



6. Installation, exploitation et entretien des systèmes solaires hors réseau

Guide de base pour l'énergie solaire hors réseau en Haïti



Fondations du solaire hors réseau en Haïti



1. Principes de base de l'électricité, de l'accès à l'énergie et de l'énergie solaire hors réseau



2. Produits clés et assurance qualité pour le solaire hors réseau



3. Potentiel de marché pour le solaire hors réseau en Haïti



4. Comprendre les clients des services solaires hors réseau (considérations relatives à la demande et à l'offre)



5. Conception et modélisation de systèmes solaires hors réseau



6. Installation, exploitation et maintenance des systèmes solaires hors réseau



7. Éléments des modèles commerciaux pour le solaire hors réseau



8. Modélisation financière pour le solaire hors réseau



9. Genre et énergie solaire hors réseau



10. Utilisation productive de l'énergie



11. Adaptation et résilience au climat

Aperçu



Ce module a pour objectif de fournir un aperçu ainsi que des ressources et outils clés pour comprendre :

- Comment les systèmes hors réseau sont-ils configurés ? ([Consulter la section](#))
- Comment les systèmes hors réseau sont-ils installés ? ([Consulter la section](#))
- Quelles sont les considérations supplémentaires à prendre en compte pour l'installation dans les zones sujettes aux ouragans ? ([Consulter la section](#))
- Comment les systèmes solaires hors réseau sont-ils exploités et entretenus ? ([Consulter la section](#))



Les diapositives ci-dessous fournissent un aperçu des concepts et des approches relatives à l'installation et l'entretien des systèmes photovoltaïques (PV), mais ne constituent pas une formation ou une certification formelle pour l'installation, l'exploitation et l'entretien des systèmes PV. **L'installation, l'exploitation et l'entretien ne doivent être confiés qu'à des professionnels qualifiés.**



Comment les systèmes hors
réseau sont-ils configurés ?

Systemes couplés en courant alternatif et en courant continu



Le courant électrique circule de deux manières : en **courant alternatif (CA)** ou en **courant continu (CC)**. La principale différence entre le courant alternatif et le courant continu réside dans le sens de circulation des électrons. Dans le courant continu, les électrons circulent régulièrement dans une seule direction. Dans le courant alternatif, les électrons changent constamment de direction, allant vers l'avant puis vers l'arrière.

Pour les systèmes solaires hors réseau, la différence entre les systèmes couplés en courant continu et en courant alternatif réside dans la manière dont le parc de batteries est chargé dans le système :

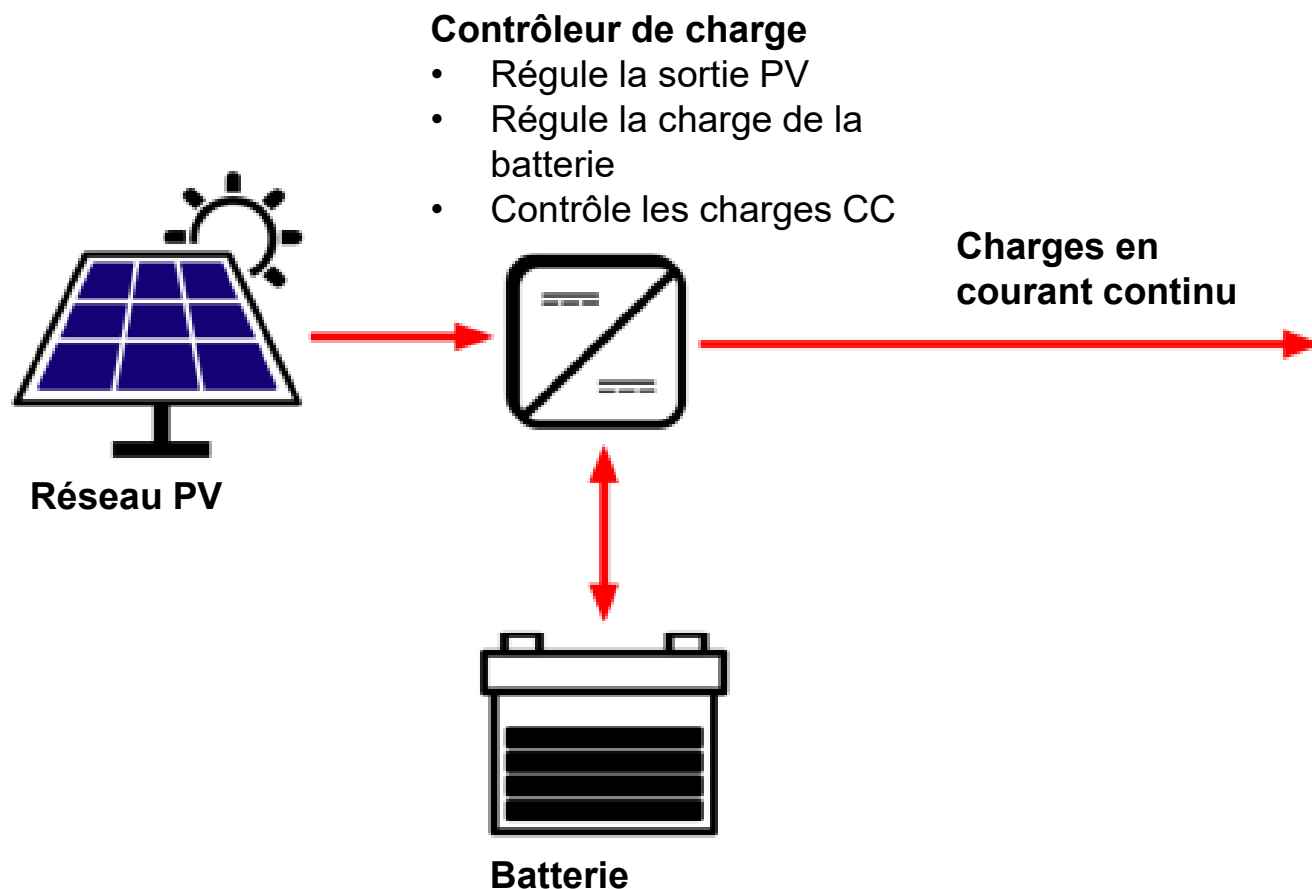
- **Les systèmes à couplage CC** chargent le parc de batteries avec de l'énergie CC provenant directement du générateur photovoltaïque.
- **Les systèmes à couplage CA** convertissent le CC du générateur photovoltaïque en CA, puis reconvertissent ce CA en CC pour charger les batteries.
- Les systèmes hybrides comprennent des sources de production multiples (par exemple, un générateur solaire et un générateur de secours peuvent être couplés en courant continu, en courant alternatif ou les deux).

Avantages et inconvénients du courant alternatif et du courant continu



Type de système	Avantages	Inconvénients
Couplage CC	<ul style="list-style-type: none">• Chargement plus efficace des batteries• Moins d'onduleurs• Communication en boucle fermée et contrôle dynamique de la charge/décharge des batteries	<ul style="list-style-type: none">• Le système photovoltaïque et la batterie doivent être situés au même endroit.• Pas de redondance potentielle de l'onduleur entre les sources d'énergie - si l'onduleur tombe en panne, le site n'est plus alimenté en courant alternatif.• Extension future plus difficile - si le site nécessite un parc de batteries plus important à l'avenir, l'onduleur devra peut-être être mis à niveau.• Coûts de câblage plus élevés
Couplage CA	<ul style="list-style-type: none">• Le système photovoltaïque et la batterie peuvent être installés à des endroits différents.• Peut être plus efficace pour les grandes charges de courant alternatif pendant la journée.• Redondance des onduleurs entre les sources d'énergie• Extension future plus facile• Coûts de câblage moins élevés	<ul style="list-style-type: none">• Chargement de la batterie moins efficace• Plus d'onduleurs - des onduleurs sont nécessaires pour convertir l'énergie photovoltaïque du courant continu au courant alternatif et des onduleurs sont également nécessaires pour convertir l'énergie de la batterie du courant continu au courant alternatif.• Communication en boucle ouverte - le système peut ne pas se remettre d'un état de charge faible de la batterie s'il n'y a pas de générateur de secours.

Configurations solaires hors réseau usuelles - Couplage CC avec charge à courant continu uniquement



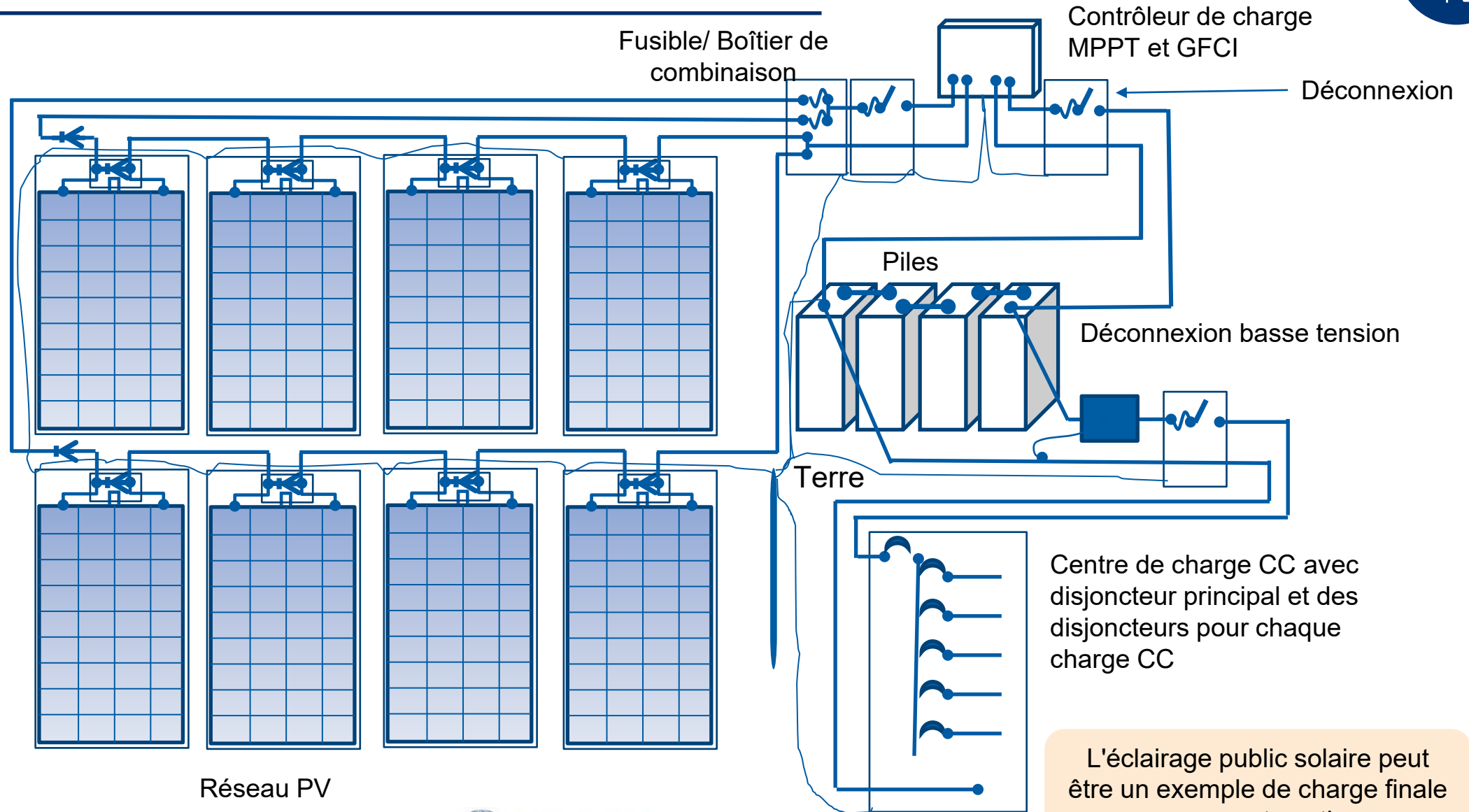
Avantages : simple, aucun onduleur n'est nécessaire, de nombreux appareils à courant continu sont disponibles.

