

Anne Labouret

Michel Villosz

Adrien Villosz

INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

**Conception et dimensionnement
d'installations raccordées au réseau**

6^e édition

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel
Graphisme de couverture : Élisabeth Riba
Illustration de couverture : Artjazz/shutterstock.com

© Dunod, 2022
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-084940-6

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	VII
Chapitre 1 ■ Énergie lumineuse et conversion photovoltaïque	1
1.1 La lumière sous toutes ses formes	1
1.1.1 Dualité onde-particule	2
1.1.2 Sources de lumière	4
1.2 Le rayonnement solaire terrestre	8
1.2.1 Géométrie Terre-Soleil	8
1.2.2 Caractéristiques du rayonnement solaire	11
1.2.3 Le rayonnement solaire sur notre planète	16
1.3 La conversion photovoltaïque	24
1.3.1 L'absorption de la lumière	25
1.3.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques	28
1.3.3 La collecte des charges	32
1.4 Le fonctionnement de la jonction photovoltaïque	35
1.4.1 Caractéristique courant/tension	35
1.4.2 Réponse spectrale	39
Chapitre 2 ■ Technologie des panneaux solaires	41
2.1 Cellules et panneaux au silicium cristallin	42
2.1.1 Préparation du silicium et des cellules	42
2.1.2 Propriétés des cellules cristallines	55
2.1.3 De la cellule au panneau photovoltaïque	60
2.1.4 Caractéristiques électriques et climatiques des panneaux	65
2.1.5 Assemblage de panneaux	72
2.2 Cellules et panneaux couches minces	77
2.2.1 La particularité des couches minces	77
2.3 Panneaux au CdTe	77
2.4 Panneaux au CIS et CIGS	79
2.5 Panneaux spéciaux	79
2.5.1 Panneaux souples	79
2.5.2 Éléments architecturaux	80

Chapitre 3 ■ Équipements pour installations raccordées au réseau	85
3.1 Panneaux solaires	86
3.1.1 Grands panneaux à cellules de 166, 182 ou 210 mm	87
3.1.2 Panneau en couches minces de 440 W	89
3.1.3 Vieillessement, points critiques	91
3.1.4 Fiabilité des producteurs	92
3.1.5 Retour d'expérience	92
3.1.6 Vieillessement actuel	93
3.2 Installation mécanique des panneaux	94
3.2.1 Structures support	94
3.2.2 Types de montage	95
3.2.3 Panneaux solaires pour intégration en toiture	97
3.3 Onduleurs	98
3.3.1 Critères de choix	99
3.3.2 Rendement de l'ondeur	100
3.3.3 Rendement européen	101
3.3.4 Transformateur d'isolement et mise à la terre	102
3.3.5 Tension de l'ondeur	104
Chapitre 4 ■ Systèmes basse puissance	107
4.1 Choix techniques	107
4.2 Étapes du projet	108
4.3 Dimensionnement	109
4.3.1 Localisation du bâtiment	110
4.3.2 Données météorologiques	110
4.3.3 Autoconsommation et stockage	120
4.4 Dessin 3D et calcul des ombrages	125
4.4.1 Importance de l'environnement	131
4.4.2 Puissance de l'ondeur et du champ photovoltaïque	134
4.5 Exemple d'intégration	135
4.6 Montage et câblage	136
4.7 Effets d'ombrages	137
Conclusion	138
Chapitre 5 ■ Centrales photovoltaïques	139
5.1 Montage en dômes	139
5.2 Montage en sheds fixes et suiveurs	140
5.3 Données climatiques	141
5.4 Étapes du projet	142

5.5 Dimensionnement	144
5.5.1 Variante modules standards	144
5.5.2 Variante modules bifaciaux	160
5.5.3 Variante suiveurs standards	162
5.5.4 Variante suiveurs bifaciaux	166
5.6 Centrale solaire	168
5.6.1 Variante centrale à – 20 degrés est	169
5.6.2 Variante centrale à sheds orientés sud	172
5.6.3 Terrain – sol irrégulier	175
5.7 Variabilité, P90, TMY	179
5.7.1 Variabilité	179
5.7.2 P90	180
5.7.3 TMY	181
Conclusion	182
Chapitre 6 ■ Contrôle et maintenance des systèmes photovoltaïques	183
6.1 Précision de la simulation	184
6.2 Simulation « ciel clair »	189
6.2.1 Salissures	189
6.2.2 Vieillissement	191
Conclusion	197
Annexes	199
1 Grandeurs physiques et unités	201
2 Données d'ensoleillement	205
Bibliographie	206
Organismes et associations	209
Lexique	211
Index	213

Avant-propos

Cette sixième édition d'un ouvrage paru la première fois en 2006 n'a plus besoin de présenter l'énergie solaire photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques sont devenus courants dans le paysage avec de nombreuses utilisations, sur des toitures, pour l'alimentation de candélabres ou autres besoins isolés du réseau, ou dans les centrales en plein champ.

