

# LIVRE BLANC SUR LA SÉCURITÉ

Janvier 2020

L'architecture d'Enphase Energy se distingue principalement par sa sécurité. Dans le monde entier, les propriétaires tout comme les installateurs s'intéressent avant tout à la sécurité, et Enphase dispose de l'une des architectures d'onduleurs les plus sûres du secteur. Pour mieux comprendre l'architecture d'Enphase, commençons par les principes fondamentaux.

### Courant alternatif et courant continu

Le courant électrique est le flux d'électrons dans un câble. On distingue en général deux catégories : le courant continu (DC) et le courant alternatif (AC). En courant continu, la charge électrique (courant) circule dans un seul sens. En courant alternatif, la charge électrique change de sens à intervalles réguliers.

Sur l'illustration 1 ci-dessous, notez que le courant continu nécessite une tension constante afin de transporter les électrons (c'est ce que l'on appelle « le débit du courant »). En revanche, le courant alternatif se déplace selon une tension qui oscille entre la valeur maximale et la valeur minimale. On voit notamment que le courant alternatif passe deux fois par le point zéro à chaque cycle. C'est un point essentiel, car lorsque la tension est égale à zéro, il n'y a pas de courant. Avec un système DC, le courant ne passe jamais par le point zéro. C'est particulièrement problématique en cas de défaillance ou de panne d'un système d'isolation DC qui compromet alors la sécurité. Nous reviendrons bientôt sur ce point.

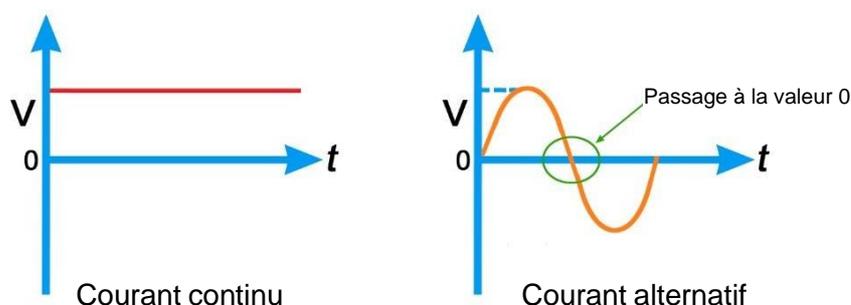


Illustration 1 : représentation du courant continu et du courant alternatif

De nombreuses préoccupations de sécurité dans le domaine du solaire sont principalement liées à la tension DC et au courant DC. À faible tension, il y a relativement peu de dommages. Toutefois, lorsque la tension DC augmente, le risque de dommages associés augmente également, entraînant parfois même des incendies dévastateurs et dangereux.

Avec les anciens modèles d'onduleurs string, les panneaux photovoltaïques (PV), qu'ils soient équipés ou non d'optimiseurs, sont reliés en série (voir l'illustration 2). Chaque panneau ajouté au circuit en série augmente la tension DC du circuit. Les systèmes domestiques peuvent comporter 600 V DC sur le toit et les systèmes commerciaux peuvent même comporter jusqu'à 1 000 V DC. Même le circuit des systèmes de petite taille peut comporter environ 350 à 400 V DC. Tout ceci peut être potentiellement très dangereux. C'est non seulement dangereux pour les propriétaires, mais aussi pour le personnel d'installation qui met en place les systèmes et les entretient.

