

## Les fusibles PV – Pour une protection maximale des modules photovoltaïques

*Les fusibles sont couramment utilisés pour la protection des circuits électriques depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Cependant, les nouvelles technologies comme les systèmes d'alimentation en énergie photovoltaïque (PV) impliquent de nouveaux équipements, de nouvelles procédures de câblage ainsi que de nouvelles règles d'installation qui s'appuient sur une protection fusibles et des conseils de mise en œuvre spécifiques. Stimulée par une demande croissante en énergie alternative et un soutien financier important de la part de certains gouvernements, l'installation de systèmes PV a largement précédé la mise en place de règles communément admises et de normes internationales. De nombreux termes, définitions et procédures de test ne sont toujours pas définis et sont par conséquent utilisés de différentes manières. Cet article a pour but d'aider le lecteur à sélectionner correctement les fusibles destinés à des systèmes PV, sans pour autant avoir la prétention de représenter un état de l'art. Le module PV et la technologie du fusible sont encore en développement et les études en cours ainsi que l'expérience du terrain pourraient en effet conduire à des résultats différents dans l'avenir.*

*Les règles locales de câblage et d'installation exigent généralement une protection contre les surintensités dès qu'il existe un risque d'incendie lié à la surchauffe des conducteurs. En outre, lorsqu'ils sont correctement choisis et mis en place, des dispositifs de protection contre les surintensités tels que les fusibles préservent efficacement les équipements en cas de panne électrique.*

*Des fusibles spéciaux ont été développés pour assurer la protection des systèmes PV et des travaux de normalisation sont en cours afin de répondre aux exigences particulières des circuits courant continu caractéristiques des générateurs PV. Il faut toutefois garder à l'esprit que même ces fusibles spéciaux ne peuvent assurer une protection incendie dans toutes les hypothèses de défaillance, comme, par exemple, en cas d'un défaut d'arc. Il est par conséquent préférable d'adjoindre aux fusibles des moyens de protection complémentaires.*

*La première partie de cet article est destinée aux ingénieurs d'application et aux équipes « services » chargés de sélectionner les fusibles destinés à la conception de systèmes PV ou à remplacer des systèmes existants. Pour ceux qui souhaiteraient d'abord comprendre la logique de mise en œuvre des fusibles, nous suggérons de consulter directement l'annexe.*

### Guide d'application du fusible PV pour une lecture rapide

*(consulter l'annexe pour des explications techniques détaillées)*

Les modules PV sont des dispositifs capables de résister à leur courant nominal de court-circuit  $I_{SC\_STC}$  et les surintensités occasionnelles dues à une augmentation anormale de l'irradiation. En effet, une irradiation accrue est susceptible de faire passer temporairement les courants de fonctionnement à un niveau de 1,4 à 1,6  $I_{SC\_STC}$ .<sup>1</sup>

Un ombrage partiel des cellules dans une chaîne de modules PV peut provoquer localement des points chauds (hot spots) et causer de graves dégâts aux modules. Etant donné que la surchauffe est causée par une augmentation de tension dans des conditions de courant normales, les fusibles ne sont d'aucune aide. Aussi les diodes bypass constituent-elles la solution privilégiée pour prévenir les points chauds.

---

<sup>1</sup> STC (standard test conditions): 25 °C, 1.000 W/m<sup>2</sup>, facteur de masse atmosphérique 1,5

Correctement conçus, les générateurs photovoltaïques ne nécessitent pas de protection contre les surintensités dans les conditions normales.

Néanmoins, dans des circuits défaillants, les modules PV peuvent être endommagés par des surintensités inverses excédant la tenue au courant inverse des modules  $I_{MOD\_REVERSE}$ . Les effets des courants de défaut peuvent aller d'un dommage définitif aux modules PV (et une diminution de l'efficacité) jusqu'à la destruction des conducteurs (pouvant générer des arcs électriques voire un incendie). Les courants de défaut dangereux proviennent de sources externes telles que les modules ou les chaînes de modules connectés en parallèle à la chaîne défaillante, des accumulateurs électriques servant au stockage ou encore de la réalimentation au travers d'onduleurs connectés au réseau.

Les fusibles de chaîne PV correctement dimensionnés sont en mesure de protéger les modules ou chaînes PV et le câblage interne contre les surintensités inverses.

Les conseils de sélection des fusibles pour chaîne PV qui suivent s'appliquent principalement à des générateurs photovoltaïques sans source d'énergie externe, c'est-à-dire des systèmes sans accumulateur électrique et avec des onduleurs qui ne peuvent se réalimenter sur le réseau. Dans le cas d'installations PV de grande taille, des fusibles supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires au niveau des batteries, des groupes ou des générateurs PV.

NOTE - Les courants de défaut dans les générateurs PV dépendent fortement de l'irradiation effective et peuvent être bien inférieurs à  $I_{SC\_STC}$ . Il existe des risques d'arcs électriques dangereux avec ces courants qui ne déclenchent pas le dispositif de protection contre les surintensités.

## Sélection des fusibles de chaîne PV

### a) Le nombre de chaînes connectées en parallèle, facteur décisif d'une protection fusible

La sélection fusibles de chaîne PV est régie par la valeur de la tenue au courant inverse  $I_{MOD\_REVERSE}$  des modules PV et du câblage du module. Les fabricants de modules PV publient des valeurs correspondantes ou des calibres maximum des fusibles.

En général, aucune protection contre les courants de défaut ne sera requise dans les systèmes PV composés de seulement une ou deux chaînes en parallèle, c'est-à-dire si le courant de défaut ne peut dépasser la tenue au courant inverse des modules PV. Pour les systèmes avec un plus grand nombre de chaînes en parallèle, une protection des fusibles est recommandée en fonction de la capacité de tenue au courant inverse des modules  $I_{MOD\_REVERSE}$  (figure 1).

