claire FAURE  
et Cécile MIQUEL (HESPUL)

sur la base du guide « *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau - guide de recommandations à destination des maîtres d'ouvrage* » rédigé par TRANSENERGIE.

**Crédits photo :** ©Adobe Stock - ©ADEME

**Création graphique :** GRAPHIE 4 - Vallauris

**Impression :** Imprimé en France par Nis Photoffset,  
80, allée des Serruriers - 06700 Saint-Laurent-du-Var.  
Imprimé en France grâce au procédé CTP avec des encres  
végétales sur papier recyclé certifié écolabel Européen.

**Brochure réf. 010838**

**ISBN :** 979-10-297-1324-8 - Septembre 2019 - 300 exemplaires

**Dépôt légal :** ©ADEME Éditions, Septembre 2019

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.



# PRÉFACE



***Nous pouvons tous,  
à titre individuel ou au titre  
d'une entreprise, d'une collectivité  
ou d'une exploitation agricole, jouer  
un rôle dans le développement  
de l'énergie solaire photovoltaïque  
afin d'accompagner la Transition  
Écologique et Solidaire de  
la France.***

**P**our assurer un déploiement qualitatif de l'énergie photovoltaïque, cet ouvrage se veut être un guide d'aide à la décision pour vous, porteur de projet, quel que soit votre profil.

**Il se limite néanmoins aux installations photovoltaïques de puissance inférieure ou égale à 100 kWc, en France métropolitaine, implantées sur bâtiment et notamment en toiture.**

Pour que votre installation puisse être de qualité, performante, pérenne et respectueuse de l'environnement, ce guide, basé sur plus de 10 ans de retours d'expérience, vous apportera :

- **une méthodologie sur la conduite de votre projet** et sur les démarches administratives à prévoir, en ciblant notamment les principaux écueils à éviter,
- un approfondissement technique et normatif dans l'objectif de **vous donner les clés pour échanger avec tous les intervenants du projet**, voire de porter un regard critique sur leurs choix et les solutions qu'ils vous proposeront.

Vous découvrirez notamment les différents modes de valorisation de l'électricité produite, que vous soyez « **autoconsommateur** » (en consommant l'électricité que vous produisez) et/ou « **producteur d'énergie** » (en injectant une partie ou la totalité de votre production d'électricité photovoltaïque sur le réseau public de distribution). Pour ce faire, ce guide vous expliquera les conditions réglementaires et tarifaires actuellement en vigueur, c'est-à-dire celles de l'**arrêté tarifaire photovoltaïque du 9 mai 2017**.

Si votre capacité d'investissement est limitée mais que vous souhaitez tout de même vous impliquer dans le développement de l'énergie solaire, vous découvrirez également que vous pouvez faire appel à un **tiers investisseur** ou que vous pouvez participer à un **projet citoyen ou participatif** afin de financer des installations photovoltaïques collectives en tant qu'actionnaire.

Conçu de façon à être le plus lisible possible, **ce guide est présenté par étapes clés, suivant l'ordre chronologique d'un projet**, qu'elles soient techniques ou administratives. Dans ce contexte, vous pourrez, en tant que porteur de projet, trouver toutes les informations utiles sur :

- le mode de valorisation de l'électricité photovoltaïque,
- la conception de votre installation,
- le choix des professionnels,
- le suivi de la réalisation de l'installation,
- et enfin, l'exploitation et le suivi des performances de l'installation photovoltaïque.

Il est toutefois à noter que ce guide n'a pas vocation à être exhaustif sur tous les sujets. Il ne peut être ainsi considéré comme un guide de montage de projet, au sens juridique du terme, ni comme un guide se substituant aux obligations réglementaires et aux recommandations professionnelles.



# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>JE VEUX COMPRENDRE LES BASES DU PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>14</b>
1.1	Le principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque	14
1.2	Les technologies des cellules photovoltaïques	15
1.3	Les puissances de l'installation	16
1.3.1	La puissance crête des modules (Wc)	16
1.3.2	La puissance de l'onduleur (kW)	16
1.3.3	La puissance de raccordement (kVA)	16
<b>2</b>	<b>LE FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU</b>	<b>17</b>
2.1	Le réseau électrique français	17
2.2	Le financement des réseaux	19
2.2.1	La contribution des utilisateurs aux coûts de raccordement	20
2.2.2	Le Tarif d'Utilisation du Réseau Public d'Électricité (TURPE)	20
2.3	Le principe de raccordement au réseau public de distribution	20
2.3.1	Injection de la totalité de l'énergie produite sur le réseau	21
2.3.2	Injection sur le réseau de l'énergie photovoltaïque excédentaire	21
2.3.3	Sans injection sur le réseau	22
2.3.4	Installation avec stockage	22
<b>3</b>	<b>LA VENTE OU L'AUTOCONSOMMATION DE L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>23</b>
3.1	Le prix de l'électricité	23
3.2	Les modes de valorisation (vente et autoconsommation)	24
3.2.1	La vente de l'électricité produite	26
3.2.2	L'autoconsommation individuelle de l'électricité produite	26
3.2.3	L'autoconsommation collective de l'électricité produite	27
<b>4</b>	<b>LE PORTEUR DE PROJET ET SES INTERLOCUTEURS</b>	<b>29</b>
4.1	Les statuts de producteur et d'autoconsommateur	29
4.1.1	Le producteur ou autoconsommateur en tant que particulier	29
4.1.2	Le producteur ou autoconsommateur en tant que personne morale	29
4.1.3	Le producteur ou la société de projet en tant que tiers-investisseur	30
4.2	Le rôle des différents acteurs et les étapes d'un projet	32
<b>5</b>	<b>LES SEUILS DE PUISSANCE RÉGLEMENTAIRE</b>	<b>34</b>
5.1	La puissance de l'installation et la puissance cumulée avec les autres installations	34
5.1.1	Synthèse pour les installations inférieures à 9 kWc	35
5.1.2	Synthèse pour les installations de 9 à 100 kWc	36

## 2

**J'ENVISAGE LA RÉALISATION D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE 37**

<b>1</b>	<b>ÉLÉMENTS FAVORABLES A UNE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ</b>	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>ESTIMER LA PUISSANCE ET LA PRODUCTION DE L'INSTALLATION</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>AUTOCONSOMMER LA PRODUCTION</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>ÉVALUER LES COÛTS DE RACCORDEMENT AU RÉSEAU</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>ANTICIPER LES RÉGLEMENTATIONS LOCALES</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ÉVALUER SA CAPACITÉ D'INVESTISSEMENT</b>	<b>48</b>
<b>6.1</b>	Première estimation	48
<b>6.2</b>	Le recours à un tiers-investisseur	49
<b>7</b>	<b>OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION</b>	<b>49</b>

## 3

**JE COMPARE LES MODÈLES ÉCONOMIQUES 51**

<b>1</b>	<b>CONNAÎTRE LES AIDES FINANCIÈRES ET LES TARIFS D'ACHAT SELON L'ARRÊTÉ DU 9 MAI 2017</b>	<b>52</b>
<b>1.1</b>	Tarif d'achat pour la vente de la totalité de la production	54
<b>1.2</b>	Prime d'investissement et tarif d'achat pour la vente du surplus	54
<b>1.3</b>	L'autoconsommation totale ou l'injection du surplus non rémunéré	55
<b>2</b>	<b>COÛTS D'INSTALLATION</b>	<b>56</b>
<b>2.1</b>	<b>Les coûts d'investissement</b>	<b>56</b>
2.1.1	Pour les installations de puissances inférieures à 3 kWc	56
2.1.2	Pour les installations de puissances supérieures à 3 kWc et inférieures ou égales à 100 kWc	57
<b>2.2</b>	<b>Coûts de raccordement au réseau public</b>	<b>57</b>
2.2.1	Pour les installations de puissances inférieures à 3 kWc	58
2.2.2	Pour les installations de puissances supérieures à 9 kWc et inférieures ou égales à 100 kWc	58
<b>2.3</b>	<b>Coûts de fonctionnement</b>	<b>60</b>
2.3.1	Montant du Tarif d'Utilisation du Réseau Public d'Électricité (TURPE)	60
2.3.2	Conditions d'imposition des revenus issus de la vente de l'électricité photovoltaïque	61
<b>2.4</b>	<b>Aide à la décision</b>	<b>62</b>
<b>3</b>	<b>CAS DES INSTALLATIONS EN AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE</b>	<b>63</b>
<b>3.1</b>	<b>Modes de valorisation de l'électricité photovoltaïque</b>	<b>65</b>
<b>3.2</b>	<b>Coûts de fonctionnement</b>	<b>65</b>
3.2.1	Montant lié aux aspects d'utilisation et de gestion du réseau	65
<b>3.3</b>	<b>Aide à la décision</b>	<b>65</b>