Aujourd'hui, c'est la source d'électricité la moins chère et les derniers grands projets de plusieurs centaines de mégawatts au Moyen-Orient ont été adjugés à des promoteurs offrant un courant à moins de 0,02 €/kWh.

La qualité des composants solaires a progressé avec une fabrication fortement robotisée et le rendement des modules a augmenté régulièrement, en particulier depuis le recours à la technologie PERC¹ qui a permis de gagner en moyenne 0,5 % d'amélioration par an ces dix dernières années. Le rendement typique des modules est ainsi passé de 15 à 20 % durant cette période.

On peut citer quelques grandes tendances appelées à beaucoup se développer ces prochaines années :

- Le montage de centrales sur des plans d'eau se développera en particulier sur des lacs de barrage où la surface solaire, tout en assurant une production électrique, limite l'évaporation de l'eau et augmente ainsi le potentiel hydroélectrique du site. Un deuxième avantage de ce type de montage est la perte thermique plus faible des modules sur un plan d'eau, moins chaud que la terre ferme au même endroit.
- L'agrivoltaïque est un autre créneau intéressant sous certains climats et en particulier en pays chauds, où certaines cultures poussent mieux à l'ombre qu'en plein soleil. On dispose pour ce faire les modules solaires en hauteur au-dessus des plantes à protéger et la surface agricole est ainsi mieux rentabilisée avec cette double utilisation du champ. Un exemple de grande centrale de plus de 1 GW au Tibet montre que le terrain sec reverdit sous les panneaux grâce à la réduction de l'évaporation. On peut ainsi nourrir des milliers de moutons. Ceux-ci se réfugient sous les modules lors

1 PERC : *Passivated Emitter and Rear Cell*, « Passivation du contact arrière ».

des pluies et des périodes de chaleur. C'est la plus simple utilisation de l'agrivoltaïque, qui contribue ainsi au bien-être animal.

- Avec le choix de modules bifaciaux, montés verticalement en longues rangées nord-sud tous les 10 à 15 m de distance, un terrain agricole ne perd qu'une faible proportion de sa surface de production tout en engrangeant un revenu énergétique.
- Partout où les surfaces agricoles non exploitées sont rares, on privilégie le montage sur les grands toits industriels ou les maisons individuelles avec des avantages tarifaires pour les petits systèmes.

Les composants solaires qui ont été développés d'abord en Europe, aux États-Unis et au Japon sont aujourd'hui produits à plus de 90 % en Extrême-Orient. Cette mainmise de la production organisée depuis la Chine suit la tendance actuelle des autres biens de consommation. La Chine est le premier fabricant mais aussi le premier marché où en 2020 une puissance de 48 GW a été installée pour un global mondial de 140 GW. Toujours en 2020, les dix premiers fabricants écoulaient 81,5 % de cette puissance globale, soit 114,1 GW et on y trouvait huit Chinois, un Coréen et un Américain. En 2021, le premier producteur a écoulé plus de 38 GW, ce qui correspond à environ 100 millions de modules de 380 W en un an, soit 270 000 modules par jour. Sachant qu'environ 668 modules de 72 cellules (environ 2 m²) sont transportés par container de 40 pieds (soit 67 m³), on obtient le chiffre de 400 grands containers par jour pour ce fabricant.

Pour l'ingénieur décidant de se former dans cette spécialité, nous présentons dans cet ouvrage les bases de fonctionnement des composants solaires et un logiciel qui permet d'évaluer les performances d'un système, soit pour sa conception, soit dans son analyse de fonctionnement.

Chapitre 1

Énergie lumineuse et conversion photovoltaïque

1.1 La lumière sous toutes ses formes

Quand on évoque la lumière en physique, une des premières grandeurs qui vient à l'esprit est la vitesse de la lumière, qui ne peut être égalée et encore moins dépassée. Rien ne peut aller plus vite que la lumière, et c'est la célèbre formule rendue célèbre par Einstein. Elle met en évidence que la matière (m) est énergie (E), et *vice versa*, et que ces grandeurs sont liées par la vitesse de la lumière au carré : $E = mc^2$. Dans le vide, la vitesse de cette lumière C (pour célérité) est de 299 792 458 m/s, à peine plus d'une seconde pour parcourir la distance Terre-Lune¹.

Cette lumière apparaît donc à nos yeux comme un rayon se propageant en ligne droite et obéissant à certaines lois, décrites par l'optique dite « géométrique » : réflexion sur une surface, réfraction (déviation du faisceau à l'entrée dans un milieu), focalisation par une lentille, diffusion sur une surface rugueuse... Tous ces phénomènes sont concernés quand il s'agit de capter la lumière dans une cellule photovoltaïque (§ 1.3.1).

