

LOUIS-PAUL HAYOUN
ET AURIAN ARRIGONI



LES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT
DES INSTALLATIONS RACCORDÉES AU RÉSEAU

L'EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE
DU BÂTIMENT

EYROLLES

LES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT
DES INSTALLATIONS RACCORDÉES AU RÉSEAU

LOUIS-PAUL HAYOUN
ET AURIAN ARRIGONI



Inaugurée en 2008 à Saint-Aunès (Hérault), cette ombrière photovoltaïque dont la production est injectée au réseau électrique présente une surface de captage de 8000 m².
(photo des auteurs)

Soutenue d'un côté par des tarifs d'achat très encourageants et, de l'autre, par des investisseurs en quête de placements prometteurs, la filière photovoltaïque a bénéficié en France d'un développement aussi soudain que spectaculaire. Cette brève euphorie fait progressivement place à une approche rationnelle de la question et, désormais, c'est à la qualité des installations solaires photovoltaïques que l'on accorde la priorité.

Toujours en progression – grâce notamment à une tarification qui reste attrayante – l'énergie photovoltaïque raccordée au réseau suit un plan de croissance contrôlé par l'État. D'ici 2020, le parc photovoltaïque français aura quintuplé.

Dans ce contexte, les auteurs se sont efforcés de proposer l'ouvrage de référence réclamé par les professionnels du bâtiment et de l'électricité. À cette fin, ils se sont appuyés sur leur double expérience d'ingénieurs et de formateurs spécialisés dans l'énergie photovoltaïque. Avec ce manuel, ils entendent aussi diffuser le plus largement possible leurs connaissances et contribuer au progrès qualitatif de la filière photovoltaïque en France.

Formateur QualiPV agréé Qualit'EnR, **Louis-Paul Hayoun** a créé dans le Gard un bureau d'études spécialisé dans l'énergie solaire photovoltaïque, Solis Ingénierie (Les Angles, près de Nîmes).

Ingénieur en génie électrique, **Aurian Arrigoni** a acquis la maîtrise du dimensionnement et de la conception de tout type de projet photovoltaïque, qu'il soit raccordé au réseau ou autonome, en France comme à l'étranger.

SOMMAIRE

I. Panorama de la filière photovoltaïque en France : acteurs, labels de qualité, étapes d'un chantier.

II. Systèmes d'intégration des modules photovoltaïques. Tous les modes de pose assortis d'illustrations et d'explications sur la notion d'intégration au bâti.

III et IV. Propriétés électriques des deux composants majeurs d'une installation photovoltaïque : les modules photovoltaïques et les onduleurs.

V. Niveaux de performance des installations photovoltaïques raccordées au réseau en basse tension et moyens d'optimiser le rendement. Comment calculer la production électrique annuelle d'une installation photovoltaïque.

VI et VII. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque : schémas électriques, calculs et justificatifs de dimensionnement.

VIII. Études de cas reprenant pas à pas les notions abordées dans l'ouvrage.

Ce manuel professionnel s'adresse en priorité aux artisans installateurs, aux maîtres d'ouvrage et aux assistants maîtres d'ouvrage ainsi naturellement qu'aux maîtres d'œuvre. Il contient un exposé complet – de la théorie aux applications – qu'apprécieront les ingénieurs des bureaux d'études et les techniciens, les formateurs et leurs stagiaires autant que les enseignants et leurs étudiants.

Code éditeur : G12994
ISBN : 978-2-212-12994-6

www.editions-eyrolles.com
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif

Les installations photovoltaïques

Conception et dimensionnement des installations raccordées au réseau

Dans la même collection

Dominique Pajani, *Thermographie du bâtiment*, à paraître en 2012

Alain Garnier, *Le bâtiment à énergie positive. Comment maîtriser l'énergie dans l'habitat ?*, 2012

Armand Dutreix, *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*, 2010

Christine Charlot-Valdieu & Philippe Outrequin, *Écoquartier mode d'emploi*, 2009

Louis-Paul Hayoun & Aurian Arrigoni

Les installations photovoltaïques

Conception et dimensionnement des installations raccordées au réseau

EYROLLES

The logo graphic for EYROLLES, featuring a horizontal line with a small red dot in the center.

Groupe Eyrolles
61, Bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05

www.editions-eyrolles.com

Les auteurs et l'éditeur remercient les nombreux organismes qui leur ont procuré les illustrations figurant dans l'ouvrage. Sauf mention particulière, toutes les autres illustrations ont été réalisées par les auteurs.

Les auteurs

Louis-Paul Hayoun



Fondateur et gérant de la société Solis Ingénierie, Louis-Paul Hayoun est formateur photovoltaïque QualiPV module Élec & Bât agréé par Qualit'EnR, depuis 2008.

Il a également animé de nombreuses conférences et séminaires sur le thème des énergies renouvelables, de la performance énergétique des bâtiments et de la conception bioclimatique ainsi que de la haute qualité environnementale.