<b>4</b>	<b>JE VEUX TROUVER UN PROFESSIONNEL QUALIFIÉ</b>	<b>67</b>
<b>1</b>	<b>QUELS TYPES DE PROFESSIONNELS CHOISIR ?</b>	<b>68</b>
1.1	Compétences et qualifications professionnelles requises de l'installateur	68
1.2	Pour les particuliers (installations de petite puissance de 0 à 9 kWc)	69
1.3	Pour les personnes morales et/ou les installations de moyenne puissance (9 à 100 kWc)	70
1.3.1.	Réaliser un dossier de consultation	70
1.3.2.	Le choix d'un interlocuteur unique	70
1.3.3.	La nécessité d'un organisme de contrôle technique	71
1.4	Quelles assurances professionnelles exiger ?	72
<b>5</b>	<b>JE VEUX COMPRENDRE LES POINTS CLÉS TECHNIQUES DE LA CONCEPTION</b>	<b>73</b>
<b>1</b>	<b>ANALYSE DU POTENTIEL SOLAIRE DU SITE</b>	<b>74</b>
<b>2</b>	<b>MODE D'IMPLANTATION DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	<b>77</b>
<b>3</b>	<b>EXAMENS PRÉALABLES POUR UNE POSE SUR TOITURE DE BÂTIMENT EXISTANT</b>	<b>80</b>
3.1	Examen initial	80
3.2	Examen de la charpente existante	81
3.3	Examen de la couverture	82
3.4	Examen de la sous-face de couverture	82
<b>4</b>	<b>MATERIEL NECESSAIRE A UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>83</b>
4.1	Le système de montage des modules photovoltaïques	83
4.2	Les modules photovoltaïques	85
4.3	Les boîtes de connexion des modules	86
4.4	Les connecteurs côté DC	86
4.5	Les câbles électriques côté DC	87
4.6	La liaison équipotentielle côté DC	87
4.7	Les dispositifs de protection côté DC	87
4.8	Les onduleurs	88
4.8.1	Les différents types d'onduleur	88
4.8.2	Les différentes architectures électriques	89
4.8.3	Implantation des onduleurs	92
4.9	Les dispositifs de protection côté AC	92
4.10	Les batteries (en option)	93
4.11	Le compteur d'électricité privé (en autoconsommation)	94
<b>5</b>	<b>SIMULATION DU PRODUCTIBLE</b>	<b>94</b>
<b>6</b>	<b>OPTIMISATION DE L'AUTOCONSUMMATION</b>	<b>95</b>
6.1	La courbe de consommation	96
6.2	Les actions de MDE	96
6.3	Évolution du prix de l'électricité	97
6.4	Études et comparaisons	97

<b>6</b>	<b>JE CHOISIS MON OFFRE</b>	<b>99</b>
1	LA CHECK-LIST	100
2	LE CHOIX DU DEVIS	102
<b>7</b>	<b>JE PLANIFIE MON PROJET ET ENGAGE LES DÉMARCHES ADMINISTRATIVES</b>	<b>103</b>
1	<b>AUTORISATIONS D'URBANISME</b>	<b>104</b>
1.1	Pour les bâtiments existants	105
1.2	Pour les bâtiments neufs (ou en rénovation lourde)	105
1.3	Pour les Établissements Recevant du Public (ERP)	106
2	<b>DÉMARCHES DE RACCORDEMENT</b>	<b>107</b>
2.1	Demande de raccordement	107
2.2	Offre de raccordement	108
2.3	Cadre contractuel du raccordement, de l'exploitation et de l'accès au réseau	109
3	<b>OBTENTION D'UN CONTRAT D'ACHAT</b>	<b>109</b>
4	<b>ASSURANCES À CONTRACTER</b>	<b>109</b>
4.1	Assurance responsabilité civile	109
4.2	Assurances complémentaires	110
4.3	Assurance dommage-ouvrage	110
<b>8</b>	<b>JE VEILLE À LA BONNE RÉALISATION DE MON INSTALLATION</b>	<b>111</b>
1	<b>LA SÉCURITÉ DES INTERVENANTS</b>	<b>112</b>
2	<b>LA MANUTENTION DES MODULES</b>	<b>114</b>
3	<b>LA MISE EN ŒUVRE DU PROCÉDÉ PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>114</b>
3.1	L'étanchéité	115
3.2	La résistance mécanique	116
3.3	La sécurité au feu	117
3.4	La check-list	117
4	<b>LA MISE EN ŒUVRE ÉLECTRIQUE</b>	<b>118</b>
4.1	Les boîtes de connexion des modules	118
4.2	Les connecteurs côté DC	118
4.3	Les câbles électriques côté DC	119
4.4	La liaison équipotentielle côté DC	119
4.5	Les dispositifs de protection côté DC	120
4.6	Les onduleurs	120
5	<b>LES ATTESTATIONS DE CONFORMITÉ ET RAPPORTS DE CONTRÔLE</b>	<b>121</b>
5.1	L'attestation de conformité électrique CONSUEL	121
5.2	L'attestation sur l'honneur de l'installateur dans le cadre de l'obligation d'achat	121
6.	<b>LA RÉALISATION DES TRAVAUX DE RACCORDEMENT ET LA MISE EN SERVICE</b>	<b>122</b>



