



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par



Omaïma El Alani

Pour l'obtention du diplôme

Master Sciences et Techniques

Electronique, Signaux et Systèmes Automatisés

(E.S.S.A)

Intitulé

**Développement d'un modèle de prévision
du rayonnement au sol par ciel clair**

Encadré par :

Pr Hicham Ghennioui

Mr Abdellatif Ghennioui (GEP)

Soutenu le **12 Juin 2017**, devant le jury composé de :

Pr Hicham Ghennioui.....: Encadrant

Pr Najiba EL Amrani.....: Examinatrice

Pr Abdellah Mechaqrane.....: Examineur



Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut. Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour et le respect que je vous dois... Aussi, je dédie ce projet de fin d'études ...

À mes chers parents

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, ma gratitude, mon dévouement et mon profond respect envers vous. Je prie le Bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

À mon frère, ma sœur

Je vous remercie de tout mon cœur, sans vous je n'aurais pas réussi à avancer.

À toute ma famille

Merci d'être à mes côtés, votre soutien et vos encouragements ont été sources inépuisables et force qui m'a permis d'aller de l'avant.

À tous mes professeurs

Leur générosité et leur soutien m'obligent de leur témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

À tous mes amis

Je vous remercie pour tous les moments inoubliables que nous avons passés ensemble.

À tous mes amis du master ESSA

À tous ceux qui m'aiment

Je dédie ce travail...

OMAIMA EL ALANI

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à tous ceux qui, par leurs enseignements et leurs conseils, m'ont aidé pour la réalisation de ce projet de fin d'études. Puissent ces lignes être l'expression de notre profonde reconnaissance.

Tous d'abord je tiens à remercier mon encadrant universitaire Monsieur **Hicham Ghennioui**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce stage, ses remarques pertinentes et directives, son soutien sans faille, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur **Abdellatif Ghennioui** pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour sa gentillesse et pour l'encadrement scientifique dont il m'a fait bénéficier, je lui adresse mes remerciements les plus vifs pour son accompagnement et sa disponibilité tout au long de la période du stage, et la pertinence de ses remarques. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour la confiance qu'il a su m'accorder, et pour avoir mis à ma disposition les données et les documents sur lesquels sont basés ces travaux.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide de Docteur **Ahmed Alami**, je le remercie pour sa disponibilité pour répondre à mes questions et à mes attentes et pour l'attention qu'il a bien voulu apporter à ce tout au long de période de stage, pour son appui.

Je présente aussi mes remerciements les plus chaleureux à Madame **Najiba El Amrani** et à Monsieur **Abdellah Mechaqrane**, Professeurs à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès de m'avoir honoré en acceptant de juger notre modeste travail. Veuillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond.

Je ne peux pas clore mes remerciements sans adresser mes remerciements amicaux à mes camarades de stage Mohammed Zemouri, Samira Boujenane, Fatima Zehra Daher pour leurs bonnes humeurs quotidiennes et leurs soutiens et pour les bons moments que nous avons passés ensemble.

J'aimerais encore remercier chaleureusement mes parents, mon frère et ma sœur qui m'ont encouragé durant toutes ces années. Je les remercie du fond du cœur pour m'avoir permis d'aller aussi loin dans mes études.

Résumé

La ressource solaire est une source abondante sur toute la planète. Cette ressource reste cependant sous-exploitée car sa disponibilité est très variable dans le temps et dans l'espace. Cependant elle n'est insérée que de manière limitée au sein du réseau électrique.

La contribution de ce travail se focalise sur la prévision du rayonnement solaire global à un horizon de temps d'une heure, vu que la puissance photovoltaïque produite découle directement de l'intensité du rayonnement solaire global.

Dans un premier temps nous avons fait un contrôle de qualité des données issues des mesures au sol, pour la station météorologique de Benguerir afin de construire un ensemble de données plus fiable qui pourra être utilisée comme référence. Par la suite, nous avons utilisé cet ensemble de données pour étalonner les données du rayonnement global estimé par le satellite, dans le but de construire un ensemble de données plus précises pour les gens qui ne disposent pas de stations météorologiques. Enfin, une étude bibliographique a permis de classer différents modèles de prévision du rayonnement solaire en fonction de la résolution spatiale et temporelle. Pour l'horizon $h+1$, un modèle de prévision est proposé avec le filtre de Kalman. Cette méthode produit d'une part une prévision énergétique et d'autre part une prévision multi-horizon. La comparaison de la performance de ce modèle avec la méthode de référence dite de persistance montre une amélioration de la qualité de la prévision.

Mots clés : Contrôle de qualité, calibration, prévision, modèle de Kalman, rayonnement globale horizontal, Helioclim3.

Abstract

The solar resource is an abundant source on the planet, but this resource remains under-exploited because its availability varies greatly in time and space. However, it is inserted only in a limited way within the electrical network.

The contribution of this work focuses on the prediction of global solar radiation over a time horizon of one hour, since the photovoltaic power produced derives directly from the intensity of the global solar radiation.

Firstly, we carried out a quality control of the ground measurements data for the Benguerir weather station in order to construct a more confident dataset that could be used as a reference. Subsequently, we used this dataset to calibrate the global horizontal irradiance data estimated by the satellite, in order to construct a more accurate dataset for people who do not have weather stations. Finally, a literature review has allowed to classify different models of prediction of the solar radiation according to the spatial and temporal resolution. For the horizon $h + 1$, a prediction model is proposed with the Kalman filter. This method produces on the one hand an energy forecast and on the other a multi-horizon forecast. The comparison between the developed method and the reference method, namely the persistence method, shows an improvement of the quality of the forecasts.

Keywords: Quality check, calibration, forecasting, Kalman model, global horizontal irradiance, Helioclim3.

Table des matières

Introduction générale	15
Chapitre I - Présentation de l'organisme d'accueil et Green Energy Park	18
I.1. Présentation de l'entreprise.....	18
I.2. Mission de l'institut.....	18
I.3. Les grands projets pilotes d'IRESSEN	18
I.4. Présentation de la plateforme :	19
I.5. Les grands projets pilotes de la plateforme	20
I.6. Contexte générale du projet de stage.....	21
Chapitre II - Le rayonnement & Gisement solaire: Généralités	23
II.1. Introduction.....	23
II.2. Le rayonnement solaire	23
II.3. La géométrie solaire.....	24
II.2.1. Distance Terre-Soleil.....	24
II.2.2. Les coordonnées géographiques	25
II.2.3. Coordonnées horaires	25
II.2.4. Coordonnées horizontales.....	26
II.4. Propagation du rayonnement dans l'atmosphère.....	27
II.3.1. Le rayonnement extra-terrestre.....	27
II.3.2. Extinction atmosphérique du rayonnement solaire	28
II.5. Les composantes du rayonnement solaire	28
II.4.1. Rayonnement solaire direct	29
II.4.2. Rayonnement diffus.....	29
II.4.3. Rayonnement global	30
II.4.4. La fraction d'irradiation.....	30
II.6. Mesure du rayonnement solaire	30
II.5.1. Pyranomètre à thermopile.....	30

II.5.2.	Pyrhéliomètre	31
II.5.3.	Pyranomètre ombragé.....	31
II.5.4.	Site d'étude: IRESEN.....	32
II.7.	<i>Le gisement solaire marocain</i>	32
II.6.1.	Gisement solaire au Maroc.....	32
II.6.2.	Le développement de l'énergie solaire au Maroc.....	32
II.8.	<i>Conclusion</i>	33
Chapitre III - Contrôle de qualité et calibration		35
Partie I : Contrôle de qualité		35
III.1.	<i>Introduction</i>	35
III.2.	<i>Site d'étude</i>	35
III.2.1.	Analyse des données climatiques.....	35
a)	La température	35
b)	Précipitation.....	35
c)	L'humidité relative de l'air	36
d)	La vitesse du vent	36
III.3.	<i>Procédure de contrôle de qualité</i>	37
III.3.1.	Inspection visuelle des données	38
a)	Données manquantes	38
III.3.2.	Le test des limites de l'enveloppe	39
III.3.3.	Test des conditions extrêmes.....	39
III.3.4.	Cohérence des composantes.....	40
III.4.	<i>Contrôle de qualité des données du site d'étude</i>	40
III.4.1.	Inspection visuelle et valeurs manquantes	40
III.4.2.	Contrôle de qualité du rayonnement global GHI	42
a)	Test de l'enveloppe pour les valeurs journalières	43
b)	Test des conditions extrêmes	44

c)	Test de cohérence.....	45
d)	Test de valeur de K	45
III.4.3.	Température, humidité et vitesse du vent.....	46
III.4.4.	Classification de l'ensoleillement	47
III.4.5.	Sources des problèmes rencontrés.....	47
a)	Intervention artificielle sur le signal DNI (nettoyage)	47
b)	Problème de la rosée	48
III.4.6.	Comparaison des données avant et après le contrôle de qualité	48
III.2.1.	Conclusion	49
Partie II : Calibration		50
III.5.	<i>Introduction.....</i>	<i>50</i>
III.6.	<i>Ensembles de données dérivés des satellites.....</i>	<i>50</i>
III.7.	<i>Adaptation des données satellitaires.....</i>	<i>50</i>
III.7.1.	Méthodes statistiques	51
a)	Élimination des biais par adaptation linéaire	51
b)	Régression linéaire.....	51
III.7.2.	Fonction de distribution cumulative.....	51
III.8.	<i>Méthodes d'évaluation.....</i>	<i>51</i>
III.8.1.	Les indicateurs statistiques.....	52
III.9.	<i>Description et application de la méthode de calibration.....</i>	<i>53</i>
III.9.1.	Calibration de l'indice de clarté	53
III.9.2.	Adaptation linéaire du GHI journalier.....	54
III.9.3.	Calibration du GHI horaire	54
III.9.4.	Application de la fonction de distribution cumulative	55
a)	Le paramètre KSI.....	56
b)	Le paramètre Over	57
III.10.	<i>Conclusion.....</i>	<i>58</i>

Chapitre IV - Modèles de prévision du rayonnement solaire	60
<i>IV.1. Introduction.....</i>	60
<i>IV.2. Les méthodes de prédiction à horizon.....</i>	60
IV.2.1. Les séries temporelles	60
IV.2.2. Modèles statistiques	61
a) Modèle de persistance et de climatologie	61
IV.2.3. Les images hémisphériques.....	61
IV.2.4. Les modèles de Prévision Numérique de Temps PNT	61
IV.2.5. La mesure du rayonnement solaire par satellite	62
<i>IV.3. Filtre de Kalman</i>	62
IV.3.1. Fonctionnement du filtre de Kalman.....	63
IV.3.2. Prévision basée sur le modèle d'état	63
<i>IV.4. Mise en place du modèle de Kalman.....</i>	64
IV.4.1. Algorithme du modèle de Kalman	64
IV.4.2. Modèle de Kalman	65
IV.4.3. Identification des entrées pertinentes	65
IV.4.4. Initialisation du filtre.....	65
<i>IV.5. Conclusion.....</i>	66
Chapitre V - Résultats et discussions	68
<i>V.1. Introduction</i>	68
<i>V.2. Analyse de la série temporelle.....</i>	68
<i>V.3. Performances des prévisions à court terme.....</i>	69
V.3.1. Prévisions avec le modèle de persistance	69
V.3.2. Modèle de Kalman	69
<i>V.4. Conclusion.....</i>	73
Conclusion générale et perspectives	74
Annexe.....	76

Bibliographie..... 77

Table des figures

Figure 1: A gauche : liste des fondateurs d'IRESSEN et à droite environnement d'IRESSEN [4].....	18
Figure 2: Vue en 3D de la plateforme d'IRESSEN [4].	19
Figure 3: La répartition spectrale du rayonnement solaire [7].	24
Figure 4: Mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil [8]	24
Figure 5 : Coordonnées géographiques [7]	25
Figure 6: Coordonnées horaires [7]	26
Figure 7: Système de coordonnées horizontales [7].	27
Figure 8: Interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère terrestre dans l'atmosphère (les chiffres sont des pourcentages) [8].	28
Figure 9: Les différents types du rayonnement solaire [12].	29
Figure 10 : Eclairement solaire d'un capteur plan horizontal [8].	29
Figure 11: Pyranomètre à thermopile [18].	31
Figure 12: Pyrhéliomètre [20].	31
Figure 13: Pyranomètre à bille (gauche), Pyranomètre à bande (droite) [21].	31
Figure 14: Données climatiques mesurées à la station météorologique de Green Energy Parck de Benguerir. ...	36
Figure 15: Les variations mensuelles : Température, précipitation, humidité et rosée du vent pour la zone d'étude	37
Figure 16: L'organigramme de la procédure de remplissage des données manquantes.	38
Figure 17: Vue en 2D du global rayonnement horizontale.	41
Figure 18: Vérifications des conditions climatiques avant l'interpolation.	41
Figure 19: Vue en 2-D du rayonnement global sans valeurs manquantes.	42
Figure 20: Données mensuelles horaire avant et après interpolation.	42
Figure 21: Vérification des limites de l'enveloppe pour le rayonnement global.	43
Figure 22: Vérification des limites pour les valeurs horaires après remplissage des données manquantes.	43
Figure 23: Test des conditions extrêmes pour GHI journalier et horaire.	44
Figure 24: Contrôle de qualité des valeurs mensuelles.	44
Figure 25: Test de cohérence.	45

<i>Figure 26: Vérification des limites pour les valeurs de K.</i>	<i>46</i>
<i>Figure 27: Vérification des limites (Température, Humidité et vitesse du vent).</i>	<i>46</i>
<i>Figure 28: Présentation de l'ensoleillement pour chaque classe.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 29: Visualisation des données du DNI erronées à cause de la rosée et le nettoyage [28].....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 30: Scatterogrammes du GHI horaire avant et après contrôle de qualité.</i>	<i>49</i>
<i>Figure 31: GHI journalier avant (gauche) et après (droite) la calibration.</i>	<i>53</i>
<i>Figure 32: GHI journalier obtenu après la correction.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 33: GHI horaire après calibration.</i>	<i>55</i>
<i>Figure 34: GHI mensuelles avant (gauche) et après (droite) calibration.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 35: CDFs de GHI sol et HC3 (gauche) et l'erreur entre les deux CDFs.</i>	<i>56</i>
<i>Figure 36: CDFs et erreur entre GHI sol et HC3 après la correction.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 37: Imageur du Ciel Total [10].....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 38: Classification de différentes méthodes de prévision selon la résolution temporelle et spatiale [2].....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 39: Algorithme du filtre de Kalman</i>	<i>65</i>
<i>Figure 40: Représentation du rayonnement globale horizontal horaire, pour le site de Benguerir entre mars 2015 et février 2016.</i>	<i>68</i>
<i>Figure 41: Résultats de prévision avec la méthode de persistance.</i>	<i>69</i>
<i>Figure 42: Résultats du filtre de Kalman pour des conditions initiales faibles.</i>	<i>70</i>
<i>Figure 43: Prévision h+1 avec Kalman pour une journée claire (à gauche) pour une journée non clair et variable (à droite).....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 44: Irradiation solaire prévue avec le filtre de Kalman pour une journée ensoleillé (à gauche) et une journée variable (à droite).....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 45: Exemple d'une journée de mesure pour chaque méthode.</i>	<i>72</i>

Liste des tableaux

Tableau 1: Projet marocain d'énergie solaire.	32
Tableau 2: Test des limites de l'enveloppe.	39
Tableau 3: Test des conditions extrêmes.....	39
Tableau 4: Comparasion des performances pour une journée claire	72
Tableau 5: Comparaison des performances pour une journée non claire et variable.....	72

Table des acronymes

BSRN	Basline Surface Radiation Network
CC	Coefficient de Corrélation
CDF	Cumulative Distribution Function
CDF	Cumulative Distribution Function
CNESTEN	Centre National de l'Energie des Sciences et des Techniques Nucléaires
CPV	Concentrator Photovoltaics
CSP	Concentrated solar power
DHI	Diffuse Horizontal Irradiance
DNI	Direct Normal Irradiance
GEP	Green Energy Parck
GHI	Global Horizontal Irradiance
HC3V4	Helioclim-3 Version 4
IRESEN	Institut de recherche en énergie solaire et énergies nouvelles
KSI	Kolmogorov–Smirnov test Integra
MASEN	Moroccan Agency For Solar Energy
MBE	Mean Bias Error
OCP	Office Chérifien des Phosphates
ONEE	Office National de l'Electricité et de l'eau potable
PNT	Prévision Numérique du Temps
RMSE	Root Mean Squared Error
STD	Stendard Deviatiaion
SZA	Solar Zenithale Angle
TMY	Typical Metrological Year
TSI	Total-Sky Imager
TSV	Temps Solaire vrai
WRF	Weather Research and Forcasting

Introduction générale

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles sont limitées. La croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles, et la détérioration de l'environnement causée par ces types d'énergie ont incité le développement de nouvelles sources d'énergies dites renouvelables, assurant ainsi une durabilité et une protection qui est devenue un point très important.

L'exploitation de l'énergie solaire se heurte cependant certains défis techniques. Au même titre que l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque est une énergie dite intermittente : sa disponibilité varie fortement sans possibilité de contrôle. Cette intermittence représente un défi majeur à son intégration dans le réseau électrique et nécessite l'introduction de nouvelles méthodes pour équilibrer l'offre et la demande [1].

La problématique de l'intégration de la production des énergies renouvelables est encore plus sensible dans les régions insulaires, vu que les milieux insulaires présentent la particularité de former des systèmes isolés ne bénéficiant pas, ou très peu, d'interconnexions à un réseau électrique continental. L'électricité doit être produite sur place et l'équilibre offre-demande est fragile, et pour illustrer ce phénomène on peut rappeler que l'énergie solaire ne peut être exploitée la nuit et que son potentiel est plus faible en hiver qu'en été [1].

Les principales pistes envisagées pour pallier cette limitation sont les suivantes :

- **Le stockage** : le stockage de l'énergie permettrait de stabiliser la production des centrales photovoltaïques en stockant l'électricité lors des périodes de forte production pour la restituer pendant les chutes de production. Cependant, le stockage d'importantes quantités d'énergie reste un challenge à l'heure actuelle.

- **La prévision** : la prévision de la production des énergies intermittentes permettrait d'anticiper la disponibilité des sources de production et donc de faciliter la gestion du réseau.

La production d'énergie électrique par un système photovoltaïque est dépendante de nombreux facteurs. L'inclinaison des panneaux, leur technologie et leur température influent sur la production, mais le rayonnement solaire reçu reste le facteur principal de variation. Nous choisissons dans le cadre de ce projet de prévoir le rayonnement solaire plus tôt que la production elle-même, car la prévision photovoltaïque découle directement de celle du rayonnement solaire global. On définit comme variable principale d'intérêt le GHI (Global Horizontal Irradiation) qui représente le rayonnement global horizontal reçu au niveau du sol.

La prévision de GHI est un domaine de recherche très actif à l'heure actuelle pour les raisons évoquées précédemment. On distingue quatre grandes familles de méthodes selon les données utilisées et l'horizon de prévision. Il existe plusieurs horizons : la ressource qui sera disponible les jours suivants ($j+1$, $j+2$ et $j+3$), le lendemain par pas horaire ($h+24$), dans 1 heure ($h+1$), et dans 5 min ($m+5$). Ces différents horizons permettent d'appréhender les différents aspects de la prédiction : le moyen terme, le court terme et le très court terme [2]. Ce sont successivement :

- **Les méthodes de Prévision Numérique du Temps (PNT).**
- **Les méthodes de traitement statistique des images de satellites.**

- **Les méthodes d'imagerie du ciel à partir du sol.**
- **Les modèles statistiques de séries temporelles et l'intelligence artificielle (Réseaux de neurones, etc.)**

Les mesures au sol avec des instruments appropriés peuvent être d'une qualité beaucoup plus élevée vu la calibration et la maintenance de ces instruments. Cependant, les stations de mesure sont rares et disponibles pour un site spécifique et pour de courtes périodes, en raison des moyens financiers. D'autre part, les bases de données satellitaires peuvent offrir une longue couverture de temps du rayonnement solaire, mais elles sont relativement peu précises en raison de la présence de plusieurs composants qui affectent la dérivation du rayonnement à partir des données satellitaires.

Les mesures du rayonnement solaire au sol peuvent être utilisées pour corriger les données du rayonnement solaire dérivé des satellites. L'objectif de ces corrections est de minimiser le biais moyen (MBE pour Mean Bias Error) et d'améliorer la distribution des fréquences des séries chronologiques dérivées du satellite [3].

Organisation du rapport

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer la prévision du rayonnement global horizontal (GHI) en milieu insulaire en vue d'anticiper les intermittences de la production photovoltaïque.

La problématique développée au cours de ce projet s'inscrit dans cette dynamique : Comment peut-on corriger les données sol (mesures pyranométriques), calibrer les données satellitaires dans le cadre d'améliorer les prévisions ? pour y répondre nous avons dans un premier temps de caractériser l'apport de chacune de ces sources d'information afin de les utiliser conjointement par la suite. Le rapport s'articule ainsi en quatre parties :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'organisme d'accueil IRESEN, et Green Energy Parck, lieu de mon stage.
- Le deuxième chapitre permet d'introduire les notions fondamentales à l'étude du GHI. Nous décrivons les processus physiques théoriques expliquant ses divers degrés de variabilité. A cet effet, nous rappelons les différentes interactions entre le sommet de l'atmosphère et le sol. Nous présentons ensuite le site d'étude retenu dans le cadre de l'étude, ainsi que les capteurs utilisés pour collecter les données du rayonnement. Nous concluons ce chapitre en présentant le gisement solaire marocain.
- Le troisième chapitre est consacré au contrôle de qualité des données sol afin d'établir un jeu de données permettant de calibrer des données satellitaires. Nous introduisons dans la première partie un état de l'art des méthodes utilisées dans divers projets de contrôle de qualité des données. la seconde partie est consacrée à l'utilisation des données sol de haute qualité pour la calibration des données satellitaires, nous montrons dans chaque partie les résultats obtenus.
- Le quatrième chapitre présente l'état de l'art des méthodes de prévision. Une étude bibliographique a permis de déterminer les domaines de performance suivant la résolution spatiale et temporelle et l'horizon de prévision.
- Le dernier chapitre traite la méthodologie de prédiction adoptée dans ce travail. La première partie porte sur l'utilisation de la méthode statistique de Kalman pour la prévision du rayonnement global. Dans la suite, nous dégagerons les résultats issus du modèle. En dernier lieu, nous présentons les conclusions de nos travaux, à partir de ces conclusions, nous verrons quelles perspectives sont envisageables et intéressantes pour la poursuite de ces travaux.

Chapitre I

Présentation de Green Energy Park

Chapitre I - Présentation de l'organisme d'accueil et Green Energy Park

I.1. Présentation de l'entreprise

L'IRESEN (Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles) est un institut de recherche créé en 2011 par le Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, la SIE, l'ADEREE, MASEN, l'ONEE, l'OCP, MANAGEM, l'ONHYM, le CNESTEN... (Figure. 1), et la Fédération de l'Énergie pour accompagner la stratégie énergétique nationale en soutenant la R&D appliquée dans le domaine de l'énergie solaire et des énergies nouvelles. IRESEN se positionne au niveau de la recherche appliquée et technologique dans le secteur de l'énergie solaire et énergies nouvelles pour un transfert de technologie plus rapide et une transposition des résultats de la recherche en produits innovateurs [4].

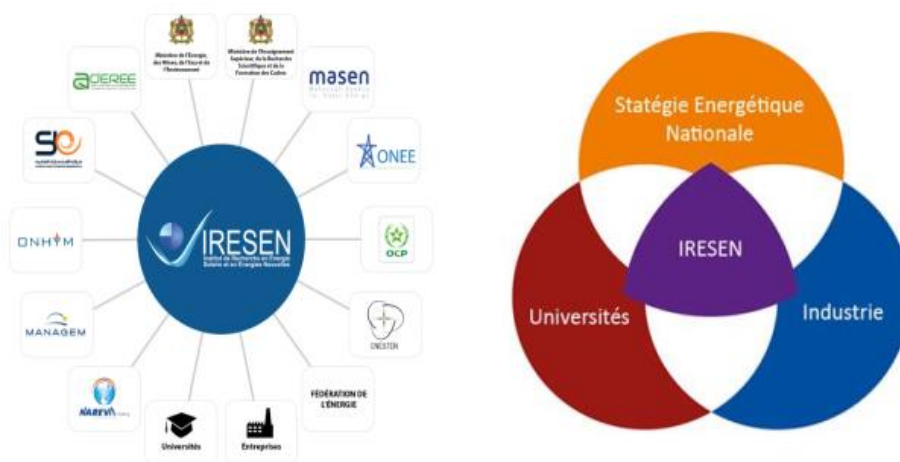


Figure 1: A gauche : liste des fondateurs d'IRESEN et à droite environnement d'IRESEN [4].

