



MINISTÈRE DES MINES,
DU PÉTROLE ET DE L'ÉNERGIE



Crédit photo: Shutterstock / Ingénieure inspectant l'entretien du panneau solaire

MANUEL DE BONNES PRATIQUES POUR L'EXPLOITATION ET LA MAINTENANCE DES SYSTÈMES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

En Coopération avec



Mise en œuvre par



DIRECTION GÉNÉRALE
DE L'ÉNERGIE

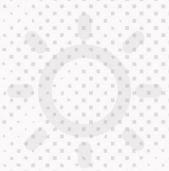


TABLE DES MATIERES

PREAMBULE	8
1 INTRODUCTION	9
2 CADRE REGLEMENTAIRE IVOIRIEN.....	11
2.1 Aspects légaux	11
2.2 Normes	11
2.3 Certifications	11
3 CONTEXTE CLIMATIQUE	12
4 SECURITE	13
5 PROCESSUS D'EXPLOITATION, OPERATION ET MAINTENANCE	15
5.1 Phases d'exploitation et maintenance.....	15
5.2 Rôle du propriétaire	17
6 SUPERVISION : DONNEES ET PERFORMANCES	20
6.1 Collecter les données	20
6.2 Traiter les données	21
6.3 Indicateurs	22
6.4 Analyser les données	24
6.5 Rapport de performance	28
7 MAINTENANCE PREVENTIVE : LISTE DES CONTROLES POSSIBLE ET PERIODICITE	29
8 IDENTIFICATION DES DEFAUTS.....	36
9 STRUCTURES	37
10 MODULES ET CONNECTEURS.....	42
11 CABLES DC ET AC.....	48
12 APPAREILLAGES, BOITES DE JONCTION ET PROTECTIONS.....	52
13 ONDULEURS	57
14 BATTERIES.....	61
14.1 Local technique	61
14.2 Lithium-ion.....	63
14.3 Plomb.....	67
15 STATION METEO	72

16	SYSTEME DE MONITORING.....	73
17	ANNEXES.....	74
17.1	Cadre légal et réglementaire	74
17.2	Références et bibliographie.....	75

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Configuration de la gateway du datalogger pour définir l'adresse IP des onduleurs..	25
Figure 2 : Ratio de performance calculé pour l'installation en question.....	26
Figure 3 : Image des modules sales et d'une solution pour chasser les oiseaux	26
Figure 4 : Exemple de courbe de dégradation (source : Longi Hi-Mo X6)	27
Figure 5 : Exemple de structure desserrée.....	39
Figure 6 : Exemple de corrosion sur les structures causée par le choix d'un métal inadapté...	40
Figure 7 : Attache plastique à remplacer par une fixation pérenne.....	40
Figure 8 : Exemples de pinces de module devant être serrées ou remplacées	44
Figure 9 : Exemple de modules encrassés.....	45
Figure 10 : Exemple de module cassé.....	46
Figure 11 : Connecteurs présentant une corrosion externe.....	46
Figure 12 : Exemple d'attache en plastique et de mousse à remplacer	49
Figure 13 : Exemple de dégradation avancée de câble DC à l'ombre	50
Figure 14 : Exemples de câbles exposés aux UV	51
Figure 15 : Exemple d'étiquettes à remplacer, l'inscription a disparu	51
Figure 16 : Coffret avec présence d'animaux.....	55
Figure 17 : Exemple de boîte de jonction sans presse-étoupe avec présence d'insectes	56
Figure 18 : Exemples d'onduleurs à dépoussiérer et nettoyer	59
Figure 19 : Exemple de grille de ventilation à nettoyer	62
Figure 20 : Batterie à nettoyer et terre à rendre continue.....	65
Figure 21 : Exemple de rack de batterie	66
Figure 22 : Exemple de connecteurs trop serrés ayant endommagé l'enveloppe du module de batterie.....	70
Figure 23 : Pyranomètre nécessitant un nettoyage et recalibrage.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Recommandations concernant les phases d'exploitation et maintenance	19
Tableau 2: Recommandations concernant l'analyse des données	24
Tableau 3: Recommandations concernant la maintenance préventive	33
Tableau 4: Recommandations concernant les structures.....	38
Tableau 5: Recommandations concernant les modules et connecteurs.....	43
Tableau 6: Recommandations concernant les câbles DC et AC.....	49
Tableau 7: Recommandations concernant des appareillages, boîtes de jonction et protections	54
Tableau 8: Recommandations concernant les onduleurs	58
Tableau 9: Recommandations concernant le local technique	62
Tableau 10: Recommandations concernant le Lithium-ion.....	64
Tableau 11: Recommandations concernant le Plomb.....	68
Tableau 12: Recommandations concernant la Station météo	72

ACRONYMES

AC	Alternative Current : courant alternatif
BMS	Battery Management System
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
cm	Centimètre
CODINORM	Association Côte d'Ivoire Normalisation
Cu	Cuivre
DC	Direct Current : courant continu
DGE	Direction Générale de l'Énergie
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
EPC	Équipements de Protection Collective
EPI	Équipements de Protection Individuelle
EMS	Energy Management System
I	Intensité
kVA	Kilovolt-ampère
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-heure
Li-ion	Lithium-ion
m	Mètre
MALT	Mise A La Terre
mm	Millimètre
mm ²	Millimètre carré
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MW	Megawatt
PMS	Power Management System
PV	Photovoltaïque
TGBT	Tableau Général de Basse Tension
U	Tension
UV	Ultraviolet
W	Watt
°	Degré
°C	Degré Celsius
Ω	Ohm
-	Borne negative
+	Borne positive
%	Pourcentage

PREAMBULE

Le présent guide a été rédigé dans le cadre du projet « Développement du marché et promotion de l'emploi dans le domaine des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique en Côte d'Ivoire » (ProFERE II), et spécifiquement dans le cadre d'une prestation « Conseiller le ministère de l'Énergie de Côte d'Ivoire dans la définition de normes et de procédures de contrôle de la conformité des installations solaires photovoltaïques et des pratiques d'opération et de maintenance (O&M) ». Le guide se base sur des échanges avec des parties prenantes et visites d'installations en Côte d'Ivoire réalisées dans le cadre d'une mission en janvier 2025 et a été rédigé sur la période mars – mai 2025 sur base du cadre légal, réglementaire et normatif en vigueur.

Ce guide a été rédigé par un consortium constitué de :

- PLANAIR SA, ingénieurs conseils/ www.planair.ch
- INES Plateforme Formation & Evaluation / www.ines-solaire.org

1 INTRODUCTION

Le guide présenté ici regroupe les obligations et meilleures pratiques pour l'exploitation, l'opération et la maintenance de solaire photovoltaïque et de batteries en Côte d'Ivoire. Il est principalement à destination des installateurs effectuant des opérations de maintenance d'installations photovoltaïques et des propriétaires de ces installations. Le guide traite de tous types d'installations fixes au sol, en toiture, raccordées ou non au réseau, avec ou sans batterie. Bien qu'utilisable dans d'autres contextes, ce guide cible plus particulièrement les installations domestiques ou industrielles de quelques kilowatts à plusieurs centaines avec un raccordement en basse tension. Cela exclut les onduleurs raccordés en haute tension et limite la puissance apparente en sortie d'onduleur à 250 kVA par onduleur. Les spécificités des grandes installations supérieures à 1 MWh ne seront pas traitées, car elles sont souvent encadrées par des appels d'offres avec des contrats dédiés. Le guide se concentre sur les technologies les plus répandues en Côte d'Ivoire à ce jour, en regardant principalement les panneaux photovoltaïques en silicium et les batteries plomb ou lithium. Les obligations et conseils prodigués sont basés sur les normes applicables en Côte d'Ivoire en mai 2025, mais aussi sur les meilleures pratiques internationales.

La qualité d'une installation est évidemment dépendante de nombreux facteurs, notamment de sa conception et de son installation. Les problèmes de dimensionnement, de conception et d'exécution ne seront cependant pas traités dans ce document. Un guide complémentaire traite des bonnes pratiques pour l'installation. D'autres références pertinentes sont disponibles en annexe.

Le chapitre « Cadre réglementaire ivoirien » appelle les textes légaux et normatifs applicables.

Le chapitre « Contexte climatique » revient succinctement sur les spécificités climatiques locales pouvant impacter les systèmes.

Le chapitre « Sécurité » revient sur les règles de sécurité à appliquer et les dangers spécifiques de ce type d'installation.

Dans le chapitre « Processus d'exploitation, opération et maintenance » est traité le processus d'une manière générale.

Le chapitre « Données et performances » résume les données à collecter, les indicateurs principaux pour évaluer l'état de la centrale et les analyses possibles à distance.

L'ensemble des mesures préventives et leurs périodicités est décrit dans **le chapitre « préventif : Liste des contrôles possibles et périodicité »**. Ce chapitre inclut aussi les tests de performance à effectuer de manière régulière.

La suite de guide évoque pour chaque élément constituant une centrale photovoltaïque les obligations, les bonnes pratiques et les pratiques à éviter ou à bannir. Seront évoqués :

- Les Méthodes d'identifications des défauts.
- Les Structures en toiture au sol.
- Les Modules et connecteurs.
- Les Câbles DC et AC.
- Les Appareillages, boîtes de jonction et protections.
- Les Onduleurs.
- Les Batteries Lithium-Ion, plombs et éléments constitutifs du local technique dédié.
- Le Système de monitoring, y compris EMS, PMS, et station météo.

Ce guide n'a pas pour vocation à remplacer une formation spécifique sur le photovoltaïque pour les installateurs ou les entreprises chargées de la maintenance. Il peut servir de rappel, mais n'est en aucun cas suffisant pour une mise en pratique directe.

2 CADRE REGLEMENTAIRE IVOIRIEN

2.1 Aspects légaux

Les systèmes photovoltaïques et batteries en Côte d'Ivoire sont encadrés par un corpus réglementaire important.

La loi n°2014-132 régit le code de l'électricité qui doit être respecté par chaque installation et installateur. Les décrets et arrêtés applicables à ce jour sont listés en annexe et encadrent aussi bien la production que la vente, les mini-réseaux et le matériel autorisé.

2.2 Normes

Le décret 2016-1152 rend les normes suivantes obligatoires pour le matériel :

- Les équipements électroniques et électriques traditionnels du bâtiment doivent se conformer **aux standards CEI**.
- Les modules et les batteries entrant sur le territoire Ivoirien doivent respecter **les normes respectives, CEI 61730-x et IEC 61427-1 : 2013**.

Le décret 81-388 de 1981 rend l'application de la **NF C 15-100** obligatoire en Côte d'Ivoire.

Dès lors, de nombreuses autres normes sont rendues obligatoires, notamment pour le PV :

- **UTE C 15-712-1**
- **UTE C 15-712-2**
- **XP C 15-712-3**

Le respect de ces normes est capital pour une installation solaire standard et conforme.

Les normes ECOSTAND constituent un guide pour l'installation en mini-réseau spécifique à la CEDEAO qu'il est conseillé de respecter.

- **L'ECOSTAND 109** offre des lignes directrices très concrètes pour l'installation et la mise en œuvre de mini-réseaux solaires.
- **L'ECOSTAND 110** présente des spécifications techniques minimales à respecter très utiles pour les installateurs dans la sélection de leurs composants.
- **L'ECOSTAND 111** propose une checklist de conformité utile pour l'autocontrôle ou la réception.

2.3 Certifications

Codinorm propose une certification des métiers du photovoltaïque, non obligatoire à ce jour. Il est possible de se faire certifier en tant que technicien d'étude ou en tant qu'installateur. Plus d'informations sont disponibles sur le site de Codinorm ou de la DGE.

3 CONTEXTE CLIMATIQUE

La Côte d'Ivoire présente certaines caractéristiques climatiques ayant un fort impact sur la qualité des systèmes photovoltaïques et des batteries.

En particulier, **la température** influence directement les performances du photovoltaïque, de la batterie et les caractéristiques des protections électriques. Un soin particulier doit être pris concernant la ventilation de l'ensemble des composants électriques et la climatisation des batteries. **Le local technique** doit être bien abrité et isolé du soleil et maintenu à une température acceptable pour l'ensemble des composants, notamment si les batteries et onduleurs y sont installés. Les limites de températures de fonctionnement des équipements sont consultables dans les fiches techniques.

Le fort taux d'ensoleillement, globalement propice au photovoltaïque apporte cependant des contraintes à cause des UV. Les câbles et équipements électriques doivent impérativement être abrités du soleil. **La protection des rayons directs** est primordiale, mais même à l'ombre, les étiquettes et écrans peuvent se dégrader en extérieur. La pluie présente une variabilité saisonnière forte. Il n'est pas rare d'observer de longues périodes sèches dans certaines régions, suivi de longues périodes de pluie. Ce phénomène impacte surtout l'encrassement du module et doit être pris en compte dans la conception et la maintenance du système. **L'humidité**, elle aussi très variable dans le temps et dans l'espace, peut impacter le choix des composants électriques et les performances de la centrale. En particulier, les onduleurs et les batteries peuvent avoir une humidité maximale tolérable. La dégradation peut aussi s'accélérer avec un fort taux d'humidité.

La côte sud du pays étant directement exposée à l'océan, la corrosion saline ne doit pas être sous-estimée. A proximité de l'océan, le brouillard salin peut corroder tous les composants métalliques (conducteurs, fixations, modules, électronique). Le choix des composants est dès lors critique et des mesures de protection particulières doivent être mises en place. Par exemple, certains onduleurs peuvent perdre leur garantie **à moins de 50 km de la côte**. D'autres composants peuvent spécifier une classe de résistance à la corrosion. A quelques kilomètres de la côte, il peut s'avérer nécessaire d'installer l'ensemble des composants électroniques dans un local technique étanche et climatisé maintenant un niveau de corrosion maximal pour maintenir l'ensemble des garanties de performances.

La densité de foudroiement ou niveau kéraunique est très élevée en Côte d'Ivoire. Sur l'ensemble du territoire, la densité de foudroiement dépasse 4 impacts / km² / an et peut monter jusqu'à 32 selon l'entreprise Vaisala. Une protection à la foudre opérationnelle est nécessaire sur toutes les installations photovoltaïques.

Le climat local présente aussi des avantages. Il n'y a pas de neige ou grêle en Côte d'Ivoire, l'activité sismique est très faible, et il n'y a pas de risque de cyclone ou d'éruption volcanique.

Le site du Global Facility for Disaster Reduction and Recovery thinkhazard.org peut être consulté pour visualiser les risques climatiques locaux. Le site Climate Knowledge Portal présente aussi des ressources intéressantes.

4 SECURITE

Les chantiers photovoltaïques présentent de nombreux risques :

- **Risque de chute.**
- **Risque électrique.**
- **Risque incendie.**
- **Risque chimique des batteries.**

Comme pour tout site industriel professionnel, le Code du travail oblige les employeurs à protéger ses employés et présume le chef d'entreprise responsable. De fait, **les équipements de protection individuelle (EPI) et équipements de protection collective (EPC)** adaptés aux conditions de travail sont fortement recommandés.

Les ouvriers sont en général tenus de porter à minima casques, chaussures et gilets de sécurité. Les lunettes, gants et autres protections sont requis suivant les travaux effectués. En outre, le chantier doit être clairement délimité et les risques signalés.

