

Août 2019

Guide pour l'exploitation du photovoltaïque

Auteurs

Christian Moll, responsable technologie photovoltaïque, Swissolar

Jörg Rothenbühler, REVELIO GmbH

Avec le soutien de Sylvia Schüpbach, avocate
et de Peter Toggweiler, Basler & Hofmann AG

**Cette étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
Les auteurs sont les seuls responsables du contenu.
Par souci de simplicité, seule la forme masculine est utilisée.**

Adresse

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie OFEN
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale : CH-3003 Berne
Infoline 0848 444 444, www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/infoline
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.suisseenergie.ch, twitter.com/suisseenergie

Avant-propos

A fin 2018, les installations photovoltaïques (installations PV) construites en Suisse atteignaient une puissance totale d'environ 2200 MW, ce qui correspond à environ 3,4 % de la production d'électricité suisse. Le photovoltaïque deviendra à moyen terme un important pilier de la transition énergétique en Suisse ! Une planification et une installation dans les règles de l'art sont déterminantes pour garantir un fonctionnement sûr et économique des installations PV. Des installations PV qui fonctionnent bien suscitent la confiance de la population dans cette technologie. Les installations PV doivent être installées conformément aux règles de l'art, mais il est également particulièrement important qu'elles restent dans un état correct et sûr pendant leur durée de fonctionnement d'environ 30 ans, afin que les rendements prévus puissent être atteints. Une surveillance à distance opérationnelle et, si nécessaire, un entretien de l'installation permettent de garantir un bon fonctionnement.

Ce guide contient des informations concernant les principaux aspects qu'il convient de prendre en compte lors de la mise en service et de la réception d'une installation PV. Il se conçoit comme un guide pratique qui a pour finalité de conseiller aussi bien les maîtres d'ouvrage que les installateurs solaires. Par ailleurs, ce guide inclut des recommandations concernant la surveillance des installations, leur maintenance et l'analyse des défauts. Il aborde également des aspects juridiques, notamment concernant la maintenance ainsi que les garanties et les périodes de garantie.

Sommaire

1	Procédure pour la mise en service et le contrôle final	5
1.1	Contrôles effectués sur la base des prescriptions de l'ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT)	6
2	Surveillance de l'installation PV	10
2.1	Comment la surveillance peut-elle être effectuée ?	10
2.1.1	Systèmes de surveillance et possibilités de transfert	10
2.1.2	Interface de données des systèmes de surveillance et possibilités de transfert	11
2.1.3	Surveillance par module	12
2.2	Problèmes de surveillance	12
2.3	Quelles erreurs la surveillance permet-elle d'identifier ?	13
2.4	Quels sont les systèmes de surveillance disponibles sur le marché ?	13
3	Tâches et obligations des exploitants d'installations	15
3.1	Garanties, prestations de garantie et réclamations	15
3.2	Quelles assurances sont vraiment nécessaires ?	17
4	Maintenance	19
4.1	Quand et à quelle fréquence une maintenance est-elle nécessaire ?	19
4.2	Qui propose une maintenance ?	20
4.3	Quelles mesures convient-il de mettre en œuvre dans le cadre de la maintenance ?	21
4.4	Mesures nécessaires dans le cadre d'une maintenance	24
4.5	Conditions préalables applicables à la maintenance	26
4.6	Quelles mesures de sécurité au travail convient-il de respecter pendant la maintenance ?	27
4.7	Évaluation des principaux points d'un contrat de service	28
4.8	Nettoyage dans les règles de l'art de l'installation PV	30
4.9	Élimination de la neige, contrôle des pare-neige	31
4.10	Installation PV sur une toiture végétalisée	32
4.11	Contrôles optionnels dans le cadre d'une maintenance : thermographie, électroluminescence	34
4.12	Contrôle de la puissance des modules dans des laboratoires de contrôle	35
5	Les Pros du solaire : des entreprises spécialisées contrôlées	36
6	Glossaire	37
7	Table des illustrations	38

1 Procédure pour la mise en service et le contrôle final¹

Le contrôle final constitue généralement l'achèvement de l'installation PV. Conformément à l'art. 24, al. 3 de l'ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT), le contrôle final représente la remise et le moment à partir duquel une partie ou la totalité d'une installation électrique est utilisée conformément à sa destination. Il marque le transfert de responsabilité du constructeur au donneur d'ordre. Le contrat d'entreprise est, dans ce contexte, conclu en vertu du Code des obligations (CO) (sauf convention spéciale) ou en vertu de la norme SIA² correspondante (à convenir expressément).

Si le contrat est conclu selon la norme SIA, l'entrepreneur est tenu de signaler l'achèvement des travaux ; selon le CO, le maître d'ouvrage est tenu de vérifier l'ouvrage et de faire part à l'entrepreneur de tout défaut. Ce transfert est judicieusement lié au contrôle final. Lors de ce contrôle, il convient de déterminer si les travaux sont terminés dans leur intégralité et si l'installation est opérationnelle. Les résultats doivent être consignés dans un procès-verbal. La date du contrôle final constitue la date de début de la période de garantie et de l'élimination des défauts.

Il convient au minimum de consigner les informations suivantes au procès-verbal :

- informations générales sur l'installation PV (objet de construction, maître d'ouvrage, entrepreneur, contrat d'entreprise, spécifications techniques de l'installation PV), date de réception ;
- contrôle du contenu de livraison convenu ;
- contrôle de fonctionnement, si non déjà effectué par ailleurs ;
- état de la réception (éventuels défauts, délai imparti pour leur élimination, etc.) ;
- liste des mesures existantes.

La SIA met à disposition un modèle de procès-verbal pour cette réception (contre paiement).

¹ Fiche technique Swissolar Photovoltaïque n° 8 « Procès-verbal de réception et de mise en service », faisant partie des « Fiches techniques Photovoltaïque Suisse », disponible sur <https://www.swissolar.ch/fr/pour-professionnels/materiel-photovoltaique/notices-techniques>

² Généralement SIA 118 dans la version la plus actuelle

1.1 Contrôles effectués sur la base des prescriptions de l'ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT)

Ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT)

L'OIBT régit les conditions préalables applicables aux travaux réalisés sur les installations électriques à basse tension et au contrôle de ces installations. Elle soumet de principe les travaux d'installation à une obligation d'autorisation.

Concernant les nouvelles installations PV, l'OIBT prévoit les contrôles ci-après pour la mise en service et la remise aux maîtres d'ouvrage. L'installateur compile les documents requis pour les contrôles prescrits et les transmet aux organismes de contrôle (p. ex. organismes de contrôle indépendants, ESTI, etc.). Le maître d'ouvrage est contacté par les différents organismes de contrôle et doit leur permettre l'accès à l'installation.

Obligations du propriétaire

Toute personne qui exploite une installation électrique a également des obligations légales : elle est tenue de veiller à ce que l'installation fonctionne en toute sécurité et, dans la mesure du possible, sans perturbation. En qualité d'exploitant de l'installation, le propriétaire n'est en général pas un spécialiste (au sens de l'OIBT), mais un profane. Il est tenu de conserver les documents techniques de l'installation et de pouvoir apporter une preuve de sécurité. Cette preuve ne pouvant être établie par un profane, il est tenu de mandater un tiers. Cette mission ne peut être réalisée que par une personne compétente et habilitée (cf. section « Contrôle indépendant »).

Le propriétaire est par ailleurs tenu de faire éliminer les défauts immédiatement. L'élimination des défauts ne doit également être effectuée que par des personnes dûment formées et autorisées.

Inspection initiale effectuée parallèlement à la construction

Il convient de réaliser une première vérification parallèlement à la construction avant la mise en service d'une installation électrique ou de ses éléments. Conformément à l'art. 14, al. 1, de l'ordonnance du DETEC sur les installations électriques à basse tension³, il convient d'établir un procès-verbal de mesure et de contrôle officiel pour l'inspection initiale.

Cette première vérification de l'installation PV doit être consignée au procès-verbal et documentée. Le rapport de contrôle doit inclure les points suivants :

- description sommaire du système (nom, adresse, etc.) ;
- liste de tous les circuits électriques inspectés et testés ;
- rapport sur l'inspection ;
- rapport sur les résultats des contrôles pour chaque circuit électrique testé ;
- signature de la (des) personne(s) ayant effectué le contrôle ;

³ <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20173115/index.html>

- renseignements sur la personne responsable de la construction et de la vérification du système, ainsi que sur l'étendue de sa responsabilité.

Ces mesures ne doivent être effectuées que par des personnes dûment qualifiées avec des instruments de mesure appropriés. Les exigences applicables à ces personnes sont décrites à l'art. 10 et à l'art. 25 OIBT.

Contrôle final interne à l'entreprise

Un contrôle final doit être réalisé avant la remise d'une installation électrique au propriétaire. Ce contrôle doit être effectué par une personne compétente ou habilitée, sur la base d'un procès-verbal de mesure et de contrôle ainsi que d'un rapport de sécurité. Dans le cas d'une autorisation d'installer limitée (en vertu de l'art. 14 OIBT), les personnes mentionnées dans l'autorisation effectuent une première vérification ou un contrôle final des travaux réalisés et établissent un procès-verbal de mesure et de contrôle. Elles y apposent leur signature et le tiennent à la disposition des organismes de contrôle. Le rapport de sécurité établi lors du contrôle final doit être remis au propriétaire à la réception de l'installation. Le titulaire d'une autorisation d'installer limitée remet au propriétaire et au gestionnaire de réseau le procès-verbal du contrôle final des travaux réalisés. La date à laquelle une installation électrique est utilisée en partie ou dans son intégralité conformément à sa destination est considérée comme date de remise (art. 24, al. 3 de l'OIBT).