I.2. Mission de l'institut

- Soutien à la création d'un environnement favorable à la Recherche ;
- Création de synergies entre les universités et les entreprises ;
- Acquisition du savoir-faire et développement de l'expertise de l'IRESEN et du réseau ; de partenaires (Universités et Entreprises) ;
- Et Création de valeur.

La structure de l'IRESEN lui permet de mener au mieux ses missions, et ce selon deux approches différentes et complémentaires :

- IRESEN – Agence de Moyens ;
- IRESEN – Centre de Recherche.

I.3. Les grands projets pilotes d'IRESEN

Au sein de la plateforme Green Energy Park de Ben Guerir IRESEN a mis en place un ensemble des projets pilotes [5] :

- **Centrale (CSP-ORC) :** Développement et installation d'une nouvelle génération centrale thermo-solaire modulaire de petite capacité 1MW, cette puissance sera injectée au réseau de l'OCP ;
- **Centrale PV :** installation d'une centrale pilote photovoltaïque utilise 5 technologies différentes pour la caractérisation des performances et l'identification de la complémentarité climatique marocaine ;
- **Projet de dessalement (aquasolar) :** couplage de l'énergie solaire à concentration avec le dessalement de l'eau au Maroc ;
- **Projet MCP :** Etude et développement du stockage thermique solaire par fusion des MCP et application au chauffage passif de l'habitat au Maroc ;
- **Projet SFlash :** Développement d'un séchage Flash solaire des phosphates
- **Projet MicroOnduleurPV:** Développement d'un système de transfert et d'optimisation d'énergie solaire PV ;
- **Projet Digesteur :** Valorisation des effluents organiques issus des industries de papier carton au Maroc par méthanisation : réalisation d'un digesteur pilote couplé à l'énergie solaire ;
- **Projet MCS Bitume :** Maintien en chauffe d'un stockage de bitume par des panneaux solaires à haute énergie.

I.4.Présentation de la plateforme :

L'IRESEN et le groupe OCP se sont alliés pour créer une plateforme de recherche et de formation en énergies renouvelables « Green Energy Park » dans la ville verte Mohammed VI, à Ben Guérir sur une superficie de huit hectares, en face de l'Université Mohammed VI polytechnique [5].

Cette première plateforme en Afrique, modèle unique en son genre, permettra d'une part, la création de synergies et la mutualisation des infrastructures de plusieurs institutions marocaines de recherche afin de créer une masse critique et arriver à l'excellence, et d'autre part l'acquisition du savoir et du savoir-faire par les différentes universités partenaires ainsi que les industriels marocains. Sa superficie totale est de huit hectares, dont 3100 m² de laboratoires (figure 2).



Figure 2: Vue en 3D de la plateforme d'IRESEN [4].

I.5. Les grands projets pilotes de la plateforme

- **Centrale CSP (CHAMS1)** : L'objectif du projet CHAMS 1 est le développement d'un champ solaire thermodynamique nouvelle génération, basse concentration et utilisant un champ solaire de type Fresnel innovant [4].



- **Centrale PV** : Installation d'une centrale pilote photovoltaïque 120 – 200KW_c, utilisant 5 technologies différentes pour la caractérisation des performances et l'identification de la complémentarité des technologies existantes sous les conditions climatiques marocaines [4].



- **Centrale SUNPOWER C7** : Installation d'une nouvelle génération de CPV à basse concentration, pour mettre en évidence les preuves de ce nouveau concept et pour comparer sa performance à celle des technologies PV conventionnel [4].



- **Centrale HCPV** : Mise en place d'un système CPV à haute concentration combiné à un système d'accumulateurs, pour l'étude et la caractérisation de ses performances [4].



I.6. Contexte générale du projet de stage

Parmi les buts de Green Energy Parck la construction d'une base de données précises, sûres, complètes, et certifiées de qualité. Ce but se poursuit selon quatre axes ou sous-tâches dans les domaines de la ressource solaire, la standardisation et l'intégration des banques de données complémentaires aux différents sets de données d'irradiance, de la prévision à court et moyen terme, ainsi que l'amélioration des modèles d'évaluation de la ressource basé sur des données satellitaires.

Les responsables au sein de Green Energy Parck, se sont rendu compte qu'il fallait approfondir les connaissances de certains aspects de la ressource solaire, notamment la variabilité au pas de temps, la « banquabilité » des séries de données pour répondre aux différents investisseurs, la précision des prévisions de la ressource à court et moyen terme, ainsi que l'amélioration des différents modèles d'évaluation de la ressource à partir des mesures satellitaires.

C'est dans ce cadre que s'inscrit mon projet de fin d'étude, Les différents axes de ce projet se déclinent en sous tâches :

- Compréhension de la variabilité de la ressource solaire à court terme pour faciliter son intégration dans les réseaux électriques.
- Contrôle de qualité de l'ensemble de données d'irradiation.
- Amélioration des différents modèles d'évaluation de la ressource solaire à partir des mesures satellitaires.
- Génération d'une TMY, à partir de quatorze ans de données de la ressource solaire estimée par les satellites.

Chapitre II

Le rayonnement : Généralités & Gisement solaire marocain

Chapitre II - Le rayonnement & Gisement solaire: Généralités

II.1. Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les systèmes photovoltaïques nécessitent une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système [6].

Ce chapitre est ainsi consacré pour donner des rappels sur l'énergie solaire, les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol. Nous décrivons ensuite les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base, le mouvement de la Terre autour du soleil et les différents types de rayonnements.

II.2. Le rayonnement solaire

La terre capte, dans sa haute atmosphère, une énergie correspondante à son disque vue du soleil, soit environ 1367 W/m^2 , relativement indépendante du lieu où l'on est sur la terre. Ces 1367 W/m^2 vont être absorbés partiellement par l'atmosphère. Cette énergie, pour peu qu'on la capte perpendiculairement au rayon lumineux, ne dépend pratiquement que de l'épaisseur de l'atmosphère traversée (de l'ozone, de la vapeur d'eau, du CO_2 ...), et donc essentiellement de l'altitude et du lieu où l'on est [7].

- Rayonnement solaire en atmosphère terrestre

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétiques solaire. Il est caractérisé par une longueur d'onde comprise entre $0,2$ et $2,5 \mu\text{m}$, il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de $0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$) [7].

D'après la figure 3. Nous constatons qu'en traversant l'atmosphère terrestre, et avant d'atteindre le sol, le rayonnement incident est fortement influencé par l'atmosphère terrestre, à travers des interactions de type absorption et réflexion [7] :

- **Rayonnement direct** : c'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion par atmosphère ;
- **Rayonnement diffus** : c'est le rayonnement diffusé par les différents gaz constituant l'atmosphère ;
- **Albédo** : c'est la partie réfléchiée par le sol.

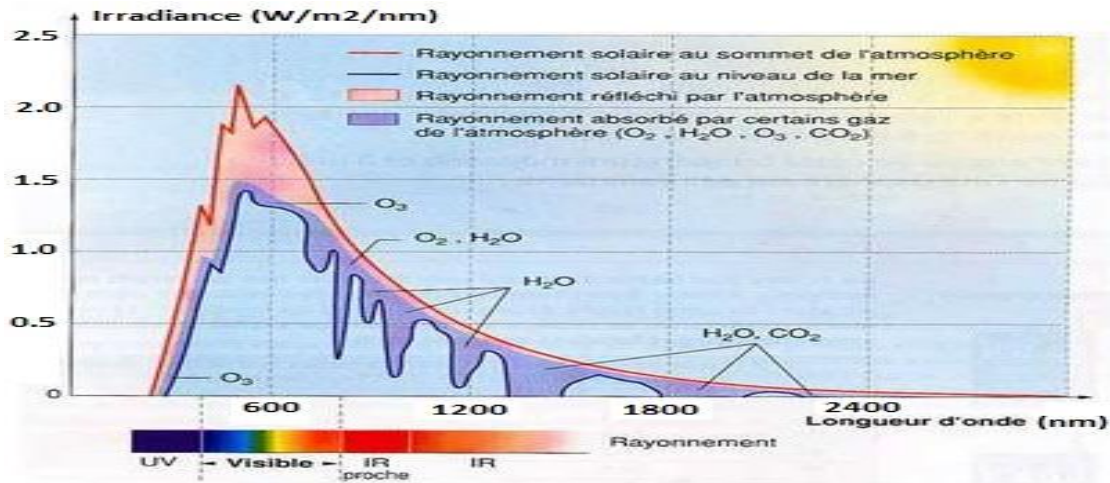


Figure 3: La répartition spectrale du rayonnement solaire [7].

II.3. La géométrie solaire

La valeur d'éclairement en un point du sol et à un instant donné dépend de la position du Soleil, ainsi que l'état optique de l'atmosphère, c'est pour cela il convient de formuler des définitions et éléments essentiels à la bonne compréhension du rayonnement solaire par le biais de méthodes de calcul du bilan de ce rayonnement en un point de la surface terrestre [8].

II.2.1. Distance Terre-Soleil

La terre subit deux types de déplacement aux répercussions totalement différents. Le premier est lié au mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil de périodicité annuelle, qui permet de comprendre le phénomène des saisons. Le second mouvement est lié à la rotation de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles de périodicité de 24 heures. Cette dernière est à l'origine de la succession des jours et des nuits. Il est bien sûr possible de déterminer de façon précise la position du soleil en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre. La terre tourne autour du Soleil selon une trajectoire elliptique d'excentricité 0,0167, comme le montre la Figure 4 [8].

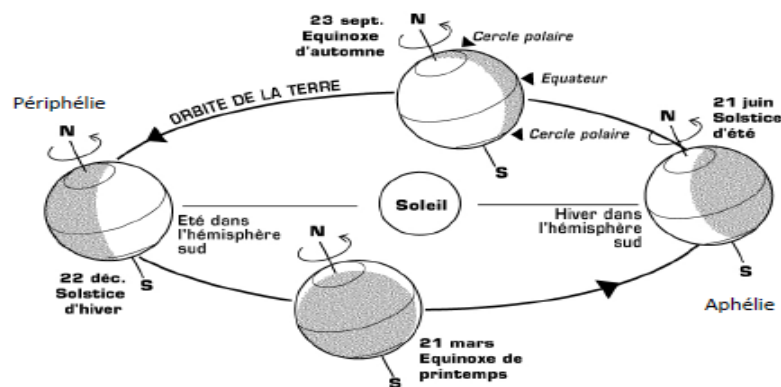


Figure 4: Mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil [8]

II.2.2. Les coordonnées géographiques

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

- La latitude θ

C'est l'angle θ que fait la verticale du lieu avec le régime équatorial (figure 5). Si $\theta > 0$, le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud [7].

- La longitude φ

C'est l'angle φ formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré (figure 5). La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'est). Comme à la terre avec 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360 °), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et ainsi, chaque degré de longitude représente 4 minutes [7].

- L'altitude

C'est l'élévation du point de mesure par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m) [7].

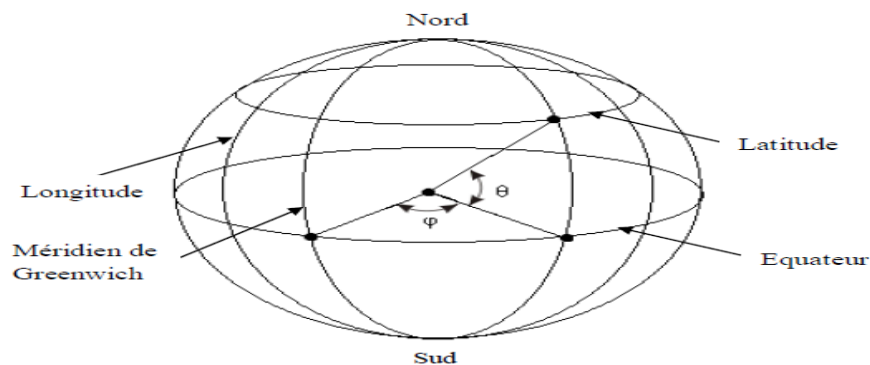


Figure 5 : Coordonnées géographiques [7]

La position du soleil dans la voute céleste est repérée à tout instant de la journée par deux systèmes de coordonnées (les coordonnées horaires et les coordonnées horizontales) [8] :

II.2.3. Coordonnées horaires

- Déclinaison solaire δ

C'est l'angle formé par la direction du soleil (la droite OM) et le plan équatorial terrestre, elle varie de façon sinusoïdale au cours de l'année. Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [9].

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} (J + 284) \right), \quad \text{Eq. 1}$$

avec J le numéro du jour de l'année à compter à partir du 1^{er} janvier.

- Angle horaire du soleil ω

Le cercle horaire qui contient le zénith de l'observateur est appelé méridien. L'angle horaire est l'angle entre le méridien et le cercle horaire qui contient l'astre M. C'est l'angle avec lequel la terre doit tourner pour amener le méridien du point (lieu) considéré directement sous le soleil. Cet angle horaire est négatif si le temps solaire est inférieur à 12 h. L'angle horaire est donné par la relation suivante [7] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad \text{Eq. 2}$$

avec TSV le temps solaire vrai exprimé en heure.

La Figure 6 illustre l'ensemble du système de coordonnées horaires

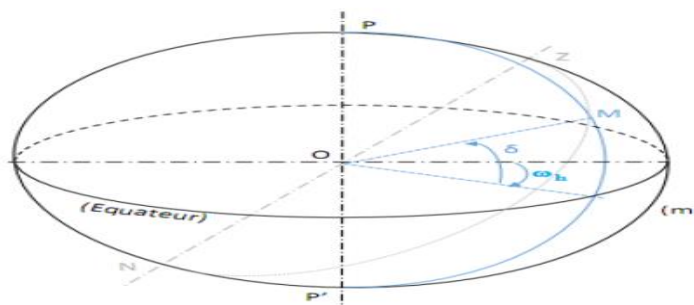


Figure 6: Coordonnées horaires [7]

II.2.4. Coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal du lieu d'observation (H) et le demi-méridien sud (m). Un lieu est repéré dans ce système par ces composants [8] :

- La hauteur du soleil (h)

La hauteur du soleil est l'angle en degré qui sépare l'astre M du plan horizontal (H). Elle est donnée par la relation suivante [8] :

$$\sin(h) = \sin\theta\sin\delta + \cos\theta\cos\delta\cos\omega, \quad \text{Eq. 3}$$

où h est égal à 0° au lever et au coucher du soleil, sa valeur est maximale à midi temps solaire vrai.

- Azimut solaire

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud locale. L'azimut est compté négativement vers l'Est et positivement vers l'Ouest. Il est donné par la relation suivante [8] :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(h)}{\cos(h)} \quad \text{Eq. 4}$$

- Angle zénithal θ_s

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. IL varie entre 0 et 90° [10],

$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi) \quad \text{Eq. 5}$$

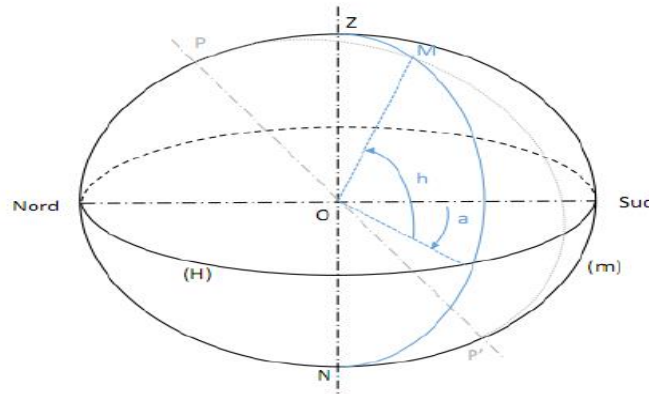


Figure 7: Système de coordonnées horizontales [7].

II.4. Propagation du rayonnement dans l'atmosphère

II.3.1. Le rayonnement extra-terrestre

Tout ce que nous venons de détailler permet de dégager des éléments essentiels concernant le rayonnement global. En effet, il est désormais possible, sous condition d'introduire la constante solaire, de quantifier le rayonnement à l'entrée de l'atmosphère habituellement nommé «extra-terrestre » ou « hors atmosphère » que l'on notera I_N dans la suite. Ce rayonnement ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographiques [10].

La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m^2 située à une distance de 1 ua (distance moyenne Terre-Soleil) et exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence de l'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de l'énergie au sommet de l'atmosphère. Sa valeur est de 1367 Wm^{-2} [10].

Pour le jour n , le rayonnement extraterrestre normal $I_N (\text{Mj.m}^{-2}.\text{jour}^{-1})$ est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$I_N = I_0 \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{360J}{365} \right) \right], \quad \text{Eq. 6}$$

avec J numéro du jour de l'année (1 pour le 1^{er} janvier)

II.3.2. Extinction atmosphérique du rayonnement solaire

L'extinction (ou atténuation) atmosphérique résulte de la superposition de deux processus physiques distincts qui sont l'absorption et la diffusion. Ces processus s'appliquent aussi bien aux molécules qu'aux aérosols, brumes, brouillards et pluie [11].

L'absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques est intimement liée à leurs caractéristiques énergétiques. Un photon peut être absorbé lorsque son énergie correspond à une transition entre le niveau fondamental et un des états excités des atomes des composants de l'atmosphère, essentiellement les composants gazeux telles que la vapeur d'eau H₂O, le gaz carbonique CO₂ et l'oxygène O₂ [11].

La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses, les gouttelettes et les aérosols dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde [7, 11].

L'essentiel des interactions entre l'atmosphère et le rayonnement solaire est principalement influencée par les éléments que l'on vient de présenter, à savoir : les nuages, les aérosols et les gaz atmosphériques.

Alors une fois interagir avec les constituants de l'atmosphère le rayonnement solaire peut être réfléchi, absorbé ou diffusé. La contribution de ces différents phénomènes est illustrée par la Figure 8.

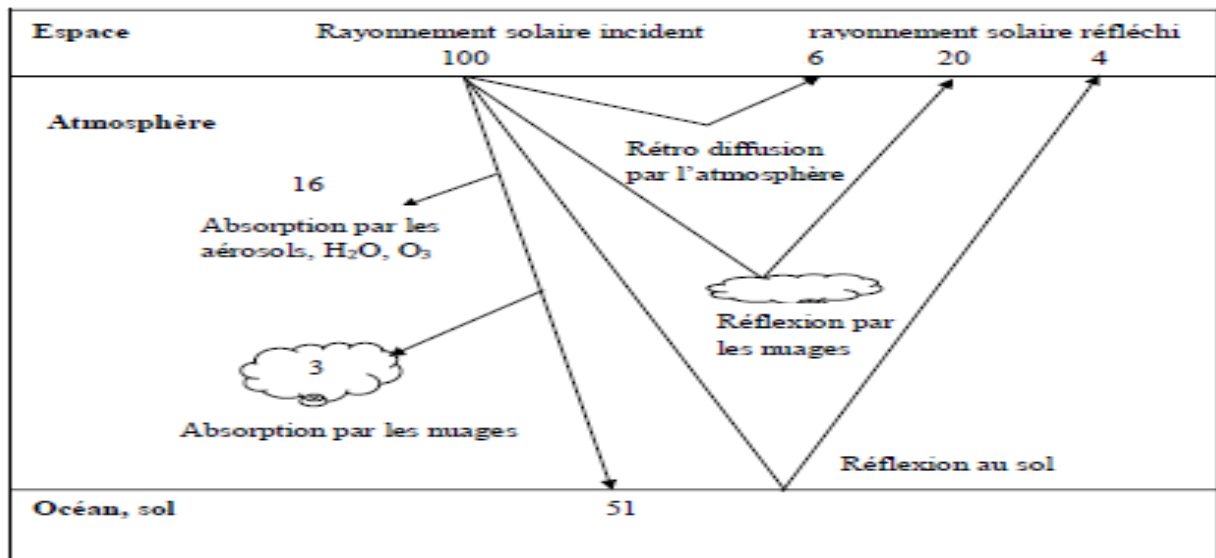


Figure 8: Interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère terrestre dans l'atmosphère (les chiffres sont des pourcentages) [8].

II.5. Les composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire au niveau de sol se divise principalement en trois composantes bien distinctes, la composante solaire directe (BHI) et la composante diffuse (DHI). La somme de ces deux rayonnements donne naissance au rayonnement global (GHI) [12].

La figure 9 présente les différents composants du rayonnement solaire.

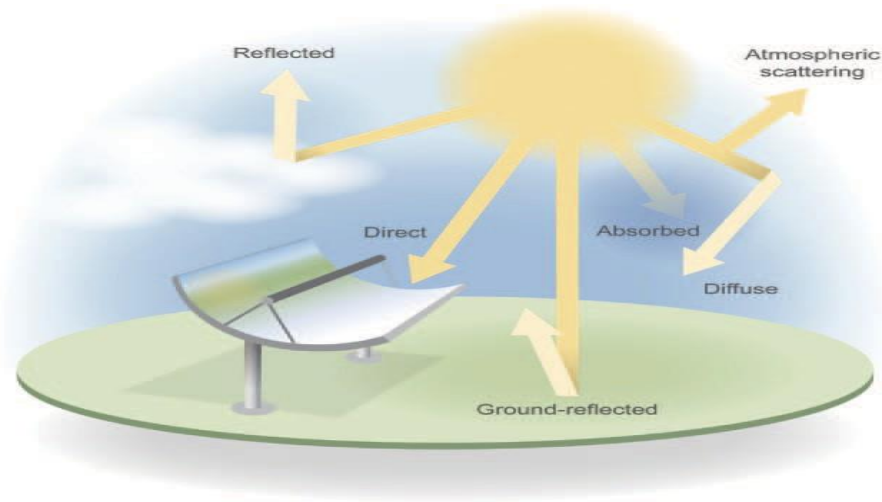


Figure 9: Les différents types du rayonnement solaire [12].

II.4.1. Rayonnement solaire direct

C'est le rayonnement qui provient du disque solaire et c'est celui d'un temps clair et ensoleillé. La composante directe représente le flux solaire qui atteint directement la surface quand celle-ci est exposée au soleil sans avoir subi de diffusion. Elle dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'inclinaison de la surface à l'instant considéré [13].

$$\begin{cases} BHI = DNI * \sin(h) \\ BHI = DNI * \cos(\theta_s) \end{cases} \quad \text{Eq. 7}$$

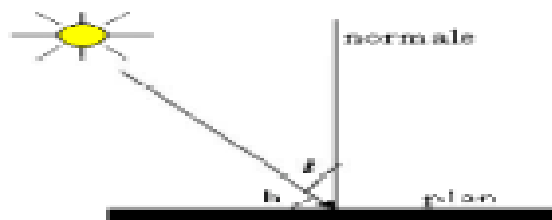


Figure 10 : Eclairage solaire d'un capteur plan horizontal [8].

II.4.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il est beaucoup plus difficile à analyser que le rayonnement direct. Tout d'abord, le sol réfléchit en moyenne le tiers de rayonnement qu'il reçoit et il faut tenir compte également de la diffusion de ce rayonnement réfléchi. C'est le rayonnement émis par les obstacles (nuage, sol, bâtiments, etc.) et provient de toutes les directions [13,14].

II.4.3. Rayonnement global

Le rayonnement global au sol est fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et diffus [15].

- Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit sous la forme suivante :

$$GHI = DNI \cdot \sin(h) + DHI \quad \text{Eq. 8}$$

II.4.4. La fraction d'irradiation

- Indice de ciel clair : $K_c = \frac{GHI}{GHI_c}$ Eq. 9

- Indice de clarté : $K_t = \frac{GHI}{GHI_{atm}}$ Eq. 10

Avec :

GHI_{atm} : Irradiation solaire globale sur plan horizontal hors atmosphère.