Sur une toiture, ou pour tout travail en hauteur, un dispositif de sécurité collectif doit être mis en place. Le risque de chute ou le travail en hauteur ne semble pas défini clairement dans la réglementation locale. A titre d'exemple, la législation française considère un risque de chute de hauteur dès que le travail n'est pas effectué de plain-pied (échelle, escabeau) ou en bordure d'une ouverture. D'autres pays, comme la Suisse, considèrent que des mesures doivent être mises en place à partir d'un risque de chute de plus de 2 m.

Avant d'intervenir, l'opérateur doit identifier les possibilités d'intervention conformément à la réglementation en vigueur concernant la protection des travailleurs.

La sécurité électrique est encadrée par la réglementation locale et **la NF C 18-510**. Toute manipulation électrique ou à proximité d'installation électrique doit être effectuée par une personne habilitée. La mise en sécurité de l'installation via le processus de consignation est nécessaire.

En particulier, les installations photovoltaïques et les batteries produisent un courant continu qui ne peut être arrêté facilement. Il est dès lors recommandé de considérer sous tension les parties DC directement connectées aux modules PV ou aux batteries.

Comme toute installation avec un risque électrique, les installations photovoltaïques présentent un risque d'incendie. Les incendies sont en général causés par un défaut électrique ou une surchauffe. Les panneaux photovoltaïques et onduleurs n'occasionnent pas plus d'incendies que les autres équipements électriques. Sur les toitures, il existe cependant un risque d'échauffement de la charpente du fait de la température élevée des modules.

Les batteries présentent un risque d'incendie particulier du fait d'une très grande densité énergétique et sont difficiles à éteindre une fois enflammées. Par ailleurs, elles peuvent s'enflammer d'elle-même en cas de défaut électrique interne à la batterie.

Enfin, elles peuvent dégager des gaz toxiques durant l'incendie. A cause de leur chimie, les batteries plomb-acide ont aussi un risque de corrosion et de brûlure chimique en cas de fuite et un risque de dégagement de gaz toxique naturel. C'est pourquoi il est nécessaire de toujours installer les batteries dans des locaux adaptés, comme décrit **au chapitre 13**.

La norme ECOSTAND 109 recommande que les intervenants sur les mini réseaux disposent d'une formation de base en électricité, soient formés sur le PV et accompagnés par une personne habilitée.

5 PROCESSUS D'EXPLOITATION, OPERATION ET MAINTENANCE

Le processus d'exploitation, opération et maintenance succède à la réalisation de la centrale et sa mise en service. Une réception de la centrale par l'exploitant est nécessaire au début de sa prestation pour faire l'état des lieux des systèmes et corriger les éventuels défauts.

5.1 Phases d'exploitation et maintenance

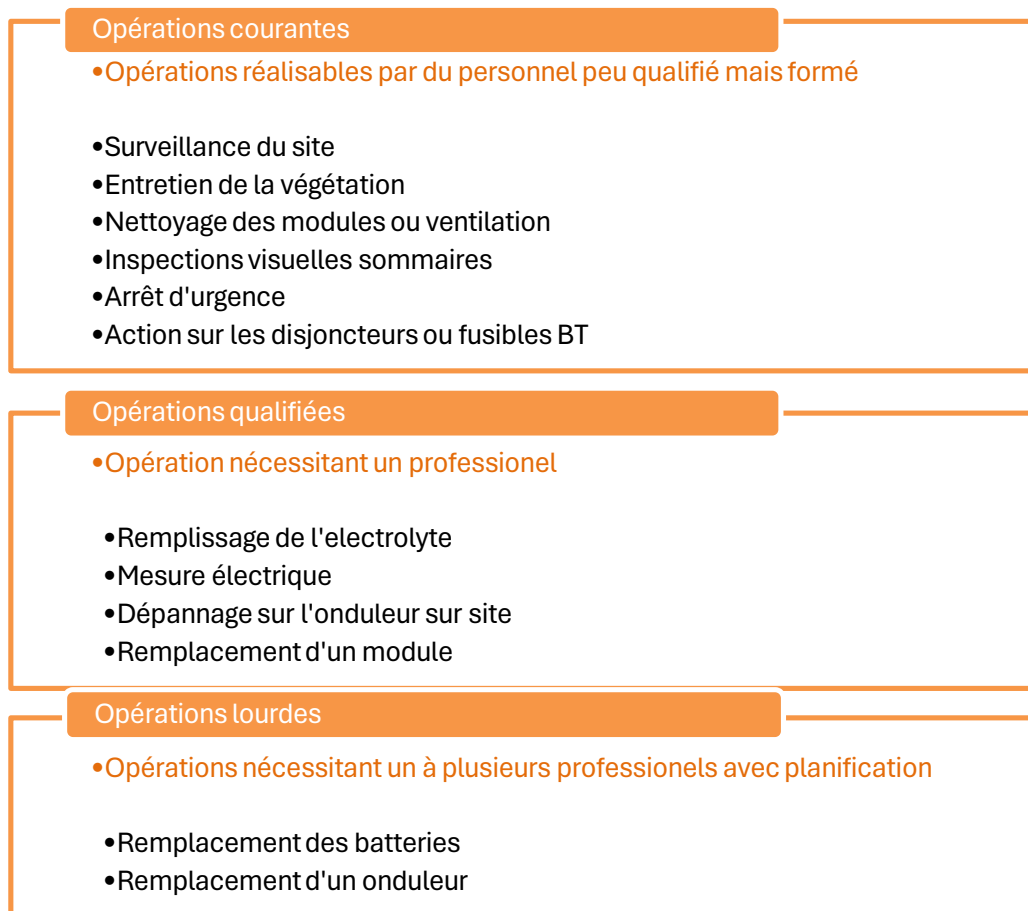
Les phases suivantes sont souvent distinguées :

- **Supervision et exploitation** : fonctionnement de la centrale tel que planifié avec la surveillance des données et alarmes. Une bonne exploitation comprend les registres d'interventions et d'alarmes, ainsi qu'une bonne gestion de la documentation sur place et à distance. Cette tâche peut être réalisée par le propriétaire ou déléguée à une entreprise chargée de la maintenance. Elle aboutit généralement sur un rapport de performance annuelle détaillé en 6.5.
- **Maintenance préventive** : opérations de maintenance et d'entretien réguliers pour maximiser les performances et la durée de vie du système. Elle peut comprendre des inspections visuelles régulières, potentiellement accompagnées de mesures électriques, d'analyse de données approfondies ou d'inspection avec des outils spécifiques (thermographie, électroluminescence). Le plan d'entretien des composants tel que le nettoyage des modules, batteries et onduleurs, la gestion de l'électrolyte sont compris dans cette phase. Des analyses de performances, à minima annuelles doivent être effectuées avec le propriétaire pour s'assurer de la qualité du système. Les opérations courantes telles que détaillées plus bas peuvent être effectuées par le propriétaire, mais elles peuvent être déléguées à une entreprise spécialisée dans le PV. Les opérations plus techniques doivent être effectuées par un professionnel.
- **Maintenance corrective** : opérations correctives faisant suite à un défaut. Cela inclut l'identification de pannes via des outils appropriés et le remplacement des composants. Ces opérations sont effectuées par des professionnels qualifiés.

La responsabilité entre le propriétaire de l'installation et l'entreprise chargée de la maintenance doit être clairement définie, de préférence de manière contractuelle.

La partie 5.2 ci-dessous détaille les différents niveaux de responsabilité du propriétaire.

Le processus de maintenance peut être décliné sur 3 niveaux de technicité :



L'exploitation et la maintenance de la centrale se réfléchissent dès la conception et la construction de la centrale. Par exemple, les mesures suivantes peuvent être mises en place dès la conception pour faciliter la maintenance :

- Sélectionner les variantes d'équipements ou de technologie avec moins de maintenance. Par exemple, favoriser les batteries lithium face au plomb.
- Se renseigner sur les performances du matériel et prendre en compte les retours d'expériences.
- Encourager l'accessibilité de données à distance.
- Organiser le site pour faciliter la maintenance, notamment au vu des accès et des circulations entre les modules.
- Respecter les standards et meilleures pratiques.

L'exploitation d'une centrale, en particulier pour les systèmes isolés et les grands systèmes, est un processus continu. Les alarmes du système doivent être relevées au quotidien. Un registre des interventions doit être tenu sur site à minima.

Un relevé régulier des indicateurs et la comparaison avec les valeurs théoriques et historiques sont nécessaires. Ce point est détaillé dans le chapitre suivant.

L'entreprise chargée de la maintenance doit aussi gérer ses pièces de rechange et les différents consommables. Cela inclut par exemple les fusibles, les parafoudres, les ampoules, etc.

Certains composants ont une durée de vie inférieure à la durée d'exploitation d'une centrale PV estimée à 30 ans. Le remplacement de ces composants est à prévoir avec le propriétaire :

- **Onduleurs : 10-15 ans selon le type et l'utilisation.**
- **Batteries : 5 ans pour le plomb ; 10-20 ans pour le Lithium.**
- **Pompes CVC : 5 ans.**
- **Systèmes de communication.**

Le remplacement comprend aussi l'évacuation et le traitement de ces composants selon les standards applicables. Le recyclage des batteries, onduleurs et modules photovoltaïques est essentiel pour créer une filière circulaire et durable. En 2025, l'export de déchets de batteries plomb a été interdit pour 10 ans par la Côte d'Ivoire pour favoriser le recyclage par l'industrie locale. Une interdiction similaire était en place depuis 2023 pour les produits ferreux et l'aluminium. A ce jour, aucun processus de recyclage des composants ne semble en place en Côte d'Ivoire.

Par ailleurs, les batteries présentent toujours un risque d'incendie même débranchées. Le manuel de la batterie mentionne la manière dont la batterie doit être stockée si elle n'est plus utilisée. En général, une charge régulière est nécessaire pour maintenir l'état de charge à un niveau sécurisé et le local d'entrepôt doit répondre aux mêmes spécifications que le local technique d'exploitation.

5.2 Rôle du propriétaire

L'installation d'un système photovoltaïque et a fortiori son exploitation sont soumises, le cas échéant, à des démarches spécifiques liées à l'activité d'autoproduction qui sont à réaliser par le propriétaire. Pour rappel, les systèmes dépassant 20 kW sont soumis à autorisation préalable, revue tous les 5 ans et à renouveler tous les 10 ans. L'augmentation de puissance d'un système existant au-dessus de 20 kW nécessite aussi **une autorisation préalable**. Si le propriétaire souhaite injecter sa production sur le réseau public de distribution, il doit notifier **la Commission chargée de l'examen des autorisations** au sein de **la Direction Générale de l'Energie** après au moins une année d'activité d'autoproduiteur et pourra vendre au maximum 50 % de sa production annuelle. Le cas échéant, **un contrat d'achat d'électricité** devra être signé avec la Commission. Cette démarche est susceptible d'évoluer rapidement, il est dès lors conseillé de vérifier sur le site des autorités les processus et la réglementation en cours. A ce jour, il n'existe pas, en Côte d'Ivoire, d'obligation d'assurer une centrale photovoltaïque.

Le propriétaire d'une installation PV ne doit jamais tenter de réparer lui-même un élément de son installation PV ou de procéder seul au remplacement d'un composant de son installation PV. Il peut cependant entreprendre des opérations de maintenance courante qui nécessitent peu de qualification.

La personne effectuant ces opérations doit avoir été formée par l'installateur ou une personne qualifiée au préalable et doit être sensibilisée aux points de vigilance **du chapitre 4**.

Par exemple, le propriétaire de l'installation PV peut procéder à l'inspection visuelle périodique, l'entretien de la végétation à proximité de l'installation PV, le nettoyage de certains composants à condition qu'ils soient accessibles sans risque de chute (modules PV, sonde d'ensoleillement, etc...).

Certains propriétaires d'installations PV qui en auraient les compétences pourraient même prendre à leur charge la tâche de supervision et de suivi des performances de leurs installations PV. Dans tous les cas, pour permettre ce suivi, le propriétaire devra prévoir une connexion internet indépendante et prévoir de payer régulièrement les frais d'accès auprès de son fournisseur.

De plus, le propriétaire d'une installation PV doit se charger de vérifier que tout composant de son installation PV qui serait défaillant et remplacé par l'entreprise chargée de la maintenance soit remis dans une filière de traitement des déchets ou de recyclage, en particulier les modules PV et les batteries.

Pour le propriétaire d'une installation d'autoproduction, 3 schémas de maintenance sont possibles :

- Le propriétaire d'une installation PV souscrit à **un contrat de maintenance annuelle préventive et corrective** auprès d'une société spécialisée qui peut être par exemple l'entreprise ayant effectuée aux travaux de pose de l'installation PV. Ce contrat de maintenance devra également comprendre un rapport d'analyse des performances de l'installation PV dont un exemple de contenu est donné au chapitre 6.5 de ce guide.

Ceci permettra d'allonger la durée de vie de l'installation et de réduire les risques liés à un défaut quelconque.

- Le propriétaire effectue lui-même **le contrôle de maintenance périodique et certaines opérations de maintenance préventive** qui nécessitent peu de qualification, mais demande à un professionnel d'intervenir régulièrement pour des audits plus poussés (tous les 2 à 10 ans) ou pour la maintenance corrective.
- Le propriétaire se charge de l'ensemble de **la maintenance préventive et corrective**, à l'exception des opérations lourdes. Ce schéma est déconseillé si le propriétaire n'a pas suivi une formation professionnelle en photovoltaïque.

Le tableau ci-dessous résume la délégation des responsabilités attendue suivant le niveau de contrat :

	Contrat de maintenance complet	Contrat de maintenance corrective / qualifiée	Absence de contrat
Analyse des données et rapport de performance	Entreprise	Propriétaire	Propriétaire
Analyse des alarmes	Entreprise	Propriétaire ou entreprise en option	Propriétaire
Inspection visuelle régulière	Entreprise	Propriétaire	Propriétaire
Audits détaillés avec mesures	Entreprise	Entreprise	Non prévus
Opérations courantes de maintenance préventive	Entreprise	Propriétaire	Propriétaire
Opérations qualifiées	Entreprise	Entreprise	Non prévues
Maintenance corrective	Entreprise	Entreprise	Non prévue
Gestion de la fin de vie	Entreprise	Propriétaire	Propriétaire

Tableau 1: Recommandations concernant les phases d'exploitation et maintenance

6 SUPERVISION : DONNEES ET PERFORMANCES

Le but de ce chapitre est de donner des clefs de fonctionnement pour une supervision efficace des systèmes photovoltaïques. Une bonne supervision permet d'identifier d'éventuels défauts de l'installation de façon rapide et précise. Pour ceci, ce guide indique quelles données récolter.