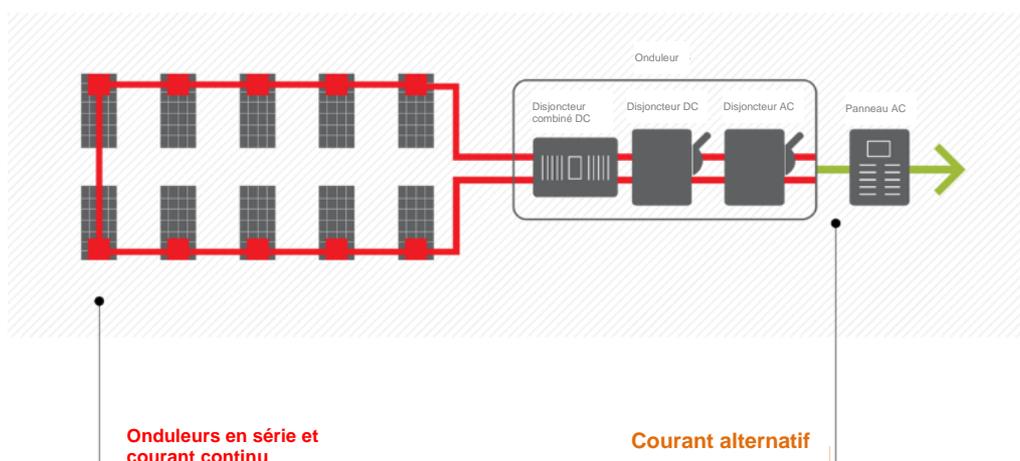


Illustration 2 : représentation d'un système d'onduleur string traditionnel

Les systèmes Enphase ne comportent toutefois pas de haute tension DC. Un micro-onduleur se situe sous chaque panneau. Le courant continu est converti en courant alternatif au niveau du panneau par le micro-onduleur. C'est pourquoi la tension DC reste faible (voir l'illustration 3). Le reste du système fonctionne en courant alternatif.

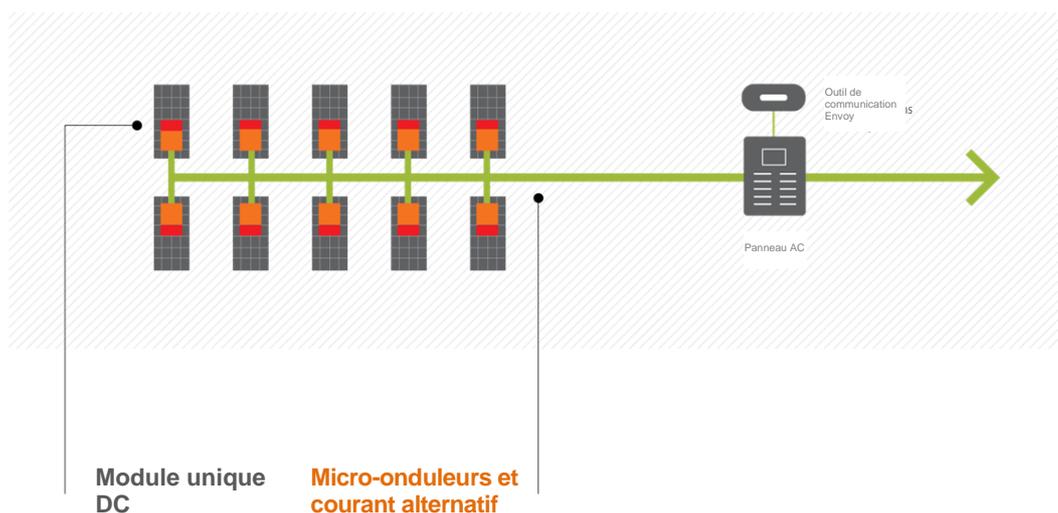


Illustration 3 : représentation d'un système de micro-onduleurs Enphase

### Défaut d'arc DC

Un défaut d'arc correspond au flux d'énergie électrique qui traverse un passage d'air grâce à des molécules de gaz ionisées. On considère normalement que l'air est un milieu non conducteur. Toutefois une différence de potentiel (tension) élevée entre deux conducteurs (par exemple, un défaut du câble en raison d'un raccordement des câbles desserré) à proximité immédiate peut entraîner la rupture des molécules d'air en leurs composants ionisés (appelé « plasma ») pouvant ensuite transporter une charge d'un conducteur à l'autre. Lorsque cette circulation de la charge (électrons) perdure, elle entraîne un arc électrique qui génère de la chaleur, rompant alors l'isolation du câble et provoquant un incendie électrique.

Les différentes possibilités de défaut d'arc dans un système photovoltaïque utilisant des onduleurs string sont mises en évidence dans l'illustration 4. La lettre D représente le défaut le plus important et le plus fréquent (défaut en série avec un conducteur).