Contrôle indépendant

Une installation PV doit être vérifiée par un organisme de contrôle indépendant ou un organisme d'inspection accrédité dans un délai de six mois à compter de sa réception. Le contrôle de réception indépendant à partir du commutateur AC de l'installation réalisée par un installateur possédant une autorisation d'installer générale, peut être effectué par un organisme de contrôle indépendant ou accrédité. Un contrôle de réception par un organisme d'inspection accrédité est obligatoire si l'installation a été effectuée par le porteur d'une autorisation d'installer limitée. Il convient également de transmettre dans ce délai le rapport de sécurité établi lors du contrôle de réception au gestionnaire de réseau compétent et/ou, le cas échéant, à l'ESTI (art. 35, al. 3 de l'OIBT). Pour les installations < 30 kVA soumises à une obligation d'approbation des plans, l'ESTI peut également, dans le cadre du contrôle de réception et en vertu de l'ordonnance sur la procédure d'approbation des plans des installations électriques (OPIE), effectuer le contrôle indépendant conformément à l'art. 35, al. 3 de l'OIBT, pour autant que le rapport de sécurité pour la partie AC, le procès-verbal de mesure et de contrôle photovoltaïque pour la partie DC et la documentation complète soient disponibles.

Où puis-je trouver les organes de contrôle ?

Les contrôleurs effectuant un contrôle indépendant sont répertoriés sous :

<https://verzeichnisse.esti.ch/fr/aikb.htm>

Les organismes d'inspection accrédités sont répertoriés ici :

<https://www.sas.admin.ch/sas/fr/home/akkreditiertestellen.html> (Mot de recherche: OIBT / Type d'accréditation: SIS - Organisme d'inspection)

Contrôles ESTI pour les installations d'une puissance supérieure à 30 kVA⁴

Les installations PV d'une puissance supérieure à 30 kVA sont soumises à une obligation d'approbation des plans. Pour ces installations PV, l'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI) contrôle, après l'achèvement, si l'installation a été réalisée conformément aux prescriptions et aux plans approuvés.

Contrôles périodiques en vertu de l'ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT)

Les recommandations et les résultats des contrôles précédents doivent être pris en compte lors du contrôle périodique. Par ailleurs, un rapport de contrôle du contrôle périodique faisant état de toutes les anomalies et recommandations de réparation ou d'amélioration doit être présenté.

Certification des installations PV⁵

La société Pronovo AG est le centre de compétence de la Confédération pour la gestion de la production d'énergies renouvelables (<http://www.pronovo.ch>). Elle gère, entre autres, le système de rétribution de l'injection (SRI), la rétribution unique (RU) et la garantie d'origine (GO) pour le compte de la Confédération. La certification des installations et des données de production permet de garantir que l'utilisation des subventions publiques (RU) est justifiée. Les organismes de certification sont des gestionnaires de réseau ou des auditeurs. La certification des installations doit être effectuée par un auditeur en possession d'un agrément du Service d'accréditation suisse (SAS) et être réalisée dans le cadre d'une visite sur place et d'une vérification des documents présentés. Les installations d'une puissance de raccordement maximale de 30 kVA (puissance nominale côté courant alternatif) peuvent être certifiées par le gestionnaire de réseau compétent (gestionnaire du point de mesure), à condition qu'il soit légalement dissocié de l'exploitant de l'installation. La certification des installations d'une puissance inférieure à 30 kW peut désormais également être effectuée par un organe de contrôle indépendant dans le cadre du contrôle indépendant. L'optimisation temporelle permet ainsi d'économiser des coûts. L'exploitant d'une installation est responsable de la réalisation d'une certification. Il est tenu de mandater un auditeur ou le gestionnaire de réseau à cet effet. Une liste des auditeurs accrédités est disponible sur le lien suivant : <https://pronovo.ch/fr/services/formulare>.

Instruction du maître d'ouvrage

Dès que possible après la mise en service, l'exploitant de l'installation doit être initié à l'utilisation de l'installation à l'aide de la documentation de l'installation. Les principaux composants de l'installation et leurs fonctionnalités doivent lui être expliqués par le constructeur de l'installation. En font par exemple partie : l'explication des affichages d'écran de l'onduleur, d'un accumulateur de courant ou d'un système de surveillance. Si cela n'a pas encore été clarifié, il convient de définir avec l'exploitant de l'installation qui est responsable de la surveillance de l'installation. Si le maître d'ouvrage assume lui-même la surveillance, il doit être informé de ses obligations (contrôle

⁴ Directive n° 233, version 0918 f – Installations de production d'énergie photovoltaïque (IPE-PV)

⁵ Guide relatif à la certification d'installations de production et de données de production, Pronovo

de la surveillance de l'installation et notification en temps opportun des messages d'erreur), la forme écrite étant recommandée. Si la surveillance est effectuée par l'entreprise d'installation, les tâches et obligations doivent être réglementées dans un contrat de service (cf. 4.7).

Documentation de l'installation

La documentation de l'installation doit être établie par l'installateur conformément à la norme « SN EN 62446-1:2016⁶ Systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique - Exigences minimales pour la documentation du système, les essais de mise en service et l'examen ». Elle doit être disponible sur le site à proximité de l'installation et contenir au minimum ce qui suit :

1. généralités, adresses, renseignements sur le propriétaire de l'objet, renseignements sur le propriétaire de l'installation PV, emplacement de l'installation, entreprises exécutantes, date ;
2. données du système (identification du projet, puissance assignée du système en kW DC ou kVA AC, modules PV et onduleurs [fabricant/modèle/nombre], date de l'installation et date de la mise en service) ;
3. fiche d'information « Procédure en cas d'anomalie » selon la norme SN EN 62446-1:2016 ;
4. résultats des contrôles et informations sur la mise en service, y compris le rapport de sécurité ainsi que le procès-verbal de mesure et de contrôle ;
5. preuve du contrôle de réception (entre le maître d'ouvrage et l'installateur) ;
6. schéma de principe (schéma électrique) AC et DC ;
7. schéma des strings/chaînes (vue d'ensemble de la connexion des chaînes de modules : plusieurs modules sont connectés en un champ photovoltaïque) ;
8. plan de protection contre la foudre avec points de raccordement et attestation de l'assurance du bâtiment, uniquement requise en cas de bâtiments soumis à une obligation de protection contre la foudre, respectivement en cas d'existence d'une protection contre la foudre ;
9. fiches techniques (documentations des composants utilisés : modules, onduleurs, sous-construction, câbles solaires, surveillance à distance, protection contre les surtensions, boîtier de connexion du générateur, tableau de comptage, équipement de sécurité [dispositifs anti-chute], le cas échéant accumulateur électrique et station de charge), conformités, informations sur les conditions de garantie des composants, documents d'autorisation (Pronovo, EAE, si nécessaire permis de construire) ;
10. indications relatives à la sous-construction mécanique (preuve statique) ;
11. indications relatives à l'exploitation et la maintenance ;
12. description de la manière dont la réglementation en matière de sécurité et de santé au travail est respectée pendant les travaux réalisés sur le toit (p. ex. indication des points d'ancrage). Les exigences sont correctement décrites dans la fiche technique de la Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents (Suva) « Intervenir en toute sécurité sur les toits »⁷

⁶ Fiche technique Swissolar Photovoltaïque n° 8 « Procès-verbal de réception et de mise en service », faisant partie des « Fiches techniques Photovoltaïque Suisse », disponible sur <https://www.swissolar.ch/fr/pour-professionnels/materiel-photovoltaique/notices-techniques>

⁷ Intervenir en toute sécurité sur les toits : <https://www.suva.ch/de-CH/material/Dokumentationen/sicher-zu-energie-vom-dach-montage-und-instandhaltung-von-solaranlagen-44095-d-40954-40954#uxlibrary-from-search>

2 Surveillance de l'installation PV

Swissolar recommande un monitoring (surveillance de l'installation) pour toutes les installations PV, car un contrôle individuel et continu de la production via l'affichage de l'onduleur sur une période de 20 à 25 ans n'est pas réaliste. La surveillance permet d'identifier les dysfonctionnements ou les pannes de l'installation. Les messages d'avertissement peuvent, par exemple, être transmis par e-mail, fax ou SMS. Par ailleurs, la production de l'installation pendant toute la durée d'exploitation peut être visualisée sur la base de valeurs annuelles, mensuelles et horaires. Un enregistreur de données pouvant être utilisé pour la surveillance à distance est déjà intégré dans la plupart des onduleurs. Une connexion Internet est requise afin de pouvoir accéder au portail respectif du fabricant de l'onduleur. Outre les systèmes intégrés aux onduleurs, il existe également des systèmes de surveillance indépendants des onduleurs. Une vue d'ensemble des systèmes les plus utilisés en Suisse est décrite au chapitre 2.4. La surveillance permet de garantir la rentabilité de l'installation PV et, en cas de messages d'erreur, de procéder en temps opportun à l'élimination des défauts et à une maintenance consécutive.

2.1 Comment la surveillance peut-elle être effectuée ?⁸

2.1.1 Systèmes de surveillance et possibilités de transfert

Il existe plusieurs possibilités de surveiller l'installation à distance.

Enregistreur de données

Un enregistreur de données externe permet de surveiller indépendamment du produit différents types d'onduleurs de divers fabricants. Si plusieurs installations sont surveillées, toutes les productions peuvent être visualisés sur un seul portail (cf. sous 2.4.).