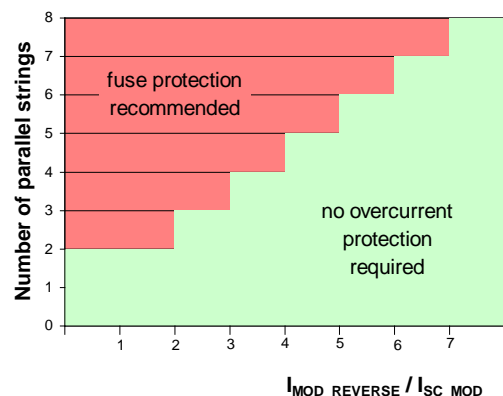


Fig. 1 - Application des fusibles de chaîne PV

**b) Seuls les fusibles stipulés "PV" sont susceptibles d'être utilisés**

L'utilisation de fusibles impropres dans les systèmes PV est plus susceptible d'être une cause de dommage que d'assurer une protection contre les dommages. En attendant qu'une norme spécifique pour les fusibles PV existe, il est fortement conseillé de n'utiliser que des fusibles étiquetés "PV" ou spécifiés par le constructeur pour la protection des systèmes PV.

**c) Une protection fusible aux deux pôles**

Très communs en Europe, les systèmes PV non reliés à la terre nécessitent un sectionnement et des dispositifs de protection contre les surintensités aux deux pôles des chaînes PV. Lorsque les fusibles de chaîne PV sont nécessaires à la protection de surintensité inverse, l'utilisation de sectionneurs-fusibles (combinés-fusibles) est recommandée pour permettre un remplacement des fusibles en toute sécurité.

**d) Pouvoir de coupure assigné**

Les fusibles de chaîne PV doivent être conçus pour le courant continu et avoir un pouvoir de coupure nominal supérieur ou égal au courant de défaut maximum du système PV. Un pouvoir de coupure minimum de 25 kA en courant continu est recommandé eu égard aux courants de défaut des unités de stockage d'énergie ou des courants de réalimentation provenant du réseau. La constante de temps du circuit est supposée être inférieure à 2 ms, c'est-à-dire qu'il est possible d'attribuer un plus grand pouvoir de coupure aux fusibles dans les systèmes de PV que dans les systèmes ayant des constantes de temps plus grandes.

**e) Gamme de coupure**

Les fusibles de chaîne PV doivent être à pouvoir de coupure sur l'ensemble de la plage des courants (type «g»), c'est-à-dire qu'ils doivent être en mesure d'interrompre en toute sécurité tout courant entre le courant minimum de fusion et le pouvoir de coupure assigné. Les fusibles de chaîne PV communément disponibles sont de type "gR" ou "gS" conformément à la norme CEI 60269-4.

Une nouvelle norme pour les fusibles de type "PV" est actuellement en cours d'élaboration et devrait probablement s'appeler CEI 60269-6. Les fusibles "PV" auxquels on se réfère dans cet article sont conformes au projet de norme quant aux exigences relatives aux courants conventionnels de fusion et non-fusion.

*Note - Les fusibles type "a", à pouvoir de coupure sur une gamme partielle, ne doivent pas être utilisés car ils peuvent provoquer un arc dangereux lorsqu'ils fonctionnent dans la plage qui se situe entre le courant de fusion et le courant de coupure minimum.*

**f) Tension d'emploi**

La tension d'emploi du fusible  $U_n$  doit être égale ou supérieure à la tension en circuit ouvert au maximum  $U_{OC\_STC}$  de la chaîne PV :

$$U_n \geq 1,2 U_{OC\_STC}$$

(Le facteur 1,2 matérialise l'augmentation de la tension en circuit ouvert à basse température ambiante et peut être augmenté en cas de conditions climatiques froides).

## g) Courant assigné minimum des fusibles de chaînes PV

Les fusibles ne doivent ni fonctionner ni se dégrader dans des conditions normales de fonctionnement afin d'éviter des déclenchements intempestifs. La capacité à transporter des courants sans détérioration est étroitement liée à l'élévation de température des composants du fusible. On évitera donc que les courants de fonctionnement ne dépassent le calibre du fusible.

Cette exigence est encore plus essentielle pour des fusibles soumis à des cycles de température à cause de fluctuations répétées des courants, ce qui est bien souvent le cas dans les systèmes PV.

Le courant assigné  $I_n$  des chaînes de fusibles doit donc être supérieur au courant de fonctionnement maximum de la chaîne, qui varie de  $1,25 I_{SC\_MOD}$  à  $1,6 I_{SC\_MOD}$  en fonction des conditions climatiques locales, y compris une tolérance pour irradiation excessive. La règle d'application suivante semble raisonnable :

$$I_n \geq 1,4 I_{SC\_MOD}$$

NOTE - *Les fabricants de fusibles peuvent appliquer des déclassements en fonction de conditions particulières d'utilisation, par exemple des températures ambiantes élevées ou des fusibles confinés dans des enceintes avec une dissipation de chaleur réduite (voir ci-dessous).*

Comme l'illustre la figure 2, les fusibles spécifiques PV offrent une meilleure protection que les fusibles standards grâce à un courant fusion  $I_f$  plus faible.

## h) Courant assigné maximum des fusibles

Le courant de fusion  $I_f$  du fusible doit être égal ou inférieur au courant inverse non-destructeur ("calibre de protection contre les surintensités») du module. Le résultat de cette règle étant :

$$I_n \leq 0,9 I_{MOD\_REVERSE} \text{ pour les fusibles PV}$$

(voir l'annexe pour plus de détails et pour d'autres types de fusibles).