Inconvénients : ne peut pas alimenter des charges en courant alternatif.

Applications appropriées : site avec des charges en courant continu uniquement et aucune charge en courant alternatif prévue à l'avenir ; les systèmes typiques sont inférieurs à 1 kW. Un exemple en Haïti est l'éclairage public solaire.

D'autres configurations moins courantes sont présentées dans le rapport de Lighting Africa ci-dessous.

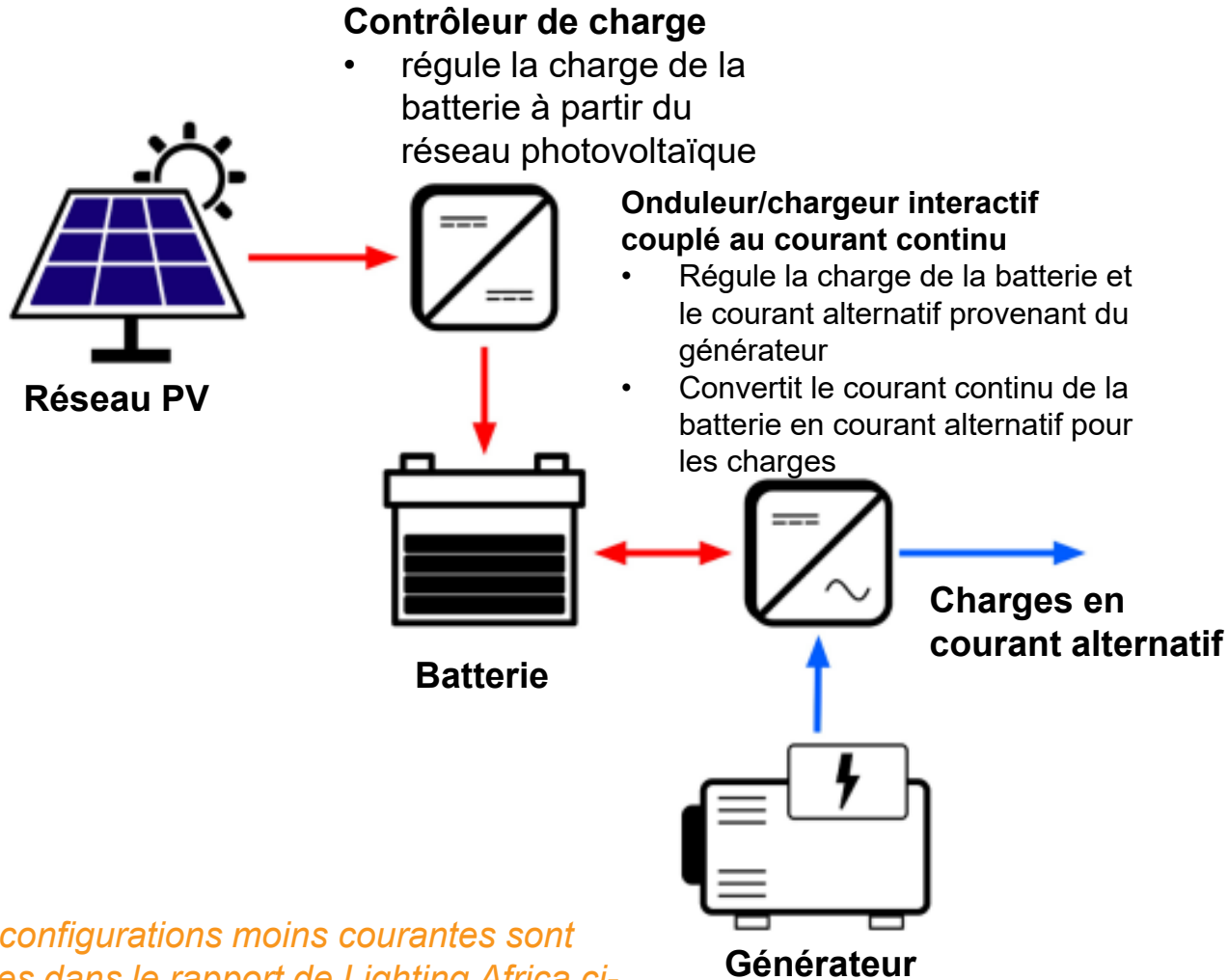
Système photovoltaïque simple à courant continu avec stockage sur batterie



L'éclairage public solaire peut être un exemple de charge finale en courant continu.



Configurations solaires hors réseau usuelles - Couplage CC, entrées CA/CC, onduleur intégré



Avantages : utilisation plus efficace de la batterie, pas d'onduleurs photovoltaïques, le générateur fournit de l'électricité sur demande.

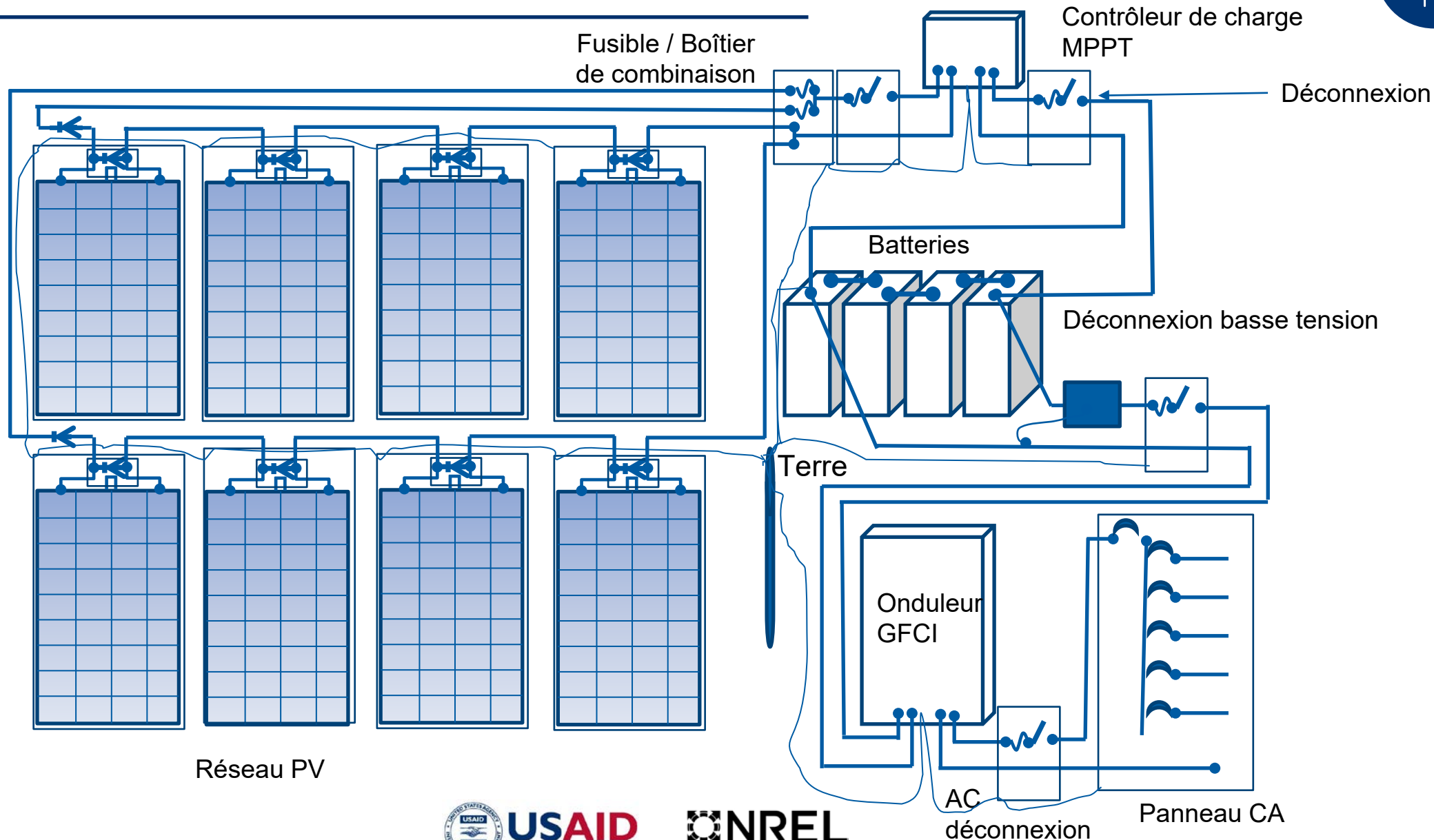
Inconvénients : moins efficace pour les charges de jour.

Applications appropriées : site qui ne peut pas être alimenté uniquement par un système PV/batterie.

D'autres configurations moins courantes sont présentées dans le rapport de Lighting Africa ci-dessous.