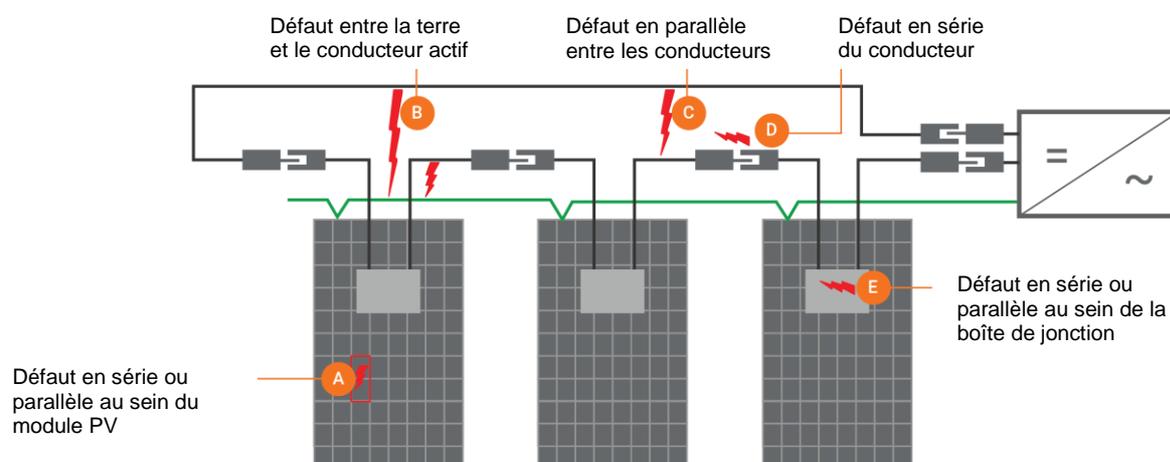


Illustration 4 : différentes possibilités de défaut d'arc dans un système photovoltaïque à onduleurs string

Pour visualiser la démonstration vidéo d'un défaut d'arc, [cliquez ici](#). Dans le premier exemple, l'interstice entre deux câbles conducteurs est d'environ 1,30 à 1,90 cm, à environ 280 V DC. La chaleur de l'arc situé à ce point suffit à faire fondre le tungstène ! C'est équivalent à de la soudure. Cela montre à quel point un système à haute tension DC placé sur votre toit peut être dangereux.

Dans le second exemple de la vidéo, la démonstration du défaut d'arc est à environ 35 V DC avec un interstice BIEN plus petit. L'arc ne parvient pas à subsister. Nous allons approfondir ces deux comportements.

Lorsqu'il est connecté à des micro-onduleurs, le système PV est de fait bien plus sûr qu'un système à onduleurs string avec de hautes tensions DC. En cas de survenue d'un arc en série dans le câblage DC, les caractéristiques intrinsèques du panneau PV, la capacité d'entrée DC du micro-onduleur et le comportement de l'algorithme de recherche de point de puissance maximale (MPPT) jouent tous un rôle important dans la réduction de l'arc. Ces trois éléments interagissent automatiquement et entraînent presque instantanément l'extinction de l'arc de lui-même lors de sa formation. Passons en revue chaque élément ainsi que ses interactions.

### Courbe I-V du panneau PV

L'enveloppe de fonctionnement électrique de tous les panneaux PV est identifiée par sa courbe I-V caractéristique (voir l'illustration 5). À une irradiance et une température de fonctionnement données, la tension et le courant du panneau sont toujours situés sur cette courbe I-V. Les extrémités de la courbe I-V définissent le courant maximal ( $I_{sc}$ ) et la tension maximale ( $V_{oc}$ ) que le panneau PV peut produire. La loi d'Ohm définit la puissance comme étant la tension multipliée par le courant ( $P = I \times V$ ). Puisque la sortie du panneau PV suit la courbe I-V, la tension optimale ( $V_{mp}$ ) et le courant optimal ( $I_{mp}$ ) sur la courbe I-V correspondent à la puissance maximale délivrée par le panneau.

### MPPT

Lorsque le micro-onduleur fonctionne, il mesure en continu la tension et le courant du panneau PV et ajuste la puissance délivrée par le micro-onduleur afin de conserver le point de fonctionnement au point de puissance maximale. Cette fonction est appelée « recherche de point de puissance maximale » ou « MPPT ». Dans la pratique, cela signifie que le panneau PV atteint son point de puissance maximale dès que le micro-onduleur fonctionne. Dans la mesure où la capacité d'entrée du micro-onduleur est proportionnelle au panneau PV, cette capacité correspond également au point de tension maximale ( $V_{mp}$ ).