NOTES - *Dans tous les cas, le courant assigné maximum des fusibles donné par le fabricant des modules ne doit pas être dépassé.*

*Pour des valeurs élevées de  $I_{MOD\_REVERSE} / I_{SC\_MOD}$  et en présence d'un grand nombre de chaînes en parallèle, il faut vérifier à deux fois que la protection des câbles de chaîne reste assurée.*

## i) Dissipation d'énergie et température ambiante

En comparaison avec les autres dispositifs de protection ou aux diodes de blocage, les cartouches fusibles PV dissipent très peu d'énergie. Toutefois, les boîtes de jonction des générateurs PV sont susceptibles d'être exposées à une température ambiante élevée et contiennent un grand nombre de cartouches fusibles et

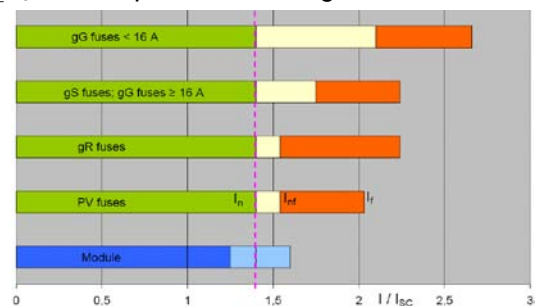


Fig. 2 - Gamme de coupure de différents types de fusibles

$I_n$  - courant assigné du fusible  
 $I_{nf}$  - courant de non-fusion  
 $I_f$  - courant de fusion

autres composants électriques, tels que les diodes de blocage, qui génèrent une hausse significative de la température à l'intérieur de l'enceinte. Contrairement aux boîtes de dérivation définies par la norme CEI 60439-1, une réduction des facteurs de charge pour un plus grand nombre de circuits n'est pas applicable. Les calculs de hausse de température et les tests doivent être fondés sur des courants de charge maximum dans tous les circuits. Des facteurs de déclassement (fournis par les fabricants de fusibles PV) peuvent s'appliquer pour des températures ambiantes élevées.

#### **j) Fluctuations de charge**

Soumises à de fréquentes fluctuations des courants de charge, les appareillages fusibles PV ne doivent pas se dégrader sous l'influence des changements de température permanents. Un facteur de déclassement peut s'appliquer au courant assigné du fusible en fonction des données du fabricant et selon avis.

#### **k) Surveillance des fusibles**

La détérioration d'un fusible de chaîne PV dans un groupe ou un générateur comprenant de multiples chaînes peut être difficile à détecter. Une surveillance électronique des fusibles est donc recommandée afin de rendre compte de leur fonctionnement et permettre ainsi un diagnostic immédiat pour réparer rapidement la chaîne en défaut et réduire au minimum la perte d'énergie fournie.

### **Sélection des fusibles PV pour groupes et générateurs PV**

La sélection de fusibles pour des champs ou des groupes de chaînes suit les mêmes règles que la sélection des fusibles d'une chaîne PV en ce qui concerne le courant assigné minimum. Le courant assigné des fusibles doit être supérieur au courant de fonctionnement maximum du groupe PV composé de  $n$  chaînes PV et au courant de fonctionnement maximum du générateur PV composé de  $n_A$  groupes PV :

$$I_n \geq 1,4 I_{SC\_SUB\_ARRAY} = n \cdot 1,4 I_{SC\_MOD} \text{ et}$$

$$I_n \geq 1,4 I_{SC\_ARRAY} = n_A \cdot 1,4 I_{SC\_SUB\_ARRAY}$$

Le courant assigné maximum des générateurs PV et groupes PV est choisi afin de protéger les conducteurs des câbles adjacents et doit être inférieur ou égal à la capacité de transport de courant  $I_Z$  des conducteurs correspondants:

$$I_n \leq I_{Z\_ARRAY\_CABLE} \text{ et}$$

$$I_n \leq I_{Z\_SUB\_ARRAY\_CABLE} \text{ respectivement}$$

Une protection des câbles des générateurs PV contre les surintensités n'est nécessaire que pour les systèmes connectés à des batteries ou lorsque d'autres sources de courant seraient susceptibles d'alimenter en retour le générateur PV en cas de défaut.

### **Sélectivité**

La protection contre les surintensités d'un générateur PV doit être coordonnée de telle manière que, en cas de défaut, le dispositif de protection situé au niveau le plus bas (chaîne < groupe < générateur) à l'origine du courant de défaut fonctionne en premier. D'ici qu'une nouvelle norme PV établisse des règles spécifiques de sélectivité, les caractéristiques temps/courant publiées par les fabricants de fusibles doivent être utilisées pour une bonne coordination des fusibles aux différents niveaux d'un générateur PV.

## **Fusibles inadaptés**

Seuls des fusibles ayant un pouvoir de coupure en courant continu suffisant doivent être utilisés pour la protection des chaînes PV, groupes PV ou générateurs PV. La plupart des fusibles disponibles sur le marché doivent malheureusement être considérés comme inappropriés même s'ils ont les mêmes dimensions ou une tension et un calibre apparemment similaires aux fusibles qualifiés PV. Les fusibles suivants doivent faire l'objet d'une attention spéciale puisqu'ils sont susceptibles d'être inappropriés :

- Fusibles miniatures
- Fusibles automobiles
- Fusibles domestiques

Les fusibles utilisables par des personnes non qualifiées conformément à la norme CEI 60269-3 (fusibles domestiques) sont généralement conçus pour le courant alternatif et ne sont pas qualifiés pour des applications photovoltaïques, à l'exception des fusibles de type D qui sont également assignés en courant continu et fréquemment utilisés dans les installations industrielles.

**ANNEXE**

**Connaître son équipement pour se protéger**

Les générateurs PV se comportent très différemment des autres générateurs d'énergie en ce qui concerne les courants de fonctionnement ainsi que les courants de défaut. Une connaissance approfondie des principes physiques et des conditions de fonctionnement est essentielle pour la sélection et la coordination des fusibles. Contrairement à d'autres sources d'alimentation électrique, le courant de court-circuit n'est pas significativement plus élevé que le courant de fonctionnement maximum. Les règles classiques de sélection des fusibles ne sont donc pas applicables.