Concerné par la mise en œuvre des énergies renouvelables dans le monde et les pays émergents, il s'implique sur des projets au Moyen-Orient, en Asie et sur le pourtour méditerranéen.

Aurian Arrigoni



Directeur technique du bureau d'études Solis Ingénierie, Aurian Arrigoni est ingénieur Grande École diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique (ENSEM). Expert sur les questions de génie électrique, génie thermique et mécanique des fluides, il mène des opérations de plus ou moins grande envergure dans le domaine du bâtiment.

Son parcours professionnel lui a permis d'intervenir sur tout type de projet photovoltaïque, raccordé au réseau ou autonome, concernant le dimensionnement et la conception, en France et à l'export. Il dirige également le pôle R&D de Solis Ingénierie au sein duquel il développe des travaux innovants dans le domaine du pompage solaire, de la production de froid solaire, de la performance énergétique du bâtiment.

Au-delà de la composante photovoltaïque, Aurian Arrigoni intervient aussi dans le secteur de la Haute Qualité Environnementale du bâtiment.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
PARTIE I	
CADRE ÉCONOMIQUE ET ADMINISTRATIF	3
1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	4
COMPOSANTE ÉLECTRICITÉ	4
COMPOSANTE BÂTIMENT.....	10
L'APPELLATION QUALI'PV	17
ÉTAPES D'UN CHANTIER PHOTOVOLTAÏQUE.....	17
2 INTÉGRATION ARCHITECTURALE.....	25
GÉNÉRALITÉS.....	25
TOITURE INCLINÉE.....	29
TOITURE À FAIBLE PENTE	31
INTÉGRATION SUR FAÇADES.....	34
CENTRALE AU SOL.....	39
PARTIE II	
PERFORMANCES D'UNE INSTALLATION PV RACCORDÉE AU RÉSEAU	41
3 PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES	42
LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	42
LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	51

4	LES ONDULEURS.....	58
	RÔLE DE L'ONDULEUR.....	58
	PERFORMANCE D'UN ONDULEUR.....	67
	LIRE UNE FICHE TECHNIQUE D'ONDULEUR.....	73
5	L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.....	87
	GISEMENT SOLAIRE.....	87
	QUALITÉ D'UNE INSTALLATION PVR.....	96
	PRODUCTION D'UNE INSTALLATION.....	104
	OMBRAGES.....	107

PARTIE III

	DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PV RACCORDÉE AU RÉSEAU	119
6	DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE CC.....	120
	SCHÉMA ÉLECTRIQUE	120
	DIMENSIONNEMENT DES ONDULEURS	123
	DIMENSIONNEMENT DES CÂBLES CC.....	130
	LES FUSIBLES CC.....	140
	PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS.....	144
	COUPURE ET SECTIONNEMENT.....	151
7	DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE CA.....	153
	SCHÉMA ÉLECTRIQUE	153
	CALIBRAGE DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES.....	157
	SECTIONS DES CÂBLES.....	169
8	ÉTUDE DE CAS.....	174
	OPTIMISATION DU CALEPINAGE.....	174
	DIMENSIONNEMENT ÉLECTRIQUE	178

ANNEXES 201

ANNEXE 1

LE RELEVÉ DE MASQUE..... 202

LE GRAPHE DE LA COURSE DU SOLEIL..... 202

REPORTER LES OBSTACLES..... 204

INTERPRÉTER LE MASQUE SOLAIRE 209

ANNEXE 2

FACTEUR DE FORME D'UNE CELLULE..... 211

ANALOGIE GÉOMÉTRIQUE 211

LE FACTEUR DE FORME 213

ANNEXE 3

EFFET POINT CHAUD..... 215

COMPORTEMENT DE DEUX CELLULES EN SÉRIE..... 215

INVERSION DE POLARITÉ 218

ANNEXE 4

COURANT RETOUR..... 219

GLOSSAIRE..... 222

Introduction

Cet ouvrage, dont le contenu s'appuie sur le fil directeur de la formation Quali'Pv, s'adresse aux artisans-installateurs, aux bureaux d'études ainsi qu'aux maîtres d'ouvrage. Le lecteur y trouvera des éléments pointus de conception et de dimensionnement des installations photovoltaïques raccordées au réseau en basse tension (puissance inférieure à 250 kW).

Le premier chapitre donne une vision générale de la filière photovoltaïque en France, fournissant des informations sur les différents acteurs, les labels de qualité et les étapes d'un chantier photovoltaïque.

Le chapitre 2, entièrement dédié aux systèmes d'intégration des modules photovoltaïques, présente tous les modes de pose – des plus classiques aux plus esthétiques. Des illustrations et des explications simples aident à mieux comprendre la compatibilité des installations avec la notion d'intégration au bâti (permettant de bénéficier des tarifs d'achat plus ou moins avantageux).

Les chapitres 3 et 4 détaillent l'ensemble des propriétés électriques des deux composants majeurs

d'une installation que sont les modules photovoltaïques et les onduleurs.

L'objet du chapitre 5 est une analyse des niveaux de performance des installations photovoltaïques raccordées au réseau et des solutions permettant d'en optimiser le rendement. Les notions développées permettent notamment de calculer la production électrique annuelle d'une installation.

