



Estimation de l'Irradiation Solaire sur le Plateau des Guyanes: apport de la Télédétection Satellite

Tommy Albarello

► To cite this version:

Tommy Albarello. Estimation de l'Irradiation Solaire sur le Plateau des Guyanes: apport de la Télédétection Satellite. Astrophysique stellaire et solaire [astro-ph.SR]. Université de Guyane, 2016. Français. NNT : 2016YANE0008 . tel-01527108

HAL Id: tel-01527108

<https://theses.hal.science/tel-01527108>

Submitted on 23 May 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LA GUYANE
Ecole Doctorale 587
« Diversités, santé et développement en Amazonie »
DFR « Sciences et Technologies »

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur de l'Université de la Guyane

Présentée par

Tommy ALBARELO

**ESTIMATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE SUR LE PLATEAU DES
GUYANES : APPOINT DE LA TELEDETECTION SATELLITE**

Sous la direction de **Laurent LINGUET** et **Frédérique SEYLER**

Soutenue le 07 Décembre 2016 à Cayenne devant le jury composé de

Fabrice CHANE MING, MCF HDR, Université de La Réunion

Rapporteur

Laurent LINGUET, MCF HDR, Université de Guyane

Co-Directeur

Philippe POGGI, Professeur Université de Corte

Rapporteur

Frédérique SEYLER, Directrice de recherches, IRD

Directrice



«_ J'ai fait ce qu'il fallait, n'est-ce pas ? Tout s'est bien déroulé, à la fin .

_ « À la fin » ? Rien ne finit, Adrian. Rien ne finit jamais. »

Extrait de Watchmen, de Alan Moore e Dave Gibbons

Remerciements

Et qui aurait cru que l'on verrait la fin ? C'est à l'issue de la fin de ma thèse que je tiens humblement à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé directement ou indirectement dans cette aventure.

Tout d'abord, je tiens à remercier M. Philippe Poggi et M. Fabrice Chane-Ming d'avoir fait le déplacement jusqu'en Guyane afin de participer à mon jury de thèse. Vos commentaires et remarques pertinents ont permis de mieux cibler les perspectives de travail suite aux travaux de thèse.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement Mme Frédérique Seyler d'avoir été ma directrice de thèse, en particulier pour sa patience à mes débuts et pour avoir animé sans relâche l'UMR Espace-Dev.

Un autre grand merci à M. Laurent Linguet, mon encadrant, qui m'a suivi tout au long de cette thèse quasiment tous les jours (« M. Tommy ! »). On dit que l'on devient un expert en apprenant des meilleurs, et j'ai acquis une grande rigueur méthodologique, aussi bien au niveau de la rédaction qu'au niveau du travail en soi.

Ce suivi est aussi le fruit du travail de l'équipe pédagogique de l'Université de Guyane, en particulier l'équipe de l'UMR Espace-Dev, à savoir Ahmed Abbas, Martine Sebeloue, Idris Sadli, Henri Clergeot, Vivien Robinet, Ollivier Tamarin, Daniel Bienaimé, Antoine Primerose, Marie-Line Gobbindass. Et bienvenue aux récents membres : Matiyendou Lamboni, William Dimbourg, Allyx Fontaine.

Un merci tout particulier à Isabelle Marie-Joseph, sans qui cette aventure n'aurait pas été possible. Encore merci Isabelle de m'avoir donné cette opportunité, et je te souhaite une « vie longue et prospère ».

Cette aventure de thèse a été le fruit de rencontres enrichissantes. Je tiens à remercier en particulier le laboratoire OIE de MINES Paris-Tech : Philippe Blanc, Bella Espinar, Claire Thomas, Etienne Wey, Mireille Lefèvre, Thierry Ranchin, Laurent Saboret, Alexandre Boilley... et aux récents docteurs William et Youva. Merci aussi à M. Lucien Wald qui m'a particulièrement touché par son humilité.

Un merci aussi à Christelle Rigollier, que je n'ai pas pu croiser, mais qui a été mon premier « contact » avec Heliosat-2 via ses travaux de thèse. Un autre coucou à Sylvain Cros, avec qui j'espère collaborer plus souvent !

Quatre ans, c'est beaucoup de temps. Ainsi, on se constitue tout un entourage, un « noyau dur ». C'est à cette occasion que je tiens à remercier tout le personnel de l'IRD de Cayenne, avec qui j'ai partagé mes journées : Christophe, Pape, Rosiane, Jeanine, Marie-Claude, Ramon (Marseillais !), Serge, Max (Ti Boug !), Sylvie, Eric, Natacha, Rolland, Jean-Claude, Marie, Rodolphe, Marine. Merci aussi au personnel de l'Herbier de Cayenne : Chantal, Sophie, Christelle, Jean-Louis (Rapaz !), Véronique, Piero. Mention spéciale à M. Olivier Lamonge, récemment retraité (M. LAMOOOONGE !), et à notre regretté Pascal. Je tiens à remercier aussi le personnel du CNRS : Antoine, Yann, Josiane, Annaïg, Sevahnee, Philippe, Dorothée, Guillaume, Damien, Tanguy.

Autre « noyau dur », mais beaucoup plus proche, mes collègues doctorants qui m'ont supporté pendant la durée de la thèse, et avec qui j'ai partagé les hauts et les bas. Tout d'abord un véritable frère avec qui j'ai ÉNORMEMENT appris, tant sur le plan humain comme sur le plan professionnel : Youven Goulamoussène. Sans lui, je ne m'en serais pas sorti. Merci mon youyou. Le monde n'est pas si grand, donc on se reverra. Merci aussi à Yi, Marjorie, Justine et Sihem. Mesdemoiselles, ce sera bientôt à vous de montrer le Girl Power. Bienvenue aux nouveaux doctorants, Mouhamet, Marco et Maha. Un merci particulièrement à Erwann Fillol, sans qui je n'aurais pas pu réaliser la cartographie. Tu as démontré toute ton expertise en SIG et en « processing ». Je t'en suis grandement reconnaissant.

Un autre coucou aux collègues que j'ai croisé pendant ces années : Camilla, Noellia, Sylvain (G.B. !), Boris, Meryam, Kenji, Adrien, Jérôme (bonjour missié !), Marta, Mélanie, Noellie, Raphael, Mourad, Emmanuel, Christophe.

Enfin, je tiens à remercier Olivier Marnette (et l'association « la Canopée des Sciences »), Thomas Beck, M. et Mme Gallay, Jean et Joseph Chemaly ... et ma famille qui a supporté mes humeurs tout au long de la thèse.

Ainsi se termine le « cast » de mon travail de thèse. Et maintenant, place au manuscrit !

Résumé

La connaissance du rayonnement solaire, ou irradiation solaire, à la surface de la Terre est d'un grand intérêt dans de nombreux domaines. Sur le plan énergétique, la nécessité de réduire les rejets de gaz à effets de serre impose la substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables. Cependant le développement de systèmes utilisant l'énergie solaire nécessitent des données sur le rayonnement solaire denses (spatialement et temporellement) et suffisamment précises pour simuler, concevoir, gérer et optimiser le fonctionnement de ces systèmes.

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir et développer une méthode d'estimation de l'irradiation solaire applicable à la zone intertropicale.

Les travaux de la première partie se concentrent sur la recherche d'une solution méthodologique pour estimer le l'irradiation solaire sur la partie Nord du continent Sud-Américain (Plateau des Guyanes) avec une haute résolution spatiale et temporelle et une précision similaire à celle des aux autres méthodes opérationnelles sous d'autres climats. Pour cela, nous avons sélectionné une approche basée sur l'extension fonctionnelle d'une méthode d'estimation (Heliosat-2) actuellement exploitée avec le satellite Meteosat (zone Europe et Afrique) afin d'étendre son exploitabilité au satellite GOES (zone Amérique). Nous avons réalisé l'optimisation de cette méthode afin de proposer des estimations de l'irradiation solaire à haute résolution temporelle et spatiale dans cette région du monde où elles ne sont pas disponibles. Les questions de recherche abordées concernent l'évaluation des paramètres pertinents qui conditionnent l'efficacité d'une méthode d'estimation originellement conçue pour un satellite donné et optimisée afin de la rendre exploitable avec des données issues d'un autre satellite. Nous y décrivons les données exploitées, les modifications apportées à la méthode et la validation des estimations faites avec la méthode modifiée en les comparant aux mesures opérées par six stations météorologiques localisées en Guyane Française.

Dans la deuxième partie, nous proposons d'améliorer les estimations d'irradiation solaire obtenues dans la première partie, notamment celles faites en ciel couvert. En effet, si en moyenne annuelle les estimations d'irradiation sont satisfaisantes, une analyse intra-annuelle montre que les erreurs de biais sont très variables selon le type de ciel. La méthode modifiée génère des estimations ayant une précision satisfaisante en ciel clair, et des estimations ayant une précision insuffisante en ciel couvert. Le Plateau des Guyanes étant une zone fortement affectée par la ZIC et avec des passages nuageux très fréquents, il nous est apparu nécessaire de compléter les modifications apportées à la méthode originelle en introduisant une modélisation du ciel couvert. Cette modélisation permet de mieux rendre compte des phénomènes d'atténuation en ciel couvert qui affectent l'irradiation solaire sans toutefois induire de dégradation de la qualité des résultats par ciel clair. Le choix du modèle de ciel couvert est discuté, une analyse de sensibilité est conduite afin de calibrer le modèle de ciel

couvert choisi, et la validation des estimations de l'irradiation solaire est réalisée en ciel clair et en ciel couvert pour démontrer l'intérêt de la démarche.

Dans la troisième partie, nous proposons de réaliser des cartographies d'indicateurs en utilisant les estimations d'irradiation obtenues avec la méthode Heliosat-2 modifiée. Les tâches réalisées dans cette partie permettent de caractériser la quantité d'irradiation solaire reçue sur le Plateau des Guyanes, sa variabilité ainsi que d'autres paramètres utiles. Les indicateurs créés renseignent notamment sur l'exploitabilité de l'irradiation solaire par des systèmes de production d'énergie.

Enfin, nous concluons sur les avancées obtenues en termes de connaissance sur l'irradiation solaire et sur son exploitabilité sur le Plateau des Guyanes. La méthode d'estimation de l'irradiation solaire que nous avons validée a permis de créer la première cartographie du potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes. Divers indicateurs sur l'irradiation solaire ont été extraits. Nous discuterons des résultats obtenus, de leurs limites, de leurs applications potentielles et nous formulons plusieurs perspectives s'inscrivant dans la continuité du travail réalisé.

Mots clés :

Rayonnement Solaire, Énergie solaire, Télédétection, Heliosat, GOES, Plateau des Guyanes

Abstract

Knowledge of solar radiation, or solar irradiation, at Earth's surface is of great interest in many fields. On the Energy topic, the need to reduce Greenhouse gas emissions impels the substitution of fossil energy for renewable energy. However, the development of systems using solar energy need spatially and temporally dense data on solar radiation, sufficiently accurate to simulate, design, generate and optimize the operation of these systems.

The main objective of this thesis is to design and develop a method to assess solar irradiation applicable on intertropical regions.

The works of the first part focus on the search of a methodological solution to assess solar irradiation on the northern part of the South American continent (Guiana Shield) with a high temporal and spatial resolution and accuracy on the same level of other operational methods under other climates. For that, we selected an approach based on a functional extension of an assessment method (Heliosat-2) presently used with the Meteosat satellite (above Europe and Africa) in order to extend its exploitability to GOES satellites (above Americas). We performed the optimization of this method in order to offer assessments of solar irradiation at high temporal and spatial resolutions in this part of the world, where they are not available. Research questions tackled concern the assessment of pertinent parameters which condition the efficiency of an assessment method originally developed for a given satellite and optimized in order to make it workable with data from another satellite. We describe the data used, the changes brought to the method and the validation of assessments done with the modified method by comparing them to measurements made by six meteorological stations located in French Guiana.

In the second part, we propose to improve the solar irradiation assessments obtained in the first part, notably those done in cloudy sky. Indeed, if on an annual average the irradiation assessments are satisfying, an intra-annual analysis shows that the bias errors vary highly with sky conditions. The modified method generates assessments with a satisfying accuracy in clear skies, and assessments with insufficient accuracy in cloudy skies. The Guiana Shield being a zone strongly affected by the ITCZ and with recurrent cloudy periods, it appeared necessary to us to complete the changes brought to the original method by introducing a modeling of the cloudy sky. This modeling allows taking better into account attenuation phenomena in cloudy skies that affect solar irradiation without inducing deterioration of the quality of results in clear skies. The choice of the model in cloudy skies is discussed, a sensibility analysis is led in order to calibrate the chosen cloudy sky model, and the validation of assessments of solar irradiation is done both in clear skies and in cloudy skies to demonstrate the appeal of the work.

In the third part, we propose to produce maps of indicators by using the assessments of solar irradiation obtained with the modified Heliosat-2 method. The tasks achieved in this part allow characterizing the quantity of solar irradiation received

on the Guiana Shield, its variability and other useful parameters. The created indicators inform mainly on the exploitability of solar irradiation by systems of energy production.

Finally, we conclude on the advances obtained in terms of knowledge on solar irradiation and its exploitability on the Guiana Shield. The solar irradiation assessment method that we have validated allowed creating the first map of solar potential in the Guiana Shield. Many solar irradiation indicators have been extracted. We discuss the obtained results, their limits, their potential applicability and we express prospects about the continuity of the tasks done.

Keywords:

Solar Radiation, Solar Energy, Remote Sensing, Heliosat, GOES, Guiana Shield

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction générale.....	1
1.1 Caractérisation du rayonnement solaire	2
1.2 Méthodes d'estimation de l'irradiation globale solaire par satellite	5
1.2.1 Méthodes statistiques.....	5
1.2.2 Méthodes Physiques	7
1.2.3 Méthodes Hybrides.....	8
1.3 Bases de données d'irradiation solaire	10
1.3.1 BSRN (réseau in-situ)	10
1.3.2 SSE (Surface meteorology and Solar Energy)	10
1.3.3 NREL.....	10
1.3.4 HelioClim	10
1.4 Rayonnement solaire et atmosphère	11
1.4.1 Composition et structure de l'atmosphère.....	11
1.4.2 Diffusion.....	12
1.4.3 Absorption	12
1.4.4 Causes d'atténuation du rayonnement solaire	13
1.5 Technologies d'exploitation du rayonnement solaire	16
1.5.1 Technologie d'exploitation de la composante globale.....	17
1.5.2 Technologie d'exploitation de la composante directe	18
1.5.3 Situation de la l'exploitation de l'énergie solaire en zone intertropicale....	18
1.6 Objectif de la thèse	19
1.7 Méthodologie et plan	20
Chapitre 2 : Estimation de l'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle avec des images GOES	22
Optimizing the Heliosat-2 method for Surface Solar Irradiation estimation with GOES images	23
2.1 Abstract.....	23
2.2 Introduction	24
2.3 Context and data.....	25
2.3.1 Context	25
2.3.2 In-situ data.....	26

2.3.3	Satellite data.....	27
2.3.4	Climate.....	28
2.4	The Heliosat-2 method	28
2.4.1	Changes in the calibration process.....	29
2.4.2	Choice of an optimal cloud albedo calculation.....	32
2.4.3	Determination of the Linke turbidity factor value	33
2.5	Results and analysis.....	34
2.5.1	Results obtained depending on cloud albedo strategy.....	35
2.5.2	Results obtained depending on the Linke turbidity factor value	36
2.5.3	Results obtained depending on the type of sky.....	40
2.5.4	Comparison with Helioclim3 estimates	42
	44
2.6	Conclusion	45

Chapitre 3 : Amélioration des estimations de l'irradiation solaire par ciel couvert 46

Optimizing the Heliosat-2 method for Surface Solar Irradiation estimation under cloudy sky conditions.....	47
3.1 Abstract.....	47
3.2 Introduction	47
3.3 Data	50
3.3.1 Ground measurements.....	50
3.3.2 Satellite Data	51
3.3.3 Climate.....	51
3.4 Method	52
3.4.1 Presentation of the Heliosat method.....	52
3.4.2 Cloudy sky correction of the Heliosat II method.....	54
3.5 Results and discussion.....	55
3.5.1 SSI estimates with original method	56
3.5.2 SSI estimates with modified method (under cloudy sky)	57
3.5.3 SSI estimates with modified method (under cloudy sky)- cloud absorption dependency	58
3.5.4 Original and modified model SSI estimates comparison (under clear sky)	59
3.6 Conclusion	60

Chapitre 4 : Exploitabilité de l'irradiation solaire sur le Plateau des Guyanes 61

Spatiotemporal indicators of solar energy potential in the Guiana Shield using GOES images	62
4.1 Abstract.....	62
4.2 Introduction	63
4.3 Data	65
4.3.1 Satellite data.....	65
4.3.2 In situ data	66
4.4 Methods	67
4.4.1 Optimized Heliosat-2 method	67
4.5 Results and discussion.....	70
4.5.1 Validation	70
4.5.2 Global and direct irradiation potential.....	71
4.5.3 Spatiotemporal indicators	73
4.6 Conclusions	78

Chapitre 5 : Discussion générale..... 79

5.1 Estimation de l'irradiation solaire à haute résolution spatiale et temporelle sur le Plateau des Guyanes	80
5.2 Amélioration de la qualité des données d'irradiation en tenant compte des phénomènes climatiques.....	81
5.3 Amélioration de la connaissance du potentiel en énergie solaire sur le Plateau des Guyanes	82
5.4 Limites.....	83

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives..... 84

Liste des figures

Figure 1 : liste de stations du Global Historical Climatology Network (GHCN) en 2009 (K. Hashemi, 2009).....	3
Figure 2 : schéma de la distribution angulaire de l'énergie par diffusion, en fonction de la taille de la particule (Liou, 2002)	12
Figure 3: types de nuage en fonction de l'altitude (source : Met Office)	14
Figure 4 : Position de la ZIC en janvier (en bleu) et en juillet (en rouge)(source : Wikipedia).....	16
Figure 5 : panneau solaire (source : Wikipedia).....	17
Figure 6 : Electric network in French Guiana. The coastal areas are well connected to the grid, unlike inlands and the borders with other countries.....	26
Figure 7 : Graphic comparison of GOES 8-bit data to 10-bit data nonlinear conversion.....	32
Figure 8 : Radiances plotted against NOAA Radiances, Rochambeau station, 2011. The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend.	32
Figure 9 : Scatter plots between hourly in-situ SSI measurements and Heliosat-II estimates using (a) $\rho_{C \max}$, (b) $\rho_{C Q95}$ and (c) $\rho_{C \text{ Rig}}$. The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend.....	38
Figure 10 : Scatter plots between daily means of in-situ SSI measurements and Heliosat-II estimates with cloud albedo chosen as $\rho_{c\max}$, for (a) Saint Georges, (b) Rochambeau, (c) Kourou CSG, (d) Ile Royale, (e) Saint Laurent and (f) Maripasoula, all years merged.....	39
Figure 11 : Graphic comparison of the relative bias values with TL_{fixed} and TL_{var} for the year 2011, for (a) Saint-Georges station, (b) Kourou station, (c) Rochambeau station.....	40
Figure 12 : Scatter plots between hourly in-situ SSI measurements and Heliosat-II estimates with TL_{fixed} and cloud albedo chosen as $\rho_{c\max}$ for (a) clear sky days and (b) for cloudy days. The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend	43
Figure 13 : Elevation map (from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM))....	67
Figure 14 : Comparison between estimated GHI and measured GHI in the 2010-2015 period for the 6 stations in French Guiana. The full line is the regression line, and the dotted line is the 1x1 line.....	70
Figure 15 : Map of the annually averaged daily global irradiation (GHI) and the annual reference yield for photovoltaic energy production.....	72
Figure 16 : Map of the annually averaged daily direct normal irradiation (DNI)..	73
Figure 17 : Map of suitable areas according to slope.....	74
Figure 18 : Map of sustainable areas for GHI exploitation.....	75
Figure 19 : Map of sustainable areas for DNI exploitation	75
Figure 20 : Map of the annual inter-day standard deviation of GHI.....	76
Figure 21 : Map of the annual inter-day standard deviation of DNI	76
Figure 22 : Map of orientation indicator.....	77

Liste des tableaux

Table 1 : Latitude, longitude and altitude of the studied ground stations in French Guiana.....	27
Table 2: GOES-13 calibration coefficients. (Weinreb & Han, 2009; Doelling et al, 2013).....	31
Table 3 : Linke Turbidity factor values for the studied ground sites in French Guiana	34
Table 4 : Air features associated with each Linke turbidity factor value (Kasten, 1996).....	34
Table 5 : Hourly estimation results for 2010, 2011 and 2012, all stations merged, for the three cloud albedo strategies.....	36
Table 6 : Daily means estimation statistical results for every station, all years merged, using pcmax as cloud albedo	37
Table 7 : Hourly estimation statistical results for clear sky days and cloudy sky days for each station, all years merged.....	42
Table 8 : Comparison of the daily means of the estimates between HelioClim-3 data and estimates derived from Heliosat-II and GOES images, all years merged. For Heliosat-II and GOES images, pcmax is used as the cloud albedo	44
Table 9 : Ground meteorological stations in French Guiana.....	50
Table 10 : Number of clear and cloudy sky days for each station throughout the study period.....	56
Table 11 : Hourly original method estimates under cloudy skies from years 2010 to 2013 merged by stations.....	57
Table 12 : Hourly original method estimates under clear skies from years 2010 to 2013 merged by stations.....	57
Table 13 : Hourly modified method estimates under cloudy skies from years 2010 to 2013 merged by stations, $\alpha_c = 0.07 * \rho_c$	58
Table 14 : Hourly modified method estimates under cloudy skies from years 2010 to 2013 merged by stations, $\alpha_c = 0.165 * \rho_c$	59
Table 15 : Hourly modified Heliosat II method estimates under clear skies from years 2010 to 2013 merged by stations, $\alpha_c = 0.165 * \rho_c$	60
Table 16: Latitude, longitude, and altitude of ground meteorological stations in French Guiana	66
Table 17: Statistical errors between estimated GHI and measured GHI in the 2010-2015 period	71

Chapitre 1 : Introduction générale

La connaissance du rayonnement solaire, ou irradiation solaire, à la surface de la Terre est d'un grand intérêt dans de nombreux domaines. Les sciences du climat requièrent des données solaires fiables et suffisamment nombreuses pour comprendre le changement climatique. L'agriculture et plus généralement les écosystèmes naturels sont affectés par le rayonnement solaire et sa connaissance est nécessaire pour aider à la compréhension des actuels impacts liés au changement climatique. Sur le plan énergétique, la nécessité de réduire les rejets de gaz à effets de serre impose la substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables. L'urgence de concevoir des modes de développement économique plus durables et plus protecteurs de la planète ouvre un champ d'action inédit aux énergies propres parmi lesquelles celles qui utilisent la ressource solaire présentent un intérêt particulier. En effet, l'énergie du soleil reçue sur la Terre en une année correspond à 10 000 fois les besoins de la population mondiale sur la même période. Un autre atout plaidant en faveur de l'exploitation de l'énergie solaire est qu'elle relativement facile d'accès et uniformément répartie sur une grande partie de la planète, bien que plus abondante à proximité de l'Équateur. En architecture, la simulation des performances énergétiques des immeubles en zone urbaine requiert aussi de disposer de données de rayonnement solaire (données d'entrée), afin de dimensionner les systèmes de production d'énergie propre complémentaires (thermique solaire, photovoltaïque, etc.) aptes à satisfaire les besoins en chauffage et en énergie électrique tout en optimisant la consommation totale d'énergie des immeubles. Dans tous ces domaines et dans d'autres, les données de rayonnement solaire sont souvent nécessaires.