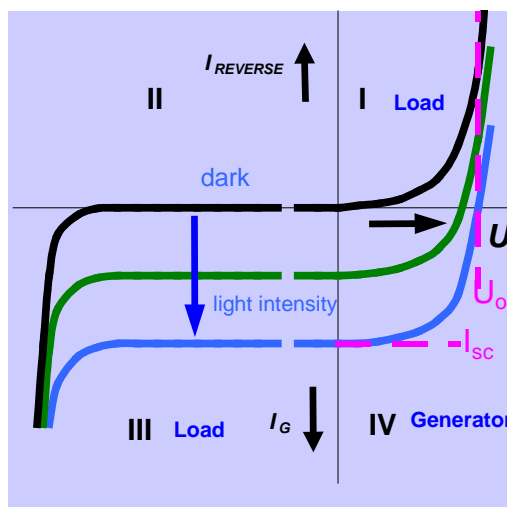
**Cellules PV**

**Tableau A1** - Tailles et courants des cellules (valeurs typiques des cellules de silicium)

Taille des cellules		$I_{sc}$
4 "	10 x 10 cm <sup>2</sup>	3,5 A
5 "	12,5 x 12,5 cm <sup>2</sup>	5 A
6 "	15,6 x 15,6 cm <sup>2</sup>	7,5 A
8 "	21 x 21 cm <sup>2</sup>	14 A

Les cellules PV, communément appelées panneaux solaires, sont les éléments fondamentaux de la production d'électricité PV. Les cellules PV sont des diodes semi-conducteurs ayant une barrière de jonction exposée accessible aux rayons du soleil et

produisant de l'électricité lorsqu'elles sont éclairées. Dans l'obscurité, les cellules PV se comportent presque comme des diodes ordinaires (voir les caractéristiques sur la figure A1).

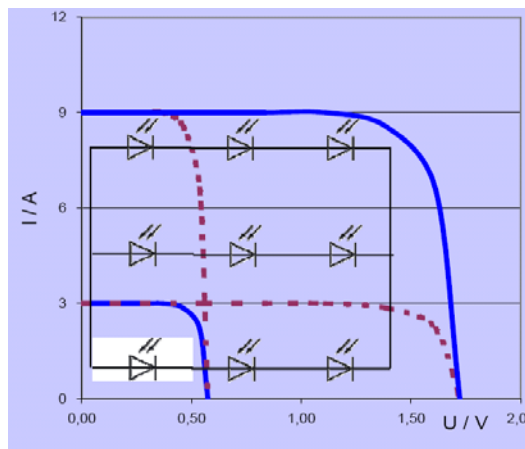


**Fig. A1 – Caractéristiques des cellules PV** (système de flèche pour la détermination des charges de référence)

*NOTE - On utilise tout au long de cet article le système de flèche pour la détermination des charges de référence dans la mesure où, en cas de surintensités ou un fonctionnement irrégulier, tous les composants du circuit qui nécessitent une protection sont des charges absorbant de l'énergie.*

Les cellules PV représentent des charges passives quand elles fonctionnent dans les quadrants I et III de la figure A1. L'énergie électrique est fournie uniquement lorsque les cellules PV fonctionnent dans le quadrant IV. Ce quadrant, dont l'axe du courant est inversé (schéma du générateur: axe  $I_G$  pointant vers le haut) est couramment utilisé pour donner les caractéristiques des cellules, des modules et des générateurs PV (voir la figure A2).

*NOTE - Les courants allant dans le sens direct de la diode sont définis comme "des courants inverses"  $I_{REVERSE}$  par rapport aux courants de fonctionnement des générateurs PV.*



**Fig. A2 - Caractéristiques en mode générateur de cellules PV connectées en parallèle et en série**

Le courant de court-circuit maximum  $I_{sc}$  fourni par une cellule PV est limité par la taille des cellules (voir tableau A1) et proportionnel à l'intensité du rayonnement solaire (figure A1). La tension générée par une cellule PV cor-

respond à la valeur de seuil de la diode et est proche de 0,5 V pour une diode de silicium. La tension en circuit ouvert  $U_{OC}$  des cellules PV en silicium disponibles sur le marché est généralement comprise entre 0,5 V et 0,7 V à une température de fonctionnement des cellules de 25 °C. Pour les applications commerciales, un certain nombre de cellules PV sera donc relié en série et en parallèle afin d'atteindre la puissance de sortie désirée. L'interconnexion en série augmente la tension, tandis que l'interconnexion en parallèle augmente le courant (voir figure A2).

Pour les essais et le classement des cellules et des modules PV, un ensemble de conditions standard de référence a été défini dans la norme CEI 61215. Ces conditions d'essai standard marquées de l'indice "STC" sont les suivantes:

- Température de la cellule  $T_{STC} = 25\text{ °C}$
- Intensité de rayonnement solaire  $G_{STC} = 1.000\text{ W/m}^2$
- Spectre de lumière (masse atmosphérique optique relative)  $AM = 1,5$

NOTE - Les conditions de test standards représentent une approximation des conditions environnementales en Europe centrale. Des conditions climatiques locales et temporaires peuvent s'en écarter de manière significative.

Bien que la température de la cellule PV n'ait pas une influence significative sur le courant maximum de la cellule PV, la tension en circuit ouvert de la cellule, et par conséquent la puissance fournie, diminuent de manière considérable à des températures élevées comme le montre la figure A3. De faibles températures ambiante et de la cellule PV augmentent la tension du système PV et le rendement énergétique.