<b>9</b>	<b>JE RÉCEPTIONNE MON INSTALLATION</b>	<b>123</b>
1	LE PROCÈS-VERBAL DE RÉCEPTION	124
2	LA SIGNALÉTIQUE	125
3	LES GARANTIES À LA RÉCEPTION	125
4	LES DOCUMENTS À CONSERVER	126
4.1	Le dossier technique	126
4.2	Le dossier contractuel	127
<b>10</b>	<b>J'EXPLOITE MON INSTALLATION EN TOUTE CONFIANCE</b>	<b>129</b>
1	<b>MAINTIEN DES PERFORMANCES, DE LA SÉCURITÉ ET DE LA PÉRENNITÉ DE L'OUVRAGE</b>	<b>130</b>
1.1	Suivi de la production	130
1.1.1	Pour les particuliers et ou les installations de puissance inférieure à 9 kWc	130
1.1.2	Pour les personnes morales et/ou les installations de puissance supérieure à 9 kWc	131
1.2	Suivi de la consommation évitée	132
1.3	Entretien et maintenance	132
1.4	Démarches à suivre en cas de dysfonctionnement	134
1.5	Changement ou réparation de matériel	134
2	<b>FACTURATIONS ET PAIEMENTS</b>	<b>135</b>
2.1	Vente des kWh produits	135
2.2	Paiement du TURPE (et des éventuels frais de décompte)	135
2.3	Cotisations des assurances	136
2.4	Déclaration d'imposition	136
2.5	Modification de contrats	137
2.5.1.	Modification de contrat sous obligation d'achat	137
2.5.2.	Modification des contrats signés avec le gestionnaire de réseau	137
2.5.3.	Modification du périmètre de l'opération d'autoconsommation collective	137
3	<b>SUIVRE SON PLAN D'AFFAIRES ÉCONOMIQUES</b>	<b>137</b>
4	<b>FIN DE VIE DE L'INSTALLATION</b>	<b>138</b>
	<b>GLOSSAIRE</b>	<b>139</b>
	<b>MES NOTES ET CROQUIS</b>	<b>144</b>
	<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>147</b>
	<b>L'ADEME EN BREF</b>	<b>147</b>

# SE REPÉRER DANS LE GUIDE

Pour vous permettre de bien vous repérer dans ce guide, chaque chapitre est identifié par une couleur unique en lisière de page où figure le nom du chapitre associé.

Au sein de chaque chapitre, vous pourrez voir des notes colorées permettant d'attirer votre attention sur des points spécifiques :

**Des notes jaunes** pour vous apporter des informations complémentaires,

**Des notes rouges** pour vous alerter sur des points de vigilance,

**Des notes vertes** pour vous donner des détails sur les figures ou les tableaux du guide.



Par ailleurs, le contexte administratif et réglementaire du photovoltaïque pouvant évoluer, un pictogramme vous permettra de repérer les informations susceptibles d'être modifiées dans le temps.

Ainsi, par exemple, les éléments relatifs à l'arrêté tarifaire du 9 mai 2017 sont signalés par ce pictogramme car ils sont susceptibles d'évoluer et qu'il est recommandé dans tous les cas de lire les textes originaux. A titre d'exemple, les grilles tarifaires évoluent tous les trimestres.

D'une manière générale, il est indispensable de vous rapprocher de votre conseiller FAIRE ([www.faire.fr](http://www.faire.fr)) et de votre professionnel pour appliquer les textes en vigueur, connaître les montants des soutiens financiers et obtenir les coûts actualisés du matériel et des services nécessaires à votre installation.

Par ailleurs, ce guide prend pour hypothèse que **les installations de petite puissance (de 0 à 9 kWc) sont portées par des particuliers, et que les installations de moyenne puissance (de 9 à 100 kWc) sont portées par des personnes morales.**

En conséquence, vous pourrez identifier, comme ci-dessous :

• **EN BLEU CLAIR** : les informations relatives aux **PARTICULIERS** et aux installations de **0 à 9 kWc**.

TYPE DE TABLEAU	Installations ≤ 9 kWc
	Informations spécifiques

• **EN BLEU FONCÉ** : les informations relatives aux **PERSONNES MORALES** et aux installations de **9 à 100 kWc**.

TYPE DE TABLEAU	9 kWc < Installations ≤ 100 kWc
	Informations spécifiques



# ATTENTION À NE PAS CONFONDRE

**L'ÉNERGIE SOLAIRE PEUT ÊTRE UTILISÉE POUR PRODUIRE DE LA CHALEUR ET/OU PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ.**

## LE SOLAIRE THERMIQUE

Les panneaux solaires thermiques sont dédiés à la production de la chaleur, grâce à un « absorbeur » qui capte l'énergie solaire et la convertit en chaleur pour la communiquer à un liquide caloporteur.