Source: [Exigences et directives de Lighting Africa pour l'installation de systèmes solaires hors réseau pour les installations publiques](#)

Système photovoltaïque à courant alternatif (CA) avec onduleur



Comment les systèmes solaires
sont-ils installés ?

Étapes générales de l'installation photovoltaïque



Vérifier la conception du système

- Vérification des besoins et des attentes du client
- Examen de l'étude et des caractéristiques du site
- Confirmation du dimensionnement du système
- Examen de la conception du stockage de l'énergie
- Confirmation des calculs de dimensionnement de la chaîne
- Examen de la sélection des composants
- Examen du dimensionnement du câblage et des conduits
- Examen de la protection contre les surintensités
- Examen de la sélection des attaches
- Examen des plans

Gérer le projet

- Réunions de construction
- Permis et approbations
- Gestion de la main-d'œuvre du projet
- Gestion de l'équipement du projet
- Mise en œuvre d'un plan de sécurité spécifique au niveau du site

Installer les composants électriques

- Atténuation des risques électriques
- Installation des systèmes de mise à la terre
- Installation des conduits
- Installation des composants électriques
- Installation des conducteurs de circuit
- Installation des composants du système
- Installation des composants de la batterie

Installer les composants mécaniques

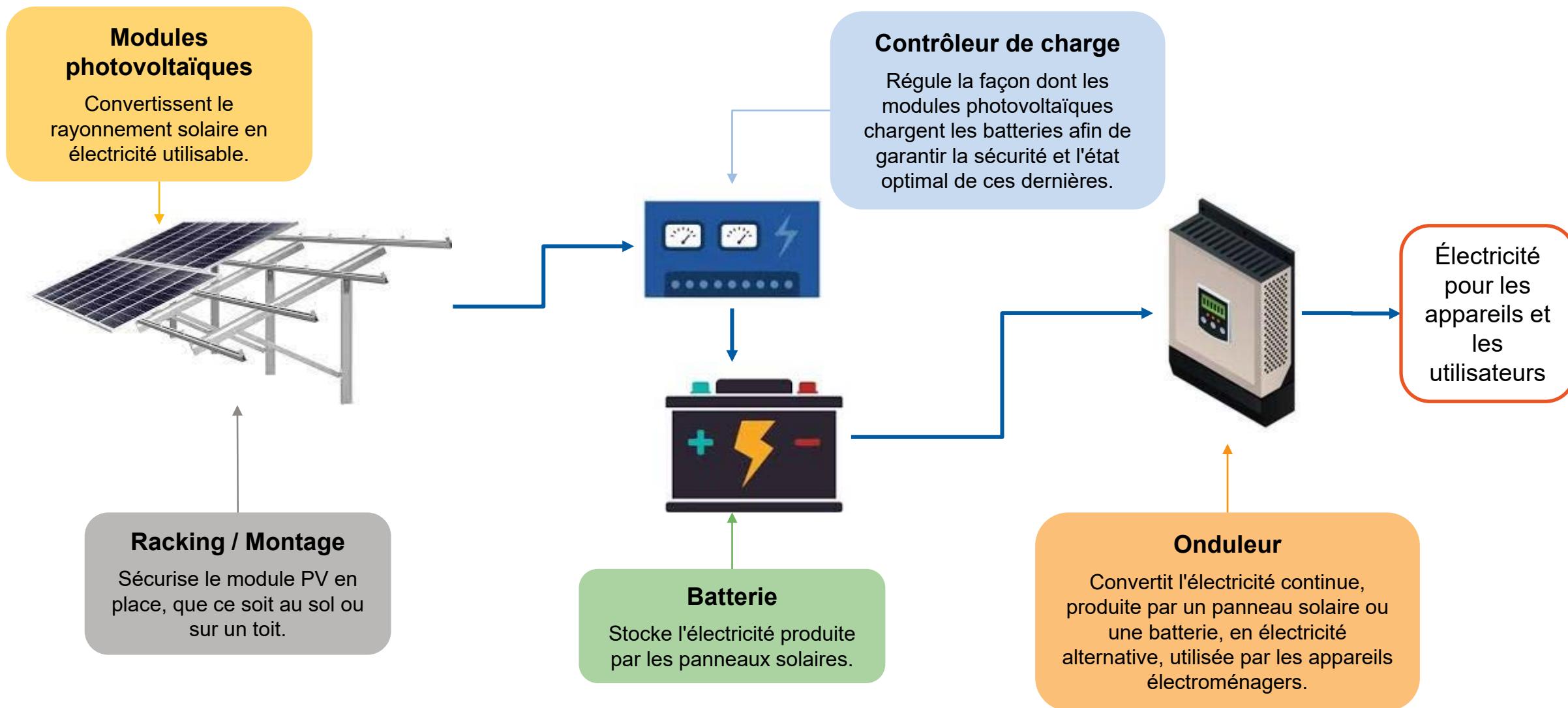
- Installation des fondations de l'équipement
- Installation du support de montage
- Installation des modules PV

Finaliser l'installation

- Essai du système
- Mise en service du système
- Documentation du système
- Orientation client

L'installation solaire hors réseau, en particulier pour les kits solaires, suivra probablement des processus différents et légèrement simplifiés, mais de manière générale, ce flux est approprié. Chacune de ces étapes est détaillée dans [le guide complet du NABCEP](#).

Composants clés de l'énergie solaire hors réseau





Les images ci-dessous mettent en évidence les meilleures pratiques et des exemples d'installation, de composants et de configurations pour les systèmes solaires distribués. En Haïti, en particulier dans les installations solaires moins formelles, ces pratiques peuvent différer, mais cette section illustre les bonnes pratiques pour la conception et l'installation de systèmes solaires décentralisés en accord avec les codes internationaux. Le matériel porte également sur les grands systèmes ; cependant, les systèmes solaires domestiques et les kits solaires suivront des principes similaires, mais leurs installations incluront aussi généralement des clips et d'autres instructions spécifiques des fabricants.

Types de montage photovoltaïque



Supports pour les toits : attachés ou lestés



Supports au sol : mobiles ou fixes



Photo by Mercury Solar Solution images.NREL.gov #18062

Actuellement, en Haïti, les montages pour les projets solaires ont tendance à être des solutions ponctuelles conçues pour des projets individuels, mais à mesure que le secteur se formalise, des montages plus spécialisés et standardisés deviendront la norme.



Photo by Andy Walker



Photo Orlando Utilities Commission images.NREL.gov #18715

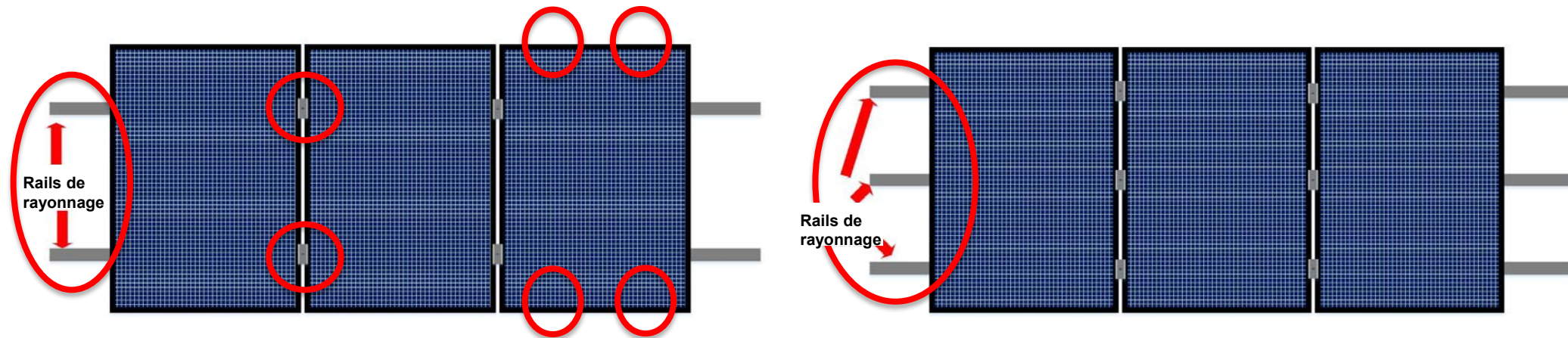


Images.nrel.gov 56760r, NREL

Facteurs météorologiques - Charge dûe au vent



- L'obtention de la pleine résistance d'un module dépend de la manière dont il est monté
 - Type d'attaches utilisées (par exemple, colliers de serrage du haut vers le bas, boulons traversants)
 - Quantité d'attaches
 - Emplacement des attaches
 - Les attaches placées sur le côté long offrent une plus grande résistance
 - Nombre de rails de montage