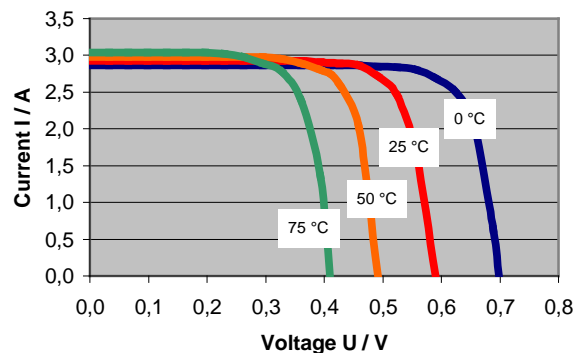


Fig. A3 - Caractéristiques des cellules à des températures différentes

Les caractéristiques des cellules PV se reflètent dans les caractéristiques du module, de la chaîne et du générateur PV à différentes échelles de tension et de courant.

## Modules PV

Les cellules PV sont des objets fragiles qui nécessitent une protection mécanique et environnementale pour une meilleure manipulation et installation à l'extérieur. En outre, la puissance fournie par une unique cellule PV n'a guère d'utilité pratique en raison d'une tension de sortie limitée de l'ordre de 0,5 V. Pour atteindre la tension de sortie désirée, on interconnecte en série un grand nombre de cellules (généralement de 36 à 120) que l'on assemble et protège de l'environnement dans des modules PV. En général, les cellules PV ne sont pas reliées en parallèle au sein d'un module PV, ce qui signifie que les courants de la cellule et du module PV sont identiques.

Les modules PV comprennent une boîte de jonction montée à l'arrière du module, et des moyens de connexion, par exemple des câbles et connecteurs, pour ajouter des modules supplémentaires. Les diodes bypass (figure A11) peuvent être soit partie intégrante du module soit incluses dans la boîte de jonction.

Les fabricants de modules PV fournissent des données techniques, par exemple, le courant de court-circuit  $I_{SC}$ , la tension en circuit ouvert  $U_{OC}$  et les paramètres de fonctionnement optimal  $I_{MPP}$  et  $U_{MPP}$  donnant une définition du point de puissance maximum MPP (maximum power point) du module (figure A4). Pour une exploitation maximale du rayonnement solaire, le générateur PV doit fonctionner aussi près que possible du point de puissance maximum. Un contrôle électronique sophistiqué appelé « tracker MPP » est donc nécessaire afin de répondre aux conditions fluctuantes de l'environnement et fait généralement partie intégrante du système de conditionnement de l'énergie qui adapte le générateur PV aux réseaux primaires (Figure A5).

## Générateurs PV

Les générateurs PV comprennent l'ensemble des composants courant continu du système PV à l'exception des dispositifs de stockage, des conditionneurs d'énergie et des charges (Figure A5). Un module de 36 cellules peut être utilisé pour charger une batterie de 12 V de façon autonome. Dans cette application, le module unique équivaut à un générateur PV. Des systèmes plus importants font appel à un grand nombre de modules interconnectés en série pour former des chaînes PV (figure A5) qui atteignent la tension désirée. Des courants plus importants peuvent être générés en mettant en parallèle plusieurs chaînes PV pour former un groupe PV et plusieurs groupes PV peuvent être reliés en parallèle pour former un générateur PV. Les câbles de chaînes de polarité positive et négative sont souvent reliés dans des boîtes de jonction (figure A6) qui peuvent comprendre également des équipements de protection contre les surtensions et, le cas échéant, des diodes de blocage.

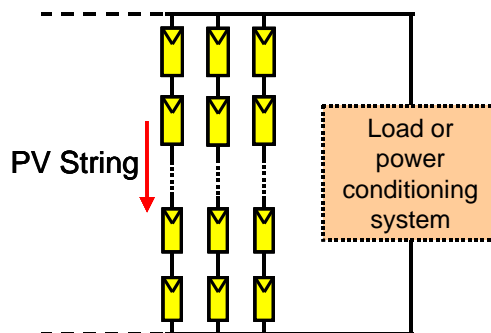


Fig. A5 - Générateur PV

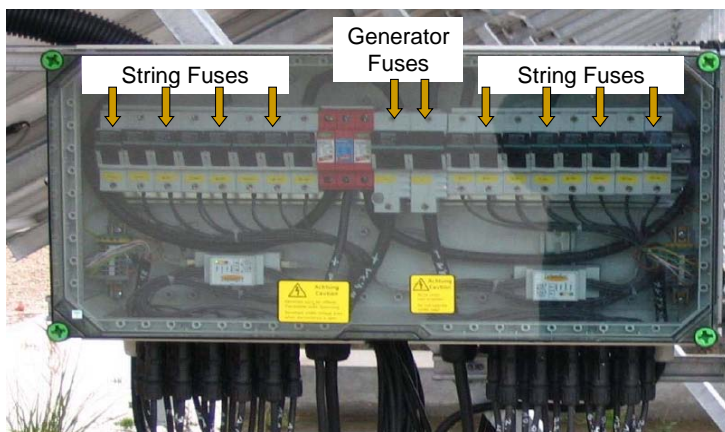


Fig. A6 - Boîte de jonction du générateur

Virtuellement rien n'empêche d'atteindre d'énormes quantités d'énergie électrique, par exemple, de l'ordre de plusieurs mégawatts en interconnectant les modules PV en série et en parallèle. On veillera à n'interconnecter que des modules de même type, ayant les mêmes caractéristiques et des tolérances proches. Des tolérances marquées dans les caractéristiques ou l'irradiation des modules conduisent à d'importantes pertes de puissance et à une moindre efficacité du générateur.