Figure 1 :  
Exemple d'installation solaire thermique  
Source © TRANSENERGIE (www.esthace.com)

## LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Les modules photovoltaïques, quant à eux, produisent de l'électricité, grâce à un matériau semi-conducteur (silicium cristallin ou couches minces), constitutif des cellules photovoltaïques, qui convertit le rayonnement solaire en électricité.



Figure 2 :  
Exemple d'installation en toiture-terrasse et représentation schématique de l'écartement des châssis et de l'angle limite d'ombrage.  
Source © TRANSENERGIE - PVSystem

Il existe des systèmes hybrides photovoltaïque/thermique (communément appelés « PV-T ») qui produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité grâce à un module solaire photovoltaïque disposé au-dessus d'un absorbeur à eau ou à air.

**SEULE LA TECHNOLOGIE DU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE EST DÉTAILLÉE ICI.**

# ABRÉVIATIONS

## UTILES À LA LECTURE DU GUIDE

<b>ABF</b>	Architecte des Bâtiments de France	<b>LTECV</b>	(loi de) Transition Énergétique pour la Croissance Verte
<b>AC</b>	Courant alternatif (Alternative Current)	<b>MDE</b>	Maîtrise de la Demande en Électricité
<b>AMO</b>	Assistance à maîtrise d'ouvrage	<b>MO</b>	Maîtrise d'Ouvrage
<b>ATEc</b>	Avis Technique	<b>MOE</b>	Maîtrise d'Œuvre
<b>ATEx</b>	Appréciation Technique d'Expérimentation	<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>BT</b>	Basse tension	<b>PLU</b>	Plan Local d'Urbanisme
<b>CAE</b>	Contrat d'accès et d'exploitation	<b>PTF</b>	Proposition Technique et Financière (installations >36 kVA)
<b>CARD-I</b>	Contrat d'Accès au Réseau en Injection	<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>CCTP</b>	Cahier des Clauses Techniques Particulières	<b>RC</b>	(assurance) Responsabilité Civile
<b>CRD</b>	Convention de Raccordement Directe	<b>RCD</b>	(assurance) Responsabilité Civile Décennale
<b>CRE</b>	Commission de Régulation de l'Énergie	<b>RGE</b>	Reconnu Garant de l'Environnement
<b>CSPE</b>	Contribution au Service Public de l'Électricité	<b>RPD</b>	Réseau Public de Distribution d'énergie électrique
<b>DC</b>	Courant continu (Direct Current)	<b>S3REnR</b>	(ou SRRRER) Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables
<b>DEEE</b>	Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques	<b>SDIS</b>	Service Départemental d'Incendie et de Secours
<b>DTR</b>	Documentation Technique de Référence des gestionnaires de réseau	<b>SPS</b>	(coordonnateur) Sécurité et Protection de la Santé
<b>DTU</b>	Documents Techniques Unifiés	<b>TCFE</b>	Taxes (locales) sur la consommation finale d'électricité
<b>ELD</b>	Entreprise Locale de Distribution	<b>TURPE</b>	Tarifs d'Utilisation des Réseaux Publics d'Électricité
<b>ERP</b>	Établissements Recevant du Public	<b>TVA</b>	Taxe sur la Valeur Ajoutée
<b>ERT</b>	Établissements Recevant des Travailleurs	<b>ZNI</b>	Zones Non Interconnectées
<b>GRD</b>	Gestionnaire de Réseau de Distribution		
<b>HTA</b>	Moyenne tension		
<b>HTB</b>	Haute et très haute tension		
<b>IFER</b>	Imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux		
<b>IGH</b>	Immeuble de Grande Hauteur		
<b>LCOE</b>	Levelised Cost of Energy (coût actualisé de l'énergie)		





1

# JE VEUX COMPRENDRE LES BASES DU PHOTOVOLTAÏQUE



## 1. L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

### 1.1. LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule photovoltaïque, élément de base des modules, est composée d'un matériau semi-conducteur photosensible. Lorsque la cellule est exposée au rayonnement lumineux, l'énergie apportée par les photons est transférée aux électrons qui gravitent autour des atomes constitutifs du matériau. En absorbant suffisamment d'énergie, ces électrons peuvent s'échapper de la couche externe de l'atome en créant des paires « électrons-trous » : c'est l'effet photovoltaïque qui a été découvert en 1839 par le français Antoine-César Becquerel.