Illustration 1 : BE Netz AG, enregistreur de données

⁸ Documents de formation continue « Formation solaire Suisse », acquisition sur le site www.swissolar.ch/fr/pour-professionnels/formation/formation-solaire-suisse

Systèmes intégrés aux onduleurs

La plupart des onduleurs utilisés actuellement disposent d'une fonction de surveillance intégrée qui peut être utilisée gratuitement pour la surveillance à distance.

Lecture des compteurs

Un système de surveillance des installations à distance basé sur des compteurs permet de contrôler principalement les valeurs de production d'une installation PV. Pour de tels systèmes, des données météorologiques précises sont utilisées pour la production théorique. Ces données peuvent en grande partie être mises à disposition pour un site précis : d'une part via l'accès à un réseau cohérent de stations météorologiques et d'autre part via un propre capteur de rayonnement monté sur l'installation PV. Pour les capteurs de rayonnement, il est important que la cellule de référence ne soit pas encrassée, car dans le cas contraire, on se base sur une production théorique erroné. La production effectivement mesurée par le compteur constitue la production réelle. En cas d'écarts importants entre la production théorique et la production réelle, un message d'erreur est envoyé à l'exploitant de l'installation. Le système peut également être utilisé en complément des systèmes intégrés aux onduleurs.

2.1.2 Interface de données des systèmes de surveillance et possibilités de transfert

Il existe différentes interfaces de données et possibilités de transfert qui peuvent être utilisées en fonction de la situation de l'installation.

Ethernet

La variante la plus économique et la plus fiable par rapport à un réseau existant est une connexion Ethernet câblée (câble LAN). Cela nécessite qu'un réseau général existant soit disponible. Le raccordement par câble de l'onduleur ou de l'enregistreur de données garantit une haute fiabilité et une insensibilité aux perturbations. Cette variante est celle qui consomme le moins d'énergie.

Réseau local Powerline

Une autre solution consiste à utiliser le câblage du réseau local de 230V AC pour la communication avec le routeur. Pour ce faire, un adaptateur PLC (adaptateur PowerLine Communication) est branché sur une prise au point de départ (routeur) et au point final (onduleur ou enregistreur de données), l'adaptateur étant muni d'une sortie Ethernet des deux côtés. Ce type de communication est quelque peu plus sujet aux défaillances qu'un câble Ethernet et peut être source de problèmes pour les personnes qui sont sensibles aux interférences électromagnétiques. Ce système est principalement utilisé dans les endroits où la pose d'un câble Ethernet est liée à un investissement important. Toutefois, le système ne fonctionne qu'à l'intérieur d'un même circuit électrique (même groupe de sécurité). La transmission sur différents circuits électriques n'est possible que sous certaines conditions et est vulnérable. Les informations du fabricant des systèmes concernés doivent être respectées.

Réseau local sans fil

Il est également possible d'utiliser une liaison radio sans fil si elle est prise en charge par l'onduleur ou l'enregistreur de données. Ce type de connexion est souvent sujet aux défaillances, notamment lorsque l'onduleur ou l'enregistreur est éloigné de la base radio. Le réseau local sans fil est avant tout utilisé dans les endroits où un réseau câblé ne peut être réalisé qu'avec un investissement important.

Téléphonie mobile

Si aucun réseau local n'est disponible ou si l'enregistreur de données ne peut pas être intégré au réseau local pour des raisons de sécurité informatique, l'enregistreur de données peut être connecté via le réseau de téléphonie mobile. Dans ce cas, il convient de veiller à utiliser un standard radio qui sera pris en charge également dans le futur par les fournisseurs de téléphonie mobile. Il est conseillé de toujours travailler avec un modem cellulaire externe (modem LTE), afin qu'il puisse être remplacé si nécessaire. Par ailleurs, il convient de veiller à ce que la réception sur le site choisi soit stable. La plupart des fournisseurs de télécommunications proposent des abonnements spéciaux à des coûts relativement faibles.

2.1.3 Surveillance par module

Il existe à cet effet des onduleurs de modules (micro-onduleurs) ou des systèmes de surveillance par module. Les micro-onduleurs, avec un onduleur par module, permettent de visualiser et de surveiller la production de chaque module. Il est ainsi possible d'identifier les anomalies d'un module spécifique. C'est en même temps également un onduleur. Pour les installations dotées d'un onduleur string, il est également possible d'équiper ultérieurement les modules avec un système de surveillance individuel des modules. Cela permet de surveiller les tensions, les courants et la température, ainsi que de visualiser le rendement de chaque module.

2.2 Problèmes de surveillance

Divers problèmes peuvent survenir lors de la surveillance d'une installation. Ainsi, à titre d'exemple, il convient de s'assurer qu'il n'existe pas de problème de communication, ce qui signifie qu'une liaison de données ou radio doit être suffisamment bonne. Une configuration incorrecte peut être exclue si les premiers messages de rendement affichent des valeurs réalistes. Il y a lieu de vérifier ce point en collaboration avec l'entreprise d'installation. Il existe aujourd'hui de nombreux fournisseurs d'onduleurs avec surveillance intégrée. La question de savoir si la qualité de cette surveillance intégrée dans les onduleurs est suffisante ou s'il convient d'utiliser une solution externe peut également être évaluée par l'entreprise d'installation. La plupart des messages d'erreur émis par le système de surveillance ne sont pas clairs. En conséquence, le maître d'ouvrage doit pouvoir, notamment s'il est lui-même responsable de la surveillance de l'installation, identifier clairement les messages d'erreur pertinents (perte de rendement, défaut de communication). Il existe également un risque que les adresses des destinataires de messages d'erreur changent et qu'elles ne soient pas adaptées en conséquence. De même, une boîte aux lettres pleine peut empêcher l'arrivée d'un message d'erreur.

2.3 Quelles erreurs la surveillance permet-elle d'identifier ?

La surveillance permet entre autres de déterminer les pertes de rendement de l'installation dues à l'ombrage et à l'encrassement ou des défauts des modules et des onduleurs. Dans de tels cas, le système de surveillance signale des diminutions ou des pertes totales de production.

Une diminution de la production dû à un ombrage peut, par exemple, être déterminée via une cellule solaire de référence. La cellule de référence mesure le rayonnement solaire réel et le compare avec la production de l'installation. En cas d'ombrage, un écart par rapport au rendement théorique est signalé. Les diminutions de production dues à un encrassement de l'installation peuvent aussi être détectées. La condition préalable à cet effet est toutefois que la cellule de référence ne soit pas encrassée. Un ajustement est également possible au moyen de données météorologiques pour une région spécifique ou, s'il y a plusieurs chaînes de modules, via une comparaison de la production des différents onduleurs (par chaîne) les uns avec les autres.

De plus, les défauts d'isolation causés par des défauts des modules ou des endommagements du câblage peuvent être détectés et signalés. Les anomalies de communication (aucun transfert de données et de ce fait aucune visualisation du rendement) peuvent également être identifiées. L'exploitant de l'installation reçoit, dans les cas décrits, un message d'avertissement avec la désignation de l'erreur correspondante.

2.4 Quels sont les systèmes de surveillance disponibles sur le marché ?

On utilise aussi bien des systèmes de surveillance intégrés aux onduleurs que des systèmes de surveillance externes. La plupart des onduleurs sont dotés de solutions de surveillance intégrées, qui permettent d'envoyer des messages d'erreur. En général, il existe également une visualisation gratuite des données de production sur un portail web. Les onduleurs les plus souvent utilisés en Suisse (liste non exhaustive) incluent entre autres des appareils ABB, Delta, Enphase Energy (micro-onduleurs), Fronius, Huawei, Kaco, Kostal, Solarmax, SMA, Refusol/Advanced Energy et SolarEdge (micro-onduleurs). Les solutions de surveillance permettent en partie de surveiller aussi les systèmes de stockage d'électricité.

Une vue d'ensemble complète du marché des systèmes de surveillance (externes et intégrés aux onduleurs) est disponible dans le *pV magazine* (en allemand) en ligne sur :

<https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/monitoringsysteme/produktdaten>

Un aperçu non exhaustif des solutions de surveillance indépendantes des onduleurs est présenté dans le tableau qui suit.

Solutions de surveillance indépendantes des onduleurs (liste non exhaustive)

Fabricant	Produit	Visualisation/ portail Web	Remarque
Common-Link AG	Inter-Link®-Solar	www.pv-log.de	Surveillance des installations PV
Egon AG	Egonline	www.egonline.ch	Surveillance des installations PV
Meteocontrol	blue' log	www.meteocontrol.com	Surveillance des installations PV
Skytron energy GmbH	skylog®	www.skytron-energy.com	Surveillance des installations PV
Smartblue AG	Enregistreur de données Smartblue	www.smartblue.de	Surveillance des installations PV
Smartfox	Smartfox	www.smartfox.at	Surveillance des installations PV
Solare Daten-systeme GmbH	Solar-Log	www.solar-log.com	Compatible avec plus de 2300 modèles d'onduleurs, de systèmes de surveillance des installations PV et de systèmes de stockage électrique.
QTE Service & Systeme GmbH	QTE energy	www.qte.de/energy/monitoring.html	Surveillance des installations PV et des systèmes de stockage électrique.

3 Tâches et obligations des exploitants d'installations

Les exploitants d'installations doivent conclure un contrat d'entreprise avec l'entreprise d'installation. Tous les points importants concernant la mise en place d'une installation PV peuvent y être réglementés, notamment les garanties auxquelles il est possible de recourir et les délais de garantie existants (cf. sous 3.1). En cas de travaux de maintenance sur une installation, les principaux points d'un contrat de service et d'une maintenance sont décrits au chapitre 4. Les mesures de sécurité au travail à respecter pendant la maintenance sont décrites au point 4.6. La meilleure façon d'assurer l'installation PV est expliquée au point 3.2.

