



## PV PERFORM MOD

# Méthodologie : Détection automatique de fautes des systèmes PV



Version 1.1  
2016

© Sa Majesté la Reine en chef du Canada  
représentée par le Ministre des Ressources  
naturelles du Canada, 2016

Préparé par :  
CanmetÉNERGIE Varennes

Novembre 2016

**CanmetÉNERGIE**

*Leadership en écoInnovation*

Canada 

### **Mise en garde**

Ressources naturelles Canada et ses employés ne font aucune garantie, formelle ou tacite, et n'assument aucune responsabilité légale ou autre à l'égard de l'exactitude ou de l'exhaustivité du contenu de ce document. Ressources naturelles Canada ne pourra être tenu responsable dans toute cause résultant d'une négligence ou de toute autre faute commise dans l'utilisation des informations contenues dans ce document.

### **Droit d'auteur**

Le contenu du présent document peuvent être reproduites, en totalité ou en partie, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit, à des fins personnelles ou non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

Nous demandons aux utilisateurs de :

- faire preuve d'une diligence raisonnable en s'assurant de l'exactitude des documents copiés;
- indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour plus de renseignements, contactez RNCAN à l'adresse [copyright.droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:copyright.droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca).

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2016

# Table des matières

1.	Introduction .....	1
1.1.	Données requises du système PV .....	2
2.	Nettoyage des données .....	3
2.1.	Qualité des données .....	3
2.2.	Pondération des valeurs .....	5
2.3.	Données aberrantes .....	7
2.4.	Irradiation faible et production d'électricité .....	9
2.5.	Intervalles d'irradiation.....	9
2.6.	Mesures non représentatives des conditions d'opérations normales .....	10
2.7.	Résumé des étapes du nettoyage des données .....	13
3.	Modèle de la production d'électricité .....	15
3.1.	Erreurs d'apprentissage et de validation.....	15
4.	Détection de fautes .....	17
4.1.	Conditions d'opération normales .....	17
4.2.	Détection de fautes .....	17
5.	Rapport de performance .....	20
5.1.	Recommandations pour le calcul du rapport de performance .....	22
5.2.	Rapport de performance supérieur à 100 % .....	22

## Liste des figures

Figure 1 : Relation linéaire entre la puissance électrique alternative et l'irradiation solaire .....	4
Figure 2 : Relation non-linéaire entre la puissance électrique alternative et l'irradiation solaire..	5
Figure 3 : Mesures à 10 minutes de puissance électrique alternative et d'irradiation solaire .....	6
Figure 4 : Mesures de puissance et d'irradiation solaire pondérées par heure.....	6
Figure 5 : Valeurs d'irradiation solaire anormalement élevées .....	8
Figure 6 : Valeurs de la puissance électrique alternative anormalement élevées.....	8
Figure 7 : Températures des panneaux PV anormalement élevées.....	9
Figure 8 : 1 <sup>re</sup> itération du nettoyage des données .....	11
Figure 9 : 7 <sup>e</sup> itération du nettoyage des données .....	12
Figure 10 : Erreurs d'apprentissage et de validation.....	16
Figure 11 : Données fautives et limites d'opération normales .....	18
Figure 12 : Limites d'opération normales exprimées en kW.....	19
Figure 13 : Rapports de performance mensuels .....	21
Figure 14 : Rapports de performance hebdomadaires .....	21

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Itérations du nettoyage des données.....	12
--	----

# 1. Introduction

L'outil logiciel exécute une procédure automatique pour détecter les fautes dans les systèmes photovoltaïques (PV). Les fautes sont définies comme étant les périodes où la production d'électricité est anormalement basse, lorsque le système produit moins d'électricité que ce qu'il devrait produire étant donné ses conditions d'opération (irradiation solaire et température du panneau PV).

Ce document décrit la méthodologie de l'outil logiciel et les calculs qu'il effectue automatiquement.

La procédure de détection de fautes consiste à comparer la puissance électrique du courant produit par le système PV à la puissance électrique attendue dans des conditions d'opération normales (sans fautes). Les différences entre ces deux valeurs supérieures à des seuils préétablis constituent des fautes.

La production d'électricité dans des conditions d'opération normales est établie par un modèle qui calcule la puissance électrique alternative. Le modèle est constitué d'une équation qui tient compte de l'irradiation solaire et de la température des panneaux PV pour prédire la puissance du courant électrique produit par le système PV.

Le rapport de performance (RP) est aussi calculé automatiquement. Le RP évalue l'efficacité du système PV en comparant sa production d'électricité réelle à sa production idéale. Le RP se marie bien à l'approche de détection de fautes par modèle, puisqu'il évalue la performance à long terme du système PV.

La procédure de détection de fautes suit les étapes suivantes:

1. nettoyage des données avant le développement du modèle – suppression des données qui ne sont pas représentatives d'une opération normale du système PV
2. développement du modèle prédisant la production de courant alternatif du système en conditions d'opération normales
3. calcul des limites de l'opération normales du système PV
4. détection des fautes

La procédure utilisée pour détecter les fautes est décrite dans ce rapport. Les calculs présentés ici sont effectués automatiquement par le logiciel. L'utilisateur n'a qu'à charger un fichier contenant les mesures prises du système PV et à spécifier quelques paramètres du même système. Pour plus de renseignements sur les données que doit fournir l'utilisateur, consultez le manuel d'*Aide*.

La procédure présentée ici a été développée et validée en utilisant les données provenant de plusieurs systèmes PV commerciaux. Des graphiques illustrant les données de ces systèmes sont utilisés dans ce rapport pour mieux expliquer les calculs.

## **1.1. Données requises du système PV**

Les données suivantes sont requises pour mener la détection de fautes :

- puissance électrique alternative
- irradiation solaire dans le plan des panneaux PV
- température des panneaux PV

La puissance de design en courant continu du système PV est nécessaire pour calculer le rapport de performance.

## 2. Nettoyage des données

Le modèle de production de courant alternatif doit représenter la production du système PV attendue dans des conditions d'opération normales. Avant de développer le modèle, les données doivent être analysées et les données représentant une opération anormale du système PV doivent être éliminées. La présence de ces données peut être due à plusieurs facteurs, comme un dysfonctionnement des instruments ou de l'équipement. Des irrégularités peuvent aussi apparaître dans les données, en raison d'une mauvaise synchronisation des mesures.

La qualité de données a un effet direct sur la précision de la procédure de détection de fautes. Dans des cas extrêmes, la qualité des mesures peut être trop faible pour développer un modèle fiable.

La procédure de nettoyage des données comprend les étapes suivantes :

1. vérification de la qualité des données
2. pondération par heure des données
3. suppression des données aberrantes
4. suppression des données ne représentant pas des conditions d'opération normales

Les données aberrantes sont les mesures qui ne s'inscrivent pas dans la tendance générale des données. Afin d'analyser le comportement du système PV selon les niveaux de rayonnement solaire et d'augmenter la précision du nettoyage des données, les données aberrantes sont repérées dans plusieurs intervalles d'irradiation.