## Conditions de fonctionnement normales et anormales

Bien entendu le fonctionnement normal des cellules PV devrait se situer dans le quadrant IV de la figure A1, c'est-à-dire que de l'électricité devrait être produite. Des conditions de fonctionnement anormales dans les quadrants I et III ne

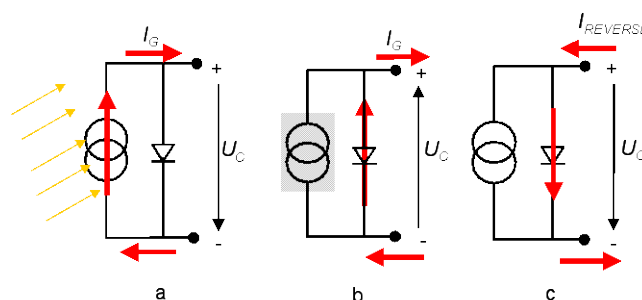


Fig. A7 - Schéma équivalent d'une cellule PV  
a) irradiée b) ombrée c) inversée

peuvent, toutefois, pas toujours être évitées, et entraînent une surchauffe voire la destruction thermique des cellules PV. Un schéma équivalent composé d'une source de courant et d'une diode en parallèle (voir figure A7) peut être utile afin de rapprocher le comportement électrique des cellules PV et d'expliquer différentes conditions de fonctionnement:

- **À la lumière du soleil**, les cellules PV (figure A7 a) génèrent un courant (sens direct)  $I_G$  et une tension  $U_C$  correspondant à l'opération dans le quadrant IV de la caractéristique de la cellule (figure A1). Les courants en fonctionnements, y compris les courants de court-circuit, sont limités par la nature de la source de courant de cellules PV et n'endommageront normalement pas des systèmes PV correctement conçus.

- **Un ombrage partiel** d'une cellule PV dans une chaîne composée de multiples cellules PV n'influencera que très peu le générateur de courant, mais forcera la cellule PV à fonctionner dans le quadrant III, c'est-à-dire inverser la polarité de la tension de la cellule (figure A7 b) et l'élever au seuil tension inverse de la jonction :  $U_C \approx -15 \text{ V}$  à  $-25 \text{ V}$  (Figure A9). La puissance absorbée par les cellules PV à l'ombre dans une chaîne est augmentée au delà des conditions de fonctionnement normales. La hausse des températures impliquées cause des points chauds (figure A8) qui peuvent endommager de façon permanente le module PV. Malheureusement, **les fusibles ne peuvent pas protéger les modules PV de ces points chauds** puisque ceux-ci ne sont pas causés par des surintensités, mais des tensions inverses élevées (figure A9). Les points chauds peuvent largement être évités au moyen de diodes bypass connectées à travers plusieurs cellules ou à travers un module dans le sens du courant du générateur (sens direct) (figure A11). La détection des points chauds impose un contrôle régulier par le biais d'une caméra à infrarouge.

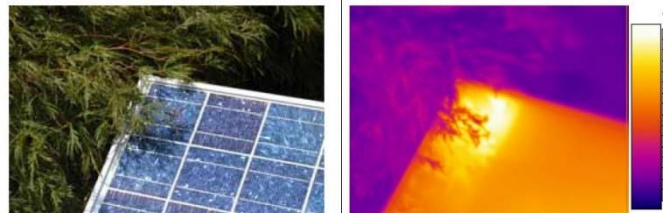


Fig. A8 - Hot spot généré par un ombrage partiel

Photo: Photovoltaik-Systemtechnik Schlussbericht Luciano Borgna, Christof Geissbühler, Dr. Heinrich Häberlin, Martin Kämpfer, Urs Zwahlen Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Fachbereich Elektro- und Kommunikationstechnik, Photovoltaiklabor, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf [heinrich.haerberlin@bfh.ch](mailto:heinrich.haerberlin@bfh.ch) / [www.pvtest.ch](http://www.pvtest.ch)

- **Des courants inverses**, comme l'illustre la figure A7 c, peuvent être infligés à un module ombragé par des modules parallèles exposés à des niveaux de rayonnement élevés. Le module ombragé représente une charge et fonctionne dans le quadrant I (figure A1). Dans des conditions de fonctionnement normal, la tension de fonctionnement est limitée au maximum de la tension en circuit ouvert  $U_{oc}$ . Par conséquent, dans les systèmes fonctionnant normalement, les valeurs absolues des courants inverses ne peuvent guère dépasser le niveau de court-circuit du module.

- **Dans les circuits fonctionnant normalement, les courants inverses ne représentent donc pas des charges dangereuses qui nécessiteraient une protection fusible.**

Toutefois, dans les générateurs PV défectueux, la tension appliquée aux modules individuels peut dépasser la tension en circuit ouvert normale et générer des courants inverses sensi-

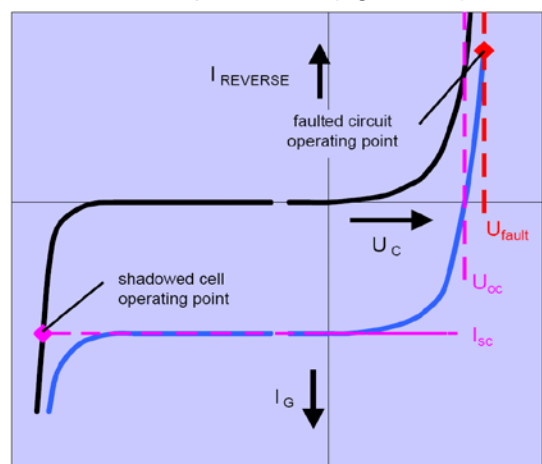


Fig.A9 - Conditions d'ombrage et de défaut

blement plus grands, ce qui risque de surchauffer le module et doit être interrompu par des fusibles de chaîne avant de causer des dommages (figure A9).

## Courants de défaut dans les systèmes PV

Contrairement aux autres sources d'énergie, un court-circuit de la charge n'entraînerait pas de surintensités dangereuses dans un système PV. Toutefois, des défauts de courts-circuits dans les modules, les boîtes jonction et le câblage du module ou des défauts à la terre dans le câblage du générateur peuvent produire des surcharges. Bien que les modules PV soient des sources de courant limité, ils peuvent être soumis à des surintensités inverses provenant soit de l'une des multiples chaînes PV parallèles soit de sources externes (des batteries par exemple) ou les deux.

