

Le Système Solaire

Photovoltaïque Isolé (Off-Grid)

Indépendante du réseau public, elle fonctionne grâce à des panneaux solaires et des batteries pour stocker l'énergie.

1. Pourquoi choisir un système isolé ?

- **Éloignement du réseau** (sites ruraux, montagnes, îles)
- **Autonomie énergétique** (indépendance vis-à-vis des fournisseurs)
- **Solution d'urgence** (alimentation sécurisée pour des applications critiques)
- **Mobilité** (camping, bateaux, véhicules aménagés)

2. Composants principaux

a) Panneaux photovoltaïques (PV)

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable produite par la conversion de la lumière en électricité via l'effet photovoltaïque. Ce phénomène se produit lorsque des photons de la lumière solaire frappent un matériau semi-conducteur (comme le silicium), libérant des électrons et générant un courant électrique utilisable du photovoltaïque.

Les avancées dans la technologie photovoltaïque intègrent innovations techniques, nouveaux matériaux et optimisation de production, augmentant l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des systèmes solaires. Cela en fait une source d'énergie clé pour la transition énergétique mondiale.

Tableau 1: Technologies photovoltaïques

Génération	Type de cellule	Matériaux principaux	Efficacité (typique)	Coût (relatif)	Durabilité	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
Première	Monocristallin, Polycristallin	Silicium	15-22%	Élevé	Très bonne (25-30 ans)	Haute efficacité, bonne tolérance à la température, technologie mature.	Coût initial élevé, production d'énergie par surface limitée.	Grands systèmes photovoltaïques, toitures résidentielles.
Deuxième	Couches minces	CdTe, CIGS	10-15%	Moyen	Bonne (15-20 ans)	Flexible, léger, production possible sur de grandes surfaces.	Efficacité légèrement inférieure, sensibilité à la température, matériaux potentiellement toxiques (CdTe).	Toitures, bâtiments intégrés, applications flexibles.
Troisième	Technologies émergentes	Organiques, pérovskite, silicium hétérojonction	5-20%	Bas à moyen (en développement)	Variable (en développement)	Léger, flexible, potentiellement à très bas coût, possibilité de fabrication sur de grands substrats.	Efficacité encore faible, stabilité à long terme à démontrer, sensibilité à la lumière UV.	Applications spécifiques (ex : IoT, bâtiments intégrés), recherche et développement.

b) Régulateur de charge (contrôleur)

- Description : En énergie solaire, le régulateur de charge/décharge protège et recharge les batteries. Il empêche les batteries de se surcharger ou de se décharger excessivement, prolongeant ainsi leur durée de vie. De plus, il optimise la charge en fonction de l'énergie produite par les panneaux.
- Fonctionnement : Deux principales technologies de régulateurs de charge existent :
 - PWM (*Pulse Width Modulation*) : Envoie des impulsions de tension modulées pour ajuster la charge des batteries et éviter la surcharge lorsque la batterie approche de sa capacité maximale.
 - MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) : Ajuste continuellement le point de fonctionnement des panneaux solaires pour extraire le maximum de puissance, utile en conditions de faible luminosité ou de température variable.

c) Batteries de stockage

- Description
Une batterie est un dispositif électrochimique capable de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique et de la restituer sous forme électrique. Contrairement à une pile, une batterie est rechargeable. Elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) plongées dans un électrolyte, choisies en fonction des réactions chimiques souhaitées et des performances recherchées.
- Fonctionnement d'une batterie
 - Charge de la batterie Lorsqu'une batterie est connectée à un chargeur, un courant électrique déplace les ions positifs de l'anode vers la cathode à travers l'électrolyte. Simultanément, des électrons sont libérés à l'anode et circulent dans le circuit externe vers la cathode, induisant des réactions chimiques spécifiques à chaque électrode, stockant ainsi l'énergie électrique sous forme chimique.
 - Décharge de la batterie : lors de la décharge, les électrons circulent spontanément de l'anode vers la cathode à travers le circuit externe, alimentant un appareil électrique. Ce déplacement d'électrons entraîne des réactions chimiques inverses à celles de la charge, libérant l'énergie chimique stockée sous forme électrique.