Colliers de serrage versus "boulons traversants" reliés au rail de fixation



Colliers de serrage

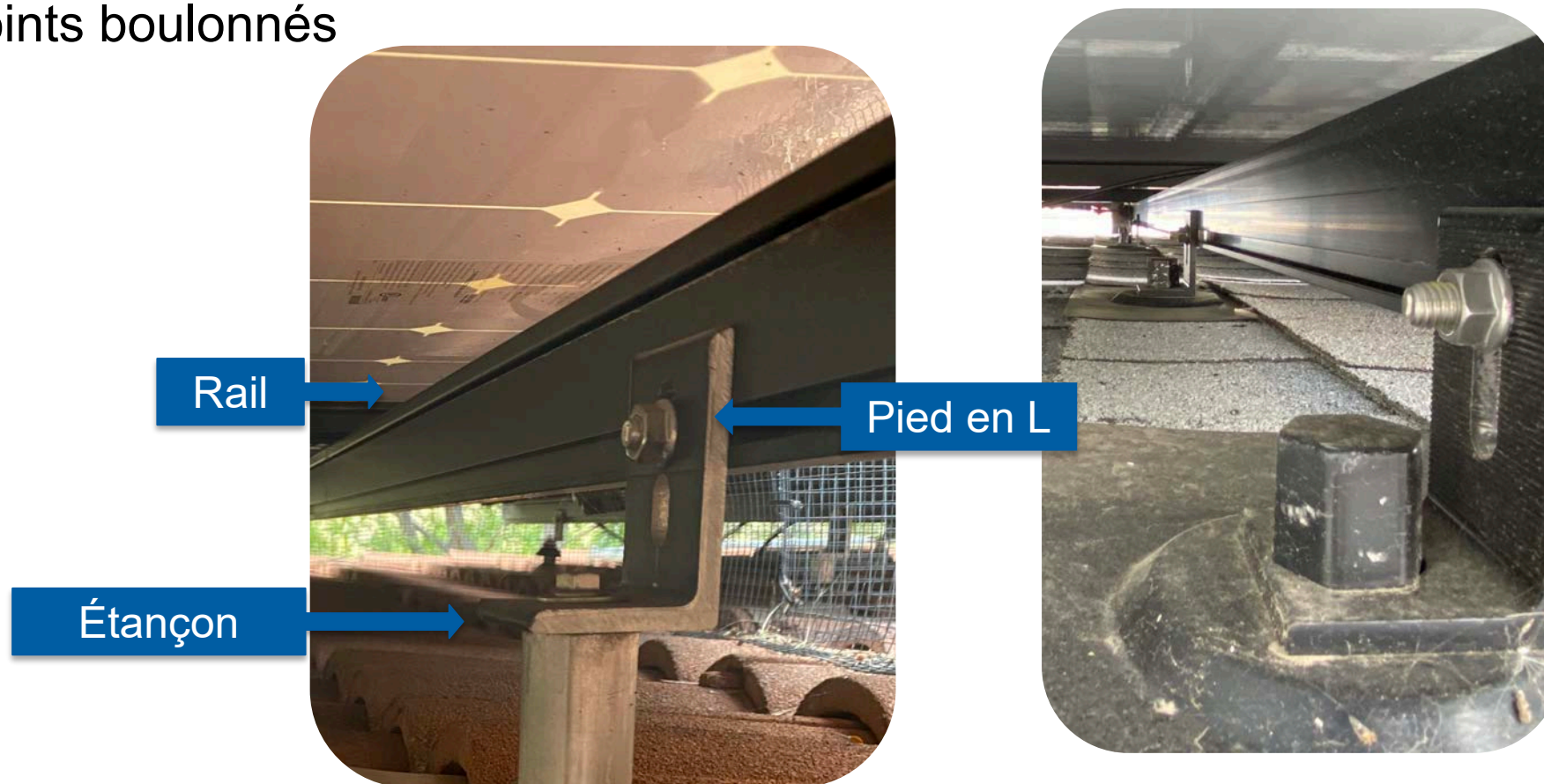


Boulons traversants

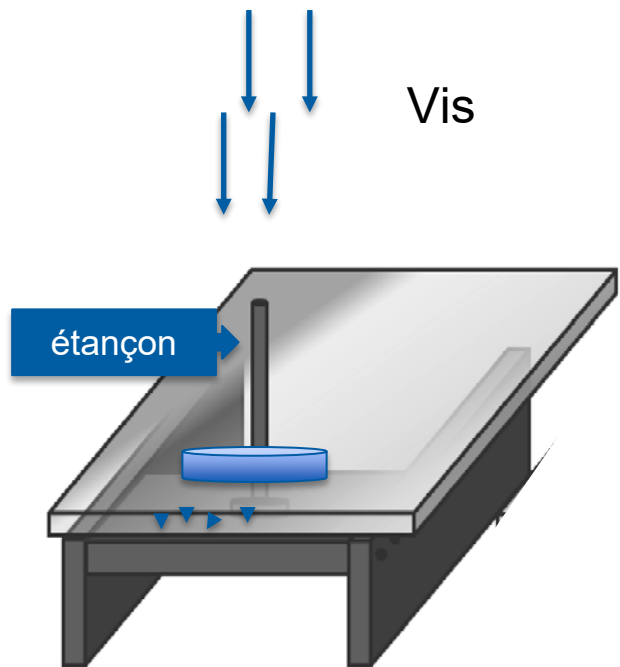
Rattachement entre le rail et l'étauçon



- Pied en L
- Joints boulonnés



Raccordement de l'étauçon à la toiture et au solin



Blocage entre les chevrons

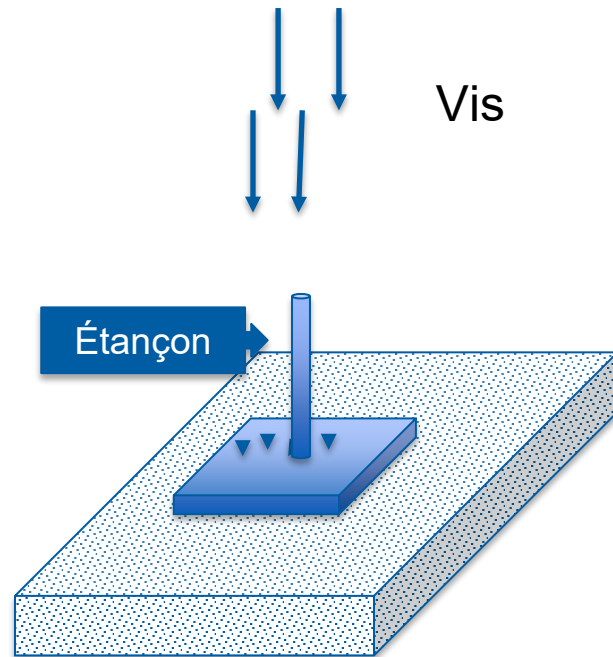


Solin pour bardeau



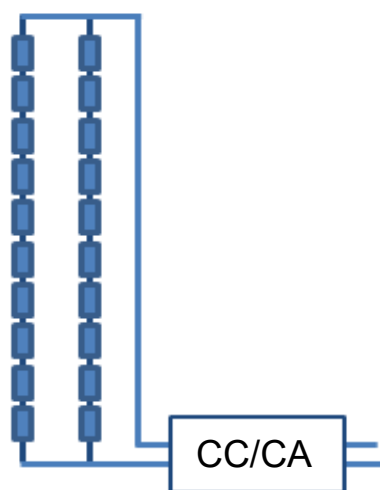
Solin pour toit en tuiles

Étançon pour toit en béton/ asphalte

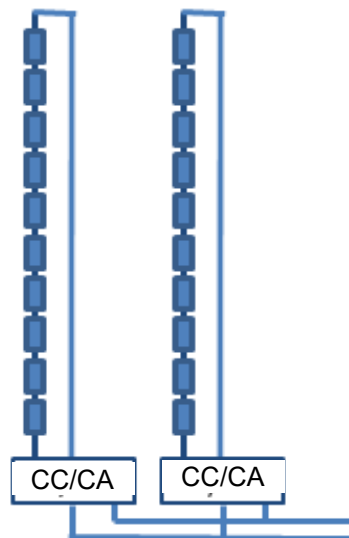


L'étançon est fixé à la terrasse ou à la structure du toit sous l'isolation ; il est accouplé à la membrane du toit avec un joint d'étanchéité surélevé, un solin en forme de cône et un mastic d'étanchéité à la membrane du toit.

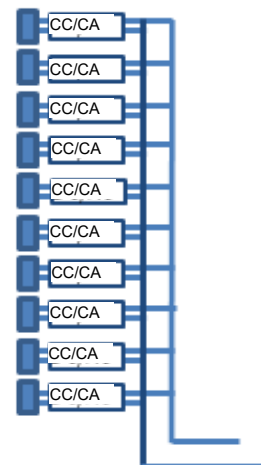
Différentes configurations d'onduleurs



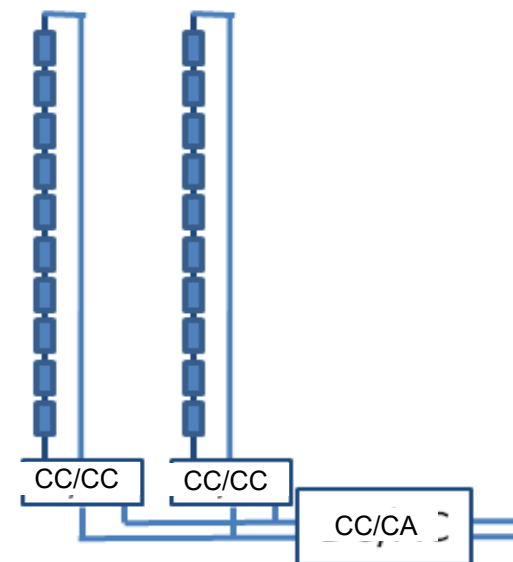
Onduleur central



**Onduleurs de
branche**



Micro-onduleur



Optimiseur CC

Micro-onduleurs et onduleurs de branche

- Plus chers qu'un onduleur central
- Réduisent les pertes de production
- Permettent un arrêt rapide à proximité du réseau
- Fournissent des données détaillées
- Câblage CA plus conventionnel

Installation d'un onduleur de branche (string)



Connecteurs MC entre les modules PV.



Transition entre le fil PV et le fil dans le conduit jusqu'à l'onduleur.



Onduleur avec déconnexion CC et CA et câblage au panneau du bâtiment.

Installation d'un micro-onduleur



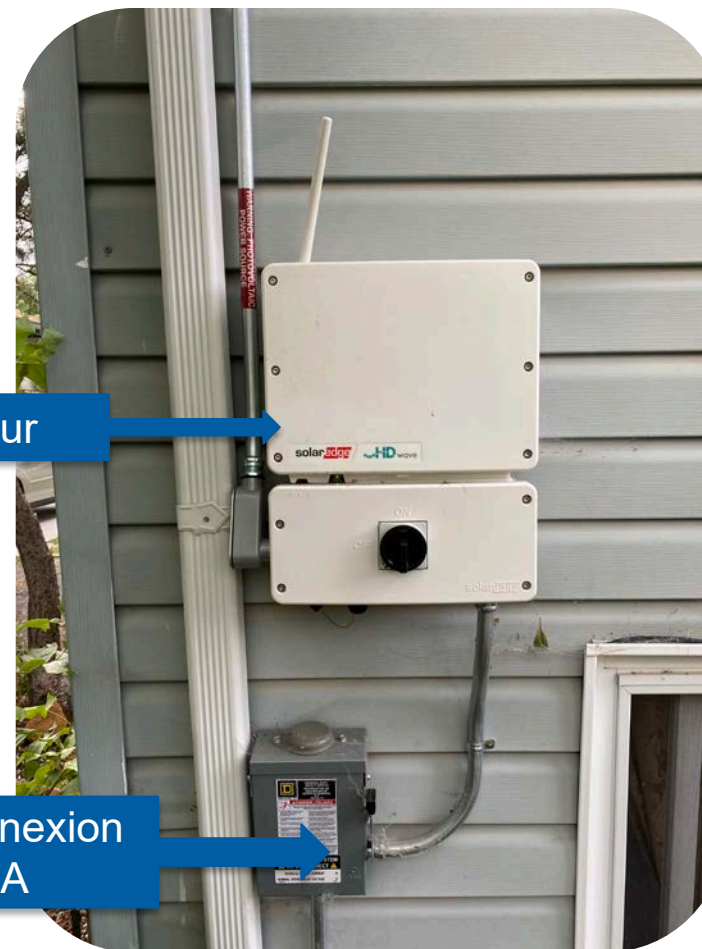
- Fils du module PV vers le micro-onduleur
- Connecteur vers le micro-onduleur suivant (non utilisé)
- Connecteur en fin de ligne