GHI_c : Irradiation solaire globale horaire sur plan horizontal hors atmosphère.

GHI : Irradiation solaire globale horaire sur plan horizontal au sol.

II.6. Mesure du rayonnement solaire

L'approche traditionnelle de la mesure de la ressource solaire consiste à utiliser des capteurs solaires au sol. Une variété de capteurs de mesure du rayonnement global et diffus est disponible chez un certain nombre de fabricants différents, associés à différentes implications en termes de précision et de coût. Les deux principales catégories de technologie sont les suivantes [10] :

II.5.1. Pyranomètre à thermopile

C'est le capteur le plus fréquemment utilisé pour mesurer le rayonnement global ou diffus. Il se compose d'une thermopile composée d'une série de thermocouples avec alternance des soudures chaudes et soudures froides [16].

Les pyranomètres ont une réponse spectrale comprise entre 335 et 2200 nm du spectre solaire qui inclut la bande de longueurs d'onde visibles [17].

- Une surface horizontale : mesure du rayonnement global sur l'horizontale (GHI),
- Un plan incliné : mesure du rayonnement global incliné (GTI).



Figure 11: Pyranomètre à thermopile [18].

II.5.2. Pyrhéliomètre

Un pyrhéliomètre est destiné à mesurer l'irradiation solaire directe. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir (donc très absorbante), fixé à un suiveur solaire automatique sur 2-axes [19].



Figure 12: Pyrhéliomètre [20].

II.5.3. Pyranomètre ombragé

Permet la mesure du rayonnement solaire diffus sur plan horizontal (*DHI*), ou sur plan incliné (*DTI*), il est constitué d'une thermopile avec une bande ou bille d'ombrage [21].



Figure 13: Pyranomètre à bille (gauche), Pyranomètre à bande (droite) [21].

II.5.4. Site d'étude: IRESEN

L'ensemble des données de rayonnement au sol utilisées dans cette étude a été acquis sur le site d'IRESEN. Ce site dispose de nombreux capteurs nécessaires à l'étude de l'atmosphère et plus particulièrement du rayonnement incident au sol.

II.7. Le gisement solaire marocain

La stratégie énergétique nationale a pour ambition de faire du Maroc un pays leader dans les énergies renouvelables, avec comme objectif une production électrique nationale assurée à 43% par les énergies renouvelables en 2020 (objectif initialement fixé à 42%), et à 52% en 2030. Dans ce contexte, le Plan Solaire Marocain prévoit le développement d'une capacité de 2000 MW d'énergie solaire à l'horizon 2020, ce qui correspond à 14% du mix de production électrique. Le développement d'une filière industrielle et des programmes de formation et de recherche est aussi prévu [22].

II.6.1. Gisement solaire au Maroc

Les sources d'énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans le bouquet énergétique mondial. Le Maroc ne fait pas exception à cette tendance et a l'avantage de jouir d'un potentiel particulièrement riche par rapport à d'autres pays. L'exploitation optimale du riche potentiel permettra de réduire la dépendance énergétique et assurer la stabilité du pays [23].

Le solaire est certainement la source d'énergie renouvelable la plus importante au Maroc. Avec plus de 3000 h/an d'ensoleillement, soit une irradiation de $\sim 5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$, le Maroc jouit d'un gisement solaire considérable. Cette source d'énergie constitue un potentiel particulièrement important surtout dans les régions mal desservies en capacité de production électrique [22].

II.6.2. Le développement de l'énergie solaire au Maroc

Le Projet Marocain de l'Energie Solaire est un projet de développement intégré visant la mise en place en 2020 d'une capacité de production électrique à partir de l'énergie solaire d'une capacité totale de 2 000 MW sur cinq sites (tableau 1) : Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Foug El Oued, Boujdour et Sebkhath Tah. Les deux technologies - Concentrated Solar Power (CSP) et Photovoltaïque sont envisagées pour ces différentes stations. Ce programme augmentera la part de l'énergie solaire dans la capacité électrique totale à 14% à l'horizon 2020 et évitera l'émission de 3,7 millions de tonnes de CO₂ par an [24].

Site	Production (GWh/an)	Puissance(MW)	Superficie (ha)	Rayonnement solaire direct (kWh/m ² /an)
Ouarzazate	1150	500	2500	2635
Ain Beni Mathar	835	400	2000	2290
Foug El Oued	1150	500	2500	2628
Boujdour	230	100	500	2642
Tarfaya	1040	500	2500	2140

Tableau 1: Projet marocain d'énergie solaire [24].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement, et nous avons fini par la présentation du gisement solaire marocain puis les capteurs de rayonnement utilisés ainsi que le site de mesures.

Chapitre III

Contrôle de qualité & Calibration

Chapitre III - Contrôle de qualité et calibration

Partie I : Contrôle de qualité

III.1. Introduction

L'irradiation solaire avec d'autres données météorologiques auxiliaires est à la base des études dans le cadre de développement de projets de centrales solaires. Les bases de données satellitaires peuvent offrir une longue couverture de temps du rayonnement solaire, mais ils sont relativement peu précis en raison de présence de plusieurs composants qui affectent la dérivation du rayonnement à partir des données satellitaires. La précision et la qualité des données dépendent fortement de la source.

Parmi les objectifs de notre étude est de faire une étude comparative entre les valeurs *GHI* estimées par Helioclim-3 et celles mesurées au niveau du sol dans Green Energy Parck, afin d'évaluer l'incertitude du *GHI* Helioclim-3, pour faire des données de mesures de haute précision sont nécessaires. C'est pour cela qu'il faut faire un contrôle de qualité des données disponibles au sol.

Différents tests existent pour vérifier la qualité des données et détecter des mesures influencées ou erronées. Nous allons présenter dans cette partie les différents tests de qualité et leurs applications aux données du sol.

III.2.Site d'étude

Avant de commencer la procédure de contrôle de qualité, l'identification de notre site d'étude est nécessaire.

Les données du rayonnement exploitées dans cette étude ont été mesurées à la station météorologique de Green Energy Parck. La station météorologique est localisée au sud du Maroc à la ville verte de Benguerir au point de coordonnées 23 .12°N ; -7.94° E.

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont, la température de l'air, l'humidité relative de l'air, les précipitations et la vitesse du vent. Elles ont été collectées auprès de la station météorologique Green Energy Parck. Les données utilisées couvrent la période du 01 mars 2015 au 29 février 2016. 01/03/2015 29/02/2016.

III.2.1. Analyse des données climatiques

a) La température

L'aperçu du climat montre que les températures moyennes mensuelles au niveau du Parck varient entre 13,6 °C (Mars) et 28,8 °C (Juillet). On constate qu'il fait chaud presque durant toute l'année. La température la plus élevée est enregistrée pour le mois de juillet. Nous signalons également que le site d'étude bénéficie d'un fort ensoleillement.

b) Précipitation

Les colonnes vertes montrent le nombre de jours des précipitations moyennes par mois. Une journée avec des précipitations est définie comme étant de plus de 2 mm, les précipitations sont en moyenne de 32 mm en hiver et 1 mm en été.

c) L'humidité relative de l'air

L'humidité relative s'exprime en pourcentage et se définit comme le rapport de la quantité d'eau effectivement contenue dans l'air et la capacité d'absorption à une température donnée. Les humidités relatives moyennes mensuelles durant la période d'étude varient entre 44 % (juillet) et 71 % (Mars). L'humidité relative est généralement supérieure à 40 % et varie relativement beaucoup au cours de l'année.

d) La vitesse du vent

La vitesse de vent est généralement faible, la plus grande valeur enregistrée est 10.9 m/s et comme on voit sur la rosée du vent, il y a beaucoup de bleu indiquant des faibles vitesses de vent.

Un exemple des valeurs journalières pour la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et la vitesse maximale sont représentés sur la figure suivante. Nous constatons que la température maximale est de 44.28°C et la minimal est de 2.63°C. Tandis que l'humidité relative varie entre 40 % et 100%, et la vitesse du vent atteint un maximum de 5,2 m/s.

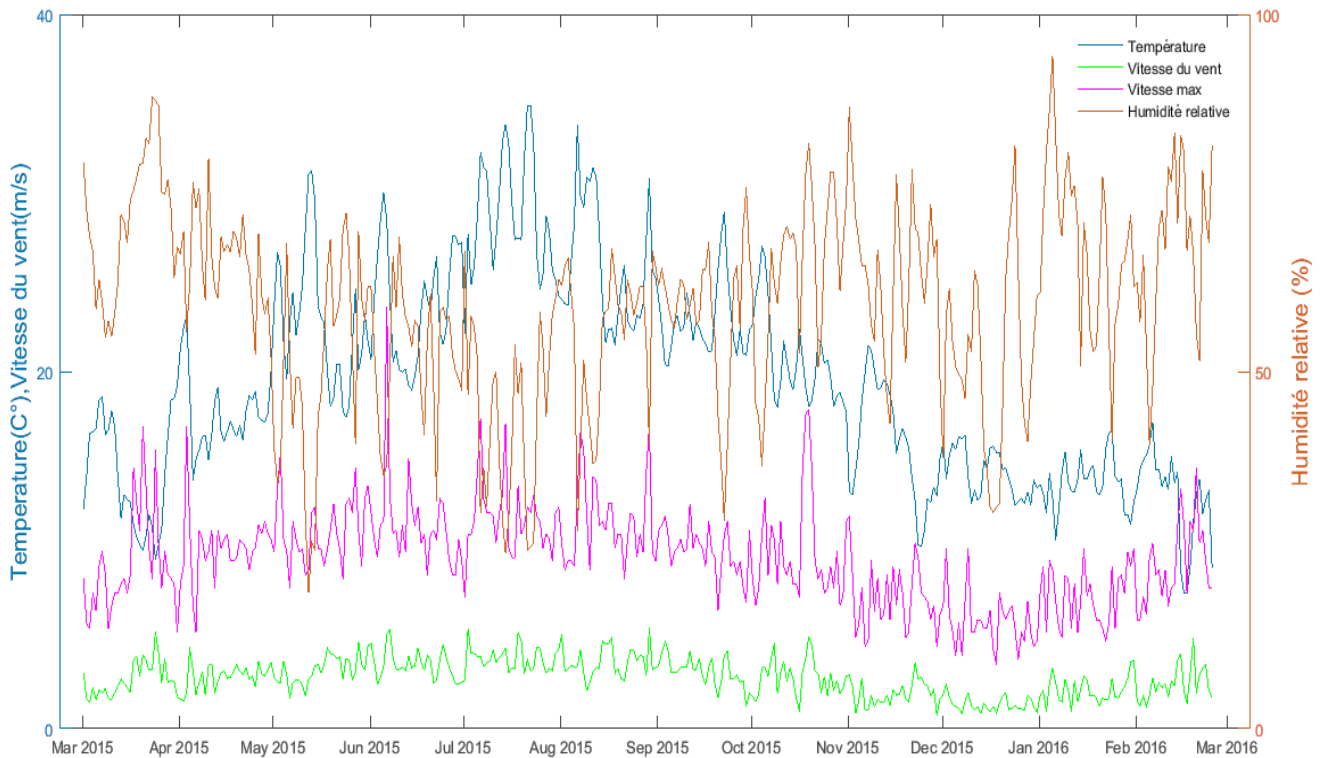


Figure 14: Données climatiques mesurées à la station météorologique de Green Energy Parck de Benguerir.

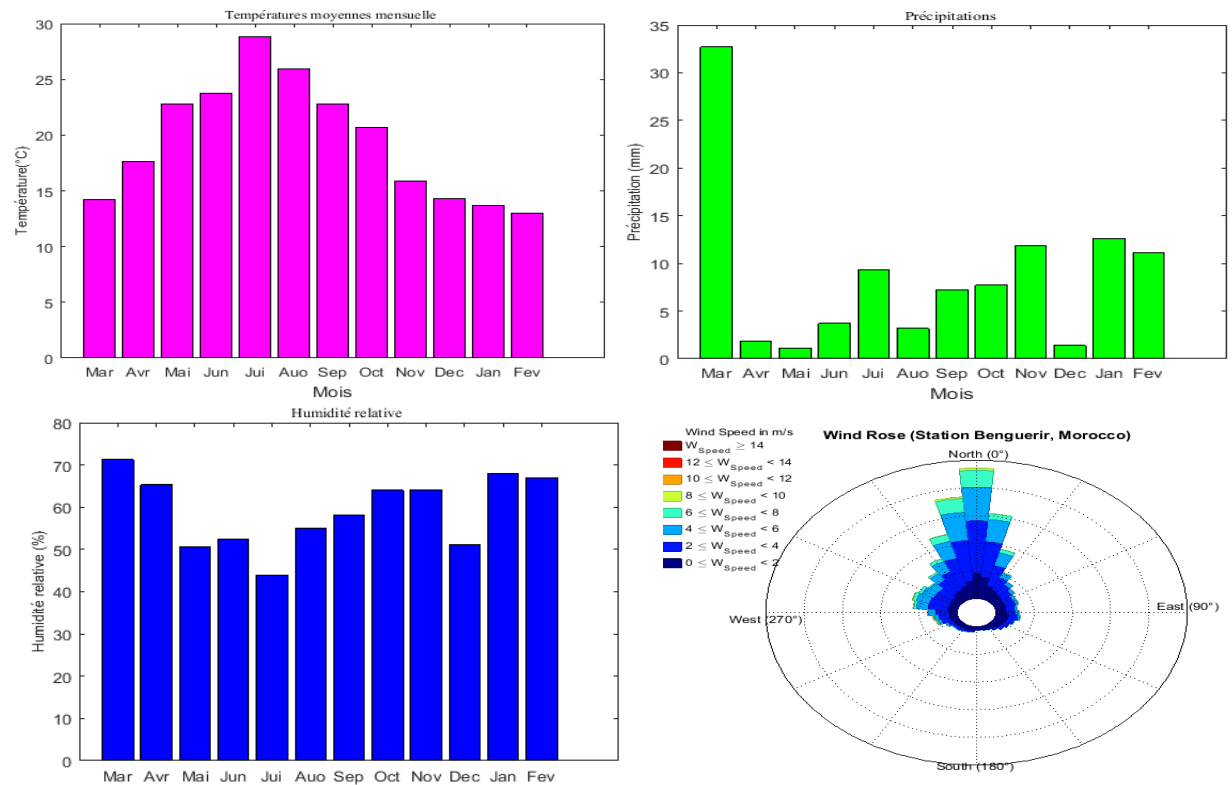


Figure 15: Les variations mensuelles : Température, précipitation, humidité et rosée du vent pour la zone d'étude

Nous pouvons conclure que la zone d'étude possède un climat méditerranéen chaud avec été sec. Après avoir une idée sur le site d'étude, nous nous intéressons dans la suite au contrôle de qualité des données.

III.3. Procédure de contrôle de qualité

Puisque notre étude s'intéresse à la qualité du rayonnement global mesuré, seuls les tests directement appliqués au GHI sont détaillés. Les conditions de validité sont définies à partir de l'indice de clarté k_t , $\cos(sza)$ l'angle solaire zénithal exprimé en (*radian*), du rayonnement hors atmosphère GHI_{atm} , I_N l'éclairement d'une surface normale au rayonnement solaire, hors atmosphère, I_0 la constante solaire et J le numéro du jour.

Les mesures de rayonnement effectuées sur un site passent par plusieurs tests de qualité [25]. Il s'agit principalement de vérifier d'une part la présence des données, mais aussi leur cohérence physique. A cet effet, les tests ci-dessous seront appliqués:

- Le premier test porte sur la possibilité physique des mesures faites (Tableau 2);
- Le second test porte sur les conditions dites extrêmes elles sont tolérées dans la mesure où leur apparition reste exceptionnelle (Tableau 3);
- Enfin, le dernier test est un test croisé entre les différentes mesures de rayonnement (direct/diffus/global) afin de vérifier leur cohérence physique.

III.3.1. Inspection visuelle des données

Un contrôle de qualité des données doit comprendre à la fois des inspections visuelles ainsi que des vérifications automatiques pour détecter les données invalides, l'inspection visuelle des données consiste à rechercher les décalages temporels ainsi que les valeurs manquantes.

a) Données manquantes

Les ensembles de données se réfèrent généralement à des intervalles de temps réguliers. Pour diverses raisons (Processus de mesure), les données de certains intervalles peuvent être perdues. Dans notre cas, un algorithme automatique permet de vérifier, détecter et marquer les intervalles des données manquantes puis de laisser le choix à l'utilisateur de décider quoi faire, soit les garder ou bien les enlever. Il est présenté sur l'organigramme suivant :

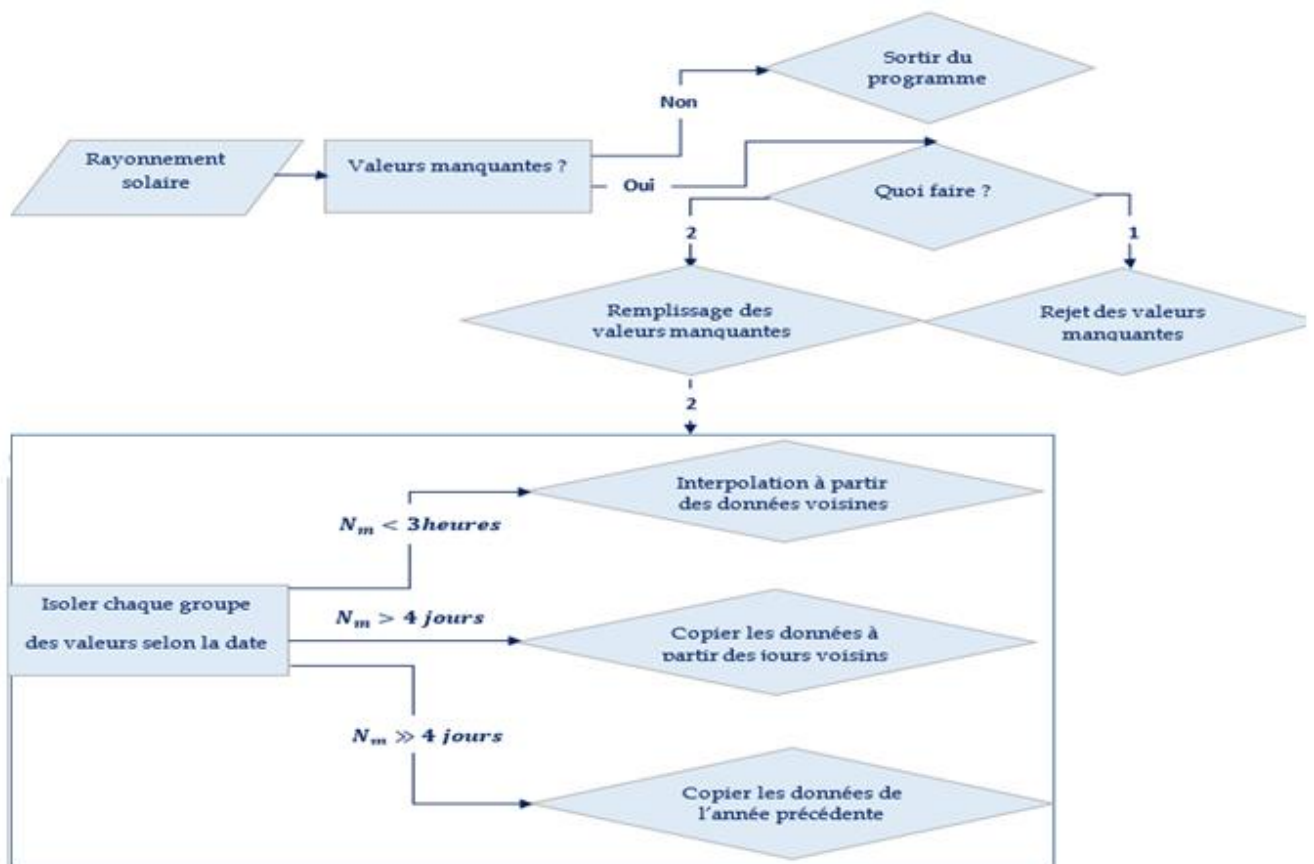


Figure 16: L'organigramme de la procédure de remplissage des données manquantes.

Après cette étape, nous avons un nouvel ensemble de données d'un plus grand niveau de confiance, mais qui peut être incomplet. Le rôle d'application de la procédure de contrôle de qualité utilisée est inspiré du projet BSRN/Endorse dont le résumé est présenté dans le tableau 1 et le tableau 2.

III.3.2. Le test des limites de l'enveloppe

Ce test permet de vérifier les limites inférieures et supérieures de l'irradiation solaire, la limite inférieure physique pour l'irradiation solaire est normalement $0w/m^2$, cette limite peut diminuer jusqu'à $-4w/m^2$ pour les capteurs thermopile, pour le rayonnement direct sa valeur maximale est la constante solaire [26, 27].

GHI (w/m²)	Horaire	$0.03 * GHI_{tot} < GHI < \min(1.2 * I_N, 1.5 * I_N * \cos(sza)^{1.2} + 100)$
	Journalière	$0.03 * GHI_{atm} < GHI < 1.2 * GHI_{atm}$
BNI (w/m²)	Horaire	$0 < BNI < I_N$
	Journalière	$0 < BNI < I_N$
DHI (w/m²)	Horaire	$0.03 * GHI_{atm} < DHI < \min(0.8 * I_N, 0.95 * I_N * \cos(sza)^{1.2} + 50)$
	Journalière	$0.03 * GHI_{atm} < DHI < 0.8 * I_N$
Température(°)	Horaire	$-90 < Température < +60$
	Journalière	$-90 < Température < +60$
Humidité(%)	Horaire	$0 < Humidité relative < 100$
	Journalière	$0 < Humidité relative < 100$
Vitesse du vent (m/s)		$0 < Vitesse du vent < 15$

Tableau 2: Test des limites de l'enveloppe.

III.3.3. Test des conditions extrêmes

Le deuxième test porte sur les conditions dites extrêmes qui sont tolérées dans la mesure où leur apparition reste exceptionnelle. Ils sont effectués avec les limites d'Espinar, présenté dans le tableau suivant [26] :

GHI (w/m²)	Horaire	$0.03 * GHI_{tot} < GHI < (1.2 * I_N * \cos(sza)^{1.2} + 50)$
	Journalière	$0.03 * GHI_{atm} < GHI < GHI_{atm}$
DNI (w/m²)	Horaire	$0 < DNI < (0.95 * I_N * \cos(sza)^{0.2} + 50)$
	Journalière	-
DHI (w/m²)	Horaire	$0.03 * GHI_{atm} < DHI < (0.75 * I_N \cos(sza)^{1.2} + 30)$
	Journalière	-
Température (C°)	Horaire	$-80 < Température < +50$
	Journalière	-
Humidité(%)	Horaire	$0 < Humidité relative < 100$
	Journalière	-

Tableau 3: Test des conditions extrêmes

III.3.4. Cohérence des composantes

Après le test des limites de l'enveloppe, la vérification de la valeur min et max pour chaque composante et les conditions extrêmes de la disponibilité des données de GHI, DHI, BHI. On peut faire un contrôle de cohérence entre ces composantes :

- **Pour les valeurs horaires :**

Pour $GHI > 20 W/m^2$:

- Test à 2 composantes : $\frac{DHI}{GHI} < 1.2$ Eq. 11

- Test à 3 composantes : $\left| 1 - \frac{GHI}{DHI+BHI} \right| < 0.15$ Eq. 12

Les limites supérieures pour GHI et DHI sont à peine définissables : DHI est généralement inférieure à $600 W/m^2$, mais dans certains cas avec des nuages minces, des brouillards et/ou des aérosols, des valeurs plus élevées sont observées. Le GHI peut facilement dépasser le rayonnement hors atmosphère dans le cas où DHI est assez élevé [28].

De telles valeurs élevées de GHI dépassant le rayonnement extraterrestre sont généralement de courte durée. La cohérence des données d'irradiation peut être analysée au moyen de la combinaison des trois composantes d'irradiation, GHI, DHI et DHI à un moment donné. Par conséquent, les transmittances calculées sont tracées un en fonction de l'autre pour voir leur cohérence. Au lieu de travailler avec les irradiances, les indices de clarté et de fraction diffuse peuvent être utilisés.