Les chapitres 6 et 7 sont respectivement consacrés au dimensionnement de la partie courant continu (CC) et à celui de la partie courant alternatif (CA) d'une installation photovoltaïque. Tous les cas de schémas électriques ainsi que les calculs et justificatifs de dimensionnement y sont présentés. Le recours à des illustrations et à des exemples concrets facilite la compréhension du processus de dimensionnement.

Enfin, le chapitre 8 reprend les notions abordées précédemment sous la forme d'une étude de cas détaillée pas à pas, de la conception au dimensionnement.

PARTIE I

CADRE ÉCONOMIQUE ET ADMINISTRATIF

Une conception réfléchie d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau passe nécessairement par la connaissance du contexte économique et administratif. Cette partie expose l'ensemble des éléments relatifs aux règles de l'art ainsi qu'aux conditions de vente de l'électricité photovoltaïque en France.

1 | Méthodologie générale

Composante électricité

Une installation photovoltaïque produit de l'électricité.

Le dimensionnement électrique d'une installation photovoltaïque fait appel à deux concepts :

- la performance de l'installation (traitee en détail dans le chapitre 4) ;
- la sécurité électrique (traitee en détail dans les chapitres 6 et 7).

Le processus du dimensionnement d'une installation photovoltaïque consiste donc à réaliser des choix techniques afin de respecter ces deux critères, en conformité avec les normes en vigueur.



Différence entre norme et guide

Même si d'une manière générale, un guide est un document normatif à caractère informatif, dans le cas présent, le guide UTE C15-712-1 est un guide d'application des exigences de la norme NF C15-100 pour les installations photovoltaïques, la norme NF C15-100 étant elle-même d'application obligatoire. Par ailleurs, étant donné qu'il s'agit du seul référentiel existant et utilisé par le CONSUEL pour la délivrance de l'attestation du même nom, cela le rend de fait incontournable.

Conformité électrique

Normes applicables

Une installation photovoltaïque est, avant tout, une installation électrique. Elle doit, en ce sens, se conformer à l'ensemble des documents à caractère normatif dans le domaine de l'électricité. En France, l'Union technique de l'électricité (UTE) est l'organisme responsable de la normalisation des matériels et des installations électriques. L'UTE élabore, publie et diffuse les normes et les guides dans le domaine de l'électricité.

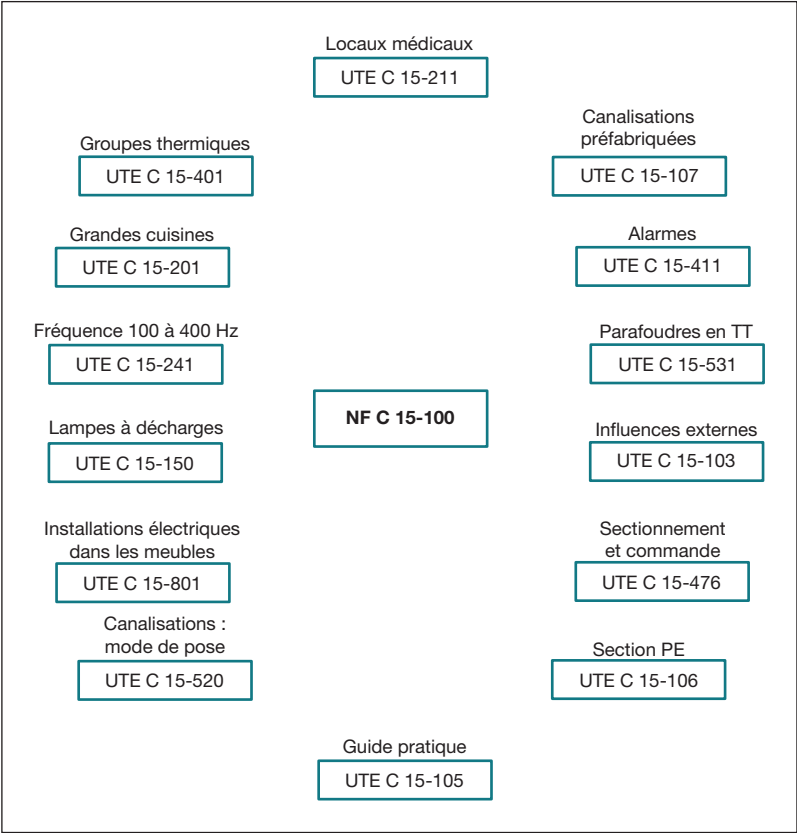
Concernant les installations photovoltaïques raccordées au réseau, deux documents techniques centraux sont à considérer :

- le guide de l'UTE C15-712-1 pour la partie continue (partie CC) ;
- la norme NF C15-100 pour la partie alternative (partie CA).