Les sections suivantes présentent des difficultés liées à la qualité des données et expliquent plus en détail la procédure de nettoyage des données.

### 2.1. Qualité des données

La qualité des données a un effet direct sur la précision du modèle de production de courant alternatif utilisé dans la détection de fautes. Afin d'empêcher le développement d'un modèle imprécis à partir de données de faible qualité, une vérification initiale est effectuée avant le nettoyage des données. La qualité des données est évaluée selon la relation entre l'irradiation et la production d'électricité. Dans des conditions normales, la relation entre l'irradiation et la production est très linéaire. Le coefficient de détermination  $R^2$  indique la force de cette relation linéaire entre irradiation et production, et il est utilisé pour évaluer la qualité des données. Une valeur  $R^2$  de 1 indique que les données s'inscrivent sur une droite de régression parfaite.

Pour effectuer une bonne détection de faute, seuls les ensembles de données avec un coefficient  $R^2$  supérieur ou égal à 0.70 seront utilisés dans la procédure de détection de fautes. Par exemple, la Figure 1 montre un ensemble de données « propres », avec des mesures d'irradiation et de production dont la relation linéaire est forte. La Figure 2 montre un ensemble de données de faible qualité avec un coefficient  $R^2$  de 0.37. Cela est causé par une faible précision dans la mesure de la production de courant alternatif (6 kW). Puisque la production de courant alternatif nominale du système PV est de 18 kW, la précision de cette mesure n'est que de 33.3 %. Étant donné ce manque de précision, il est impossible de développer des modèles de ce système PV.

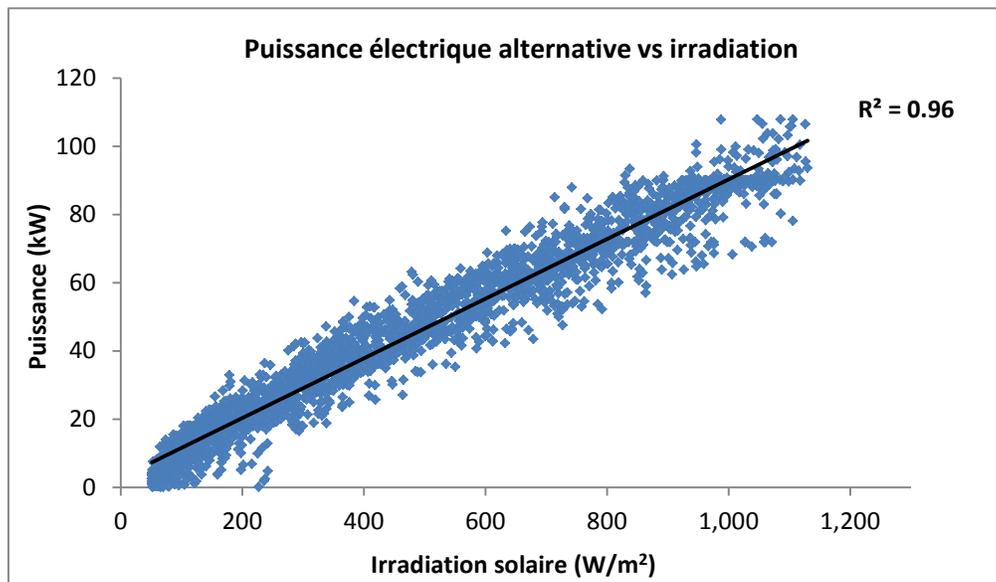


Figure 1 : Relation linéaire entre la puissance électrique alternative et l'irradiation solaire

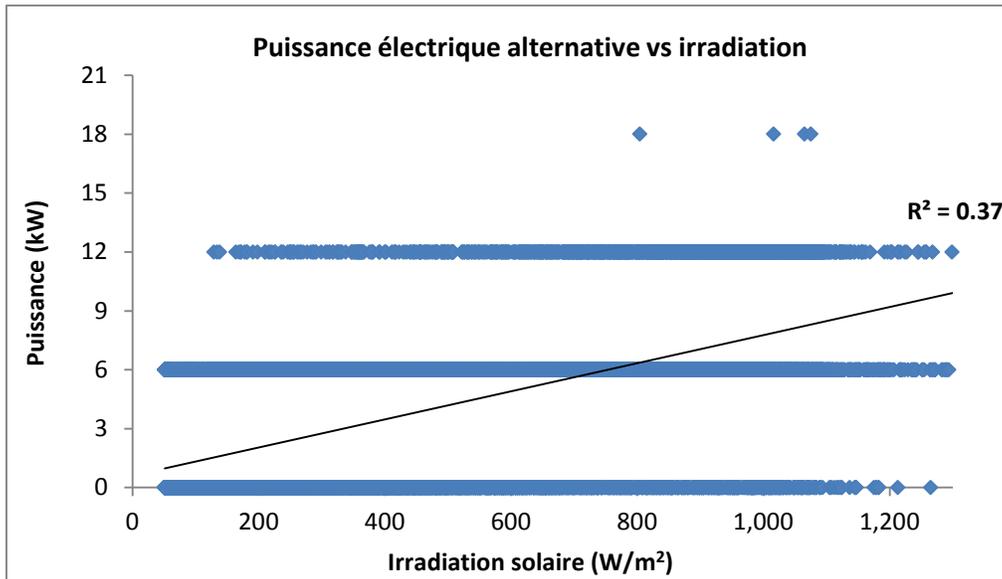


Figure 2 : Relation non-linéaire entre la puissance électrique alternative et l'irradiation solaire

## 2.2. Pondération des valeurs

Les mesures initiales sont pondérées par heure afin de réduire la variabilité des données et augmenter la précision du modèle. La Figure 3 montre les mesures initiales, prises toutes les 10 minutes, alors que la Figure 4 montre les mesures correspondantes pondérées par heure.

On constate que la pondération par heure des mesures initiales a contribué à augmenter le coefficient  $R^2$ , qui passe de 0.78 à 0.91.

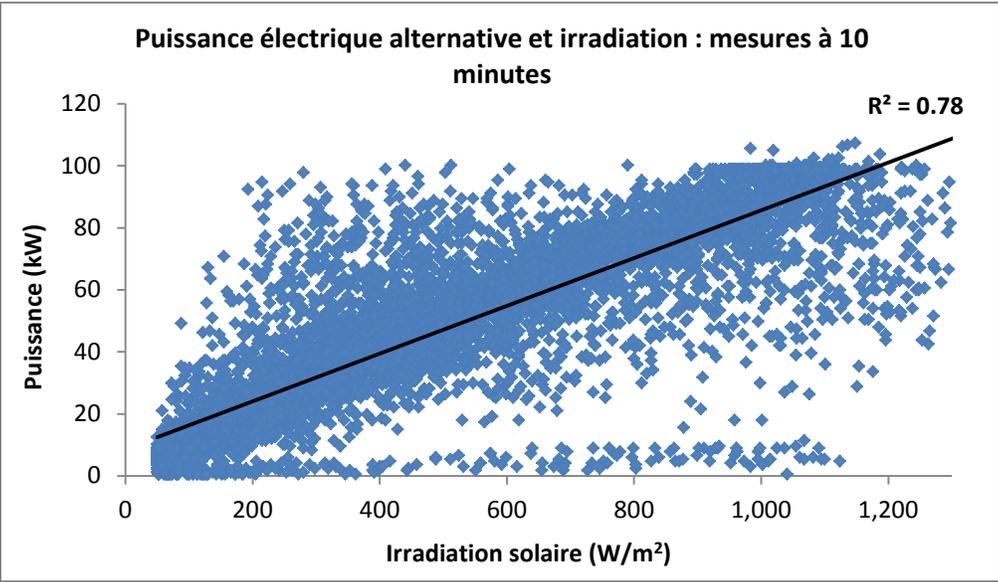


Figure 3 : Mesures à 10 minutes de puissance électrique alternative et d'irradiation solaire