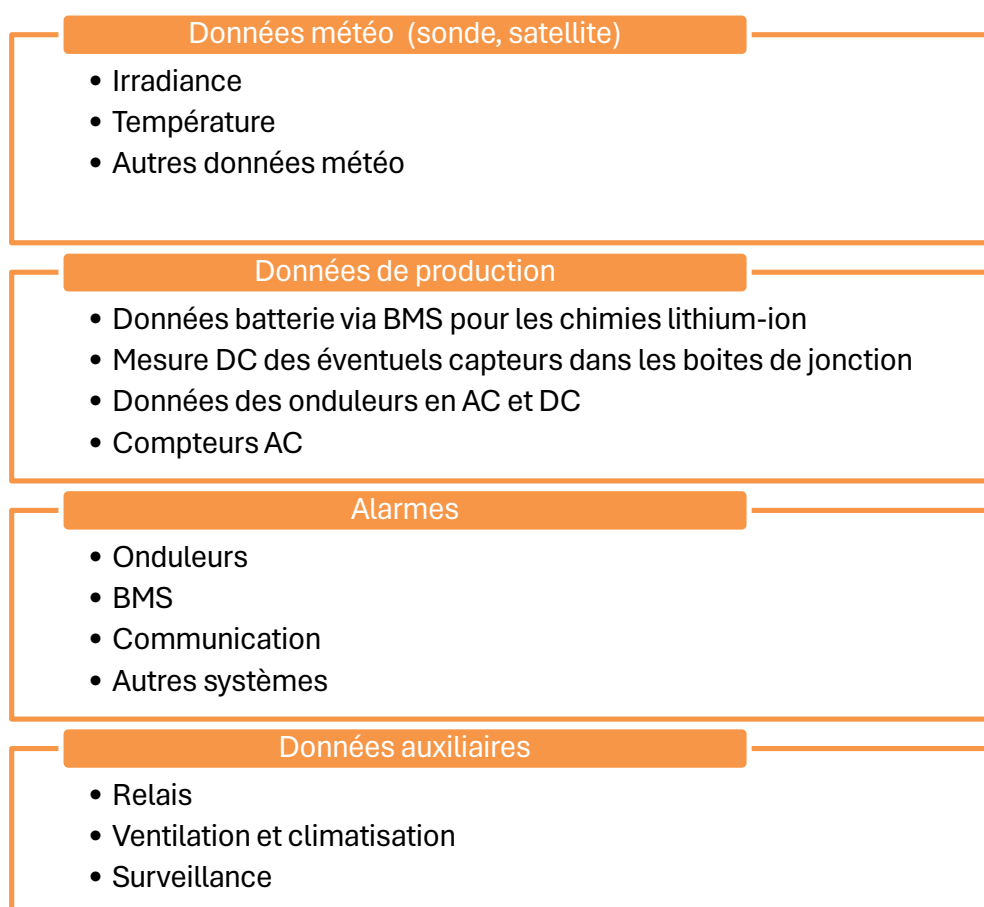
Puis, à partir de ces données, comment analyser les performances du système. La méthodologie suivante est conseillée :

- **Collecter les données adéquates.**
- **Traiter les données.**
- **Analyser les données.**
- **Interpréter les résultats.**

Le guide “best practice guidelines for the use of economic and technical KPIs” par **IEA PVPS** décrit de manière approfondie un ensemble d'indicateurs utiles ainsi qu'un processus détaillé pour la collecte et l'analyse de donnée.

6.1 Collecter les données

Les sources de données sur les centrales photovoltaïques et batteries sont nombreuses. Les principales sont :



Pour remonter ces données, il est recommandé d'utiliser **un SCADA** pour les centrales de plus de 1 MWc et sinon un datalogger connecté à internet ou les onduleurs directement. Des spécifications plus précises sont données dans **le chapitre 13 du manuel d'installation du photovoltaïque en Côte d'Ivoire** rédigé dans le cadre **du projet PROFERE II** sous financement **GIZ**. Il est fortement recommandé d'avoir une connexion internet indépendante pour ne pas être tributaire des décisions ou modifications de réseau de la part d'un tiers.

Une perte de l'accès aux données est un problème majeur qu'il ne faut pas sous-estimer. Sans accès aux données, il n'est pas possible de savoir si le système fonctionne ou non. L'accès en direct et continu aux données de monitoring de l'onduleur est obligatoire pour le propriétaire et pour l'exploitant.

Le choix des stations météo et des capteurs électriques influence la qualité et la précision de la mesure sur site, ainsi que le besoin d'entretien des capteurs. Le placement et la bonne installation des capteurs doivent aussi être vérifiés régulièrement.

6.2 Traiter les données

Une fois ces données remontées, il est important de les traiter afin qu'elles soient exploitables. Pour ceci, les recommandations de **la norme IEC 61724** sont une base sérieuse :

- **Prendre en compte uniquement la lumière du jour (irradiance > 20 W/m²)**
- **Supprimer les données invalides**

Limites physiques (max, min, taux de variation).

Tests statistiques (identification des valeurs aberrantes, comparaison entre capteurs).

Noter les codes d'erreur.

Identifier et nettoyer les données redondantes, manquantes ou bloquées.

- **Traitements des données manquantes**

Remplacer par des estimations ou des données moyennes.

Procéder conformément au contrat de maintenance.

Ignorer les périodes invalides.

En parallèle, il est important de vérifier que **les dénominations des appareils** (onduleurs, chaînes de modules, etc...) correspondent aux dénominations qui apparaissent dans les documentations techniques de l'installation. **La signalétique** est aussi importante dans le système de traitement des données afin d'identifier correctement les appareils défectueux et de pouvoir intervenir aux bons endroits.

6.3 Indicateurs

De nombreux indicateurs peuvent être utilisés pour suivre la production des systèmes photovoltaïques durant leur exploitation.

La norme IEC 61724 en définit un certain nombre :

- **Productible spécifique (kWh/kWc) :** l'énergie produite sur une période (généralement un an) divisée par la puissance crête. Cette information est critique pour le propriétaire, mais ne permet pas d'identifier si les variations de production sont causées par la météo ou un dysfonctionnement.

$$\text{Productible spécifique} = \frac{\text{Energie produite}}{\text{Puissance installée}}$$

- **Disponibilité (%) :** temps de fonctionnement de la centrale à pleine puissance sur le temps d'observation. Il est possible de pondérer les indisponibilités partielles par la puissance. Les indisponibilités planifiées et imprévues sont généralement distinguées. Cet indicateur permet d'évaluer le taux de panne et les performances de l'opérateur de maintenance, mais ne donne pas directement des informations sur l'énergie produite et la santé de la centrale. Une variante existe appelée disponibilité énergétique permettant de pondérer la disponibilité par l'énergie qui aurait dû être produite.

$$\text{Disponibilité} = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps total}}$$

- **Le ratio de performance (%) :** cet indicateur présente le ratio entre la production mesurée et la production théorique maximale des modules. Il permet de comprendre si la centrale performe comme elle devrait en capturant l'influence de la météo. Plusieurs manières de calculer ce ratio existent.

$$\text{Ratio de performance} = \frac{\text{Energie mesurée au point de référence}}{\text{Energie théorique calculée}}$$

On peut préciser pour une installation domestique avec un seul onduleur :

$$PR_{ac} = \frac{E_{AC}}{E_{th}}$$

E_{AC} est l'énergie AC (kWh) mesurée en sortie de l'onduleur sur une période définie (jour, heure ...)

E_{th} est l'irradiance dans le plan des modules sur la même période (kWh/m²) multiplié par l'efficacité des modules.

Le ratio de performance peut être calculé par jour, par heure, ou selon l'intervalle de votre choix. Il est sensible aux variations de performances thermiques du module. On s'aperçoit, que le ratio est meilleur lorsqu'il fait froid que lorsqu'il fait chaud, il peut donc être corrigé par la température ou la météo dans certaines formules. Le **guide du NREL « Weather corrected Performance Ratio »** permet d'approfondir les connaissances de cet indicateur.

- **L'index de performance (%)** : c'est le ratio entre la puissance ou l'énergie délivrée et un modèle théorique utilisant la donnée météo réelle (mesure ou satellite). Le modèle peut inclure ou non les périodes d'indisponibilités.

$$\text{Index de performance} = \frac{\text{Energie mesurée au point de référence}}{\text{Energie du modèle numérique}}$$

L'index de performance permet de réaliser une comparaison avec modèle détaillé du fonctionnement de la centrale et ainsi de percevoir des déviations fines de performances heure par heure. Le modèle numérique doit être réalisé et choisi avec les autres parties prenantes et peut être inscrit dans le contrat de maintenance.

D'autres indicateurs intermédiaires peuvent être utilisés : efficacité de conversion AC/DC, pertes électriques, etc. La batterie possède ses indicateurs propres :

- **Disponibilité (%)** : similaire au PV
- **Nombre de cycles cumulés (-)** : cet indicateur suit le cumul de l'énergie déchargée divisée par la capacité installée. C'est une base pour estimer la dégradation de capacité dans le projet.

$$\text{Nombre de cycles cumulés} = \frac{\text{Cumul de l'énergie déchargée}}{\text{Capacité installée}}$$

- **State of Health ou SOH (%)** : cet indicateur représente le pourcentage de capacité maximale disponible comparé à la capacité initiale. Il est estimé directement pour le BMS ou l'onduleur. C'est une version plus fonctionnelle de la dégradation

$$\text{SOH} = \frac{\text{Capacité maximale restante}}{\text{Capacité installée}} = 1 - \text{Dégradation}$$

- **Efficacité roundtrip (%)** : l'efficacité de la conversion entre la charge et la décharge. Il est possible de regarder cet indicateur à différent référentiel, mais le principal concerne l'efficacité du système batterie dans son ensemble.

$$\text{Efficacité Round Trip} = \frac{\text{Energie déchargée}}{\text{Energie chargée}}$$

L'efficacité et le State of Health peuvent être suivis et estimés en direct, mais il est nécessaire d'effectuer des tests de performance selon un protocole donné pour comparer les valeurs dans des conditions similaires.

6.4 Analyser les données

Le tableau suivant liste deux opérations de supervision essentielles à effectuer avec leur périodicité. Plus la centrale est importante pour l'approvisionnement ou pour le propriétaire, plus le contrôle doit être fréquent.

Opérations	Descriptions	Périodicités
Supervision		
Contrôle des données de production	Vérifier que les appareils sont en lignes et que des données de production sont remontées	Quotidien Hebdomadaire
Analyse des performances	Contrôler les indicateurs de performance, vérifier que les relevés correspondent aux valeurs prévisionnelles et/ou aux valeurs des années précédentes.	Mensuelle Trimestrielle Annuelle

Tableau 2: Recommandations concernant l'analyse des données

Lorsque l'analyse de performance montre de mauvais résultats, il faut que l'entreprise chargée de la maintenance intervienne. L'indicateur de disponibilité peut être vérifié au quotidien lors du contrôle des données de production. Si l'on s'aperçoit que les données ne sont plus remontées ou que la production est nulle pendant un certain temps (disponibilité nulle), il faut rechercher la cause de ces problèmes. Les raisons peuvent être multiples, voici une liste non exhaustive :

- **Problème de connexion internet.**
- **Mise à jour du firmware d'un des appareils nécessaires.**
- **Défaut de l'onduleur.**
- **Les dispositifs de sécurité électrique ont été déclenchés.**
- **Erreur de manipulation.**

Voici un exemple concret d'un problème de remontée des données de production. Sur cette installation, les données étaient remontées via le routeur du locataire du bâtiment. Au moment, du changement de locataire, plusieurs années après la mise en service de l'installation, le nouveau locataire a pris un abonnement chez un autre fournisseur d'internet et a changé le routeur.

Bien que les connexions aient été réeffectuées, toutes les adresses IP avaient été redéfinies par le nouveau routeur et le datalogger ne trouvait plus les onduleurs.

Configuration / Network / Ethernet

ETHERNET

Interface ETH 1

Obtain IP address automatically (DHCP) ☒ ? Activated

IP address ?

Subnet mask ?

Gateway ?

Primary DNS server

Secondary DNS server

Figure 1 : Configuration de la gateway du datalogger pour définir l'adresse IP des onduleurs

La solution a été d'aller manuellement trouver le **gateway du datalogger** et ensuite changer l'adresse IP des onduleurs pour qu'ils soient à nouveau sur le même gateway.

En ce qui concerne le **Ratio de Performance**, celui-ci est généralement compris **entre 70 % et 80 %**. Si on s'aperçoit qu'il descend régulièrement en dessous de 60 %, il faut investiguer.

Pour les plus grands systèmes, le ratio de performance cible est défini dans le contrat de maintenance. Plusieurs pistes sont possibles comme l'inspection visuelle des modules, les mesures de tensions et de courant des strings, la thermographie, etc.

Pour donner un exemple concret, voici le cas d'une installation d'environ 1 an. Le graphique ci-après montre le ratio de performance quotidien moyen de l'installation sur les 12 mois.

On observe que celui-ci est entre 70 % et 80 % pendant les 7 premiers mois, puis il diminue pour être à moins de 60 % sur les mois 11 et 12 (le mois 8 n'est pas comptabilisé, car il y a eu un problème avec un onduleur – et un trou de plusieurs jours dans les données).

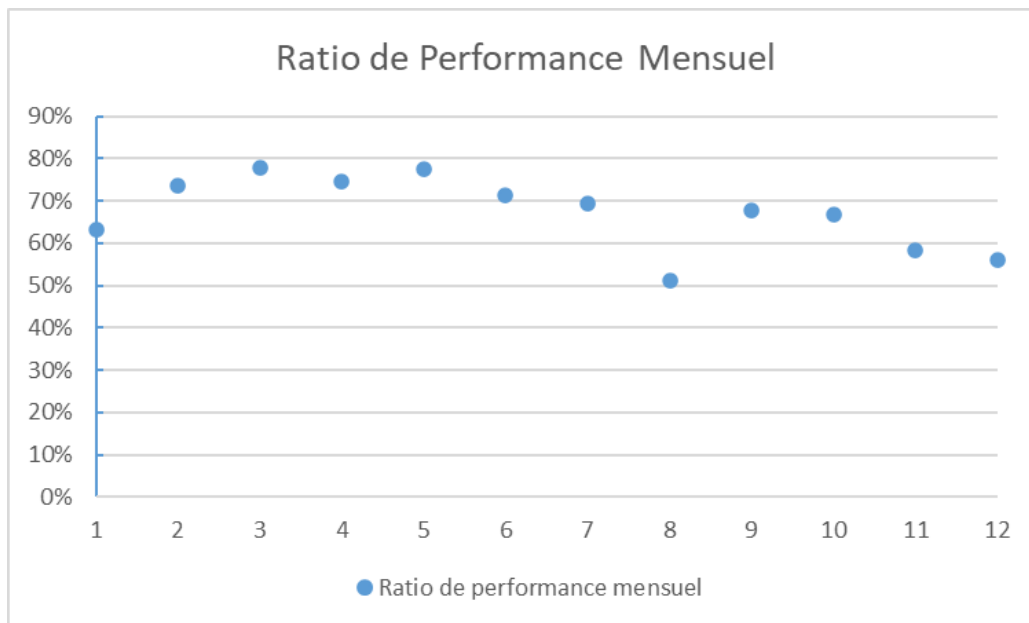


Figure 2 : Ratio de performance calculé pour l'installation en question

Au vu de la baisse du ratio de performance, une intervention sur site a été programmée. Celle-ci a permis de se rendre compte de l'état de saleté avancé des panneaux dû à la présence de goélands qui nichaient à proximité. Des mesures ont été prises pour nettoyer les panneaux et chasser les **goélands**. Sur l'image ci-dessous, on observe un nombre élevé de fientes sur les panneaux et l'ancien emplacement du nid, ainsi qu'un encrassement dû au pollen. Un filet jaune a été posé pour bloquer les oiseaux et les panneaux ont été nettoyés.



Figure 3 : Image des modules sales et d'une solution pour chasser les oiseaux

L'analyse de performance qui est réalisée à intervalles réguliers, doit être rangée sous forme de rapports de performance pour être accessible plus tard. Les rapports d'interventions doivent aussi être classés et archivés correctement. Cela permet par exemple de comparer le rapport de la période en cours avec celui des périodes précédentes. Un bon rapport de performance d'une installation solaire doit inclure une analyse détaillée de la production d'électricité, une évaluation du rendement des panneaux, ainsi qu'une analyse des facteurs influençant la performance et des recommandations d'amélioration. Il doit également inclure un historique des interventions liées à la performance.