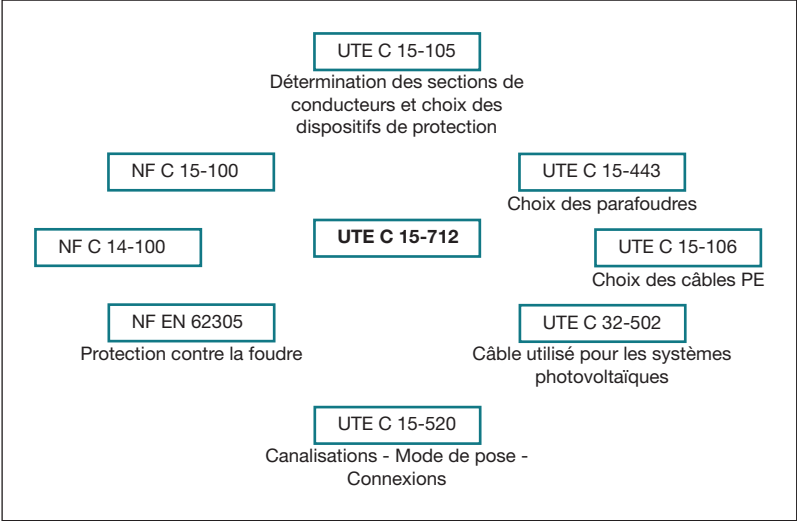
Ces deux documents techniques ne sont cependant pas suffisants pour concevoir et dimensionner une installation photovoltaïque dans les règles de l'art. En effet, chacun d'entre eux fait référence à d'autres normes et guides, ainsi qu'illustré sur les schémas ci-contre.

Le chapitre 6 et le chapitre 7 traitent respectivement du dimensionnement de la partie continue et de la partie alternative d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau. Le lecteur pourra s'y reporter pour toute information concernant ces sujets.

La norme NF C15-100.



Le guide de l'UTE C15-712.



CONSUEL

Le CONSUEL est le Comité national pour la sécurité des usagers de l'électricité. Il s'agit d'une association, sous la tutelle des pouvoirs publics, dont le rôle est de vérifier la conformité électrique des installations électriques.

Depuis le 22 mars 2010, toute installation photovoltaïque raccordée au réseau doit être attestée conforme par le CONSUEL avant sa mise en service.

L'attestation de conformité du CONSUEL est devenue obligatoire suite à un rapport, produit par le CONSUEL lui-même, mentionnant : « La moitié, 51 % exactement, des installations photovoltaïques que nous avons contrôlées en France métropolitaine présentent des non-conformités. » Il est à noter que, parmi les non-conformités relevées, 53 % correspondaient à l'absence d'étiquetage.

Sécurité électrique

L'électricité est, rappelons-le, très dangereuse. En France, chaque année, on dénombre plusieurs

milliers d'accidents corporels, dont au moins 200 sont mortels, et plus de 4 000 incendies.

Les modules photovoltaïques produisant de l'électricité dite continue, les électriciens ne sont pas rompus à ce type d'installation. La sécurité électrique d'une installation photovoltaïque est donc un élément à ne pas négliger.

Les arcs électriques

Les risques

Un arc électrique est le passage d'un courant dans un milieu isolant tel que l'air. Un arc électrique se produit d'autant plus facilement que deux parties conductrices sont proches.

Les arcs électriques se produisent généralement lors de l'ouverture d'un circuit électrique (ouverture d'un interrupteur).

Dans une installation photovoltaïque, des arcs électriques peuvent se produire dans les cas suivants :

- ouverture d'une chaîne photovoltaïque après mise en court-circuit de la chaîne. La mise en court-circuit de la chaîne se fait :

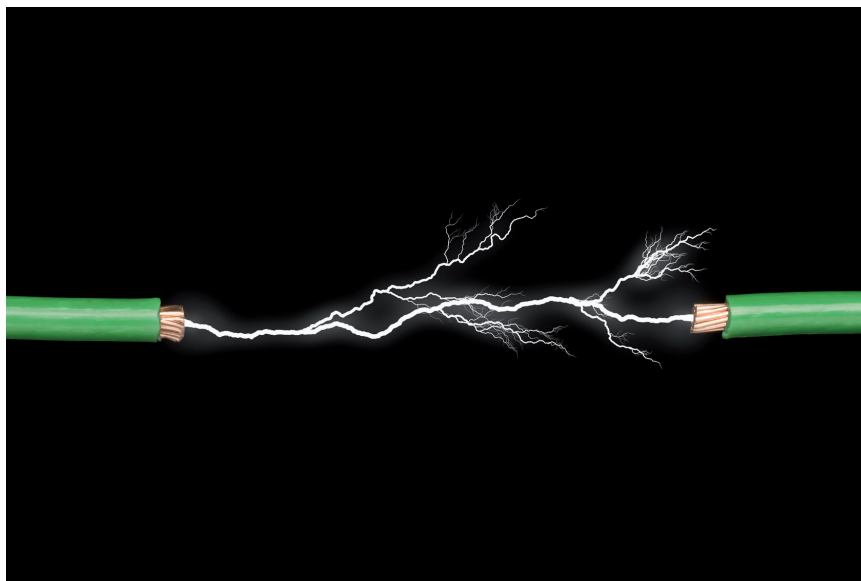


Illustration d'un arc électrique.
© Kelpfish - Fotolia.com

- soit par imprudence lors du câblage,
- soit par usure des câbles (l'âme des conducteurs entre en contact) ;

- contact électrique défectueux. Par exemple, dans le cas de borniers à vis au niveau des coffrets électriques, si la vis est mal serrée, il peut se produire des arcs électriques.