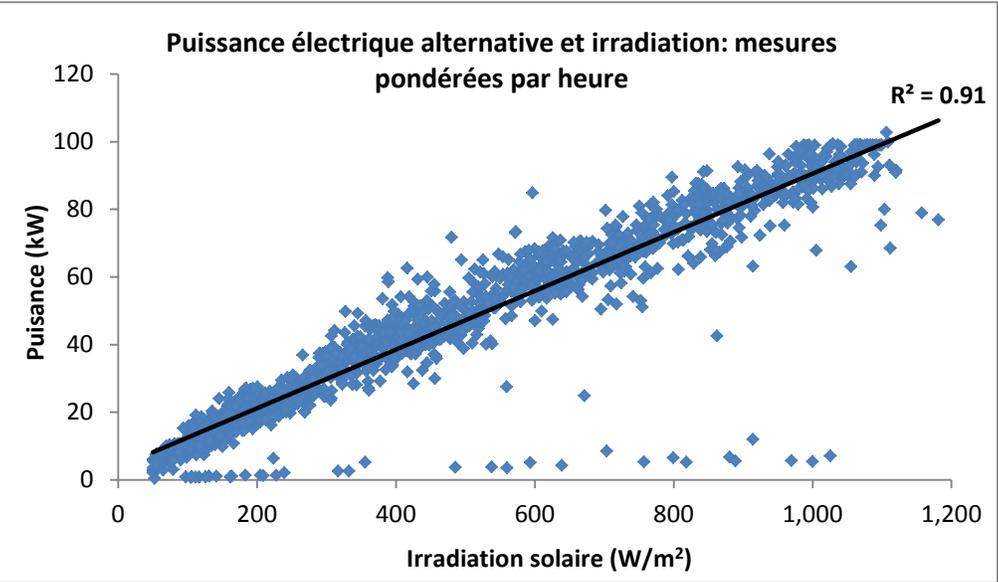


Figure 4 : Mesures de puissance et d'irradiation solaire pondérées par heure

## 2.3. Données aberrantes

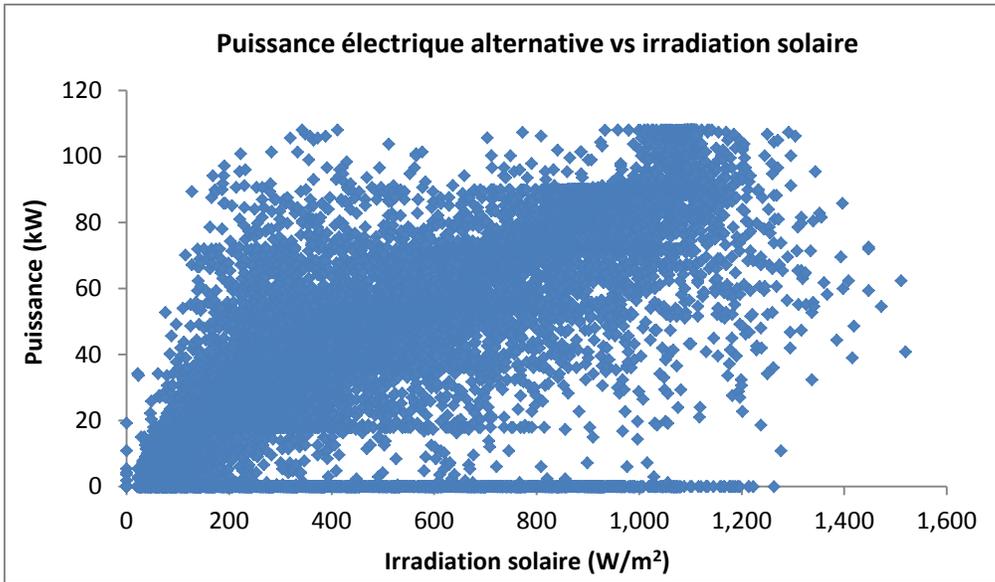
Les données aberrantes sont celles qui ne suivent pas la tendance générale de l'ensemble des données et doivent être supprimées avant le développement du modèle. Ces anomalies peuvent être causées par des erreurs de mesure, une dysfonction des appareils ou une mauvaise calibration.

Trois exemples des données aberrantes sont fournis : irradiation solaire, puissance électrique et température des panneaux PV anormalement élevées.

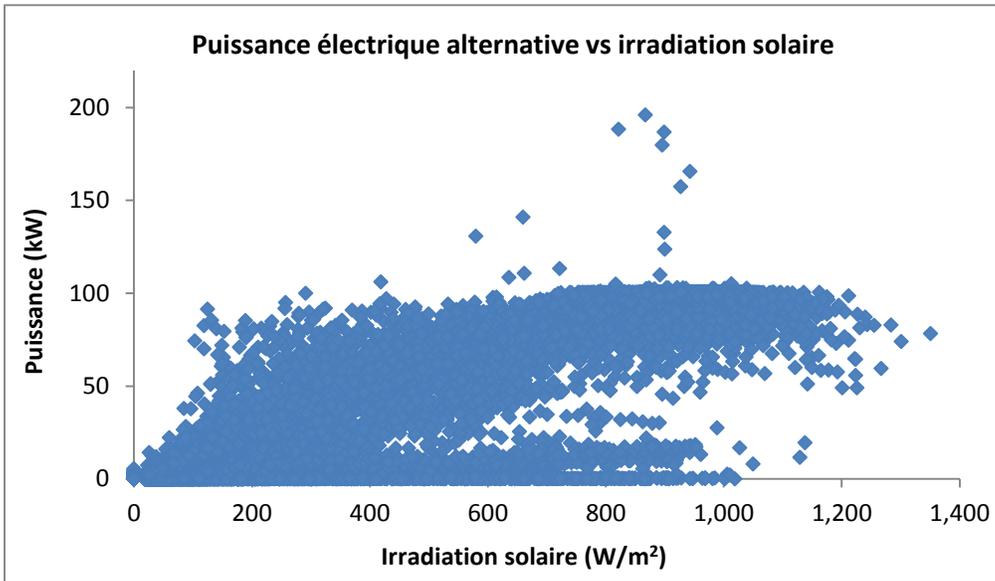
La Figure 5 montre que des valeurs d'irradiation solaire supérieures à  $1,400 \text{ W/m}^2$  sont mesurées par le pyranomètre de ce système PV en particulier. Dans l'espace, l'irradiation solaire maximale, avant d'entrer dans l'atmosphère de la Terre, est légèrement supérieure à  $1,300 \text{ W/m}^2$ . Bien que des valeurs d'irradiation plus élevées puissent être causées par la réflexion de la lumière, des valeurs supérieures à  $1,300 \text{ W/m}^2$  sont éliminées à titre de précaution pour éviter la présence de mesures erronées dans l'ensemble de données de modélisation.