Avec :

$$K_t = GHI / GHI_{atm} ; \quad K_d = DHI / GHI ; \quad K_n = DNI / I_N$$

avec K_d la fraction diffuse et K_n l'indice de clarté directe.

III.4. Contrôle de qualité des données du site d'étude

III.4.1. Inspection visuelle et valeurs manquantes

Dans le cadre de cette étude, les données acquises sur le site du Green Energy Parck ont été utilisées. La figure 17 illustre une vue en 2-D du GHI capté durant la période d'étude.

Nous observons au niveau de la figure 17 que parfois des bandes sombres indiquant un manque de données. Comme il a été déjà mentionné, les données de certains intervalles de temps peuvent être perdues à cause d'une panne dans la station météorologique. Nous avons appliquée l'algorithme aux données du rayonnement qui nous concernent. Les résultats montrent qu'il existe des journées manquantes dans le mois de juillet, ce qui explique l'apparition d'une bande sombre durant ce mois, et quatre jours du 24/02/2016 au 28/02/2016.

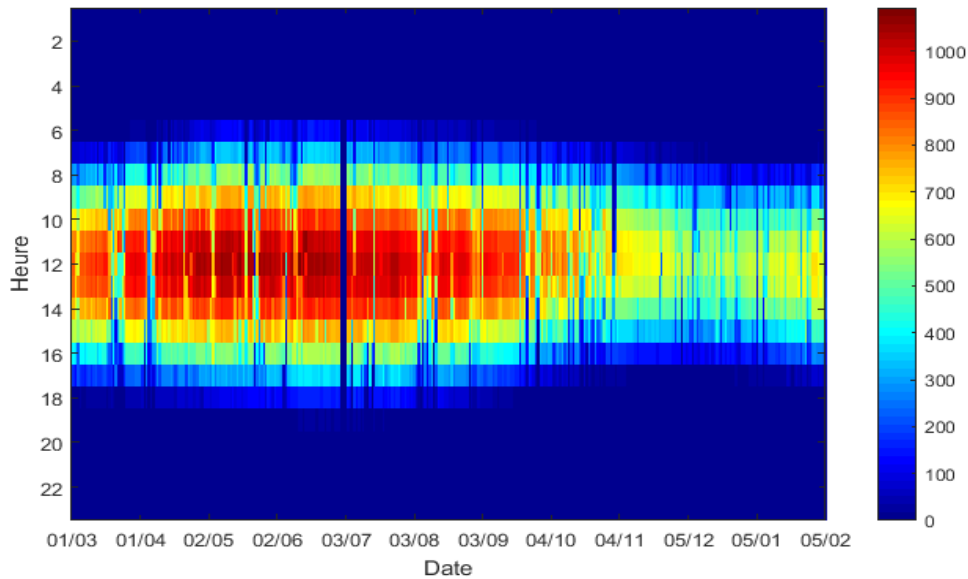


Figure 17: Vue en 2D du global rayonnement horizontale.

Avant de faire l'interpolation des données, nous avons vérifié que les jours contenant les données manquantes ont presque les mêmes conditions climatiques que les jours choisis pour l'interpolation. Un exemple pour le 01/07/2015 qui contient des valeurs manquantes qui ont été interpolées à partir des valeurs du 30/06/2015 est illustré sur la figure 18. Le test est vérifié pour la température et l'humidité.

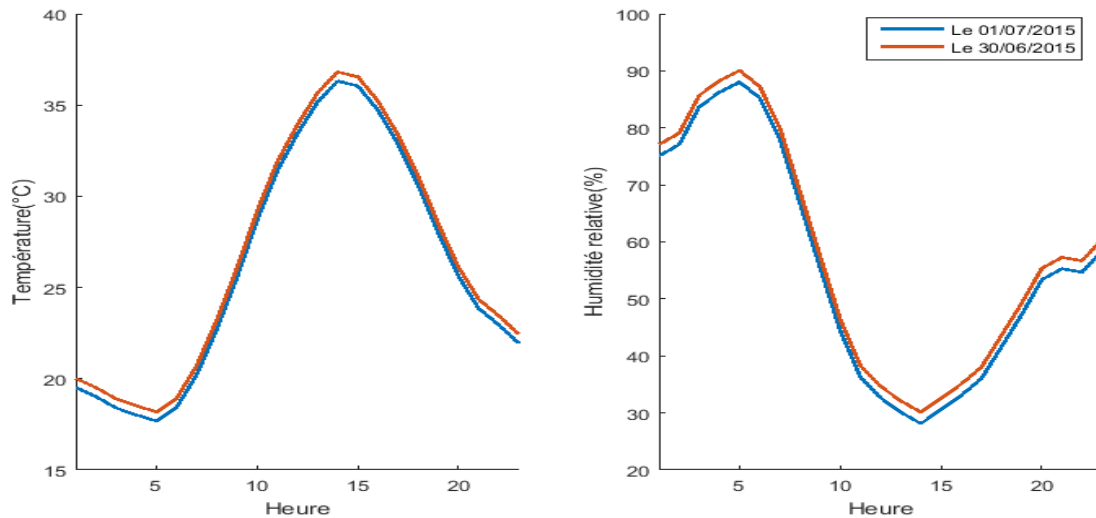


Figure 18: Vérifications des conditions climatiques avant l'interpolation.

La figure montre qu'il n'y a pas une grande différence entre les conditions climatiques des deux jours.

La figure suivante illustre une vue d'ensemble du rayonnement après l'interpolation. Nous constatons que les bandes sombres ne sont pas présentes, surtout durant les mois de juillet et février, ce qui montre la qualité de l'interpolation.

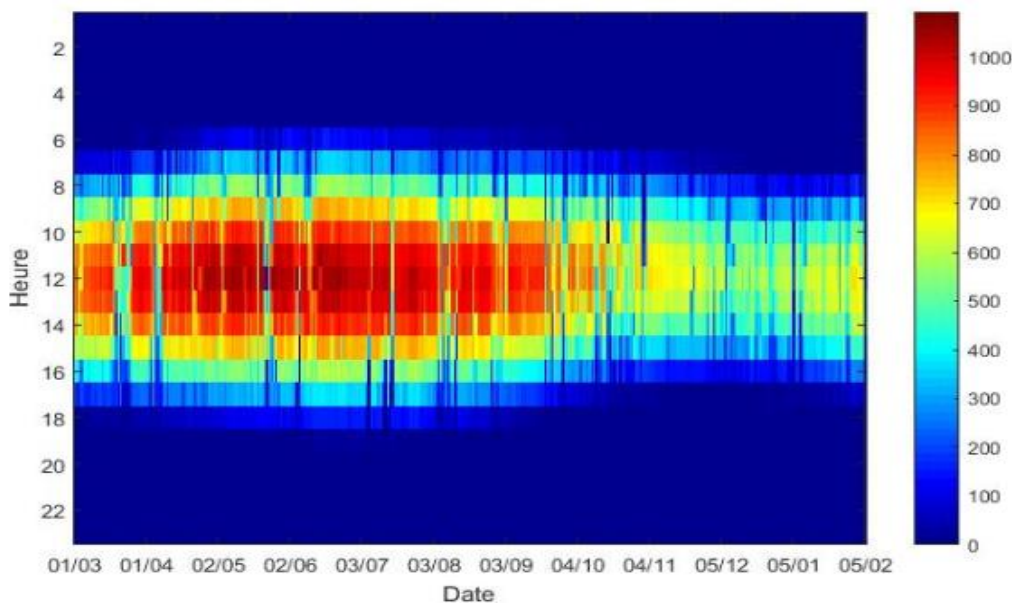


Figure 19: Vue en 2-D du rayonnement global sans valeurs manquantes.

Ce problème est ainsi peu visible sur la figure puisque le nombre faible des valeurs manquantes par rapport aux données disponibles. Afin de bien illustrer ce problème, nous avons tracé les moyennes mensuelles horaires, avant et après l'interpolation. La figure suivante montre la différence entre les deux.

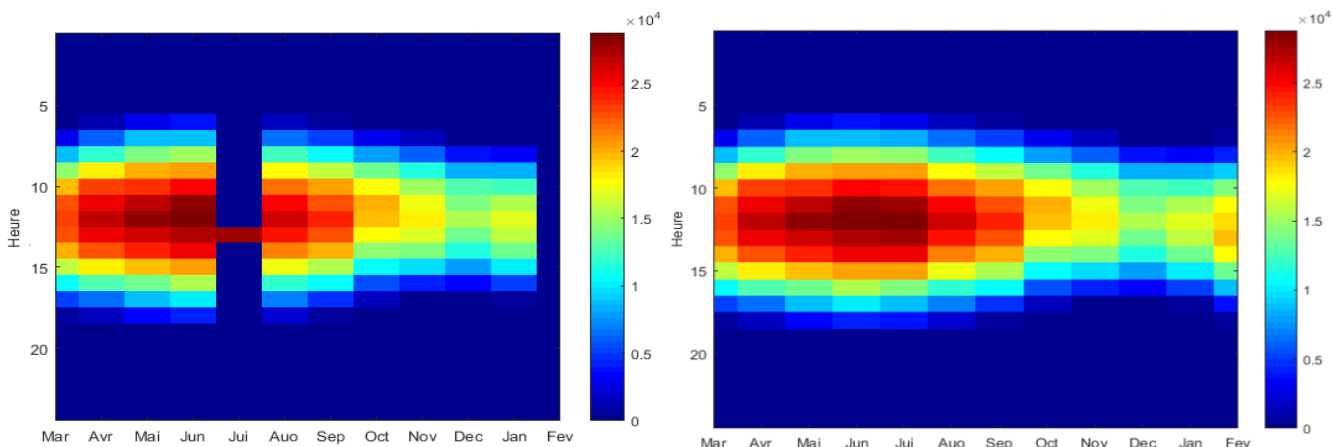


Figure 20: Données mensuelles horaire avant et après interpolation.

III.4.2. Contrôle de qualité du rayonnement global GHI

Comme il a été déjà indiqué, chaque composante solaire doit passer par trois tests de contrôle de qualité, les limites de l'enveloppe, les observations rares et en fin les tests de cohérence dans le cas où les trois composantes sont disponibles.

Afin d'éviter l'apparition des valeurs négatives d'irradiations pendant la nuit et pour une plus grande lisibilité, seules les heures comprises entre 7h du matin et 18h sont considérées dans la suite de cette étude, car les valeurs basses ou nulles n'ont peut-être aucune signification.

a) Test de l'enveloppe pour les valeurs journalières

Ce test permet de détecter la limite de l'enveloppe supérieure et inférieure des valeurs de l'irradiation, alors la possibilité physique des mesures faites

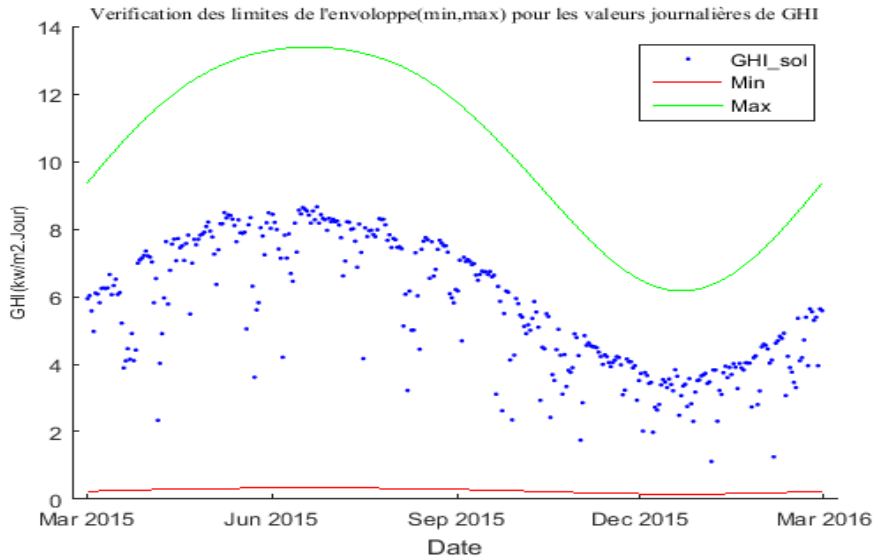


Figure 21: Vérification des limites de l'enveloppe pour le rayonnement global.

Pour plus de confidentialité, nous avons fait un contrôle de qualité même pour les données horaires et pour différents jours de l'année, nous avons également essayé de choisir des jours pour différentes saisons. Les résultats obtenus sont fournis dans les figures suivantes.

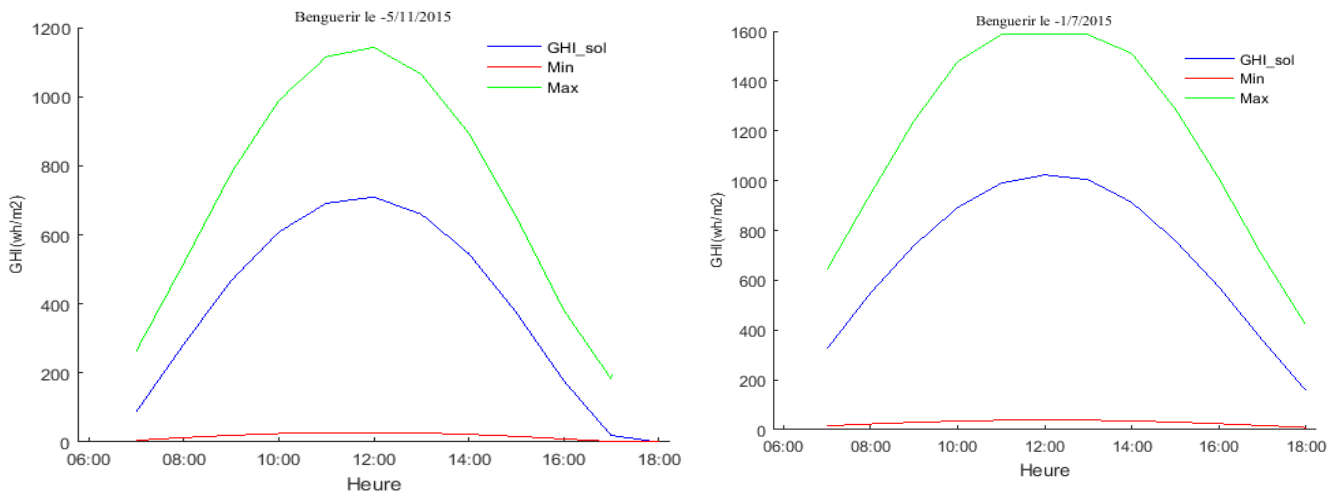


Figure 22: Vérification des limites pour les valeurs horaires après remplissage des données manquantes.

D'après ces figures, aucune valeur dépassant les limites n'est détectée, alors aucune valeur n'est physiquement impossible, le taux de suppression des données représente 0% pour le rayonnement global. Ce test illustre également l'efficacité de l'algorithme utilisé.

b) Test des conditions extrêmes

Un deuxième test du GHI journalier concernant les conditions extrêmes est appliqué pour les valeurs journalières. A l'issue de ce test, aucune condition extrême n'est observée. Comme le premier test, ce deuxième test est appliqué aux valeurs horaires.

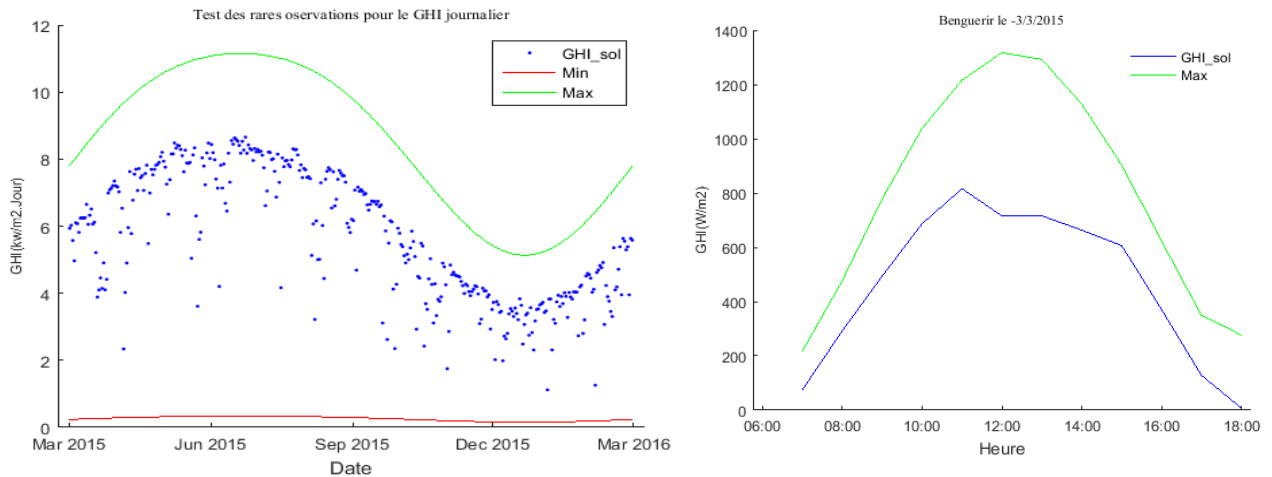


Figure 23: Test des conditions extrêmes pour GHI journalier et horaire.

Un dernier test est appliqué pour les valeurs mensuelles du rayonnement global. Nous remarquons au niveau de la figure qu'aucune valeur mensuelle ne dépasse pas les limites supérieures ou inférieures.

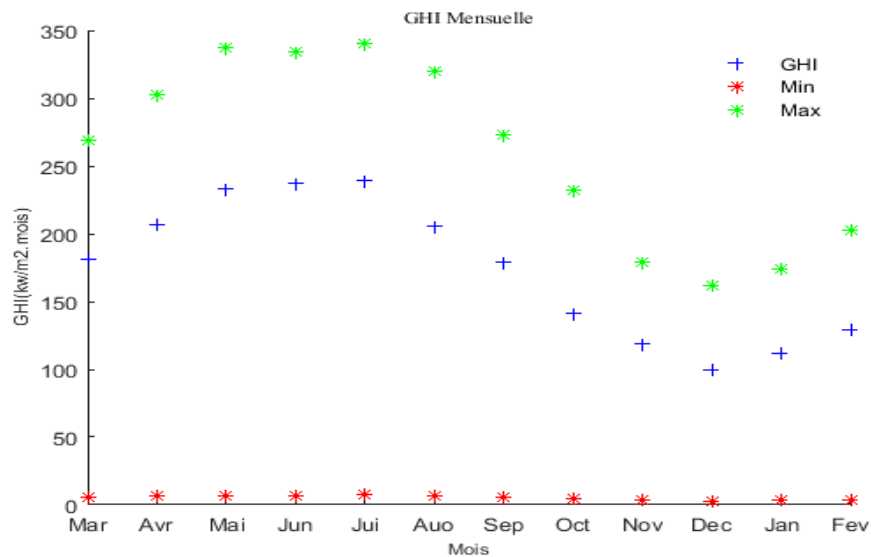


Figure 24: Contrôle de qualité des valeurs mensuelles.

c) Test de cohérence

Ce test permet de montrer la cohérence entre les trois composantes d'irradiation solaire lorsqu'elles sont disponibles.

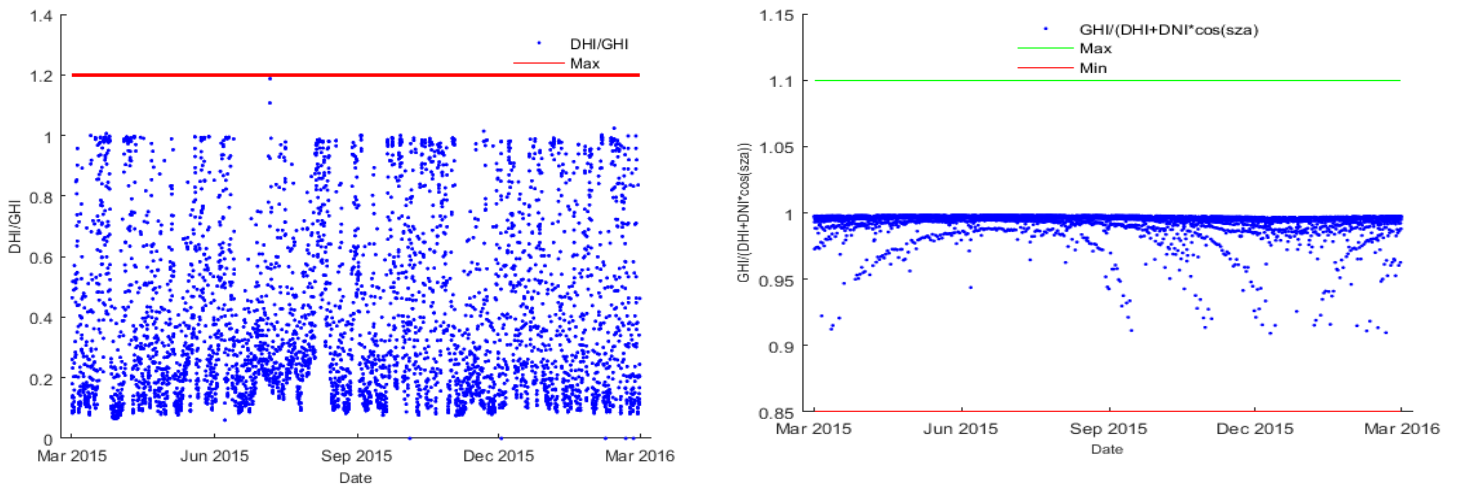


Figure 25: Test de cohérence.

Ces tests permettent de détecter des problèmes dus à la couverture nuageuse, ou d'autres problèmes comme si par exemple si on a des valeurs d'irradiation élevée pour GHI et DHI, mais nulle pour le DNI. Il s'agit d'un signe que le suiveur solaire ne fonctionne pas ou la bande d'ombrage ne tourne pas correctement. Pour l'ensemble des données disponibles le test entre le GHI et le DHI ne présente aucun problème.

d) Test de valeur de K

Comme il a été déjà mentionné, la cohérence entre les rayonnements direct, global et diffus mesurés peut être vérifiée au moyen des indices de clarté. Il s'agit de représenter l'indice de clarté direct en fonction de l'indice de clarté global tel qu'il est illustré au niveau de la Figure 26.

Il existe deux tests principaux pour les valeurs de k.

Vérification des limites dans l'espace K_d-K_t et puis dans l'espace K_t-K_n .

- L'espace K_t-K_n est vérifié pour les limites suivantes :

$K_n > K_t$: Une telle situation peut se produire en raison d'un éventuel nettoyage.

Dans la littérature, une limite supérieure de K_n choisie égale à 0,8, dans notre cas avec cette valeur aucun événement n'a été détecté. Par conséquent, cette limite peut être réduite.

Une limite supérieure de K_t égale à un est recommandée dans [28], cette limite aussi n'est pas dépassée dans notre cas.

- L'espace K_d-K_t est vérifié pour les limites suivantes :

La limite supérieure de la fraction diffuse est 1.2 comme il a été déjà mentionné.

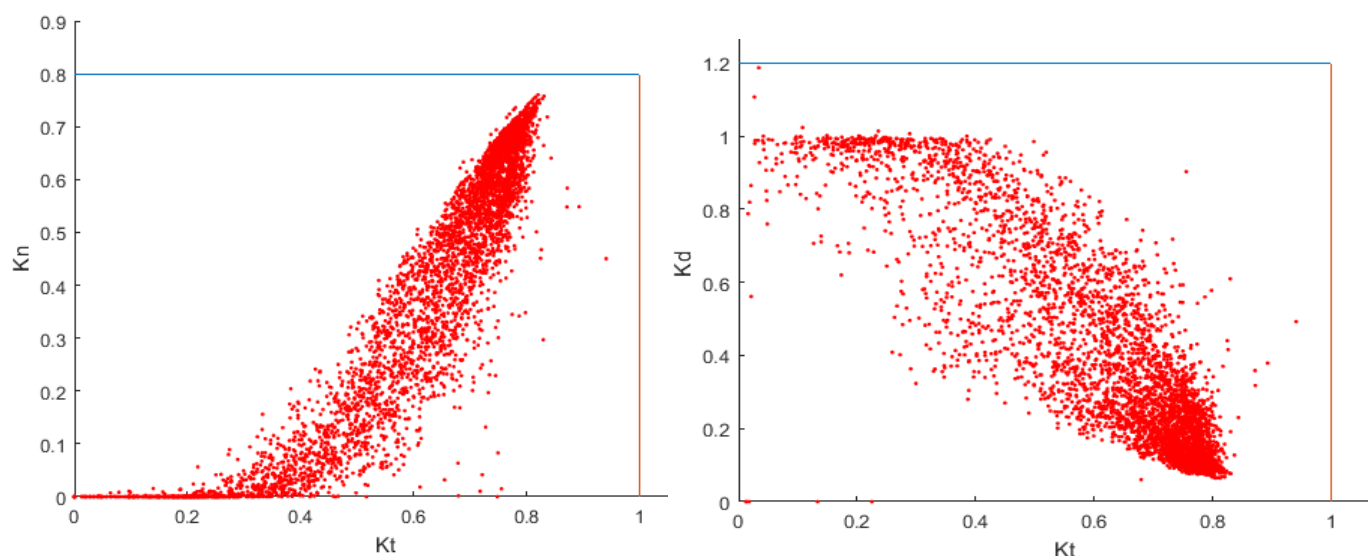


Figure 26: Vérification des limites pour les valeurs de K.