Cependant, la conception et le dimensionnement de systèmes utilisant l'énergie solaire, tels que les chauffe-eau solaires, les cellules photovoltaïques ou les concentrateurs solaires thermiques, nécessitent des données sur le rayonnement solaire suffisamment précises afin de simuler, concevoir, gérer et optimiser la productivité de ces systèmes.

1.1 Caractérisation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il comprend les longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il se décompose en rayonnement direct et en rayonnement diffus. Le rayonnement direct est la part de rayonnement provenant de la direction du Soleil. Le rayonnement diffus est originaire de la voûte céleste, des nuages et des objets environnants (Wald, 2007). Le rayonnement global reçu sur la Terre est donc la somme des composantes directe et diffuse. La majorité de l'énergie émise par le Soleil se situe dans les longueurs d'onde du spectre visible ($0,39 \text{ } \mu\text{m}$ à $0,76 \text{ } \mu\text{m}$). L'énergie du rayonnement global reçu à tout instant par unité de surface est appelée irradiation globale, et a pour unité le Wattheure par mètre carré (Wh.m^{-2}).

Le moyen le plus simple de produire des données énergétiques associées au rayonnement global solaire reçu au sol consiste à installer des stations de mesure. Ces stations comportent un instrument appelé « pyranomètre » qui mesure l'irradiation globale reçue au sol en utilisant l'effet Seebeck (Chambers, 1977). L'installation, la mise en œuvre et le fonctionnement des pyranomètres imposent quelques contraintes. Premièrement, il ne doit y avoir aucune ombre portée sur l'instrument de mesure (bâtiments, arbres, végétation). Ensuite, le pyranomètre doit être régulièrement entretenu : nettoyage du dôme du pyranomètre, vérification et remplacement du désiccatant, calibration du matériel afin de compenser la dérive des matériaux, etc. Toutes ces opérations d'entretien et de maintenance requièrent l'intervention humaine, ce qui explique qu'il n'y a pas de stations de mesure en tout point du globe, comme vu sur la figure 1. Afin de combler l'absence de mesure d'irradiation dans les zones où il n'y a pas de pyranomètre installé, il est possible d'utiliser des techniques d'interpolation permettant de produire des données en tous points.

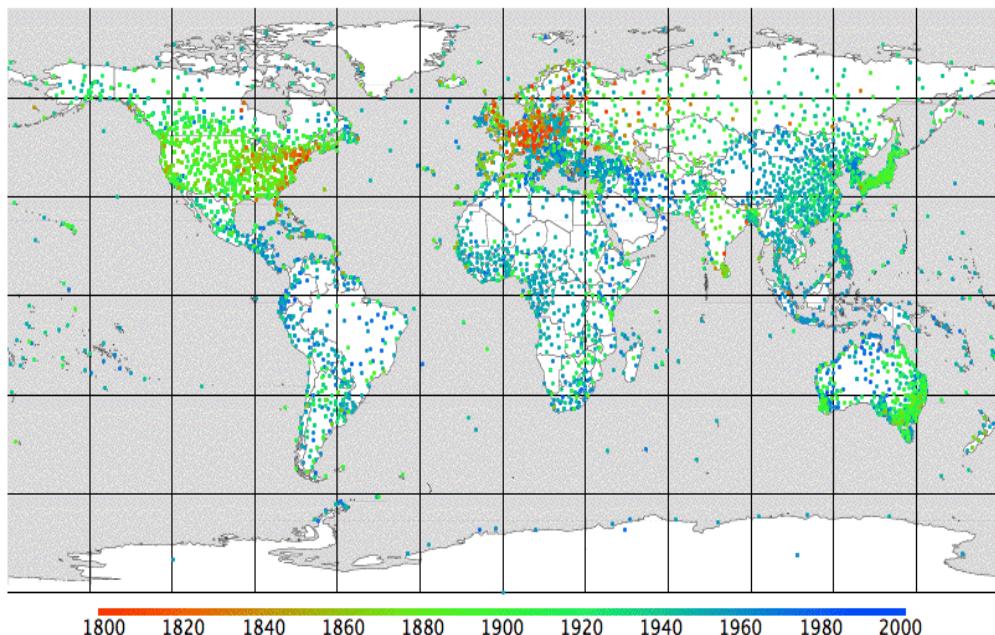


Figure 1 : Liste de stations du Global Historical Climatology Network (GHCN) en 2009 (K. Hashemi, 2009¹)

L'interpolation de données in-situ permet d'obtenir des cartographies de l'irradiation solaire, cependant l'interpolation de données d'irradiation permet de produire des estimations pertinentes et suffisamment précises que jusqu'à une distance moyenne de 50 km entre stations pour des valeurs moyennes journalières d'irradiation et jusqu'à une distance de 34 km entre les stations pour des valeurs moyennes horaires d'irradiation (Perez et al., 1997).

¹ <http://homeclimateanalysis.blogspot.com/2009/12/station-distribution.html>

Au-delà de ces distances, une approche alternative pour produire des données d'irradiation solaire en tout point repose sur l'exploitation des observations et images satellites acquises par des radiomètres imageurs.

Les satellites imageurs peuvent être répartis en deux grandes familles :

- Les satellites géostationnaires, dont le plan orbital est celui de l'équateur et l'altitude de révolution est d'environ 36000 km. Les satellites géostationnaires sont adaptés pour le suivi d'une région en particulier. Parmi les satellites géostationnaires, on peut citer GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*, NASA, Etats-Unis) et Météosat (Europe). La vitesse de révolution est égale au jour sidéral de la Terre, de sorte que le satellite est immobile par rapport à un point fixe terrestre. Les satellites géostationnaires se caractérisent par une résolution spatiale basse (pixel de 1km de côté pour le canal visible de GOES, 4 km pour le canal infrarouge de GOES) et par une résolution temporelle élevée (par exemple, des images toutes les 15 minutes pour Meteosat-7 et toutes les 30 minutes pour GOES).
- Les satellites à défilement (ou à orbite polaire), dont l'orbite est caractérisée par une inclinaison proche de 90° par rapport à l'équateur et la période de révolution est de l'ordre d'une centaine de minutes. L'orbite des satellites à défilement est calculée de façon à ce qu'elle soit héliosynchrone, c'est-à-dire qu'à chaque fois que l'on observe un même site, l'observation se fera toujours à la même heure. Ils se caractérisent par une résolution spatiale haute à très haute (pixel de 30 m pour Landsat 7, entre 5 et 20 m pour SPOT 5) et par une résolution temporelle basse (entre 2 et 6 images par jour). Parmi les principaux satellites à orbite polaire, on peut citer le satellite météorologique NOAA AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer*), ainsi que des satellites d'observation de la Terre tels qu'Ikonos ou SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*). Les satellites à défilement sont adaptés pour de la surveillance à échelle globale de phénomènes à progression lente.

Plusieurs approches méthodologiques ont été développées pour produire des données d'irradiation solaire à partir d'observations satellites. L'intérêt de ces méthodes est qu'elles permettent de produire des estimations du rayonnement solaire à large échelle, c'est à dire sur l'ensemble de la fenêtre d'observation spatiale satellite.

1.2 Méthodes d'estimation de l'irradiation globale solaire par satellite

Les méthodes d'estimation de l'irradiation globale solaire à partir d'images satellites se divisent principalement en trois catégories : les méthodes statistiques, les méthodes physiques et les méthodes hybrides.

1.2.1 Méthodes statistiques

C'est avec le lancement des premiers satellites météorologiques que les premières méthodes d'estimation de l'irradiation solaire à l'aide d'images satellite ont vu le jour. Ces méthodes ont été appelées « statistiques » car basées sur la corrélation entre les valeurs de pixel extraits des images satellites et les mesures d'irradiation au sol. Ce type de méthode est exploitable partout dans le monde, à condition de procéder à des ajustements empiriques basés sur des comparaisons avec des mesures d'irradiation au sol. Plusieurs auteurs ont développé des méthodes d'estimation basées sur des méthodes statistiques.

Hanson (1971) a étudié le taux de couvert nuageux et sa relation avec l'irradiation solaire. L'étude de Hanson (1971) a exploité des données du satellite à orbite polaire Nimbus 2, en considérant le rayon incident comme la somme d'une composante réfléchie vers l'espace, d'une composante absorbée par l'atmosphère ou absorbée par la surface.

Tarpley (1979) a été l'un des premiers à utiliser des images de satellites géostationnaires (issues du satellite météorologique GOES-1 lancé en 1975) pour estimer l'irradiation solaire au sol dans les Grandes Plaines des Etats-Unis d'Amérique. À partir de la valeur (compte numérique) d'un pixel, il calcule une valeur de brillance et un taux de couverture nuageuse. Ces deux paramètres sont ensuite utilisés pour calculer une valeur de « brillance moyenne ». Enfin, l'irradiation reçue au sol est obtenue en fonction de la valeur du taux de couverture nuageuse et de la valeur de brillance moyenne. Tarpley a mis en évidence l'importance de disposer d'une résolution temporelle élevée (en l'occurrence, une image toutes les 30 minutes) pour modéliser l'irradiation solaire avec précision. En effet, un test avec des images issues d'un satellite à orbite polaire, bien qu'offrant l'avantage d'une couverture globale, ne permet pas de suivre les variations intra-journalières de l'irradiation, car deux images par jour seulement sont disponibles.

Une autre méthode d'estimation largement exploitée par la communauté scientifique et s'inspirant des travaux de Tarpley (1979) est la méthode Heliosat (Cano et al., (1986), Diabaté et al., (1988)). Cette méthode a été développée à MINES Paris Tech. Elle permet de convertir la réflectance d'un pixel issu d'une image provenant du canal visible des satellites météorologiques Meteosat en valeur d'irradiation solaire. Le principe de la méthode Heliosat est que la variation de couvert nuageux à l'égard d'un site donné entraîne une variation d'albédo à l'égard de ce même site. Cette variation

d'albédo a une influence sur l'irradiation solaire à l'égard du site considéré. L'albédo, borné par une valeur maximale (albédo des nuages) et par une valeur minimale (albédo des sols), permet d'obtenir un indice d'ennuagement, rendant compte du couvert nuageux à égard d'un pixel. Enfin, il est possible de lier l'indice d'ennuagement à un facteur de transmission K, défini par :

$$K = \frac{G}{G_0} \quad (1.1)$$

Avec :

- K : facteur de transmission atmosphérique (sans unité)
- G : rayonnement global au sol sur une surface horizontale
- G_0 : rayonnement extraterrestre

Le rayonnement global peut être déterminé par :

$$G = n \cdot G_b + (1 - n) \cdot G_c \quad (1.2)$$

Avec :

- G : rayonnement global au sol
- n : indice d'ennuagement
- G_b : rayonnement global au sol pour un ciel couvert
- G_c : rayonnement global au sol pour un ciel clair

Beyer et al., (1996) ont proposé une modification à cette méthode en introduisant un indice de ciel clair, K_c , qui fait intervenir le rayonnement par ciel clair, G_c et qui est défini par :

$$K_c = \frac{G}{G_c} \quad (1.3)$$

Avec :

- K_c : indice de ciel clair (sans unité)
- G : rayonnement global (en W/m^2)
- G_c : rayonnement global par ciel clair (en W/m^2)

Beyer et al., (1996) ont modifié l'équation (1.2) et démontré que l'indice de ciel clair (K_c) était lié à l'indice d'ennuagement par la relation suivante :

$$K_c = 1 - n \quad (1.4)$$

1.2.2 Méthodes Physiques

Les méthodes dites « physiques » sont basées sur la modélisation des constituants de l'atmosphère pour décrire l'atténuation du rayonnement. En grande majorité, les méthodes physiques utilisent des modèles de transfert radiatif (MTR) pour modéliser ces atténuations.

L'un des premiers modèles physiques est celui de Gautier et al., (1980). Ce modèle exploite des données image issues du satellite météorologique géostationnaire GOES, couplées à des modélisations des atténuations des constituants de l'atmosphère. Deux modèles sont proposés pour calculer l'irradiation solaire : l'un par temps clair, l'autre par temps couvert. Le bon fonctionnement de ce modèle, comme pour la plupart des modèles physiques, dépend d'une série d'images correctement étalonnées (Gautier et al., 1980a). La dernière version de la méthode, datant de 1997 (Gautier and Landsfeld, 1997) prend en compte également l'atténuation de l'irradiation dans la portion ultraviolette du spectre solaire.

D'autres modèles physiques exploitent l'imagerie satellite, comme l'algorithme du projet GEWEX SRB (*Global Energy and Water Exchange - Surface Radiation Budget*) développé par Pinker and Laszlo (1992) . Cet algorithme exploite le MTR de Delta-Eddington (Joseph et al., 1976), dans lequel une bibliothèque de valeurs de transmissivité et de réflectivité du rayonnement à égard d'une surface est mise en place. Lorsqu'une valeur de luminance est mesurée par le capteur satellite à un instant donné, elle est convertie en réflectance bande étroite (narrowband) puis en réflectance large bande (broadband). Et l'irradiation globale au sol est estimée par itérations successives, grâce à la lecture de la bibliothèque contenant les valeurs de réflectance et de transmissivité générées par le MTR (table de lecture ou *Look Up Table* -LUT)

L'INPE (*Instituto de Pesquisas Espaciais* – Institut National de Recherches Spatiales, Brésil) et le laboratoire LABSOLAR de l'UFSC (Université Fédérale de Santa Catarina, Brésil) ont mis en place la méthode Brazil-SR (Pereira et al., 2000), une méthode physique qui utilise le canal du visible du satellite GOES pour estimer le rayonnement solaire en surface, pour obtenir des estimations d'irradiation au niveau de l'Amérique du Sud. La méthode Brazil-SR s'inspire du modèle IGMK (*Institut für Geophysik Meteorologie, Universitat zü Köln* – Institut de Météorologie Géophysique, Université de Cologne, Allemagne) de Moser & Raschke (1983), amélioré par la suite par Stuhlmann et al., (1990), qui permit la prise en compte de l'élévation de la surface, et des réflexions multiples du rayonnement entre la surface et les couches de l'atmosphère. L'hypothèse de départ stipule que les nuages sont le facteur le plus influent dans l'atténuation du rayonnement solaire. Le principal objectif est donc de paramétriser l'influence des nuages (couvert nuageux, épaisseur optique) le plus précisément possible. Les autres contributions (aérosols, vapeur d'eau, ozone, albédo de surface) sont considérées comme secondaires et peuvent être décrites par leur climatologie mensuelle (Stuhlmann et al., 1990). La méthode Brazil-SR utilise une approche "double flux" (Schmetz, 1984) pour estimer la transmittance du ciel. À partir de cette

transmittance et d'un indice de couvert nuageux (n), une estimation de l'irradiation solaire au sol en est déduite.

Janjai et al., (2005) ont mis en place un modèle physique particulièrement adapté pour les zones tropicales afin de cartographier le rayonnement global reçu au sol. L'accent a été mis sur la modélisation des processus d'absorption et de diffusion par les constituants de l'atmosphère (ozone, aérosols, vapeur d'eau). Les données images sont issues des capteurs satellites GMS-4, GMS-5, GOES-9 et MTSAT-1R ont été extraites et converties en une valeur d'albédo « Terre-Atmosphère ». Les coefficients d'absorption et cet albédo « Terre-Atmosphère » sont liés à un coefficient total de transmission. En multipliant ce coefficient total de transmission par le rayonnement solaire extraterrestre, il est possible d'obtenir le rayonnement global au sol.

Enfin, Oumbe (2009) et Lefèvre et al., (2013) ont développé la méthode Heliosat-4 qui exploite deux modèles atmosphériques : McClear, pour estimer le rayonnement au sol par ciel clair, et McCloud (Qu, 2013) pour estimer le rayonnement au sol par ciel couvert. Un abaque de valeurs issues de chaque modèle est créé au préalable, afin de permettre une exploitation opérationnelle de ces modèles. En effet, l'exploitation d'un MTR en mode opérationnel est quasiment impossible, compte tenu de la durée des temps de calcul.

1.2.3 Méthodes Hybrides

La mise en place opérationnelle de procédures d'étalonnage des instruments de mesure (dans le canal du visible) des satellites météorologiques géostationnaires (Weinreb et al., (1997), Lefevre et al., (2000), Rigollier et al., (2002)), a permis d'établir des relations physiques entre valeurs de comptes numériques des pixels et valeurs de luminance au sol. Ainsi, la plupart des ajustements empiriques opérés dans les méthodes statistiques ont pu être remplacés par un ensemble de relations physiques et statistiques et ces méthodes exploitant sont dites alors « hybrides ». Ces méthodes sont aussi appelées « méthodes inverses », puisqu'elles résultent de trois opérations : une modélisation du rayonnement au sol par ciel clair, une modélisation du rayonnement au sol par ciel couvert et enfin une combinaison de ces deux modèles avec une mesure de la couverture nuageuse issue d'une observation satellite (Oumbe, 2009).

Rigollier et al., (2000) ont proposé plusieurs améliorations pour faire évoluer la méthode originale Heliosat. La version Heliosat 2 utilise le modèle de ciel clair ESRA (utilisé dans le *European Solar Radiation Atlas*, d'où son nom). Le modèle ESRA offre une expression explicite pour chacune des composantes (directe et diffuse) du rayonnement solaire, ce qui permet une meilleure représentation de l'irradiation par ciel clair.

Ce modèle fait intervenir, comme indiqué dans sa formule, le Trouble de Linke, qui permet de rendre compte des atténuations du rayonnement lorsqu'il traverse l'atmosphère. Le Trouble de Linke est défini comme le nombre d'atmosphères pures et sèches nécessaires pour reproduire la même atténuation du rayonnement solaire extraterrestre que celle obtenue par l'atmosphère réelle.

Une autre méthode exploitant le Trouble de Linke est la méthode de Perez et al., (2002). Dans cette méthode, le Compte numérique de l'image est normalisé, puis converti en indice d'ennuagement. Cette méthode est une amélioration du modèle de Zelenka et al., (1999) : la formule du Trouble de Linke a été modifiée pour la rendre indépendante de la masse d'air, puis exploitée dans le modèle de ciel clair de Kasten (Ineichen and Perez, 2002), et la présence de neige sur le sol est prise en compte.

Avec le lancement de Meteosat Seconde Génération (Météosat 8 lancé en 2002) qui a presque quadruplé le nombre de canaux d'acquisition (de 3 à 11), avec une hausse de la résolution temporelle (1 image toutes les 15 min) et spatiale (pixel de 1km au sol), on cherche désormais à se rapprocher d'un modèle physique. En effet, telle qu'elle était, la méthode Heliosat-2 ne pouvait pas exploiter cette nouvelle gamme d'informations sur l'atmosphère, fournie par des satellites plus performants.

Mueller et al., (2004) ont mis à jour la méthode Heliosat-2, grâce à l'utilisation d'un nouveau modèle de ciel clair : le modèle SOLIS, une approximation de modèle de transfert radiatif. Ce rapprochement avec un modèle de transfert radiatif se base sur la modification de la relation de Lambert-Beer. Sa formule est la suivante :

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau} \quad (1.5)$$

Avec :

- I : rayonnement solaire direct au sol, avec le soleil au zénith (W/m^2)
- I_0 : rayonnement extraterrestre (W/m^2)
- τ : trajet optique (sans unité)

Si l'on prend en compte le cheminement du rayon et la projection sur la surface de la Terre, nous pouvons poser :

$$I(\theta_z) = I_0 \cdot e^{\frac{-\tau}{\cos(\theta_z)}} \cdot \cos(\theta_z) \quad (1.6)$$

Avec :

- θ_z : angle solaire zenithal (en degrés)
- $I(\theta_z)$: irradiation à l'angle θ_z

Bien qu'ayant une motivation physique, l'utilisation de la relation de Lambert-Beer modifiée reste une fonction d'ajustement.

Les méthodes d'estimation présentées dans cette section ont été développées par différentes institutions, à différentes résolutions. Les résultats obtenus par certaines de ces méthodes ont permis de produire des estimations d'irradiation solaire au sol qui ont été archivées dans des bases de données. Certaines de ces bases de données sont disponibles à une échelle continentale, d'autres à une échelle planétaire.

1.3 Bases de données d'irradiation solaire

Les données d'irradiation solaire issues d'acquisitions satellite et d'acquisitions in-situ sont archivées dans diverses bases de données. Nous présenterons ici les principales bases de données :

1.3.1 BSRN (réseau in-situ)

Le BSRN (Baseline Surface Radiation Network) (Ohmura et al., 1998) est un projet du volet “Données et Estimations” du GEWEX sous la supervision du WCRP (*World Climate Research Programme*), visant à détecter des changements dans le champ de rayonnement de la Terre, changements qui peuvent être liés au changement climatique.

Bien que les stations soient en nombre réduit (59 stations à la date d'Octobre 2016), elles sont situées dans des zones climatiques contrastées, couvrant une latitude de 80°N à 90°S. Les données atmosphériques et de rayonnement solaire sont mesurées avec une résolution temporelle élevée (1 à 3 minutes).

1.3.2 SSE (Surface meteorology and Solar Energy)

La base de données SSE est un service Web qui exploite l'algorithme de Pinker et Laszlo (1992) et fournit des séries de données d'irradiation journalières. Elle se distingue par son ouverture au monde de l'industrie du secteur énergétique. La base de données SSE a une couverture mondiale, avec des résolutions temporelles et spatiale réduites : les données d'irradiation solaire sont fournies toutes les 3 h et à une résolution spatiale de 1° x 1° (soit environ un pixel de 100 km x 100 km). Les images utilisées proviennent de divers satellites géostationnaires (GOES, Meteosat) et à orbite polaire (NOAA AVHRR) utilisés dans le cadre du projet ISCCP. Les données climatologiques proviennent des projets ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Project*) et CERES (*Cloud and the Earth's Radiant Energy System*).