La Figure 6 montre les mesures d'un système PV dont la production de courant alternatif maximale est de 100 kW. Cependant, des valeurs supérieures à 100 kW sont présentes dans les données.

La Figure 7 montre un ensemble de températures du panneau PV. On remarque que les températures atteignent des niveaux anormalement élevés (autour de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Généralement, la température d'un panneau PV dans des conditions d'opération normales ne devrait pas dépasser  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  dans le cas d'un système monté sur un support, et  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  dans le cas d'un système intégré à un bâtiment.



**Figure 5 : Valeurs d'irradiation solaire anormalement élevées**



**Figure 6 : Valeurs de la puissance électrique alternative anormalement élevées**

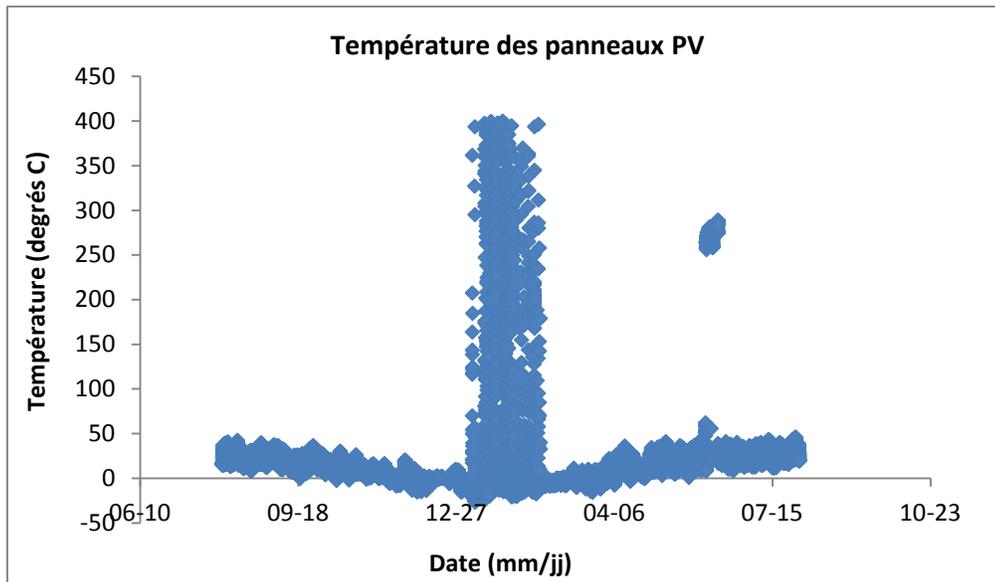


Figure 7 : Températures des panneaux PV anormalement élevées

## 2.4. Irradiation faible et production d'électricité

Les données qui correspondent à des niveaux d'irradiation solaire inférieurs à  $50 \text{ W/m}^2$  sont supprimées avant le développement du modèle, puisque la précision des mesures est considérablement réduite à des niveaux très bas de rayonnement solaire.

Les données qui correspondent à une production d'électricité très basse sont aussi supprimées. À ce stade, la plupart des données associées à une production d'électricité faible ont probablement déjà été supprimées lorsque les données correspondant à des niveaux d'irradiation solaire inférieurs à  $50 \text{ W/m}^2$  ont été supprimées, mais les périodes d'opération fautive peuvent générer des données de production faible malgré des valeurs d'irradiation élevées. Pour simplifier le procédé de suppression des données extrêmes, on supprime les données qui correspondent à une puissance électrique alternative inférieure à 5 % de la puissance électrique alternative nominale du système PV.

## 2.5. Intervalles d'irradiation

En raison de leurs caractéristiques techniques, l'efficacité des systèmes PV dépend des niveaux d'intensité du rayonnement solaire. À des niveaux d'irradiation bas (généralement inférieurs à  $300 \text{ W/m}^2$ ), l'efficacité est faible. L'efficacité augmente avec de plus grands niveaux de rayonnement solaire, demeure relativement stable jusqu'à que l'irradiation atteigne des valeurs plus élevées, et diminue légèrement quand l'irradiation dépasse un certain niveau.

Pour mesurer le fonctionnement du système PV selon plusieurs niveaux de rayonnement solaire, la procédure de nettoyage des données est effectuée pour les intervalles d'irradiation suivantes : 50-250, 250-500 et au-delà de 500 W/m<sup>2</sup>.

## 2.6. Mesures non représentatives des conditions d'opérations normales

Dans les conditions d'opération normales, il y a une relation linéaire forte entre les mesures d'irradiation solaire et les mesures de production d'électricité. Ainsi, les données avoisinant la relation linéaire entre irradiation et production sont considérées normales (sans fautes), alors que les données trop éloignées de cette relation sont considérées anormales (avec fautes). Les données fautives correspondent à une production d'électricité anormale, lorsque le système produit nettement moins d'électricité que ce qu'il devrait produire à un niveau d'irradiation solaire donné.

Les données qui indiquent que le système PV produit moins d'électricité que ce qu'il devrait produire sont situées sous la limite des conditions d'opération normale. Les données situées au-dessus de la limite des conditions d'opération normale peuvent être indicatives de problèmes des instruments de mesure, ceux-ci effectuant des lectures erronées, suggérant que le système PV produit plus d'électricité que ce qu'il devrait produire.

Le nettoyage des données est basé sur les valeurs d'irradiation solaire et la puissance électrique alternative. Le rapport entre la puissance et l'irradiation est utilisé pour établir les seuils permettant de déterminer les données représentant des conditions d'opération fautives. Ces seuils sont établis pour différents intervalles d'irradiation : 50-250, 250-500 et au-delà de 500 W/m<sup>2</sup>. Pour chaque intervalle, les seuils du nettoyage des données sont établis de la manière suivante :

1. le rapport entre la puissance électrique alternative (kW) et irradiation (W/m<sup>2</sup>) est calculé
2. la moyenne et l'écart-type de ces rapports sont calculés
3. les seuils sont établis par l'équation : *moyenne ± 3 x écart-type*

Ceci est la règle des 3 écarts-types (ou la règle des trois sigma) qui indique que pour une distribution normale, 99.73 % des valeurs se situent entre trois écarts-types de part et d'autre de la moyenne. Même si les données ne forment pas une distribution normale, la plupart d'entre elles vont se situer dans les intervalles définis par les trois écarts-types. Les données qui se situent hors de ces seuils seront associées à des conditions d'opération fautives, puisqu'elles ne suivent pas la relation linéaire entre l'électricité et l'irradiation. Ces données seront supprimées avant le développement du modèle.