3.1 Garanties, prestations de garantie et réclamations

En qualité d'acquéreur d'un ouvrage, l'exploitant de l'installation est en droit de prétendre que l'ouvrage fonctionne conformément au contrat. Il l'a généralement commandé à l'installateur et, en conséquence, l'installateur est responsable vis-à-vis de lui pour l'élimination des défauts.

L'installateur a acheté son matériel chez le fabricant. Le fabricant est responsable vis-à-vis de l'installateur du fonctionnement irréprochable du produit. Il s'agit ici d'un rapport entre professionnels dans lequel la responsabilité peut être limitée. Les Conditions générales de vente (CGV) du fabricant contiennent souvent des renseignements à ce sujet.

Le terme « garantie » désigne les conditions définies par le fournisseur et la manière dont il perçoit son obligation de garantie des défauts. Une garantie désigne ainsi toujours un service qui est promis par l'auteur de la garantie. Elle peut différer des obligations légales de garantie des défauts.

Il convient de faire une distinction entre les périodes de garantie accordées par le fabricant et celles accordées par l'entreprise d'installation. Les fabricants de modules et d'onduleurs accordent souvent de plus longues périodes de garantie que les installateurs. Pour les onduleurs, une garantie produit de 5 à 10 ans est accordée, mais elle peut aussi être prolongée jusqu'à 20 ans moyennant un supplément. Pour les modules, il existe des garanties produit de 5 à 15 ans qui peuvent également être prolongées moyennant un supplément.

La garantie produit constitue une garantie sur un produit, qui assure qu'un article était dans un état irréprochable lors de sa livraison, respectivement ne présentait pas de défauts. Il existe en outre une garantie de performance qui promet que les modules solaires fourniront encore un certain pourcentage de leur performance indiquée sur la fiche technique après un certain temps. Il est souvent garanti que les modules doivent encore posséder 90 % de leur performance initiale au cours des 10 premières années et encore 80 % au bout de 25 ans. Les garanties produit et de performance varient d'un fabricant à l'autre.

De telles garanties sont des prestations volontaires des fabricants et non pas de l'entreprise d'installation. En conséquence, le fabricant peut lui-même décider de ce que la garantie couvre et de sa durée de validité.

Il convient d'expliquer clairement à l'exploitant de l'installation que ces garanties sont promises ou accordées par le fabricant, et non par l'entreprise d'installation.

Les prestations minimales légales selon le CO sont applicables à l'installateur. Si le contrat d'entreprise a été conclu en vertu de la norme SIA 118, les dispositions de cette norme sont applicables. En Suisse, les périodes de garantie durent de 2 ans à 5 ans au maximum, ensuite les droits à l'élimination des défauts sont prescrits. Pour les contrats conclus en vertu de la norme SIA 118, les défauts manifestes peuvent faire l'objet de réclamations pendant une durée de 2 ans et les vices cachés pendant une durée de jusqu'à 5 ans après la réception.

En raison des différences entre garantie et prestation de garantie, il est important qu'un contrat d'entreprise définisse qui est responsable de quoi et pour combien de temps. Cela permet d'éviter le risque que, dans certaines circonstances, des malentendus surviennent des années après la conclusion d'un contrat. Il convient notamment d'indiquer clairement que la garantie accordée par un fabricant doit être revendiquée auprès de lui. Au plus tard à l'expiration de la période de garantie contractuelle accordée par l'installateur, le client doit de principe contacter directement le fabricant, un soutien à titre commercial de la part de l'installateur est ainsi toujours encore possible dans la pratique. Une entreprise d'installation qui souhaite régler sans ambiguïté le thème de la garantie et de la prestation de garantie pourrait utiliser la formulation suivante dans son contrat d'entreprise :

Nous remplissons notre obligation de prestation de garantie en vertu du CO, respectivement de la norme SIA 118⁹. Les garanties des fabricants qui promettent des durées de garantie supérieures ne peuvent être revendiquées auprès de nous après l'expiration de la période de garantie ordinaire, mais doivent l'être auprès du fabricant. Nous vous conseillons volontiers sur ce point.

En ce qui concerne un projet de contrat d'entreprise, les maîtres d'ouvrage peuvent se renseigner auprès des Pros du solaire, membres de Swissolar. Le modèle de contrat d'entreprise est mis librement à la disposition des membres.

Durée de garantie de 2 ou 5 ans ?

Selon le Code des obligations (CO), la durée de la garantie est de 5 ans si « les défauts d'un ouvrage mobilier intégré dans un ouvrage immobilier conformément à l'usage auquel il est normalement destiné sont à l'origine des défauts de l'ouvrage ». Cela signifie que si, par exemple, un onduleur défectueux est responsable des pertes de rendement de l'installation, une période de garantie de 5 ans est applicable. L'expression « *intégré* dans un ouvrage immobilier conformément à l'usage auquel il est normalement destiné » utilisée dans le CO est sujette à interprétation et peut

⁹ Les contrats ne peuvent être conclus en vertu de la norme SIA 118 que si les deux parties au contrat en connaissent la teneur.

être définie encore plus précisément par les tribunaux. Un onduleur, par exemple, est en soi un ouvrage mobile, tandis que la maison dans laquelle il est « intégré conformément à l'usage » est un ouvrage non mobile. Cette intégration conforme aux prescriptions joue ainsi un rôle important en matière de durée de la garantie.

Réclamations

Un défaut doit être signalé à l'entreprise d'installation immédiatement (au plus tard dans un délai de 7 jours calendaires) après sa découverte (art. 201 CO), de préférence par écrit pour des raisons de justification (par e-mail, demander un accusé de réception, par voie postale, par courrier A+ minimum). Les signalements retardés entraînent la perte des droits de garantie. Les conditions de garantie font aussi souvent état de délais de signalement qui doivent être respectés afin que la garantie ne devienne pas caduque.

3.2 Quelles assurances sont vraiment nécessaires ?¹⁰

En matière d'assurances, il se pose fondamentalement la question de savoir quelles sont celles qui sont vraiment nécessaires. Dans la plupart des cas, il est possible (et en partie obligatoire) d'inclure l'installation PV dans l'assurance existante du bâtiment. Elle couvre fondamentalement les dommages résultant d'événements naturels causés par le feu, l'eau, les tempêtes, la grêle et la foudre. Si l'installation PV ne fait pas partie de l'assurance du bâtiment, une assurance tous risques peut être souscrite. Par ailleurs, d'autres assurances peuvent être souscrites à titre volontaire.

Il est en tout état de cause conseillé de clarifier auprès de l'assurance du bâtiment du canton respectif si l'installation est assurée ou non. Vous trouverez ci-après une liste des dommages couverts par les différentes assurances.

Assurance du bâtiment

Si aucune assurance du bâtiment n'est obligatoire, la souscription de contrats d'assurance est volontaire. Dans les cantons GUSTAVO (GE, UR, SZ, TI, AI, VS, OW), il n'existe pas d'assurances cantonales. Pour les installations intégrées dans un bâtiment, dans la plupart des cantons, l'installation PV doit être intégrée dans l'assurance existante du bâtiment.

Assurance tous risques

Ici, l'installation photovoltaïque est assurée contre tous les dangers possibles, sauf pour les clauses d'exclusion expressément mentionnées dans les conditions d'assurance. En fonction de l'offre, sont par exemple assurés : le vol, le vol avec effraction, le détournement, le pillage, le feu, l'incendie, la foudre, la tempête, la grêle, la pression de la neige, les dommages dus à une surtension, les dommages d'exploitation internes (dommages techniques), l'intention délibérée de tiers,

¹⁰ Fiche technique Swissolar Photovoltaïque n° 4 « Assurances », faisant partie des « Fiches techniques Photovoltaïque Suisse », disponible sur <https://www.swissolar.ch/fr/pour-professionnels/materiel-photovoltaique/notices-techniques>

le sabotage, le vandalisme, le gel, le rongement par des animaux (p. ex. morsures de fouines), la perte de rendement ainsi que les frais de démontage et remontage.

Assurance des prestations de garantie

Il existe également une assurance des prestations de garantie. Il s'agit d'assurer les droits à la garantie en cas d'insolvabilité du fabricant ou si celui-ci ne peut honorer les recours en garantie pour toute autre raison. Le fabricant des modules solaires est tenu de souscrire une réassurance des prestations de garantie. En cas de commandes importantes, il est utile de vérifier s'il existe une réassurance appropriée et dans quelles conditions les dommages sont couverts.

Assurance responsabilité civile (RC)

En Suisse, la plupart des installations PV sont installées contre ou sur un bâtiment. En conséquence, l'installation PV devrait faire partie de l'assurance RC du bâtiment ordinaire pour les propriétaires d'immeubles. La question de savoir si et comment la responsabilité civile est couverte doit en tout état de cause être clarifiée et confirmée individuellement. Les primes étant généralement basées sur la valeur du bâtiment, leur coût peut augmenter en fonction de la valeur de l'installation PV.

Assurance montage

L'assurance montage couvre les dommages survenant pendant la période entre la livraison du matériel sur le chantier et la mise en service de l'installation achevée.

Comparatif d'assurance

Si l'assurance de l'installation photovoltaïque peut être incluse dans l'assurance existantes du bâtiment, c'est la solution la plus simple. Là où l'assurance des dommages résultant d'événements naturels n'est pas obligatoirement incluse dans l'assurance bâtiment cantonale, il peut être utile de demander aux assureurs externes le montant de la prime qu'ils facturent pour la même prestation. Le cas échéant, il en résulte de meilleures conditions ou l'amélioration de la propre assurance bâtiment en présence d'une offre concurrente plus favorable. Des primes plus basses sont sinon possibles en principe avec des mesures similaires que pour les autres produits d'assurance, par exemple par le biais d'une franchise plus élevée.