La dégradation standard d'un module PV est en général garantie **inférieure à 0.4 %/an**. Une dégradation la première année de 1 % à 2 % des performances est attendue à cause de différents phénomènes physiques.

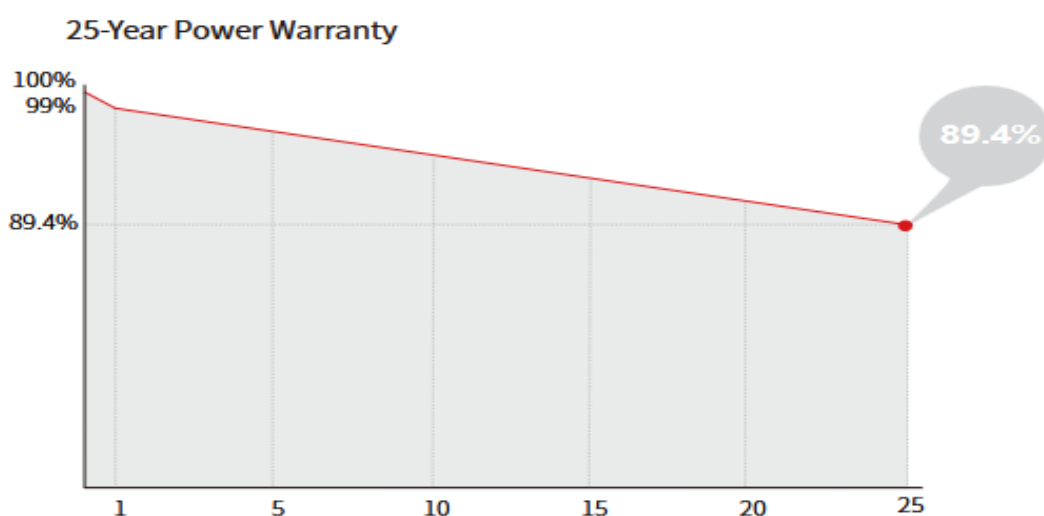


Figure 4 : Exemple de courbe de dégradation (source : Longi Hi-Mo X6)

La dégradation des batteries est un sujet complexe qui dépend de nombreux facteurs comme la chimie, l'utilisation, la température, etc. Ce sujet doit être traité avec le fournisseur et le fabricant de manière détaillée avant l'installation.

Attention, même si tous les indicateurs sont au vert et que les performances sont bonnes, cela ne signifie que la centrale ne présente pas de défauts ou de dysfonctionnements. La maintenance préventive et les inspections régulières sont indispensables au même titre que le suivi de performance.

Si l'installation présente un défaut, un contrôle visuel sommaire peut être effectué par le propriétaire ou du personnel qualifié. Cette personne peut être formée à observer sans prendre de risque pour identifier les traces de danger immédiat, les traces de brûlures, les disjoncteurs ouverts, ou autres problèmes usuels attendus.

Cela permettra de jauger rapidement sans attendre la personne qualifiée du type de défaut et de sa dangerosité. Si la centrale présente un défaut pour la sécurité des personnes ou un risque incendie important, la personne doit pouvoir actionner l'arrêt d'urgence.

Les chapitres 8 à 15 permettent d'identifier les problèmes principaux rencontrés durant l'exploitation d'une centrale.

6.5 Rapport de performance

Le rapport de performance de la centrale doit inclure les informations suivantes :

- **Information du projet : site, puissance installée, date d'installation, matériel.**
- **Information météo avec la source : irradiation (global ou dans le plan), température.**
- **Energie électrique avec le point de mesure : énergie DC, Actif à l'onduleur, actif et réactif au point d'injection.**
- **Consommation électrique si mesurée.**
- **Indicateurs : PR, disponibilité, énergie spécifique, dégradation.**
- **Le rapport doit ensuite être interprété pour en déduire l'état de santé de la centrale et les différentes actions à mener.**

7 MAINTENANCE PREVENTIVE : LISTE DES CONTROLES POSSIBLE ET PERIODICITE

D'une manière générale, les meilleures pratiques de maintenance sont celles recommandées par le fabricant de chaque équipement. **La périodicité et le type d'intervention de maintenance préventive** sont à vérifier dans chaque manuel pour chaque composant. Ces vérifications périodiques ont pour but de déterminer si l'installation est dans des conditions de fonctionnement sûres et satisfaisantes.

Le nettoyage des composants électriques est particulièrement sensible. Les recommandations du fabricant doivent être respectées. Globalement, l'usage de produit chimique et de brosse dure est proscrit. Les opérations doivent uniquement être entreprises par du personnel habilité et formé. Par exemple, le simple passage d'un chiffon sec en matière synthétique sur une batterie plomb peut créer des décharges électrostatiques pouvant mener à l'explosion de l'hydrogène produit lors de son fonctionnement.

Toute intervention sur le champ PV ou les parties électriques de l'installation doit être réalisée avec des équipements de protection individuels (EPI) contre les risques de choc électrique (gants isolants, tenue adaptée couvrante, chaussures de sécurité, lunettes de sécurité). Si une intervention de nettoyage doit être réalisée sur des parties électriques (coffret, onduleur) le courant doit être interrompu au moyen des dispositifs de coupures prévus côté AC et DC.

Attention la tension au niveau du circuit DC du champ PV reste présente même après coupure, la personne chargée de l'entretien doit donc être qualifiée pour intervenir.

Pour les petites installations domestiques, la figure ci-après liste les principales actions à réaliser :



Suivi de production mensuelle



Inspection visuelle des modules et structures annuelles



Dépoussiérage annuel des grilles de ventilation



Inspection visuelle externe des équipements électriques



En cas de panne ou défaut : appeler un professionnel qualifié

Le tableau ci-dessous résume les opérations de maintenance préventives à entreprendre ainsi que leur périodicité pour des installations professionnelles :

Opérations	Descriptions	Périodicités
Entretien du site et locaux		
Entretien végétation	Coupe régulière de la végétation pour limiter les ombrages proches. Sur certains sites, le périmètre autour du site doit aussi être débroussaillé sur 50m pour limiter le risque de propagation d'incendie.	Trimestrielle Annuelle ou selon la pousse
Vérification chemin de circulation, protections collectives, clôtures, portail	Vérifier que les espaces de circulation autour du champ photovoltaïque sont dégagés d'obstacles et le cas échéant vérifier la bonne fixation et l'intégrité des protections collectives, clôtures, portail.	Annuelle
Inspection étanchéité toiture et systèmes de drainage	Inspection visuelle de l'intégrité de l'étanchéité/couverture de la toiture et du dégagement des systèmes de drainage (gouttières, grilles d'évacuation). Nettoyage si nécessaire.	Annuelle
Nettoyage local technique	Maintenir un local technique propre en condition adéquate, vérifier la bonne ouverture et fermeture de la porte du local.	Mensuelle Trimestrielle
Entretien Ventilation et climatisation	Inspection visuelle d'absence de fuite, corrosion et poussière. Nettoyage des ventilations. Vérifier que les ventilateurs ne produisent pas de bruits anormaux lors du fonctionnement. Remplacement du liquide de refroidissement	Trimestrielle
Entretien sécurité incendie	Vérification du détecteur de fumée et du système d'extinction. Entretien selon manuels. Test du détecteur. Contrôle et révision des extincteurs.	Annuelle

Inspections et nettoyages techniques		
Inspection et nettoyage module	Inspection visuelle des modules (absence de fissures, d'impacts, de délaminations) et nettoyage de l'encrassement excessif à l'eau claire à température ambiante le matin avec un tissu doux (pas de produit chimique, abrasif). Attention, l'isolement des modules présentant des dommages importants doit être vérifié avant le nettoyage pour éviter tout risque électrique.	Selon encrassement et a minima annuelle
Inspection des structures	Inspection visuelle des structures (absence de corrosion et déformation). Vérification du couple de serrage avec une clef dynamométrique.	Annuelle
Inspection et nettoyage onduleurs	Inspection visuelle externe d'absence de rouille, poussière, infiltration et de l'aspect hermétique. Nettoyage des poussières en particulier sur les ventilations. Inspection visuelle et absence de rouille sur les supports. L'onduleur fonctionne sans bruit anormal. Vérification des paramètres de l'onduleur, des voyants de défaut/codes d'alarme.	Trimestrielle
Inspection et nettoyage appareillages	Inspection visuelle d'absence de rouille, poussière, infiltration et de l'aspect hermétique. Nettoyage interne et externe selon Manuel. Inspection visuelle et absence de rouille sur les supports. Vérification visuelle des fusibles, disjoncteurs et parafoudre.	Trimestrielle
Vérification étiquetage	Vérifier que l'ensemble de l'étiquetage préconisé est présent, lisible et visible.	Annuelle
Nettoyage station météo	Pour les grandes centrales, la norme IEC 61724 recommande un nettoyage régulier des pyranomètres pour assurer la validité des données. Vérifier que les capteurs sont fonctionnels et que les mesures sont cohérentes.	Nettoyage hebdomadaire Calibration selon Manuel (tous les deux ans)
Inspection visuelle câblage et mise à la terre	Inspection visuelle des câbles et connectiques (continuité, absence de dégâts sur les isolants, absence de corrosion).	Trimestrielle Annuelle

Inspection visuelle protections électriques et test de fonctionnement	Inspecter l'état des protections électriques et réaliser un test de fonctionnement sur les dispositifs qui possèdent un bouton test (disjoncteurs différentiels), vérifier le fonctionnement des coupures d'urgences côté AC et DC, vérifier l'état des fusibles, vérifier l'état des protections contre les surintensités/la foudre. Le cas échéant, vérifier le fonctionnement de l'arrêt d'urgence.	Annuelle
Inspection des compteurs	Vérification de l'intégrité et nettoyage des compteurs d'énergie. Relève des valeurs.	Annuelle
Mise à jour des logiciels	Mise à jour des logiciels des différents composants	Trimestrielle
Inspection des systèmes de communication	Inspection visuelle des systèmes de communications	Annuelle
Mesures électriques	Mesure des tensions ouvertes de strings PV, résistance d'isolement à la terre, comparaison des courants de fonctionnement des chaînes	Annuelle – tous les 5 ans
Batteries		
Inspection batteries	Inspection visuelle des racks et des modules de l'absence de rouille, fuite, déformation sur les racks et les connectiques. Relevé des tensions et température selon les capteurs en place.	Trimestrielle
Entretien batterie plomb	Inspection visuelle du serrage des connectiques. Graissage des connectiques, serrage des bouchons. Essuyer l'extérieur des batteries avec un chiffon légèrement humide (eau) en évitant toutes les charges électrostatiques.	Annuelle
Mesures électriques batteries plomb	Mesure des tensions sur l'ensemble du système, mesure des tensions des éléments individuels, température de surface de chaque élément, température de la salle.	Annuelle

Electrolyte liquide batterie plomb	Relevé de densité, température et niveau de l'électrolyte sur chaque élément et mise à niveau si nécessaire.	Annuelle
Génératrice / Groupe électrogène		
Inspection du niveau de carburant	Inspection des réserves de carburant et remplissage si nécessaire.	Hebdomadaire
Entretien Groupe Electrogène	Vidange, appoint d'huile, nettoyage ou remplacement des filtres, nettoyage du groupe avec chiffon sec. Vérification du bon fonctionnement.	Annuelle
Divers		
Tests de performance	Voir ci-dessous Tests de performance.	Annuelle
Vérification serrures	Vérifier que les serrures des coffrets et locaux sont fonctionnelles, nettoyer et lubrifier avec un produit adapté si nécessaire.	Annuelle

Tableau 3: Recommandations concernant la maintenance préventive

Les inspections de bases incluent une inspection visuelle, les tests électriques et la vérification des couples de serrages.

D'autres tests plus détaillés peuvent être exécutés, soit de manière préventive, soit pour confirmer et identifier un défaut en particulier. Les tests avec courbes I-V, les thermographies, les tests électroluminescents peuvent permettre de vérifier plus en détail l'état de la centrale. Ils nécessitent cependant du matériel spécifique pouvant être onéreux et une planification propre.

Le guide d'Hespul « Méthode de détection des dysfonctionnements électriques des installations photovoltaïques » détaille l'ensemble des contrôles possibles sur une centrale PV et résume la mise en œuvre et les défauts détectés par chacune des méthodes.

L'acquisition de caméras thermiques pour vérifier les câbles, connecteurs et appareillage est fortement recommandée, car elle permet de vérifier l'échauffement des points critiques menant souvent à un risque incendie. Elle permet aussi de vérifier plus en détail l'état d'un module en cas de doute sur ses performances, et ce sans déconnecter la centrale. En complément, l'acquisition d'un drone avec caméra thermique permet de faciliter la prise de vue de l'ensemble du site en automatisant le trajet du drone. Cette solution est particulièrement pertinente pour les grands sites au sol.

Les dispositifs de traceur I-V offrent aussi la possibilité d'approfondir l'analyse des performances chaîne par chaîne, mais nécessitent une intervention spécifique par du personnel habilité.

- **Tests de performance**

Les indicateurs clefs de performance de la partie photovoltaïque ne sont pas toujours vérifiables facilement. Sur les grands systèmes, la mesure des indicateurs tels que le ratio de performance, le productible ou la disponibilité doivent être vérifiés après 1 an de fonctionnement et doivent être ajustés en fonctions des conditions climatiques. Ces valeurs sont généralement vérifiables à distance et sont décrites dans **le chapitre « Supervision : Donnée et performances »**

En revanche, les performances de la batterie doivent être évaluées en conditions réelles sur place de manière régulière (annuellement pour les systèmes les plus critiques). Il est recommandé de tester la batterie au moins 4 heures après sa mise sous tension avec les auxiliaires allumées. Durant ces tests, il est recommandé d'effectuer des mesures comparatives aux valeurs de l'onduleur avec une pince ampèremétrique pour vérifier la cohérence des mesures. La température pouvant largement influencer les performances globales de la batterie et des onduleurs, les tests doivent avoir lieu durant un jour représentatif.

La capacité réelle de la batterie doit être testée avec **un protocole de décharge rigoureux**. Souvent ce protocole est proposé par le fournisseur ou par un cahier des charges, auquel cas il convient de le respecter. Ce protocole doit spécifier une charge avec une puissance constante cohérente avec la puissance maximale que le système doit pouvoir livrer, sur une durée ou une profondeur de décharge donnée.

Il est conseillé de partir de l'état de charge minimal, de charger jusqu'au maximum puis de recharger jusqu'au minimum. Sauf indication contraire explicite, toutes les autres sources d'énergie doivent être déconnectées durant ce test. Le test peut être répété 3 fois pour confirmer les mesures sur les plus gros systèmes.

Pour les systèmes off-grid sans consommateur déjà raccordés, un protocole avec une charge fictive doit être mis en place. Pour **les grandes centrales**, un banc de charge peut être utilisé pour simuler une consommation.

Pour **les petites centrales**, des méthodes plus artisanales avec des équipements électriques avec forte consommation type plaque de cuisson ou autres systèmes résistifs peuvent être envisagées.

De manière similaire, un protocole de test de la puissance doit être mis en place. Il doit pouvoir tester la capacité des onduleurs et de la batterie à livrer la puissance maximale désirée dans des conditions réalistes pendant **au moins 15 min voire 1 h**.