Certains défauts potentiels et les courants de défaut maximum qui en résultent (circuit de charge ouverte et test standard des conditions) dans un système PV comportant  $n$  chaînes parallèles et sans source extérieure se trouvent expliqués sur la figure A10:

### a) Court-circuit du module

La tension de sortie totale de la chaîne en défaut vaut la tension en circuit ouvert des chaînes en fonctionnement diminuée de la tension de sortie d'un module. Par conséquent, les  $n-1$  chaînes parallèles alimentent en retour la chaîne en défaut (figure 10, faute a). Le courant inverse dans la chaîne en défaut peut valoir

$$I_{\text{REVERSE}} \approx (n - 1) I_{\text{SC}}$$

La puissance électrique correspondante de

$$P_v = U_{\text{MODULE}} \times I_{\text{REVERSE}}$$

doit être dissipée par les modules en fonctionnement dans la chaîne en défaut et transporté par les câbles de connexion. Le courant dans les conducteurs de la boucle de court-circuit est encore plus grand et s'élève à  $I_{\text{fault}} \approx n I_{\text{SC}}$ .

### b) Double défaut à la terre

En cas de défauts à la terre simultanés dans un conducteur et une chaîne, le courant de la boucle de terre s'élève à  $I_{\text{fault}} \approx n I_{\text{SC}}$  et le courant inverse dans le segment de chaîne qui se situe entre la faute et le conducteur opposé est

$$I_{\text{REVERSE}} \approx (n-1) I_{\text{SC}}, \text{ correspondant à une perte de puissance de } P_v = U_{\text{MODULE}} \times I_{\text{REVERSE}}$$

Dans les deux cas, il faut s'attendre à une surchauffe des modules et des conducteurs et une protection contre les surintensités est nécessaire en fonction du nombre de chaînes parallèles (voir figure 1). Les défauts à la terre doubles peuvent bien sûr se produire dans la polarité opposée à celle illustrée à la figure A10. Par conséquent, dans un système PV non relié à la terre, les dispositifs de protection contre les surintensités, s'ils sont nécessaires, doivent être installés au niveau des conducteurs positifs et négatifs des chaînes PV.

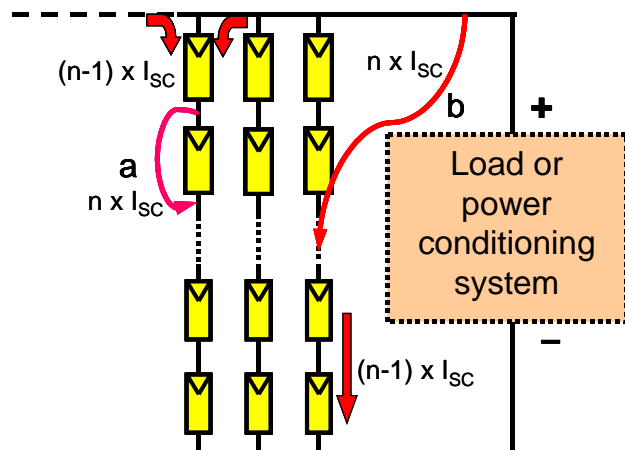


Fig. A10 - Défauts potentiels dans un groupe PV non relié à la terre

## Protection contre les surintensités inverses à l'aide de fusibles de chaîne PV

Dans la plupart des générateurs PV de grande taille, les dispositifs de protection contre les surintensités sont nécessaires pour protéger les câbles et modules PV de la surchauffe en cas de défauts d'isolement. Les fusibles sont à privilégier en raison de leur fiabilité, compacité, faible coût et faible dissipation d'énergie. Comme les câbles sont généralement sélectionnés en fonction d'exigences en matière de chute de potentiel, la capacité de transport de courant requise est presque automatiquement donnée et la tâche principale des fusibles reste de protéger les coûteux modules PV contre la surchauffe et les dommages causés par les surintensités inverses.

Le principal critère de sélection des fusibles est donc le courant inverse qu'un module PV peut supporter temporairement jusqu'à ce qu'un dispositif de protection interrompe le courant de défaut. Les valeurs typiques pour  $I_{REVERSE}$  des modules PV en silicium cristallin sont estimées à entre  $2 I_{SC\_STC}$  et  $3 I_{SC\_STC}$ . (Les fabricants de modules peuvent donner plus de valeur en fonction du matériau cellulaire et la conception du module.)

La protection contre les courants de défaut n'est pas pertinente dans les systèmes PV composés d'une seule ou deux chaînes en parallèle, et sans batterie de stockage, à condition que les modules PV soient capables de supporter un courant inverse au moins égal à leur courant de court-circuit assigné  $I_{SC\_STC}$  (voir figure 1).

Les fabricants de modules peuvent donner des valeurs applicables pour  $I_{MOD\_REVERSE}$  en fonction du matériau cellulaire et la conception du module. Comme alternative, un fusible de courant assigné maximum peut être donné, ce qui, toutefois, n'a pas beaucoup de sens sans une spécification précise du fusible.

NOTE - Certains fabricants de modules stipulent un courant inverse maximum à peu près égal à la puissance assignée du court-circuit  $I_{MOD\_REVERSE} \approx I_{SC\_MOD}$  et un calibre de fusible significativement plus élevé, ce qui prête à confusion. Apparemment, le faible calibre se réfère à l'application intentionnelle de courants inverses pour le dégivrage ou à des fins de déneigement, la plus grande valeur se référant à la protection des fusibles en cas de défaut.

Lorsque le fabricant du module préconise un courant assigné maximum pour les fusibles, cette valeur doit être respectée. En cas de doute, il faut également s'assurer du type de fusible auprès du service clientèle du fabricant du module.