1.3.3 NREL

Cette base de données fournit des cartes de moyennes annuelles d'irradiation journalières en utilisant la méthode de Perez et al., (2002). Les cartes proposent des données d'irradiation globale et de d'irradiation directe à une résolution spatiale de 10 km via l'utilisation d'un SIG (Système d'Information Géographique), mais uniquement pour les États-Unis. Des archives constituées de données recueillies entre 1985 et 1991 sont disponibles pour l'Amérique du Sud, l'Amérique Centrale, l'Afrique, le Moyen-Orient, le Sud de l'Europe et le Sud de l'Asie, mais à une résolution spatiale de 40km.

1.3.4 HelioClim

La base de données HelioClim (issue du projet du même nom, Blanc et al., (2011)) propose des valeurs d'irradiation solaire au sol en moyenne journalière, mensuelle, et

annuelle à partir d'images du satellite Météosat, sur la zone Europe, Afrique et Océan Atlantique (champ de vision du satellite Météosat) en exploitant la méthode Heliosat. La base de données propose des estimations d'irradiation solaire obtenues à partir d'images Météosat Première Génération (constellation de satellites allant de Meteosat 1 à Météosat 7) pour la période 1985 – 2005 (base de données HelioClim-1), et d'images Météosat Seconde Génération (constellation de satellites initiée avec Météosat 8 depuis 2002) pour la période 2004 à actuellement (base de données HelioClim-3). Pour la période 1985 – 2005, la résolution temporelle des données est journalière pour une résolution spatiale de 30 km. Pour les données obtenues à partir de 2004, la résolution temporelle est de 15 minutes pour une résolution spatiale de 3 km. Pour la période 1985 – 2005, la résolution temporelle des données est journalière pour une résolution spatiale de 30 km. Pour les données obtenues à partir de 2004, la résolution temporelle est de 15 minutes pour une résolution spatiale de 3 km.

1.4 Rayonnement solaire et atmosphère

1.4.1 Composition et structure de l'atmosphère

L'atmosphère désigne au sens large, l'enveloppe fluide externe de la planète Terre. La pression et la densité dans l'atmosphère décroissent lorsque l'altitude augmente. L'atmosphère est divisée en plusieurs couches :

-La troposphère (0 à 12 km aux moyennes latitudes, 0 à 18 km à proximité de l'équateur), qui contient presque toute la masse d'air et de vapeur d'eau. C'est la plus dense des couches et les variations de pression y sont notables.

-La stratosphère (15 km à 45 km aux moyennes latitudes, 22 km à 45 km à proximité de l'équateur), où se situe la couche d'ozone. L'ozone s'y forme et s'y détruit. Le réchauffement y est progressif depuis environ 40 km, à cause du choc entre rayons ultraviolets et glace.

-La mésosphère (48 à 80 km) : la température chute rapidement jusqu'à -80 °C. Au-delà de la Mésosphère, la température est imprimée directement par le rayonnement (pas de protection par l'atmosphère) 99,99 % de la masse de l'atmosphère est comprise dans ses 70 premiers km.

L'atmosphère protège la vie sur Terre en absorbant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit. Il n'y a pas de frontière définie entre l'atmosphère et l'espace. Elle devient de plus en plus ténue et s'évanouit peu à peu dans l'espace. L'altitude de 120 km marque la limite où les effets atmosphériques deviennent notables durant la rentrée atmosphérique.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire qui, on le rappelle, est composé d'ondes électromagnétiques subit deux phénomènes : la Diffusion et l'Absorption (Qu, 2013). La somme de ces interactions entraîne l'extinction du rayonnement. L'extinction dépend de la distance (ou « épaisseur d'atmosphère »)

parcourue par le rayon dans l'atmosphère. Plus cette distance, appelée « masse d'air » est grande, plus le rayon est atténué (Wald, 2007). Nous décrivons dans les paragraphes suivants ces phénomènes d'extinction du rayonnement solaire.

1.4.2 Diffusion

La diffusion regroupe trois phénomènes : la diffraction, la réfraction et la réflexion. La diffusion décrit comment une particule placée sur la trajectoire d'une onde électromagnétique incidente, absorbe l'énergie de cette onde et agit comme une nouvelle source d'énergie en renvoyant une partie de l'énergie reçue dans différentes directions. Lorsque la taille de la particule augmente, la quantité d'énergie diffusée est plus importante dans la direction d'incidence, comme le montre la figure 2.

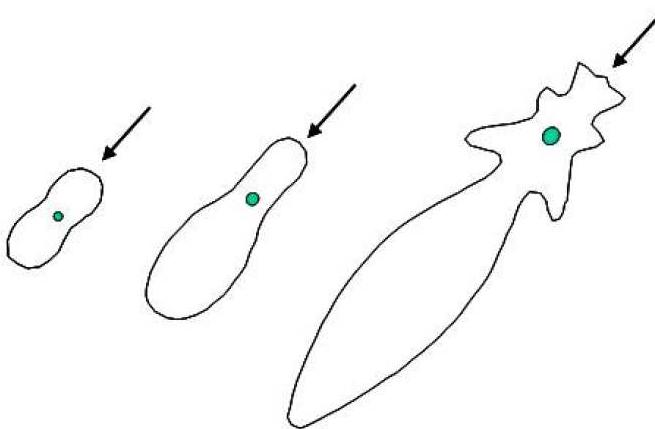


Figure 2 : Schéma de la distribution angulaire de l'énergie par diffusion, en fonction de la taille de la particule (Liou, 2002)

Cette énergie diffusée par des particules peut être obtenue en résolvant les équations de Maxwell en coordonnées polaires sphériques. La solution de cette équation pour une particule de diamètre très inférieur à la longueur d'onde incidente a été trouvée par Rayleigh. Ainsi, la théorie de Rayleigh est exploitée pour l'étude de la diffusion par les molécules. (ex : interaction entre ondes courtes et molécules d'air, pour la couleur bleue du ciel)

Lorsque la taille des particules est du même ordre que la longueur d'onde incidente (par exemple pour des aérosols), la théorie de Mie est appliquée. (ex : couleur blanche des nuages)

1.4.3 Absorption

L'absorption décrit comment l'énergie d'une onde électromagnétique incidente entrant en collision avec une particule est absorbée par cette particule et convertie dans une autre forme. L'absorption entraîne un phénomène d'émission d'énergie, l'émission étant liée à l'agitation moléculaire interne de la matière. La nature de la transition de

niveaux d'énergie dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident (Oumbe, 2010) :

- pour les rayons ultraviolets, il y a dissociation des molécules
- pour les longueurs d'onde du visible, il y a transition entre niveaux d'énergie correspondant aux configurations électriques
- pour le rayonnement Infrarouge, la transition est vibrationnelle
- pour les micros ondes, la transition est rotationnelle.

Contrairement à la diffusion, l'absorption des ondes électromagnétiques qui composent le rayonnement solaire par les gaz atmosphériques est sélective : elle concerne des bandes de longueurs d'onde réparties de façon discrète dans le spectre solaire.

Le rayonnement ultraviolet, dont la longueur d'onde est inférieure à 0,3 µm, est absorbé par l'ozone.

Le rayonnement dont les longueurs d'onde est supérieur à 4 µm (ex : infrarouges) est absorbé par la vapeur d'eau.

Dans le domaine des radiations visibles, moins de 1 % de l'énergie solaire totale est absorbée lorsque le Soleil se trouve au zénith. Les molécules responsables de cette faible absorption sont l'ozone et l'oxygène.

Dans l'infrarouge, le rayonnement solaire est absorbé principalement par la vapeur d'eau et le gaz carbonique, créant des discontinuités sur le spectre solaire dans cette région. L'absorption propre à la vapeur d'eau représente environ 10 %.

1.4.4 Causes d'atténuation du rayonnement solaire

1.4.4.1 Nuages

Les nuages sont des amas de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. Les nuages sont formés par condensation de la vapeur d'eau, lors de l'ascension de la vapeur d'eau. Certaines particules en suspension dans l'atmosphère (poussières, cristaux de sable ou de sel) deviennent des noyaux de condensation, agglomérant la vapeur d'eau. La figure 3 illustre les divers types de nuage en fonction de leur altitude.

Un rayon traversant un nuage est diffusé et absorbé avec plus ou moins d'intensité. L'épaisseur optique d'un nuage (τ_c , sans unité) caractérise son aptitude à atténuer un rayon. Une valeur nulle indique qu'il n'y a pas atténuation, alors qu'une valeur proche de 4 (nuages précipitants fortement chargés en humidité) indique une forte atténuation (Wald, 2007). L'épaisseur optique n'est pas uniquement liée à l'épaisseur géométrique : elle dépend aussi du type de nuage et de la taille des particules d'eau et des cristaux de glace constituant le nuage.

L'épaisseur optique est définie par :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\tau} \quad (1.7)$$

Avec :

- I : intensité du rayon après un trajet donné
- I_0 : intensité du rayon incident
- τ : épaisseur optique

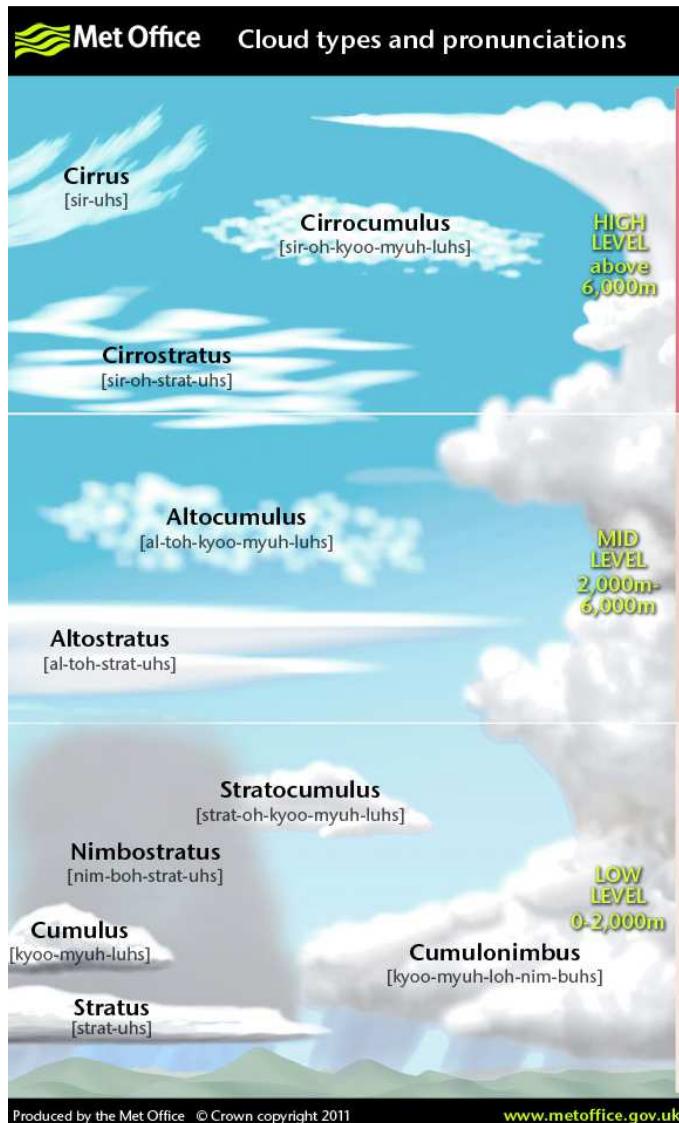


Figure 3: Types de nuage en fonction de l'altitude (source : Met Office²)

Bien que les nuages atténuent le rayonnement, ils peuvent aussi le réfléchir de par leur fort albédo, avec deux effets particuliers (Wald, 2007) :

- Une part du rayonnement réfléchi par le sol peut être réfléchie à nouveau vers le sol par la limite inférieure du nuage

² <http://www.metoffice.gov.uk/learning/clouds/cloud-spotting-guide>

- Le rayonnement en un point donné peut être concentré par réflexion sur les bords du nuage.

1.4.4.2 Aérosols

Les aérosols sont un ensemble de fines particules en suspension dans l'atmosphère. Ces particules peuvent être d'origine naturelle (cendres des éruptions volcaniques ou d'incendies de forêt, poussières désertiques, pollens) ou anthropique (rejets industriels, rejets de combustion d'énergies fossiles). La taille des particules influe sur l'intensité d'extinction du rayonnement les traversant.

L'influence des aérosols est évaluée par temps clair, sans nuages. Un exemple de grandeur rendant compte des effets des aérosols dans l'atmosphère est le Trouble de Linke, défini dans la section 1.2.3.

1.4.4.3 Le cas de la zone intertropicale

La zone intertropicale (située entre 20°N et 20°S de latitude) étant proche de l'équateur, les rayons solaires qui atteignent la Terre traversent une couche atmosphérique d'épaisseur plus faible qu'ailleurs ce qui permet à la ressource solaire d'y être plus abondante. Dans cette zone le principal phénomène météorologique à l'origine de la présence de nuages est la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC). La ZIC est une « ceinture » où convergent les vents d'est (alizés), sous l'effet de l'anticyclone (zone de haute pression atmosphérique) des Açores et de l'anticyclone de Sainte Hélène. Les alizés sont des flux d'air chaud, réguliers, généralement secs sur les secteurs orientaux des océans et humides sur les secteurs occidentaux des continents.

Au cours de l'année, la ZIC se déplace en latitude et provoque l'apparition de masses nuageuses chargées en humidité, entraînant des périodes de précipitation prolongées à égard des zones continentales bien que la ZIC soit un phénomène principalement océanique (Vasquez, 2009). Le déplacement de la ZIC soumet la zone intertropicale à deux saisons : une saison des pluies et une saison sèche.

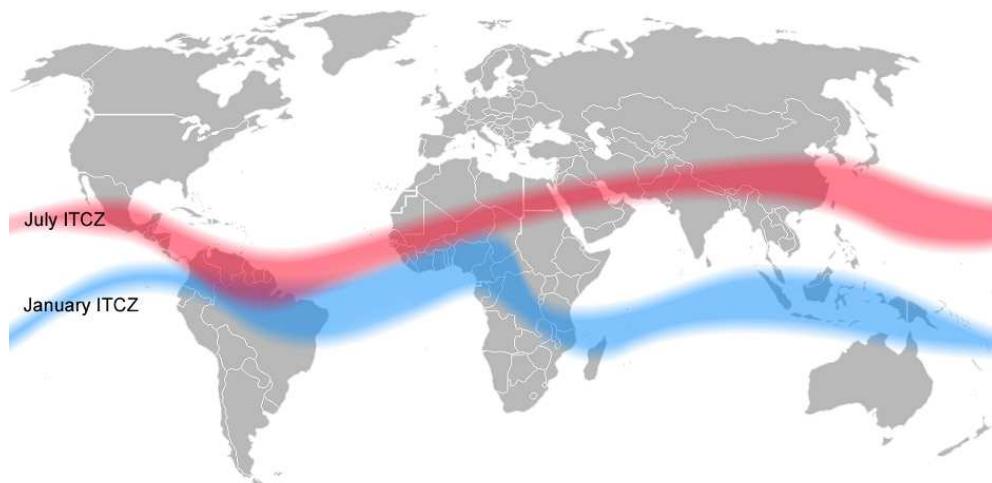


Figure 4 : Position de la ZIC en janvier (en bleu) et en juillet (en rouge) (source : Wikipedia)

La saison des pluies revêt différentes appellations selon le continent. En Asie on l'appelle Mousson et elle a lieu entre Mai et Septembre en Asie du Sud-Est. En Afrique, cette saison a aussi l'appellation de Mousson, mais elle a lieu entre Juillet et Septembre en Afrique Centrale et entre Décembre et Février en Afrique de l'Ouest. Sur le Plateau des Guyanes, elle a lieu entre Novembre et Juin (Bovolo et al., 2012). En saison des pluies, il y a prédominance de nuages de type CumuloNimbus. En saison sèche, les nuages les plus observés sont de type Cirrus et Cumulus Fractus (nuages fractionnés).

Un apport d'aérosols massif a lieu sur la partie nord du Plateau des Guyanes, dû au phénomène des « brumes de sable du Sahara ». Les grains de sable provenant d'une région située au nord du Mali en Afrique sont transportés par les Alizés. 45 Millions de tonnes de poussières sont déposées sur le bassin amazonien, 70 Millions de tonnes sont déposées sur la Caraïbe.

1.5 Technologies d'exploitation du rayonnement solaire

L'énergie solaire est à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'énergie solaire est abondante à l'échelle humaine et disponible partout sur le globe terrestre, malgré son intermittence, et peut subvenir largement à nos besoins. Les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire fonctionnent différemment selon la composante de l'énergie solaire qu'ils utilisent : globale, directe ou diffuse. Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité ;
- le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur ;

1.5.1 Technologie d'exploitation de la composante globale

L'irradiation globale solaire peut être exploitée pour produire de l'énergie grâce à l'effet Photoélectrique. L'effet photoélectrique permet de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur porteur de charges électriques. Ce matériau semi-conducteur peut être utilisé pour construire des cellules photovoltaïques (PV) qui grâce à cet effet vont produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. La juxtaposition d'un ensemble de cellules PV constitue un panneau PV, comme illustré sur la figure 5.



Figure 5 : Panneau solaire (source : Wikipedia)

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (Masson, 2015), Le photovoltaïque est la source d'énergie qui devrait être la plus déployée à l'avenir dans le monde. La capacité installée de production d'électricité photovoltaïque au niveau mondial connaît une croissance importante depuis plusieurs années. Entre 2011 et 2014 la capacité mondiale installée de PV solaire est passée de 30 GW à 150 GW (IEA, 2010) et les perspectives de croissance sont d'environ 40 GW par an de 2015 à 2020. À la fin 2014, la puissance mondiale installée est de l'ordre de 177 GW avec la répartition suivante : 51% pour l'Europe, 36% pour l'Asie, 12% pour le continent Amérique (21 GW principalement installés en Amérique du Nord) et 1% pour l'Afrique. L'intérêt croissant du photovoltaïque est lié à la baisse du coût des systèmes photovoltaïques qui a diminué de 50 % entre 2010 et 2014. Cette baisse des coûts offre de nouvelles opportunités pour électrifier des millions des gens dans le monde entier qui n'en ont jamais bénéficié auparavant. En effet, le photovoltaïque est de plus en plus considéré comme un moyen efficace et économique pour alimenter en électricité les sites isolés plutôt que d'étendre les réseaux d'électricité. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, dans les pays en voie de développement (Amérique Latine et Afrique notamment) le défi de fournir de l'électricité pour l'éclairage et pour l'accès aux moyens de communication, y compris à Internet, verra la progression du photovoltaïque comme étant l'une des sources d'électricité les plus fiables et plus prometteuses dans les années à venir.

1.5.2 Technologie d'exploitation de la composante directe

L'irradiation directe peut être exploitée à des fins énergétiques par les technologies dites « à concentration » (*Concentrated Solar Technologies - CST*). L'irradiation directe est concentrée par une surface réfléchissante (miroir parabolique ou lentille de Fresnel) en un point donné. On dénombre deux applications principales associées à cette technologie :

- Le Photovoltaïque concentré (Concentrated PV), dans lequel les rayons sont concentrés sur une cellule photovoltaïque multicouche afin de générer de l'électricité avec un rendement de conversion plus élevé que celui d'une cellule PV standard.
- L'Énergie Solaire Thermique concentrée (CSTE), dans laquelle les rayons concentrés chauffent un fluide calorifique qui se transforme en vapeur, laquelle est utilisée pour faire fonctionner un turbo-alternateur qui génère de l'électricité.

Afin de maximiser la quantité d'énergie produite, des dispositifs appelés « traqueurs » permettent de s'assurer que les surfaces réfléchissantes soient en permanence orientées dans la direction du soleil.

Les technologies à concentration connaissent un essor depuis quelques années. En 2012 il y avait 0,1 GW de puissance CPV installée dans le monde. En 2016 il y avait 0,36 GW de puissance CPV installée dans le monde (REN21, 2016). Le CSTE est passé de 0,354 GW de puissance installée en 2004 à 2,55 GW de puissance installée en 2012 dans le monde (REN21, 2013).

1.5.3 Situation de la l'exploitation de l'énergie solaire en zone intertropicale

La plupart des pays situés en zone intertropicale sont des territoires en voie de développement ou des économies émergentes pour lesquels la production d'énergie et l'autonomie énergétique sont des questions essentielles. A cause de l'abondance de la ressource solaire liée à la position géographique de ces pays, la réponse aux problématiques évoquées ci-dessus passe par une exploitation quasi-incontournable de l'énergie solaire sans négliger pour autant les autres sources d'énergie.

Cependant, le développement de systèmes de production d'énergie à base solaire est généralement conditionné par les appuis de banques et de financeurs qui accompagnent les projets considérés comme présentant de faibles risques. Ces risques sont principalement évalués via l'analyse des données de mesures d'irradiation solaire. Or, dans la plupart des pays de la zone intertropicale la disponibilité des mesures d'irradiation solaire, tant en termes de couverture spatiale qu'en terme de couverture temporelle, est limitée à cause du faible nombre de stations de mesure (Figure 1). Dans

cette zone, les réseaux de mesure in-situ du rayonnement solaire et de ses composantes ne sont pas suffisamment denses pour satisfaire les besoins de données solaires liés au développement de projets industriels de systèmes solaires. La conséquence de cette situation est que de nombreux pays de la zone intertropicale sont peu, voire sous équipés en systèmes d'exploitation de l'énergie solaire.

Sur le Plateau des Guyanes (Nord de l'Amérique du Sud) par exemple, en 2015 la capacité maximale nette de puissance PV installée dans les pays qui composent cette région est de 0 MW au Surinam, 2 MW au Guyana, 3 MW au Vénézuela alors que la Guyane Française compta 39 MW installés (IRENA, Renewable energy capacity statistic, 2015). Cet état de fait est en grande partie lié au manque d'information sur la ressource solaire car, selon nos recherches, il n'existe pas dans la littérature de connaissances publiées sur la ressource solaire dans cette région du monde à l'exception de quelques articles concernant la Guyane Française et le Venezuela.