Installation d'un onduleur avec optimiseur CC



Optimiseur

- Optimiseur CC sur chaque module PV
- Fixé au rail du rack



Onduleur

Déconnexion
CA

- Onduleur avec antenne Wi-Fi et déconnexion



Il existe trois critères importants pour le choix de la taille des fils

- Courant (Capacité en ampères)
- Tension
- Taille minimale exigée en raison de la résistance physique requise ou des codes et normes

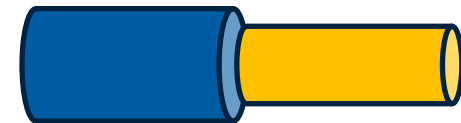
Capacité en ampères

- Capacité d'un fil à transporter du courant (ampères)
- Fil plus gros = plus grande capacité
- L'utilisation d'un fil de faible capacité en ampères transportant un courant important entraîne une surchauffe du fil
- La surchauffe est synonyme de gaspillage d'énergie et d'inefficacité, et peut entraîner la fonte de l'isolation, un court-circuit ou un incendie

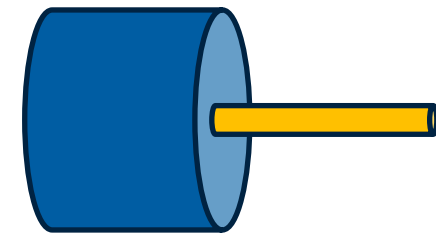
Tension nominale

- Tension maximale d'un fil (600 V, 1000 V ou 1500 V)
- Isolation plus épaisse = tension nominale plus élevée

Puissance =
Courant *
Tension



Courant élevé:
Plus conducteur



Haute tension:
Isolation plus plastique

Gestion des fils



Attaches en fil de fer au support



Vers le conduit



Chemins de câbles



Enfouissement direct

Connecteurs PV



De nombreuses défaillances des systèmes photovoltaïques sont dues aux connecteurs.

- Connecteurs PV mal adaptés ou mal fixés
- Les connecteurs entre la chaîne du module et l'onduleur sont souvent « fabriqués sur place »
 - Risque de points chauds
- Les connecteurs ne doivent être associés qu'avec des connecteurs du même fabricant - **NE PAS CROISER LES CONNECTEURS SAUF SI LES INSTRUCTIONS DU FABRICANT LE DÉCRIVENT SPÉCIFIQUEMENT !**



Déconnexions



- Chaque équipement d'un système photovoltaïque, tel que l'onduleur, les batteries et les régulateurs de charge, doit pouvoir se déconnecter de toutes les sources d'alimentation.
- Les déconnexions doivent :
 - être des interrupteurs ou des disjoncteurs
 - être accessibles et étiquetées
 - ne pas comporter de pièces sous tension exposées
 - indiquer s'elles sont sous tension ou hors tension (fermés ou ouverts)
 - être prévues pour la tension nominale du système et le courant disponible



Interrupteur de déconnexion



Un système de mise à la terre relie des parties spécifiques d'un réseau électrique au sol, généralement la terre, à des fins de sécurité et de fonctionnement.

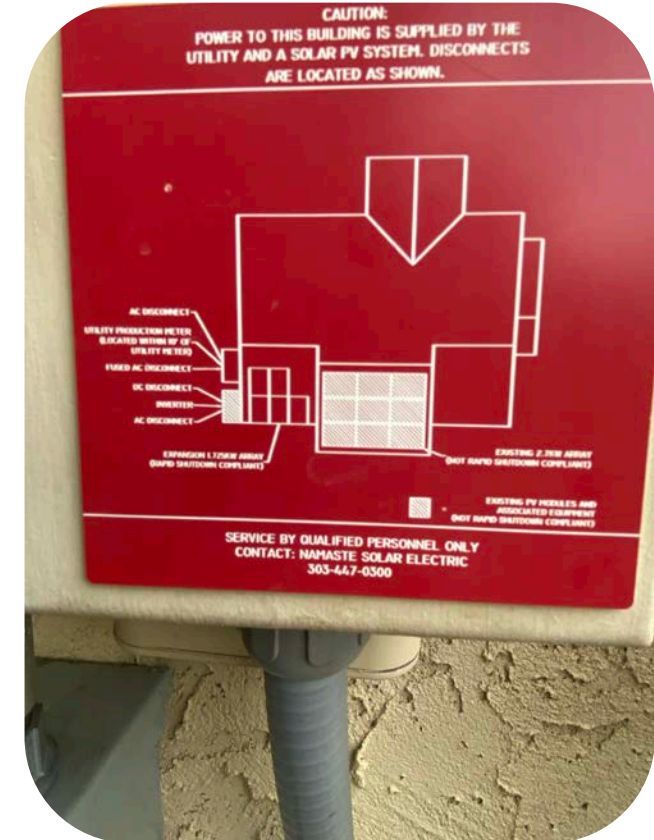
Mise à la terre des équipements

- Dans ce cas, la terre est connectée à la partie non porteuse de courant ou au châssis (le corps externe de l'équipement).
- Est utilisée pour protéger le personnel contre les chocs causés par une défaillance de la mise à la terre et exigée par le Centre national d'énergie (NEC en anglais) dans tous les systèmes photovoltaïques.

Mise à la terre du système

- Dans ce cas, la terre est reliée aux parties conductrices de courant en prenant un conducteur d'un système bifilaire et en le reliant au sol.
- Est utilisé pour protéger l'équipement.

Étiquettes d'avertissement et instructions



Respecter toutes les exigences du code et du programme en ce qui concerne l'emplacement et l'espacement des étiquettes d'avertissement.

Liste de contrôle pour la mise en service



Les listes de contrôle de mise en service varient en fonction de l'entreprise, du lieu et du type de projet, mais voici un exemple de liste de contrôle de mise en service de haut niveau :

- Tension mesurée de toutes les chaînes PV
- Polarité de toutes les chaînes PV
- Gestion adéquate des câbles (par exemple, les conducteurs ne touchent pas le toit)
- Réglages et points de consigne de l'onduleur ou de l'onduleur/chargeur, le cas échéant, par exemple réglage du chargeur de batterie basés sur les recommandations du fabricant de la batterie
- Points de consigne du contrôleur de charge, le cas échéant
- Tension du parc de batteries par rapport à la tension de l'onduleur
- Évaluation de l'étanchéité du toit et de la pénétration dans les murs, le cas échéant
- Le système est exempt de défauts de mise à la terre (c'est-à-dire qu'aucun conducteur non relié à la terre n'est en continuité avec la terre)
- Absence de défauts (courts-circuits) entre les conducteurs indépendants (par exemple, les conducteurs PV positifs et négatifs)
- Le délestage, s'il existe, est fonctionnel et les charges critiques restent opérationnelles lorsque les charges non critiques sont désactivées
- L'interface de télésurveillance, le cas échéant, est fonctionnelle
- Le système de télésurveillance émet les coordonnées GPS correctes ou l'emplacement du projet, le cas échéant
- Modules PV, systèmes de montage (racking), et les conduits métalliques sont reliés
- Tous les autres équipements métalliques sont reliés entre eux
- Le chemin de retour neutre est présent, le cas échéant
- Aucun métal galvaniquement dissemblable n'est en contact les uns avec les autres
- Les disjoncteurs sont fonctionnels
- Toutes les charges (lampes, ventilateurs, pompes à eau, etc.) sont fonctionnelles. Toutes les prises sont fonctionnelles
- Les prises de courant continu, s'il y en a, sont sensiblement différentes des prises de courant alternatif afin d'éviter le branchement d'appareils incorrects
- Les limiteurs de charge, s'il y en a, sont fonctionnels et fonctionnent au bon courant ou au point de consigne de puissance
- Toutes les parties sous tension du système sont correctement isolées
- Cette section du rapport de mise en service doit inclure les résultats des opérations suivantes (si elles ont été effectuées)
- Essai de résistance d'isolation
- Images thermiques des modules PV, si possible

Sélection de normes de la Commission électrotechnique internationale (IEC) (d'autres normes s'appliquent également)



Normes pour l'électrification rurale

IEC/TS 62257-1, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 1: Introduction générale à l'électrification rurale.

IEC/TS 62257-2, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 2: Des exigences à une gamme de systèmes d'électrification

IEC/TS 62257-3, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 3: Développement et gestion de projet

IEC/TS 62257-4, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 4: Sélection et conception de système

IEC/TS 62257-5 Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 5: Protection contre les risques électriques

IEC/TS 62257-6, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 6: Réception, exploitation, maintenance et remplacement

IEC/TS 62257-7, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 7: Générateurs

IEC/TS 62257-7-1 Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 7-1: Générateurs - réseaux photovoltaïques

IEC/TS 62257-7-3, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 7-3: Groupe électrogène

IEC/TS 62257-8-1, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale -Partie 8-1: Sélection de batteries

IEC/TS 62257-9-1, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 9-1: Systèmes à très fiable puissance

IEC/TS 62257-9-2, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 9-2: Micro-réseaux

IEC/TS 62257-9-3, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 9-3: Système intégré - Interface utilisateur

IEC/TS 62257-9-4, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 9-4: Système intégré - Installation utilisateur

IEC/TS 62257-9-5, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 9-5: Système intégré - Sélection de panneaux photovoltaïques portables

IEC/TS 62257-9-6, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale - Partie 9-6: Système intégré - Sélection de systèmes d'électrification individuelle photovoltaïque (PV-IES)

IEC/TS 62257-12-1, Rec. pour les petits systèmes d'énergie renouvelable et hybrides pour l'électrification rurale – Partie 12-1: Sélection de lampes à ballast automatique (CFL) pour les systèmes d'électrification rurale et Rec. pour les équipements d'éclairage domestique

Sélection de normes de la Commission électrotechnique internationale (IEC) (d'autres normes s'appliquent également)



Normes pour les systèmes photovoltaïques hors réseau

IEC 62509, Contrôleurs de charge de batterie pour systèmes photovoltaïques - Performance et fonctionnement