Nous nous intéressons dans cette étude qu'au rayonnement global. Toutefois, nous allons également faire des tests pour la température, l'humidité relative et la vitesse du vent.

III.4.3. Température, humidité et vitesse du vent

Les limites des données de température, humidité et vitesse du vent ne sont pas standardisées et doivent être adaptées pour chaque climat. Dans notre cas, la température est élevée presque durant toute l'année : les limites choisies sont alors 0°C à pour la valeur inférieure et 50°C pour la limite supérieure. En ce qui concerne l'humidité et la vitesse du vent, nous avons choisi celle mentionnée dans le tableau 10.

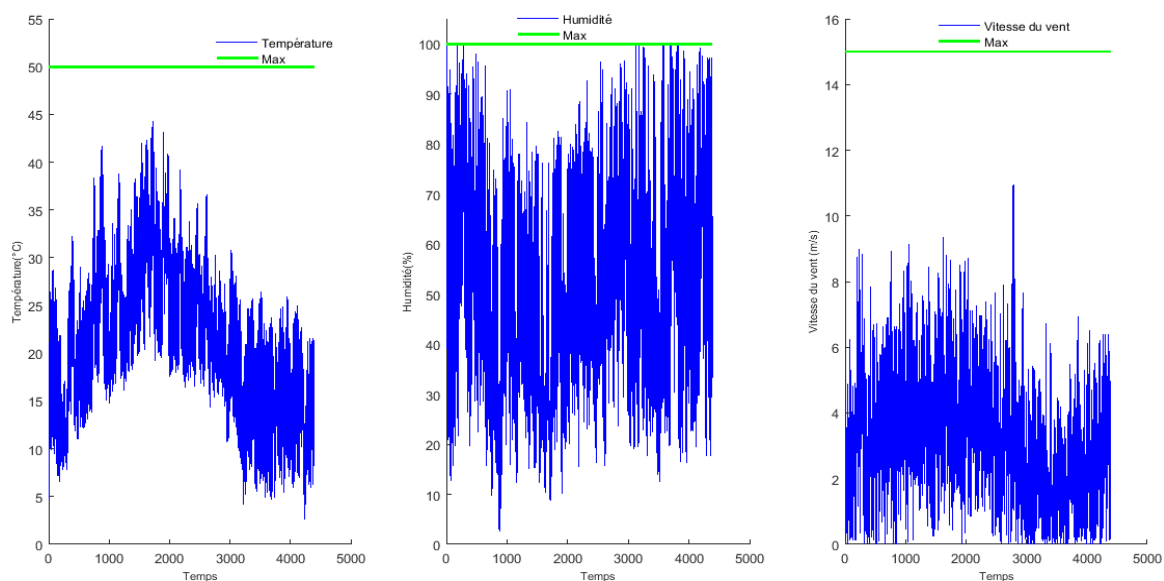


Figure 27: Vérification des limites (Température, Humidité et vitesse du vent).

L'utilisateur n'est pas obligé de prendre les mêmes seuils des tests. Il pourra utiliser ses propres connaissances du site pour adapter les seuils.

III.4.4. Classification de l'ensoleillement

Au-delà de la qualité des mesures, il est intéressant de savoir caractériser le site d'expérimentation de façon simple. Il s'agit de prendre connaissance s'il existe une météorologie prédominante ou non, et si oui laquelle ?

La méthode utilisée dans cette étude est détaillée dans l'annexe. Un exemple de classification de l'ensoleillement de notre site est illustré par la figure 28.

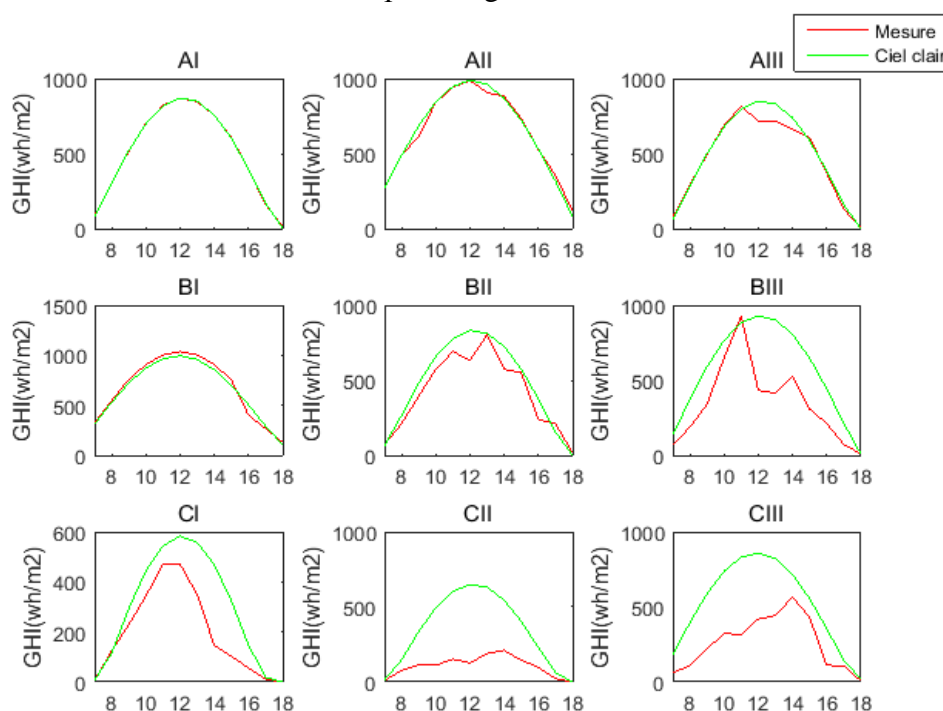


Figure 28: Présentation de l'ensoleillement pour chaque classe.

La classification de l'ensoleillement à travers la qualité et la variabilité horaire a permis de retenir que le site de Benguerir présente un nombre élevé de jours de ciel clair et mitigé avec une variabilité moyenne.

III.4.5. Sources des problèmes rencontrés

a) Intervention artificielle sur le signal DNI (nettoyage)

Des fois des problèmes sont artificiellement générés dans les données du DNI. Ces problèmes sont causés par le nettoyage du pyréliomètre ou bien par l'ombrage du capteur. Le but de ce test est de détecter ce problème. Ce test consiste à utiliser le $DNI_{coincidence}$ qui est défini comme la différence entre le DNI capté par le pyréliomètre et celui mesuré à partir du GHI et DHI. $DNI_{coin} = DNI_{meas} - DNI_{cal}$. Nous notons que des variations de DNI_{coin} peuvent être parfois causées par des nuages et alors ne doivent pas être signalés comme problème de nettoyage [26,29].

Pour éviter ce problème de confusion, il faut revenir à l'ensemble des données enregistrées une fois un nettoyage est effectué un drapeau correspondant est défini. Cela permet à l'utilisateur de détecter facilement des événements spéciaux ou des explications possibles pour certaines particularités des données

b) Problème de la rosée

La formation de la rosée sur les capteurs d'irradiation a un impact sur le signal de mesure. L'impact dépend du type de capteur : une réduction du signal est observée pour les pyranomètres et pyréliomètres en raison de la réflexion, diffusion ou bien blocage de la surface par les gouttelettes d'eau. On a l'apparition de la rosée lorsque les valeurs du DNI_{cat} supérieures à 50w/m^2 sont inférieures au DNI_{coins} [28].

En effet nous n'avons pas trouvé ces problèmes dans nos données d'étude. Afin de bien illustrer ce phénomène, nous avons utilisé les résultats cités dans [28].

La figure 33 montre des exemples de mesure de DNI erronés à cause de la rosée, présentée par la bande orange. Le deuxième problème dû au nettoyage est présenté par le carreau vert.

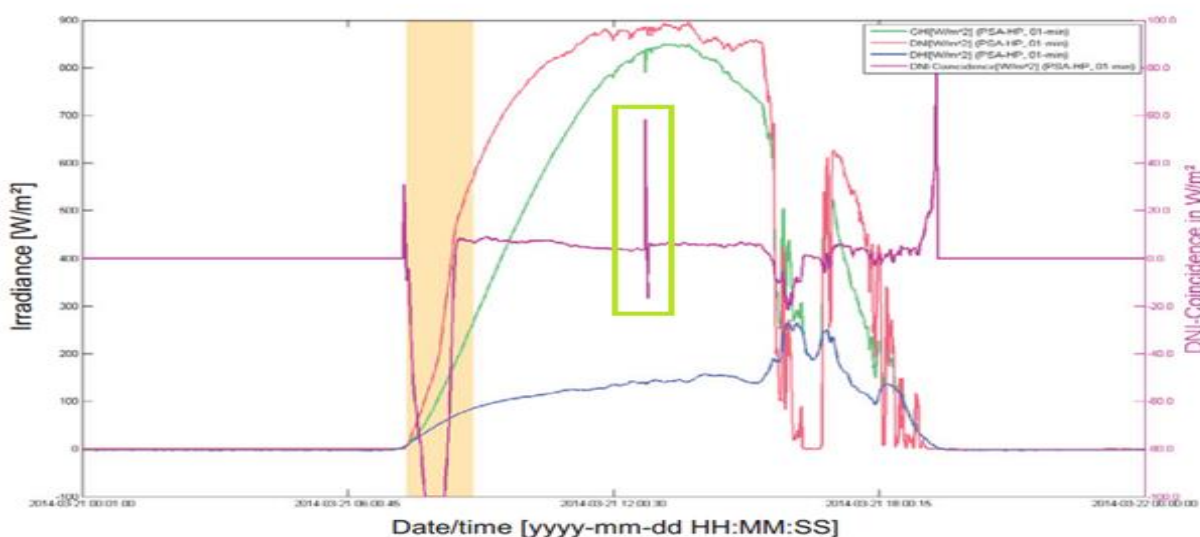


Figure 29: Visualisation des données du DNI erronées à cause de la rosée et le nettoyage [28]

III.4.6. Comparaison des données avant et après le contrôle de qualité

L'intérêt de ce contrôle de qualité des mesures issues du sol est d'avoir des données de haute précision afin de les utiliser par la suite pour la calibration. Une étape qui précède la calibration consiste à faire une étude comparative entre les valeurs GHI estimées par Helioclim-3 et celles mesurées au sol dans Green Energy Parck, afin d'évaluer l'incertitude du GHI Helioclim-3.

Pour faire une comparaison entre les données sol et de Helioclim-3, nous traçons des scattergrammes de comparaison des ensembles des valeurs du GHI horaires avant et après le contrôle de qualité.

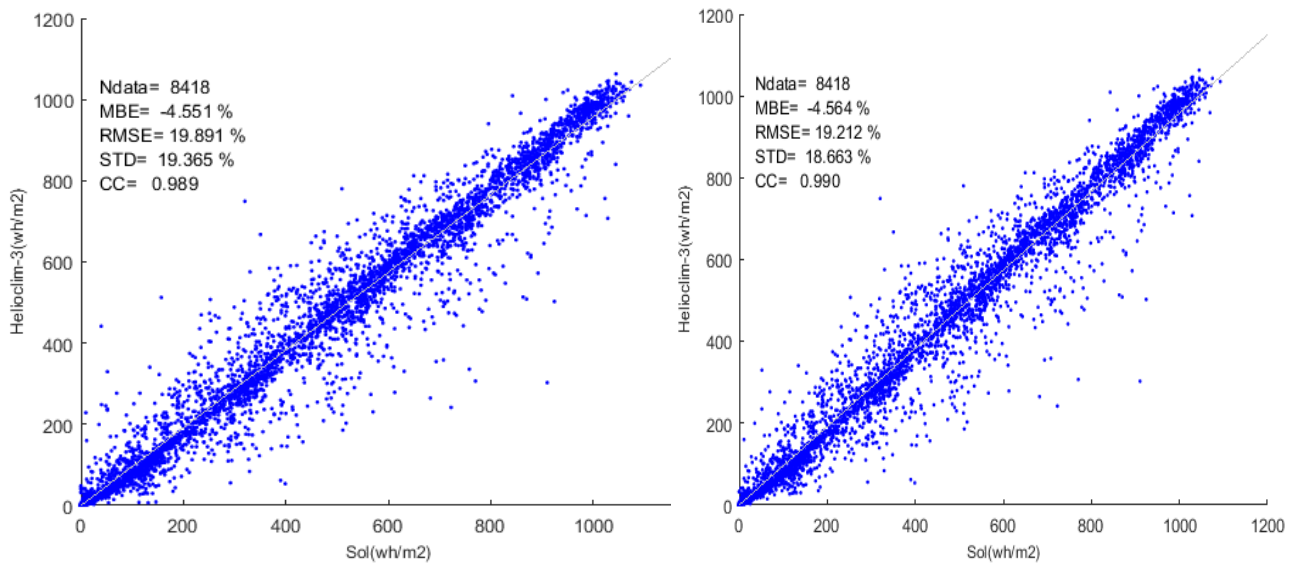


Figure 30: Scatterogrammes du GHI horaire avant et après contrôle de qualité.

.Le diagramme de comparaison donne un faible biais (-4.55%), un coefficient de corrélation élevé $cc=0.98\%$ et de bonnes statistiques en générale pour le GHI déjà sans contrôle de qualité. L'analyse des indicateurs statiques sera entamée dans la partie de calibration.

Après le contrôle de qualité le biais reste faible et la valeur de RMSE reste faible, le coefficient de corrélation est très élevé à 0.99. Nous pouvons conclure que les données sol ne présentent pas de problème pour l'ensemble des valeurs disponibles. La différence entre ces deux figures montre la grande qualité des mesures faites sur les sites d'expérimentation.

III.2.1. Conclusion

Les mesures ne présentent pas toujours la réalité. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de vérifier leurs plausibilités, selon les différents tests présentés dans ce chapitre. Ces tests sont appliqués aux données sol et qui montrent effectivement une très grande qualité des données : nous ne remarquons aucune détection sur les tests croisés et aucune donnée physiquement impossible ou très peu dans le cas du capteur de rayonnement direct. Enfin, nous ne notons aucune "condition extrême".

Partie II : Calibration

III.5. Introduction

Le rayonnement solaire reçu par la surface de la Terre peut être mesuré au sol ou dérivé par des modèles, et ceci lorsque la composition atmosphérique de la région est connue.

Les données dérivées du satellite ont l'avantage de couvrir des périodes plus longues avec une forte couverture spatiale. Ils sont nécessaires pour la sélection du site, l'évaluation des ressources solaires, les projections de production d'électricité et les études de performance du système. Cependant, la qualité de ces ensembles de données satellitaires peut être médiocre. Les mesures au sol avec des instruments appropriés peuvent être d'une qualité beaucoup plus élevée vu la calibration et la maintenance de ces instruments. Cependant, les stations de mesure sont rares et disponibles pour un site spécifique et pour de courtes périodes, en raison des moyens financiers [30].

Cette partie montre que diverses méthodes et approches ont été explorées jusqu'à présent pour combiner correctement les données de rayonnement terrestre avec les données de rayonnement modélisées. Dans le but général d'améliorer la précision des ensembles de données à dérivés de satellites. L'ajustement vise principalement à éliminer le biais annuel et/ou saisonnier dans les estimations d'irradiation modélisées à long terme. Les mesures du rayonnement solaire au sol peuvent être utilisées pour corriger les données du rayonnement solaire satellitaire. L'objectif de ces corrections est de minimiser le biais moyen (MBE) et d'améliorer la qualité des séries chronologiques dérivées du satellite [31].

III.6. Ensembles de données dérivés des satellites

Les bases de données Hélioclim fournissent des données de rayonnement solaire pour l'Europe, l'Afrique et l'Asie occidentale. L'école des Mines de Paris / Armines collecte des images satellitaires Meteosat et les convertit en données du rayonnement via la méthode Heliosat-2. La base de données HelioClim-3 (HC3) fournit des données de février 2004 jusqu'à présent avec une résolution spatiale d'environ 5 km et une résolution temporelle de 15 min [10].

III.7. Adaptation des données satellitaires

L'évaluation et la caractérisation des sources d'incertitude contenues dans les données dérivées du satellite constituent une étape cruciale vers l'amélioration des projets solaires. Par exemple, l'identification et la correction appropriée des erreurs ou biais des données dérivées du satellite par comparaison aux données du sol de haute qualité peuvent entraîner une incertitude. Plus précisément, si les estimations dérivées des satellites pour un site donné peuvent être étalonnées par rapport à une campagne de mesure locale à court terme, toutes ces méthodes seront collectivement appelées «adaptation du site» dans ce qui suit [31].

En résumé, toutes les différentes méthodes statistiques qui ont été développées pour réduire l'incertitude dans la ressource solaire locale tentent d'améliorer les données d'irradiation dérivées du satellite (en abaissant leurs erreurs aléatoires et surtout leur biais) en utilisant les caractéristiques des observations au sol.

L'adaptation du site nécessite deux types de mesures : des mesures de terrain précises et des données satellitaires.

III.7.1. Méthodes statistiques

L'adaptation statistique des résultats dérivés du modèle est utilisée dans divers domaines de la météorologie, plusieurs de ces approches sont utilisées dans la pratique. Ces approches sont présentées dans la suite.

a) Élimination des biais par adaptation linéaire

L'utilisation des méthodes satellitaires pour dériver le rayonnement solaire peut présenter des erreurs systématiques susceptibles de conduire à une surestimation ou sous-estimation de la composante solaire, appelée biais. Le biais entre les prévisions et l'irradiation mesurée peut résulter des caractéristiques systématiques du modèle radiatif ou des incohérences dans les données d'entrée externes (en particulier les aérosols ou la vapeur d'eau) [32].

Lorsque des mesures de haute qualité du rayonnement au sol sont disponibles, le biais entre les données du satellite et sol peut être réduit en calculant un facteur de correction.

La méthode la plus simple consiste à estimer le biais puis le supprimer de l'ensemble des données [32].

$$y_{HC3} = ay_{Sol} + b. \quad \text{Eq. 13}$$

La nouvelle estimation est calculée par l'équation suivante :

$$y_{HC3} = y_{HC3} - [(a - 1)y_{Sol} + b]. \quad \text{Eq. 14}$$

Cette méthode est facile à gérer, mais il ne supprime que le biais moyen, et la distribution des valeurs sera modifiée de manière uniforme sur toute la gamme des valeurs.

b) Régression linéaire

D'autres méthodes pour corriger les données sont basées sur une analyse de régression linéaire multiple entre un ensemble prescrit de prédicteurs (données satellites, prévision numérique, etc.) et l'ensemble de données d'observation. L'objectif est de développer une équation de régression linéaire multiple pour corriger les valeurs estimées en supprimant efficacement le biais [32].

III.7.2. Fonction de distribution cumulative

Ce procédé de correction met l'accent sur le raccord et l'amélioration de la fonction de distribution cumulative (CDF) des données obtenues par satellite par rapport au sol. La transformation est basée sur l'adaptation de la fréquence de distribution des données satellites à celles du sol [32,34].

III.8. Méthodes d'évaluation

Lorsque l'on considère un ensemble de couples de valeurs, les unes issues de modèles, les autres de la mesure, on désire connaître l'erreur d'estimation sur la valeur modélisée. Les causes de la dispersion entre ces deux séries de valeurs sont les suivantes [35] :

- Les erreurs de mesure : la comparaison est faite avec des mesures effectuées au sol dont la précision n'est pas toujours connue ou optimale. Ces mesures ne représentent pas la réalité, mais sont entachées d'erreurs dues à la méthode de mesure, le temps d'intégration, la calibration des instruments, leur précision, leur entretien, etc.
- Les paramètres entrant dans le modèle d'évaluation : les modèles sont déterminés physiquement ou empiriquement sur la base de mesures. Lors de l'élaboration d'un modèle, des hypothèses sont faites sur le nombre et le type de variables qui permettent de paramétrer le modèle, ainsi que de la forme de leur effet.

Dans le domaine de l'énergie solaire, ce deuxième point est souvent très important, on ramène des phénomènes extrêmement complexes par le nombre de variables et leur dynamique à des approximations relativement simples.

III.8.1. Les indicateurs statistiques

Les indicateurs les plus communément utilisés par les chercheurs lors de la comparaison entre modèles et mesures sont le biais moyen, l'écart quadratique moyen, l'écart standard et le coefficient de corrélation, indicateurs statistiques de rendement [36] :

- **Le biais moyen (MBE)** traduit un écart systématique entre les données issues du modèle et les valeurs mesurées ;

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(i)_{HC3} - D(i)_{sol} \quad Eq. 15$$

- **L'écart quadratique moyen (RMSE)** donne la précision du modèle, compte tenu des écarts systématiques ;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D(i)_{HC3} - D(i)_{sol})^2} \quad Eq. 16$$

- **La déviation standard** exprime la dispersion des estimations autour du biais, ou la précision intrinsèque du modèle, elle ne tient pas compte des écarts systématiques ;

$$\sigma = \sqrt{\frac{N(RMSE^2 - MBE^2)}{(N-1)}} \quad Eq. 17$$

- **Et le coefficient de corrélation (cc)** qui sert à quantifier la linéarité de la relation entre deux séries de données. Il est compris entre -1 et +1. Pour une bonne équivalence entre le modèle et la mesure, la valeur absolue du coefficient de corrélation se rapproche de 1.

$$cc = \frac{\sum_{i=1}^N \text{mean}((HC3(i) - GRD(i))^2) * (GRD(i) - \text{mean}(GRD))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (HC3(i) - \text{mean}(HC3))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (GRD(i) - \text{mean}(GRD))^2}} \quad Eq. 18$$

III.9. Description et application de la méthode de calibration

Nous avons donc décidé de faire une calibration en utilisant l'ensemble des données sol disponibles. Cette méthode a l'avantage de pouvoir tester la validité de la calibration en l'appliquant à notre station pour obtenir des faibles valeurs de biais et de RMSE entre HC3v4 calibré et les mesures. La méthode sera considérée comme adéquate si la calibration améliore ce biais et ce RMSE pour toutes les stations.

III.9.1. Calibration de l'indice de clarté

L'indice de clarté intègre dans un seul numéro toutes les propriétés de l'atmosphère (effets des aérosols, la vapeur d'eau et des nuages) qui atténuent l'irradiation solaire. Cette correction peut être appliquée à des données horaires, sous-horaires et journalières. La calibration a été effectuée sur l'indice de clarté journalier pour annuler les biais saisonniers éventuels de HC3V4, issus principalement d'une erreur potentielle de la valeur d'irradiation ciel clair ou d'une incertitude sur la calibration en luminance des images satellitaires entre des saisons avec couverture nuageuse plus ou moins importante [37]. L'enjeu est de trouver une régression permettant de diminuer l'écart entre l'indice K_{t_HC3} et K_{t_Sol} issu de la mesure au sol. Avant d'être utilisées, les données de la station sol sont filtrées avec la procédure de contrôle décrit dans la partie précédente.

Cette calibration se fait sur la valeur K_t . Nous avons utilisé la fonction de régression utilisée par Transvalor [37].

$$K_{t_reg} = a * K_{t_sol} + b * w^2 + c, \quad Eq. 19$$

avec w est la valeur décimale du jour de l'année, normée entre -0.5 pour le 1^{er} janvier et 0.5 le 31 décembre: $w = \frac{J}{365} - 0.5$

Les trois paramètres obtenus par la régression avec l'ensemble des valeurs sol disponibles actuellement sont: $a=0.8383$; $b=-0.0029$; $c=0.0831$.