Le développement de systèmes de production d'énergie solaire dans la zone intertropicale ne pourra se généraliser que si on comble l'absence de connaissance sur le rayonnement solaire et ses paramètres dans cette partie du monde. Afin de combler cette lacune, l'exploitation de l'imagerie satellitaire, en particulier celle issue de satellites météorologiques géostationnaires s'avère être un outil incontournable afin de produire des estimations de l'irradiation solaire reçue à la surface de la Terre à haute résolution spatiale et temporelle et avec la meilleure précision possible

1.6 Objectif de la thèse

L'objectif de la thèse est de contribuer à l'amélioration de l'estimation du rayonnement solaire en zone intertropicale, notamment sur la partie Nord du continent sud-américain appelée Plateau des Guyanes. La thèse se propose de répondre à trois questions principales :

- Q1 : comment produire des données d'irradiation solaire à haute résolution spatiale et temporelle sur le Plateau des Guyanes ?
- Q2 : Quels sont les phénomènes qui impactent la qualité des estimations et comment améliorer la qualité des données d'irradiation ?
- Q3 : Comment utiliser les données d'irradiation pour analyser l'exploitabilité de l'énergie solaire sur le Plateau des Guyanes ?

Répondre à ces questions permettra de disposer de données d'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle avec une bonne précision sur une partie du continent sud-américain, en prenant en compte les spécificités climatiques de cette région.

1.7 Méthodologie et plan

Afin de répondre aux problématiques énoncées dans la section précédente, nous avons fait le choix de structurer les études réalisées dans le cadre cette thèse en trois parties.

Les travaux du chapitre 2 se concentrent sur la recherche d'une solution méthodologique pour estimer le l'irradiation solaire sur la partie Nord du continent Sud-Américain (Plateau des Guyanes) avec une haute résolution spatiale et temporelle et une précision similaire à celle des autres méthodes opérationnelles sous d'autres climats. Pour cela, nous avons sélectionné une approche basée sur l'extension fonctionnelle d'une méthode d'estimation (Heliosat-2) actuellement exploitée avec le satellite Meteosat (zone Europe et Afrique) afin d'étendre son exploitabilité au satellite GOES (zone Amérique). Nous avons réalisé l'optimisation de cette méthode afin de proposer des estimations de l'irradiation solaire à haute résolution temporelle et spatiale dans cette région du monde où elles ne sont pas disponibles. Les questions de recherche abordées concernent l'évaluation des paramètres pertinents qui conditionnent l'efficacité d'une méthode d'estimation originellement conçue pour un satellite donné et optimisée afin de la rendre exploitable avec des données issues d'un autre satellite. Nous y décrivons les données exploitées, les modifications apportées à la méthode et la validation des estimations faites avec la méthode modifiée en les comparant aux mesures opérées par six stations météorologiques localisées en Guyane Française.

Dans le chapitre 3, nous proposons d'améliorer les estimations d'irradiation solaire obtenues dans le chapitre 2, notamment celles faites en ciel couvert. En effet, si en moyenne annuelle les estimations d'irradiation sont satisfaisantes, une analyse intra-annuelle montre que les erreurs de biais sont très variables selon le type de ciel. La méthode modifiée génère des estimations ayant une précision satisfaisante en ciel clair, et des estimations ayant une précision insuffisante en ciel couvert. Le Plateau des Guyanes étant une zone fortement affectée par la ZIC et avec des passages nuageux très fréquents, il nous est apparu nécessaire de compléter les modifications apportées à la méthode originelle en introduisant une modélisation du ciel couvert. Cette modélisation permet de mieux rendre compte des phénomènes d'atténuation en ciel couvert qui affectent l'irradiation solaire sans toutefois induire de dégradation de la qualité des résultats par ciel clair. Le choix du modèle de ciel couvert est discuté, une analyse de sensibilité est conduite afin de calibrer le modèle de ciel couvert choisi, et la validation des estimations de l'irradiation solaire est réalisée en ciel clair et en ciel couvert pour démontrer l'intérêt de la démarche.

Dans le chapitre 4, nous proposons de réaliser des cartographies d'indicateurs en utilisant les estimations d'irradiation obtenues avec la méthode Heliosat-2 modifiée. Les tâches réalisées dans cette partie permettent de caractériser la quantité d'irradiation solaire reçue sur le Plateau des Guyanes, sa variabilité ainsi que d'autres paramètres utiles. Les indicateurs créés renseignent notamment sur l'exploitabilité de l'irradiation solaire par des systèmes de production d'énergie.

Dans le chapitre 5, nous concluons sur les avancées obtenues en termes de connaissance sur le rayonnement solaire et sur son exploitabilité dans la zone du Plateau des Guyanes, nous discutons des résultats obtenus et de leurs applications potentielles. Puis nous concluons en formulant des perspectives visant à assurer la continuité du travail réalisé.

Ce document de thèse est rédigé sous forme de chapitres, les chapitres 2, 3 et 4 correspondant à un article accepté ou en cours de soumission dans une revue internationale avec comité de lecture.

Chapitre 2 : Estimation de l'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle avec des images GOES

Optimizing the Heliosat-2 method for Surface Solar Irradiation estimation with GOES images

Tommy ALBARELO^{a*}, Isabelle MARIE-JOSEPH^a, Antoine PRIMEROSE^a, Frédérique SEYLER^b, Lucien WALD^c, Laurent LINGUET^a

^a Université de la Guyane – UMR Espace-Dev, BP 792, 97337 Cayenne, France

^bIRD – UMR Espace-Dev, 97323 Cayenne, France

^c MINES ParisTech, PSL Research University, Centre Observation, Impacts, Energy, BP 204, 06905 Sophia Antipolis Cedex, France

*Corresponding author. E-mail: tommy.albarelo@ird.fr

Article publié dans *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol.41, pp. 86-100, 2015.

2.1 Abstract

The Heliosat-II method was developed to process Meteosat satellite images in order to assess the solar irradiation at surface. It is modified for its use with GOES satellite images in order to estimate the solar irradiation over French Guiana. Modifications include a change in the calibration formula, in the calculation of the cloud albedo and in the values of the Linke turbidity factor. These modifications allow the improvement of the performances of the Heliosat-II model in Intertropical zones in French Guiana. The outcomes were compared to coincident measurements of hourly irradiation performed by ground stations. The results show that the use of the maximum apparent albedo as the cloud albedo (pc_{max}), along with a fixed value of the Linke turbidity factor produces the best results; the bias was less than 23.61 Wh/m² (5% of the mean value of the measurements) overall and the RMSE was less than 109.39 Wh/m² (24 %) overall when using hourly values. In the case of daily means, the RMSE drops down to less than 10.08 W/m² (10%) overall whereas the overall bias remains unchanged as expected. The model performs better in clear skies than in cloudy skies. The results suggest that the Linke turbidity factor used in the Heliosat-II method does not reproduce well the attenuation of the solar radiation in French Guiana. The results were compared to those obtained from Heliosat II method and Meteosat images (HelioClim-3 database) and we found a better accuracy for GOES satellite data which exhibits smaller viewing angle. The use of the Heliosat II method with GOES images allows assessment of the SSI with a good accuracy and high temporal and spatial resolutions.

2.2 Introduction

The study of solar radiation is important to meet energy needs. The production of electrical energy with the use of photovoltaic cells or heat concentrators, and hot water systems are some of the main applications. The use of satellite imagery has a substantial advantage, notably in cases in which a low number of ground stations measuring global solar irradiation (for financial reasons or for a lack of human resources) causes a drop in accuracy in the interpolation of the estimations (Perez et al., 1997).

The solar irradiation at surface -called hereafter Surface Solar Irradiation (SSI)- can be generally derived from satellite imagery in two ways:

- Directly, by modeling the effects of the atmosphere on the incoming solar radiation with a Radiative Transfer Model (RTM) (Gautier et al., (1980); Moser and Raschke, (1983)). Atmospheric components (such as ozone, water vapor, aerosol properties) and cloud parameters (such as Cloud optical depth, effective radius, height and phase) are used as input to the RTM. Among the direct estimation methods, we can cite the Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Shortwave Radiation Budget (SRB) algorithm (Pinker and Laszlo, 1992) which was used in the creation of the Surface meteorology and Solar Energy (SSE) database, by using ISCCP-C1 and ISCCP B3 images. The Heliosat-IV method combines the McClear clear sky model (Lefevre et al., 2013) and observations from Meteosat Second Generation (MSG) satellites. Janjai et al., (2005) made use of a RTM to assess SSI in a tropical environment with images from GMS-4 and GMS-5 geostationary satellites.
- SSI can also be estimated "indirectly", by linking the use of a RTM or a clear sky model to a cloud index (n). Some indirect methods like Heliosat-II (Rigollier et al., 2004) links a clear sky model to a cloud index (Tarpyle, (1979), Cano et al., (1986), Perez et al., (2002)). Other methods combine the use of a RTM and the calculation of a cloud index. The Brasil-SR method (Pereira et al., (2000), Martins and Pereira (2006)) which was used for the creation of the Brazilian Solar Atlas for the Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) Project (Martins et al., 2007) with GOES-8 images, uses a RTM to calculate two boundary sky transmittance values (τ_{clear} and τ_{cloud}), which were combined to the cloud index to derive SSI. The Heliosat-III method adopted a new approach for the calculation of the clear-sky irradiance by using a modified Lambert-Beer relation. This new clear sky algorithm, called SOLIS (Mueller et al., 2004), was combined to the cloud index for calculation of SSI.

Among the indirect methods, we were interested in the Heliosat-II method (Rigollier et al., 2004) that led to the creation of the HelioClim-3 database over Europe and Africa (Blanc et al., 2011). The Heliosat-II method is free to access and was extensively tested throughout different countries (Dagestad (2004) ; Lefevre et al., (2007) ; Aculinin, (2008) ; Dürr and Zelenka, (2009) ; Wahab et al., (2010) ; Al-Jumaily et

al., (2010) ; Zhang et al., (2011) ; Marie-joseph et al., (2013)). This method originally uses Meteosat images as input. The Heliosat-II method is sufficiently generic to be modified:

- Lefevre et al., (2007) used Meteosat images in the B2 format, a reduced spatial and temporal resolution format, as input to the Heliosat-II model with similar results as Rigollier et al., (2004).
- Dürr and Zelenka (2009) used visible channel and Infra-Red channel images as input. They also built a processing chain to georeference the images, classify the pixels and separate the snow covered pixels from the cloud covered ones.
- Zhang et al., (2011) used Feng Yun-2C geostationary meteorological satellite images as input for the Heliosat-II model to map solar irradiance over North China.

The purpose of this study is to assess the performance of the Heliosat-II software (Lefevre et al., 2002) using Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) meteorological satellite images for dynamic estimation of SSI. The GOES satellite, especially GOES-East (orbiting at 75° W of longitude) offers smaller viewing angles when viewing French Guiana (located between 52°W and 55°W longitude and between 2°N and 6°N latitude) than Meteosat Satellites (orbiting at 0° of longitude). We would like to point out that in this study only Global Horizontal Irradiation (GHI) is dealt with. This paper is organized as follows. After presenting ground and satellite data in Section 2, we explain the Heliosat II method and changes made to the method in Section 3. In Section 4 we examine the performances of the modified method. We summarize the paper, conclude the discussions and specify the future research directions in the final section.

2.3 Context and data

2.3.1 Context

French Guiana is an 80000 km² overseas department administratively attached to France, located in the northeast of South America between Brazil and Surinam. French Guiana's distance from France (more than 8000 km) produces varied needs, notably in energy supply. The main energy supplier in French Guiana is the "Petit-Saut" hydroelectric station that feeds a small part of the territory (Figure 6). Many inland towns are powered by generator sets fueled by diesel oil, not by the Petit-Saut station.

French Guiana benefits from being close to the equator; therefore, SSI is potentially exploitable, with an annual daily irradiation average of 5580 Wh/m². The use of solar panels coupled with batteries or generator sets may be the best solution to provide energy in remote areas of French Guiana. However, designing and monitoring of photovoltaic systems in each locality requires drawing maps of SSI with high temporal and spatial resolution. Others needs, such as the estimation of the producible amount of

solar thermal energy and the planning and calculation of the cost-effectiveness of the thermal solar production, necessitate the availability of a solar map of French Guiana.

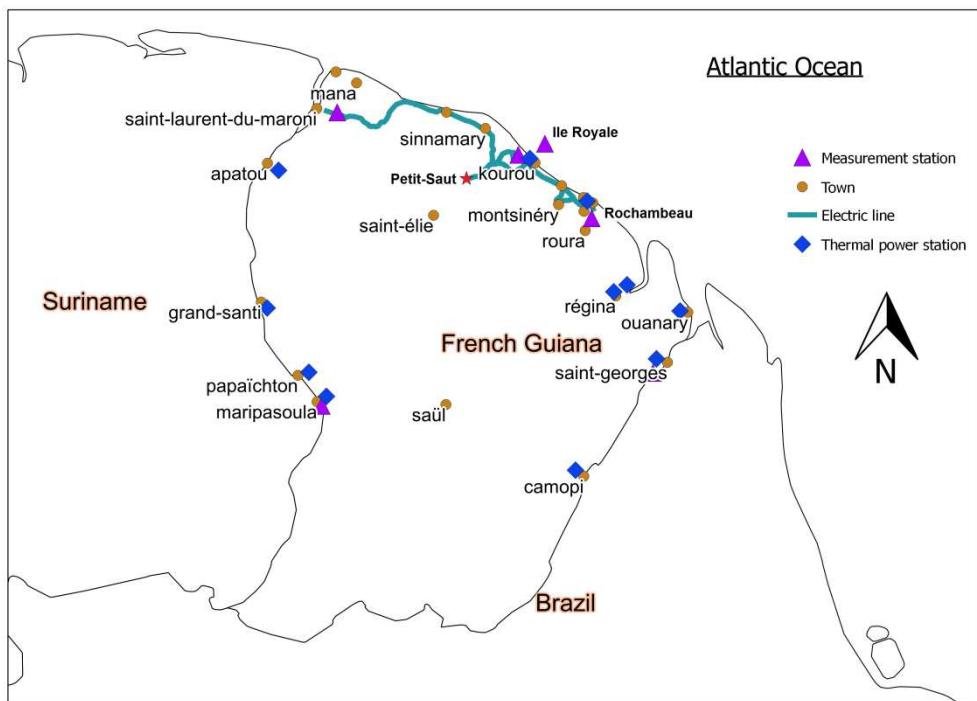


Figure 6 : Electric network in French Guiana. The coastal areas are well connected to the grid, unlike inlands and the borders with other countries.

2.3.2 In-situ data

Hourly in-situ measurement data from six ground reference stations were provided by the French national meteorological agency (Météo France). The list of the stations and their latitude, longitude and altitude are given in Table 1. These stations are equipped with Kipp and Zonen pyranometers of type CM6B and CMP11, both of which are equipped with a ventilation fan. The CM6B is a first class pyranometer The CM11 instruments fulfill the accuracy requirements of a secondary standard pyranometer defined in WMO (2008) which are specified to be 3%. Preventive maintenance is carried out every two months (e.g., cleaning of the air filter and the glass dish, desiccant exchange). Standard exchange of the pyranometers is systematically carried out every two years. Prior to its final installation each pyranometer is calibrated in the Radiometry National Center of Meteo France located in Carpentras (France). Once installed, the coefficients of the new pyranometer are then entered into the data acquisition system of the in situ station.

Table 1 : Latitude, longitude and altitude of the studied ground stations in French Guiana.

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Saint Georges	3.88	-51.8	6
Rochambeau	4.8167	-52.367	4
Kourou CSG	5.21	-52.75	12
Ile Royale	5.28	-52.58	48
Saint Laurent	5.48	-53.9	4
Maripasoula	3.63	-54.03	104

All of the in situ stations are located in flat or low-relief areas and are not subject to shadow effects. Three stations are located on the Atlantic coast: Rochambeau, Ile Royale and Kourou. The Saint Georges, Saint Laurent and Maripasoula stations are located inlands. The Rochambeau station is located at an altitude of 4 meters above the sea level on a flat area. The Ile Royale station is located at an altitude of 48 meters on the island of the same name located in the Atlantic Ocean, 14 km away from the coast of French Guiana. The Saint Laurent and Saint Georges stations are both located at an altitude of 6 meters in the municipalities of the same name. The Maripasoula Station is located at an altitude of 104 meters on a flat area inside the territory, which is 230 km from the ocean, and has houses and forest in the vicinity. As only SSI was available from the in-situ measurements, we performed a Quality Check process based on extreme values, following the method proposed by Geiger et al., (2002) and the SoDa website. For extreme values, hourly SSI (Gh, in Wh.m⁻²) was considered valid when it respected the following condition:

$$0.03 \cdot G_{TOA} < Gh < \min((1.2 \cdot I_0), ((1.5 \cdot I_0 \cdot \cos(\theta_s) \cdot 1.2) + 100)) \quad (2.1)$$

where G_{TOA} is the top of Atmosphere hourly SSI, θ_s is the sun zenith angle , I_0 is the solar constant (1367 W.m^{-2}).

2.3.3 Satellite data

A time serie of images every 30 min from the visible channel (0,55 µm – 0,75 µm) of the GOES-13 meteorological geostationary satellites from the year 2010 to 2012 has been selected. They were provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) via the Comprehensive Large-Array Stewardship System (CLASS) and had a spatial resolution of 1 km x 1 km. The retrieved images are 8-bit data.

2.3.4 Climate

The climate in French Guiana is governed by the InterTropical Convergence Zone (ITCZ), which is the location of convergence of the northeast and southeast trade winds. The ITCZ is home to many localized climatic effects. The ITCZ moves over French Guiana twice a year: northwards during May-July to approximately 7°N and southwards during November-January to approximately 15°S, creating a seasonal cycle with four periods (Bovolo et al., 2012):

- A dry season from July to November when the ITCZ lies north. The sky is mostly clear although weak precipitations may occur.
- A short rainy season from November to January when the ITCZ passes over French Guiana while moving south.
- A short dry season from February to March when the ITCZ lies south of French Guiana.
- A rainy season from April to May when the ITCZ passes over French Guiana again while moving north.

Annual variations in the movements of the ITCZ are noted because the beginning and ending of each season change from year to year.

2.4 The Heliosat-2 method

The Heliosat method allows the calculation of Solar Surface Irradiation values on a pixel from the satellite imagery provided by Meteosat meteorological geostationary satellite. The original Heliosat method (Cano et al., (1986) ; Diabaté et al., (1988)) is based on the principle that a change in cloud cover over a surface affects the albedo of that surface, which in turn affects the global irradiation reaching that surface. The Heliosat-II method is an evolution of the original Heliosat method. This modified method introduces the use of physical quantities in the model (such as the Radiance) instead of empirical parameters; therefore, the method can be exploited with any meteorological geostationary satellite. The original method was designed for use with Meteosat meteorological geostationary satellite images only.

First, the digital counts (CN) are calibrated into radiance (L) values (see equation 2.7). Then, these Radiance values are converted into reflectance values (r) as following:

$$r_{sat} = \frac{\pi \cdot L}{I_{0_sat} \cdot \varepsilon \cdot \cos(\theta_s)} \quad (2.2)$$

where r_{sat} is the satellite-derived reflectance, L is the satellite-derived radiance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$), I_{0_sat} is the total irradiance on the visible channel for the studied sensors (W.m^{-2}), ε is the Earth-Sun distance correction factor and θ_s is the sun zenith angle (°).

Reflectances are converted into apparent albedo (ρ) values as following:

$$\rho = \frac{r_{sat} - \rho_{atm}}{T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \quad (2.3)$$

where ρ is the apparent albedo, r_{sat} is the satellite-derived reflectance, ρ_{atm} is the apparent albedo of the atmosphere, $T(\theta_s)$ is the downward transmittance, $T(\theta_v)$ is the upward transmittance, θ_s is the sun zenith angle ($^{\circ}$) and θ_v is the satellite viewing angle ($^{\circ}$).

The cloud index (n) is calculated using the following formula:

$$n = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_c - \rho_g} \quad (2.4)$$

where ρ_g and ρ_c are the ground albedo and the cloud albedo, respectively. The ground albedo is selected as the second minimum of a monthly time series of apparent albedo values, because the minimal value of apparent albedo can be associated with cloud shadows (Rigollier et al., 2004). The cloud albedo is calculated following equation 2.14.

Following the calculation of n , we can derive the clear sky index (Kc) (Beyer et al., (1996) ; Rigollier and Wald, (1998) ; Hammer et al., (2003))

$$\begin{aligned} n \leq -0.2 & \quad Kc = 1.2 \\ -0.2 < n \leq 0.8 & \quad Kc = 1 - n \\ 0.8 < n \leq 1.1 & \quad Kc = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ 1.1 < n & \quad Kc = 0.05 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Hourly SSI (G_h) is then calculated using the following formula:

$$G_h = Kc * G_{ch} \quad (2.6)$$

where G_{ch} is the hourly clear-sky irradiation ($Wh.m^{-2}$), given by the ESRA clear-sky model (Rigollier et al., 2000).

2.4.1 Changes in the calibration process

The Heliosat-II software was originally developed for use with either type of Meteosat satellite data: a high-resolution Meteosat First Generation image (2500 x 2500 pixels with a pixel size of 5km) or a low resolution image (B2 format, 416 x 416 pixels with a pixel size of 30km). The calibration formula originally applied to the Meteosat data is the following:

$$L = A(CN - CN0) + B \quad (2.7)$$

where L is the effective radiance ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$), CN is the digital count, $CN0$ is an offset and A and B are Meteosat specific coefficients, obtained from the self-calibration method developed by Lefevre et al., (2000) and Rigollier et al., (2002).

Data from other meteorological geostationary satellites can be used within the Heliosat-II, as long as they are calibrated into radiance values first. The calibration process is different from one data supplier to another. To estimate SSI over French Guiana, the original Heliosat-II method was modified to be used with GOES images. The Heliosat-II software (Lefevre et al., 2002) was tailored for use with 8-bit data as input (prior to Meteosat Second Generation imagery, Meteosat imagery was 8-bit data). However calibration of GOES data from digital counts to radiance values can only be applied to 10-bit data (Weinreb et al., 1997). Then 8-bit GOES data should then be converted to 10-bit data by a non-linear transformation (D. Hillger, NOAA CIRA RAMMB, personal communication), as the direct conversion from 8-bit to 10-bit data by multiplying the 8-bit data by 4 is not correct, by using :

$$CN_8 = 255 * \sqrt{\alpha} \quad (2.8)$$

where CN_8 is the 8-bit digital count and α is the reflectance factor.

$$\alpha = k \cdot L \quad (2.9)$$

$$L = m \cdot CN_{10} + b \quad (2.10)$$

where k , m and b are GOES specific coefficients, L is the normalized radiance ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$) and CN_{10} is the 10-bit digital count.