### Capacité d'entrée du micro-onduleur

Tous les micro-onduleurs Enphase ont des capacités d'entrées relativement importantes dont le rôle est de stabiliser la tension du panneau PV au point de puissance maximale. La formation d'un arc en série crée une tension instantanée de 20 à 40 V, qui est en série avec la tension de la capacité d'entrée. Dans la mesure où la capacité d'entrée est bien plus élevée que la capacité du panneau, la tension continue d'entrée du micro-onduleur reste pratiquement constante lorsque l'arc se forme. La formation de l'arc nécessite donc une augmentation de la tension du panneau de 20 à 40 V afin de faire perdurer l'arc. La tension du condensateur associée à la tension de l'arc sont supérieures à la tension du circuit ouvert du panneau ( $V_{oc}$ ). Il est donc impossible que le panneau produise du courant à cette tension. Par conséquent, l'arc s'éteint de lui-même lorsqu'il se forme, ce qui réduit considérablement le risque d'incendie.

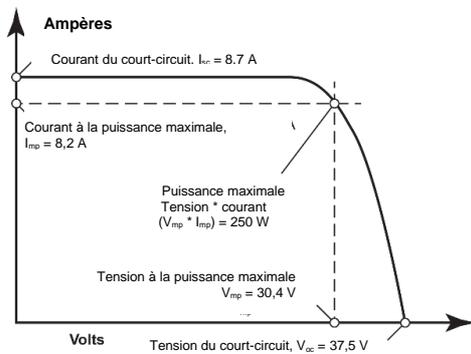


Illustration 5 : courbe I-V d'un panneau solaire

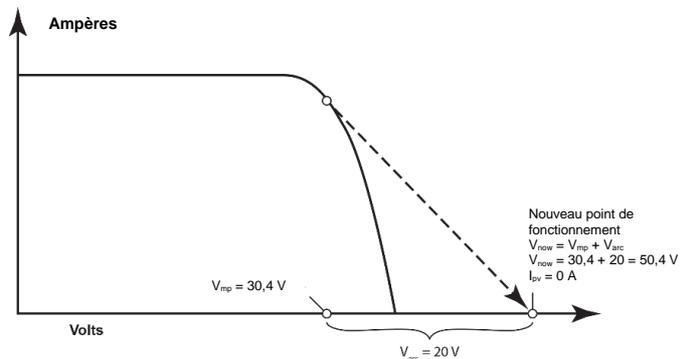


Illustration 6 : en cas de défaut d'arc en série avec un micro-onduleur en fonctionnement, la tension augmente à une valeur correspondant à  $V_{mp} + V_{arc}$ . La caractéristique de transfert du panneau PV force le courant à la valeur 0. Avec un courant égal à 0, le micro-onduleur chute à la recherche de point de puissance maximale (MPPT) et s'éteint.