Le nettoyage des données est itératif afin de supprimer graduellement toutes les données fautives. À la fin d'une itération, de nouveaux seuils sont établis pour déterminer quelles données sont représentatives de conditions d'opération normales, et un nouveau nettoyage est effectué.

La Figure 8 montre les données représentatives des conditions d'opération normales et fautives après une première itération de nettoyage. On y remarque aussi les seuils de nettoyage des différents intervalles d'irradiation. Le nettoyage des données de ce système PV en particulier s'est terminé après 7 itérations. La Figure 9 montre la dernière itération, et la progression du procédé de nettoyage des données est présentée dans le Tableau 1.

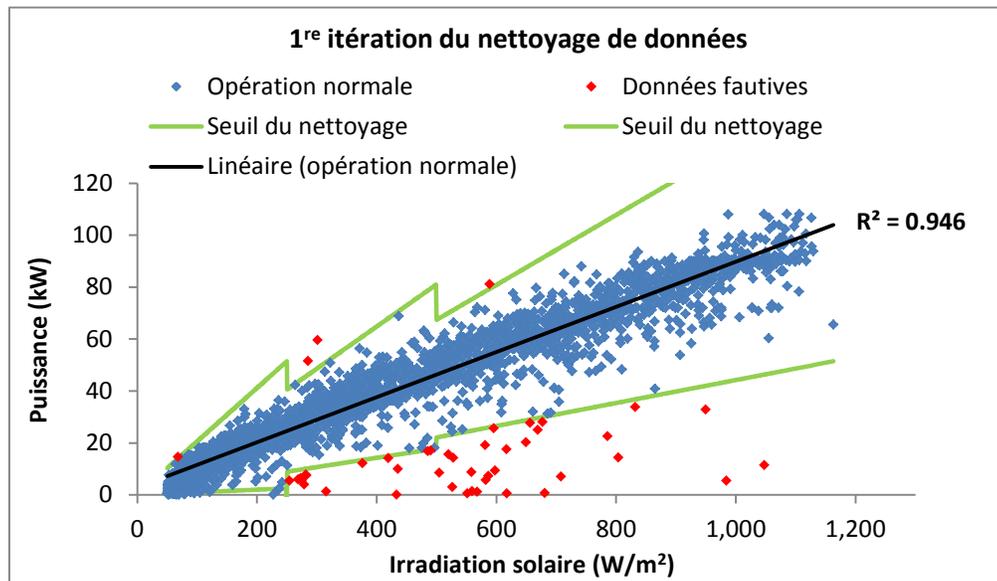


Figure 8 : 1<sup>re</sup> itération du nettoyage des données

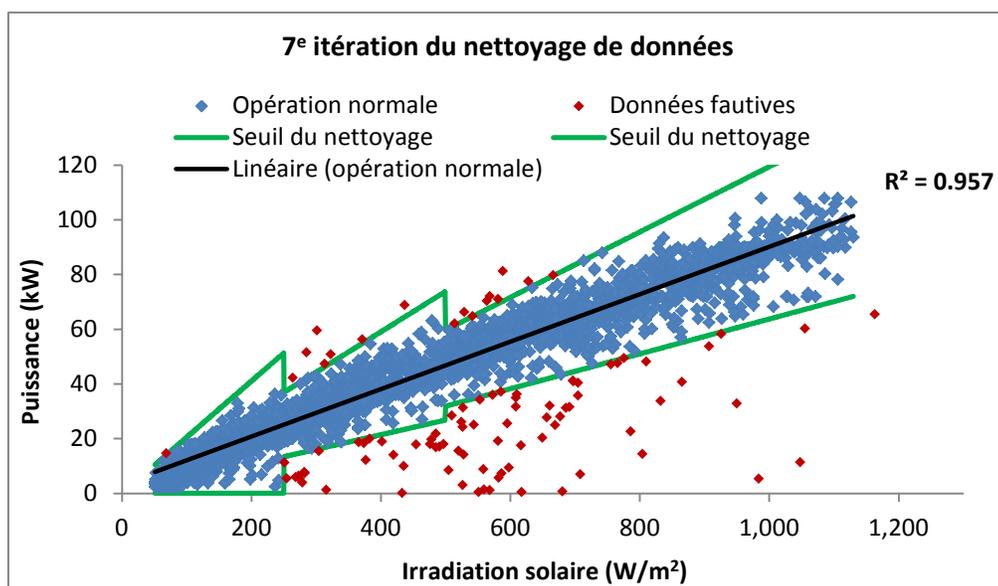


Figure 9 : 7<sup>e</sup> itération du nettoyage des données

Tableau 1 : Itérations du nettoyage des données

Étape du nettoyage	Valeur R <sup>2</sup>	Amélioration R <sup>2</sup>	Données fautives	% de fautes (sur l'ensemble des données)
Irradiance $\leq 50 \text{ W/m}^2$ , AC power $\leq 5 \text{ kW}$ removed	0.9151	-	-	-
1 <sup>re</sup> itération du nettoyage	0.9457	3.348 %	45	1.48 %
2 <sup>e</sup> itération du nettoyage	0.9533	0.797 %	28	0.94 %
3 <sup>e</sup> itération du nettoyage	0.9554	0.227 %	13	0.44 %
4 <sup>e</sup> itération du nettoyage	0.9562	0.081 %	5	0.17 %
5 <sup>e</sup> itération du nettoyage	0.9565	0.029 %	1	0.03 %
6 <sup>e</sup> itération du nettoyage	0.9567	0.026 %	2	0.07 %
7 <sup>e</sup> itération du nettoyage	0.9570	0.028 %	2	0.07 %

Après les 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> itérations, on continue de repérer des données fautives. Toutefois, ces données correspondent à des valeurs d'irradiation situées dans l'intervalle 50-500 W/m<sup>2</sup>. Puisque la production d'électricité est plus grande à des niveaux d'irradiation plus élevés, il est plus important de repérer les données fautives dans les niveaux d'irradiation élevés (supérieurs à 500 W/m<sup>2</sup>). De plus, l'amélioration de la valeur R<sup>2</sup> entre la 6<sup>e</sup> et la 7<sup>e</sup> itération de filtrage est très faible, et donc le nettoyage des données est arrêté.