En dopant de manière dissymétrique P (positif) et N (négatif) les faces opposées des cellules lors de leur fabrication, on crée un déséquilibre électronique, permettant d'attirer les charges positives et négatives (trous et électrons) de part et d'autre. Une tension apparaît alors entre les deux faces de la cellule. Un maillage métallique permet ensuite de récupérer les électrons pour les acheminer vers un circuit électrique externe et former ainsi un courant électrique continu.

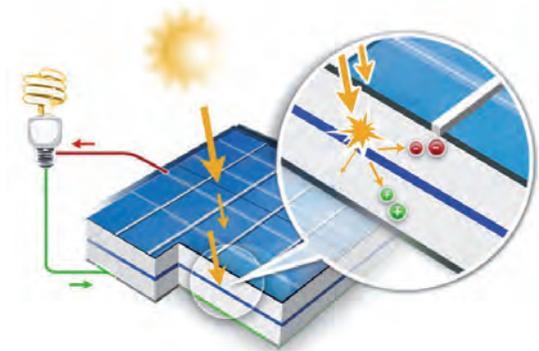


Figure 3 : Exemple de schéma de principe de l'effet photovoltaïque

Dans une installation photovoltaïque, le **courant continu (CC ou DC - Direct Current)** produit par les modules photovoltaïques doit ensuite être transformé par l'onduleur en **courant alternatif (CA ou AC - Alternative Current)** afin d'être compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public de distribution d'électricité.

Dans certaines conditions, il sera peut-être nécessaire d'installer des batteries afin de stocker l'énergie photovoltaïque produite (par exemple, pour des installations en site isolé), voire de « sécuriser » une partie des équipements de l'installation électrique vis-à-vis de coupures intempestives du réseau (que l'on retrouve moins en métropole que dans les Zones Non Interconnectées [ZNI], propres aux Départements d'Outre-Mer [DOM]).

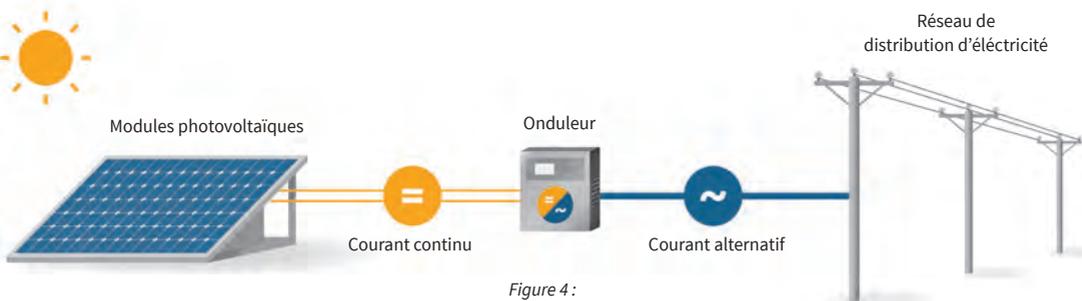


Figure 4 : Synoptique simplifié d'une installation photovoltaïque

## 1.2. LES TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Sur le marché, les technologies de cellules couramment utilisées dans les modules photovoltaïques sont :

### a) Le silicium cristallin dans 90 % des cas :

Le silicium cristallin est un matériau semi-conducteur composé de cristaux. Deux typologies existent : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

Les cellules en silicium monocristallin sont composées de tranches de silicium très fines découpées dans un lingot composé d'un grand cristal de silicium. Les modules ont ainsi une apparence très homogène, de couleur presque noire, avec comme seul élément visible les connecteurs argentés et supports de fond, habituellement blanc.

Les cellules multicristallines sont composées de tranches de silicium très fines, découpées dans un lingot, composé de réseaux cristallins juxtaposés formant des grains dans une même cellule. Les modules sont d'un bleu hétérogène du fait des cristaux aléatoires plus ou moins foncés.

### b) Les couches minces dans 10 % des cas :

Les technologies en couche minces sont notamment les technologies utilisant du silicium amorphe (a-Si, a-Si :H) non cristallisé, du CIS (Cuivre / Indium / Sélénium), du CIGS (Cuivre / Indium / Gallium / Sélénium) et du CdTe (Tellure de Cadmium). Ces technologies se développent notamment pour des applications sur bâtiment en raison de leur esthétique particulière (couleur anthracite et possibilité de vitrage semi-transparent).

Quelle que soit la technologie considérée, les cellules photovoltaïques doivent être connectées, encapsulées et protégées en raison de leur fragilité mécanique et de leur sensibilité à l'environnement extérieur (humidité relative, corrosion). Le module photovoltaïque ainsi constitué permet de délivrer des tensions et des puissances électriques adaptées aux applications usuelles.