By re-arranging equations 2.8, 2.9 and 2.10, we obtain the following:

$$CN_{10} = \frac{\left(\left(\frac{CN_8}{255} \right)_2 - b \right)}{m} \quad (2.11)$$

For GOES-13 imagers, the coefficients used were as follows (Weinreb & Han, 2009) :

$$b = -17.7428032 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$$

$$m = 0.6118208 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}.\text{count}^{-1}$$

$$k = 1.89544 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{sr}.\mu\text{m} \cdot \text{W}^{-1}$$

Figure 2 shows the comparison between the 8-bit data and the 10-bit data. Once converted from 8 bits to 10 bits, the data have to be calibrated into Radiance values. Two formulas calibrate GOES digital counts into radiance values. The first formula is provided by NOAA (Weinreb et al., 1997) :

$$L_{NOAA} = g0(CN_{10} - CN_0) \quad (2.12)$$

where L_{NOAA} is the radiance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$), $g0$ is the initial gain, CN_{10} is the 10-bit digital count and CN_0 is an offset (equal to 29 for the GOES imager). The second formula is provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Nguyen et al., 2004):

$$L_{NASA} = (g2.d^2 + g1.d + g0) * (CN_{10} - CN_0) \quad (2.13)$$

where L_{NASA} is the radiance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$), $g0$ is the initial gain, $g1$ and $g2$ are the first and second order polynomial terms of the gain trend, respectively, d is the number of days since launch, CN_{10} is the 10-bit digital count and CN_0 is an offset (equal to 29 for the GOES imager). Table 2 details the coefficients used for calibration for GOES-13 imagers.

Table 2: GOES-13 calibration coefficients. (Weinreb & Han, 2009; Doelling et al, 2013)

	g0	g1	g2
NOAA	0.6118208	N/A	N/A
NASA	0.625	$7.27 \cdot 10^{-4}$	0

The NOAA formula (eq. 2.12) is valid only before the satellite launch and shortly after. The radiance values then must be corrected because of the sensor drift: there is no calibration onboard the GOES satellite for the visible channel. Wu and Sun, (2005) provided monthly correction coefficients. Figure 8 shows the NASA radiances plotted against the NOAA radiances for the Rochambeau Station in 2011.

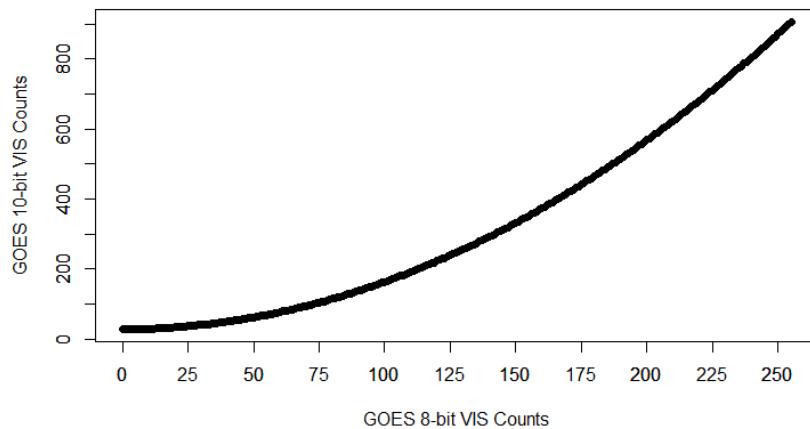
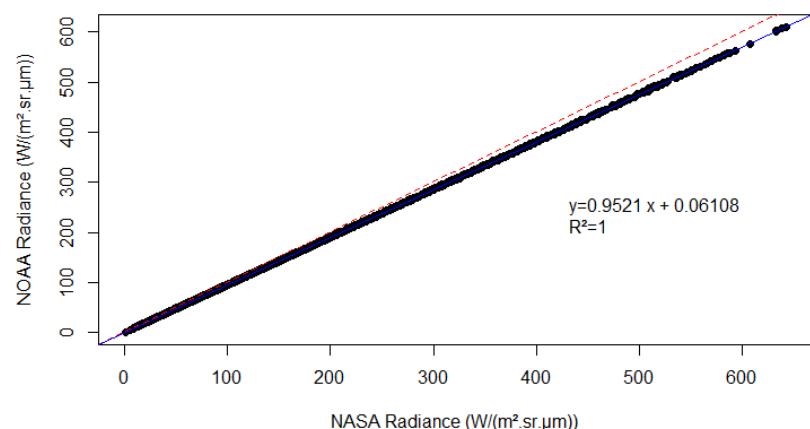


Figure 7 : Graphic comparison of GOES 8-bit data to 10-bit data nonlinear conversion



**Figure 8 : Radiances plotted against NOAA Radiance, Rochambeau station, 2011.
The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend.**

The radiance values for each calibration formula lie in a linear fit (solid line in Figure 8). As the radiance values increase, the NOAA radiances are slightly higher than the NASA values. The use of monthly correction coefficients in the NOAA calibration formula may cause discontinuities in the radiance values. The NASA formula has the advantage of immediately correcting the sensor drift on a daily basis because one of the inputs is the number of days since launch. With radiance values corrected on a lower time step, we selected the NASA formula (eq. 2.13) as the calibration formula.

2.4.2 Choice of an optimal cloud albedo calculation

The cloud albedo was originally calculated in the Heliosat-II method using the following formula (Rigollier et al., 2004) :

$$\rho_{c_Rig} = \frac{\rho_{eff} - \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi)}{T(\theta_s)T(\theta_v)} \quad (2.14)$$

$$\rho_{eff} = 0.85 - 0.13 \left[1 - e^{-4 \cos(\theta_s)^5} \right] \quad (2.15)$$

where ρ_{atm} is the apparent albedo of the atmosphere, ρ_{eff} is the effective cloud albedo, $T(\theta_s)$ is the downward transmittance, $T(\theta_v)$ is the upward transmittance, θ_v is the satellite viewing angle, θ_s is the sun zenith angle and ψ is the difference between the sun and satellite azimuthal angles. This formula is applied to every pixel and at every time step.

Two constraints were added by Rigollier et al., (2004):

$$if \rho_{cRig} < 0.2, \rho_{cRig} = 0.2 \quad (2.16)$$

$$if \rho_{cRig} > 2.24 \rho_{eff}, \rho_{cRig} = 2.24 \rho_{eff} \quad (2.17)$$

Along with the original formula, we also selected from the literature two other strategies to calculate cloud albedo :

- The maximum apparent value in a monthly time series ($\rho_{c\ max}$). This strategy was used in the original Heliosat method.
- The 95th percentile of the apparent albedo values in a monthly time series ($\rho_{c\ Q95}$). This strategy was used by Mueller et al., (2011) and Posselt et al., (2011) .

Albedos chosen with the $\rho_{c\ max}$ and the $\rho_{c\ Q95}$ are calculated at local noon.

2.4.3 Determination of the Linke turbidity factor value

The Linke Turbidity factor (TL) is a parameter describing the attenuations of the solar radiation by the atmosphere under clear skies (Remund et al., 2003). The clear-sky model of ESRA (Rigollier et al., 2000) uses TL as an input. Two strategies are linked to this input :

- TL varies for each site and each month, by using monthly values provided by the SoDa database. This strategy is used in the present Heliosat-II method. The methodology used to obtain this database of TL values is described in Remund et al., (2003). This variable will be called « $T_{L\ var}$ ».
- TL has a fixed value, equal to a yearly average used for the entire year with all ground stations merged. This strategy has been evaluated in the SoDa solar radiation database report (Rigollier et al., 2002) in which a fixed value of 3.5 for Europe has been used. This fixed value of TL will be called « $T_{L\ fixed}$ ».

Table 3 shows the values of TL associated with the six ground stations in French Guiana. These values were retrieved from the SoDa online database. Local differences (e.g., Diabaté et al.,(2003)) and different values for each month are noted, but these values are the same for every year because they are climatological values (Remund et al.,

2003). When looking at the monthly variations, January, February and May have the highest TL values that correspond to the peak of the rainy seasons (both long and short). The lower TL values, obtained from June to September, correspond to the dry season. Table 4 shows the air features associated with each value of TL.

Table 3 : Linke Turbidity factor values for the studied ground sites in French Guiana

	Month												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Saint Georges	6	5.7	4.8	3.3	6.4	3.3	3.1	3.1	3.3	3.9	4.3	4.5	
Rochambeau	5.8	5.7	4.8	3.4	6.3	3.2	3.1	3.1	3.3	3.8	4.2	4.4	
Kourou CSG	5.7	5.6	4.6	3.3	6.3	3.2	3.1	3.1	3.3	3.7	4.2	4.2	
Ile Royale	5.7	5.5	4.5	3.3	6.2	3.1	3	3.1	3.1	3.6	4.1	4.1	
Saint Laurent	5.8	5.8	4.7	3.4	6.4	3.2	3	3.2	3.3	4	4.3	4.3	
Maripasoula	6.4	6.2	5.4	3.8	6.8	3.6	3.3	3.4	3.7	4.2	4.6	4.7	
Average values	5.9	5.75	4.8	3.42	6.4	3.27	3.10	3.17	3.32	3.87	4.28	4.37	

Table 4 : Air features associated with each Linke turbidity factor value (Kasten, 1996)

TL value	Air feature
2	Very clean cold air
3	Clean warm air
4-6	Moist warm or stagnating air
>6	Polluted air

2.5 Results and analysis

SSI has been estimated at six ground stations in French Guiana. The accuracy of these estimates was evaluated through comparisons between SSI estimated from Heliosat II and in situ-based measurements. We followed the ISO standard (1995) by computing the deviations: estimated – measured, and using statistical indices: Bias (BIAS), Root Mean Square Error (RMSE) and the Pearson correlation coefficient (r).

The formula for BIAS is:

$$BIAS = \frac{\sum_i (y_i - x_i)}{N} \quad (2.18)$$

The formula for RMSE is:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (2.19)$$

The formula for r is :

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.20)$$

where y_i and x_i are the i^{th} model estimated and ground measured solar irradiation, respectively, \bar{y} and \bar{x} are respectively the model estimated and ground measured means, and N is the total number of data points.

2.5.1 Results obtained depending on cloud albedo strategy

Firstly, the hourly irradiation was assessed by using the three different cloud albedo strategies ($\rho_{c \max}$, $\rho_{c \text{ Q95}}$, $\rho_{c \text{ Rig}}$). The results are presented in table 5 for all stations merged. The Linke turbidity factor value (TL) is fixed at 4.3, the average of the yearly means of TL for all the stations merged.

Figure 9 (a, b and c) shows the scatter plots for the hourly estimates for every cloud albedo strategy with all stations merged.

The results show that SSI is underestimated with large negative bias from -92.47 Wh.m⁻² to -70.46 Wh.m⁻² when $\rho_{c \text{ Q95}}$ and $\rho_{c \text{ Rig}}$ are used as cloud albedo, although the correlation coefficient is high (> 0.85). The bias and RMSE are nearly identical for $\rho_{c \text{ Q95}}$ and $\rho_{c \text{ Rig}}$ because the cloud albedos obtained using these two methods are similar. When using $\rho_{c \max}$ as the cloud albedo, the bias is less than 5% and the RMSE is less than 25% overall, and the correlation coefficient exceeds 0.93 . Table 6 presents the results for the daily means of irradiance for every station with all years merged with cloud albedo chosen as $\rho_{c \max}$. Figure 10 shows the scatter plots associated with these results. The dots remain scattered around the 1:1 line even with the daily means. However, for daily means above 200 W.m⁻², the dots agree well with the 1:1 line, except for Saint Laurent and Maripasoula. Values below 200 W.m⁻² are overestimated. These values correspond mostly to cloudy skies. The influence of the cloudy skies will be investigated later in this article.

The ground albedo and cloud albedo used as inputs on the model have an influence on the quality of the results. When looking at the cloud index formula (equation 2.4), greater differences between ρ_c and ρ_g result in better representation of the dynamics of the apparent albedo (ρ). Values obtained for $\rho_{c \max}$ as the cloud albedo

vary between 2.7 and 3.5. Values obtained when using ρ_{cQ95} and ρ_{cRig} lie between 1.2 and 2. Rigollier et al.,(2004) point to the fact that ρ_c is not an actual cloud albedo but rather a quantity to be compared to ρ for the calculation of n . Because ρ has a larger range of values when using ρ_{cmax} , the dynamic variation of the cloudiness in French Guiana is better accounted for by this variable.

Table 5 : Hourly estimation results for 2010, 2011 and 2012, all stations merged, for the three cloud albedo strategies.

	BIAS (Wh/m ²)	BIAS (%)	RMSE (Wh/m ²)	RMSE (%)	r
2010					
ρ_c max	14.21	3	109.39	24	0.92
ρ_c Q95	-92.47	-20	171.50	38	0.85
ρ_c Rig	-78.64	-17	157.86	35	0.87
2011					
ρ_c max	5.89	1	100.33	23	0.93
ρ_c Q95	-88.92	-20	154.05	35	0.89
ρ_c Rig	-79.32	-18	152.07	34	0.86
2012					
ρ_c max	23.61	5	106.28	24	0.93
ρ_c Q95	-70.46	-16	147.78	34	0.88
ρ_c Rig	-76.02	-18	154.63	35	0.88

2.5.2 Results obtained depending on the Linke turbidity factor value

Hourly SSI has been estimated with both TL_{fixed} and TL_{var} . A value of 4.3 for TL_{fixed} has been retained. This value corresponds to a yearly average with all ground stations for French Guiana merged. Cloud albedo is chosen using the ρ_{cmax} method.

Figure 11 shows the evolution of the relative bias for Saint-Georges, Kourou CSG and Rochambeau stations for 2011, using TL_{fixed} and TL_{var} . The use of TL_{fixed} or TL_{var} has an effect on the bias but not on the RMSE. The RMSE obtained by using the two strategies are similar. The relative bias for TL_{fixed} appears to be more stable than the relative bias for TL_{var} . The relative bias for TL_{var} is high during the dry season and low during the rainy seasons for all stations. This difference in bias is observed in January,

Estimation de l'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle avec
des images GOES

February and May, where the use of TL_{var} produces lower biases compared to the use of TL_{fixed} .

Monthly TL values are insufficient to characterize the dynamic sky conditions above French Guiana, as rainfall and cloudy skies occur even in the dry season. The value retained for TL_{fixed} (4.3) corresponds, according to table 6, to a moist warm air. This characterization suits the average state of the air in French Guiana.

Table 6 : Daily means estimation statistical results for every station, all years merged, using pcmax as cloud albedo.

	BIAS (W/m ²)	BIAS (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)	r
Saint Georges	10.08	5	20.15	10	0.93
Rochambeau	5.83	3	20.96	10	0.91
Kourou CSG	3.00	1	18.42	8	0.93
Ile Royale	-0.89	0	16.97	7	0.94
Saint Laurent	6.46	3	22.21	10	0.87
Maripasoula	9.17	4	19.11	9	0.88

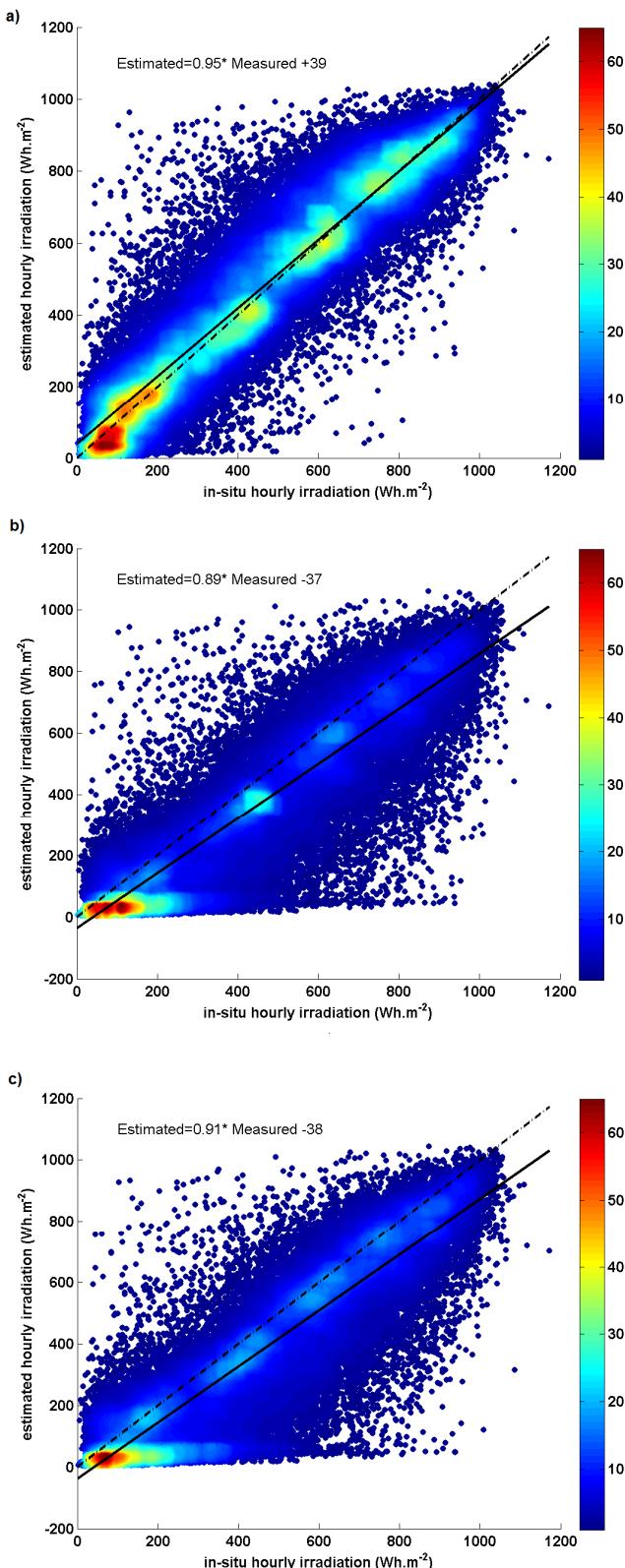


Figure 9 : Scatter plots between hourly in-situ SSI measurements and Heliosat-II estimates using (a) $\rho_{C \text{ max}}$, (b) $\rho_{C \text{ Q95}}$ and (c) $\rho_{C \text{ Rig}}$. The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend.

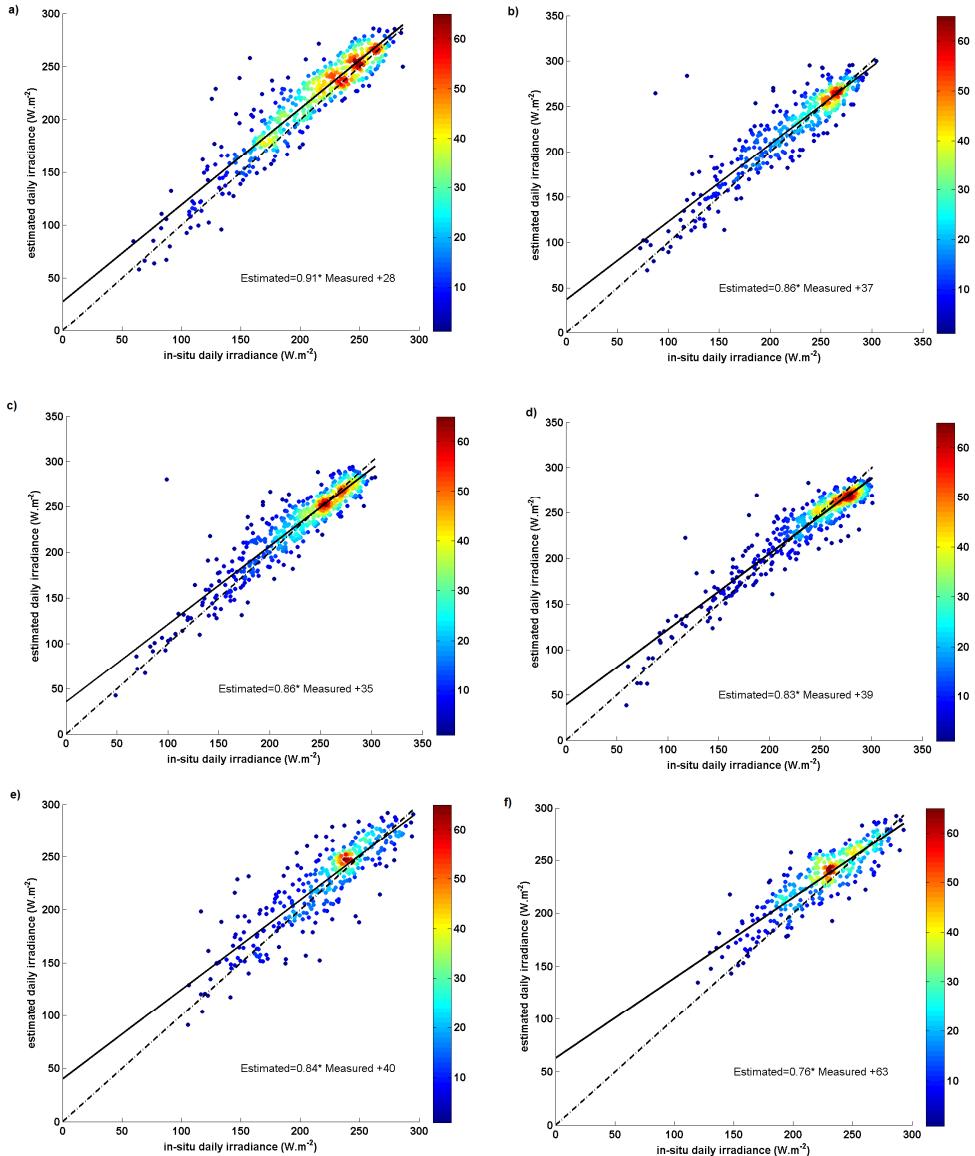


Figure 10 : Scatter plots between daily means of in-situ SSI measurements and Heliosat-II estimates with cloud albedo chosen as ρ_{cmax} , for (a) Saint Georges, (b) Rochambeau, (c) Kourou CSG, (d) Ile Royale, (e) Saint Laurent and (f) Maripasoula, all years merged.