IEC 61194, Paramètres caractéristiques des systèmes photovoltaïques (PV) autonome

IEC 61702, Évaluation des systèmes de pompage photovoltaïque (PV) à couplage direct

IEC/PAS 62111, Cahier des charges pour l'utilisation des énergies renouvelables au niveau de l'électrification rurale décentralisée

IEEE Std 1526, IEEE Pratique recommandée pour tester les performances des systèmes photovoltaïques autonomes

Normes pour les panneaux photovoltaïques

IEC 62548-1:2023 Exigences de conception pour les panneaux photovoltaïques (PV), y compris le câblage du panneau CC, les dispositifs de protection électrique, les dispositions de commutation et de mise à la terre

Normes pour les régulateurs de charge

IEC 62509, Contrôleurs de charge de batterie pour systèmes photovoltaïques - Performance et fonctionnement

IEC 62093, Composants d'équilibre pour systèmes photovoltaïques - Qualification de conception pour les milieux naturels

Normes pour les batteries

IEC 61427, Cellules et batteries secondaires pour systèmes d'énergie solaire photovoltaïque - Exigences générales et méthodes d'essai

IEC 60896-11, Batteries stationnaires au plomb - Partie 11 : Types ventilés - Exigences générales et méthodes d'essais

IEC 60896-21, Batteries stationnaires au plomb - Partie 21 : Types régulés par valve - Méthodes d'essai

IEC 60896-22, Batteries stationnaires au plomb - Partie 22 : Types régulés par valve – Exigences

IEC 62259, Batteries secondaires et batteries contenant des électrolytes alcalins ou autres électrolytes non acides - Cellules secondaires prismatiques nickel-cadmium avec recombinaison partielle des gaz

IEC 60623, Batteries secondaires et batteries contenant des électrolytes alcalins ou autres électrolytes non acides - Cellules individuelles rechargeables prismatiques nickel-cadmium ventilées

IEC 62675, Batteries secondaires et batteries contenant des électrolytes alcalins ou autres électrolytes non acides - Cellules individuelles rechargeables prismatiques nickel-hydrure métallique scellées

IEEE Std. 937, Pratique recommandée pour l'installation et l'entretien des batteries au plomb pour les systèmes photovoltaïques

IEEE Std. 1013, Pratique recommandée pour le dimensionnement des batteries au plomb pour les systèmes photovoltaïques (PV)

IEEE Std. 1361, Pratique recommandée pour déterminer les caractéristiques de performance et l'adéquation des batteries dans les systèmes photovoltaïques

Source: [Ressources sur le PV](#)



Ressources supplémentaires pour installations photovoltaïques



[Guide PV du NABCEP](#)

[Manuel de sécurité pour les alternatives de construction de réseau](#)

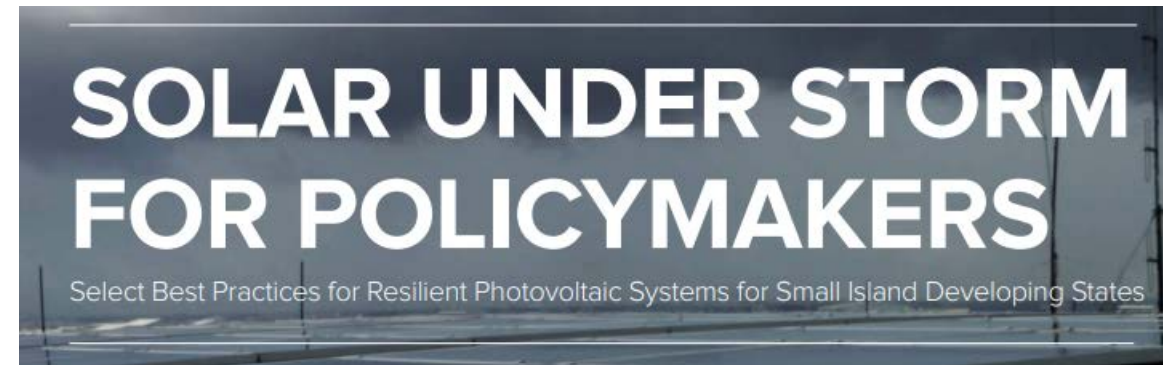
[Meilleures pratiques SAPC en matière d'installation de systèmes photovoltaïques](#)

Quelles sont les considérations supplémentaires à prendre en compte pour l'installation dans les zones sujettes aux ouragans ?



RMI a analysé les causes profondes des défaillances des systèmes photovoltaïques provoquées par les ouragans qui ont frappé les Caraïbes au cours de la saison 2017. **Voici quelques spécifications clés pour améliorer la résilience :**

- Utilisation de modules photovoltaïques à forte charge (5 400 Pa).
- Obligation d'effectuer une analyse structurelle et un examen du rapport d'essai en soufflerie
- Spécification d'une procédure de verrouillage des boulons et d'un processus de contrôle de la qualité des boulons
- Attacher les modules avec des boulons traversants par opposition aux pinces descendantes ou en T
- Obligation d'effectuer un examen des charges latérales par un ingénieur spécialisé en structure
- Non utilisation de vis auto taraudeuses
- Spécification des fondations à double pilier



Similitudes entre les systèmes survivants et les systèmes défailants



Aucun système ne peut résister à 100% aux impacts des ouragans, mais il existe des similitudes entre les systèmes qui ont échoué et ceux qui ont survécu, ce qui peut permettre de concevoir des systèmes plus résistants.

Un défi majeur pour Haïti

Similitudes des systèmes défailants

Défaillance en cascade de la rétention des modules (top-down ou t-clamp)

Absence de connexions résistantes aux vibrations

Un coin du champ photovoltaïque s'est renversé en raison d'une mauvaise conception face au vent

Résistance insuffisante des connexions structurelles

Défaillance de la connexion de la fixation du toit

Système endommagé par des débris/impacts, en particulier par des modules libérés (délogés)

Défaillance de l'intégrité structurelle du toit

Conception des modules photovoltaïques trop basse pour l'environnement

Similitudes des systèmes de surveillance

Utilisation appropriée/recours au lestage et aux fixations mécaniques

Résistance suffisante des connexions structurelles

Fixation des modules avec boulons traversants ou quatre clips de haut en bas par module

Calculs structurels enregistrés

Ingénieur du maître d'ouvrage avec un programme d'AQ/CQ

Module résistant aux vibrations, connexions boulonnées

Conception adaptée aux ouragans pour le photovoltaïque solaire - Ce qu'il faut faire et ce qu'il ne faut pas faire



Ce qu'il faut faire

- ✓ Choisir des fixations fiables pour les modules (premier point de défaillance structurelle).
 - ✓ Si possible, boulonner directement les modules au montage (racking).
 - ✓ Si vous utilisez des pinces, choisir des pinces avec une plus grande surface de préhension sur le module et le rack qui ne peuvent pas facilement pivoter hors du rail du rack.
 - ✓ Utiliser du matériel de verrouillage. Il peut être utile de multiplier les points d'attache.
 - ✓ Vérifier chaque année que les fixations sont bien serrées.
- ✓ Choisir des modules conçus pour résister à des charges de vent élevées (>5000 Pa de pression de soulèvement).
- ✓ Utiliser des angles d'inclinaison faibles (aussi faibles que possible pour permettre à l'eau de s'écouler).
- ✓ Ancrer tous les systèmes aux toits.
- ✓ La structure des rayonnages (racking) doit fournir un support latéral et longitudinal. Il est recommandé d'utiliser des renforts transversaux supplémentaires.
- ✓ Utiliser de l'acier inoxydable qualité 316 pour résister à la corrosion en milieu marin.
- ✓ Tous les boîtiers électriques doivent être conformes à la norme NEMA 4X et parfaitement étanches.
- ✓ Faire appel à un installateur photovoltaïque expérimenté dont les employés sont certifiés par le NABCEP.
- ✓ Concevoir les systèmes conformément à la norme ASCE 7-22 (sans les exemptions liées à la soufflerie). En outre, la conception doit être conforme à la norme SEAOC PV 2-17.

Ce qu'il ne faut pas faire

- ✗ Installer des systèmes de suivi photovoltaïque
- ✗ Utiliser des modules grand format
- ✗ Faire des auto-installations lorsqu'inexpérimenté
- ✗ Utiliser des attaches en fil de plastique
- ✗ Croire sur parole une personne en charge de l'installation qui indique que le système est conçu pour résister aux cyclones.. Demander des preuves et consulter un ingénieur.

Remarque : Les codes énumérés ici représentent les meilleures pratiques américaines qui sont toujours pertinentes pour Haïti.

Pressions et forces du vent sur les panneaux solaires



Catégorie d'ouragan	Vitesse du vent (m/s)	Pression maximale (Pa)	Facteur de sécurité	Charge minimale requise pour le panneau solaire (Pa)	Maximum force on solar panel inclined at 19° (N)	Force maximale sur le panneau solaire incliné à 5° (N)
Catégorie 1	33-42	1082	1,5	1623	704	189
Catégorie 2	43-49	1473	1,5	2209	959	257
Catégorie 3	50-58	2063	1,5	3095	1343	360
Catégorie 4	59-70	3005	1,5	4508	1957	524
Catégorie 5	>70	4968	1,5	7452	3235	866

- Les panneaux solaires sont généralement conçus pour résister à une pression de soulèvement d'au moins 2400 Pa.
- Les meilleurs panneaux pour la charge de vent sont évalués jusqu'à ~5400 Pa
- Des points de montage supplémentaires permettent d'augmenter davantage cette valeur nominale.
- Les modules doivent être montés conformément aux spécifications du fabricant pour répondre à ces charges nominales.
- Des angles d'inclinaison plus faibles entraînent des forces beaucoup plus faibles sur les panneaux.
- La perte de production d'énergie à ces angles d'inclinaison plus faibles est insignifiante.

Estimations fournies pour un panneau solaire typique de 2m x 1m sur le toit.; 90 m/s utilisés pour les calculs de la catégorie 5

Résistance des structures de montage



La résistance typique des différentes structures de montage qui peuvent être impliquées dans l'installation d'un système solaire varie de ~35 ksi à 80 ksi.