Il est recommandé d'effectuer ce test en partant d'un **état de charge de 50 %**. Outre la capacité à fonctionner à puissance nominale, ce test doit servir à mesurer le temps de réaction de la batterie pour suivre les ordres de charge et décharge et atteindre la puissance désirée au point de livraison. Un autre test à la moitié de la puissance nominale est conseillé.

Le temps de réponse peut aussi être quantifié en testant différents ordres de puissance chaque minute par exemple en charge et décharge :

- **0 à 50 %**
- **50 à 80 %**
- **80 à 0 %**
- **0 à 100 %**

L'efficacité roundtrip de la batterie doit aussi pouvoir être évaluée selon un protocole proche des conditions réelles d'exploitation. L'évaluation finale sur les systèmes entiers peut se faire sur les données d'une année d'exploitation en enregistrant chaque 10 min la puissance au point de livraison et l'état de charge et en s'assurant que l'état de charge final est égal à l'état de charge initial. Il faut alors comparer le ratio d'énergie livrée par l'énergie consommée pour obtenir l'efficacité totale du système.

La disponibilité peut aussi être un critère à vérifier lors de la première année de fonctionnement de la batterie et doit être définie clairement de manière contractuelle.

L'ensemble des fonctionnalités du système doivent être testées. Par exemple, un test doit être proposé pour chacun de ces aspects.

- **Synchronisation au réseau ou au générateur** : Les onduleurs doivent pouvoir se synchroniser à la fréquence et tension du réseau ou du générateur déjà actif.
- **Passage du mode réseau au mode autonome et inversement** : test de mode autonome du système en cas d'absence de réseau, avec des conditions externes et électriques représentatives. Ce test doit inclure le test des protections différentielles et vérifier la protection contre l'injection sur le courant (ouverture du commutateur). Le système doit aussi pouvoir se synchroniser au réseau dès le retour de celui-ci.
- **Gestion du réactif** : les onduleurs doivent pouvoir générer ou absorber la puissance réactive telle que prévu lors de la conception.
- **Black start** : si le système doit être capable de démarrer un mini réseau de manière autonome, cette fonctionnalité doit être testée, notamment pour vérifier la capacité à supporter les différents courants d'appels et les transitoires.

Les équipements auxiliaires doivent aussi être vérifiés. En particulier, les performances de la climatisation et des systèmes de communication sont souvent critiques et un protocole de test doit être spécifié.

Tous les essais et tests de performance doivent être consignés dans un rapport.

8 IDENTIFICATION DES DEFAUTS

Une fois une sous-performance détectée, il n'est pas toujours évident d'identifier la cause précise. Les chapitres suivants détaillent pour chaque composant les défauts typiques détectés et la méthode d'identification. Cependant, il peut être nécessaire d'utiliser des tests plus détaillés ou d'approfondir certains points plus en détail. Les guides suivants peuvent aider à mieux identifier un défaut, sa cause et sa correction :

- « Méthode de détection des dysfonctionnements électriques des installations photovoltaïques » par Hespul
- « Exploitation des installations photovoltaïques : Gestion technique de l'ordinaire et de l'extraordinaire » par Hespul
- « Quantification of Technical Risks in PV Power Systems 2021 » et “Photovoltaic Failure Fact Sheets (PVFS) 2025” par IEA PVPS
- “Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipment 2021” par le PVPS

Le manuel d'exploitation de la centrale doit inclure un arbre décisionnel pour le propriétaire et le personnel de l'entreprise de maintenance, indiquant les actions à mener en fonction du type de défaut. En particulier, les défauts critiques pouvant entraîner un risque immédiat doivent être identifiés.

9 STRUCTURES

Problème	Détection	Risques	Solution
Structure			
Vis et écrous desserrés	Inspection visuelle et test du couple de serrage à la clef dynamométrique	Arrachement de la structure Stress mécanique Perte de performance	Resserrage à l'aide d'une clef dynamométrique
Corrosion des pièces métalliques ou des mises à la terre	Inspection visuelle Test de continuité électrique	Arrachement de la structure Stress mécanique Perte de performance Risque électrique	Remplacer les pièces corrodées
Déformation et dégâts des éléments de la structure	Inspection visuelle	Arrachement de la structure Stress mécanique Perte de performance	Remplacer les éléments endommagés
Éléments plastiques détériorés à cause des UV	Inspection visuelle	Arrachement de la structure Stress mécanique Perte de performance	Remplacer les éléments plastiques détériorés par des éléments résistants aux UV ou par les mêmes éléments, mais en les protégeant des UV
Toits			
Dégât sur l'étanchéité toiture plate	Inspection visuelle	Pénétration d'eau dans le bâtiment	Etanchéité à réparer. Si les dégâts sont dus à l'installation PV, contrôler les espaces de dilations et les éléments de protection entre structure et toiture

Problème de lestage	Inspection visuelle	Arrachement de la structure Stress mécanique Perte de performance	Améliorer le lestage
Tuiles cassées	Inspection visuelle	Pénétration d'eau dans le bâtiment	Remplacer les tuiles cassées et contrôler l'effet du champ PV au niveau des tuiles cassées.
Espaces de ventilation obstrués	Inspection visuelle	Perte de performance Risque incendie	Nettoyer les espaces de ventilation entre les modules et la toiture
Sol			
Tassement du sol et problème de drainage	Inspection visuelle	Affaissement de la structure Stress mécanique Perte de performance	Contrôler le bon alignement de la structure et viabiliser le terrain. Contrôler les drainages.
Système d'ancrage ou fondations détériorées	Inspection visuelle	Affaissement de la structure Stress mécanique Perte de performance	Remplacer les éléments détériorés
Protection système antivol détériorée	Inspection visuelle	Vol	Remplacer les éléments détériorés

Tableau 4: Recommandations concernant les structures

La structure de support du système PV ou système d'intégration est un élément critique d'un système photovoltaïque permettant de maintenir la stabilité mécanique et statique des modules. La bonne tenue dans le temps des structures est à vérifier régulièrement.

Après un événement météorologique (tempêtes, grêle, orage, vent violent, mousson) ou naturel (tremblement de terre, inondation, glissement de terrain, feux de brousse) majeur, il est nécessaire de procéder à un contrôle du système de fixation des modules photovoltaïques. En temps normal, il est recommandé de contrôler annuellement la structure photovoltaïque.

Les couples de serrage des éléments d'assemblage (vis, écrous et rondelles) doivent être contrôlés à l'aide d'une clef dynamométrique au couple de serrage préconisé par le fabricant de la structure en plus d'une simple inspection visuelle. En cas d'élément d'assemblage desserré, il est nécessaire d'effectuer le resserrage de ce dernier. Une structure desserrée peut présenter un risque d'arrachement, d'effondrement ou endommager les modules à cause des vibrations et mouvements.



Figure 5 : Exemple de structure desserrée

Tous les éléments métalliques, y compris les mises à la terre, doivent être inspectés visuellement. En cas de présence de fissures, de corrosion ou de déformations, il est nécessaire de réaliser le remplacement immédiat des pièces affectées par ces dégâts et de reconstruire avec minutie les autres éléments métalliques liés à ces parties fragilisées.

A noter que la déformation des structures peut être due à une mauvaise réalisation des dilations thermiques des structures, dans ce cas en plus du remplacement des pièces endommagées, il est nécessaire de modifier la structure afin de permettre la dilation de cette dernière dans les plages autorisées par les fabricants.



Figure 6 : Exemple de corrosion sur les structures causée par le choix d'un métal inadapté

Tous les éléments plastiques exposés au rayonnement ultraviolet (UV) doivent être contrôlés visuellement. En cas de modification structurelle (plastique facilement cassable ou cassé), ces éléments doivent être remplacés par des éléments résistants aux UV ou être remplacés et protégés des UV.

Pour tous les types de toiture, une recherche visuelle des infiltrations dues à l'installation PV est à effectuer à chaque contrôle. Si des infiltrations sont détectées, des mesures afin de supprimer la fuite doivent être mises en place, de plus les éléments impactés par ces dernières doivent être inspectés par une entreprise spécialisée.



Figure 7 : Attache plastique à remplacer par une fixation pérenne

Pour les installations réalisées en toitures en pente, la lame d'air sous les modules doit être contrôlée, cette dernière ne doit pas être obstruée par des végétaux ou d'autres éléments organiques. L'obstruction de la ventilation peut poser des problèmes de performance voir créer un risque incendie.

Si la toiture est en tuile, il est aussi recommandé de vérifier visuellement l'état général des tuiles. En cas de tuiles fissurées ou brisées, un remplacement des éléments détériorés est nécessaire.

Pour les toitures plates, l'état de l'étanchéité doit être vérifié lors de chaque inspection. Une attention particulière doit être prise au niveau des appuis de la structure sur la toiture afin de déceler d'éventuelles fissures de l'étanchéité, y compris celles dues à des déplacements d'éléments influencés par la dilation thermique des supports. Les déformations de l'étanchéité au niveau des appuis doivent être contrôlées, cela peut être dû à un problème de compressibilité de l'isolant (isolant trop compressible inadapté au support de panneaux PV). En cas de présence de ces deux types de défauts, des réparations de la couverture sont à réaliser.

Pour toutes les installations lestées, il est nécessaire de contrôler l'état du lestage et dans le cas où il en viendrait à manquer, il est nécessaire de compléter le déficit. Un lestage insuffisant peut aboutir à l'arrachement de la structure à cause du vent.

Pour les installations au sol, la végétation aux alentours proche de la structure PV est à entretenir de manière régulière. L'état du sol est aussi à contrôler. Le drainage des eaux de pluie doit être contrôlé afin d'éviter de détériorer la stabilité de la structure photovoltaïque. Les systèmes d'ancrage doivent aussi être inspectés dans le but de déceler toutes fissures ou dégâts sur ces derniers. Dans le cas où il y'en aurait, les ancrages sont à réparer ou à remplacer immédiatement. Une dégradation des fondations ou de la terre autour de celles-ci peut aboutir à un affaissement de l'ensemble de la structure et un stress mécanique important sur cette dernière.

Pour tous les types d'installation, les systèmes antivols mis en place doivent être régulièrement inspectés afin que ces derniers remplissent toujours leurs fonctions premières en cas de vandalisme sur ces derniers, ils sont à remplacer immédiatement.

10 MODULES ET CONNECTEURS

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Eléments externes			
Ombrage de la végétation, de la faune ou éléments externes nouveaux	Inspection visuelle ou analyse de performance	Perte de performance	Entretien de la végétation, déplacement des animaux ou des objets nouveaux externes (parabole...)
Etrier desserré ou corrodé	Inspection visuelle et clef dynamométrique	Arrachement de la structure Perte de performance	Serrer les étriers avec la clef dynamométrique Remplacer les étriers corrodés
Modules			
Encrassement	Inspection visuelle ou analyse de performance	Perte de performance	Nettoyage des modules
Décoloration, jaunissement, délamination, traces d'escargot, dégât sur la cellule, défaut interne	Inspection visuelle Analyse de performance Thermographie	Perte de performance Dégradation accélérée Risque incendie	Remplacer le module si la perte de performance est trop importante ou si le présente un risque élevé. Se référer au guide PVPS T13 23
Dégâts sur le verre (impact, fissure) ou backsheet (craquage, perforation, grosse bulle)	Inspection visuelle Analyse de performance Thermographie	Perte de performance Dégradation accélérée Risque incendie Risque électrique	Remplacer les modules

Hotspot et traces de brûlure	Inspection visuelle Analyse de performance Thermographie	Perte de performance Dégradation accélérée Risque incendie Risque électrique	Remplacer les modules
Déformation ou corrosion du cadre	Inspection visuelle	Dégradation accélérée Risque incendie Risque électrique	Remplacer les modules
Connecteurs			
Boîte de jonction endommagée, brûlée ou décollée	Inspection visuelle	Perte de performance Risque incendie Risque électrique	En cas de brûlure ou corrosion interne, remplacer le module Fermer et étanchéifier les BJ
Corrosion / fonte du connecteur	Inspection visuelle	Perte de performance Risque incendie Risque électrique	Remplacer le connecteur ou le module
Corrosion ou interruption de la terre	Inspection visuelle	Risque électrique	Rétablir la continuité
Divers			
Défaut de performance ou défaut électrique	Analyse de performance	-	Remplacer les modules ou connecteurs

Tableau 5: Recommandations concernant les modules et connecteurs

Les parcs photovoltaïques étant situés en milieu naturel, il est fort probable que la faune et la flore aient un impact considérable durant l'exploitation du système. A ce titre, la végétation doit être entretenue régulièrement. Sur les sites au sol, une tonte régulière doit avoir lieu sous panneaux pour éviter un ombrage immédiat des plantes pouvant pousser. Il est possible d'effectuer cette opération avec des moutons ou brebis. Attention, cependant certains animaux, comme notamment les chèvres peuvent avoir tendance à monter sur les modules et les endommager.

Les arbres à proximité peuvent aussi nécessiter un entretien pour éviter un ombrage proche. Sur les sites au sol, pour éviter une propagation de l'incendie trop rapide, il peut être nécessaire de procéder au débroussaillage sur 25 à 50 m autour du périmètre du site juste avant la saison sèche.

Dans tous les cas, le personnel doit être formé au risque électrique et faire bien attention à ne pas arracher de câbles ou d'envoyer des débris sur les modules. La faune locale peut aussi engendrer des problèmes. Les nids peuvent se former sur ou sous les modules et doivent être déplacés en accord avec la réglementation environnementale locale. La présence d'oiseaux peut aussi provoquer une présence excessive de fientes, en particulier sur les sites côtiers, et doit être nettoyée régulièrement, car en plus de nuire directement aux performances, son côté corrosif peut dégrader rapidement le module.

Le lien entre les modules et la structure doit être contrôlé régulièrement. A ce titre, la fixation des étriers doit être vérifiée avec une clef dynamométrique pour éviter que le module se libère avec le temps. Attention cependant à toujours respecter le couple de serrage sous peine d'engendrer des contraintes mécaniques pouvant endommager les modules.

Si les étriers présentent des signes de corrosion, il est nécessaire de traiter ce problème en remplaçant les étriers ou à minima en traitant la corrosion. Les étriers mal serrés ou endommagés peuvent conduire à l'arrachement d'une partie des modules, ou provoquer un stress mécanique induisant des défauts et réduisant la performance et la durée de vie des modules.



Figure 8 : Exemples de pinces de module devant être serrées ou remplacées

En fonction des conditions climatiques et de la criticité des performances de la centrale photovoltaïque, un entretien régulier des modules est nécessaire. L'encrassement peut se nettoyer facilement à l'eau claire à température ambiante, avec une brosse souple, sans produit chimique comme décrit dans la partie « **Maintenance préventive : Liste des contrôles possible et périodicité** »

A l'exception des pertes de performance qu'il engendre, un encrassement uniforme ne pose pas de problème particulier. Les mousses et champignons doivent être éliminés régulièrement.



Figure 9 : Exemple de modules encrassés

En parallèle du nettoyage des modules, une inspection visuelle régulière par du personnel expérimenté doit avoir lieu de sorte à repérer les défauts des modules. La liste dressée par l'IEA PVPS dans les documents « **Quantification of Technical Risks in PV Power Systems 2021** » et « **Photovoltaic Failure Fact Sheets (PVFS) 2025** » par PVPS constitue une référence indispensable pour juger de la criticité du défaut et des actions à mener.

C'est notamment le cas pour les défauts de décoloration, délamination, ou les défauts internes à la cellule qui nécessitent d'être évalués au cas par cas.