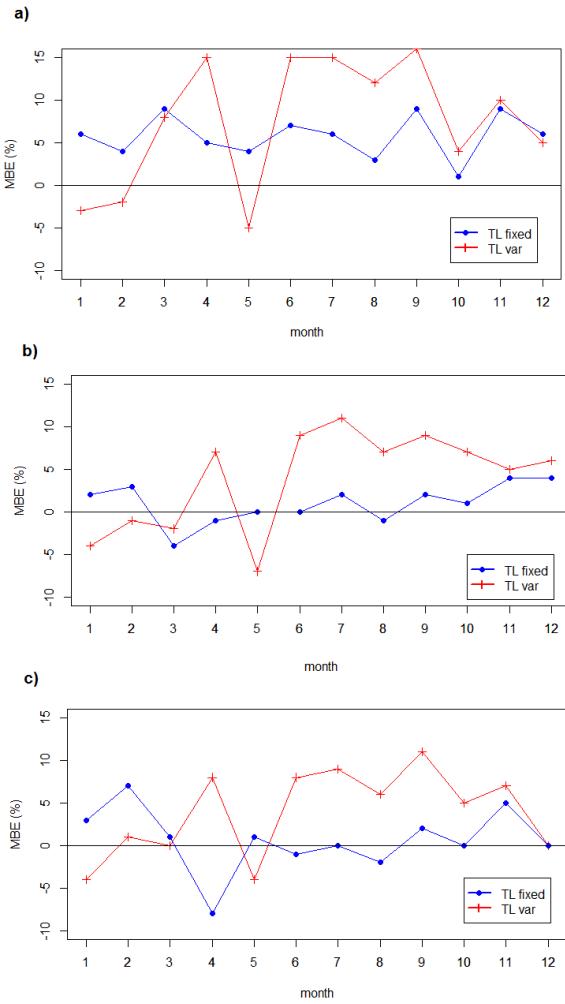


Figure 11 : Graphic comparison of the relative bias values with TL_{fixed} and TL_{var} for the year 2011, for (a) Saint-Georges station, (b) Kourou station, (c) Rochambeau station.

2.5.3 Results obtained depending on the type of sky

For this study, we assess the performance of the Heliosat-II method for two types of sky: clear and cloudy. The influence of the type of sky was studied instead of each season because of the intra-annual variations of the movements of the ICTZ. A set of days was selected and separated into two groups: clear days and cloudy days. These days were different for each ground station. To estimate which days had a clear or cloudy sky, the clearness index (KT) was calculated. The formula for KT is as follows:

$$KT = \frac{G_h}{G_{h_TOA}} \quad (2.21)$$

$$G_{h_TOA} = I_0 \cdot \varepsilon \cdot \cos(\theta_s) \quad (2.22)$$

where G_h is the the hourly irradiation (in $Wh.m^{-2}$), G_{h_TOA} is the top of atmosphere hourly irradiation ($Wh.m^{-2}$), ε is the Earth-Sun distance correction factor, I_0 is the solar

constant (1367 W.m^{-2}) and θ_s is the sun zenith angle ($^{\circ}$). KT was calculated for each hour from in situ measurements. Daily averages and standard deviations were then calculated. Due to the dynamic cloud conditions above French Guiana, only days with daily KT average values with standard deviations less than 15% were retained. The maximum and minimum values of KT (with a reasonable standard deviation) were 0.7 and 0.1 respectively. A set of 30 days with clear skies has been retained. For cloudy skies only 20 to 25 days could be retrieved with a satisfactory standard deviation.

Hourly SSI has been estimated for the six ground stations only for clear sky days and cloudy sky days. Cloud albedo is chosen using the pc_{max} method, TL_{fixed} is used as the Linke turbidity factor. Table 7 reports the results for each station with all years merged. The hourly bias is low for clear sky days with a slight underestimation for the Ile Royale station. RMSE is overall less than 88 Wh.m^{-2} (15%) and the correlation coefficient is more than 0.95. For cloudy days the bias increases by 30 Wh.m^{-2} (20 %) and RMSE increases by 40 Wh.m^{-2} (50%). The correlation coefficient drops to an overall value of 0.80. Figure 12 exhibits scatter plots between hourly in-situ SSI measurements and hourly Heliosat-II estimates with TL_{fixed} and cloud albedo chosen as pc_{max} for clear sky days (Figure 12(a)) and for cloudy days (Figure 12(b)). All stations are merged. The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend. Clear sky days (Figure 12(a)) comprise a large variety of hourly irradiation, the dots cover a large range of values : $[0, 1100 \text{ Wh.m}^{-2}]$ which lie along the line 1:1. The scattering is weak. The Heliosat-2 method reproduces well the SSI. Cloudy skies (figure 12(b)) exhibit a smaller range of hourly irradiation, the dots are concentrated in the range $[0, 400 \text{ Wh.m}^{-2}]$. The dots are scattered which may explain the lower value of the correlation coefficient. The model performs better on clear days than on cloudy days. The low performance of the model for cloudy skies can be explained by two factors:

- According to Mueller et al., (2004), global irradiation is overestimated because TL incorporates redundant information of the turbidity in comparison with a separated treatment of aerosol type, aerosol optical depth and water vapor.
- According to Dagestad (2004), the bias is expected to increase when the cloud cover increases because of the multiple scattering and reflection. When thick clouds are above the ground, the SSI decreases because of absorption without compensation from reflection.

These results show that the attenuation of the radiation by the atmosphere is not sufficiently represented in cloudy skies based on the use of TL alone. The fact of relying on the Linke Turbidity factor to take into account the cloud physics shows the physical limits of the Heliosat-II method.

Table 7 : Hourly estimation statistical results for clear sky days and cloudy sky days for each station, all years merged.

	BIAS (Wh/m²)	BIAS (%)	RMSE (Wh/m²)	RMSE (%)	r
Clear sky days					
Saint Georges	3.66	0	73.05	13	0.96
Rochambeau	-2.76	-1	77.10	14	0.96
Kourou CSG	-11.92	-2	63.83	10	0.97
Ile Royale	-36.78	-6	87.94	14	0.96
Saint Laurent	-5.54	-1	87.60	15	0.95
Maripasoula	-3.38	0	76.20	13	0.96
Cloudy sky days					
Saint Georges	36.81	25	117.93	78	0.75
Rochambeau	32.29	20	111.95	67	0.77
Kourou CSG	38.66	20	118.73	63	0.80
Ile Royale	35.06	22	114.88	71	0.78
Saint Laurent	24.10	12	105.42	51	0.85
Maripasoula	39.94	17	122.25	53	0.84

2.5.4 Comparison with Helioclim3 estimates

Although the SSI estimates in cloudy skies could be improved with the use of the recently developed McClear clear sky model (Lefevre et al., 2013), we wanted to assess SSI over French Guiana with the use of the Heliosat-II model, in a similar fashion to the work of Marie-joseph et al., (2013) who used data from HelioClim-3 data (derived from Meteosat satellite) in their study of the applicability of the Heliosat-II method on French Guiana. Then we compared the HelioClim-3 SSI estimates of the studied stations (Marie-joseph et al., 2013) to the estimates from our implementation of the Heliosat-II method (with GOES satellite images), based on daily means of global horizontal irradiance. The cloud albedo has been chosen as $\rho_c \max$. Results are reported on table 8. For the estimates from our implementation of the Heliosat-II method, the results for both the use of TL_{fixed} and TL_{var} have been reported, because the HelioClim-3 database uses the TL_{var} strategy. Bias and RMSE are lower with the use of Heliosat-II with GOES images, than with the use of Meteosat images. This shows that the viewing angle has an impact on the accuracy of

the estimates: the smaller the satellite viewing angle, the better the accuracy of the estimates.

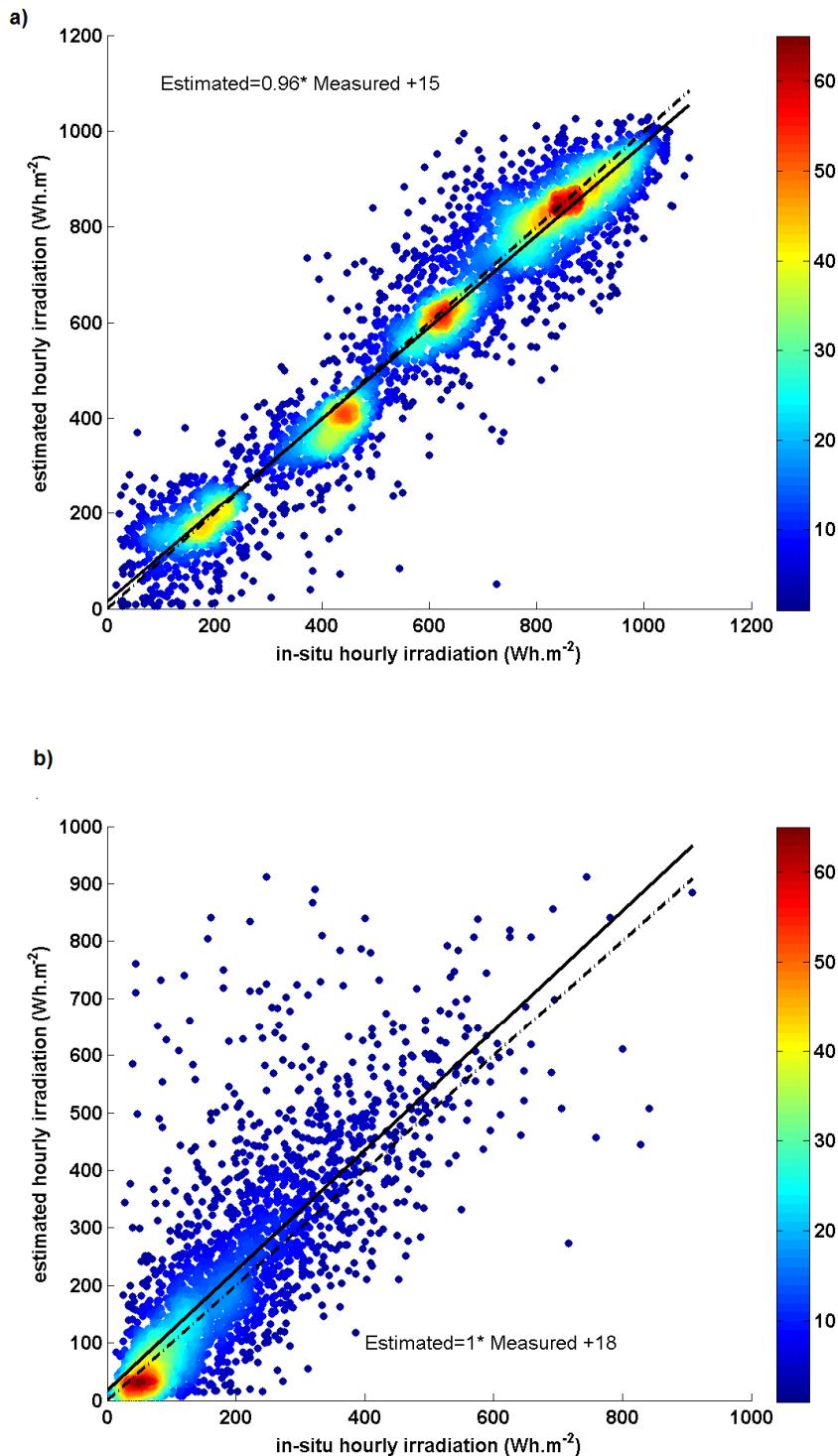


Figure 12 : Scatter plots between hourly in-situ SSI measurements and Heliosat-II estimates with TLfixed and cloud albedo chosen as pcmax for (a) clear sky days and (b) for cloudy days. The dashed line is the 1:1 line and the full line is the linear trend

Table 8 : Comparison of the daily means of the estimates between HelioClim-3 data and estimates derived from Heliosat-II and GOES images, all years merged. For Heliosat-II and GOES images, ρ_{max} is used as the cloud albedo

Stations	BIAS (W/m ²)	BIAS (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)	r
HelioClim-3 V4 (Meteosat images)					
Saint Georges	19.24	9	31.47	15	0.90
Rochambeau	14.76	7	28.61	13	0.90
Kourou CSG	15.49	7	34.72	15	0.87
Ile Royale	7.68	3	27.86	12	0.91
Saint Laurent	14.66	7	27.03	12	0.89
Maripasoula	12.43	6	26.31	12	0.86
Heliosat-II (GOES images, TL var)					
Saint Georges	15.94	8	26.28	13	0.91
Rochambeau	14.87	7	25.59	12	0.91
Kourou CSG	10.85	5	23.08	10	0.91
Ile Royale	9.36	4	20.44	9	0.93
Saint Laurent	12.39	6	25.47	12	0.86
Maripasoula	6.15	3	21.44	10	0.83
Heliosat-II (GOES images, TL fixed)					
Saint Georges	10.08	5	20.15	10	0.93
Rochambeau	5.83	3	20.96	10	0.91
Kourou CSG	3	1	18.42	8	0.93
Ile Royale	-0.89	0	16.97	7	0.94
Saint Laurent	6.46	3	22.21	10	0.87
Maripasoula	9.17	4	19.11	9	0.88

2.6 Conclusion

The Heliosat-II method, originally developed for Meteosat meteorological geostationary satellites images over Europe and Africa, has been modified to be used with GOES images. The modifications include a change in calibration, in the calculation of the cloud albedo and in the Linke turbidity factor values. Surface Solar Irradiation has been estimated on French Guiana with this modified version of the method. The results show that the use of the maximum apparent albedo as the cloud albedo ($\rho_{c\max}$), along with a fixed value of the Linke turbidity factor, produces the best results, with a bias less than 23.61 Wh.m⁻² (5% of the mean of the measurements) and a RMSE of less than 109.39 Wh.m⁻² (24 %) for hourly irradiation. If daily means are used, then the RMSE drops to less than 10.08 W/m² (10%) while the bias stays unchanged. The model performs better on clear sky days than on cloudy sky days. This weaker performance for cloudy skies is attributed to the insufficient information provided by the Linke turbidity factor on the effects of the atmosphere when the cloud cover increases. Future work is planned to improve the modeling of atmospheric attenuation in case of cloudy skies.

We have also compared our estimates to those obtained from Heliosat II method and Meteosat images (HelioClim-3 database) and we found a better accuracy for GOES satellite data which exhibits smaller viewing angle.

The use of the Heliosat II method with GOES images allows assessment of the SSI with a good accuracy and high temporal and spatial resolutions. The modified method is a powerful tool for determining sustainability initiatives and drawing maps of SSI. This knowledge is critical to planning off-grid electrification for remote sites, designing and monitoring photovoltaic systems in all localities of French Guiana.

Chapitre 3 : Amélioration des estimations de l'irradiation solaire par ciel couvert

Optimizing the Heliosat-2 method for Surface Solar Irradiation estimation under cloudy sky conditions

Mouhamet DIALLO^a, Tommy ALBARELO^{a*}, Antoine PRIMEROSE^a, Frédérique SEYLER^b, Laurent LINGUET^a

^a Université de la Guyane – UMR Espace-Dev, BP 792, 97337 Cayenne, France

^bIRD – UMR Espace-Dev, 97323 Cayenne, France

*Corresponding author. E-mail: tmouhamet.diallo@ird.fr

3.1 Abstract

Assessing the surface solar irradiation (SSI) over cloudy sky condition is a challenging issue for satellite-based method. The purpose of this article is to improve surface solar irradiation (SSI) estimates under cloudy sky in the intertropical convergence zone with a modified version of Heliosat-2 method calibrated with GOES images. The modification integrates a simple cloudy sky model to the global horizontal irradiation formula. The key element of this model is the cloud absorption coefficient. Comparisons of the results are made against SSI measurements from six meteorological stations in French Guiana over 4 years. Our study shows the improvement of the cloudy sky SSI estimates. The root mean square error (RMSE), respectively the mean bias error (MBE) before the modification ranged from 66% to 84% (-48% to 64%), after the modification they ranged from 43% to 63% (-2% to -22%). The value of the method relies on its simplicity of implementation and on its computation speed. Besides only one parameter, the cloud albedo coefficient needs to be configured to adapt this method to other areas with high cloudiness. We conclude that this modification of Heliosat-2 method with GOES images improves surface solar irradiation (SSI) estimates under cloudy sky in French Guiana.

3.2 Introduction

The accurate knowledge of surface solar irradiation (SSI) is of great interest in several fields such as climatology, agriculture, energy. For instance, SSI is used in climatology to assess ocean heat flux balance, in agronomy to monitor the growth rate of crops and in the energy sector to site and design solar energy converting system.

SSI mapping can be inferred through the pyranometers network measurements (Perez et al., 1994). However high manufacturing fees of pyranometers, their maintenance costs and the uneven network density held down their use (Qu (2013), Inman et al., (2013)). Several authors (Perez et al., (1994), Zelenka et al., (1999)) proved as soon as the distance to the pyranometers is greater than 30 km, interpolation method gives worse results than satellite-derived solar radiation. Satellite-derived SSI advantages rely on the global as well as regional coverage (Lee and Margulis, (2007), Perez et al., (1994)).

Satellite-derived SSI methods were developed with the first satellite launches (Levanon (1971), House et al., (1986)). These methods were either classified as statistical (Tarpley (1979), Moser and Raschke (1983), Cano et al. (1986), Noia et al., (1993a)) or physical (Vonder Haar and Ellis (1976), Gautier et al., (1980)). These methods were regularly enhanced but their core principles were kept.

For example, Rigollier et al., (2004) improved the Cano et al., (1986) model, adding a calibration relationship between the atmosphere emerging radiance and the numerical count measured by satellite sensors, a physical parameterization to describe the cloud and ground albedo, and several parameters such as the Linke turbidity factor and air mass to account for the atmospheric extinction. The satellite count calibration step allowed processing any type of data from geostationary meteorological satellites, and images taken by different sensors (Lefevre et al., (2000); Rigollier and Lefèvre, (2002)). The previously empirically defined parameters, the cloud and ground albedo are expressed using physical laws to improve the SSI estimates.

Gautier and Landsfeld (1997), improved the radiative transfer model previously set by Gautier et al., (1980) to better account for the effect of clouds on SSI. Under all sky conditions the first version RMSE was 9%, the later reduced the RMSE to 4%.

Perez et al., (2002) kept the idea suggested by Cano et al., (1986) to link the cloud index, a measure of cloudiness on a pixel to the SSI. However Perez normalized the cloud index to account for air mass effect and backscatter effect. This improvement allowed better result when the cloud index to SSI formula is computed.

All these improvement lead to generalized methods applicable to other regions than the one they were initially calibrated. Besides these generalized methods are less dependent on the satellite used and more importantly, these methods produce more accurate SSI estimates.

Yet the SSI estimates under cloudy sky condition from remote sensing sensors remains a relevant issue (Bisht and Bras (2010); Polo et al., (2014)). Overall Satellite-derived SSI methods exhibit positive biases over cloudy sky conditions (Tarpley, (1979), Diak and Gautier (1983), Girodo et al., (2006), Alonso Suárez et al., (2012), Polo et al., (2014)). This trend comes from the inability of the satellite sensor, on the visible spectrum, to observe the lowest level of clouds. These sensors on the visible spectrum cannot access the cloud content and layers (Heinle et al., 2010). For instance, the presence of water droplet and ice particles strongly increases both the absorption and scattering of the solar radiation (Noia et al., 1993b). Besides, for oblique viewing angles

the apparent position of a cloud as seen from the satellite will be off its true location (Wyser et al., 2002).

The authors' aim through this article is to provide a method to improve SSI estimates under cloudy sky condition. Various authors assessed satellite-derived surface solar radiation estimates accuracy under cloudy sky condition. Either the surface solar irradiance or surface solar irradiation (SSI) was used to describe the surface solar radiation.

Gautier et al., (1980) developed a method based on a radiative transfer model to estimate surface solar irradiance. Overall, the model showed good promises. However the results under cloudy sky condition were not optimal. Therefore this first method was updated (Gautier & Landsfeld, 1997) to better account for cloud effects. In the updated version, Gautier noticed a daily 12 W/m^2 RMSE worsening of the surface solar estimates accuracy under cloudy condition compared to clear sky condition. The bias increases by about 11.1 W/m^2 under cloudy sky.

Geiger et al., (2008) parameterized the surface solar irradiance as the top of the atmosphere irradiance lowered by an atmospheric transmission factor. Under cloudy sky conditions, the atmospheric transmission factor used is inferred from Gautier et al., (1980) radiative transfer models under cloudy sky conditions. Geiger found out that the monthly means of surface solar estimated biases lied between $\pm 5\%$ in most cases of clear sky condition whereas in cloudy sky condition they lied between $\pm 15\%$. The standard deviation bounded by 13 and 111 W/m^2 under clear sky is bounded by 21 and 191 W/m^2 under cloudy sky condition.

Bisht and Bras, (2010) also set a radiative transfer model over clear and cloudy sky condition. The cloudy sky conditions energy balance equation uses the cloud top temperature, cloud fraction, cloud emissivity, cloud optical thickness and land surface temperature provided by the MODIS cloud data product. Under clear sky condition daily averaged bias are about 17.82 W.m^{-2} and daily averaged RMSE about 42.05 W.m^{-2} while in cloudy sky conditions they are respectively 25.64 W.m^{-2} and RMSE of 66.52 W.m^{-2} .

Polo et al., (2014) made a sensitivity analysis of the Heliosat II surface solar irradiance estimates. In the case of the ESRA clear sky model and aerosol from AERONET data base, Polo found -0.023 W.m^{-2} hourly averaged MBE and 42.29 W.m^{-2} hourly averaged RMSD for clear sky condition. For cloudy sky conditions these scores are doubled: MBE is equal to 0.046 W.m^{-2} and RMSD to 127.00 W.m^{-2} .

Albarelo et al., (2015) developed an optimized version of Heliosat II (Rigollier et al., 2004) method calibrated with GOES satellite images to assess the SSI. Results found over clear sky were encouraging, but results over cloudy sky conditions exhibit large biases and RMSE. The hourly averaged bias ranged from -6 to 0% in clear sky condition whereas in cloudy sky condition, it ranged from 17 to 25% . The root mean square error (RMSE) hourly averaged ranged from 10 to 13% in clear sky condition whereas in cloudy sky condition, it ranged from 51 to 78% .

The objective of this study is to improve the SSI estimates under cloudy sky condition following the study made by Albarelo et al. over French Guiana. Albarelo's study relies on an optimised version of Heliosat II method developed by Rigollier et al.,

(2004). To improve the SSI estimates under cloudy sky condition we suggest modifying the way to calculate the SSI by introducing a cloudy sky model in the optimized Heliosat II method. To increase the accuracy of cloudy sky SSI estimates, the modifications respect the following constraints:

- not to increase significantly the computation time.
- not to worsen the clear sky SSI accuracy.

This paper is structured as follows: section 2 describes both the ground and satellite data used. The third section presents the Heliosat method and describes the modifications made to the optimised version of Heliosat II method to improve the SSI estimates under cloudy sky. Section 4 compares the results obtained for cloudy sky as well as clear sky condition with both modified and original optimised version of the Heliosat II described in Albarello et al. (2015). In section 5 the authors give the article's conclusions.