4 Maintenance¹¹

Par maintenance, on entend les travaux ayant pour objet de maintenir une installation dans un état opérationnel, conforme et sécurisé et d'éviter l'usure. Différentes mesures et contrôles des composants de l'installation font partie des tâches de maintenance. Une maintenance doit être effectuée par un personnel qualifié et dûment formé. Les installations photovoltaïques ne sont soumises à aucune obligation légale, ni non plus à une nécessité technique d'effectuer une maintenance du fait il n'y a pas par exemple de pièces d'usure (à l'exclusion p. ex. du transformateur dans les installations de grande taille). Les installations doivent en tout état de cause être surveillées à distance afin qu'en cas de message d'erreur, l'anomalie puisse être éliminée et qu'un nouveau contrôle de l'installation puisse être effectué. Toutefois, une surveillance à distance de l'installation ne peut pas garantir à 100 % que tous les problèmes de l'installation seront identifiés. Un bris de verre, dans la mesure où il n'affecte pas la performance du module, ne peut, par exemple, pas être signalé par le système de surveillance. En conséquence, il peut être judicieux de procéder à un contrôle visuel supplémentaire afin de vérifier l'état de l'installation.

Exigences applicables aux données d'exploitation et de maintenance au titre de la norme SNG 491000-2086A

Les documents suivants sont requis au titre de cette norme :

- dispositif d'arrêt d'urgence / dispositif de coupure ;
- recommandations de nettoyage et de maintenance ;
- check-list de ce qu'il convient de faire en cas de panne de l'installation ;
- futurs travaux réalisés sur le bâtiment susceptibles d'avoir un impact sur l'installation PV (p. ex. points d'ancrage pour les travaux réalisés sur le toit) ;
- schéma de câblage DC à titre d'information pour les pompiers.

4.1 Quand et à quelle fréquence une maintenance est-elle nécessaire ?

Il n'y a pas d'intervalle de temps spécifique au cours duquel une maintenance doit être effectuée. Ainsi, même si aucune maintenance n'est réalisée, les droits de réclamation auprès de l'entreprise d'installation ou des fabricants dans le cadre de la garantie ne sont pas perdus. Toutefois, si le maître d'ouvrage ou le propriétaire de l'installation omet ses obligations de diligence dans leur intégralité, une coresponsabilité peut lui être transférée. En fonction du fabricant, une maintenance régulière peut être prescrite pour l'exploitation de batteries de stockage. Cela doit être décrit dans la documentation et communiqué en conséquence par l'entreprise d'installation.

¹¹ Sources du chapitre 4 : Ullrich Schwarzburger, Störungsfreier Betrieb von PV-Anlagen und Speichersystemen, VDE Verlag (Fonctionnement sans faille des installations PV et systèmes de stockage) ainsi que documents de formation Solarbildung Suisse, disponible sur www.formation-solaire.ch

Vérification de l'installation PV avant la date d'expiration de la garantie

Une vérification de l'installation avant l'expiration de la période de garantie est fortement recommandée, même si l'installation a fonctionné sans problème jusqu'alors. Les défauts éventuellement constatés peuvent être alors couverts par les prestations de garantie ou les obligations de garantie. Les diminutions de performance des modules ne sont par exemple pratiquement pas perçues et ne peuvent être identifiées qu'à l'aide d'appareils de mesure spéciaux. De simples mesures des lignes de strings permettent déjà de détecter les premières sources d'erreur par comparaison avec d'autres strings ou à l'aide de la fiche technique du module. Il est conseillé de mandater une entreprise tierce indépendante pour la vérification de l'installation avant l'expiration de la garantie.

Vérification des installations PV après l'élimination d'un défaut

Une vérification de l'installation peut également être effectuée suite à une élimination de défauts affectant l'installation. Les messages d'erreur qu'il convient de prendre au sérieux sont par exemple les messages concernant des écarts ou des pertes de production ou des anomalies de communication. L'exploitant de l'installation peut de principe s'orienter sur les délais ci-après pour les éventuelles tâches de maintenance.

Les contrôles périodiques en vertu de l'OIBT sont réalisés à intervalles fixes (cf. annexe OIBT), le renouvellement du rapport de sécurité est prescrit tous les un à vingt ans, en fonction du type de bâtiment, respectivement de l'utilisation du bâtiment. Le contrôle technique de l'installation (p. ex. contrôle visuel, mesures et test du disjoncteur différentiel externe) ainsi que la vérification de l'existence et de l'exactitude de la documentation de l'installation peuvent être soumis à une autre périodicité que celle suggérée dans l'OIBT. La documentation de l'installation doit contenir des informations sur le rythme de contrôle des composants respectifs. Toutefois, les contrôles peuvent également être effectués dans le cadre d'un nettoyage de l'installation. La mesure des courbes caractéristiques est toutefois recommandée avant l'expiration de la garantie (5 ans) en cas de suspicion concrète d'une diminution de la production. Toutefois, ce qui est déterminant pour savoir si une maintenance est effectuée, reste fonction de la présence de messages d'erreur ou de la nécessité par exemple d'un nettoyage régulier de l'installation en raison des conditions du site (émissions de poussières, ombrage, végétation, etc.), ou de l'entretien/élimination de la végétation.

4.2 Qui propose une maintenance ?

L'entreprise d'installation, mais également d'autres entreprises spécialisées, peuvent proposer des services de maintenance. La surveillance de l'installation peut aussi faire partie du pack de maintenance en complément de la maintenance proprement dite de l'installation. Dans ce cas, une entreprise spécialisée prend en charge la surveillance de l'installation et en cas d'anomalie, élimine le défaut dans un délai déterminé. Tout exploitant d'installation est libre d'effectuer lui-même la surveillance de l'installation. En cas d'incertitude quant au message d'erreur reçu, il convient de demander de l'aide à l'installateur. Si la surveillance est effectuée par l'exploitant de l'installation, il est important de transmettre les messages d'erreur immédiatement à l'installateur. Cela permet à

l'entreprise spécialisée d'évaluer le potentiel de risque et de signaler les défauts en temps opportun pendant la période de garantie (cf. sous 3.1).

4.3 Quelles mesures convient-il de mettre en œuvre dans le cadre de la maintenance ?

Outre le contrôle visuel, la vérification de l'installation sur le site peut inclure, entre autres, le contrôle de la capacité de fonctionnement et la sécurité de l'installation ainsi que d'autres prestations de service.

Contrôle visuel de l'installation

Le contrôle visuel peut permettre de détecter les dommages identifiables à l'œil nu : à titre d'exemple, l'inspection mécanique des points de fixation des modules ou la détérioration de tous les composants de l'installation (modules, sous-construction, onduleur, câblage) ainsi que les dommages causés au toit lui-même. Pour les modules, il est en outre éventuellement possible de détecter des dommages réduisant le rendement, tels qu'une délamination (décollement de la pellicule arrière) ou une décoloration des modules (browning). De même, la manière dont les câbles solaires sont posés doit faire l'objet d'une vérification particulière. Les couvercles des canaux de câbles non fixés, les tubes de protection non résistants aux UV ou une isolation fragilisée des câbles de l'installation entraînent des anomalies, notamment des défauts d'isolation. Outre une diminution de la durée de vie de l'installation, les défauts d'installation mentionnés peuvent, dans le pire des cas, déclencher un incendie. Les boîtes de raccordement du générateur et la protection contre les surtensions doivent être vérifiées afin de s'assurer que les câbles et les vis de fixation sont correctement en place. Une caméra thermographique permet de créer une documentation photographique précise et de la tenir à jour (cf. sous 4.11). Il est par ailleurs possible de détecter p. ex. la corrosion ainsi que d'éventuelles détériorations des câbles de strings causées par le rongement de nuisibles ainsi que les dommages affectant les boîtes de raccordement (déformation, etc.).



Illustration 2 : Décoloration des modules (browning), Jendra Power AG

Contrôle après des intempéries

Des dommages causés aux modules ou à la sous-construction par le vent ou la grêle, n'affectant pas directement la production et n'engendrant de ce fait pas un message d'erreur, peuvent se produire en particulier après des intempéries ou une tempête violente. Dans un tel cas, il convient de vérifier notamment la fixation du module sur la sous-construction ainsi que la fixation de la structure porteuse elle-même.



Illustration 3 : Endommagement de module après une tempête, Edisun

Vérification de l'installation électrique

La vérification de l'installation électrique inclut le contrôle de chaque string individuellement côté courant continu avec établissement d'un procès-verbal, ainsi que du bon fonctionnement du disjoncteur DC. Les ailettes de refroidissement de l'onduleur doivent être contrôlées et, le cas échéant, nettoyées. Par ailleurs, les boîtes à fusibles doivent être contrôlées et les connexions/bornes de connexion resserrées. Le serrage correct des fusibles doit être vérifié et les câbles électriques inspectés afin de détecter tout endommagement.

Facteurs d'influence liés au site

Lors du contrôle visuel, il est également possible de déterminer si la situation sur le site de l'installation a changé. Ce contrôle permet par exemple d'examiner si la végétation a engendré des ombrages ou l'encrassement des modules ou des onduleurs (cf. sous 4.8). Il convient en outre de vérifier qu'aucun objet n'a été déposé sur les fentes de ventilation des onduleurs empêchant ainsi l'évacuation de la chaleur. L'accès aux onduleurs doit également être libre. Des ombrages peuvent se produire en raison d'arbres avoisinants ou de la végétation sur une toiture végétalisée (cf. sous 4.10) ainsi que de bâtiments existants et équipements temporaires, tels que des échafaudages, grues, etc.