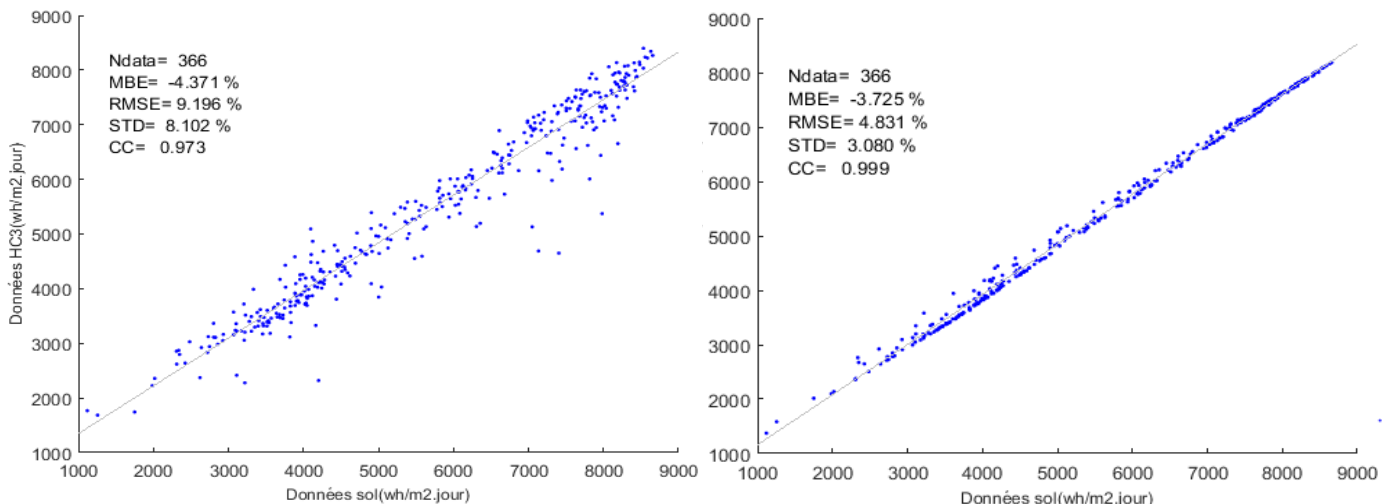


Figure 31: GHI journalier avant (gauche) et après (droite) la calibration.

Les scattergrammes de comparaison de l'ensemble des valeurs journalières de GHI pour la station avant et après calibration montrent que le biais initial est de -4.371%. Cette valeur passe à -3.72% après la calibration, sa valeur négative signifie que le satellite sous-estime l'irradiation globale journalière. La valeur de RMSE passe de 8% à 3% et le coefficient de corrélation est très élevé à plus de 0.99. Nous pouvons conclure que HC3 en valeurs journalières ne présente pas de biais annuel ou saisonnier significatif pour le GHI pour l'ensemble des données du site.

III.9.2. Adaptation linéaire du GHI journalier

Nous avons appliqué cette méthode au GHI journalier, suivant l'équation 19. Cette méthode permet d'annuler le biais moyen, sa valeur passe de -4.37% à 0%. Pour le STD et RMSE et le coefficient de corrélation, ils n'ont pas montré de bonne performance par rapport aux résultats obtenus par la première méthode (à gauche de la figure 32).

Nous avons pensé ensuite à appliquer la méthode d'adaptation linéaire au GHI journalier déjà calibré à l'aide de la régression. En appliquant la régression seule, nous pouvons obtenir de bons résultats, toutefois le biais ne s'annule pas et toujours nous avons une sous-estimation du GHI par le satellite. Dans ce cas, nous avons obtenu les résultats attendus : un biais moyen nul, une RMSE qui a diminué de 4% par rapport au GHI sans calibration et un très bon coefficient de corrélation (à droite de la figure 32).

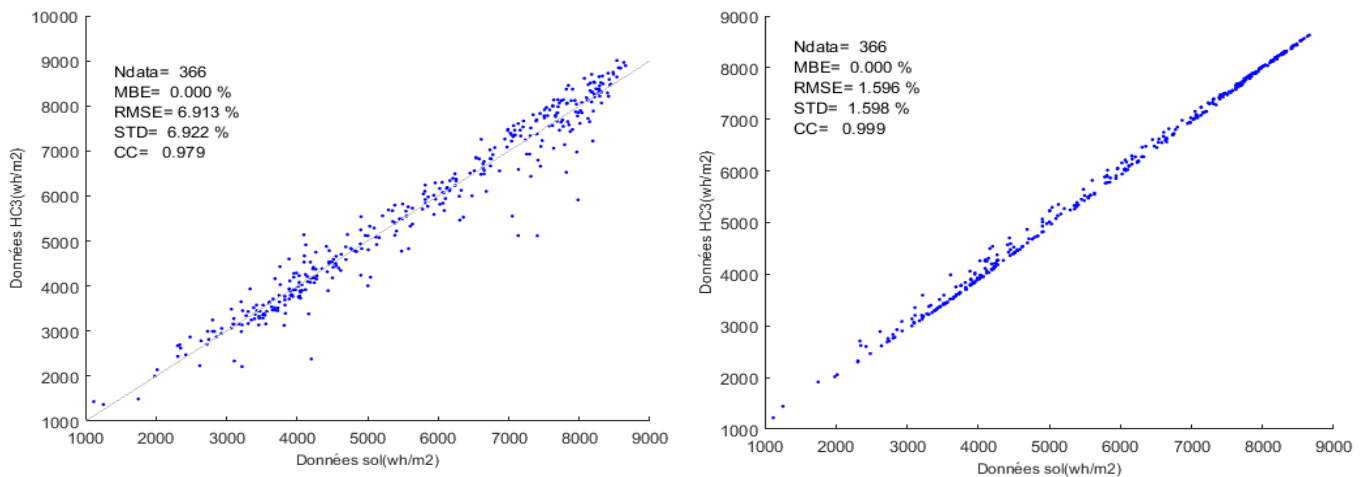


Figure 32: GHI journalier obtenu après la correction.

III.9.3. Calibration du GHI horaire

Nous avons appliqué la même procédure que la calibration faite pour le K_t journalier, mais cette fois nous avons calibré dans un premier temps le K_t horaire avec la méthode de régression, puis nous avons appliqués aux résultats obtenus par la méthode d'adaptation linéaire. Nous traçons au niveau de la figure suivante le GHI horaire après la calibration.

Nous constatons que la courbe s'est « centrée » sur la diagonale et que le biais devient nul, le RMSE baisse vers 0.9% et le coefficient de corrélation égale à 1.

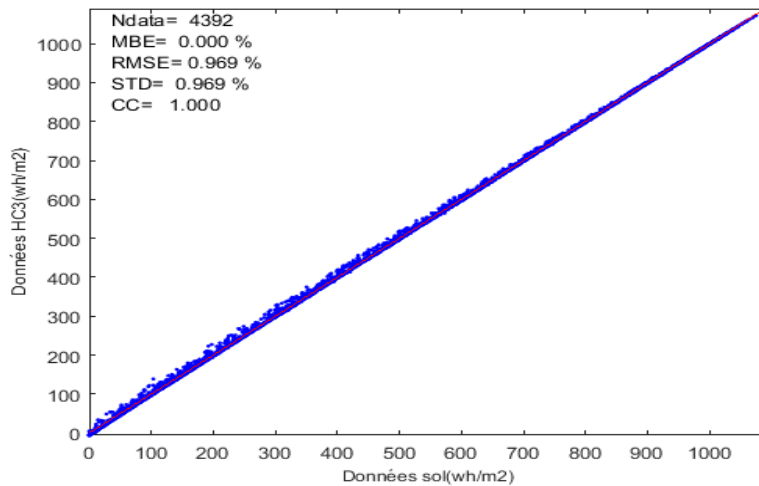


Figure 33: GHI horaire après calibration.

Pour visualiser la « qualité » de la calibration, nous avons ensuite tracé les valeurs moyennes mensuelles pour le GHI de HC3 et sol avant et après la calibration.

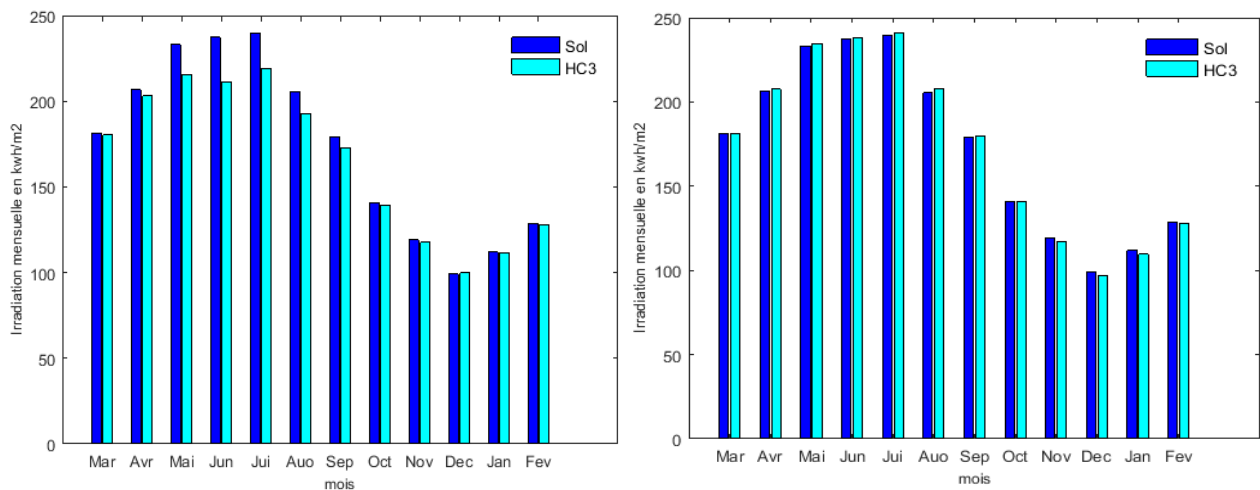


Figure 34: GHI mensuelles avant (gauche) et après (droite) calibration.

Cette méthode de calibration a montré son efficacité pour l'ensemble de données disponibles. Elle permet de réduire le biais global et le biais mensuel, mais il faut tenir compte que la calibration utilise au moins six mois couvrant au moins, l'été, le printemps ou l'automne, et l'hiver. Idéalement, une année, voire deux pour la redondance afin de pouvoir procéder à une analyse croisée (test sur une année, puis vérification sur l'autre et inversement).

III.9.4. Application de la fonction de distribution cumulative

L'objectif est de comparer une ou plusieurs fréquences de la fonction de la distribution cumulative pour les données sol et satellite. Dans le but de trouver un indicateur qui présente la similitude entre deux mesures Polo et al ont proposé dans [38, 39] d'utiliser un test de Kolmogorov–Smirnov qui permet la comparaison entre deux fonctions de distribution (CDFs), son avantage : il ne dépend d'aucun paramètre et peut-être appliquer à n'importe quel type de CDF.

a) Le paramètre KSI

Le paramètre KSI est donné par :

$$KSI = \int_{x_{min}}^{x_{max}} D_n dx \quad Eq. 20$$

D_n : La différence entre de CDFs dans l'intervalle considéré x_{min} et x_{max} .

Sa valeur normalisée est :

$$KSI(\%) = \frac{100}{a_{critical}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} D_n dx \quad Eq. 21$$

$$a_{critical} = V_c * (x_{max} - x_{min}) \quad Eq. 22$$

V_c présente la limite critique de D_n , elle dépend du nombre de données N .

$$V_c = \frac{1.63}{\sqrt{N}} \quad Eq. 23$$

La figure suivante présente le tracé de la fonction de distribution cumulative du GHI journalier sol et HC3 et la différence entre les deux données.

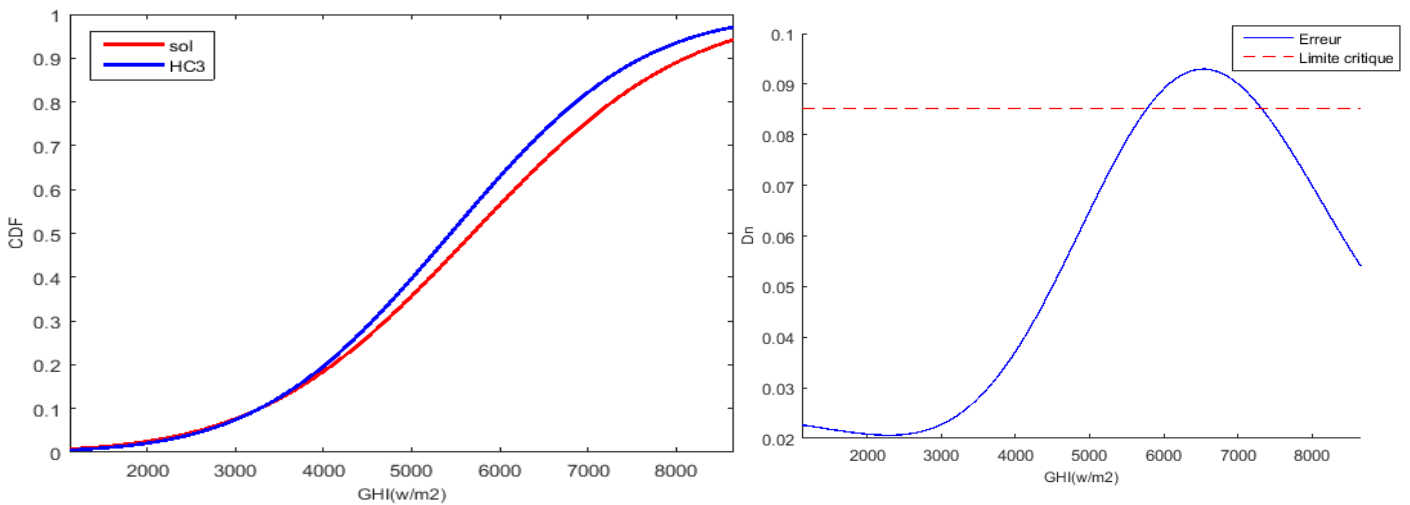


Figure 35: CDFs de GHI sol et HC3 (gauche) et l'erreur entre les deux CDFs.

D'après les CDFs, nous constatons qu'il y a un écart entre les valeurs du sol et du satellite. Pour remédier à ce problème, nous avons d'abord tracé l'erreur pour voir si elle dépasse la limite critique. Malheureusement dans notre cas, cette limite est dépassée pour un certain nombre de données.

Pour avoir une idée sur le nombre de valeurs dépassé, nous calculons un autre paramètre défini dans la suite et qui porte le nom de 'Over'.

b) Le paramètre Over

Ce paramètre est utilisé juste pour les valeurs D_n dépassant la limite critique V_c .

Pour calculer le 'Over', nous calculons d'abord un coefficient auxiliaire noté aux pour les valeurs dépassant la limite critique [38] :

$$aux = \begin{cases} D_n - V_c & \text{si } D_n > V_c \\ 0 & \text{si } D_n \leq V_c \end{cases} \quad \text{Eq. 24}$$

Le paramètre over est obtenu par l'intégration du aux dans la zone critique

$$Over(\%) = \frac{100}{a_{critical}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} aux \, dx \quad \text{Eq. 25}$$

Pour corriger les données dépassant la limite critique, deux solutions sont possibles :

- Rejeter les valeurs dépassant la limite critique est avoir un nouvel ensemble de données qu'est incomplet ;
- Corriger les valeurs aberrantes à l'aide d'une régression.

Dans notre cas, nous avons appliqué la deuxième solution, les nouvelles CDFs sont les suivantes :

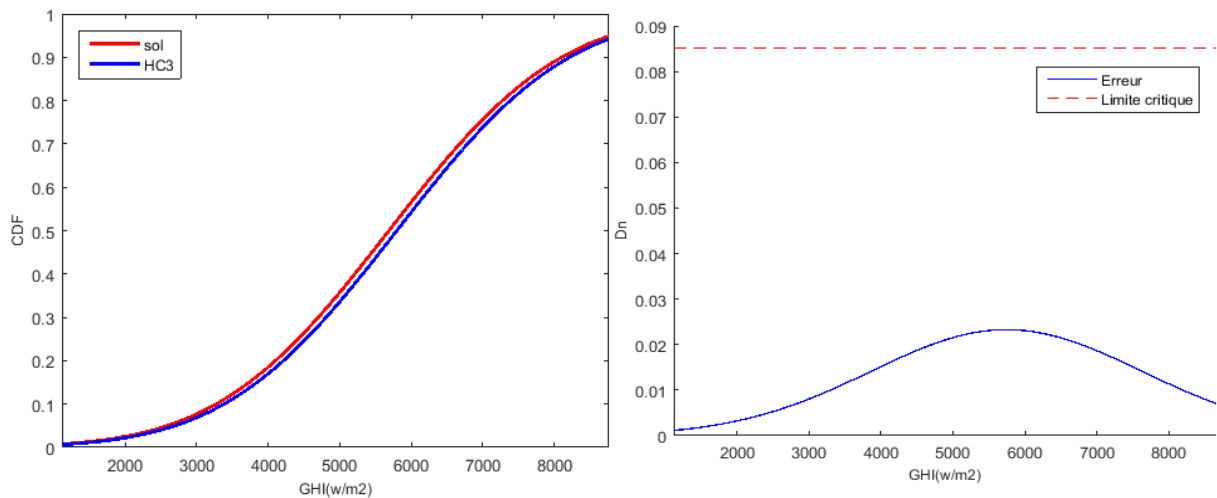


Figure 36: CDFs et erreur entre GHI sol et HC3 après la correction.

La méthode de la calibration à base de la fonction de distribution cumulative a aussi pu montrer son efficacité dans notre cas.

Dans notre cas, la comparaison entre GHI $HC3v4$ déjà sans calibration montre que le biais est faible, mais que la majorité des points de la courbe, pour les valeurs moyennes ou faibles d'irradiation, se trouve sous la diagonale. $HC3v4$ sous-estime les valeurs de l'irradiation globale. Après la calibration du GHI journalier, ce biais est diminué et nous avons trouvé les résultats souhaités.

III.10. Conclusion

La première remarque concernant ce travail est que le contrôle de qualité des données utilisées pour une telle validation est un élément clé de l'analyse et l'utilisation des instruments les plus modernes ne suffit pas pour garantir de bons résultats. En effet, nous pouvons avoir des problèmes provenant de l'appareil de mesure lui-même (la réponse de la température, la sensibilité spectrale, la stabilité, la non-linéarité), ou de la configuration du système (Suivi du soleil, câblage, enregistrement des données et problèmes de transfert de données ou stockage). Nous pouvons avoir également des problèmes de fonctionnement liés à la poussière, la neige, les gouttelettes d'eau, le gel, les fientes d'oiseaux, l'ombrage, les effets de champ mécanique ou électrique, les arrêts du système. Toutes ces sources d'erreurs doivent être prises en considération.

Pour la partie calibration, nous avons vu que certaines méthodes de correction empirique ne modifient que le biais, tandis que d'autres ajustent également la distribution de fréquence des valeurs d'irradiation. Par conséquent, chaque site nécessiterait probablement une étude initiale spécifique pour identifier les sources de divergence et ensuite aider à concevoir une méthode appropriée pour l'adaptation des données entre les observations au sol. Une estimation exacte d'un modèle de calibration n'a pas été largement étudiée jusqu'à présent. Nous notons qu'une procédure d'adaptation de site réussie dépend de manière critique de la qualité des données sol.

Chapitre IV

Modèles de prévision du rayonnement solaire

Chapitre IV - Modèles de prévision du rayonnement solaire

IV.1. Introduction

La prédiction à horizon des séries temporelles est un problème qui recouvre de nombreux domaines d'application. Les études menées dans la finance et l'économétrie ont permis de dégager de nombreux modèles plus ou moins sophistiqués. Ces derniers ont été repris dans le cadre d'autres thématiques, dont la prédiction du rayonnement global par modélisation des séries temporelles. Dans cette section, différentes approches de modélisation seront brièvement présentées. Le but étant de mieux situer le cadre général auquel appartient les modèles qui seront utilisés plus tard dans ce manuscrit [40].

La prédiction dans le domaine insulaire est essentielle car il pourrait permettre de mieux utiliser l'énergie renouvelable solaire dont l'intermittence pénalise lourdement l'intégration dans les réseaux d'exploitation électrique existants. Nous nous sommes concentrés sur les séries temporelles et leur prévision. On définit comme variable principale d'intérêt le GHI qui est le rayonnement global horizontal perçu au niveau du sol [2].

- **Méthodes statistiques** : Les méthodes statistiques s'appuient sur les séries temporelles d'un ou de plusieurs capteurs de GHI afin de construire des modèles statistiques de prévision. Ces méthodes supposent l'existence de séquences répétitives dans la série temporelle que l'on peut apprendre afin de les prévoir par la suite.
- **Modèle de prévision météorologique numérique** : Permettent de réaliser des prévisions pour des horizons supérieurs à six heures.
- **Imagerie satellitaire** : les méthodes de traitement statistique des images de satellites géostationnaires tels que le suivi du mouvement des nuages sont utilisées pour des horizons de prévisions compris entre une heure à six heures.
- **Imagerie hémisphérique** : les méthodes d'imagerie du ciel à partir du sol sont en cours de développement pour faire des révisions avec des horizons inférieurs à l'heure.

IV.2. Les méthodes de prédiction à horizon

IV.2.1. Les séries temporelles

Une série temporelle est une succession d'observations (x_1, x_2, \dots, x_n) représentant un phénomène indexées par le temps. L'indice temps peut être selon les cas : la minute, l'heure, le jour, l'année, etc. Le nombre n est appelé la longueur de la série. Dans notre cas, les observations seront le rayonnement global au sol [41].

Une fois la série temporelle estimée, le modèle doit idéalement être capable de représenter aussi fidèlement que possible la dynamique de l'évolution propre à chaque série. Lorsque le modèle représente correctement cette évolution passée, on peut raisonnablement considérer que la prédiction sera pertinente par rapport à la dynamique qui a été mesurée et qui se trouve dans la série.

IV.2.2. Modèles statistiques

a) Modèle de persistance et de climatologie

Le modèle de persistance est reconnu comme la référence des méthodes de prévision du GHI pour sa simplicité et son universalité. Il s'appuie sur l'hypothèse de persistance de la mesure d'un instant à un autre de proche en proche. La prévision d'une variable temporelle $X(t)$ par persistance consiste à écrire l'équation suivante [10] :

$$\tilde{X}_{(t+1)} = X_t \quad \text{Eq. 26}$$

En effet, on appliquant le modèle directement au GHI on obtiendrait une prévision toujours en décalage avec la mesure à cause de la variation journalière.

Ce modèle va être utilisé par la suite pour la prévision du rayonnement global.

IV.2.3. Les images hémisphériques

Les images hémisphériques sont des images du ciel prises depuis le sol via une caméra possédant un angle de vision de 180°. Les travaux impliquant ces images ont émergé il y a une vingtaine d'années avec l'apparition de capteurs de plus en plus performants. Ces images permettent une description très fine de la couverture nuageuse avec une résolution temporelle de l'ordre de la seconde. Elles sont particulièrement adaptées à l'estimation et à la prévision à très court terme (jusqu'à 30 minutes) du GHI. [10].



Figure 37: Imageur du Ciel Total [10]

IV.2.4. Les modèles de Prévision Numérique de Temps PNT

Les PNTs globaux permettent de réaliser des prévisions pour toute la planète disposent de résolutions spatiales et temporelles assez grossières avec des pixels de dimensions supérieurs à 150 km². Les modèles numériques utilisent des algorithmes de résolution numérique des équations météorologiques assimilant les données météorologiques acquises par des stations de mesures réparties sur le globe. Ils fournissent ainsi des prévisions de nombreuses variables qualifiant l'état de l'atmosphère (température, pression, vent, etc.) pour chaque point de la grille spatiale de prévision. Selon les modèles, la résolution de cette grille peut être plus ou moins fine, cependant elle reste inférieure à la résolution des images satellitaires dans la majorité des cas. Les prévisions nécessitent un temps de calcul important, la résolution temporelle des prévisions est de l'ordre de 3 à 6 heures. Ces modèles permettent une prévision

du GHI à long terme (plusieurs jours) via différents traitements statistiques des sorties obtenues [2].