Ils sont caractérisés par un fort dégagement de chaleur (la température est très élevée au niveau de l'arc), ce qui peut entraîner des accidents plus ou moins graves :

- incendies : les équipements électriques prennent feu ;
- brûlures : lors d'opération de maintenance ou pendant la phase des travaux, les intervenants sont susceptibles, s'ils ne sont pas formés, de créer des arcs électriques. La brûlure peut être directe (au niveau des mains et des avant-bras) ou indirecte (au niveau du visage par évaporation de l'âme du conducteur sous forme de micropoussières brûlantes, suite à la formation de l'arc électrique).

Mesure de protection

Afin de protéger les biens et les personnes contre les arcs électriques, il est prévu plusieurs mesures de sécurité :

- en cas d'intervention, toujours couper l'installation. Le sens de coupure doit s'effectuer d'abord en coupant l'interrupteur du coffret CA (côté alternatif), puis en arrêtant l'onduleur, et enfin en ouvrant l'interrupteur CC (côté continu). La coupure de l'installation permet de supprimer tout courant, ce qui réduit le risque d'apparition d'arc électrique ;
- les câbles doivent être de type C2, c'est-à-dire non-propagateur de la flamme ;
- chaque couple de connecteurs mâle-femelle à assembler doit être de même type et de même marque. On s'assurera que la connexion est correctement réalisée ;

- les intervenants doivent être munis de gants et d'une protection faciale.

Les risques d'électrocution

L'électrisation est le passage de courant électrique dans le corps humain. Lorsque cela entraîne le décès, on parle d'électrocution. L'électrisation a pour origine un contact direct ou un contact indirect. Le contact direct est l'action d'entrer en contact avec l'âme d'un conducteur du circuit



Connecteurs mal branchés susceptibles de produire des arc électriques.



Connecteurs bien branchés.

électrique. Le contact indirect est l'action d'entrer en contact avec un objet qui est lui-même en contact direct avec l'âme d'un conducteur. Le courant et la tension dans un circuit peuvent être soit continus, soit alternatifs. Le corps humain



Gant isolant de protection.



Protection faciale.

est capable de supporter le passage d'un courant ou une mise sous tension (récapitulatif dans le tableau ci-dessous).

Compte tenu de la résistance électrique du corps humain ($\approx 1\,000\,\Omega$), il existe un seuil de tension potentiellement mortel pour l'homme, à savoir :

- 50 V alternatif (fréquence 50 Hz) ;
- 120 V continu.

Cette limite de tension permet de définir le domaine de la très basse tension et de la basse tension :

	Alternatif	Continu
Très basse tension (TBT)	$U < 50\text{ V}$	$U < 120\text{ V}$
Basse tension (BT)	$50\text{ V} < U < 1\,000\text{ V}$	$120\text{ V} < U < 1\,500\text{ V}$

Dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau, le domaine de tension sera généralement toujours celui de la basse tension. Par conséquent, toute intervention sur ce type d'installation comporte un risque potentiellement mortel pour l'intervenant.

Effets du courant électrique sur le corps humain	
Courant alternatif 50 Hz	Effets électriques
0,5 mA	Seuil de perception - Sensation très faible
10 mA	Seuil de non-lâché - Contraction musculaire
30 mA	Seuil de paralysie - Paralysie ventilatoire
75 mA	Seuil de fibrillation cardiaque irréversible
1 A	Arrêt du cœur
Courant continu	Effets électriques
2 mA	Seuil de perception
130 mA	Seuil de fibrillation cardiaque
300 mA	Seuil d'inconscience

Il est à noter que le fait de couper l'installation photovoltaïque permet de supprimer tout courant dans le circuit. Cependant, les modules photovoltaïques, soumis au rayonnement diurne, fournissent toujours une tension dans le domaine de la basse tension ($120 \text{ V} < U < 1\,500 \text{ V}$). Ainsi, tout contact entre la borne + et la borne – d'une chaîne photovoltaïque peut s'avérer mortel.

Sur l'exemple ci-dessous, la chaîne est constituée de neuf modules en série. Lorsqu'on coupe cette chaîne (ouverture de l'interrupteur), on coupe le courant : $I = 0 \text{ A}$. Cependant, les modules continuent à fournir une tension égale à la tension à vide U_{co} (dont la valeur vaut typiquement 30 V). Aux bornes de la chaîne, la tension est égale à la somme des tensions de chaque module, soit $9 \times U_{\text{co}}$. Cette tension est potentiellement mortelle.

Ainsi, il est essentiel de se munir de gants isolants.