Illustration 4 : Onduleurs encrassés, Jendra Power SA



Illustration 5 : Modules encrassés, Jendra Power SA

Documentation de l'installation

Pour finir, il convient de vérifier si la documentation est, comme auparavant, présente sur l'installation et si des révisions ou modifications ont été effectuées. Cela est avant tout important si une entreprise différente de l'entreprise d'installation entretient l'installation.

Mise à jour des composants

Si nécessaire, il serait opportun d'effectuer une mise à jour des enregistreurs de données dans le cadre d'une maintenance. La mise à jour d'autres composants PV (p. ex. onduleurs) doit être vérifiée et effectuée. Par exemple il convient, dans la mesure du possible, de définir les nouveaux paramètres de protection de réseau pour les anciens onduleurs (cf. Fiche technique « Paramètres de réglage pour onduleurs en Suisse »¹², ainsi que la directive 1/2018 de l'EiCom¹³). Vous trouverez de plus amples informations sur le sujet sur le site Internet de Swissolar¹⁴.

¹² <https://www.swissolar.ch/fr/pour-professionnels/materiel-photovoltaique/notices-techniques>

Vérification du fonctionnement et de la sécurité à l'aide de différentes mesures

Le contrôle du fonctionnement de l'installation PV, notamment des onduleurs et des modules, peut être réalisé via différentes mesures (cf. sous 4.4).

4.4 Mesures nécessaires dans le cadre d'une maintenance

Informations générales sur les mesures effectuées

Chaque installation est différente et présente des caractéristiques distinctes. Les mesures effectuées dépendent en outre de l'état actuel de l'installation PV. Afin d'évaluer correctement l'état de l'installation lors des mesures, il convient de tenir compte du degré d'encrassement des modules, de l'ombrage sur différentes zones du champ de modules ou sur différents modules, ainsi que les diverses orientations ou angles d'inclinaison de l'installation. Pour les mesures effectuées tout au long de la journée, il convient de tenir compte du fait que les valeurs varient constamment en fonction de l'intensité du rayonnement et de la température.

Test du disjoncteur différentiel (RCD) externe

Si les câbles de raccordement AC des onduleurs traversent des espaces exposés à un risque d'incendie, il convient, conformément à la NIBT, d'utiliser un disjoncteur différentiel (RCD) pour protection incendie, qui doit être régulièrement testé. Ces tests sont en principe effectués dans le cadre du contrôle périodique et par les exploitants de l'installation. Le test de l'interrupteur différentiel (RCD) doit être réalisé à intervalles réguliers (tout comme le test RCD de l'installation électrique dans le bâtiment). Afin d'éviter des transitoires de tension inutiles, il est judicieux d'effectuer ce test le soir après le coucher du soleil.

Les mesures possibles côté DC sont présentées ci-après. Tous les composants d'une installation solaire installés en amont des onduleurs sont situés côté DC. « Côté DC » désigne en conséquence tous les composants d'une installation solaire situés du côté du courant continu. Les composants assurant la production du courant continu d'une installation solaire sont principalement des modules.

Mesure de la tension

Lorsque l'installation PV est hors tension, il est possible de mesurer la tension à vide des conducteurs strings. Les valeurs doivent être comparées et évaluées à l'aide de la fiche technique du module. Les valeurs mesurées peuvent être facilement comparées avec celles réalisées lors de la mise en service. Il convient toutefois de tenir compte du fait que la valeur mesurée dépend des conditions météorologiques actuelles et de l'état du champ de modules (encrassement, etc.).

¹³ Directive 1/2018 : Comportement des installations de production d'énergie décentralisées en cas d'écarts par rapport à la fréquence standard

¹⁴ <https://www.swissolar.ch/fr/pour-professionnels/informations-professionnelles-actuelles/mesures-de-modernisation-concernant-les-installations-photovoltaïques-de-l-elcom>

L'intensité du rayonnement et la température doivent notamment être prises en considération lors de la mesure. Si plusieurs conducteurs appartiennent à des champs de modules qui ont la même orientation et la même inclinaison, les données de mesure peuvent facilement être comparées et évaluées les unes par rapport aux autres.

Mesure du courant

La pince ampèremétrique permet de mesurer les courants de strings pendant le fonctionnement. Les valeurs peuvent être vérifiées avec la fiche technique et comparées à celles mesurées lors de la mise en service. Comme déjà décrit pour la mesure de la tension, l'état de l'installation et les conditions météorologiques actuelles doivent être pris en compte.

Mesure des courbes caractéristiques

La mesure du courant de court-circuit est généralement effectuée avec la mesure des courbes caractéristiques, réalisée lorsque l'installation est à l'arrêt. Une mesure des courbes caractéristiques permet de déterminer la courbe caractéristique de courant/tension et la puissance de l'installation PV (chaîne de modules ou module individuel). Pour ce faire, il convient de raccorder les lignes DC à l'appareil de mesure. Les valeurs DC mesurées permettent de déterminer l'état de l'installation. La mesure de la courbe caractéristique permet de mesurer un module individuel ou une chaîne complète. Les données du module doivent auparavant être enregistrées dans l'appareil de mesure. L'appareil de mesure est ensuite connecté à un module ou à une chaîne. La puissance du module ou de la chaîne est déterminée à partir des valeurs et comparée à celle indiquée sur la fiche technique. Selon l'appareil de mesure, les données sont affichées à l'aide d'un diagramme qui permet de déterminer immédiatement si la garantie de performance stipulée par le fabricant a été respectée. Il convient de tenir compte ici aussi des conditions de l'installation sur site mentionnées pendant la mesure de la tension (température, etc.). Il convient d'utiliser de préférence des capteurs de rayonnement et de température pour la mesure des courbes caractéristiques.

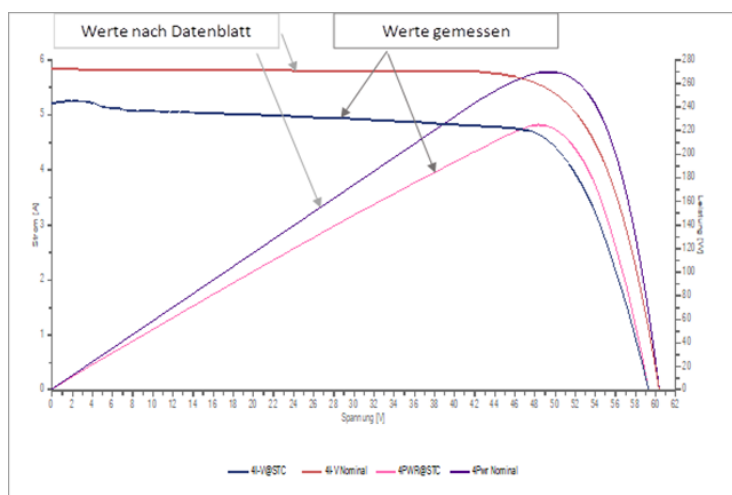


Illustration 6 : Mesure des courbes caractéristiques, représentation de l'écart des valeurs mesurées par rapport aux mesures figurant dans la fiche technique

Mesure de l'isolation

Lors de la mesure de l'isolation, il est possible de déterminer s'il existe une connexion entre un conducteur actif (conducteur positif ou négatif) avec le conducteur de protection ou avec la terre. Cette mesure effectuée dans le cadre d'une maintenance peut être différente de la mesure réalisée lors de la mise en service de l'installation. Les causes d'un défaut d'isolation peuvent être multiples. En font partie les points de compression ou les endommagements des conducteurs en raison de chemins de câbles insuffisamment protégés ainsi que les connexions enfichées qui ne sont pas étanches, en raison, par exemple, de la pénétration de l'humidité ou de la survenance d'un feu couvant. Les déclencheurs peuvent aussi être des câbles constamment mouillés ainsi que des modules défectueux, en raison par exemple de l'établissement d'une liaison au potentiel de terre suite à un bris de glace dans des conditions humides. En cas de défauts d'isolation, il est possible que l'anomalie ne se produise pas en continu. L'anomalie peut se produire le matin en cas d'humidité ou de pluie, puis disparaître au cours de la journée si les conditions sont plus sèches. Dans de tels cas, le dépannage se transforme en défi et doit être effectué dans des conditions humides ou mouillées.



Illustration 7 : Incendie de câbles, Jendra Power SA

4.5 Conditions préalables applicables à la maintenance

Une maintenance de l'installation est effectuée pendant la haute saison de production PV. Un rayonnement solaire suffisant est requis pour obtenir des valeurs de mesure représentatives et exprimer des conclusions fondées sur l'état de l'installation.

Des couloirs d'entretien sont de préférence requis pour pouvoir effectuer des travaux de maintenance sur le champ de modules. Toutefois, ils ne sont pas prévus sur de nombreux toits solaires pour des raisons d'optimisation des surfaces et des rendements. En l'absence de couloirs d'entretien, extraire un module en cas de panne peut être très onéreux en fonction de son emplacement.

Le passage sur les modules doit dans tous les cas être évité. D'une part, des graviers sous les semelles des chaussures peuvent provoquer des fissures ou des rayures sur le verre du module.

D'autre part, des charges ponctuelles par une personne sont susceptibles de provoquer des microfissures dans le module. Les microfissures ainsi créées peuvent engendrer à long terme une diminution du rendement jusqu'à la défaillance complète du module, en passant par les hot spots (lesdits « points chauds », en raison de la surchauffe du module). Toutefois, si une inspection du champ de modules est impérative, il est possible, du moins pour les modules avec cadre, d'utiliser desdits multiboards qui permettent un transfert de poids. Alternativement, il est également possible d'utiliser des plateformes élévatrices. L'accès aux onduleurs, au tableau de distribution électrique, etc. doit toujours être garanti.