IV.2.5. La mesure du rayonnement solaire par satellite

Les satellites météorologiques géostationnaires fournissent des images de l'atmosphère et de la terre sur l'ensemble du globe avec une résolution temporelle intra-horaire (15 minutes pour Meteosat seconde génération). Ces caractéristiques font de l'imagerie satellitaire un outil de premier ordre pour la description et le suivi de phénomènes météorologiques de moyenne et grande échelle. Ainsi, de nombreuses méthodes de prévision du GHI profitent de ces images depuis 1980. L'horizon de prévision atteint est généralement de l'ordre de quelques heures (1 à 6 heures). De nombreux modèles du rayonnement solaire ont été développés à partir de ces images selon des algorithmes et des hypothèses différentes : Heliosat, MeteoNorm, CalSol, SatelliLight, r-sun [bat]. La figure suivante présente une classification de différentes méthodes de prévision selon la résolution temporelle et spatiale.

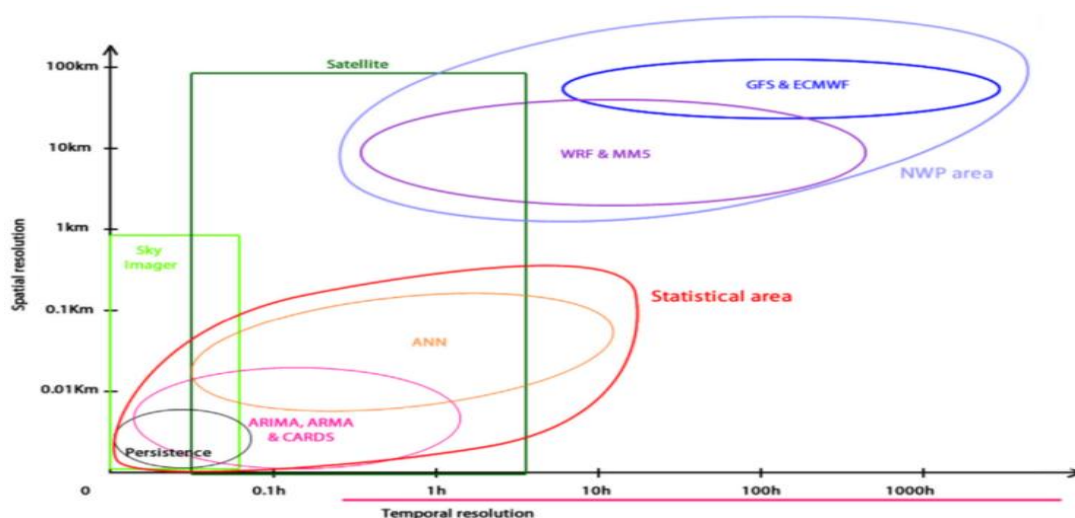


Figure 38: Classification de différentes méthodes de prévision selon la résolution temporelle et spatiale [2].

IV.3. Filtre de Kalman

Nous avons présenté dans les sections précédentes de ce chapitre quelques modèles de prévision basés sur le traitement statistique des mesures. La principale difficulté rencontrée lors de leur développement survient lors de la procédure de calage des paramètres et coefficients de pondération. Une fois ces paramètres déterminés, les modèles peuvent être utilisés tels quels et fournissent des prévisions avec une incertitude constante si elle est évaluée sur une longue période (plusieurs mois ou années). Toutefois, lors d'événements particuliers, ces modèles peuvent se révéler peu fiables car ils sont en général paramétrés pour minimiser l'erreur moyenne sur plusieurs mois ou années. Les modèles adaptatifs constituent une alternative intéressante. Ces modèles, de type lissage exponentiel adaptatif, filtrage adaptatif ou filtre de Kalman cherchent non pas à minimiser l'erreur moyenne de l'historique mais à minimiser l'erreur moyenne future. Le filtre de Kalman (Kalman, 1960) est capable de fournir une prévision d'une série non stationnaire en tendance et en variance en utilisant un modèle dont les paramètres ou les variables d'état peuvent également varier. [42]

IV.3.1. Fonctionnement du filtre de Kalman

Le fonctionnement du filtre de Kalman peut se diviser en trois étapes [42] :

- L'état initial est une variable gaussienne, indépendante des bruits du système, matrice de covariance connue ;
- Une deuxième étape de **prédiction** de l'estimation selon le modèle du système. Pour ce faire, le filtre de Kalman reprend l'estimation précédente des paramètres et de l'erreur et prédit les nouveaux paramètres et la nouvelle erreur en fonction de la modélisation du système ;
- La troisième étape va faire la **mise à jour** de cette prédiction grâce aux nouvelles mesures. Ces mesures (par définition bruitées) vont permettre d'obtenir une estimation des paramètres et de l'erreur à partir de la prédiction faite. Si jamais le modèle comporte des erreurs, cette étape de mise à jour permettra de les rectifier.

IV.3.2. Prévision basée sur le modèle d'état

L'intérêt d'utiliser un modèle espace-état pour prévoir une série temporelle, repose sur quelques points. D'abord, les besoins de stationnarité nécessaire à l'utilisation d'un modèle de régression sont éliminés d'autant plus que les résultats du filtre de Kalman restent valides en présence de séries non- stationnaires. Le modèle espace-état s'appuie sur les concepts de variable observée et variable cachée. La variable observée correspond au signal et la variable cachée représente l'état interne. [43]

Cependant, la représentation espace-état associée à un processus y_t n'est pas unique car diverses dimensions du vecteur d'état sont possibles. Donc il convient de rechercher un modèle de dimension optimale, de manière à ne pas alourdir la procédure d'estimation. Pour simplifier cette dernière, les hypothèses suivantes sont retenues :

- Les équations de mesure et d'état sont linéaires ;
- Les bruits d'observation et d'innovation sont des bruits blanc;

Ainsi, le modèle espace-état est constitué d'une équation de mesure et d'une équation d'état. L'équation de mesure (Eq 27) décrit la manière dont les variables observées sont générées par les variables cachées et les résidus. L'équation d'état (Eq 28) décrit la génération des variables cachées à partir de leur retard et innovation. Le modèle espace du processus multivarié est :

$$x_{t+1} = M_t x_t + w_t \quad \text{Eq. 27}$$

$$y_t = H_t x_t + v_t \quad \text{Eq. 28}$$

y_t : Variable de mesure et x_t est la variable d'état ;

w_t : Vecteur de l'erreur ou bruit d'innovation ;

v_t : Vecteur des erreurs de mesure ;

M_t : La matrice de transition et H_t la matrice de mesure.

Le principe du filtre de Kalman est d'estimer à chaque instant t le vecteur d'état x_t connaissant des observations y_t observée jusqu'à la date t .

- Prédiction :

$$X_{pred,t} = X_{t-1} + W_t \quad Eq. 29$$

$$P_{pred,t} = P_{t-1} + W_{t-1} \quad Eq. 30$$

- Mise à jour de la mesure :

$$X_t = X_{pred,t} + K_t(y_t - H_t \cdot X_{pred,t}) \quad Eq. 31$$

$$K_t = P_{pred,t} \cdot H_t^T (H_t \cdot P_{pred,t} H_t^T + V_t)^{-1} \quad Eq. 32$$

$$P_t = P_{pred,t} - K_t H_t P_{pred,t} \quad Eq. 33$$

$X_{pred,t}$: La prévision de X_t ;

X_t : L'estimation courante du vecteur d'état ;

P_t : Matrice de covariance de l'erreur ;

W_t : Matrice de covariance du bruit sur l'état ;

V_t : Matrice de covariance du bruit de mesure.

La matrice K_t est le gain du filtre de Kalman (Eq 32). Durant la phase de correction, ce gain K_t est multiplié à l'innovation $y_t - H_t \cdot X_{pred,t}$ qui est la différence entre la mesure observée et la mesure prédite. L'innovation permet de corriger l'estimée prédite. Les équations (Eq 31) et (Eq 33) actualisent respectivement l'estimation de x_t et sa précision, l'estimation courante du vecteur d'état dans l'équation (Eq 31) est obtenue à partir de l'estimation faite à la date $t - 1$, à laquelle on ajoute un terme prenant en compte l'information nouvelle contenue dans l'observation de y_t , ce terme, s'exprime simplement en fonction de l'estimation à la date $t-1$ de x_t de la variable de mesure y_t , et de la matrice de gain K_t . L'initialisation de l'algorithme nécessite la connaissance de la condition initiale x_0 et la covariance P_0 .

IV.4. Mise en place du modèle de Kalman

IV.4.1. Algorithme du modèle de Kalman

Le modèle de Kalman réalise la prévision du biais sur l'indice de clarté. Dans notre étude, la technique d'initialisation des paramètres, et la démarche suivie sont inspirées des travaux de Galanis [44] qui utilise le filtre de Kalman pour la prévision du vent et les travaux de Pelland [45] Il s'agit de l'application du filtre de Kalman aux mesures historiques pour corriger la prévision du modèle d'état.

Les enchainements des phases de prédiction et de correction sont illustrés sur la figure 39:

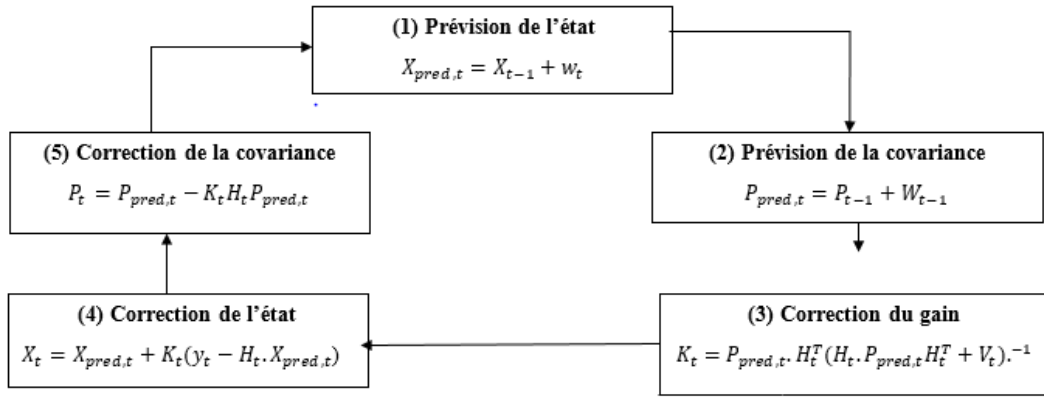


Figure 39: Algorithme du filtre de Kalman

IV.4.2. Modèle de Kalman

La méthode de prévision à très court terme proposée dans ces travaux est un modèle de Kalman. En effet, elle combine dans un modèle statistique, à savoir le filtre de Kalman linéaire, les résultats de prévision avec persistance et les mesures pyranométriques faites sur le site d'expérimentation. A chaque instant t nous allons utiliser le filtre de Kalman pour corriger l'erreur produite par la méthode de persistance.

IV.4.3. Identification des entrées pertinentes

A ce jour, il n'existe pas de méthode de sélection des entrées pertinentes pour la technique du filtre de Kalman. Nous avons pensé à remplacer le GHI par l'indice de clarté. En effet, cette dernière a naturellement une valeur comprise entre 0 et 1.2. Le choix de remplacer le rayonnement par l'indice de clarté est justifié par la large utilisation de ce dernier dans le domaine de la prévision solaire.

Dans ce cas on a :

$$H_t = [1 \quad K_{t,persis}(t+1)] \quad \text{Eq. 34}$$

$$y_t = H_t x_t + v_t \quad \text{Eq. 35}$$

$$x_t = x_{t-1} + w_t \quad \text{Eq. 36}$$

avec $K_{t,persis}$ l'indice de clarté prévu avec la méthode de persistance.

Cette procédure permet de faire des corrections avant de produire la prévision de l'instant $t+h$. Le démarrage de l'algorithme passe par une phase d'initialisation des variables qui est l'objet de la section suivante.

IV.4.4. Initialisation du filtre

Le choix des données initiales du modèle de Kalman est inspiré des travaux de Galanis [44]. Dans ce contexte, le vecteur d'état initial x_0 est initialisé à zéro, la matrice de covariance initiale P_0 est définie diagonale. De plus, les termes de la diagonale sont fixés à des valeurs élevées.

Pour identifier les valeurs initiales optimales de W_t et de V_t , notées respectivement W_0 et V_0 , une série de leurs combinaisons a été testé. Une fois les valeurs initiales optimales W_0 et V_0 identifiées, l'étape suivante consiste à définir leurs politiques d'évolution durant la phase de calibration. Concernant les variables x_t et y_t , leur évolution est réalisée par le filtre lui-même. Par la suite, les variables W_t et V_t sont fixé à leur valeur initiale durant toute la simulation. La combinaison de W_0 et V_0 produisant la plus faible RMSE est retenue comme la valeur initiale optimale.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre présente d'une façon générale quelques modèles de prévision du rayonnement solaire. Il décrit par ailleurs le modèle de Kalman développé au cours de ce travail pour faire des prévisions à court terme du GHI.

L'établissement du modèle se base sur un modèle d'état inspiré du filtre de Kalman. Il s'ensuit d'une phase d'initialisation et de calibration de l'algorithme. La sélection des entrées a été faite en partant de l'algorithme de Poland et de ses variantes. Ce test abouti au choix de l'indice de clarté comme variable d'entrée du modèle.

Chapitre V

Résultats & discussions

Chapitre V - Résultats et discussions

V.1. Introduction

La revue bibliographique faite dans le chapitre précédent a montré les différents estimateurs utilisables pour la prédiction du rayonnement global. Dans ce chapitre, nous allons détailler la méthodologie développée durant ce travail qui tient compte des deux approches distinctes : le modèle de Kalman et la persistance pour la prédiction des séries temporelles, puis une comparaison des performances de la méthode de prévision proposée avec celle de référence. Pour ce faire, les données de la station météorologique de Benguerir sont exploitées.

V.2. Analyse de la série temporelle

Quand on utilise le formalisme des séries temporelles comme outil de prédiction, il faut bien avoir à l'esprit que l'on ne va pas prédire une grandeur météorologique absolue mais uniquement la mesure de celle-ci par un dispositif physique. Pour utiliser le formalisme des séries temporelles, il est toujours utile en premier temps de présenter l'évolution temporelle d'un phénomène (profil et allure de la chronique) à l'aide d'un graphique ayant en ordonnée la valeur du phénomène x_t et en abscisse le temps t . Ainsi sur la figure 40, on peut rendre compte que le phénomène de rayonnement global est un ensemble de signaux périodiques avec un bruit (lié à la couverture nuageuse). Les données relatives à la nuit ont été retirées pour une plus grande lisibilité, seules les heures entre 7h00 et 18h00 sont considérées :

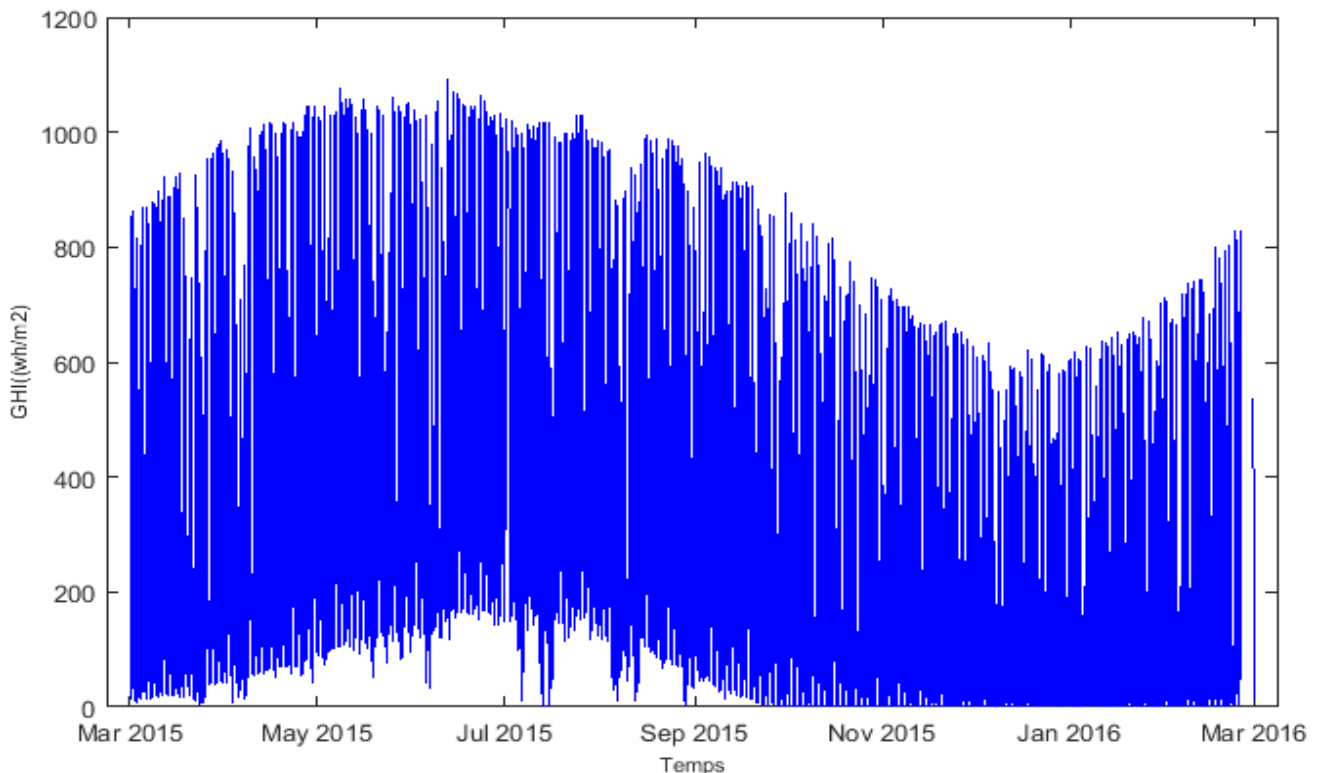


Figure 40: Représentation du rayonnement global horizontal horaire, pour le site de Benguerir entre mars 2015 et février 2016.

V.3.Performances des prévisions à court terme

V.3.1. Prévisions avec le modèle de persistance

L'application de ce modèle à la prévision du GHI nécessite l'utilisation de l'index K_t . En effet, en appliquant le modèle au GHI on obtiendrait une prévision toujours en décalage avec la mesure à cause de la variation journalière connue (figure 41). La prévision de GHI par persistance s'écrit donc avec les équations suivantes :

$$K_t(t + 1) = K_t(t) \quad \text{Eq. 37}$$

$$GHI(t + 1) = K_t(t + 1) \times GHI_{atm}(t + 1) \quad \text{Eq. 38}$$

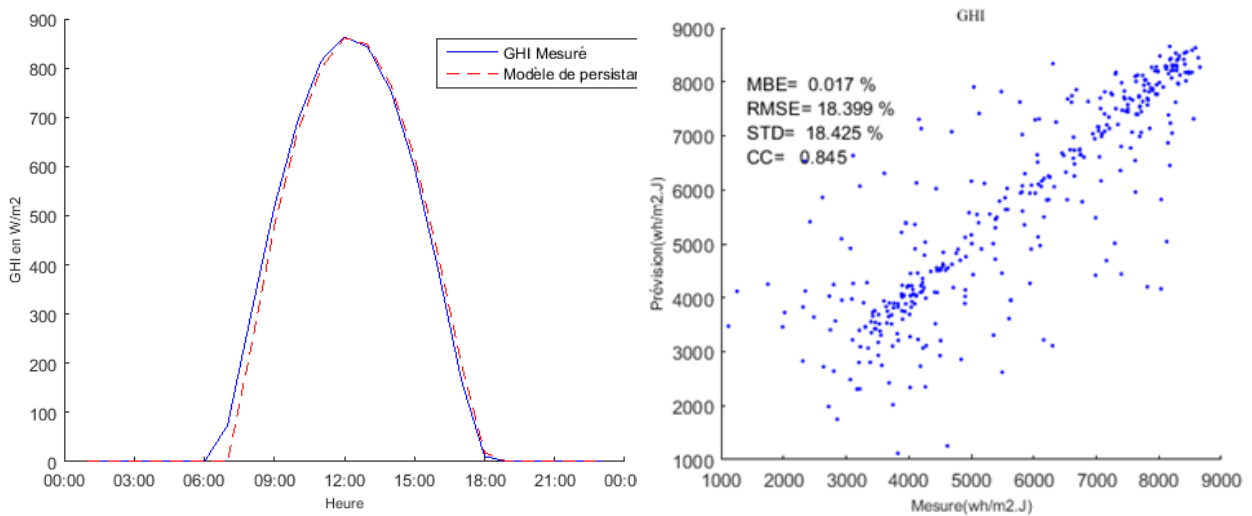


Figure 41: Résultats de prévision avec la méthode de persistance.

Les résultats de persistance journalière sont comparés aux mesures pyrométriques à travers la figure 41. Cette dernière montre que les prévisions sont très peu biaisées mais présentent une forte erreur quadratique moyenne. Ce constat est confirmé par les métriques d'évaluation de la qualité de prévision avec un $RMSE$ de 18,399% et une MBE de 0,01%. Cette étude de performance montre que la technique de persistance offre une qualité de précision qu'on pourra encore l'améliorer tout en utilisant le modèle de Kalman présenté dans la suite.

V.3.2. Modèle de Kalman

Les prévisions à très court terme du GHI sont faites d'une part avec la technique de la persistance et d'autre part avec le modèle de Kalman. C'est une prévision à horizon multiple, elle dépend du pas d'échantillonnage de la mesure pyranométrique.

Nous rappelons que les heures de nuit ne sont pas prises en compte lors des simulations. Pour le cas horaire, nous considérons douze mesures par jour. Notre objectif sera de corriger les résultats de prévision de la méthode de persistance avec le filtre de Kalman.

▪ **Initialisation du filtre**

Nous avons testé différents scénarios pour les valeurs de la matrice de covariance, afin d’obtenir une meilleure valeur du GHI.

▪ **Cas n° 1 :**

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{pmatrix}; V_0 = 0.01$$

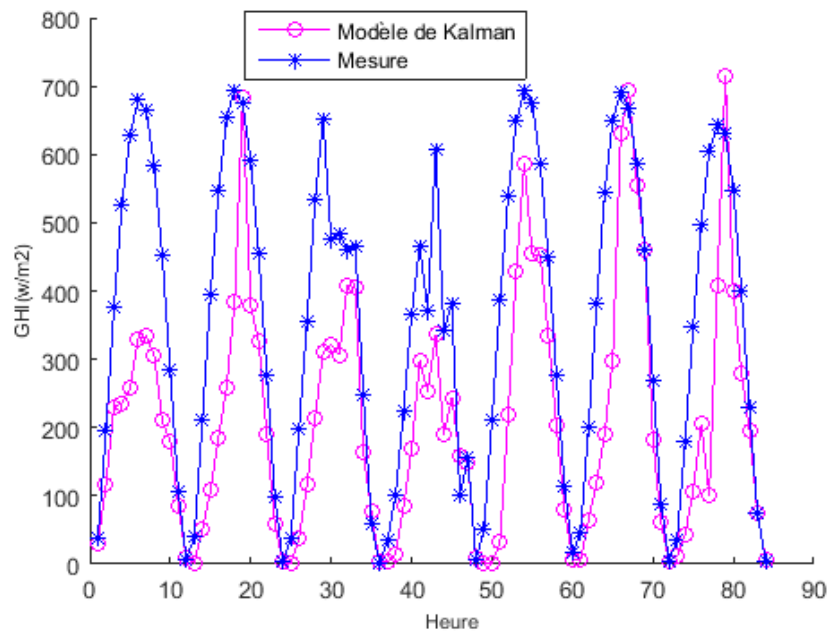


Figure 42: Résultats du filtre de Kalman pour des conditions initiales faibles.

Nous avons appliqué le filtre pour un historique de données d’une semaine. Dans ce cas le modèle de Kalman ne corrige pas l’erreur de la méthode. Si nous choisissons des conditions initiales nulles, le filtre ne corrigera pas l’état, alors, les résultats du filtre de Kalman et de persistance sont les mêmes.