## 2.7. Résumé des étapes du nettoyage des données

Le nettoyage des données suit les étapes suivantes :

1. Calculer le coefficient  $R^2$  entre la puissance électrique alternative et l'irradiation solaire. Si  $R^2 < 0,70 \Rightarrow$  arrêter le nettoyage des données, la qualité des données étant trop faible pour développer un modèle précis; sinon  $\Rightarrow$  continuer
2. Pondérer par heure les données
3. Supprimer les données qui correspondent à :
  - a. niveau d'irradiation  $< 50 \text{ W/m}^2$  et niveau d'irradiation  $> 1,250 \text{ W/m}^2$
  - b. puissance électrique alternative  $\leq 5 \%$  de la puissance électrique alternative maximale du système PV
  - c. puissance électrique alternative  $>$  puissance électrique alternative maximale du système PV
  - d. température du panneau PV  $> 60 \text{ }^\circ\text{C}$  (système PV monté sur un support) ou température du panneau PV  $> 90 \text{ }^\circ\text{C}$  (système PV intégré à un bâtiment)
4. Calculer le coefficient  $R^2$  entre irradiation et puissance
5. Calculer les valeurs du rapport puissance / irradiation
6. Calculer les moyennes et les écarts-types des rapports calculés à l'étape 5 pour les intervalles d'irradiation de 50-250, 250-500 et au-delà de 500  $\text{W/m}^2$
7. Calculer les seuils du nettoyage des données pour chaque intervalle d'irradiation : *moyenne  $\pm 3 \times$  écart-type des rapports calculés à l'étape 5*
8. Repérer et supprimer les données se situant hors des seuils calculés à l'étape 7
9. Calculer le nouveau coefficient  $R^2$  pour les données nettoyées
10. Si l'amélioration de  $R^2 < 0,1 \%$  et que le nombre de données fautives = 0  $\Rightarrow$  arrêter le nettoyage des données; sinon  $\Rightarrow$  répéter étapes 4 à 8  
  
Si l'amélioration de  $R^2 < 0,1 \%$  et que le nombre des données fautives  $\neq 0$  et que les données fautives ne se situent que dans l'intervalle d'irradiation 50-500  $\text{W/m}^2 \Rightarrow$  arrêter le nettoyage des données; sinon  $\Rightarrow$  répéter étapes 4 à 8

Il est important de noter que même si les seuils du nettoyage des données sont calculés séparément pour chaque intervalle d'irradiation, le coefficient  $R^2$  est calculé sur toute l'étendue d'irradiation.

### 3. Modèle de la production d'électricité

Un modèle qui prédit la puissance du courant alternatif produit par le système PV dans des conditions d'opération normales est utilisé pour détecter les fautes. Ce modèle utilise les données nettoyées obtenues précédemment. Le modèle utilise l'irradiation solaire et la température du panneau PV pour prédire la puissance électrique alternative attendue du courant produit par le système PV.

Le modèle est basé sur une approche paramétrique de modélisation de système PV qui calcule la production électrique alternative par l'équation suivante :

$$P_{CA} = Irrad. \times [a_1 + a_2 Irrad. + a_3 \log(Irrad.)] \times [1 + a_4(T_{module} - 25)]$$

où  $P_{CA}$  = puissance électrique alternative (W)

$Irrad.$  = irradiation solaire ( $W/m^2$ )

$T_{module}$  = température du module PV ( $^{\circ}C$ )

$a_1, a_2, a_3$  et  $a_4$  = paramètres calculés afin que les résultats du modèle soient le plus près possible des données mesurées

Pour mesurer le fonctionnement du système PV selon les niveaux de rayonnement solaire, des modèles ont été développés pour les intervalles d'irradiation suivantes : 50-250, 250-500 et au-delà de 500  $W/m^2$ . Les modèles développés pour ces niveaux d'irradiation sont plus précis qu'un modèle global qui décrit toute l'étendue d'irradiation.

#### 3.1. Erreurs d'apprentissage et de validation

Avant de développer un modèle prédictif, on sépare les données en deux ensembles : l'ensemble d'apprentissage et l'ensemble de validation. Les données d'apprentissage servent à développer le modèle, alors que les données de validation permettent de valider la précision du modèle. Si on n'utilise que les données d'apprentissage pour développer le modèle, la précision de ce dernier peut être surestimée, puisque le modèle est paramétré pour correspondre aux données d'apprentissage. C'est le surapprentissage, un problème qui survient lorsque le modèle performe très bien sur les données d'apprentissage mais n'arrive pas à se généraliser à la tendance des données. Dans ces conditions, le modèle aura de mauvaises performances sur les données inconnues (les données de validation).

On obtient les données de validation en isolant une part des données initiales qui ne sera pas utilisée pendant l'apprentissage.

Les paramètres du modèle sont calculés à l'aide d'un algorithme d'optimisation qui détermine les valeurs de paramètres qui mèneront le modèle à un résultat qui soit le plus près possible des données d'apprentissage.

Une fois que le modèle a traité les données d'apprentissage, on teste sa performance sur les données de validation. La Figure 10 montre un exemple de surapprentissage, où les données d'apprentissage (ligne rouge) diminuent de façon stable alors que les données de validation (ligne verte) commencent à augmenter pendant la modélisation.

Pour constituer l'ensemble des données de validation, on choisit aléatoirement, selon une distribution uniforme, 30 % des mesures existantes. Les mesures restantes (70 %) représentent les données d'apprentissage et sont utilisées pour développer le modèle prédictif.

Les modèles reçoivent un score basé sur l'erreur de la validation à l'aide du coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne  $CV(EQM)$ . Ce coefficient est obtenu en prenant le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et la moyenne des valeurs de la puissance de courant alternatif des données de validation.

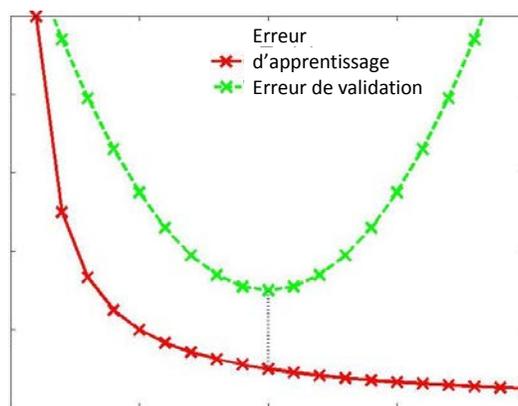


Figure 10 : Erreurs d'apprentissage et de validation

## 4. Détection de fautes

### 4.1. Conditions d'opération normales

La détection de fautes est basée sur les modèles développés précédemment. Les modèles prédisent la puissance électrique alternative du système PV dans des conditions d'opération normales, et ce, pour chaque intervalle d'irradiation solaire. Les modèles sont aussi utilisés pour calculer les limites d'opération normale du système.

Les limites d'opération normale sont calculées en utilisant le rapport entre la puissance électrique alternative mesurée et la puissance prédite par le modèle. Les limites sont calculées selon la règle des 3 sigma :

$$\text{limites d'opération normale} = \text{moyenne} \pm 3 \times \text{écart-type}$$

où la *moyenne* et l'*écart-type* sont calculés pour les valeurs du rapport *puissance mesurée / puissance calculée par le modèle*

Les limites d'opération normale ont été calculées pour chaque intervalle d'irradiation (50-250, 250-500 et au-delà de 500 W/m<sup>2</sup>).