3.3 Data

3.3.1 Ground measurements

Our study exploits hourly data of global horizontal irradiance from six stations of the French national weather services, Meteo-France (table 9).

Table 9 : Ground meteorological stations in French Guiana

Stations	Latitude (°)	Longitude (°)	Height (m)	Period
Rochambeau	4.81	-52.37	4	2010–2013
Saint Georges	3.88	-51.80	6	2010–2013
Maripasoula	3.63	-54.03	104	2010–2013
Saint Laurent	5.48	-53.90	4	2010–2013
Kourou	5.12	-52.44	12	2010–2013
Iles Royales	5.28	-52.58	48	2010–2013

One half of the stations are located on the Atlantic Coast: Rochambeau, Ile Royale, and Kourou. Rochambeau station is located 13 km from the Atlantic Ocean and The Ile Royale station is on a 0.6 Km² Island located 7 km offshore. The other half are located inland: The Saint-George, Saint-Laurent, and Maripasoula stations are located between 30 and 230 km from the coast to the interior of the country. These stations are equipped with Kipp and Zonen pyranometers of type CM6B and CMP11, both types are equipped with a ventilation fan. The CM6B is a first-class pyranometer. CM11 instruments fulfill the accuracy requirements of a secondary standard pyranometer defined in WMO, (2008). Preventive maintenance is done every 2 months and standard exchanges are systematically carried out every 2 years. Prior to its final installation, each pyranometer is calibrated in the Radiometry National Centre of Meteo France and once installed, the

coefficients of the new pyrometer are then entered into the data acquisition system of the in situ station (Albarelo et al., 2015).

Hourly SSI measurements run through a quality check process based on extreme values, following the method proposed by Geiger et al., (2002) and the SoDa website. For extreme values, hourly SSI (G_h , in Wh.m^{-2}) was considered valid when it respected the following condition:

$$0.03 * G_{hTOA} < G_h < \min((1.2 * I_0), ((1.5 * I_0 * \cos(\theta_s)) * 1.2) + 100) \quad (3.1)$$

G_{hTOA} is the top of the atmosphere hourly surface solar insolation, θ_s is the sun zenith angle, and I_0 is the solar constant (1367 W/m^2).

3.3.2 Satellite Data

A 30 min time steps series of images from the visible channel (0.55 μm –0.75 μm) of the GOES-13 meteorological geostationary satellites from years 2010 to 2013 has been selected. They were provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) via the Comprehensive Large-Array Stewardship System (CLASS) and had a spatial resolution of 1 km \times 1 km. The retrieved images are 16-bit data.

3.3.3 Climate

The climate in French Guiana is governed by the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), which is the location of convergence of the northeast and southeast trade winds (Albarelo et al., 2015).

The ITCZ is characterized by rapid ascent of hot air associated with the development of large and homogeneous cumulonimbus clouds (Marie-joseph et al., 2013). It moves over French Guiana twice a year: northward during May–July to approximately 7° N and southward during November–January to approximately 15°S, creating a seasonal cycle with 4 periods (Bovolo et al., 2012) :

- A dry season from July to November when the ITCZ lies north. The sky is mostly clear although weak precipitations may occur.
- A short rainy season from November to January when the ITCZ passes over French Guiana while moving south.
- A short dry season from February to March when the ITCZ lies south of French Guiana.
- A rainy season from April to May when the ITCZ passes over French Guiana again while moving north.

Annual variations in the movements of the ITCZ are noted because the beginning and ending of each season change from year to year.

3.4 Method

3.4.1 Presentation of the Heliosat method

This subsection presents briefly the Heliosat method principles, then describes several improvements made, which led to the Heliosat II method (Rigollier et al., 2004). The work done by Albarello et al., (2015) to exploit the Heliosat II method with GOES data over French Guiana is reminded. For the sake of conciseness, we direct the reader to the cited article for further details.

The principle of the method Heliosat is the construction of a "cloud index" n resulting from a comparison of what is observed by the sensor to what should be observed over that pixel if the sky were clear, which is related to the "clearness" of the atmosphere.

$$n = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_c - \rho_g} \quad (3.2)$$

With :

- n : cloud index (unit less)
- ρ : apparent albedo, observed by the space sensor (unit less)
- ρ_c : cloud albedo (unit less)
- ρ_g : ground albedo (unit less)

The Heliosat I method core hypothesis (cano, 1985) is: The global horizontal irradiance (GHI) referred to as the SSI is a linear function of the cloud index n . Global horizontal irradiance (GHI), is expressed as a linear function of the cloud index n .

$$GHI = n \cdot G_b + (1-n) G_c \quad (3.3)$$

With:

- GHI : the global horizontal irradiance (Wh.m^{-2})
- n the cloud index (unit less)
- G_c : The clear sky model (Wh.m^{-2})
- G_b : The cloudy sky model (Wh.m^{-2})

The GHI is also related to the Top Of the Atmosphere (TOA) irradiance as follows

$$GHI = K_t \cdot G_{TOA} \quad (3.4)$$

K_t is the clearness index: the atmosphere transmission factor. Using equation (3.3) Cano found out that K_t is linearly dependent on the cloud index equation (3.5)

$$K_t = a \cdot n + b \quad (3.5)$$

These coefficients a and b have to be determined empirically with sets of satellite images and ground-based radiation measurements covering the same period (Beyer et al., 1996).

Beyer et al., (1996) changed the GHI formula suggested by Cano et al., (1986) (equation 3.3) as follows

$$GHI = K_c \cdot G_c \quad (3.6)$$

Where K_c is the clear sky index, it is the atmosphere transmission factor under clear sky, and G_c is the clear sky model. Beyer et al., (1996) introduced the clear sky model to better account for the irradiation dependence on the solar zenith angle, atmospheric aerosol and water vapour content.

Using the linear relationship (equation 3.4) between the atmosphere transmission factor K_t and the cloud index found by Cano et al.,(1986), Beyer et al., (1996) also suggested a linear relationship between the atmosphere transmission factor for clear sky K_c and the cloud index. Using sets of satellite images and ground-based radiation measurements covering the same period, Beyer et al., (1996) found that K_c is expressed as follows:

$$K_c = 1 - n \quad (3.7)$$

Later, Rigollier and Wald (1998) showed that for overcast skies ($n > 0.8$), a linear relationship is inappropriate and underestimates K_c , therefore a quadratic equation were suggested.

$$0.8 < n \leq 1.1 \quad K_c = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \quad (3.8)$$

In 2004 the Heliosat II was developed by Rigollier et al., (2004), taking into account previous works results (Cano et al., (1986), Beyer et al., (1996), Rigollier et al., (2002)) and setting the maximal and minimal value of the clear sky index respectively to 1.2 and 0.05 (Rigollier and Wald, 1998) , the GHI was computed as written in equation 3.6 and the clear sky index K_c is defined as:

$$\begin{aligned} n \leq -0.2 & \quad K_c = 1.2 \\ -0.2 < n \leq 0.8 & \quad K_c = 1 - n \\ 0.8 < n \leq 1.1 & \quad K_c = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ 1.1 < n & \quad K_c = 0.05 \end{aligned} \quad (3.9)$$

An optimized version of the Heliosat II was developed by Albarello et al., (2015) to take into account GOES images instead of METEOSAT images. The main change involves the modification of the calibration step allowed processing of data from GOES geostationary meteorological satellites. A sensitivity analysis was also conducted with

different values of cloud albedo (max value, original cloud albedo value, 95th percentile) and with different values of the cloud Linke turbidity factor (average annual and monthly average).

However the exploitation of the optimized method in case of overcast sky revealed significant errors on estimates of GHI. Since the studied area is subject to strong climatic instability linked to the regular presence of the ITCZ, the accuracy of estimates when the sky is cloudy is quickly degraded. This is the reason that led us to question the GHI calculation formula that is based only on a clear sky model.

3.4.2 Cloudy sky correction of the Heliosat II method

To take into account the significant presence of clouds in the atmosphere of the studied area, our idea is to introduce a time and space dependent cloudy sky model into the SSI estimates formula. For this, we use equation 3.3 proposed by Cano et al., (1986) in which the clear sky coefficient, 1-n, is replaced by K_c (equation 3.6). The SSI equation then becomes:

$$GHI = n \cdot Gb + Kc \cdot Gc \quad (3.10)$$

A bibliographic review highlighted the three following cloudy sky model from Gautier et al., (1980), Gautier and Landsfeld (1997) and Bisht and Bras (2010). The cloudy sky model was selected to respect the following constraints:

- The modification of the optimized Heliosat II should not increase significantly the computation time
- The modification over cloudy sky condition should not worsen the clear sky condition surface solar radiation estimates.

With respect to these constraints we have selected the Gautier and Landsfeld (1997) cloudy sky model written as follows:

$$G_b = G_c \cdot \frac{(1 - \rho_{eff} - \alpha_c)}{(1 - \rho_{eff} \cdot \rho_g)} \quad (3.11)$$

With :

- G_b : The cloudy sky model (Wh.m⁻²)
- G_c : The clear sky model (Wh.m⁻²)
- ρ_{eff} : the effective cloud albedo (unit less)
- α_c : the cloud absorption (unit less)
- ρ_g : the apparent ground albedo (unit less)

The effective cloud albedo is defined as described in Rigollier et al., (2004):

$$\rho_{eff} = 0.85 - 0.13 \left[1 - e^{-4 \cos(\theta_s)^5} \right] \quad (3.12)$$

Where θ_s is the solar zenith angle.

The cloud absorption as suggested by (Gautier and Landsfeld, 1997) is linearly dependent on the effective cloud albedo. The proportionality coefficient used can be determined empirically, Gautier suggested a 0.07 value.

$$\alpha_c = 0.07 \cdot \rho_c \quad (3.13)$$

This model considers plane parallel cloud (Gautier and Landsfeld, 1997), reflection and absorption by clouds which are assumed to occur in one layer (Gautier et al., 1980). The apparent ground albedo is the same as used by Rigollier et al., (2004) in Heliosat II model.

The apparent ground albedo is defined as the minimization of the following equation since it is assumed that the presence of a cloud increases the albedo (Rigollier et al., 2004).

$$\rho g(i,j)^t = \min[\rho(i,j)^t - \rho atm(\theta_s, \theta_v, \Psi)^t] / T(\theta_s)T(\theta_v) \quad (3.14)$$

Again $\rho(i,j)^t$ is the apparent albedo, observed by the space-borne sensor for the time t.

For further details the reader is encouraged to see Rigollier et al., (2004).

The optimized Heliosat II method we are using in this study is designed with 16-bit GOES instead images of 8 bit GOES images (Albarelo et al., 2015). The cloud index is computed with a cloud albedo from the Rigollier formula (Rigollier et al., 2004). The rationale behind this choice comes from preliminary tests (not shown in this article) that showed that the surface solar irradiance estimates with 16-bit GOES images and Rigollier cloud albedo give better results than the cloud albedo taken as the maximum apparent value in a monthly time series. Monthly Linke Turbidity factor used for each site is provided by the Soda online database.

3.5 Results and discussion

The results accuracy of the modified method is benchmarked against the results of the original method (Albarelo et al., 2015). The Satellite derived irradiance is compared to the ground measurements over three criteria: the bias (MBE), the root mean square (RMSE), and the Pearson correlation coefficient (R). These accuracy criteria are defined as follows:

$$BIAS = \frac{\sum_i (y_i - x_i)}{N} \quad (3.15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (3.16)$$

$$R = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})}} \quad (3.17)$$

In these equations y_i referred to the model estimate and x_i to the ground measurement value, \bar{x} and \bar{y} are respectively the model estimated and ground measured means. N is the total amount of data points. The RMSE and bias are expressed in Wh.m⁻². To get the RMSE and BIAS relative value, the RMSE and BIAS are respectively divided by the mean value of pyranometers measurements over the time span, and then the result is multiplied by 100. Clear and cloudy days have been split with respect to the clearness index value K_t .

$$K_t = \frac{GHI}{G_{TOA}} \quad (3.18)$$

The clearness index value is calculated with the hourly SSI measured by the ground stations. Only days where the K_t average value has a standard deviation fewer than 15% were kept. With respect to this constraint: K_t values are bounded by 0.7 and 0.1, cloudy sky days have clearness index almost equal to 0.7 while clear sky days have clearness index value inferior to 0.2 (Albarelo et al., 2015). The number of clear and cloudy skies for each stations are shown in table 10.

Table 10 : Number of clear and cloudy sky days for each station throughout the study period

Stations	2010		2011		2012		2013	
	Clear days	Cloudy days						
Rochambeau	22	9	29	18	18	20	29	26
Saint Georges	25	10	28	26	20	22	20	22
Maripasoula	17	4	17	13	16	9	27	16
Saint Laurent	25	5	27	20	18	14	24	20
Kourou	20	11	30	22	13	18	27	18
Iles Royale	21	9	22	19	19	15	27	18

3.5.1 SSI estimates with original method

SSI estimates under clear and cloudy skies are summarized in tables 11 and 12.

Table 11 : Hourly original method estimates under cloudy skies from years 2010 to 2013 merged by stations

Cloudy skies	Original method		
	MBE(%)	RMSE(%)	R
StGeorges	-61.09	84.16	0.62
Rochambeau	-64.77	86.13	0.62
Kourou	-61.79	81.29	0.66
Ile Royale	-62.09	83.75	0.64
StLaurent	-64.19	81.97	0.72
Maripasoula	-48.73	66.12	0.78

Table 12 : Hourly original method estimates under clear skies from years 2010 to 2013 merged by stations

Clear skies	Original method		
	MBE(%)	RMSE(%)	R
StGeorges	-14.93	21.54	0.94
Rochambeau	-18.50	24.34	0.94
Kourou	-15.95	19.71	0.96
Ile Royale	-17.56	22.49	0.96
StLaurent	-22.74	27.14	0.95
Maripasoula	-10.81	19.32	0.94

For clear and cloudy sky bias are negative: the original method underestimates the SSI. Under clear skies the MBE ranges from -23% to -10% over the study time span. Half of these values are between -10 and -16%. The RMSE ranges from 19% to 28%, more than half of these values are between 19% and 25%. Under cloudy skies, the MBE increase by more than three times, values range from -48% to -64%. The RMSE is also increased by almost 4 times in most cases, values range from 66 to 84%. The correlation coefficient a measure of the similarity between the irradiance estimated by the model and measured by the pyranometers is close to his maximal under clear sky. For each year and each station the correlation coefficient is superior to 0.93 under clear sky. Under cloudy sky there is a significant drop of the correlation coefficient: the higher correlation is now 0.78 and the lowest 0.62.

3.5.2 SSI estimates with modified method (under cloudy sky)

In this subsection the SSI estimates of the modified method are given. First the parameterized cloud absorption suggested by Gautier is used equation (3.13).

Table 13 : Hourly modified method estimates under cloudy skies from years 2010 to 2013 merged by stations, $\alpha_c = 0.07 * \rho_c$

Cloudy skies	Modified method, $\alpha_c = 0.07 * \rho_c$		
	MBE(%)	RMSE(%)	R
StGeorges	36.20	81.08	0.55
Rochambeau	24.60	73.96	0.53
Kourou	20.46	67.20	0.60
Ile Royale	22.48	68.72	0.62
StLaurent	7.23	55.90	0.68
Maripasoula	0.09	40.63	0.83

The results from computations, presented in Table 13, show a shift from negative to positive bias, this tendency is followed by an overall decrease of the correlation coefficient except for Saint Laurent and Maripasoula station. The MBE ranges from 0.09 to 37% and the RMSE from 40 to 82%.

Taken as a whole the correction introduced, decrease the RMSE percentage value, and the absolute MBE value.

3.5.3 SSI estimates with modified method (under cloudy sky)-cloud absorption dependency

As suggested by Gautier and Landsfeld (1997) the tendency of the satellite-derived SSI to underestimate or overestimate the ground measured surface solar irradiance may be linked to a misrepresentation of cloud absorption. According to Diak and Gautier (1983) the proportionality constant between cloud absorption range from 4 to 17%, these values are extracted from Welch et al., (1980) computations . Following this idea a proportionality constant equal to 0.165 was computed to describe the effect of Cumulonimbus clouds over French Guiana (Marie-joseph et al., 2013) . This value is chosen to minimize the bias between the Cumulonimbus absorption value extracted from Liou (1976) and the cloud absorption parameterization of Gautier and Landsfeld, (1997) for solar zenith angle between 0 and 75 °. Therefore the cloud absorption is written as follows.

$$\alpha_c = 0.165 \cdot \rho_{eff} \quad (3.19)$$

These new values of α_c is introduced in the cloudy sky model, and SSI estimates are generated with this new cloud absorption parameterization for the years 2010 through 2013.

Table 14 : Hourly modified method estimates under cloudy skies from years 2010 to 2013 merged by stations, $\alpha c = 0.165 * \rho c$

Cloudy skies	Modified method, $\alpha c = 0.165 * \rho c$		
	MBE(%)	RMSE(%)	R
StGeorges	-2.42	62.38	0.62
Rochambeau	-10.76	61.76	0.60
Kourou	-12.10	57.17	0.66
Ile Royale	-11.14	58.29	0.67
StLaurent	-21.09	53.69	0.74
Maripasoula	-19.70	43.46	0.84

The computation results with this new parameterization, presented in Table 14, are encouraging. There is an overall decrease of the MBE and RMSE, the correlation coefficient is improved for most of the station. The MBE ranges from -2% to -22% over the entire study period, before this modification they ranged from -48% to -64%. This improvement is also noticeable looking at the RMSE: before the modification they ranged from 66% to 84%, after the modification they ranged from 43% to 63%.

This new albedo parameterization shows that the SSI estimate accuracy as an area dependency. This dependency may be related to the different type of cloud present over the measurement site.

Comparisons between Table 13 and Table 14 shows that lowering the cloud absorption increase western station (Saint Georges, Rochambeau, Kourou, Ile Royale) estimates accuracy but worsen eastern station results (Saint Laurent Maripasoula). Our cloud absorption formula (equation 48) only account for Cumulonimbus therefore other clouds with lower absorption (Liou, 1976) may lower the model efficiency.

3.5.4 Original and modified model SSI estimates comparison (under clear sky)

One of the objectives set up before the modified method development was not to damage the clear sky condition surface solar radiation estimates. We succeeded in doing so, as computation results, presented in Table 15, show significant improvement on RMSE, MBE and correlation coefficient.

The original method bias ranged from from -23% to -10% while the modified method ranges now from -8% to -20%. The RMSE follows the same trend they initially ranged from 19% to 28%, now they ranged from a 16%, 24%. Overall there is a minor increase of 0.01 of the correlation coefficient.

Table 15 : Hourly modified Heliosat II method estimates under clear skies from years 2010 to 2013 merged by stations, $\alpha_c = 0.165 * pc$

Clear skies	Modified method, $\alpha_c = 0.165$.		
	MBE(%)	RMSE(%)	R
StG	-12.01	18.26	0.94
R	-14.87	20.10	0.95
KCSG	-14.00	17.06	0.97
IR	-15.78	19.99	0.97
StL	-19.78	23.77	0.96
M	-8.55	16.71	0.94

One noticeable fact is that the MBE under cloudy sky is as good, if not more accurate than in clear sky condition. This is explained by our choice of 16-bit GOES image data and cloud albedo given by the Rigollier formula (Rigollier et al., 2004) . As stated earlier this choice gives better estimates under cloudy sky but damages estimates under clear skies.

3.6 Conclusion

This study demonstrates that it is possible to increase the Albarello et al., (2015) method accuracy under cloudy sky condition over French Guiana using a simple cloudy sky model that includes cloud features.

This modification does not increase the computation time and allow cutting the RMSE by more than half in some station but in most cases the improvement are between 20 and 30%. The modification applied has more effect on bias: for the entire dataset the bias went from an average of -60% to an average of -16% after the modification. This modification is highly sensitive to cloud albedo parameterization. Experiments conducted showed that better results are obtained if the cloud albedo is tweaked for each station. Nevertheless we found out a good value that describes the global cloud regime in French Guiana. This modified method is general and can be used in other locations, provided the right cloud albedo parameterization that describes the location cloud regime and variability.

Chapitre 4 : Exploitabilité de l'irradiation solaire sur le Plateau des Guyanes

Spatiotemporal indicators of solar energy potential in the Guiana Shield using GOES images

Erwann Fillol^a, Tommy Albarello^a, Antoine Primerose^a, Lucien Wald^b and Laurent Linguet^{a*}

^a Université de Guyane, Laboratoire UMR 228 Espace-DEV, 275 Route de Montabo, BP 165, 97323 Cayenne Cedex, Guyane Française

^b MINES Paris Tech, PSL Research University, Centre Observation, Impacts, Energy, BP 204, 06905, Sophia Antipolis Cedex, France

*Corresponding author. E-mail: laurent.linguet@univ-guyane.fr

Article soumis à la revue *Renewable Energy*.

4.1 Abstract

The purpose of this article is to evaluate the potential for solar energy in the Guiana Shield and propose indicators to encourage the exploitation of solar energy systems in this area. For this, we use the Heliosat-2 optimized method to process images from the geostationary meteorological satellite GOES acquired in the period from April 2010 to July 2015. We calculated the average daily global horizontal irradiation (GHI) and direct normal irradiation (DNI) throughout the study period. The results obtained allowed us to establish four indicators: maps of production potential, the inter-day variability of DNI and GHI, maps of solar panel orientation related to maximum solar potential, and maps of areas where the solar resource is under the exploitable potential threshold. We also added an additional indicator, the suitability of areas for solar system installation depending on the ground slope. Our study shows that the average value of production potential for the entire Guiana Shield is approximately $1780 \text{ kWh.kWc}^{-1}.\text{year}^{-1}$ for GHI and $2040 \text{ kWh.kWc}^{-1}.\text{year}^{-1}$ for DNI. Comparisons with pyranometer measurements indicate an error relative bias of less than 2 % and a relative RMSE of less than 21 % for hourly estimates of GHI. Although the Guiana Shield region is covered by many clouds, few areas show insufficient solar potential for the exploitation of GHI and DNI, but the hilly nature of the area limits possible locations of very large power plants and instead favors more medium-sized plants. This is the first study that offers exploitability indicators for solar resources in the Guiana Shield. In conclusion, the established indicators provide a new perspective on the solar potential in the Guiana Shield and are expected to promote the development of new solar energy operating systems.