- La tendance récente dans l'industrie est d'utiliser [l'acier faiblement allié à haute résistance A1011 et à formabilité améliorée \(HSLAS-F\) grade 80](#), qui a une limite d'élasticité minimale de 80 ksi.
- Un acier plus solide ne signifie pas nécessairement une structure plus solide, car les concepteurs qui utilisent un acier plus solide utilisent généralement moins d'acier et des espaces plus larges entre les supports. **Meilleure pratique : concevoir une structure rigide, quelle que soit la résistance de l'acier.**
- Utiliser des supports de poteaux avant et arrière pour les systèmes installés au sol.
- Réduire la distance entre les supports de fondation pour augmenter la rigidité du système.

**ASTM A1011 HSLAS-F
Grade 80**

Liste de contrôle pour les actions préventives avant les tempêtes



Catégorie	Montage au sol	Montage sur le toit
Site: Débris	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Débarrasser le site de tous les débris, matériaux et équipements qui ne sont plus utilisés, si possible ; sinon, les attacher. <input type="checkbox"/> Attacher ou ancrer les équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation ainsi que les autres équipements utilisés. <input type="checkbox"/> Couper la végétation ou les branches d'arbres qui pourraient endommager le système. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Débarrasser le site de tous les débris, matériaux et équipements qui ne sont plus utilisés, si possible ; sinon, les attacher. <input type="checkbox"/> Attacher ou ancrer les équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation ainsi que les autres équipements utilisés. <input type="checkbox"/> Couper la végétation ou les branches d'arbres qui pourraient endommager le système. <input type="checkbox"/> Débarrasser les égouts de toit de tout débris et installer un couvercle d'égout de toit, si possible.
Site : Inondations	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> S'assurer que les systèmes de contrôle des inondations et de drainage fonctionnent et sont débarrassés des débris. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> S'assurer que les systèmes de contrôle des inondations et de drainage fonctionnent et sont exempts de débris. <input type="checkbox"/> S'assurer de l'étanchéité de toutes les pénétrations du toit et appliquer, si possible, un produit d'étanchéité adapté à l'extérieur.
Mécanique : Module	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vérifier l'intégrité structurelle de l'ossature du module. <input type="checkbox"/> Vérifier que le module n'est pas endommagé. <input type="checkbox"/> Prendre des photos de l'état du réseau avant l'événement. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vérifier l'intégrité structurelle de l'ossature du module. <input type="checkbox"/> Vérifier que le module n'est pas endommagé. <input type="checkbox"/> Prendre des photos de l'état du réseau avant l'événement.
Mécanique : Fixations/ attaches	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vérifier l'étanchéité des fixations du système et les resserrer, si possible. <input type="checkbox"/> Vérifier s'il y a des fixations manquantes ou corrodées et les remplacer, si possible. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vérifier l'étanchéité des fixations du système et les resserrer si possible. <input type="checkbox"/> Vérifier s'il y a des fixations manquantes ou corrodées et les remplacer, si possible.
Mécanique : Montage (racking)	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vérifier que tout le matériel n'est pas corrodé, qu'il ne manque pas de pièces ou qu'il n'est pas endommagé et le remplacer, si possible. <input type="checkbox"/> Éliminer les débris éventuels. <input type="checkbox"/> Vérifier le serrage du matériel de rayonnage et le resserrer, si possible. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vérifier que tout le matériel n'est pas corrodé, qu'il ne manque pas de pièces ou qu'il n'est pas endommagé, et le remplacer si possible. <input type="checkbox"/> Enlever les débris éventuels. <input type="checkbox"/> Vérifier le serrage de la quincaillerie du montage (racking) et la resserrer si possible.

Liste de contrôle pour les actions préventives avant les tempêtes (suite)



Catégorie	Montage au sol	Montage sur le toit
Électricité : Connecteurs , câblage et supports	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Avant d'effectuer des réglages ou des modifications électriques, s'assurer que tous les sectionneurs, fusibles, interrupteurs et disjoncteurs CA/CC du système sont en position ouverte.<input type="checkbox"/> Vérifier que le boîtier J est bien fixé au module et qu'il est intact.<input type="checkbox"/> Vérifier que les connexions des câbles PV sont bien branchées, exemptes de corrosion et non endommagées. Remplacer les matériaux endommagés ou usés par des attaches résistantes aux UV et des pinces (de préférence en métal) sur les modules et les rails, si possible.<input type="checkbox"/> Vérifier que tous les câbles du système ne comportent pas de conducteurs exposés.<input type="checkbox"/> Inspecter les autres connexions de câbles pour vérifier qu'elles sont bien en contact et qu'elles ne sont pas corrodées. <input type="checkbox"/> Si vous utilisez un conduit, vérifier qu'il n'est pas endommagé et qu'il est continu.<input type="checkbox"/> Si vous utilisez des conduits, vérifier les supports de conduits et fixer les conduits.<input type="checkbox"/> Vérifier l'intégrité, la corrosion et l'étanchéité des boîtiers. Cela comprend les boîtiers de combinaisons, les boîtes d'onduleurs et les boîtiers.<input type="checkbox"/> Vérifier l'étanchéité du matériel de montage structurel des boîtiers et le resserrer, si possible.<input type="checkbox"/> Vérifier que les connexions électriques des boîtiers ne sont pas corrodées, endommagées ou brûlées, y compris tous les connecteurs d'alimentation boulonnés*.<input type="checkbox"/> Vérifier le système de mise à la terre pour l'étanchéité des connexions et la continuité visuelle du système.*	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Avant d'effectuer des réglages ou des modifications électriques, s'assurer que tous les sectionneurs, fusibles, interrupteurs et disjoncteurs CA/CC du système sont en position ouverte.<input type="checkbox"/> Vérifier que le boîtier J est solidement fixé au module et qu'il est intact.*<input type="checkbox"/> Vérifier que les connexions des câbles PV sont bien branchées, qu'elles ne sont pas corrodées et qu'elles ne sont pas endommagées.<input type="checkbox"/> S'assurer que tous les colliers de serrage sont en place et qu'ils maintiennent solidement les câbles sur les cadres des modules et sur les rayonnages. Remplacer les matériaux endommagés ou usés par des liens résistants aux UV et des pinces/attaches de fils (de préférence métalliques) sur les modules et les rails, si possible.<input type="checkbox"/> Vérifier que tous les câbles du système ne comportent pas de conducteurs exposés.<input type="checkbox"/> Inspecter les autres connexions de câbles pour vérifier qu'elles sont bien en contact et qu'elles ne sont pas corrodées.*<input type="checkbox"/> Si vous utilisez un conduit, vérifier qu'il n'est pas endommagé et qu'il est continu.*<input type="checkbox"/> Si vous utilisez des conduits, vérifier les supports de conduits et fixer les conduits.<input type="checkbox"/> Vérifier l'intégrité, la corrosion et l'étanchéité des boîtiers. Cela comprend les boîtes de raccordement, les boîtes d'ondeur et les boîtiers*.<input type="checkbox"/> Vérifier l'étanchéité du matériel de montage structurel des boîtiers et le resserrer, si possible.<input type="checkbox"/> Vérifier que les connexions électriques des boîtiers ne sont pas corrodées, endommagées ou brûlées, y compris tous les connecteurs d'alimentation boulonnés*.<input type="checkbox"/> Vérifier l'étanchéité des connexions et la continuité visuelle du système de mise à la terre.*

Liste de contrôle pour les actions préventives avant les tempêtes (suite)



Catégorie	Montage au sol	Montage sur le toit
Électricité : étanchéité	<input type="checkbox"/> Vérifier les joints d'étanchéité, les raccords de conduits et les joints des pénétrations dans les boîtiers électriques pour empêcher l'infiltration de la pluie poussée par le vent ; resserrer et/ou appliquer un produit d'étanchéité pour l'extérieur si possible. <input type="checkbox"/> S'assurer que les panneaux d'accès à l'équipement sont fermés et verrouillés, si possible.	<input type="checkbox"/> Vérifier que les joints d'étanchéité, les raccords de conduits et les joints des pénétrations dans les boîtiers électriques empêchent l'infiltration de la pluie poussée par le vent ; resserrer et/ou appliquer un produit d'étanchéité adapté à l'extérieur, si possible. <input type="checkbox"/> S'assurer que les panneaux d'accès à l'équipement sont fermés et verrouillés, si possible.
Étapes finales	<input type="checkbox"/> Pendant la tempête, il est recommandé de mettre le système hors tension et de placer tous les sectionneurs en position "ouverte".*	<input type="checkbox"/> Pendant la tempête, il est recommandé de mettre le système hors tension et de placer tous les sectionneurs en position "ouverte".*

****Cette liste de contrôle s'applique aux systèmes solaires décentralisés plus formels, mais elle fournit des considérations générales qui s'appliquent également à tous les systèmes hors réseau.**

Exemples de listes de contrôle

Le diagramme de droite présente des exemples clés d'éléments à vérifier lors de la préparation des systèmes photovoltaïques en cas de tempête. Ces éléments sont également pertinents pour l'exploitation et l'entretien de manière générale.

Modules photovoltaïques



Connecteurs de câbles PV



Rayonnage (racking)



Environnement



Câbles d'alimentation



Électricité



Comment les systèmes solaires
hors réseau sont-ils exploités et
entretenus ?



Pourquoi le fonctionnement et l'entretien sont-ils importants ?

Les systèmes photovoltaïques ont tendance à nécessiter très peu d'entretien par rapport à d'autres types de générateurs d'électricité, mais une exploitation et une gestion efficaces peuvent contribuer à réduire les coûts :

- Augmentation de l'efficacité et de la fourniture d'énergie (kWh/kW)
- Diminution des temps d'arrêt
- Prolongation de la durée de vie du système
- Réduction des coûts d'exploitation et d'entretien (\$/kW/an)
- Garantie de sécurité et réduction des risques
- Amélioration de l'apparence et de l'image
- Renforcement de la confiance en matière de performance à long terme et de la capacité de revenus d'un actif afin d'attirer des financements à moindre coût

Remarque : l'exploitation et la maintenance des systèmes photovoltaïques sont souvent exigées dans le cadre du financement et de la garantie.