- Types de batteries : il existe une grande variété de batteries, chacune ayant ses propres caractéristiques en termes de capacité, densité d'énergie, durée de vie et coût. Les plus courantes sont les batteries lithium-ion, utilisées dans les appareils électroniques portables, et les batteries plomb-acide, utilisées dans les véhicules et les systèmes de stockage d'énergie stationnaires.

d) Onduleur (Convertisseur)

- Description : Un onduleur solaire, ou convertisseur solaire, transforme le courant continu (CC) des panneaux solaires en courant alternatif (CA) utilisable par les appareils électriques et pour l'éclairage. Il permet également de convertir le courant stocké dans les batteries en cas de coupure de courant.
- Fonctionnement : L'onduleur fonctionne en continu pour optimiser la production d'électricité des panneaux solaires. Il analyse en permanence le courant continu produit, le convertit en courant alternatif domestique pour alimenter le réseau et les appareils. Il existe différents types d'onduleurs adaptés aux besoins spécifiques des installations.

Tableau 2: Type d'onde de l'onduleur

Type de signal	Description	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
Onde sinusoïdale pure	Forme d'onde régulière et fluide, similaire à celle du réseau électrique.	Compatible avec tous les types d'appareils, longue durée de vie des équipements, faible bruit électromagnétique.	Coût plus élevé, complexité électronique plus grande.	Appareils électroniques sensibles (audio, vidéo, informatique), moteurs à induction, appareils ménagers.
Onde sinusoïdale modifiée	Forme d'onde approximant une sinusoïde, composée de segments.	Coût inférieur, efficacité énergétique plus élevée.	Peut générer des harmoniques et du bruit, moins adaptée aux charges inductives, risque de réduire la durée de vie de certains équipements.	Chargeurs de batterie, outils électriques, certains appareils ménagers.
Onde carrée	Forme d'onde composée d'impulsions rectangulaires.	Simple à générer, efficacité énergétique élevée (pour certaines applications).	Génère beaucoup d'harmoniques, peut endommager les moteurs à induction, incompatible avec la plupart des appareils électroniques.	Circuits de commutation, alimentation de certains appareils électroniques simples.

e) Système de gestion et sécurité

- **Tableau électrique DC/AC** : Disjoncteurs, fusibles, parafoudres.
- **Monitoring** : Système de surveillance (ex : écran LCD, application smartphone).

3. Dimensionnement d'un système isolé

Le dimensionnement du système est basé sur une procédure simple et rapide :

- Indiquer la puissance souhaitée ou la surface disponible,
- Choisir un module PV dans la base de données,
- Choisir un onduleur dans la base de données.

4. Installation et maintenance

Installation :

- Orientation : Nord (à Madagascar, situé dans l'hémisphère Sud)
- Inclinaison : 15-20° pour la saison des pluies (optimisation annuelle)
- Protection contre le vol : Fixation renforcée, parfois en toiture
- Protection climatique : Boîtiers étanches (humidité, cyclones)

Maintenance adaptée :

- Nettoyage fréquent des panneaux (poussière rouge latéritique)
- Vérification mensuelle du niveau d'eau des batteries (eau distillée uniquement)
- Contrôle des connexions (oxydation due à l'humidité)
- Formation d'un responsable local dans chaque village

5. Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
Autonomie énergétique totale	Coût initial élevé (batteries)
Pas de facture d'électricité	Maintenance des batteries
Solution écologique (énergie renouvelable)	Espace nécessaire pour les batteries et panneaux
Résilience aux pannes du réseau	Surdimensionnement souvent nécessaire

6. Applications typiques

- Habitat permanent ou secondaire isolé
- Systèmes de pompage d'eau
- Éclairage public autonome

- Refuge en montagne, maisons de campagne
- Campings-cars et bateaux
- Stations de mesure environnementale

7. Pièges à éviter

- Sous-dimensionner les batteries (manque d'autonomie).
- Choisir un onduleur non adapté (sinus modifié pour moteurs).
- Négliger l'ombrage partiel sur les panneaux.
- Oublier la consommation des appareils en veille.

Conclusion

À Madagascar, le solaire photovoltaïque isolé n'est pas une option mais une **nécessité** pour le développement. Avec un ensoleillement exceptionnel et des besoins énergétiques fondamentaux non satisfaits, cette technologie représente la solution la plus viable pour l'électrification rurale.

Le succès dépend de :

1. La qualité des installations
2. La formation des utilisateurs
3. La mise en place de services de maintenance
4. L'adaptation des modèles financiers aux réalités locales

Schéma de principe :

Panneaux PV → Régulateur MPPT → Batteries → Onduleur → Charges CA

↓

Charges CC (optionnel)