Les défauts sur le verre (impacts, fissures), **la backsheet** (craquage, grosse bulle, perforation) ou sur le cadre (déformation importante, corrosion) nécessitent souvent le remplacement du module, car ils peuvent provoquer des défauts d'isolement électriques.

Les hotspots et traces de brûlures présentent des indices d'un événement de surchauffe et donc d'un risque incendie élevé. Les modules doivent être déconnectés et protégés au plus vite.



Figure 10 : Exemple de module cassé

La boîte de jonction située à l'arrière du module ne doit pas être oubliée. Elle peut simplement être recollée au module avec une colle silicone si nécessaire. Cependant, si la boîte de jonction présente des traces de brûlures, il est nécessaire de remplacer le module. L'étanchéité des boîtes de jonction doit être maintenue et vérifiée.

Les connecteurs constituant un point critique du risque incendie, une vérification régulière est recommandée. La présence de corrosion, brûlure ou fonte doit entraîner le remplacement du connecteur si la longueur de câble restante le permet ou du module.

La mise à la terre de l'ensemble des modules, sa continuité et l'absence de corrosion aux jonctions doit aussi être inspectée régulièrement. Le cas échéant, des actions correctives pour raccorder ou remplacer la terre doivent être entreprises.



Figure 11 : Connecteurs présentant une corrosion externe

D'une manière générale, de nombreux défauts sur les modules peuvent être observés en analysant les données de performances de la centrale, notamment côté DC. Comme évoqué dans la partie « **Exploitation : Données et performances** », un bilan de performance doit être conduit tous les ans.

En cas de suspicion d'une sous-performance des modules, les analyses de terrain (mesures I-V, thermographie, inspection visuelle) peuvent permettre de confirmer la présence de défauts. Avant le remplacement du module, il convient de vérifier avec le fournisseur et le fabricant le processus de garantie.

11 CABLES DC ET AC

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Câbles			
Câble pincé, pendant sujet au frottement, attache proche de la rupture	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Remplacer les attaches par des attaches durables sans tension mécanique sur le câble ou câble pendant
Dégradation à cause du frottement / rongeur	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Si la protection n'est pas entamée, protéger les points de frottement, dératiser le site
Dégradation de l'isolant, usure, déformation, câble brûlé	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Remplacer le câble. Si l'âme est visible, il est interdit d'ajouter un scotch pour la protéger.
Câble soumis aux UV	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Ajout d'un fourreau résistant aux UV ouvert vers le bas autour du câble
Corrosion ou interruption de la terre et des conducteurs	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Vérification des connecteurs, câbles et de la terre. Ils doivent présenter ni déformation, fonte, corrosion ou autres dégâts avant d'être reconnectés. Sinon le câble doit être remplacé par un câble de longueur et section identique.
Fourreaux			
Infiltration d'animaux ou d'eau dans les fourreaux	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Remplacement du fourreau et ajout d'une mousse minéral aux ouvertures
Fourreaux dégradés par UV ou frottement	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Sur petite section, protection corrective via adhésif toléré, sur grande partie, remplacer le fourreau
Marquage			

Absence de marquage ou marquage dégradé	Inspection visuelle	Exploitation plus difficile et erreurs de manipulations	Les étiquettes et marquages doivent durer dans le temps et être remplacés si nécessaire.
---	---------------------	---	--

Tableau 6: Recommandations concernant les câbles DC et AC

Les câbles AC et DC sont sujets à l'usure, en particulier à cause de l'échauffement, des UV et des stress mécaniques. Dès lors, une inspection visuelle régulière est nécessaire. Elle peut être combinée avec une inspection thermographique et des mesures électriques. Les câbles doivent toujours être remplacés par un câble de longueur et section identique, notamment pour maintenir un niveau de chute de tension tel que planifié lors de l'exécution. Ce point est notamment critique pour maintenir une répartition des puissances et charges égales sur les batteries plomb en parallèle.

Les câbles doivent être maintenus dans une position sans stress mécanique et sans mouvement de frottement possible. Les attaches pouvant se dégrader avec le temps, il peut être nécessaire de les remplacer en évitant les colliers en plastique.

La gaine ou l'isolant des câbles ne doit pas présenter d'usure, de pincement ou de dégradation et les conducteurs ne doivent pas être visibles. Le cas échéant les câbles doivent être remplacés et la source de la dégradation corrigée (bout de gomme sur les arêtes tranchantes, absence de mouvement pendulaire, protection contre les rongeurs).

Les protections partielles sur des parties de câbles sont à proscrire, comme l'ajout d'un scotch sur l'isolant. Aucun des câbles ou embouts ne doit présenter de corrosion. Il est recommandé de remplacer l'ensemble d'un câble présentant de la corrosion. Les câbles endommagés présentent des risques électriques et incendies importants.



Figure 12 : Exemple d'attache en plastique et de mousse à remplacer

Le câble de mise à la terre des structures photovoltaïques (liaison équipotentielle) doit toujours être continu et ne pas présenter de fonte, déformation ou corrosion de bout en bout. En particulier, les points de connexions ne doivent pas présenter de corrosion ou de jeu pouvant rendre la terre inopérante.



Figure 13 : Exemple de dégradation avancée de câble DC à l'ombre

Les câbles doivent être en permanence protégés des UV. Si tel n'est pas le cas, un fourreau noir résistant aux UV percé vers les bas pour laisser l'eau s'écouler peut-être ajouté sur les câbles. Les fourreaux doivent en permanence maintenir leur fonction, et éviter l'exposition des câbles UV et la stagnation d'eau. Les fourreaux enterrés ou sans évacuation d'eau doivent être bouchés des deux côtés avec une mousse minérale pour éviter l'intrusion de rongeur ou d'eau.

Des ajouts ou protections ponctuelles sur les fourreaux sont tolérés du moment qu'elles garantissent le même niveau de protection du câble à l'intérieur. Le remplacement d'un fourreau enterré peut s'avérer délicat, car il est nécessaire de rouvrir la tranchée, il est dès lors important de la maintenir dans un bon état sur toute la durée d'exploitation.



Figure 14 : Exemples de câbles exposés aux UV

Enfin, **le marquage et les étiquettes des câbles doivent rester lisibles** durant l'ensemble de la durée de vie de la centrale. En cas de dégradation avancée, une opération de remplacement doit être effectuée.



Figure 15 : Exemple d'étiquettes à remplacer, l'inscription a disparu

12 APPAREILLAGES, BOITES DE JONCTION ET PROTECTIONS

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Fixation et connexions			
Corrosion ou instabilité du support	Inspection visuelle	Arrachement du matériel	Assurer la fixation stable dans le temps de l'onduleur. Remplacer les pièces soumises à la corrosion avant propagation.
Corrosion ou interruption du câble de terre et des connecteurs	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Vérification des connecteurs, des câbles et du câble de terre. Ils ne doivent présenter ni déformation, fonte, corrosion ou autres dégâts avant d'être reconnectés. Sinon le câble doit être remplacé par un câble de qualité, longueur et section identiques.
Interne boîtier			
Infiltration ou animaux dans les appareils	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Etanchéifier les ouvertures, ajouts de presse-étoupe ou connecteurs DC en conformité avec les normes d'installation.
Présence de poussière	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Nettoyage régulier de l'appareil, notamment des ventilateurs, selon les prescriptions du fournisseur.

Corrosion des conducteurs	Inspection visuelle	Perte de performance Risque électrique Risque incendie	Remplacer les pièces soumises à la corrosion avant propagation.
Trace de brûlure ou fonte, décoloration d'arc sur les bornes	Inspection visuelle Thermographie	Risque incendie	Inspecter l'extérieur et l'intérieur de l'appareil pour identifier la source. Remplacer la pièce ou l'onduleur si nécessaire
Protection (fusible/disjoncteur/parafoudre) hors service	Inspection visuelle	Indisponibilité Risque électrique Risque incendie	Remplacer la protection après s'être assuré que les autres composants n'ont pas été endommagés (surchauffe, corrosion) et que le problème ayant causé le déclenchement est résolu (court-circuit)
Protection (fusible/disjoncteur) régulièrement déclenchée lors des périodes de forte production	Inspection visuelle	Indisponibilité Risque électrique Risque incendie	Vérifier le dimensionnement de la protection, la remplacer par une protection adaptée si elle est sous-dimensionnée
Déconnexion / délestage intempestif	Analyse de performance Test électrique Thermographie	Indisponibilité Risque électrique Risque incendie	Vérifier le dimensionnement du système (côté PV + Batterie + Charge)

			Vérifier les températures et systèmes associés, vérifier la présence de court-circuit, défaut d'isolement ou boucle d'induction. Prendre contact avec le fabricant si nécessaire.
Absence de marquage ou marquage dégradé	Inspection visuelle	Exploitation plus difficile et erreurs de manipulations	Les étiquettes et marquages doivent durer dans le temps et être remplacés si nécessaire.

Tableau 7: Recommandations concernant des appareillages, boîtes de jonction et protections

L'ensemble des appareillages, boîte de jonction, coffret et protection doit être maintenu de manière stable sur l'ensemble de la durée de vie. Le support ne doit pas présenter de corrosion ou de déformation pouvant induire à la chute de l'appareil ou ajouter un stress mécanique. Les pièces soumises à la corrosion doivent être traitées ou remplacées. La connexion à la terre de la carcasse et du support doit aussi être vérifiée et être continue.

L'étanchéité des boîtiers et coffrets doit être maintenue. L'intérieur des boîtiers ne doit pas contenir d'animaux, des traces de corrosion, d'humidité ou de poussière. Le cas échéant, l'étanchéité du boîtier doit être corrigée, par exemple au niveau des presse-étoupes. La présence d'insectes doit être éliminée au plus vite.

En fonction du niveau d'étanchéité du boîtier, la poussière peut quand même pénétrer à l'intérieur. Un dépoussiérage régulier peut être nécessaire, car la poussière peut provoquer un risque de court-circuit.

Même au sein d'un boîtier étanche, la corrosion peut s'avérer problématique, surtout à proximité de la côte. Les composants doivent être remplacés au fur et à mesure pour éviter une propagation rapide et d'éventuels courts-circuits.



Figure 16 : Coffret avec présence d'animaux

La présence de brûlure ou de composants fondus indique un échauffement par surcharge ou un court-circuit. Le boîtier doit alors être mis hors tension et inspecté minutieusement, car il peut présenter un fort risque incendie. Si l'échauffement est limité à un composant, on peut simplement remplacer l'élément, mais les autres composants voisins doivent être vérifiés. La source du problème doit être identifiée et surveillée pour éviter d'autres incidents. La thermographie et l'analyse des performances peuvent permettre de mieux comprendre les causes du problème.

L'ensemble des pièces de protection électrique (disjoncteur, fusible, parafoudre, sectionneur) doivent être fonctionnelles. En cas d'incident électrique (surtension, surintensité) les protections peuvent se déclencher de manière normale. Avant de les réenclencher, il est nécessaire de s'assurer que le problème a bien été éliminé et ne présente plus de risque. Il est aussi recommandé de vérifier que les autres protections à proximité n'ont pas été endommagées par l'incident et restent fonctionnelles.

Le déclenchement d'un fusible ou d'un parafoudre nécessite forcément le remplacement du composant par un électricien de l'entreprise de maintenance équipé de ses EPI. Pour différentes raisons, les protections peuvent se déclencher de manière intempestive. Une évaluation approfondie du problème par une personne expérimentée est souvent nécessaire.

Le dimensionnement du système doit être vérifié (au niveau PV, batterie et consommateurs), notamment en prenant en compte les températures réelles d'opérations. Suivant le composant, cela peut aussi indiquer la présence d'un court-circuit mineur, d'un défaut d'isolement ou d'une boucle d'induction. Le matériel peut aussi simplement être défectueux. Un contact avec le fournisseur et fabricant peut s'avérer nécessaire.

Enfin, **le marquage et les étiquettes des câbles** doivent rester lisibles et visibles durant l'ensemble de la durée de vie de la centrale. En cas de dégradation avancée, une opération de remplacement doit être effectuée.

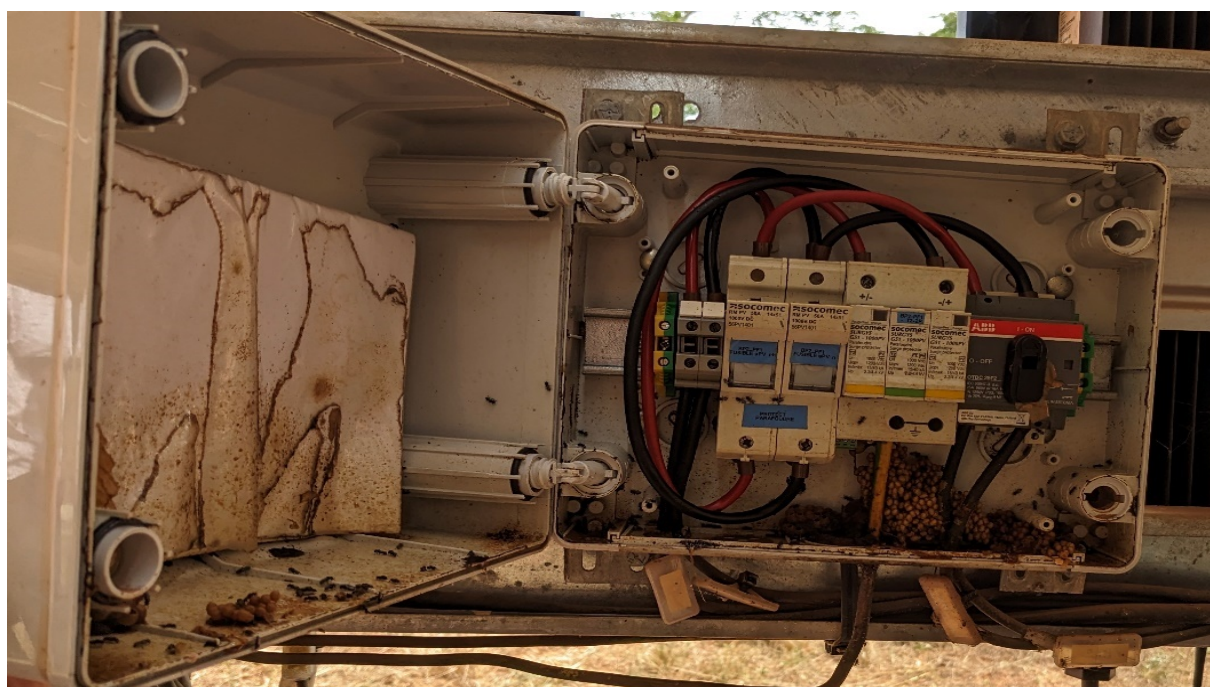


Figure 17 : Exemple de boîte de jonction sans presse-étoupe avec présence d'insectes

13 ONDULEURS

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Fixation et connexions			
Corrosion ou instabilité du support	Inspection visuelle	Arrachement du matériel	Assurer la fixation stable dans le temps de l'onduleur. Remplacer les pièces soumises à la corrosion avant propagation.
Corrosion ou interruption de la terre et des connecteurs	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Vérification des connecteurs, câbles et câble de terre. Ils ne doivent présenter ni déformation, ni fonte, ni corrosion ou autres dégâts avant d'être reconnectés. Sinon le câble doit être remplacé par un câble de qualité, longueur et section identiques.
Infiltration ou animaux dans les appareils	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Etanchéifier les ouvertures, ajouts de presse-étoupe ou connecteurs DC en conformité avec les normes d'installation.
Protection (fusible/disjoncteur/parafoudre) hors service	Inspection visuelle	Indisponibilité Risque électrique Risque incendie	Remplacer la protection après s'être assuré que les autres composants n'ont pas été endommagés (surchauffe, corrosion) et que le problème ayant causé le déclenchement est résolu (court-circuit).
Présence de poussière sur l'onduleur	Inspection visuelle	Risque incendie	Nettoyage régulier de l'onduleur, notamment des ventilateurs, selon les prescriptions du fournisseur.