▪ **Cas n° 2:**

Pour ce cas le choix des valeurs initiales est inspiré des travaux de Polland.

$$P_0 = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}; \quad W_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad V_0 = 0.01; \quad X_0 = [0; 0]^T$$

Nous avons appliqué le filtre directement au rayonnement global pour deux types de jours, ciel clair, et ciel couvert et variable.

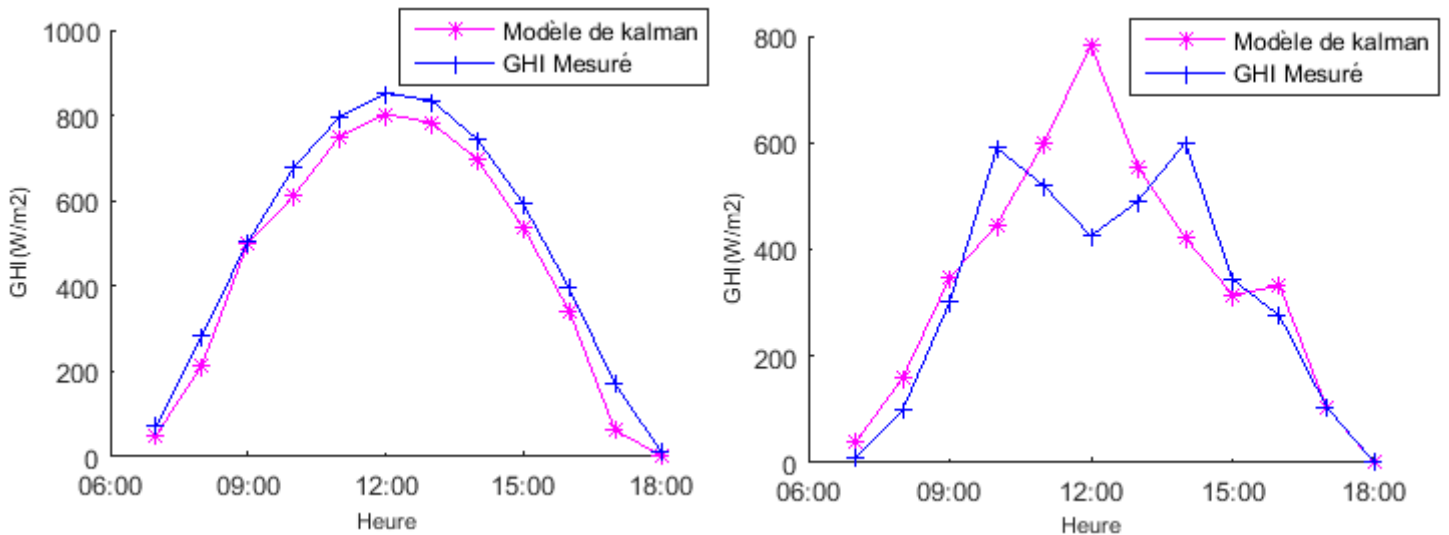


Figure 43: Prédiction $h+1$ avec Kalman pour une journée claire (à gauche) pour une journée non clair et variable (à droite).

La figure 43 illustre les résultats de prévision pour un horizon de 1 heure pendant une journée. Pour le jour clair, on obtient plus au moins de bon résultats avec un RMSE de $55 w/m^2$, mais pour le cas d'une journée non clair est variable, on obtient de mauvaise prévision avec un RMSE élevé arrivant à $130 w/m^2$. D'autre part, le filtre de Kalman corrige le décalage dû à la méthode de persistance.

Cette précision du modèle obtenu à partir du GHI en entrée nous semble pouvoir être améliorée en utilisant en entrée l'indice de ciel clair au lieu du GHI.

Dans ce cas
$$H_t = [1 \quad K(t+1)_{t_{persis}}] \tag{Eq. 39}$$

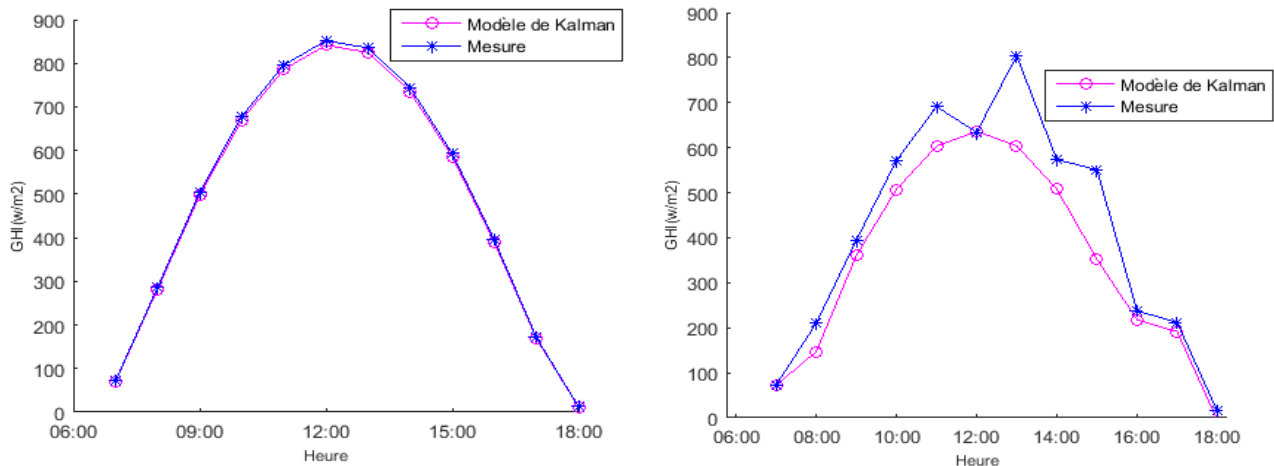


Figure 44: Irradiation solaire prévue avec le filtre de Kalman pour une journée ensoleillée (à gauche) et une journée variable (à droite).

Comme nous constatons sur la figure 44 (à gauche), nous avons un profil d'un jour typiquement ensoleillée sans nuage. Nous observons que le modèle de prédiction est très fiable. Par contre pour une journée partiellement couverte mais variable, pour les premières heures où la variabilité est faible, le modèle répond bien, mais dès que la variabilité augmente, pour lui

le jour est non variable. Il faut noter que l'introduction de l'indice de clarté au lieu du GHI contribue à l'amélioration de la prévision.

D'après la figure 44, nous pouvons conclure que le modèle de Kalman est capable de corriger efficacement le biais de la prévision obtenue avec la méthode de persistance et surtout pour les jours clairs.

La figure 45 illustre l'irradiation solaire globale pendant une journée ciel clair, estimé par différentes méthodes. Les tableaux 4 et 5 résument les valeurs du *MBE*, et du *RMSE* pour chaque type de jour.

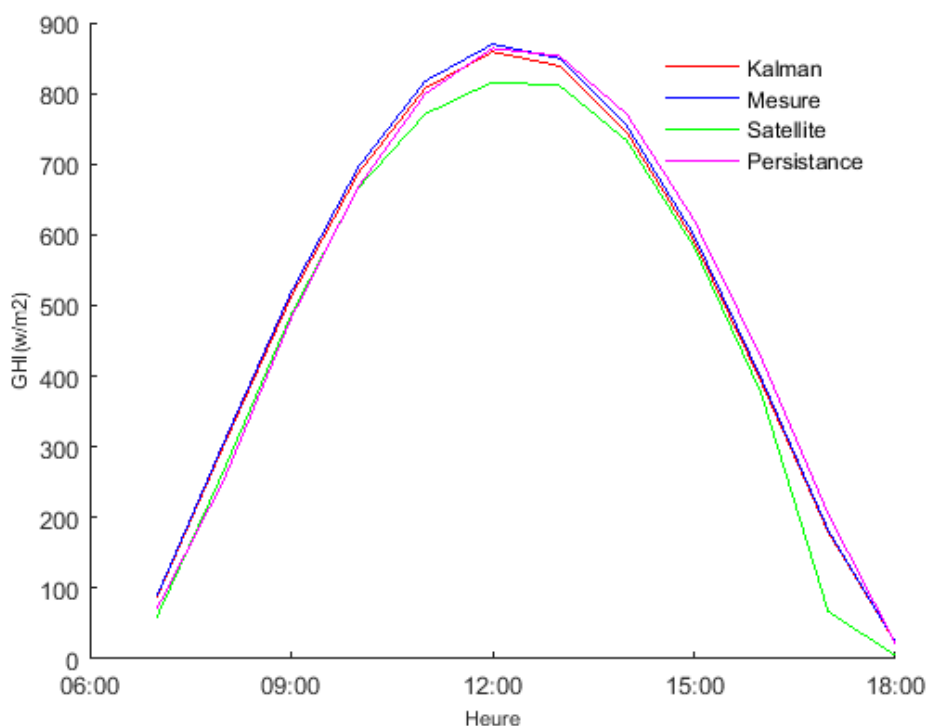


Figure 45: Exemple d'une journée de mesure pour chaque méthode.

Nous présentons au niveau des deux tableaux suivants, les résultats obtenus pour différents états du ciel.

	MBE(%)	RMSE(%)
Persistance	-1.1	5.01
Kalman	-1.99	2.26
Satellite	-7.56	9.08

Tableau 4: Comparasion des performances pour une journée claire

	MBE(%)	RMSE(%)
Persistance	-5.2	51.33
Kalman	-25.4	31.6
Satellite	2.42	12.9

Tableau 5: Comparaison des performances pour une journée non claire et variable.

Nous remarquons que le modèle donne de bons résultats pour les jours clairs. Par contre, l'erreur augmente pour une journée variable et non claire.

V.4. Conclusion

L'intégration du modèle de persistance au modèle de Kalman a amélioré sensiblement les résultats de prévision de l'irradiation solaire globale, avec le filtre de Kalman et pour des journées claires. Nous avons obtenu des résultats proches de celles mesurées avec un pyranomètre bien étalonné et entretenu. Nous pouvons conclure alors que l'utilisation du filtre de Kalman peut fournir des informations plus au moins précises sur l'évolution du rayonnement solaire et surtout pour le cas des jours non clairs.

IL faut noter que généralement la prédiction inclut correctement la mesure, mais parfois l'erreur peut être très importante, vue quand n'a pas pris en considération différents scénarios. La précision obtenue serait bien meilleure que celle données ci-dessus si l'on arrive à bien choisir des entrées du modèle.

Conclusion générale et perspectives

Le rayonnement solaire reçu par la surface de la Terre peut être mesuré au sol ou dérivé par des modèles, lorsque la composition atmosphérique de la région est connue. Les données dérivées du satellite ont l'avantage de couvrir des périodes plus longues avec une forte couverture spatiale. Cependant, la qualité de ces ensembles de données satellitaires peut être médiocre. Ces incertitudes proviennent de différentes sources et des approximations adoptées par les modèles. Elles peuvent être considérablement réduites à l'aide des observations d'irradiation sur site de haute qualité couvrant une période minimale de 9 à 12 mois. Une étape préalable de contrôle de qualité des données utilisées est primordiale une telle validation, même si les données ont été acquises par des appareils de mesures de haute qualité. D'après les résultats du contrôle de qualité appliqué à l'ensemble des données d'irradiation globale disponible au sol durant la période d'étude, nous pouvons tirer la conclusion que le site de Benguerir ne présente aucun problème, excepté la présence de quelques heures manquantes qui ont été interpolées avec un algorithme de « Gap felling ».

Le nouvel ensemble de données sera utilisé par la suite pour corriger les données satellitaires issues de la base de données Helioclim-3. Une comparaison entre les mesures pyranométriques et satellitaires donnent de meilleures statistiques pour le GHI déjà sans calibration avec un coefficient de corrélation égale à 0.98, mais une sous-estimation du GHI par le satellite est remarqué avec un biais égale à -4.5%. Les écarts entre les deux mesures sont dus dans la plupart des cas aux problèmes de la différence spatiale et temporelle, et les paramètres entrant dans le modèle, dans le domaine de l'énergie solaire. Ce point est souvent très important. Notre contribution a porté sur l'élimination de l'erreur entre les deux mesures. L'ensemble des méthodes appliquées pour la correction montrent que certaines méthodes ne modifient que le biais, tandis que d'autres ajustent la distribution de fréquence. Jusqu'à présent aucun modèle exacte de calibration n'a été largement étudié.

De l'analyse des résultats obtenues, il en ressort que les performances du modèle dépendent du type de jour en terme de couverture nuageuse et de variabilité de l'ensoleillement. L'amélioration qu'apporte le modèle de Kalman étant faible, il sera intéressant de le peaufiner dans des futurs travaux.

Futurs travaux

- Contrôle de qualité des données des quatre stations météorologiques : Tantan, Arfoud, Zagoura, et Missoour.
- Approfondir l'exploitation du modèle de Kalman à travers, l'utilisation des prévisions d'un modèle numérique (WRF).
- Comparer les méthodes de prévision sur tous les types de jours identifiés. Pour cela, il faudra avoir une plus grande fréquence l'apparition de tous les types de jours identifiés. Par conséquent, il faudra produire des prévisions pour des territoires qui présentent des similitudes de caractéristiques météorologiques et disposent de mesures historiques importantes comme les sites Tan-Tan, Arfoud, Zagoura et Missour.
- Génération d'une TMY à partir de quatorze ans des données issue de la base de données Helioclim3.

Perspectives

Les résultats de ces travaux ouvrent plusieurs pistes de recherche dont notamment :

- Penser à faire une calibration du rayonnement direct DNI.
- Etendre l'étude à la prédiction d'autres paramètres météorologique, par exemple la durée d'insolation qui est un paramètre très important pour la prévision du rayonnement solaire.
- Utiliser autre méthode pour la prévision de l'irradiation solaire globale, par exemple les algorithmes génétiques, la logique floue, et penser à l'hybridation des différents modèles.
- Prédire l'irradiation solaire pour plusieurs échelles temporaires (jour, minute) ;
- L'utilisation des SIG (Système d'Information Géographique) dans les prédictions afin de réellement prendre en compte le relief et ainsi mieux quantifier le masque solaire, les zones géographiquement équivalentes, etc.
- Elaborer un modèle de calibration et de prévision pour les irradiances solaire diffuse et directe, pour la zone de Benguerir et les autres régions.

Annexe

Au-delà de la qualité des mesures, il est intéressant de savoir caractériser le site d'expérimentation de façon simple. Il s'agit de savoir s'il existe une météorologie prédominante ou non, et si oui laquelle ? On propose pour cela de faire une classification assez simple des types de jours observés, basée sur les mesures journalières moyennées sur 1 heure. Afin de garder une classification simple, deux critères ont été retenus.

- La valeur moyenne journalière de $\bar{k}_{t,jour}$ de l'indice de clarté K_t qui définit le type de ciel. Dans ce contexte, trois classes de jours ont été identifiées dans les travaux de Dambreville [46] :
 - **La classe A** ou le ciel est clair et $\bar{k}_{t,jour}$ est supérieure à 0.8 ;
 - **La classe B** ou le ciel est mitigé $\bar{k}_{t,jour}$ est compris entre 0.4 et 0.8 ;
 - **La classe C** ou le ciel est nuageux et $\bar{k}_{t,jour}$ est inférieure à 0.4 ;

$$\text{Avec } \bar{k}_{t,jour} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_t(k)$$

N : Le nombre de mesures quotidiennes disponible après le contrôle de qualité.

- Le deuxième critère de classification, à savoir la variabilité $\delta\bar{k}_{t,jour}$, illustrée par l'équation est l'écart-type des changements d'indices de clarté selon Hoff et al [47].

$$\delta\bar{k}_{t,jour} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_t(i+1) - k_t(i))^2}$$

La variabilité $\delta\bar{k}_{t,jour}$ décrit la variation intra-journalière de proche en proche de l'indice de clarté. Cette dernière est organisée en trois familles suivant la valeur de $\delta\bar{k}_{t,jour}$ d'après les travaux de Dambreville [46] :

- **La classe I** ou la variabilité est faible et $\delta\bar{k}_{t,jour}$ est inférieur à 0.05 ;
- **La classe II** ou l'ensoleillement est fréquemment variable et $\delta\bar{k}_{t,jour}$ est compris entre à 0.05 et 0.15 ;
- **La classe III** ou l'ensoleillement est très variable et $\delta\bar{k}_{t,jour}$ est supérieur à 0.15.

La classification de l'ensoleillement quotidien de notre site par rapport à la moyenne de l'indice de clarté, et par rapport à la variabilité intra-journalière de cet indice pour une année de mesure est synthétisée dans le tableau suivant :

	Classe A	Classe I	Classe B	Classe II	Classe C	Classe III
Condition	$\bar{k}_{t,jour} > 0.8$	$\delta\bar{k}_{t,jour} < 0.05$	$0.4 < \bar{k}_{t,jour} < 0.8$	$0.05 < \delta\bar{k}_{t,jour} < 0.15$	$\bar{k}_{t,jour} < 0.4$	$\delta\bar{k}_{t,jour} > 0.15$
Benguerir	190 j	8 j	160 j	318	14 j	40 j

Bibliographie

- [1] Helali Kamilia, « *Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative* », Doctorat, Université Moloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.
- [2] Mathieu David, « *Méthorologie appliquée aux systèmes énergétiques*», Habilitation à Diriger des recherches, Université de la réunion, France, 27 avril 2015.
- [3] Mieslinger, Theresa, « *A new method for fusion of measured and model-derived solar radiation time-series*», *Energy Procedia*, 48: 1617-1626 ,(2014).
- [4] [Http://www.iresen.org/linstitut/](http://www.iresen.org/linstitut/) [consulté le 18/02/2017].
- [5] [Http://www.greenenergypark.m/](http://www.greenenergypark.m/) [consulté le 08/02/2017].
- [6] [Http://nomana.free.fr/public/solaire.html](http://nomana.free.fr/public/solaire.html) [consulté le 21/01/2017].
- [7] Meziani Fariza , « *Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement des données solaire au sol et d'images météeosat* », Magister, Université Moloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2015.
- [8] Chaouchi Mouhous, « *Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné*». Magister, Université Abou Bekr Belkaid, TLEMCEN, Algérie, 2012 .
- [9] Cooper, P. I. « *Digital simulation of transient solar still processes* », *Solar Energy*, vol. 12, no 3,p. 313-331, 1969.
- [10] Romain Dambreville, « *Prévision du rayonnement solaire global par télédétection pour la gestion de la production photovoltaïque* », Doctorat, Université de Grenbole, France, 2014.
- [11] Meziani. Fariza, «*Détermination du gisement solaire par traitement d'image MSG*». Doctorat, Université Mouloud Mammeri, TIZI-OUZOU, Algérie, 2011.
- [12] M. Samira, « *Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné*», Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Algérie, 2012.
- [13] B. Halouma, « *Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire, Mémoire de magister en électrotechnique*», Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [14] S. Saadi, «*Effet des paramètres pérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de magister en Physique*», Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [15] Muhammad Iqbal, « *Introduction to solar radiation*», Academic Press, New York, 1983.
- [16] B.Espinar, L.Wald, Ph.Blank, «*Training in Solar Radiation*», Mines ParisTech-ARMINES-Transvalor, 2014.
- [17] www.ifc.org/wps/wcm/connect/2832cfd1887/Solar+Report+French_WEB.pdf [consulté le 20/02/2017].
- [18] [Http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile#.WLNtRdLJxdg](http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile#.WLNtRdLJxdg) [consulté le 14/02/2017].

- [19] T.Muneer, «*Solar Radiation and Daylight Models*», Doctorat, Université Napier, Edinburgh, 2004.
- [20] <http://www.memoireonline.com/02/13/6955/Outil-d-aide-au-dimensionnement-des-systemes-photovoltaques-domestiques.html> [consulté le 25/02/2017].
- [21] Duffle et W. Beckman, «*Solar Engineering of Thermal Processes*», Book, Etats Unis, 1980.
- [22] <http://solairexpomaroc.com/index.php/persepectives-du-marche-marocain>. [consulté le 12/02/2017].
- [23] http://www.academia.edu/7510504/Chapitre_I_Le_gisement_solaire_I.1-Introduction. [consulté le 22/02/2017].
- [24] Ministère de l'Energie, des Mines de L'eau et de l'Environnement, «*Horizon. Stratégie Energétique Nationale : Horizon 2030* », Royaume du Maroc.
- [25] B.Espinar, L.Wald, Ph.Blanc, T.Wandrer «*Report on the Harmonization and qualification of meteorological data* ». Endorse project, 2011.
- [26] Espinar, Blanc, Wald, «*Controlling the quality of measurements of meteorological variables and solar radiation*», Rapport, Endorse project, 2011.
- [27] B.Espinar, L.Wald, Ph.Blanc, «*Statistics, Quality check, Calibration and TMY*». Rapport, Mines parisTech-Armines- Transvalor, 2014.
- [28] N.Geuder, F.Wolferssetter, S.Wilbert, «*Screening and flagging of solar irradiation and ancillary meteorological data*», International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPaces, 2015.
- [29] Abdellatif Ghennioui and Etienne Wey, «*Ground Station irradiation data reading- Quality Check Helioclim3*».IRESEN, MineParisTech, Transvalor, 2014.
- [30] Theresa, Mieslinger. «*A new method for fusion of measured and model-derived solar radiation time-series* », International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg, Germany, 48 : 23-25, 2013.
- [31] Polo, J. «*Integration of ground measurements to model-derived data: A report of IEA SHC Task 46 Solar Resource Assessment and Forecasting* », 2015.
- [32] Polo, Jesus. «*Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets* », Solar Energy, 132 : 25-37, 2016.
- [33] Cebecauer, Tomas, Suri, Marcel et Gueymard, Christian A. «*Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally?* », solar consulting services, usa, 2011.
- [34] Espinar, Bella, «*Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations* » Solar Energy 83.1 : 118-125, 2009.
- [35] Cebecauer, Tomas, and Marcel Suri. «*Site-adaptation of satellite-based DNI and GHI time series: Overview and SolarGIS approach* », AIP Conference Proceedings. Eds. Vikesh Rajpaul, and Christoph Richter. Vol. 1734. No. 1. AIP Publishing, 2016.
- [36] Mieslinger, Theresa, «*A new method for fusion of measured and model-derived solar radiation time-series* », Energy Procedia, 48 : 1617-1626. 2014.

- [37] *Abdellatif Ghennioui, Etienne wey , « Ground station irradiation data reading – Quality Check – HelioClim-3v5 calibration », IRESEN-MinesParisTech, 2014.*
- [38] *Mieslinger, Theresa, « A new method for fusion of measured and model-derived solar radiation time-series », Energy Procedia, 48 : 1617-1626. 2014.*
- [39] *Kleissl, Jan. « Solar energy forecasting and resource assessment», Academic Press, 2013.*
- [40] *Lamissa Diabaté, « Détermination du rayonnement solaire à l'aide d'images satellitaires. Doctorat », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 1989.*
- [41] *Cyril Voyant, « Prediction de series temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels », Doctorat, Université de Corse, Marseille, 2011.*
- [42] *Frédéric Jordan, « Modèle de prévision et de gestion des crues », Doctorat, Université de l'environnement naturel, architectural et construit, Genève, 2007.*
- [43] *Zbigniew Dziong, « Modélisation, estimation et contrôle, pour les réseaux de Télécommunication », Doctorat, Ecole de technologie supérieur, 2010.*
- [44] *Galanis, George, Peter C. Chu, and George Kallos. « Statistical post processes for the improvement of the results of numerical wave prediction models. A combination of Kolmogorov-Zurbenko and Kalman filters», Journal of Operational Oceanography, 4.1 : 23-31. 2011.*
- [45] *Pelland, Sophie, George Galanis, and George Kallos. « Solar and photovoltaic forecasting through post-processing of the Global Environmental Multiscale numerical weather prediction model », Progress in photovoltaics: Research and Applications, 21.3 : 284-296. 2013.*
- [46] *Dambreville, R., Blanc, P., Chanussot, J., and Boldo, D. (2014). «Very short term forecasting of the global horizontal irradiance using a spatio-temporal autoregressive model», Renewable Energy.*
- [47] *Hoff, T. E. and Perez, R. (2012). «Modeling {PV} fleet output variability», Solar Energy, 86(8):2177 – 2189. Progress in Solar Energy 3.*