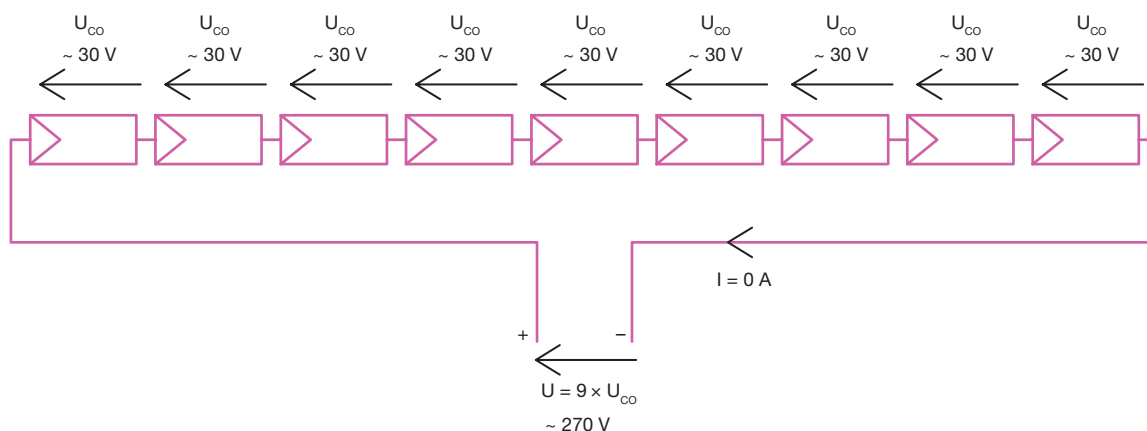
Au préalable, il est impératif de tester l'absence de tension sur les composants CC avant de toucher un quelconque composant du système. Le vérificateur d'absence de tension (VAT) permet de vérifier cette absence. Dans le cas d'une tension existante, les pratiques de travail sous tension doivent être adoptées (utilisation de gants et d'outils isolants, paillasse isolant).



Intervention sur un coffret électrique.

De même, afin d'éviter tout contact indésirable, on s'abstiendra d'effectuer des opérations électriques sur l'installation avec des personnes à proximité.

En outre, il est prévu, pour la réalisation des opérations électriques, que les intervenants présentent des aptitudes dans le domaine de la protection des personnes et des biens. Il est notamment préconisé que l'intervenant dispose de l'habilitation électrique de niveau BR.



Tension en circuit ouvert d'une chaîne photovoltaïque.

Composante bâtiment

La pose des modules sur la toiture fait appel à des compétences de couvreurs et d'étancheurs.

Couverture et étanchéité

Les documents techniques unifiés (DTU) contiennent les règles techniques relatives à l'exécution des travaux de bâtiment. Les DTU ont valeur de

normes. Ils sont reconnus et approuvés par les professionnels de la construction et servent de référence aux experts des assurances et des tribunaux. Leur non-respect peut entraîner l'exclusion des garanties offertes.

Les DTU

Les DTU spécifiques à la couverture définissent les règles de mise en œuvre d'un élément de cou-

DTU applicables aux types de couvertures les plus fréquemment rencontrés		
Couvertures métalliques	Étanchéité	Couverture de petits éléments
Bac acier nervuré DTU 40.35	Gros œuvre en maçonnerie des toitures destinées à recevoir un revêtement d'étanchéité DTU 20.12	Couverture en ardoises naturelles DTU 40.11
Bac aluminium nervuré DTU 40.36	Fascicule 3502 Étanchéité des toitures par membranes monocouches synthétiques en PVC-P non compatibles avec le bitume	Couverture en ardoises en fibres ciment DTU 40.13
Bac alu grande portée Avis techniques	Étanchéité sur bac acier DTU 43.3	Couverture en tuiles de terre cuite à emboîtement ou à glissement à relief DTU 40.21
Feuilles en zinc DTU 40.41	Étanchéité sur panneaux de bois DTU 43.4	Couverture en tuiles de terre cuite à emboîtement à pureau plat DTU 40.211
Couverture par éléments métalliques en feuilles et longues feuilles en acier inoxydable NF DTU 40.44	Étanchéité des toitures-terrasses et toitures inclinées avec éléments porteurs en maçonnerie en climat de plaine DTU 43.1	Couverture en tuiles canal de terre cuite DTU 40.22
Feuilles en cuivre DTU 40.45	Mise en œuvre des toitures en tôles d'acier nervurées avec revêtement d'étanchéité NF DTU 43.3	Couverture en tuiles plates de terre cuite DTU 40.23
Travaux de couverture en plomb sur support continu DTU 40.46		Couverture en tuiles en béton à glissement et à emboîtement longitudinal DTU 40.24
Couverture en plaques nervurées issues de tôles d'acier revêtues DTU 40.35		Couverture en tuiles planes en béton à glissement et à emboîtement longitudinal DTU 40.241
Couverture en plaques en aluminium prélaqué ou non DTU 40.36		Couverture en tuiles plates en béton DTU 40.25
Couverture par éléments métalliques en feuilles et longues feuilles en zinc DTU 40.41		
Couverture par éléments métalliques en feuilles et longues feuilles en cuivre DTU 40.45		