Trace de brûlure ou fonte	Inspection visuelle Thermographie	Risque incendie	Inspecter l'extérieur et l'intérieur de l'onduleur pour identifier la source. Remplacer la pièce ou l'onduleur si nécessaire.
Déconnexion / délestage intempestif	Analyse de performance Test électrique	Indisponibilité Risque électrique Risque incendie	Vérifier le dimensionnement du système (côté PV + Batterie + Charge), vérifier les températures et systèmes associés, vérifier les consignes de fonctionnement électriques de l'onduleur, vérifier l'absence de court-circuit. Prendre contact avec le fabricant si nécessaire.
Mise en sécurité intempestive de la protection de découplage intégrée à l'onduleur	Analyse des configurations	Indisponibilité	Modifier le paramétrage de l'onduleur pour fonctionner au mieux avec les conditions du réseau (plages de tension et fréquence) Demande de contrôle des perturbations harmoniques sur le réseau local auprès du gestionnaire du réseau de distribution
Absence de marquage ou marquage dégradé	Inspection visuelle	Exploitation plus difficile et erreurs de manipulations	Les étiquettes et marquages doivent durer dans le temps, être visibles et être remplacés si nécessaire.

Tableau 8: Recommandations concernant les onduleurs

Les onduleurs doivent être maintenus de manière stable sur l'ensemble de la durée de vie. Le support ne doit pas présenter de corrosion ou de déformation pouvant induire à la chute de l'appareil ou ajouter un stress mécanique. Les pièces soumises à la corrosion doivent être traitées ou remplacées. La connexion à la terre de la carcasse et du support doit aussi être vérifiée et continue.

L'étanchéité doit être maintenue. L'intérieur des boîtiers ne doit pas présenter d'animaux, de corrosion, d'humidité ou de poussière. Même au sein d'un boîtier étanche, la corrosion peut s'avérer problématique, surtout à proximité de la côte. Les composants doivent être remplacés au fur et à mesure pour éviter une propagation rapide de la corrosion et des éventuels courts-circuits.

En fonction du niveau d'étanchéité du boîtier, la poussière peut quand même pénétrer à l'intérieur. Un dépoussiérage régulier peut être nécessaire, car la poussière peut provoquer un risque de court-circuit et donc un départ d'incendie. Les ventilateurs et la surface externe de l'onduleur doivent être dépoussiérés régulièrement pour que la dissipation thermique soit efficace.



Figure 18 : Exemples d'onduleurs à dépoussiérer et nettoyer

La présence de brûlure ou de composants fondus indique un échauffement ou un court-circuit. L'onduleur doit alors être mis hors tension et inspecté minutieusement, car il peut présenter un fort risque d'incendie. Si l'échauffement est limité à un composant, il est possible de simplement remplacer l'élément, mais les autres composants voisins doivent être vérifiés. La source du problème doit être identifiée et surveillée pour éviter d'autres incidents.

La thermographie avec caméra infrarouge et l'analyse des performances peuvent permettre de mieux comprendre les causes du problème.

L'ensemble des dispositifs de protection électrique (disjoncteur, fusible, parafoudre, sectionneur) doivent être fonctionnels. En cas d'incident électrique (surtension, surintensité) les protections peuvent se déclencher de manière normale. Avant de les réenclencher, il est nécessaire de s'assurer que le problème a bien été éliminé et ne présente plus de risque.

Il est aussi recommandé de vérifier que les autres protections à proximité n'ont pas été endommagées par l'incident et restent fonctionnelles. Pour différentes raisons, les protections peuvent se déclencher de manière intempestive.

Une évaluation approfondie du problème par une personne expérimentée est souvent nécessaire. Le dimensionnement du système doit être vérifié (au niveau PV, batterie et consommateurs), notamment en prenant en compte les températures réelles d'opérations qui ont une forte influence sur les caractéristiques des matériels électriques. Suivant le composant, cela peut aussi indiquer la présence d'un court-circuit mineur, d'un défaut d'isolement ou d'une boucle d'induction. Le matériel peut aussi simplement être défectueux. Un contact avec le fournisseur et le fabricant peut s'avérer nécessaire. Un mauvais dimensionnement des onduleurs offgrid vis-à-vis des courants d'appels peut aussi provoquer la déconnexion du système. Un système permettant d'échelonner les appels des consommateurs peut être mis en place pour corriger ce point.

Si l'onduleur se met en sécurité de façon intempestive au niveau de la protection de découplage intégrée à l'onduleur, le problème peut venir de la qualité de l'électricité issue du réseau (plage de tension, plage de fréquence). Une première solution peut être apportée en modifiant le paramétrage de l'onduleur en lui permettant d'accepter des valeurs de tension et fréquence d'alimentation côté AC un peu plus éloignées des valeurs standards.

En 2ème recours il est nécessaire de consulter le gestionnaire du réseau de distribution d'électricité en lui demandant de réaliser un contrôle des perturbations harmoniques sur le réseau local.

Enfin, le marquage et les étiquettes des câbles doivent rester lisibles et visibles durant l'ensemble de la durée de vie de la centrale. En cas de dégradation avancée, une opération de remplacement doit être effectuée.

14 BATTERIES

A travers ce guide, seule l'opération des batteries plombs et lithium-ion est évoquée. Les autres chimies devraient pour l'instant n'avoir qu'une place anecdotique ou expérimentale en Côte d'Ivoire. Les réglementations électriques et incendies peuvent évoluer rapidement, car les batteries sont encore un sujet relativement récent. L'installateur doit nécessairement vérifier l'évolution des meilleures pratiques et du cadre réglementaire régulièrement.

Attention, les problèmes suivants doivent conduire à une mise à l'arrêt et une sécurisation immédiate des personnes et des batteries :

- **Local batterie plomb non ventilé : l'accumulation d'hydrogène présente un risque immédiat.**
- **Cellule de batterie endommagée.**
- **Fuite d'électrolyte.**
- **Emballlement thermique d'une batterie et départ de feu.**

14.1 Local technique

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Local sain, ventilé et climatisé			
Ventilation obstruée	Inspection visuelle	Perte de performance Risque incendie	Nettoyage régulier des ventilations
Présence d'eau ou de fuite	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Réfection de l'étanchéité
Température du local anormale / dysfonctionnement de la climatisation	Inspection visuelle ou analyse des données	Perte de performance Risque incendie	Intervention de spécialiste en système de climatisation
Protection incendie			
Détecteur fumé hors service	Inspection visuelle et test de fonctionnement	Risque incendie	Changement des piles ou du détecteur

Extincteur non fonctionnel	Inspection visuelle et test de fonctionnement	Risque incendie	Le système de protection et d'extinction incendie doit être contrôlé régulièrement par un expert qualifié
Dysfonctionnement du système d'extinction	Inspection visuelle et test de fonctionnement	Risque incendie	Le système de protection et d'extinction incendie doit être contrôlé régulièrement par un expert qualifié

Tableau 9: Recommandations concernant le local technique

Le local technique doit maintenir en permanence la protection contre les éléments externes des éléments protégés en son sein. La température, l'humidité et la propreté doivent être contrôlées et maintenues en continu.

Un défaut d'étanchéité du local entraînant la présence d'eau dans le local doit être résolu dans les plus brefs délais au risque que des éléments électriques soient mis en court-circuit (en particulier pour les éléments avec un indice de protection inférieur à IPX4) ou en immersion.

Par exemple, cela pourrait endommager de manière irréversible la batterie et créer un incendie.

De même la ventilation doit toujours être fonctionnelle et obtenir le niveau de ventilation spécifié. Ce point est critique pour la sécurité des personnes, en particulier pour les batteries plombs pouvant émettre de l'hydrogène très facilement explosif. La ventilation contribue aussi à la régulation thermique du local, et donc aux performances et garanties de l'ensemble des équipements s'y trouvant. Un nettoyage régulier de la ventilation est clef pour un système fonctionnel et performant.



Figure 19 : Exemple de grille de ventilation à nettoyer

Une température anormale, en dehors des valeurs contractuelles spécifiées dans le cahier des charges de l'installateur, doit être corrigée au plus vite. Elle est souvent liée à un dysfonctionnement du système de climatisation. Les systèmes de climatisation étant complexes, il peut être nécessaire de faire intervenir un spécialiste. La température de consigne, la présence de fuite ou l'obstruction du système de climatisation peuvent être vérifiées facilement par du personnel lors des inspections visuelles. De manière similaire, le dysfonctionnement de la climatisation influence les performances du système et à terme sa sécurité.

Le système de détection, prévention et d'extinction incendie doit être vérifié régulièrement selon les spécifications du fabricant et maintenu opérationnel en tout temps. Des tests réguliers sont souvent nécessaires. Par exemple, le détecteur de fumée doit être testé via son bouton de test et les piles doivent être remplacées si nécessaire. Les extincteurs nécessitent un contrôle régulier par un expert qualifié, de même que les systèmes d'extinction plus complexes.

14.2 Lithium-ion

Les batteries Lithium-ion requièrent peu de maintenance et présentent normalement peu de problèmes. Cependant, en cas de défaut un court-circuit peut être engendré qui peut créer un incendie difficile à arrêter du fait de la forte masse thermique de ce type de batterie.

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Fixation et connexions			
Racks instables, rouillés ou endommagés	Inspection visuelle	Affaissement de la batterie	Vérification des fixations ou remplacement des racks.
Protection (fusible/disjoncteur/parafoudre) hors service	Inspection visuelle	Indisponibilité Risque incendie Risque électrique	Remplacer la protection après s'être assuré que les autres composants n'ont pas été endommagés (surchauffe, corrosion) et que le problème ayant causé le déclenchement est résolu (court-circuit).
Connecteurs ou mise à la terre déconnectés ou endommagés	Inspection visuelle	Risque incendie Risque électrique	Vérification des connecteurs, câbles et du câble de terre.

			Ils ne doivent présenter ni déformation, ni fonte, ni corrosion ou autres dégâts avant d'être reconnectés. Sinon le câble doit être remplacé par un câble de qualité, longueur et section identiques.
Modules de batteries			
Module de batterie endommagé ou anormalement chaud	Inspection visuelle	Perte de performance Risque incendie Risque électrique	Retrait de la batterie immédiat et recyclage. Attention les batteries en série doivent être de même marque, modèle et âge. Il est impossible de changer un seul module dans une série. En parallèle, les batteries doivent avoir la même tension et le même nombre de modules en série.
Poussières sur les batteries	Inspection visuelle	Risque incendie	Essuyer l'extérieur des batteries avec un chiffon légèrement humide (eau) et séchage avec un chiffon propre.
Problème de fonctionnement des ventilateurs	Inspection visuelle ou alarmes	Indisponibilité Risque incendie	Dépoussiérage régulier du ventilateur et des dissipateurs thermiques des batteries.

Tableau 10: Recommandations concernant le Lithium-ion

La stabilité des batteries doit être contrôlée durant toute la durée de vie des installations, notamment au niveau des racks. Ces derniers ne doivent pas présenter de rouille, déformation ou altération. La rouille légère peut éventuellement être traitée localement, mais le rack doit être remplacé si sa stabilité et pérennité n'est pas garantie.

La connexion électrique DC et la mise à la terre doivent être continues et opérationnelles. Les câbles ne doivent pas présenter de corrosion, de signe d'échauffement ou de dégât sur l'isolant.

Un **câble endommagé** doit être remplacé par un câble de qualité, section et longueur identiques. Les défauts peuvent présenter un risque électrique et un risque incendie immédiat et doivent être traités avec la plus grande précaution. En particulier, les mises à la terre des carcasses et éléments métalliques ne doivent pas présenter de corrosion ou de rouille.



Figure 20 : Batterie à nettoyer et terre à rendre continue

Les protections électriques comme les fusibles, disjoncteurs et les parafoudres doivent être contrôlés régulièrement, notamment à la suite d'incident. Les boîtiers doivent être ouverts et nettoyés hors tension. Avant tout remplacement d'une protection, il faut s'assurer que l'aval et l'amont du circuit ainsi que les composants à proximité ne sont pas endommagés (brûlure, échauffement).

Les modules de batteries doivent aussi être inspectés visuellement régulièrement. La présence d'un module présentant une fuite d'électrolyte, une déformation ou un échauffement anormal doit conduire à sa mise hors service immédiate, car elle peut entraîner un risque d'incendie immédiat. Si possible, le module ou rack problématique doit être séparé des autres batteries et éléments combustibles.

Son remplacement et les éventuelles mesures correctives doivent être vérifiés avec le fournisseur du système, mais il est en général nécessaire de remplacer l'ensemble du rack pour garantir que l'ensemble des modules en série présentent la même usure.

La poussière se déposant sur les modules ou au niveau du ventilateur de la batterie doit être régulièrement nettoyée en suivant les instructions du fabricant (Chiffon antistatique, pas de produit chimique ou brosse dure).

Elle peut éventuellement créer des courts-circuits entre des conducteurs ou bloquer le fonctionnement correct du ventilateur. In fine, les performances peuvent se dégrader et la batterie pourrait surchauffer jusqu'à présenter un risque incendie.



Figure 21 : Exemple de rack de batterie

14.3 Plomb

La maintenance des batteries plomb doit se faire avec les EPI indiqués par le fabricant : gants de protection chimique, lunettes chimiques, chaussures de protection, tablier anti-acide. Un rince œil doit être à disposition à proximité immédiate.

Toutes les interventions actives doivent s'effectuer une fois le sectionneur DC ouvert. Il est possible d'utiliser du bicarbonate de soude pour neutraliser l'acide en cas de problème.

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Electrolyte			
Niveau d'électrolyte faible	Inspection visuelle	Indisponibilité Risque incendie	Ajout d'eau distillée après la charge en suivant le processus du manuel (opérateur habilité avec EPI et outils adaptés).
Densité d'électrolyte non uniforme	Mesure spéciale	Indisponibilité Risque incendie	Retrait de la batterie si possible (et recyclage). Attention les batteries en série doivent être de même marque, modèle et âge. Il est impossible de changer un seul module dans une série. En parallèle, les batteries doivent avoir la même tension et le même nombre de modules en série.
Présence d'électrolyte au sol / fuite	Inspection visuelle	Risque chimique Risque incendie	Vérification et remplacement des batteries, ou formation des opérateurs en cas d'erreur de manipulation.
Bouchon desserré	Inspection visuelle	Risque chimique Risque incendie	Serrage des bouchons selon prescription du fabricant.
Fixation et connexions			
Racks instables, rouillés ou endommagés	Inspection visuelle	Affaissement de la batterie Risque chimique	Vérification des fixations ou remplacement des racks.