Illustration 8 : Utilisation d'un multiboard solaire, SMB Solar Multiboard GmbH

4.6 Quelles mesures de sécurité au travail convient-il de respecter pendant la maintenance ?

Lors de la maintenance des installations PV, les prescriptions de la Suva (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents) en matière de sécurité au travail doivent être respectées. Les travaux d'une durée inférieure à 2 jours/homme peuvent être effectués avec des mesures temporaires de sécurité au travail, à savoir avec une protection par encordement. Les maintenances des installations PV dans les maisons individuelles sont généralement effectuées dans ce délai.

La documentation de l'installation doit inclure un plan indiquant comment la sécurité au travail peut être garantie en cas de maintenance. Cela est par exemple possible avec des dispositifs d'arrêt qui doivent être prévus lors de la mise en place de l'installation PV. En l'absence de dispositifs d'arrêt permanents, il est possible d'installer des dispositifs d'arrêt temporaires, par exemple avec une corde de rappel ou une protection collective avec échafaudage, plateforme élévatrice ou moyens similaires.

Si la maintenance ne peut pas être effectuée conformément aux directives de la Suva, la responsabilité concernant le non-accès au toit incombe à l'entreprise chargée de la maintenance. Les travaux effectués avec une protection par encordement requièrent des personnes formées disposant d'un équipement de protection individuelle et ayant suivi un cours de sécurité en hauteur ap-

proprié. La fiche technique de la Suva « Intervenir en toute sécurité sur les toits »¹⁵ contient une description complète des mesures de sécurité au travail à mettre en œuvre.



Illustration 9 : Protection par encordement, BE Netz AG

Les travaux effectués sous tension doivent être évités. La mise hors tension correcte de l'installation PV est décrite dans le mode d'emploi. Si des travaux sous tension sont inévitables, ils doivent être réalisés par du personnel qualifié conformément à l'OIBT.

L'exploitant de l'installation est responsable et peut être puni si les travaux ne sont pas exécutés dans les règles de l'art ou si un accident survient. En conséquence, l'exploitant de l'installation est tenu d'informer l'entreprise d'installation des directives de la Suva et de se faire confirmer le respect des directives.

4.7 Évaluation des principaux points d'un contrat de service

Cette section décrit les principaux points d'un contrat de service. Sur le plan juridique, le contrat de service contient des éléments de divers types de contrat, notamment le contrat d'entreprise et la commande, mais ces points ne sont pas traités dans les détails ici.

¹⁵ <https://www.suva.ch/material/dokumentationen/sicher-zu-energie-vom-dach.-montage-und-instandhaltung-von-solaranlagen-44095.d-40954-40954>

Informations sur les parties au contrat

Le contrat de service doit inclure des informations sur le contenu du contrat, les parties au contrat et le lieu de l'installation (adresse de l'entreprise chargée de la maintenance ainsi qu'adresse de l'exploitant de l'installation et emplacement de l'installation PV).

Étendue des travaux de maintenance

Il convient de définir avec précision les points à traiter dans le cadre de la maintenance (p. ex. surveillance de l'installation, tâches périodiques telles que contrôle visuel, nettoyage des éléments de l'installation, réparation ou remplacement de composants de l'installation, vérification des valeurs affichées par l'onduleur et éventuels codes d'erreur).

Si l'entreprise d'installation est chargée de la surveillance de l'installation en plus de sa maintenance, il convient de définir les délais dans lesquels un incident est traité (p. ex. uniquement les jours ouvrables) et les conséquences pour l'exploitation si les délais ne sont pas respectés. Il convient également de déterminer comment les travaux de maintenance ou l'élimination des incidents doivent être documentés. Il est conseillé d'établir un procès-verbal des travaux de maintenance.

Il convient en outre de réglementer la manière dont les anomalies qui ne concernent pas l'objet du contrat sont traitées, dans la mesure où elles sont par exemple causées par une mauvaise utilisation, des interventions, extensions ou réparations inappropriées n'ayant pas été réalisées par l'entreprise d'installation ou par un endommagement délibéré ou par négligence de l'installation.

Durée du contrat de service, délais de résiliation

La durée du contrat et les délais de résiliation possibles doivent être définis.

Rémunération

Il y a lieu de déterminer la rémunération des services de maintenance régulièrement réalisés. Il convient également de définir comment les services de maintenance ou réparations exceptionnels sont traités.

Droits et devoirs

Les droits et obligations des parties au contrat sont réglementés dans cette section. Il convient par exemple de définir si l'entreprise spécialisée a accès à l'installation à tout moment lorsqu'elle est chargée de la surveillance à distance et de l'élimination des défauts. Il peut également être stipulé que l'entreprise d'installation est en droit de confier certains travaux à des entreprises tierces.

Responsabilité

Il y a lieu de définir sous ce point qui est responsable de quoi, dans la mesure où la législation ne fait pas état de dispositions contraignantes ou s'il convient de s'écarter de la norme SIA 118 si l'installation n'a pas été construite conformément à cette norme.

Dispositions finales

Dans les dispositions finales, il est par exemple stipulé que les modifications apportées aux tâches de maintenance doivent faire l'objet d'un nouvel accord écrit des deux parties. Le for y est par exemple également fixé.

4.8 Nettoyage dans les règles de l'art de l'installation PV

Les modules peuvent être encrassés par de la poussière, du pollen, des feuilles mortes, des fientes d'oiseau ou autres causes. En cas de modules avec cadre, de la mousse peut aussi se développer au fil du temps sur le châssis inférieur des modules. L'encrassement et la formation de végétation entraînent des diminutions de rendement. Un nettoyage professionnel des modules permet d'optimiser les rendements d'une installation. Les encrassements normaux par exemple par du pollen ou les fientes d'oiseau sont généralement éliminés par les précipitations. Des encrassements plus importants et, de ce fait, des pertes notables de production peuvent toutefois survenir notamment sur les étables, sur les entreprises industrielles à proximité de sites d'extraction émettant de la poussière et sur les toits avec une pente de toiture faible (inférieure à 10 degrés). Dans de tels cas, un nettoyage régulier est recommandé.

Le nettoyage du toit doit être effectué par une entreprise spécialisée. Pour le nettoyage du toit, il convient de n'utiliser que de l'eau déminéralisée ou de l'eau de pluie, car l'usage d'eau du robinet peut entraîner des taches de calcaire sur l'installation. En outre, aucun détergent ne doit être utilisé. Sinon la surface des modules peut être attaquée, auquel cas les garanties accordées par le fabricant deviennent caduques. Les détergents pourraient également être déversés dans les cours d'eau.

Pour le nettoyage, on utilise normalement des brosses sur perches télescopiques. Elles doivent être conçues de manière que le verre des modules ne soit pas rayé. Une autre possibilité est l'utilisation de robots de nettoyage qui nettoient le toit de manière autonome.

Lors des activités de nettoyage, il convient aussi de ne pas marcher sur les modules ; les mesures de sécurité au travail doivent également être respectées lors des travaux.



Illustration 10 : Nettoyage de l'installation solaire, BE Netz AG

4.9 Élimination de la neige, contrôle des pare-neige

Certains exploitants d'installation aimeraient optimiser leur rendement solaire également en hiver. À cet effet, il est parfois fait usage du balai ou de la pelle à neige pour enlever la neige du toit. Cela est très fortement déconseillé. D'une part, la sécurité est menacée lorsque la personne n'est pas encordée, ce qui est généralement le cas quand il s'agit de particuliers. D'autre part, les modules et le câblage peuvent être endommagés par les divers équipements. Il est donc préférable d'attendre que la neige glisse d'elle-même ou fonde.

Pare-neige

Pour les installations PV dont le pan de toit est orienté en direction de surfaces accessibles à pied ou avec un véhicule, l'exploitant de l'installation est tenu de prendre des mesures afin que la neige ne puisse glisser sans entrave sur le chemin ou la route en dessous de l'installation PV. Il convient d'installer un pare-neige de dimensions suffisantes pour la quantité de neige attendue sur le site de l'installation. Dans les régions à fort enneigement, il peut arriver dans les cas extrêmes que des déformations ou des endommagements affectent le pare-neige ou la structure de montage. Cela doit être vérifié dans le cadre d'une maintenance.

4.10 Installation PV sur une toiture végétalisée

Planification et construction de la toiture végétalisée

Les toits plats peuvent être végétalisés aussi bien sur les maisons individuelles et les immeubles collectifs que dans le secteur industriel. Souvent les communes posent un certain nombre d'exigences afin qu'une meilleure rétention d'eau soit obtenue pour la surface construite. Dans un nombre de cas restreint, les raisons esthétiques jouent également un rôle. En outre, une toiture végétalisée permet d'abaisser la température du bâtiment et crée un habitat pour la faune et la flore.



Illustration 11: La toiture végétale comme espace de vie ; criquet à ailes bleues (*Sphingonotus caeruleus*), Dr. Stephan Brenneisen, ZHAW Wädenswil

Lorsqu'un toit plat est construit ou assaini et que la construction d'une installation PV est prévue, la toiture végétalisée peut être planifiée en conséquence. Il convient ici de faire appel à un installateur expérimenté dans le domaine des toitures photovoltaïques végétalisées. La hauteur du substrat, le choix des plantes et le positionnement des modules sont déterminants pour gérer la végétation. Si les modules sont positionnés de telle manière qu'il y ait un passage entre les rangées, la croissance des plantes sera plus importante dans cette zone, car les précipitations y sont déversées par les deux surfaces de modules. La hauteur de substrat doit donc être très réduite à cet endroit afin de ne permettre qu'une croissance modérée de la végétation.