### 4.2. Détection de fautes

Les fautes sont détectées de la manière suivante :

- les mesures d'irradiation et de température du panneau PV sont utilisées comme entrées dans le modèle de puissance électrique alternative. Le modèle prédit la puissance du courant produit par système PV dans des conditions d'opération normales.
- le rapport entre la puissance électrique alternative mesurée et la puissance prédite par le modèle est calculé
- les rapports dont la valeur se situe hors des limites d'opération normale représentent des données considérées fautives

Les points éloignés de la ligne droite représentant la linéarité entre l'irradiation et la puissance électrique alternative, associés précédemment à des conditions d'opération fautives, ont été utilisés pour valider cette approche. Ces points sont comparés aux résultats correspondants du modèle pour déterminer s'ils se trouvent à l'extérieur des limites d'opération normales.

Les données fautives, situées hors des limites d'opération normales, apparaissent dans la Figure 11. La plupart des fautes se trouvent sous la limite inférieure, indiquant que le système

produit moins d'électricité que ce qu'il doit produire étant donné les conditions d'opération (définies par l'irradiation solaire et la température du panneau PV). Par contre, il y a aussi quelques fautes au-dessus de la limite supérieure, indiquant que le système produit plus d'électricité que ce qu'il devrait. Ces fautes peuvent être causées par une dysfonction des instruments de mesure, qui effectuent des lectures erronées. Ces fautes peuvent aussi découler des imprécisions du modèle de production électrique.

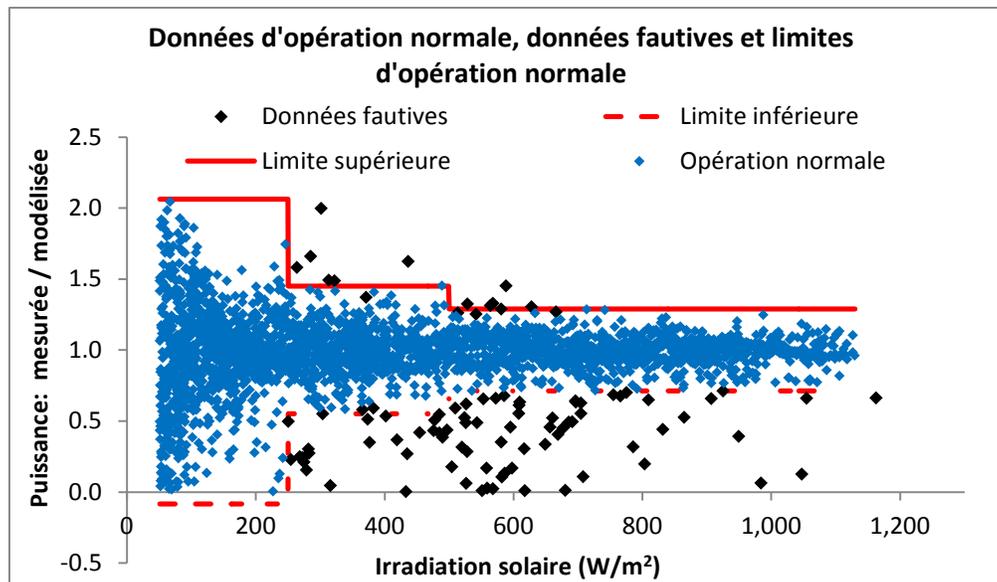
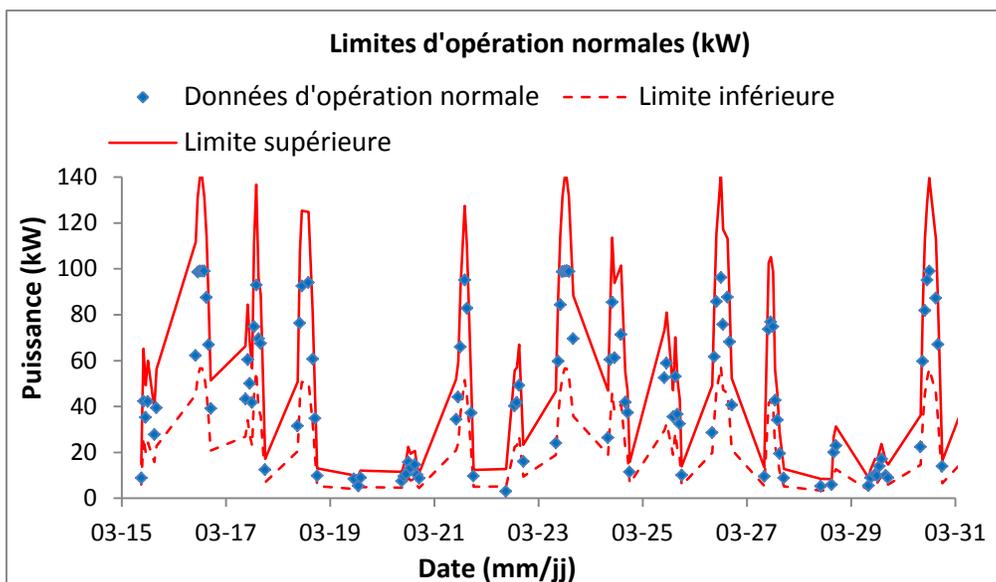


Figure 11 : Données fautives et limites d'opération normales

Pour chaque mesure, les limites d'opération normale peuvent aussi être exprimées en kW, en multipliant leurs valeurs avec la puissance calculée par le modèle. Par exemple :

- la puissance électrique alternative calculée par le modèle est 95.36 kW
- les limites d'opération normale inférieures et supérieures, exprimées selon le rapport *puissance mesurée / puissance calculée* sont respectivement 0.807 et 1.193
- les limites d'opération normale, exprimées en kW, sont : *limite inférieure* =  $95.36 \text{ kW} \times 0.807 = 76.96 \text{ kW}$  et *limite supérieure* =  $95.36 \text{ kW} \times 1.193 = 113.76 \text{ kW}$

La Figure 12 montre les limites d'opération normales de cet exemple, exprimées en kW.



**Figure 12 : Limites d'opération normales exprimées en kW**

## 5. Rapport de performance

Le rapport de performance (RP) évalue l'efficacité du système PV en comparant sa production électrique réelle à sa production idéale. La production idéale est considérée dans des conditions normales d'essai (*Standard test conditions, STC*), c'est-à-dire une irradiation solaire de  $1,000 \text{ W/m}^2$  et une température du module PV de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  – c'est la capacité nominale en courant continu du système. Le RP est calculé sur une période de temps donnée et est utilisé pour surveiller les performances du système au fil du temps. Le RP tient compte de la production d'électricité et de la quantité de rayonnement solaire captée pendant la période de temps donnée. Le ratio de performance *RP* est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$RP = \frac{\text{Production électrique alternative totale (kWh)}}{\text{Puissance nominale en courant continu (kW) x Insolation totale (Wh/m}^2) / 1,000 (\text{W/m}^2)}$$

où *Production électrique alternative totale* = énergie électrique alternative (kWh) produite dans la période de temps sur laquelle le rapport de performance est calculé

*Puissance nominale en courant continu* = puissance de design en courant continu du système PV (kW)

*Insolation totale* = énergie solaire captée par le système PV dans la période de temps sur laquelle le rapport de performance est calculé ( $\text{Wh/m}^2$ )

Plus la valeur RP s'approche de 1, plus le système s'approche de sa production électrique idéale.