Lorsque le fabricant de module spécifie les valeurs pour  $I_{MOD\_REVERSE}$ , on peut supposer que cette valeur a été vérifiée selon la norme CEI 61730 via un test de 2 h à  $1,35 I_{MOD\_REVERSE}$  sans entraîner de dommage. Par conséquent la protection est effective dès lors qu'un fusible assigné au module fonctionne avant d'atteindre

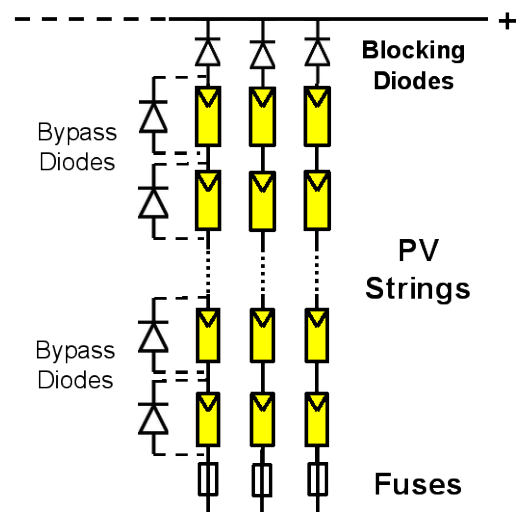


Fig. A11 - Dispositif de protection dans un générateur PV

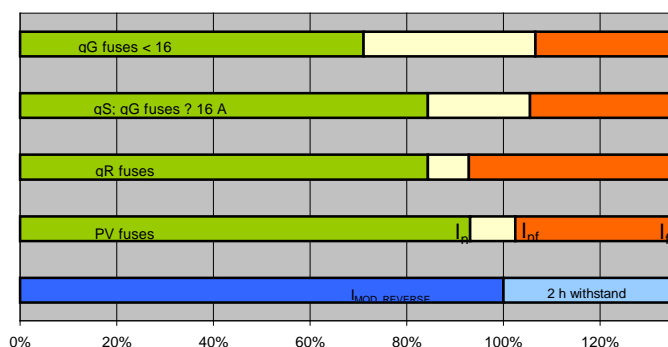


Fig. A12 - Coordination des fusibles de chaînes

$I_n$  - courant assigné du fusible  $I_{nf}$  - courant de non-fusion;  $I_f$  - courant de fusion

cette valeur de test non-destructive.

Des fusibles de types différents, ayant des valeurs assignées conventionnelles de temps et de courants de fusion différentes, exigent des règles de coordination différentes telles qu'énuméré ci-dessous et illustré sur la figure A12. Etant donné que le temps de fusion conventionnel des fusibles de chaîne couramment appliqué est de 1 h (et donc inférieur aux 2 h que le module peut supporter), la formule suivante pour la sélection des fusibles de chaîne inclut une certaine marge de sécurité et donne la valeur maximum du fusible pour un module spécifique :

$$I_f \leq 1,35 I_{MOD\_REVERSE}$$

Pour les fusibles de type standard, les critères de sélection suivants s'appliquent :

$$I_n \leq 0,85 I_{MOD\_REVERSE} \text{ for "gR", "gS" or "gG" fuse-links } > 10 \text{ A}$$

$$I_n \leq 0,7 I_{MOD\_REVERSE} \text{ for "gG" fuse-links } \leq 10 \text{ A}$$

Développés spécifiquement pour la protection de chaînes PV, les fusibles assignés "PV" présentant une intensité de fusion de  $I_f = 1,45 I_n$  sont sélectionnés

$$I_n \leq 0,9 I_{MOD\_REVERSE}$$

D'ici qu'une norme acceptée existe, il est conseillé d'appliquer cette règle, avec l'accord des fabricants.

## Fusibles ou diodes de blocage ?

Dans une chaîne PV, les diodes de blocage bloquent certains courants inverses mais pas tous (figure A11). De fait, les diodes de blocage ne doivent pas se substituer aux fusibles de chaîne. Si elles peuvent être des éléments indispensables dans les systèmes PV contenant des batteries de stockage, car elles évitent une décharge de la batterie pendant la nuit, leur utilisation doit cependant être limitée à cette application et évitée par ailleurs puisqu'elles peuvent être source de défaillance et être responsable d'une perte de puissance significative.

Les diodes de blocage ne sont pas considérées comme une protection fiable contre les surintensités inverses car elles échouent souvent en mode court-circuit et sont sensibles aux surtensions.

En outre, la dissipation d'énergie des diodes de blocage dépasse de beaucoup celle du fusible de chaîne PV (figure A13), réduisant ainsi l'efficacité du générateur PV et causant une élévation de température dans les boîtes de jonction du générateur PV.

Dans la mesure où la technologie PV, et en particulier la technologie des fusibles PV, sont encore en développement, nous vous suggérons de contacter de temps à autre vos spécialistes fusibles regroupés au sein de Pro Fuse International pour des informations détaillées et des conseils.

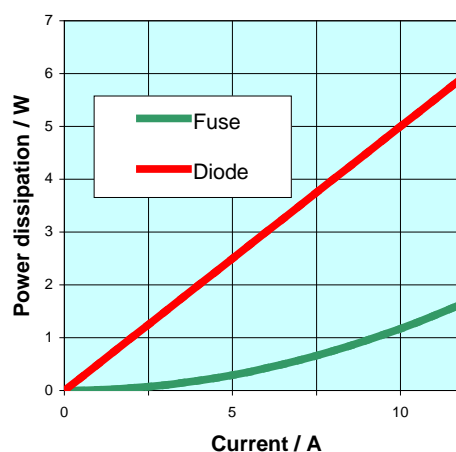


Fig. A13 - Dissipation d'énergie comparée des diodes de blocage et des fusibles de chaîne PV