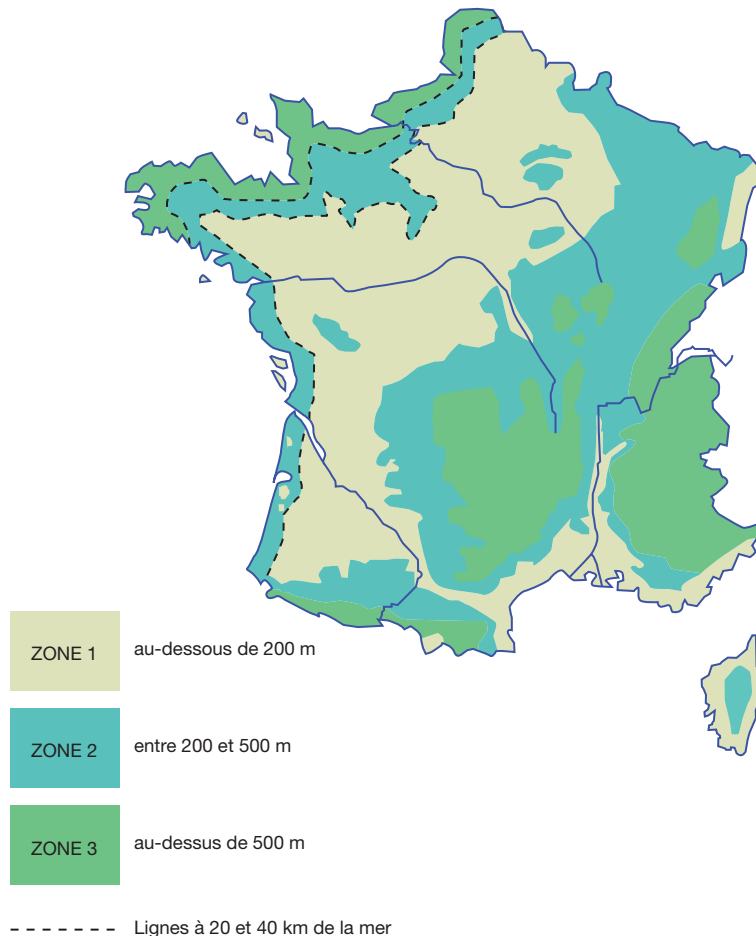
verture. Les DTU sont fournis par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

La mise en œuvre de modules photovoltaïques sur une toiture existante implique, pour l'entreprise qui réalise les travaux, la fourniture d'une garantie décennale qui s'appliquera non seulement sur la partie remplacée, mais plus généralement sur l'ensemble de la toiture existante. Ainsi, l'entreprise, avant de procéder aux travaux de modification de la toiture existante en vue de l'intégration du générateur ou même de sa pose en surimposition, devra s'assurer de la conformité de la toiture existante ainsi que de son bon état d'entretien général.

D'un point de vue général, les DTU définissent les règles de l'art et les conditions de mise en œuvre des matériaux en fonction des caractéristiques du site. Ces caractéristiques sont typiquement :

- les données climatiques de la zone géographique ;
- l'altitude ;
- l'exposition au vent ;
- la présence d'écran sous la toiture.

Ces quatre critères vont définir un certain nombre de propriétés que devra respecter la toiture, notamment sa pente minimale.



Exemple de carte de concomitance vent-pluie.

Les données climatiques sont fournies par des cartes de concomitance vent-pluie qui caractérisent des secteurs géographiques (en fonction de l'altitude). Ces cartes définissent des zones. Elles sont uniques par type d'élément de couverture. Par exemple, pour les tuiles dites « canal », la carte de concomitance vent-pluie est donnée page précédente.