### MODULES PHOTOVOLTAÏQUES ET RENDEMENT

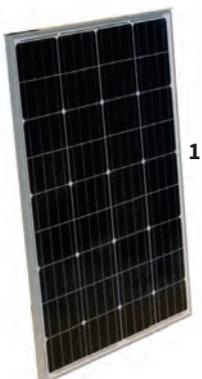
Le rendement des modules se définit comme le rapport entre la puissance électrique délivrée aux bornes d'une installation photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente mesurée dans les conditions normalisées d'essai (unité sans dimension ; valeur exprimée en %).

A titre général et indicatif, les rendements moyens sont de l'ordre de :

- 18 % à 22 % pour les modules monocristallins,
- 16 à 20 % pour les modules polycristallins,
- 7 à 17 % pour les couches minces.

Figure 5 :

1. Module constitué de cellules en silicium monocristallin.
2. Module constitué de cellules en silicium multicristallin.
3. Modules en couches minces en CIS.



1



2



3



### 1.3. LES PUISSANCES DE L'INSTALLATION

#### 1.3.1. LA PUISSANCE CRÊTE DES MODULES (Wc)

La puissance crête  $W_c$  (Watt crête) correspond à une puissance de référence théorique, en sortie des modules (puissance DC), obtenue dans des conditions standardisées de test :

- ensoleillement dans le plan du module égal à  $1000 \text{ W/m}^2$ ,
- spectre lumineux spécifique (dans des conditions atmosphériques de 1,5 AM).
- température au niveau des cellules égale à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

En France métropolitaine, cette puissance de référence est peu souvent atteinte ou dépassée (d'où le nom « crête »). Le module fonctionne majoritairement entre 0 et 80 % de sa puissance crête.

#### 1.3.2. LA PUISSANCE DE L'ONDULEUR (KW)

Du fait de la puissance crête rarement atteinte par le système photovoltaïque, l'onduleur est généralement choisi dans une gamme de puissance inférieure au système photovoltaïque (de 80 à 100 % de la puissance crête du système). Cela permet à l'onduleur de fonctionner de manière optimisée et d'éviter de longs cycles en sous-régime. Sa puissance est donnée en kW (kiloWatt) et correspond à la puissance alternative en sortie de l'onduleur (puissance AC).

#### 1.3.3. LA PUISSANCE DE RACCORDEMENT (KVA)

La puissance de raccordement correspond à la puissance maximale de l'installation permettant de dimensionner le raccordement au point de connexion avec le réseau, en fonctionnement normal et sans limitation de durée. Elle permet ainsi d'assurer une puissance d'injection sur ce même point en toute sécurité, elle s'exprime dans l'unité relative à la puissance apparente : kVA.

La puissance apparente correspond à la valeur de puissance maximale d'une installation, c'est à dire à la somme des puissances actives et des puissances réactives.

L'installation photovoltaïque ne génère pas en soi de puissance réactive. Mais selon les besoins du réseau, l'onduleur a la capacité d'injecter ou d'absorber de la puissance réactive. En effet, le système électronique intégré à l'onduleur permet de déphaser l'onde électrique sans dégrader la puissance active délivrée, dans une certaine limite de fonctionnement.

La puissance d'un module photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement qu'il reçoit ainsi que de la température au niveau de ses cellules.

La puissance augmente avec l'ensoleillement, mais décroît avec la température.

En 2019, un module standard en silicium cristallin d'environ  $1,6 \text{ m}^2$  (soit 60 cellules) aura généralement une puissance crête unitaire comprise entre 250 Wc et 330 Wc selon la technologie des cellules (silicium polycristallin ou monocristallin).

Pour les installations inférieures ou égales à 36 kVA, il n'est pas autorisé à ce jour d'injecter ou d'absorber de l'énergie réactive.

Ainsi, l'onduleur n'est programmé que pour injecter de la puissance active.

D'une manière générale, seule l'énergie active est achetée.

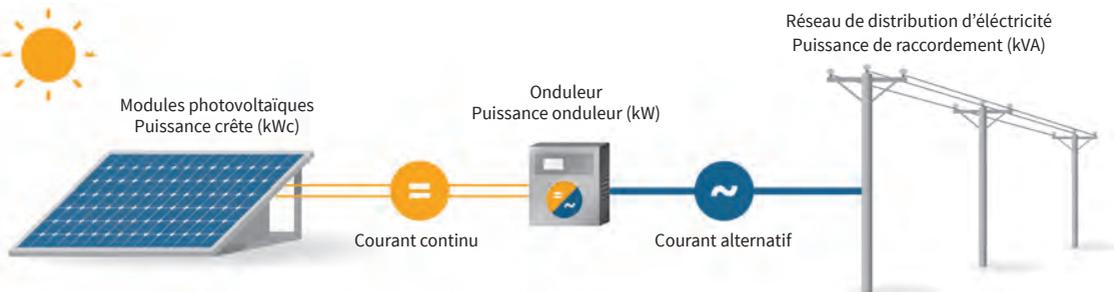


Figure 6 :  
Synoptique simplifié d'une installation photovoltaïque avec les différentes unités de puissance