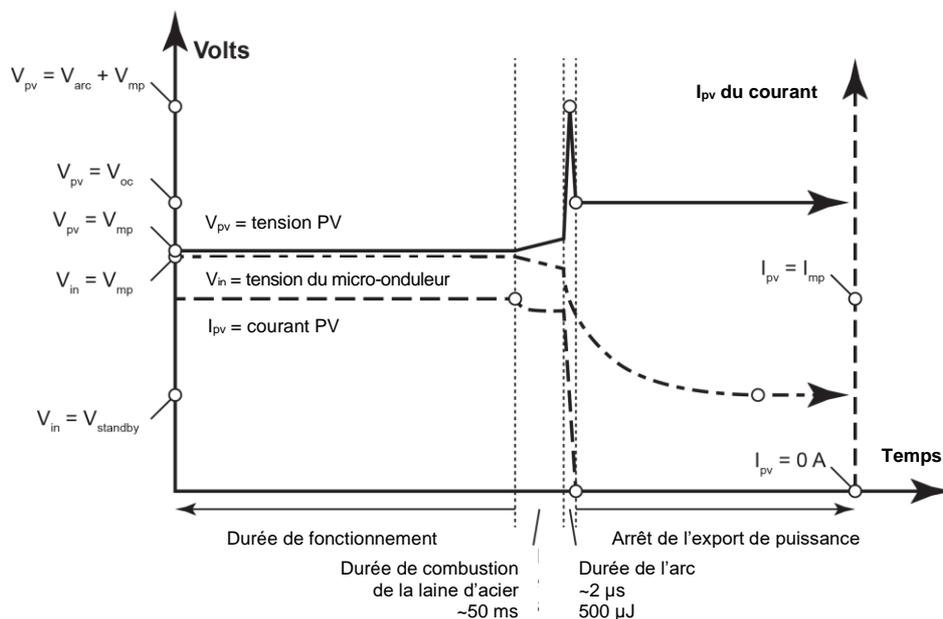


Illustration 5 : courbe I-V expliquant le comportement du micro-onduleur lors d'un défaut d'arc

Pour qu'un arc perdure, l'équation suivante doit être vraie :  $V_{oc} > V_{arc} + V_{mp}$ . Pour un système doté d'un seul module,  $V_{mp} + V_{arc}$  est supérieure à  $V_{oc}$ . C'est pourquoi l'arc ne peut exister. Lorsque deux modules sont en série, l'équation est susceptible d'être vraie en fonction de la température et du facteur de remplissage du module, c'est-à-dire de la forme de la courbe I-V. Avec trois modules ou plus reliés en série,  $V_{arc} + V_{mp}$  est inférieure à  $V_{oc}$ . L'onduleur string est alors en mesure de faire perdurer l'arc.

Essayons de comprendre ce phénomène de façon non mathématique dans des systèmes d'onduleur string. Après la formation de l'arc, la force de l'arc dépend du courant. Dans la mesure où la tension continue totale d'un onduleur string est élevée (environ 600 à 1 000 V DC), la tension de l'arc de 20 à 40 V en série ne modifie pas grandement la tension de l'onduleur string. Cela signifie que les panneaux PV continuent à fournir le courant essentiel au maintien de l'arc. Par conséquent, l'arc ne s'éteint pas de lui-même et d'autres moyens sont nécessaires afin de réduire les risques de défaut d'arc.

Les systèmes de micro-onduleurs Enphase fonctionnent toujours à une tension continue basse. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'ajouter un interrupteur de circuit de défaut d'arc (AFCI) DC externe à une installation dotée d'un système de micro-onduleurs Enphase. Les caractéristiques intrinsèques des micro-onduleurs confèrent une sécurité accrue à cette technologie d'onduleur.

### **Défaut d'arc AC**

Avec le courant continu, le conducteur est toujours actif et ne passe jamais par le point zéro. Le courant alternatif, quant à lui, passe par le point zéro une fois à chaque demi-cycle, et représente ainsi un risque bien plus faible de faire perdurer les défauts d'arc que le courant continu. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'ajouter un interrupteur de circuit de défaut d'arc (AFCI) DC à une installation dotée d'un système de micro-onduleurs Enphase. En outre, la conversion de la puissance PV en courant alternatif au niveau du panneau réduit la longueur de câblage DC et, par conséquent, le risque de défauts d'arc en série.

### **Choc électrique**

Lors d'un choc électrique réel et de par sa nature, le courant continu a tendance à vous retenir et à vous « tirer », alors que la nature du courant alternatif fait qu'il a tendance à vous repousser. Les foyers sont reliés au courant alternatif et non au courant continu pour de nombreuses raisons, la principale étant la sécurité.

### **Rapid Shutdown (Arrêt Rapide)**

La fonctionnalité d'arrêt rapide vise à améliorer la sécurité des pompiers qui interviennent sur les incendies de bâtiments comportant des systèmes photovoltaïques. Il est nécessaire de fournir une méthode simple permettant aux pompiers de désactiver facilement les conducteurs DC du système photovoltaïque afin de garantir la sécurité du toit d'un bâtiment en cas d'incendie. Avec un système photovoltaïque à onduleur string standard, lorsque l'onduleur est éteint, le câblage DC du système photovoltaïque vers l'onduleur reste actif tant que le soleil brille.

Comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes PV électriques dotés de micro-onduleurs Enphase disposent d'un onduleur interagissant avec le réseau situé directement sous chaque panneau solaire et convertissant une basse tension continue en courant continu conforme au réseau électrique. Lorsque le réseau électrique est disponible et que le soleil brille, chaque micro-onduleur vérifie que le réseau électrique fonctionne conformément aux normes d'interconnexion des réseaux (par exemple, IEEE 1547). C'est à cette seule condition qu'il exporte du courant alternatif vers le service électrique afin d'être utilisé par les charges du site ou qu'il exporte du courant vers le réseau électrique à d'autres utilisateurs. En cas de défaillance du réseau électrique, ou si les circuits AC du système PV sont déconnectés du réseau électrique grâce à un disjoncteur AC, la déconnexion du courant alternatif entraîne l'arrêt de production par le micro-onduleur avec un nombre de cycles AC réduit. Les micro-onduleurs Enphase (séries IQ7, séries M) ne peuvent pas fonctionner comme une source de tension AC. Ainsi, sans une source de réseau AC, les micro-onduleurs Enphase ne sont pas en mesure d'alimenter le câblage raccordé, et aucune tension AC ni aucun courant AC ne peuvent être injectés dans les circuits de sortie de l'onduleur ou dans le réseau.

D'autre part, les onduleurs string nécessitent un équipement supplémentaire afin de respecter les exigences Rapid shutdown, des boîtiers électriques d'arrêt rapide spécialisés installés sur le toit à une distance de 30 cm environ du champ. Le commutateur d'arrêt ou l'actionneur d'arrêt rapide doit être accessible aux premiers intervenants (pompiers) au sol. Il est également nécessaire de prévoir que le câblage contrôle les dispositifs d'arrêt rapide installés sur le toit. Tout cet équipement et ce câblage supplémentaires représentent un temps d'installation supplémentaire et des coûts plus élevés. Chacune de ces pièces nécessaires à l'arrêt rapide constitue surtout un point de défaillance. Ainsi, il est possible au final d'avoir de nombreux points uniques de défaillance, chacun étant dépendant de l'autre afin d'assurer la sécurité du système. Ces mécanismes sont-ils donc tous installés correctement à chaque fois ? Et arrive-t-il que ces mécanismes soient défaillants ? Il suffit d'une seule fois.

Certains fabricants d'onduleurs string dotés d'optimiseurs aiment à qualifier leur courant continu de « courant continu sûr ». Lors de l'arrêt rapide (en raison d'un défaut de câble, de l'arrêt de l'onduleur ou d'une panne de l'onduleur), chaque optimiseur supprime 1 V DC. Toutefois, en cas de défaillance de l'optimiseur, la tension continue peut être transmise, voire pire si de nombreux optimiseurs sont défaillants, ou encore la tension continue de nombreux panneaux PV peut être transmise et infliger un choc électrique à toute personne travaillant éventuellement dans le champ (l'installateur ou le propriétaire), en particulier au moment même où cette personne pense que le système est éteint.

Dans certaines régions, la réglementation exige explicitement que les dispositifs initiateurs éteignent les unités de conditionnement de courant (PCU), c'est-à-dire les micro-onduleurs. Avec les micro-onduleurs Enphase, les disjoncteurs du centre de charge principal (raccordant les PCU au bus de raccordement) ou les disjoncteurs combinés jouent le rôle de dispositif initiateur.

Dans un système de micro-onduleurs Enphase, lorsque la source d'électricité AC est supprimée des circuits de sortie du micro-onduleur par quelque moyen que ce soit, notamment un disjoncteur AC, la déconnexion AC ou le retrait du photovoltaïque, il est essentiel que le micro-onduleur exécute la fonction d'arrêt rapide. Avec un système de micro-onduleurs Enphase, cet arrêt a lieu en quelques secondes. En outre, comme les micro-onduleurs sont situés au sein du champ, il n'y a pas d'autre conducteur alimenté à plus de 30 cm environ dans toutes les directions du champ, y compris à l'intérieur du bâtiment. C'est pourquoi les systèmes de micro-onduleurs Enphase répondent intrinsèquement aux exigences d'arrêt rapide sans avoir besoin d'installer un équipement électrique supplémentaire.