Mais ils n'expliquent pas tout, loin de là. Pourquoi faut-il de la lumière pour que notre œil perçoive son environnement ? Comment la lumière peut-elle traverser le verre ? Comment se forme un arc-en-ciel ?... Les questions sont multiples. Pour rendre compte de toutes les observations, depuis le

¹ Pour en savoir plus, voir par exemple l'excellent ouvrage de vulgarisation *Lumière Matière*, de Séverine Martrenchard-Barra, collection « Nature des Sciences », Centre de vulgarisation de la connaissance, CNRS Éditions.

Moyen Âge les scientifiques ont cherché à décrire la nature profonde de la lumière et élaboré de nombreuses théories, parfois contradictoires.

1.1.1 Dualité onde-particule

Lorsqu'un faisceau lumineux passe par deux fentes assez rapprochées, cela produit sur un écran placé derrière non pas deux taches de lumière mais un ensemble de taches sombres et lumineuses alternées : ce sont des *interférences*. Ce phénomène ne peut s'expliquer que si la lumière est une onde qui se propage dans l'espace. En effet, lorsque deux ondes arrivent au même point, elles peuvent soit se renforcer, soit s'annuler – d'où les alternances de taches sombres et brillantes sur l'écran. De nombreuses expériences vinrent conforter cette théorie ondulatoire, notamment les observations de l'astronome Huygens, les travaux de Young, Fresnel, Arago, et enfin Maxwell, qui mit en équations la propagation des ondes lumineuses.

Certains physiciens, comme Newton, défendaient une autre conception de la lumière, celle d'un faisceau de particules, pour expliquer la réflexion : les grains de lumière « rebondissent » sur le miroir (comme des balles).

Ce n'est qu'au xx^e siècle que furent enfin réconciliées ces deux théories dites *ondulatoire* et *corpusculaire* de la lumière, grâce à la découverte du *photon* par Planck et Einstein. En pratique, la lumière a bien une double nature.

– **C'est une onde électromagnétique**, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde λ (périodicité spatiale, cf. figure 1.1) ou sa fréquence ν : plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est faible et inversement :

$$\nu = C/\lambda$$

où C est la célérité de la lumière. Dans la partie visible du spectre solaire (§ 2.2.2), la longueur d'onde se manifeste par la « couleur » de la lumière.

– **C'est aussi un faisceau de photons** qui sont comme des « grains de lumière » porteurs d'une quantité d'énergie, qui dépend de leur longueur d'onde, selon la formule de Louis de Broglie (1924) :

$$E = h\nu = \frac{hC}{\lambda}$$

où h est la constante de Planck.

C'est cette énergie portée par les photons qui est à l'origine de la conversion photovoltaïque : elle va libérer des charges électriques contenues dans le matériau (§ 1.3.2).

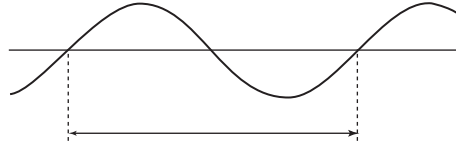


Figure 1.1 – Définition de la longueur d'onde d'une onde électromagnétique (λ)

Répartition spectrale des ondes électromagnétiques

On appelle *répartition spectrale* ou *spectre* la répartition des ondes d'une source lumineuse selon leur longueur d'onde. La lumière blanche, par exemple, est en fait composée de plusieurs couleurs, visibles par décomposition à travers un prisme (cf. figure 1.2) ou dans l'arc-en-ciel. Mais les ondes électromagnétiques ne se réduisent pas à la seule lumière visible, qui ne représente en réalité qu'une infime portion de tous les rayonnements électromagnétiques connus. Évidemment le terme de *lumière* est plutôt adapté à cette partie visible par l'homme, mais par extension, il est souvent appliqué à tout le spectre solaire qui va de l'ultraviolet proche (250 nm) à l'infrarouge (10 μm). Voir les détails au paragraphe 1.2.2.

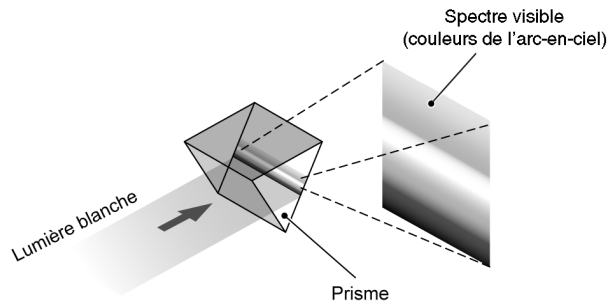


Figure 1.2 – Décomposition de la lumière blanche par un prisme

Le tableau 1.1 décrit brièvement l'ensemble des ondes électromagnétiques, leur domaine de longueur d'onde et quelques-unes de leurs applications.