## REMERCIEMENTS :

L'ADEME remercie tous les relecteurs de cette édition pour leur expertise et leur suggestions avisées, et notamment :

**Jean-Alain BOUCHET** du CEREMA,

**Jean-Charles CORBIN** et **Coralie NGUYEN**  
du CSTB,

**Michaël DELAY** de la CRE,

**Dominique DETONY**  
de la Direction Départementale de la  
protection des populations du Rhône,

**David DUMAS** de CYTHELIA,

**Samy ENGELSTEIN** du Syndicat  
des Energies Renouvelables (SER),

**Antoine FARCOT** d'AUTAN SOLARE,

**Cécile FONTAINE** du cabinet FIDAL,

**Mathieu GONDOLO** d'ENEDIS,

**Stephen JAMENOT** d'AXA,

**François MICHEL** et **Patrick VERGES**  
du BUREAU VERITAS,

**Maxence OLIVARD** de QUALIT'EnR,

**Franck PASQUALINI** de TRANSENERGIE,

**Nicolas RANDRIA** du GMPV,

**Elika SAIDI-CHALOPIN** du CONSUEL,

**Christophe THOMAS** pour ENERPLAN.

## AUTRES OUVRAGES DANS LA COLLECTION "CLÉS POUR AGIR" :

- Guide de recommandations à destination des porteurs de projets photovoltaïque. Installations de puissance supérieure à 100 kW, Implantations sur bâtiments, ombrières de parkings et centrales au sol (À VENIR EN 2020).
- Guide pour la réalisation de projets photovoltaïques en autoconsommation, dans les secteurs tertiaire, industriel et agricole (Ref. 010225).

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

**L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.**

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) ou suivez-nous sur [@ademe](https://www.instagram.com/ademe)

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





# GUIDE DE RECOMMANDATIONS A DESTINATION DES PORTEURS DE PROJET PHOTOVOLTAÏQUE

## INSTALLATIONS DE PUISSANCE INFÉRIEURE OU ÉGALE A 100 KWC

Ce guide est destiné aux porteurs de projet qui souhaitent approfondir leurs connaissances sur les installations photovoltaïques de petite puissance, inférieure ou égale à 100 kWc. Il permet de comprendre les enjeux et les étapes techniques et administratives pour monter un tel projet, en France métropolitaine, sur bâtiment, et ce, quel que soit le mode de valorisation de l'électricité produite (vente ou autoconsommation).

Il a vocation à donner les clés nécessaires au porteur de projet pour qu'il puisse faire des choix éclairés sur la réalisation de son installation, par exemple, sur le mode de valorisation de son électricité ou sur la mise en oeuvre de son installation en lui permettant de poser les bonnes questions aux professionnels afin d'aboutir à une réalisation de qualité.

En suivant le déroulement chronologique d'un projet, le guide débute par un décryptage du contexte lié au photovoltaïque en France métropolitaine, puis donne les éléments pour que le porteur de projet puisse valider la viabilité de son projet. Des conseils et des outils sont ensuite apportés au porteur de projet pour qu'il puisse faire une comparaison des différents modèles économiques, faire appel à des professionnels qualifiés, vérifier leurs critères de dimensionnement et de conception dans le but de choisir l'offre la plus adaptée à son projet. S'en suivent les étapes de planning et de réalisation avec les démarches administratives et la mise en oeuvre de l'installation. Enfin, la réception des travaux est une étape cruciale pour que le porteur de projet puisse collecter l'ensemble des éléments relatifs à son installation et ainsi envisager une exploitation pérenne de son installation photovoltaïque.

***HESPUL**, association créée en 1992, accompagne le développement du photovoltaïque en France et s'est vu confier par l'ADEME la gestion du Centre de ressources documentaires national sur le Photovoltaïque (CRPV).*

***Mélie de l'Épine**, coordinatrice du pôle photovoltaïque à HESPUL et du CRPV, participe notamment, grâce à ses 15 ans d'expérience dans le domaine, aux diverses instances de concertation et de consultation organisées par l'Etat.*

***Anne-Claire Faure**, animatrice du CRPV depuis 8 ans, est spécialiste du contexte réglementaire de la filière photovoltaïque et des conditions de raccordement au réseau de distribution.*



[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



010838  
20,00 €