Illustration 12 : Zone de sedums devant les modules PV, Dr. Stephan Brenneisen, ZHAW Wädenswil

Une hauteur appropriée de la sous-construction contribue à ce que les plantes n'atteignent si possible pas les modules. En raison des optimisations des surfaces qui sont principalement obtenues par une orientation plate est-ouest – mise en œuvre principalement sur les toits industriels –, de faibles hauteurs de végétations suffisent déjà à ombrager les modules. Ce point doit être pris en compte lors de la planification.

Entretien de la toiture végétalisée

Un concept d'entretien doit être défini pour les toitures photovoltaïques végétalisées. Par sécurité, il est préférable de prévoir une à deux interventions de maintenance par an. Dans les premières années, directement après la plantation, il se peut que les coûts d'entretien soient un peu plus élevés, jusqu'à ce que la plantation ait bien pris racine. Les frais d'entretien doivent être suffisamment pris en compte lors de la planification des coûts d'exploitation. Les consignes de sécurité au travail de la SUVA doivent également être respectées lors de l'entretien de la toiture végétalisée.



Illustration 13 : Végétation sur une toiture végétalisée ; installation photovoltaïque orientée est-ouest, Dr. Stephan Brenneisen, ZHAW Wädenswil

4.11 Contrôles optionnels dans le cadre d'une maintenance : thermographie, électroluminescence

En plus des méthodes déjà décrites, l'exploitant de l'installation dispose d'autres inspections spéciales pour rechercher les causes des pertes ou des réductions de rendement.

Thermographie

Les caméras thermographiques peuvent permettre de détecter des échauffements non admissibles sur les installations PV. Sont décelables ici principalement les points chauds appelés « hot spots », les cellules plus chaudes, l'échauffement global d'un module ainsi que les diodes bypass court-circuitées (la chaîne de modules est échauffée). Les causes de l'échauffement sont des défauts au niveau des cellules ou du module, d'éventuels ombrages partiels, l'interruption de pistes conductrices dans le module, des chaînes non connectées qui sont inactives ainsi que le vieillissement des modules PV (dégradation). L'évaluation des images thermographiques doit être effectuée par des spécialistes. Les inspections thermographiques peuvent être réalisées à l'aide de drones. L'avantage de cette méthode est de permettre d'inspecter rapidement, sans contact et de manière sûre même des grandes installations.

Quand convient-il d'effectuer une inspection thermographique ?

Lorsque les pertes de puissance ne sont pas explicables autrement, il est judicieux d'effectuer une inspection thermographique. Outre l'identification des modules défectueux, il est également possible de détecter des défauts de l'installation électrique.

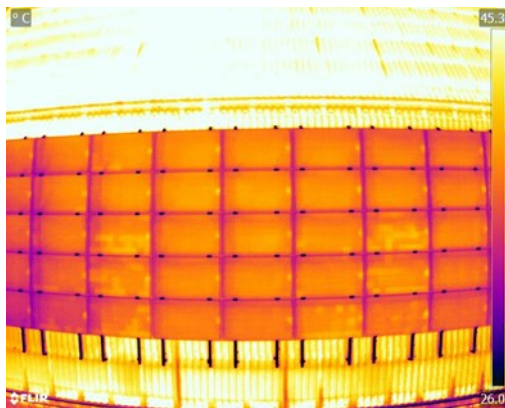


Illustration 14 : Photo thermographique d'une dégradation induite du potentiel (PID), Jendra Power AG

Mesure de l'électroluminescence (EL)

Lors de la mesure de l'électroluminescence, l'effet photoélectrique de la cellule solaire est inversé. Lorsque les modules solaires sont sous tension, les cellules commencent à devenir lumineuses. Une caméra EL spéciale permet de visualiser la lumière émise. Les mesures peuvent être effectuées de nuit comme de jour. Un recouvrement spécial des modules est nécessaire pendant la journée. La mesure EL permet d'examiner aussi bien les modules à couches minces (a-Si, CIGS, CIS, CdTe) que les modules cristallins, qu'ils soient montés ou démontés. La mesure EL permet de détecter les microfissures et les bris de cellules sur les modules solaires. Les bris de cellules et les microfissures peuvent être causés par la tempête ou la grêle, un transport inapproprié ou un montage incorrect ou en marchant sur les modules. Chaque fissure ne signifie pas obli-

gatoirement un changement de module solaire. Mais si de grandes zones sombres (électriquement non actives) sont détectées, les nœuds solaires peuvent faire état d'une performance réduite.

4.12 Contrôle de la puissance des modules dans des laboratoires de contrôle

Des laboratoires indépendants tels que la Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), l'Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW), la Haute école spécialisée bernoise (HESB) et d'autres offrent également des possibilités de vérifier des modules. Un tel contrôle est par exemple indispensable lorsqu'un fabricant de modules ne veut pas reconnaître une baisse de performance constatée par l'exploitant de l'installation ou l'installateur. Dans ce cas, le maître d'ouvrage pourrait faire examiner le module – toutefois à ses frais – dans un laboratoire de contrôle indépendant. Celui-ci pourra déterminer la performance effective du module au moyen d'un flash-test. Si le test effectué en laboratoire permet de prouver que la puissance mesurée diffère de la valeur de la liste flash, il y a de grandes chances que le fabricant fournisse un module de remplacement sur la base de cette expertise. Outre le numéro de série du module, la puissance du module mesurée dans l'usine de fabrication de modules est également documentée sur la liste flash. En matière de puissance, il existe pour chaque fabricant une marge de tolérance dans les limites de laquelle la puissance du module peut se situer. Les modules de la majeure partie des fabricants se situent dans la plage de tolérance positive, c'est-à-dire que le module a généralement une puissance légèrement supérieure à celle indiquée sur la fiche produit. Mais des tolérances négatives sont également possibles. Les coûts de la dépose et du remontage du module, le contrôle en laboratoire ainsi que l'envoi au fabricant sont en règle générale à la charge de l'exploitant de l'installation.



Illustration 15 : Flasher, SUPSI

5 Les Pros du solaire : des entreprises spécialisées contrôlées

Les membres spécialisés de Swissolar, les Pros du solaire, peuvent vous apporter un soutien professionnel dans les domaines de la planification, de l'installation ainsi que de la maintenance ultérieure de l'installation. Pour devenir Pros du solaire, les entreprises spécialisées doivent justifier de l'expérience, de l'expertise et d'installations de références adéquates. Un contrôle est ensuite effectué par des experts externes et le comité directeur de Swissolar. Les Pros du solaire signent en outre une autodéclaration dans laquelle ils certifient qu'ils installent, planifient et vendent des installations photovoltaïques selon les règles de l'art et conformément aux lois et prescriptions en vigueur. La qualité des travaux est vérifiée par l'association par le biais de contrôles aléatoires. Vous trouverez des informations complémentaires et un accès au répertoire des Pros du solaire sur www.prosdusolaire.ch.

6 Glossaire

AC	Courant alternatif
Côté AC	Par côté AC, on entend la partie de l'installation photovoltaïque qui va du disjoncteur AC ou de l'onduleur jusqu'au tableau de comptage
DC	Courant continu
Côté DC	Par côté DC, on entend la partie de l'installation photovoltaïque qui va du champ de modules jusqu'à l'onduleur
Délamination	Décollement du film plastique de protection des cellules sous le verre du module
RU	Rétribution unique
GO	Garantie d'origine
kVA	Kilovoltampère
Surveillance	Surveillance de l'installation
Paramètres de protection RI	Réglages de la protection du réseau et de l'installation
NIBT	Norme installations à basse tension
OIBT	Ordonnance sur les installations électriques à basse tension (OIBT)
O-DETEC	Ordonnance du DETEC sur les installations électriques à basse tension
CO	Code des obligations
PID	(<i>Potential Induced Degradation</i>) Dégradation induite du potentiel, phénomène qui attaque les cellules des installations PV ; l'effet PID provoque une détérioration accélérée de la performance.
Interrupteur RCD	(<i>Residual Current Device</i>) Interrupteur différentiel, communément appelé interrupteur FI
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes

7 Table des illustrations

Illustration 1 : BE Netz AG, enregistreur de données	10
Illustration 2 : Décoloration des modules (browning), Jendra Power AG	21
Illustration 3 : Endommagement de module après une tempête, Edisun	22
Illustration 4 : Onduleurs encrassés, Jendra Power SA.....	23
Illustration 5 : Modules encrassés, Jendra Power SA	23
Illustration 6 : Mesure des courbes caractéristiques, représentation de l'écart des valeurs mesurées par rapport aux mesures figurant dans la fiche technique	25
Illustration 7 : Incendie de câbles, Jendra Power SA	26
Illustration 8 : Utilisation d'un multiboard solaire, SMB Solar Multiboard GmbH.....	27
Illustration 9 : Protection par encordement, BE Netz AG.....	28
Illustration 10 : Nettoyage de l'installation solaire, BE Netz AG	31
Illustration 11: La toiture végétale comme espace de vie ; criquet à ailes bleues (Sphingonotus caerulans), Dr. Stephan Brenneisen, ZHAW Wädenswil.....	32
Illustration 12 : Zone de sedums devant les modules PV, Dr. Stephan Brenneisen, ZHAW Wädenswil	33
Illustration 13 : Végétation sur une toiture végétalisée ; installation photovoltaïque orientée est-ouest, Dr. Stephan Brenneisen, ZHAW Wädenswil.....	33
Illustration 14 : Photo thermographique d'une dégradation induite du potentiel (PID), Jendra Power AG	34
Illustration 15 : Flasher, SUPSI	35