Connecteurs desserrés ou non graissés	Inspection visuelle	Risque électrique Risque incendie	Couple de serrage vérifié avec une clef dynamométrique et connecteurs graissés. Selon les modèles, du bicarbonate de soude peut être utilisé pour neutraliser la corrosion acide.
Protection (fusible/disjoncteur/parafoudre) hors service	Inspection visuelle	Indisponibilité Risque incendie Risque électrique	Remplacer la protection après s'être assuré que les autres composants n'ont pas été endommagés (surchauffe, corrosion) et que le problème ayant causé le déclenchement est résolu (court-circuit).
Modules de batteries			
Module de batterie endommagé ou anormalement chaud	Inspection visuelle	Perte de performance Risque incendie Risque électrique	Retrait de la batterie immédiat de la batterie et recyclage. Attention les batteries en série doivent être de même marque, modèle et âge. Il est impossible de changer un seul module dans une série. En parallèle, les batteries doivent avoir la même tension et le même nombre de modules en série.
Poussière sur les batteries	Inspection visuelle	Risque incendie	Essuyer l'extérieur des batteries avec un chiffon en coton légèrement humide (eau) en évitant toutes les charges électrostatiques.
Batterie plomb ouverte non égalisée	Analyse des données Mesures électriques	Perte de performance Risque incendie	Charge d'égalisation via l'onduleur selon spécification de la batterie.
Différence de tension entre les cellules	Mesures électriques	Perte de performance Risque électrique	Confirmer via le manuel ou avec le fournisseur les valeurs limites et remplacer les batteries le cas échéant.

Tableau 11: Recommandations concernant le Plomb

Avant toute manipulation, l'opérateur doit utiliser des gants chimiques, des lunettes chimiques, chaussures de protection, et un tablier anti-acide, et disposer d'un rince-œil à proximité. Il doit être sensibilisé aux risques statiques notamment en portant une tenue appropriée. Enfin, un densimètre, un thermomètre et rince-œil (risque chimique) doivent être mis à disposition dans le local batterie.

Le niveau d'électrolyte pour les batteries OPzS (batterie plomb à électrolyte liquide) est un élément critique. Il doit être contrôlé régulièrement pour assurer un niveau ni trop haut ni trop bas de l'électrolyte.

Si le niveau faiblit trop, de l'eau distillée peut être ajoutée en accord avec les spécifications du manuel de la batterie. Le remplissage de l'électrolyte doit se faire par une personne formée en suivant scrupuleusement le manuel d'installation.

La densité de l'électrolyte doit aussi être vérifiée régulièrement et le niveau doit être uniforme entre les batteries. Une batterie gardant un niveau de densité hors des seuils acceptés par le fabricant présente un risque de sécurité et doit être retirée et disposée selon les règles du manuel.

La présence d'électrolyte au sol peut indiquer une fuite de la batterie. Une inspection minutieuse autour de la fuite doit avoir lieu pour en trouver la cause. Cette présence pourrait aussi être expliquée par une erreur de manipulation. Dans ce cas, le personnel doit être sensibilisé pour comprendre le problème et le limiter au maximum.

Enfin, après toute manipulation, le bouchon de l'électrolyte doit être vérifié et bien fermé.

L'ensemble des problèmes sur l'électrolyte amène **des risques chimiques et incendies importants** et doit toujours être pris au sérieux.

La stabilité des batteries doit être contrôlée durant toute la durée de vie des installations, notamment au niveau des racks. Ces derniers ne doivent pas présenter de rouille, déformation ou altération. La rouille légère peut éventuellement être traitée localement, mais le rack doit être remplacé si sa stabilité et pérennité n'est pas garantie.

La connexion électrique DC et la mise à la terre doivent être continues et opérationnelles. Les câbles ne doivent pas présenter de corrosion, de signe d'échauffement ou de dégât sur l'isolant. Les câbles endommagés doivent être remplacés par un câble de qualité, section et longueur identiques. Les défauts peuvent présenter un risque électrique et un risque incendie immédiat et doivent être traités avec la plus grande précaution. En particulier, les mises à la terre des carcasses et éléments métalliques ne doivent pas présenter de corrosion ou rouille.

Le couple de serrage doit être vérifié avec une clef dynamométrique et les connecteurs doivent être graissés pour limiter la corrosion.

Les protections électriques comme les fusibles, disjoncteurs et les parafoudres doivent être contrôlées régulièrement, notamment à la suite d'incident. Les boîtiers doivent être ouverts et nettoyés hors tension. Avant tout remplacement d'une protection, il faut s'assurer que l'aval et l'amont du circuit ainsi que les composants à proximité ne sont pas endommagés (brûlure, échauffement).

Les modules de batteries doivent aussi être inspectés visuellement régulièrement. La présence d'un module présentant une fuite d'électrolyte, une déformation ou un échauffement anormal doit conduire à sa mise hors service immédiate, car elle peut révéler un risque d'incendie immédiat. Si possible, le module ou rack problématique doit être séparé des autres batteries et éléments combustibles.

Son remplacement et les éventuelles mesures correctives doivent être vérifiés avec le fournisseur du système, mais il est en général nécessaire de remplacer l'ensemble du rack pour garantir que l'ensemble des modules en série présentent la même usure.

La poussière se déposant sur les modules doit être régulièrement nettoyée en suivant les instructions du fabricant (Chiffon antistatique, pas de produit chimique ou brosse dure). La poussière peut éventuellement créer des courts-circuits entre des conducteurs ou bloquer le fonctionnement correct du ventilateur. In fine, les performances peuvent se dégrader et la batterie pourrait surchauffer jusqu'à présenter un risque incendie.



Figure 22 : Exemple de connecteurs trop serrés ayant endommagé l'enveloppe du module de batterie.

Suivant les modèles, il est nécessaire d'égaliser la charge des batteries régulièrement. Attention, cela n'est pas le cas de toutes les batteries et une vérification au cas par cas est nécessaire. Cette charge doit être interdite dans l'onduleur si elle n'est pas demandée par le fabricant de la batterie. Une batterie déséquilibrée peut présenter des différences de tension entre les cellules, et ainsi réduire les performances de la batterie.

A terme, cela peut conduire au fonctionnement de cellules en dehors des tensions admissibles et donc présenter un risque incendie. C'est aussi pour cela que la tension de chaque module de batterie doit être vérifiée individuellement de manière annuelle. Si une cellule présente une tension anormale malgré une charge d'égalisation, il est nécessaire de prendre contact avec le fabricant pour vérifier les solutions.

15 STATION METEO

Problèmes	Détections	Risques	Solutions
Encrassement du pyranomètre	Inspection visuelle	Données erronées	Nettoyage régulier du pyranomètre
Capteurs mal placés / détachés	Inspection visuelle	Données erronées	Fixation propre des capteurs selon le manuel d'installation
Valeurs erronées	Analyse des données	-	Contrôle du système (fixation, propreté) et recalibrer (tous les 1 à 5 ans)

Tableau 12: Recommandations concernant la Station météo

La station météo nécessite un entretien régulier pour être fonctionnelle et transmettre des données représentatives. Les pyranomètres doivent être nettoyés régulièrement. L'ensemble des capteurs doit rester attaché correctement et aligné selon les instructions de l'étude d'exécution ou du manuel. Suivant la précision de la mesure désirée, un recalibrage doit avoir lieu entre une fois par an à une fois tous les 5 ans.



Figure 23 : Pyranomètre nécessitant un nettoyage et recalibrage

16 SYSTEME DE MONITORING

Les conseils pour les systèmes de monitoring étant spécifiques à chaque système, il est difficile de généraliser les problèmes et les solutions.

Les problèmes avec la communication et la transmission des données sont cependant récurrents. Les interférences avec les câbles de communications sont souvent en cause. Le blindage de ces câbles et la bonne mise à la terre sans création de boucles sont à vérifier.

La perte d'accès de la connexion internet peut aussi être un problème pour les systèmes 4G. L'ajout d'une antenne avec une bonne orientation et une portée suffisante peut aider à limiter ce problème.

17 ANNEXES

17.1 Cadre légal et réglementaire

- **Loi n°2014-132** : Code de l'électricité
Impliquant le respect **de la norme NF C 15-100**, par extension rendant applicable les normes **UTE C 15-712-1, UTE C 15-712-2, et XP C 15-712-3**.
- **Décret n°2016-782** : Conventions de concession pour la production, le transport, et le dispatching de l'électricité.
- **Décret n°2016-783** : Réglementation sur la vente de l'énergie électrique par les producteurs indépendants.
- **Décret n°2016-786** : Définition des tarifs de vente.
- **Décret n°2016-787** : Réglementation de la production sur mini-réseaux et systèmes autonomes.
- **Décret n°2016-1152** : Liste des normes applicables :
- Impliquant entre autres l'obligation du respect des normes **CEI 61730-x et IEC 61427-1 : 2013**.
- **Arrêté n°074 MPEER/CAB/DGE** : Code de raccordement au réseau électrique.
- **Arrêté n°103 MPEER/CAB/DGE** : Typologie des micro-réseaux.
- **Arrêté n°105 MPEER/CAB/DGE** : Seuils de puissance pour l'autoproduction et conditions d'autorisation.
- **Arrêté n°326 MMPE/DGE** : Commission pour l'examen des demandes d'autorisation et d'agrément.
- **Arrêté n°327 MMPE/DGE** : Seuils de puissance et conditions d'autoproduction.
- **Arrêté n°328 MMPE/DGE** : Modalités d'agrément des opérateurs.
- **Arrêté n°329 MMPE/DGE** : Conditions d'achat et clients autorisés.
- **Arrêté n°532 MMPE/MFB/MINEDDTE** : Liste des équipements et matériels exonérés sur la TVA, droits de douane et opérations bancaires.
- **Arrêté 134 MPEER/MCLU** : Mesures EE dans le bâtiment et évaluation de conformité.
- **Arrêté 156 MMPE/MCLU/MT/MINEDDTE/MCI** : Audit énergétique obligatoire.
- **Circulaire 1956/SEPMBPE/DGD** : Programme de vérification de conformité aux normes des marchandises à destination de **CDI**.
- **DIRECTIVE N°02/2022/CM/UEMOA** relative à la promotion et au développement des énergies renouvelables dans les états membres de l'**UEMOA**.

17.2 Références et bibliographie

Normes utiles pour les opérateurs :

- **ECOSTAND 109 : 2022** Lignes directrices pour l'installation des mini-réseaux solaires.
- **ECOSTAND 110 : 2022** Norme de prescriptions techniques minimales d'installations des mini-réseaux solaires photovoltaïques.
- **ECOSTAND 111 : 2022** Norme d'exigence techniques minimales d'inspection d'une installation du mini-réseau solaire photovoltaïque.
- **ECOSTAND 112 : 2022** Norme minimale de performance énergétique pour les onduleurs de mini-réseau.
- **UTE C 15 712-1** – Installations photovoltaïques sans stockage et raccordées au réseau public de distribution.
- **UTE C 15 712-2** – Installations photovoltaïques avec stockage d'énergie.
- **XP C 15 712-3** – Règles d'installation des systèmes photovoltaïques en autoconsommation.
- **IEC 62446-1 : 2016** – Systèmes photovoltaïques (PV) – Exigences pour les essais, la documentation et la maintenance – Partie 1 : Installations raccordées au réseau.
- **IEC 62446-2 : 2020** – Systèmes photovoltaïques (PV) – Exigences pour les essais, la documentation et la maintenance – Partie 2 : Installations hors réseau.
- **IEC 62485-2** Exigences de sécurité pour les batteries d'accumulateurs et les installations de batteries - Partie 2 : Batteries stationnaires.
- **IEC 62485-4** Exigences de sécurité pour les batteries d'accumulateurs et les installations de batteries - Partie 4 : Batteries au plomb à soupapes pour appareils portables.
- **IEC 62485-5 : 2020** Exigences de sécurité pour les batteries d'accumulateurs et les installations de batteries - Partie 5 : Fonctionnement en toute sécurité des batteries ions-lithium stationnaires.
- **NF EN 61427-1** : Accumulateurs pour le stockage de l'énergie renouvelable - Exigences générales et méthodes d'essais - Partie 1 : applications photovoltaïques hors réseaux.
- **NF EN 61427-2** : Accumulateurs pour le stockage de l'énergie renouvelable - Exigences générales et méthodes d'essais - Partie 2 : applications en réseaux.
- **IEC TS 63049** : 2017 Terrestrial photovoltaic (PV) systems - Guidelines for effective quality assurance in PV systems installation, operation and maintenance.
- **NF EN IEC 61724-1** : Performances des systèmes photovoltaïques - Partie 1 : surveillance.
- **IEC TS 61724-2 : 2016** : Photovoltaic system performance - Part 2: Capacity evaluation method.

- **IEC TS 61724-3 : 2016** : Photovoltaic system performance - Part 3: Energy evaluation method.
- **NF EN 62446-1** : Systèmes photovoltaïques (PV) - Exigences pour les essais, la documentation et la maintenance - Partie 1 : systèmes connectés au réseau électrique - Documentation, essais de mise en service et examen.
- **NF EN 62446-2** : Systèmes photovoltaïques (PV) - Exigences pour les essais, la documentation et la maintenance - Partie 2 : systèmes connectés au réseau électrique - Maintenance des systèmes PV.
- **IEC TS 62446-3 : 2017** : Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography.
- **IEC TS 63019 : 2019**: Photovoltaic power systems (PVPS) - Information model for availability.

Guides en français :

- Guide : Exploitation des installations photovoltaïques : Gestion technique de l'ordinaire et de l'extraordinaire – **Hespul – 2017**.
- Méthode de détection des dysfonctionnements électriques des installations photovoltaïques – Agence Qualité Construction **Hespul – Juin 2019**.
- Directives techniques pour les installations électriques à basse tension - guide **AFSEC 03 – 2020**.
- Directives techniques pour l'installation de mini-réseaux photovoltaïques - guide **AFSEC 08 – 2024**.

Guides en anglais :

- The Ultimate Safety Guide for Solar PV Connectors – **PVEL heliovolta**.
- Operation & Maintenance : Best practice guidelines 5.0 – **Solarpower Europe**.
- Operation & Maintenance : Best practice guidelines Africa Edition – **Solarpower Europe**.
- Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems; 3rd Edition – **NREL – 2018**.
- Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications : Fourth Edition – **IEA PVPS 16-6 – 2024**.
- Weather Corrected Performance Ratio – **NREL – 2013**.
- Guidelines for Operation and Maintenance of Photovoltaic Power Plants in Different Climates – **IEA PVPS T13-25 – 2022**.
- Quantification of technical risks in PV Power Systems – **IEA PVPS – 2021**.

- Photovoltaic Failure Fact Sheets – **IEA PVPS T13:30 – 2025.**
- Best practice guidelines for the use of economic and technical KPIs” - **IEA PVPS T13 28 – 2024.**
- Qualitification of Photovoltaic Power Plants using Mobile Test Equipment – **IEA PVPS T13-24 – 2021.**
- Foundations of Off-Grid Solar in Haiti : Installation, Operations, and Maintenance of Off-Grid Solar Systems – USAID / NREL.





Credit photo: Shutterstock / Installation de panneaux solaires sur un ingénieur

Publié par

Ministère des Mines, du Pétrole
et de l'Energie (MMPE)

Direction Générale de l'Energie
(DGE)

Adresse

Immeuble SCIAM, 15ème Etage
BP V 50 Abidjan, Côte d'Ivoire

Contacts

T (+225) 27 20 21 50 03
E info@energie.gouv.ci

Auteurs

PLANAIR SA & INES

Crédits Photos

Shutterstock / GIZ ProFERE II /
Auteurs du document

L'élaboration de ce manuel a été rendue possible grâce au financement du Ministère fédéral de la Coopération économique et du Développement (BMZ), avec le cofinancement de l'Union européenne (UE), et le soutien de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH à travers le Projet ProFERE II.

Abidjan - Côte d'Ivoire
Juin 2025