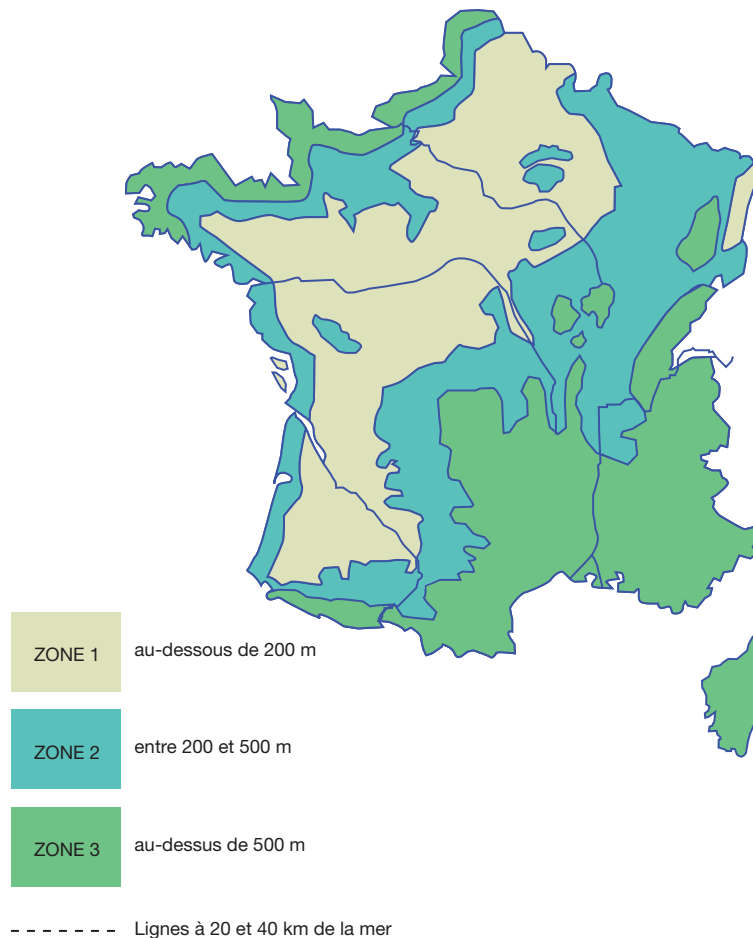
D'après cette carte, une implantation à Marseille située à une altitude supérieure à 500 m est associée à la zone 1.

Mais, si on met en œuvre de la feuille métallique, la carte est différente (et donnée ci-dessous).

Dans ce cas, l'implantation précédente correspond à la zone 3.

Pour chaque zone, l'étape suivante consiste à déterminer le taux d'exposition au vent. Celui-ci prendra en compte les effets du vent dominant sur le projet et permettra de classer le site en trois sous-catégorie :

- situation protégée : fond de cuvette entouré de collines sur tout son pourtour et ainsi protégé pour toutes les directions du vent. Terrain bordé de collines sur une partie de son pourtour correspondant à la direction des vents les plus violents et protégé pour cette direction de vent ;



Autre exemple de carte de concomitance vent-pluie.

- situation normale : plaine ou plateau pouvant présenter des dénivellations peu importantes, étendues ou non (vallonnements, ondulations) ;
- situation exposée :
 - au voisinage de la mer, soit littoral (jusqu'à 5 km), sommet des falaises, îles ou presqu'îles étroites, estuaires ou baies encaissées et profondément découpées dans les terres ;
 - à l'intérieur du pays : vallées étroites où le vent s'engouffre, montagnes isolées et élevées et certains cols.

Un autre des critères prévus par les DTU pour la mise en conformité des divers matériaux est la présence ou l'absence d'écran de sous-toiture.

Les quatre critères présentés permettent ainsi de définir les propriétés de la toiture. Par exemple, la pente minimale de la toiture est déterminée grâce à des tableaux (voir ci-dessous, les chiffres correspondent à des pentes exprimées en pourcentage – à titre d'exemple, 35 % signifie 35 cm d'élévation par mètre de projection horizontale).

Ainsi, à Marseille, zone 1, exposition au vent normal, sans écran, pour des tuiles grand moule



Écran sous toiture

Un écran de sous-toiture peut être souple ou rigide et constitué soit d'un matériau en rouleau de type pare-pluie (perméable à la vapeur mais étanche à l'eau liquide) soit d'une plaque de bois (à emboîtement ou jointive), tels contreplaqué, OSB ou volige.

Il est posé entre le comble et la face interne des tuiles.

– Il permet l'abaissement des pentes de couverture dans une proportion de 1/7 de la valeur de pente sans écran.

– Il réduit l'aspiration entre les tuiles et donc le siphonage des éléments par l'équilibre des pressions et dépressions qui s'exercent de part et d'autre de la couverture.

Les écrans souples relèvent de l'Avis technique. Celui-ci précise les conditions de mise en œuvre en fonction des performances de l'écran.

L'écran souple est fixé tendu sur les chevrons et le niveau d'appui des liteaux est relevé par une contre-latte d'une épaisseur minimale de 20 mm, clouée sur la face supérieure du chevron. (Cahier du CSTB 3651-2 de janvier 2009).

conformes au DTU 40.21, il faut une pente minimale de 40 %.

Noter qu'en cas d'utilisation de tuiles sous avis technique la pente minimale peut être revue à la baisse.

Connaître la pente minimale de la toiture

Tuile catégorie grand moule

Sans écran	Zones d'application		
Sites	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Protégé	0,35	0,35	0,50
Normal	0,40	0,50	0,60
Exposé	0,60	0,70	0,80

Tuile catégorie petit moule

Sans écran	Zones d'application		
Sites	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Protégé	0,40	0,50	0,60
Normal	0,50	0,60	0,70
Exposé	0,70	0,80	0,90

Avec écran	Zones d'application		
Sites	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Protégé	0,30	0,30	0,45
Normal	0,45	0,45	0,50
Exposé	0,50	0,60	0,70

Avec écran	Zones d'application		
Sites	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Protégé	0,35	0,45	0,50
Normal	0,45	0,50	0,60
Exposé	0,60	0,70	0,75