Les données des conditions d'opération normales et fautes sont utilisées pour calculer le rapport de performance. Avant le calcul de la valeur RP, les mesures qui ont des données manquantes doivent être repérées. Si la valeur de puissance électrique est manquante, alors la valeur d'irradiation solaire correspondante est supprimée des données. À l'inverse, il en va de même si une valeur d'irradiation solaire est manquante. Cette vérification garantit l'intégrité du calcul du rapport de performance, puisque les valeurs de production et d'irradiation sont additionnées dans la même période de temps.

Les mesures qui correspondent à des niveaux d'irradiation inférieurs à  $50 \text{ W/m}^2$  sont supprimées afin d'éviter l'incertitude des mesures à des niveaux de rayonnement solaire faibles.

La Figure 13 montre des rapports de performance mensuels. On remarque une chute de performance du système au mois de mai, causée par une dysfonction de l'onduleur. Le calcul de la valeur RP peut être effectué sur une période de temps plus courte pour repérer avec plus de précision la période où les performances du système étaient réduites. La Figure 14 montre les

valeurs RP calculées de façon hebdomadaire pendant le mois d'avril. Le problème est survenu dans la deuxième semaine d'avril.

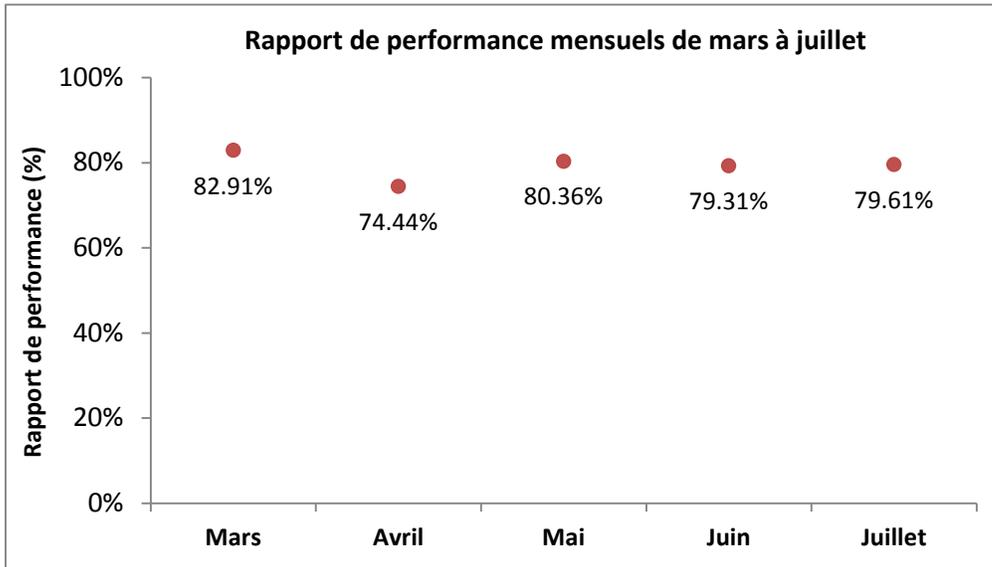


Figure 13 : Rapports de performance mensuels

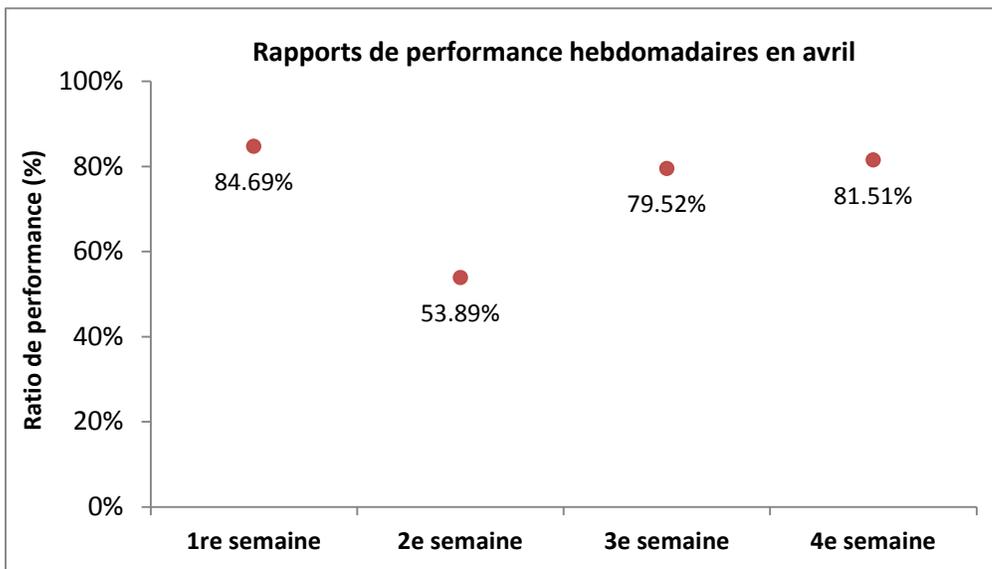


Figure 14 : Rapports de performance hebdomadaires

Le rapport de performance est un bon outil pour surveiller la performance d'un système PV, puisqu'il indique à quel point le système s'approche de sa capacité nominale. De plus, le rapport de performance ne nécessite que les données mesurées, aucun modèle n'étant requis.

La valeur RP complète bien la méthode de détection de fautes basée sur le modèle :

- le modèle détecte, en temps réel, les fautes du système PV
- la valeur RP surveille la performance du système PV à long terme, celui-ci se dégradant au fil du temps (détérioration de l'équipement, dysfonction des instruments, etc.)

## 5.1. Recommandations pour le calcul du rapport de performance

Pour bien calculer le rapport de performance, il faut suivre les étapes suivantes :

- les mesures correspondant à des niveaux d'irradiation solaire inférieurs à  $50 \text{ W/m}^2$  sont supprimées pour éviter l'incertitude des mesures à des niveaux de rayonnement solaire faibles
- les mesures qui ont des données manquantes sont supprimées
- les ensembles de données qui contiennent plusieurs données manquantes ne devraient pas être utilisés pour calculer une valeur RP, puisque l'absence de nombreuses valeurs dans la période de temps choisie produira une valeur RP peu représentative des performances du système PV pour cette période
- une période de temps suffisamment longue doit être choisie pour le calcul d'une valeur RP représentative; par exemple, une période d'une journée n'est pas assez longue pour refléter les performances du système PV et générer une valeur RP représentative
- une période de temps d'au moins une semaine est recommandée pour calculer le rapport de performance

## 5.2. Rapport de performance supérieur à 100 %

Le rapport de performance ne peut pas dépasser 100 %. Si un tel résultat est obtenu, la cause la plus probable est une mesure erronée du niveau d'irradiation. Cela peut être dû à une mauvaise calibration du pyromètre, qui sous-estime alors le niveau d'irradiation. Dans ce cas, les données indiquent à tort que la production d'électricité du système PV a lieu à des niveaux de rayonnement solaire inférieurs au niveau de rayonnement réel.