Format type d'un contrat d'exploitation et d'entretien

- Liste des éléments d'entretien préventif (programmé) basé sur le « coût fixe »
 - Inspection périodique, contrôle de la végétation, etc.
- Entretien correctif (réparation non programmée après une panne) sur la base d'un « coût majoré » où les coûts de main-d'œuvre et la majoration des équipements sont négociés dans le contrat d'exploitation et d'entretien.
 - Remplacement de l'onduleur, modules cassés, dégâts causés par le vent, etc.
- Les propriétaires de systèmes sont susceptibles de rechercher un « contrat de performance » au niveau duquel les performances spécifiées sont garanties.
 - Il est important de comprendre les indicateurs clés de performance (ICP) et la manière dont ils sont définis dans le contrat.
 - **Ratio de performance** : production mesurée (kWh) / production du modèle (kWh) (IEC 61724)
 - **Disponibilité** : fraction du temps pendant lequel le système est opérationnel (IEC 63019)
 - **Production annuelle** : ajustée en fonction des conditions météorologiques



L'entretien préventif permet de maximiser le rendement du système, d'éviter des pannes plus coûteuses et de maximiser la durée de vie d'un système photovoltaïque et de stockage d'énergie. L'objectif est de gérer l'équilibre optimal entre le coût de l'entretien programmé, le rendement et le flux de trésorerie tout au long de la durée de vie du système.

Une liste de contrôle et un calendrier des tâches d'entretien préventif sont disponibles à la page 107 du rapport [Meilleures pratiques pour l'exploitation et l'entretien des systèmes solaires et des systèmes de stockage d'énergie](#) 3^{ème} édition:

- Nettoyage des réseaux
- Gestion de la végétation
- Inspection de la corrosion
- Inspection des déconnexions
- Inspection de la mise à la terre et des câbles
- Essais de performance
- Inspections visuelles



Entretien nécessaire pour réparer les dommages ou remplacer les composants défectueux. Il convient de trouver un équilibre entre l'urgence de la réparation, le manque à gagner et les risques d'impact ultérieur sur le système. Par exemple, les défauts ou les conditions qui posent un problème de sécurité doivent être traités dès que possible, même si les recettes récupérées sont faibles, mais des tâches correctives moins importantes peuvent être combinées avec des programmes préventifs.

Une liste de contrôle et un calendrier des tâches de maintenance préventive sont disponibles à la page 106 du rapport [Meilleures pratiques pour l'exploitation et l'entretien des systèmes solaires et des systèmes de stockage d'énergie](#) __ 3ème édition:

- Remplacement des fusibles et des connecteurs
- Réparation des défauts
- Réacheminement des conduits
- Remplacement du câblage
- Réinstallation de logiciels
- Remplacement des batteries
- Remplacement des rayonnages (racking)

Nettoyage

- L'encrassement des panneaux photovoltaïques peut réduire la production d'énergie - **jusqu'à 6 % de pertes par an.**
- Le nettoyage peut être défini à intervalles réguliers (par exemple, mensuellement) ou en fonction des conditions (par exemple, en fonction de la performance des cellules).

Les sources de salissures les plus courantes sont les suivantes:

- Poussière agricole
- Poussières de construction
- Pollen
- Nids et fientes d'oiseaux
- Suie de diesel
- Sources industrielles

La plupart des fabricants fournissent des instructions de nettoyage des PV, mais il s'agit généralement d'eau ordinaire et de savon doux, en évitant les brosses dures et les produits abrasifs.



Contrôle de la végétation



Code international de prévention des incendies (IFC) 2018 1204.1

- Une zone dégagée et débroussaillée de 10 pieds est exigée pour les panneaux photovoltaïques au sol comme mesure de protection contre les incendies
- La végétation peut faire de l'ombre aux modules photovoltaïques
- Les racines peuvent affecter les fondations
- La végétation peut attirer les parasites et augmenter les fientes d'oiseaux
- Empêcher la végétation d'accéder aux nutriments, à la lumière du soleil et à l'eau.

Le bétail, en particulier les moutons, a été utilisé pour contrôler la végétation et il y a de plus en plus d'installations "[agrivoltaïques](#)" les installations qui associent les terres solaires à une croissance agricole mieux contrôlée.



Considérations relatives à l'exploitation et à l'entretien des installations photovoltaïques



Montée au niveau du toit	Montées au niveau du sol
<p>Lesté : accumulation de feuilles et de débris ; fuites sous les bacs de lestage ; déplacement d'objets sur le toit.</p> <p>Fixé : fuites autour des solins des étauçons</p> <p>Système de toiture : membrane, panneau de couverture, isolation, pare-air et pare-vapeur et plate-forme de toiture</p> <p>Complexité : toits plus complexes = réparations plus coûteuses</p> <p>Pente ou inclinaison : une pente ou une inclinaison plus élevée que le toit = des réparations plus coûteuses</p> <p>État : dommages causés au toit et à la terrasse</p> <p>Échelle : la taille du toit influe sur le coût unitaire</p> <p>Type de toit : des toits différents nécessitent un entretien différent</p>	<p>Gestion de la végétation : tonte, taille, enlèvement des arbres, etc.</p> <p>Déneigement : sur le réseau, les voies d'accès et les allées, entre les rangées de pisteurs</p> <p>Nettoyage : saleté, poussière, pollen, etc.</p> <p>Conception initiale : dégagement par rapport au sol, espace de rayonnement, croissance de la végétation sur les propriétés adjacentes.</p> <p>Couverture du sol : le gravier peut poser problème</p> <p>Érosion : peut compromettre la stabilité du rack PV</p> <p>Mouvement : peut endommager le rack et le conduit</p> <p>Populations d'oiseaux : nécessitent des nettoyages fréquents</p>

Pièces détachées



- Un facteur essentiel à la réussite de l'exploitation et de l'entretien des systèmes solaires est la tenue d'un inventaire de pièces détachées facilement accessibles pour les réparations.
- La liste des pièces de rechange varie en fonction du type de solution solaire et de l'emplacement, mais elle comprend généralement les composants électriques (batteries, onduleurs, panneaux, câblage, etc.), l'équilibre des systèmes, les connexions (ports, prises, connexions, contacteurs, interrupteurs, etc.), ainsi que les biens de consommation (vis, fusibles, filtres, écrous et boulons) - voir diapositive suivante

Une équation générale pour les pièces détachées :

$$n = N * R^P / (1 - P)$$

n : Nombre de pièces de rechange à garder en stock

N : Nombre total de pièces (d'un composant spécifique) dans le système

R : Fiabilité souhaitée (0-1)

P : Probabilité de défaillance d'une pièce



- **Pièces fréquemment remplacées**

- Attaches de rack (écrous et boulons) ; pinces pour modules PV
- Attaches de fils
- Fiches de connexion PV
- Faisceaux de câbles, longueur du fil endommagé
- Fusibles, porte-fusibles, disjoncteurs, interrupteurs de déconnexion
- Filtres à air de l'onduleur
- Joints du boîtier, fixations de porte

- **Pièces de rechange courantes**

- Micro-onduleurs ou onduleurs de branche ; composants de l'onduleur central (carte d'acquisition de données, carte de contrôle, cartes pilotes, matrice, condensateurs)
- Contacteurs CA, contacteurs CC, ré enclencheurs
- Capteurs et composants d'acquisition de données et de communication (cassés ou simplement obsolètes)
- Pièces de la crémaillère de suivi (moteur de l'actionneur, roulements)

- **Pièces rarement remplacées**

- Fondations de rack et pièces de rack fixes
- Transformateur

Gestion de la garantie



- Suivre attentivement les instructions pour **ne pas annuler la garantie** - de petites déviations telles que la manipulation de l'emballage peuvent entraîner l'annulation de la garantie.
- Documenter les données **prouvant que les performances d'un module sont insuffisantes**.
- Prévoir la main-d'œuvre **nécessaire pour retirer, expédier et réinstaller** un module dont les performances sont insuffisantes.
- **Essayer d'obtenir du fabricant une garantie** de "réparation ou de remplacement" plutôt qu'une garantie de "complément".
- Envisager **une police d'assurance** prévoyant que les réclamations au titre de la garantie continueront d'être traitées en cas de liquidation, de mise sous séquestre ou de fermeture d'un revendeur.

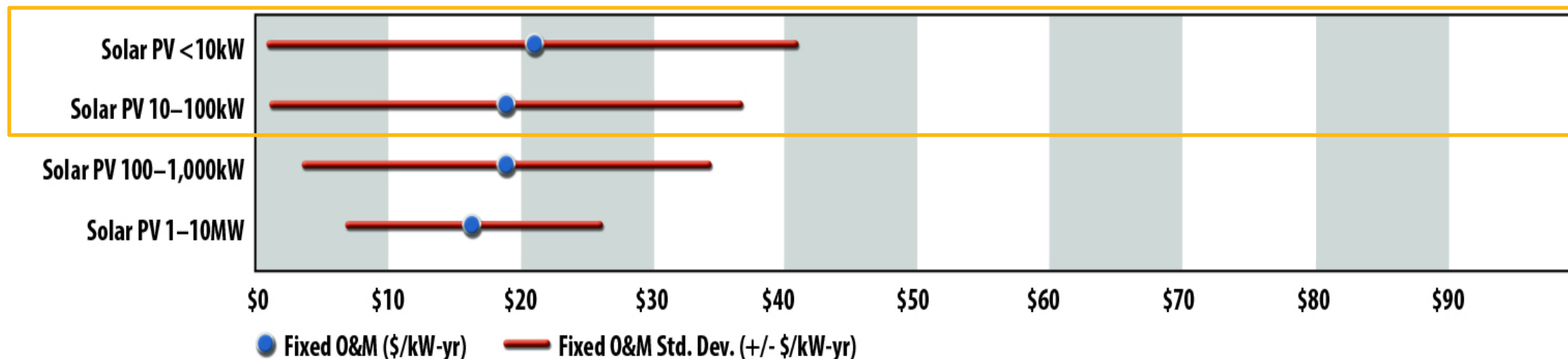


Barèmes généraux des coûts d'exploitation et d'entretien pour l'énergie solaire



Le tableau ci-dessous présente des estimations prudentes des coûts d'exploitation et d'entretien pour des installations solaires de différentes tailles (USD).

Coûts fixes d'exploitation et d'entretien



Merci



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



This work was authored, in part, by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), operated by Alliance for Sustainable Energy, LLC, for the U.S. Department of Energy (DOE) under Contract No. DE-AC36-08GO28308. Funding provided by the United States Agency for International Development (USAID) under Contract No. IAG-19-2120. The views expressed in this report do not necessarily represent the views of the DOE or the U.S. Government, or any agency thereof, including USAID. The U.S. Government retains and the publisher, by accepting the article for publication, acknowledges that the U.S. Government retains a nonexclusive, paid-up, irrevocable, worldwide license to publish or reproduce the published form of this work, or allow others to do so, for U.S. Government purposes.

NREL/PR-7A40-89260