4.2 Introduction

Climate change is largely due to emissions of greenhouse gases created by human activity. Without a mitigation strategy, the average temperature on the Earth's surface could increase by between 3.7 °C and 4.8 °C before 2100 (IEA, 2014). The electricity generation sector is the primary sector in which carbon emissions can be quickly reduced. In particular, the renewable energy sector is promising because of its low environmental impact. Among the available forms of renewable energy, photovoltaic has the most global future potential. According to the International Energy Agency (IEA) (Masson, 2015) the worldwide installed capacity of photovoltaic power has been experiencing significant growth for several years and shows growth prospects of about 40 GW/year from 2015 to 2020. At the end of 2014, the worldwide installed capacity was approximately 177 GW, divided in the following manner: 51 % in Europe, 36 % in Asia, 12 % on the American continent (21 GW mainly installed in North America), and 1 % in Africa. One reason for the growth of photovoltaic is related to the falling cost of photovoltaic systems by 50 % between 2010 and 2014. This cost reduction offers new opportunities to provide electricity to millions more people around the world.

Indeed, photovoltaic is increasingly seen as an effective and economical way to supply electricity to isolated areas rather than extending electricity networks. Another advantage that may encourage the use of solar energy in developing countries is that it is relatively well distributed over a large part of the planet, and much more abundant near the equator. However, several regions in the world located near the equator have a poorly developed capacity for energy production based on solar power. This is the case in the Guiana Shield area in the north of South America. In 2015, according to IEA, the maximum net capacity of installed photovoltaic (PV) capacity in the countries of the Guiana Shield was 0 MW in Suriname, 2 MW in Guyana, and 3 MW in Venezuela. There are few or virtually no solar power plants in Amapá, North Brazil, while French Guiana has installed 39 MW (IRENA (2015a); IRENA (2015b); IRENA (2015c); IRENA (2015d)). Electrical networks are underdeveloped and electricity production of the Guiana Shield countries is mostly fossil dependant (diesel generators) or hydroelectric. The poor development of solar power generation projects is almost certainly related to a lack of knowledge regarding the solar energy potential in this region.

Development of solar power generation projects in the Guiana Shield can only be accomplished with increased knowledge of the solar potential and its variability in this region. This knowledge can be achieved through a network of terrestrial solar radiation measuring stations. Although in-situ data interpolation allows acquisition of solar radiation maps, the data interpolation is valid only up to an average distance of 50 km between stations for daily radiation totals and up to 34 km between stations for hourly radiation measurements (Perez et al., 1997). Beyond this distance, it is recommended that satellite imagery is used to obtain significant results.

Among the existing methods for estimating solar potential from satellite images, one is widely exploited by the scientific community: the Heliosat-2 method (Cano et al., (1986), Rigollier et al., (2004)). The Heliosat-2 method uses input data from the visible channel of the Meteosat satellite, coupled with a clear sky model to estimate solar radiation on the ground. The spatial coverage of data is identical to the spatial extent of the images of the Meteosat geostationary meteorological satellite (Europe, Africa, and Middle East). The solar radiation data is provided every 15 minutes with a spatial resolution of $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ (about 3 km x 3 km). This method was optimized by Albarello et al., (2015) to produce estimates of solar radiation in South America using images from the visible channel of the GOES satellite. To address the lack of mapping of solar potential and its features in the Guyana Shield area, we use the Heliosat-2 method optimized by Albarello et al., (2015). The effectiveness of this Heliosat-2 optimized method has been evaluated in one of the countries of the Guyana Shield (French Guiana) with conclusive results that allow its use on a larger scale.

This study aims to produce information currently lacking on the usability of solar radiation. There are several studies in the tropics on solar potential, predominantly regarding global radiation in the horizontal plane (Global Horizontal Irradiation - GHI) and occasionally regarding direct radiation normal to the incident surface (direct normal irradiance - DNI). These include the work of Janjai et al., (2011) and Janjai et al., (2013) on mapping of the solar potential in Southeast Asia, that of Gastli and Charabi (2010) on the Middle East, and of Pillot et al., (2015) in Djibouti. The solar potential of Brazil was also evaluated in the SWERA (Solar and Wind Energy Resources Assessment), which resulted in the design of the Brazilian Atlas of Solar Energy (Pereira et al., 2006). Estimates of GHI and DNI from this atlas were obtained using the Brasil-SR estimation method (Pereira et al., (2000); Martins and Pereira, (2006), Martins et al., (2007)). This is a physical model that combines weather and climate data with GOES satellite images in the visible and infrared channel.

Other solar potential studies have done more than simply map the solar potential. Some studies have integrated the analysis of constraints operability including Polo et al., (2015), who conducted a study of solar potential in Vietnam by analyzing the constraints related to a minimum level of potential in terms of GHI as DNI, in order to optimize the operation and productivity of PV plants (to exploit the GHI) and concentrator solar power, or CSP (to exploit the DNI). Another example is Mahtta et al., (2014), who also conducted a study of solar potential through DNI and GHI in India. They analyzed the constraints related to the minimum irradiation threshold ($4 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ for GHI-1, $5.47 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ for DNI), but also the constraints related to the type of land (only land classified as "wasteland" was used) and the slope (less than 2.1 %). Gherboudj and Ghedira (2016) carried out even more research on this issue. They estimated the potential of GHI and DNI in the United Arab Emirates, and they studied the constraints on the production capacity of solar systems, such as climatic factors that may impact system productivity (humidity, wind, aerosol particle size, temperature). Others constraints were also analyzed, such as topography, vegetation, and the presence of roads, which limit availability of production areas.

However, to our knowledge no study exists that deals with solar potential and constraints related to the use of solar energy in the Guiana Shield. This study seeks to fill this gap and aims to map the solar potential of the area and identify the most suitable areas for the operation of solar power systems. This knowledge is vital for overcoming the barrier to developing production projects based on solar energy. To carry out this study, we build indicator maps relating to the usability of solar energy production systems. Following this work, we identify the most suitable areas for the deployment of solar energy production systems. This study is part of a genuine effort to promote the development of solar energy exploitation in the Guiana Shield. The article is structured as follows: the study area and data is presented in Section 2. Section 3 describes the methodology used to convert a satellite image map of solar radiation. In Section 4, the results are presented and discussed. Finally, we present conclusions and our future research prospects.

4.3 Data

The Guiana Shield is a region of South America composed of Venezuela, Guyana, Suriname, French Guiana, and northern Brazil (states of Pará, Amapá, and Roraima) (Figure 1). The Guiana Shield is located between 3° S and 10° N and 63° W and 48° W and is a low population density area covering 2.3 million km² (Gond et al., 2011). It is covered entirely by the Amazon rainforest. This area is located near the equator and is subjected to high cloud cover as part of a regular and important cycle of evaporation and precipitation due to the Intertropical Convergence Zone (ICTZ) or monsoon trough. The ICTZ passes twice over the Guiana Shield, causing heavy rainfall and defining two main seasons: the dry season from July to October, when the ICTZ is located north of the Guiana Shield and the sky is mostly clear, and the rainy season from November to June.

4.3.1 Satellite data

The satellite data used in this study comes from the meteorological geostationary satellite GOES-13, orbiting at 74.5° W. Images are from the visible channel (0.55 µm – 0.75 µm) and are taken every 30 minutes, with a spatial resolution of 1 km in latitude and 0.6 km in longitude, with a ground spot of approximately 1 km in diameter. The selected images are from April 27th 2010 to July 15th 2015 (5 and a half years) and were provided by the Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) catalogue. We divided the day into hourly slots, as suggested by Rigollier et al., (2000). The period of the day for this study lasts from slot 18 (8h45 GMT) to slot 46 (22h45 GMT). Satellite data related to ground elevation were also used in this study. The elevation map is obtained from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model downloaded at a resolution of 90 m (Jarvis et al., 2008). Figure 13 shows the ground elevation map of the study zone.

4.3.2 In situ data

Very few stations measuring solar irradiation have been established in the Guiana Shield and they have very sparse coverage. Measurements of global irradiation used in this study are from six ground stations located in French Guiana and managed by the French national meteorological agency (Météo France). The list of the stations and their latitude, longitude, and altitude are given in Table 16.

Table 16: Latitude, longitude, and altitude of ground meteorological stations in French Guiana

Station	Latitude [°N]	Longitude [°E]	Altitude [m]
Saint Georges	3.89	-51.80	6
Rochambeau	4.82	-52.37	4
Kourou	5.21	-52.75	12
Ile Royale	5.28	-52.58	48
Saint Laurent	5.49	-54.03	4
Maripasoula	3.64	-54.03	104

There are not, to our knowledge, global solar irradiation ground stations in Guyana and Suriname. In Venezuela, although there are global irradiation ground stations (Almorox et al., 2008), we did not have access to these data. Ground stations in French Guiana are equipped with Kipp and Zonen pyranometers of type CM6B and CMP11, considered as having an accuracy of up to 3 % by the WMO, (2008). Preventive maintenance of these pyranometers is carried out every two months and they are calibrated in the Radiometry National Center of Meteo France located in Carpentras, France. Standard exchange of the pyranometers is systematically carried out every two years. All of the in situ stations are located in flat or low relief areas and are not subject to shadow effects. As only global irradiation was available from the in-situ measurements, we performed a quality check process based on extreme values, following the method proposed by Geiger et al., (2002) and the SoDa website (SoDa - Solar radiation Database). Hourly global irradiation (G_h , in Wh.m^{-2}) was considered valid when it respected the following condition:

$$0.03.G_{hTOA} < G_h < \min((1.2.I_0), ((1.5.I_0.\cos(\theta_s).1.2) + 100)) \quad (4.1)$$

where G_{hTOA} is the top of atmosphere hourly irradiance, θ_s is the sun zenith angle, and I_0 is the solar constant (1367 W.m^{-2}).

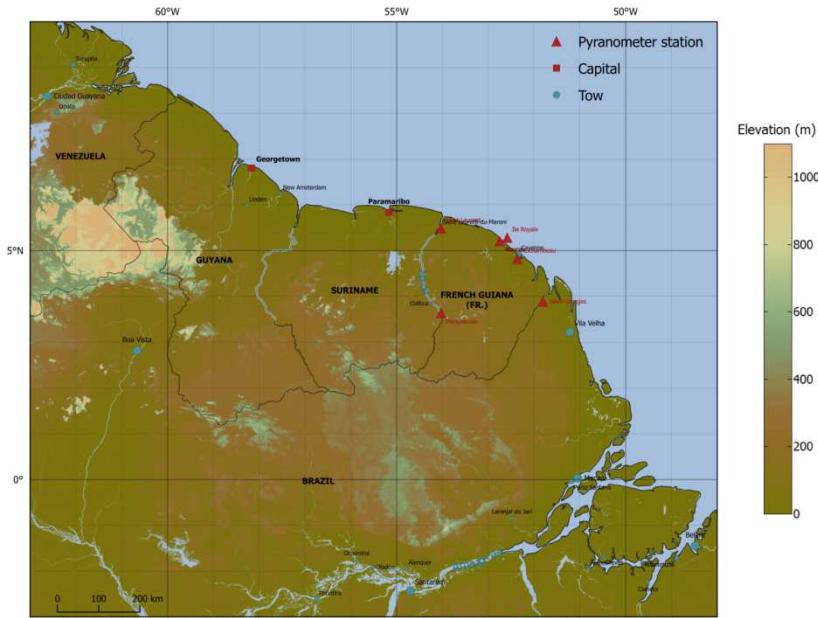


Figure 13 : Elevation map (from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM))

4.4 Methods

4.4.1 Optimized Heliosat-2 method

The Heliosat-2 method (Cano et al., (1986), Diabaté et al., (1988)) was developed in MINES Paris Tech. The principle of the method is that variation in the cloud cover above a pixel from a satellite image leads to a variation in the albedo of that pixel. This variable albedo influences the solar irradiance of the pixel. The method makes it possible to convert the reflectance of a pixel in an image from the meteorological satellite METEOSAT into values of solar irradiation. In order to determine the potential related to solar irradiation in the Guiana Shield, we used the optimized Heliosat-2 method, developed by Albarello et al., (2015), but with some changes. The optimized Heliosat-2 method can be run with images from the meteorological satellite GOES (for more details see Albarello et al., (2015)). The GOES satellite images were downloaded in the AREA format encoded in 16 bits and then transformed into digital counts CN_{10} encoded in 10 bits. This operation was performed by moving 3 bits to the right. Once converted from 16 bits to 10 bits, the data was calibrated into radiance values.

The modified method uses the following calibration formula provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Nguyen et al., 2004), because it offers the advantage of correcting the sensor drift on a daily basis:

$$L = (g_2.d^2 + g_1.d + g_0) * (CN_{10} - CN_0) \quad (4.2)$$

where L is the radiance ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), $g0$ is the initial gain, $g1$ and $g2$ are the first and second order polynomial terms of the gain trend, respectively, d is the number

of days since the launch, $CN10$ is the 10-bit digital count, and $CN0$ is an offset (equal to 29 for the GOES imager). Radiance was then converted into reflectance by:

$$\rho_{sat} = \frac{L_\lambda}{E_{0_sat} \cdot \varepsilon \cdot \cos(\theta_s)} \quad (4.3)$$

where ρ_{sat} is the satellite-derived reflectance or apparent reflectance, L_λ is the satellite-derived radiance ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), E_{0_sat} is the solar constant in the visible channel for the studied sensors ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), ε is the Earth-Sun distance correction factor, and θ_s is the sun zenith angle (radians). The satellite reflectance was then converted into apparent reflectance by accounting for the atmospheric effects:

$$\rho = \frac{\rho_{sat} - \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi)}{T(\theta_s)T(\theta_v)} \quad (4.4)$$

where ρ is the apparent reflectance or apparent albedo, ρ_{sat} is the satellite-derived reflectance, ρ_{atm} is the apparent reflectance of the atmosphere, $T(\theta_s)$ is the downward transmittance, $T(\theta_v)$ is the upward transmittance, θ_s is the sun zenith angle (radians), θ_v is the satellite viewing angle (radians), and ψ is the difference between the sun and satellite azimuthal angles. From the apparent albedo, a cloud index (n) was calculated to determine the cloud cover over a pixel:

$$n = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_c - \rho_g} \quad (4.5)$$

where ρ_g and ρ_c are the ground albedo and the cloud albedo, respectively. The ground albedo (ρ_g) was selected, for each pixel, as the second minimum detected on a sliding time window of 61 days by considering all of the slots where the solar elevation angle is higher than 40° . The size of the time window was significant but it is explained by a weak annual evolution of the ground albedo because of the weak phenology of the vegetation and the absence of snowfall.

Regarding the calculation of the cloud albedo, unlike Albarello et al., (2015) we did not retain the maximum value of pixel reflectance for the whole zone. Instead, because of the size of the study site (ten times bigger than French Guiana, therefore the slot when the sun is directly overhead is not the same everywhere) and calculation time, we kept the original formula suggested by Rigollier et al., (2004) (equation 4.6):

$$\rho_c = \frac{\rho_{eff} - \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi)}{T(\theta_s)T(\theta_v)} \quad (4.6)$$

$$\rho_{eff} = 0.85 - 0.13 \left[1 - e^{-4(\cos(\theta_s))^5} \right] \quad (4.7)$$

where ρ_{eff} is the effective cloud albedo. This formula was applied to every pixel and at every slot. From the cloud index, we calculated the clear sky index (Rigollier and Wald, (1998) , Hammer et al., (2003)):

$$\begin{aligned}
 n \leq -0.2 & \quad Kc = 1.2 \\
 -0.2 < n \leq 0.8 & \quad Kc = 1 - n \\
 0.8 < n \leq 1.1 & \quad Kc = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\
 1.1 < n & \quad Kc = 0.05
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Assessment of the global horizontal irradiation on the ground was obtained by combining the clear-sky index (Kc) (Beyer et al., 1996) and the clear-sky irradiation (G_{ch}) using the following equation (4.9):

$$GHI = Kc * G_{ch} \tag{4.9}$$

The clear-sky irradiation (Wh.m^{-2}) is the irradiation on the ground in the case of a cloudless sky, only attenuated by aerosols and gases. We derived it using the ESRA model (Rigollier et al., 2000) in which attenuations by aerosols and gases (scattering by aerosols, absorption by gases) are modeled using the Linke turbidity factor (T_L). Climatological values of T_L , calculated over 20 years (1983 – 2003), were obtained via the SoDa website as a monthly set of values. The methodology used to obtain these values has been published by Remund et al., (2003) . Monthly values were temporally and linearly interpolated in order to obtain daily values. For the selected window concerning the Guiana Shield, the Linke turbidity factor is equal to 4.1 on average, corresponding to a hot and moist air, and varies between 2.9 in the dry season and 6.1 in the wet season. We did not adopt a fixed Linke turbidity factor, as was the case in Albarello et al., (2015), because of the extent of the study zone and the variability of T_L across different zones. To obtain the direct normal irradiation, we used the following formulas:

$$G_{ch} = D_{ch} + B_{ch} \tag{4.10}$$

where D_{ch} is the diffuse clear sky irradiation (Wh.m^{-2}) and B_{ch} is the direct clear sky irradiation (Wh.m^{-2}). Then, the following equation was used:

$$BHI = Kc * B_{ch} \tag{4.11}$$

$$DNI = BHI / \cos(\theta_z) \tag{4.12}$$

where BHI is the direct hourly irradiation (Wh.m^{-2}) and DNI is the direct irradiation normal to a surface (Wh.m^{-2}).

4.5 Results and discussion

4.5.1 Validation

We assess the estimates of the method by comparing the estimated GHI and the measured GHI for the whole study period and for the defined spatial extent. Validation of the estimates derived from the optimized Heliosat-2 method is performed by comparing in situ global irradiation measurements from six ground stations located in French Guiana (Figure 13). The statistical errors calculated on these six stations agree with the results obtained from the Heliosat-2 method for other geographical zones (Lefevre et al., (2007) ; Aculinin, (2008) ; Wahab et al., (2010) ; Al-Jumaily et al., (2010) ; Zhang et al., (2011)). The correlation coefficient (CC) varies between 0.91 and 0.95, and the bias is between -1 % and +1 % (Table 17). We note, however, a small overestimation for low irradiation values as seen by a high density of dots above the ideal regression line (dotted line in Figure 14). Nevertheless, the effect of this overestimation is limited because of its small contribution to the daily irradiation.

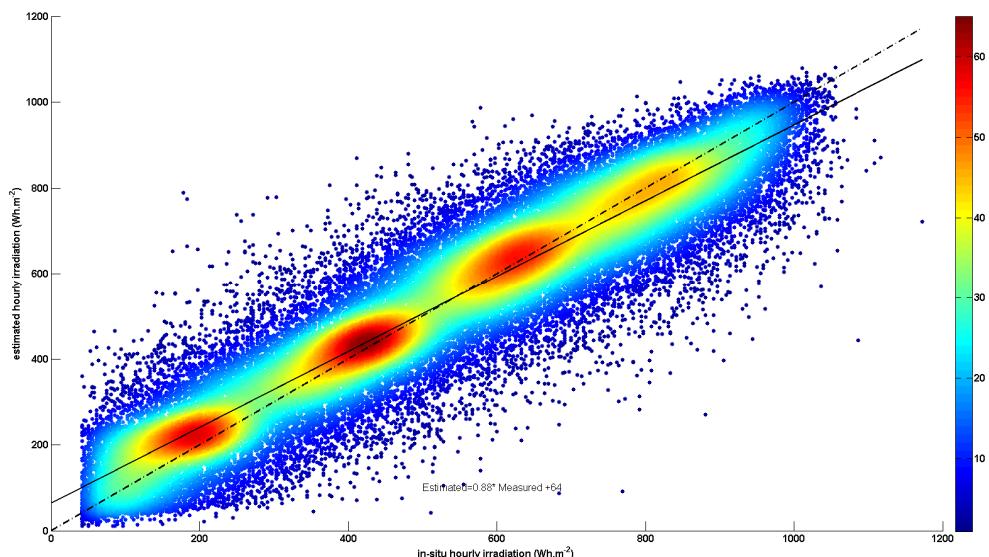


Figure 14 : Comparison between estimated GHI and measured GHI in the 2010-2015 period for the 6 stations in French Guiana. The full line is the regression line, and the dotted line is the 1x1 line.

Table 17: Statistical errors between estimated GHI and measured GHI in the 2010-2015 period

Station	Number of records	α	Bias [Wh.m ⁻²]	CC	RMSE (%) [Wh.m ⁻²]	Bias (%) [Wh.m ⁻²]
Saint Georges	12373	0.89	55	0.91	99 (21%)	2.58 (1%)
Rochambeau	11627	0.87	56	0.91	102 (21%)	-7.18 (-1%)
Kourou	12731	0.9	51	0.94	93 (18%)	-0.27 (0%)
Ile Royale	11894	0.89	57	0.95	85 (16%)	-4.36 (-1%)
Saint Laurent	12194	0.9	50	0.92	96 (20%)	0.11 (0%)
Maripasoula	11468	0.86	65	0.92	96 (19%)	-7.63 (-1%)
All Stations	72287	0.88	55	0.93	95 (19%)	-2.67 (-1%)

4.5.2 Global and direct irradiation potential

Figure 15 is a map of the daily average GHI from 2010 to 2015. For the whole study area, GHI daily average values vary from 4.46 to 5.48 kWh.m⁻².day⁻¹. Zones showing the best global solar potential are mostly coastal zones up to a distance of 5 to 10 km from the coastline. Here, we find an irradiation potential 8 to 12 % higher than the mean value of global irradiation. This can be explained by the specific wind system and the sea breeze phenomenon that diminishes diurnal clouds in coastal zones (Météo-France, 2011). This phenomenon is also observed at the mouths of rivers. Zones located west of stretches of water also show 10 % higher GHI. Four zones can be distinguished with a potential greater than 5 kWh.m⁻².day⁻¹: east Venezuela, the Venezuela/Guyana/Brazil border, the central strip of Suriname, and north Brazil.

For most of the study zone, results show that the range of GHI values on the Guiana Shield (between 4.2 and 5.6 kWh.m⁻².day⁻¹) agree with the range of GHI values in tropical regions published in other studies. This solar energy potential is nearly three times higher than in countries of the European Union (Pereira et al., 2006), where initiatives towards solar energy are more widespread (Fontoynon et al., (1997); Gschwind et al., (2006) ;Blanc et al., (2011)). However, if we compare the average solar potential in the Guiana Shield (4.91 kWh.m⁻².day⁻¹) to that of other studies conducted in tropical zones, for example, we notice that it is slightly lower. Indeed, the average GHI of the whole Guiana Shield is lower than in Myanmar and in Cambodia, where it is approximately 5.1 kWh.m⁻².day⁻¹ (Janjai et al., (2011); Janjai et al., (2013)), as well as in

Djibouti ($5.92 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$) (Pillot et al., 2015) . This is almost certainly because of the regular presence of cloud masses in the Guiana Shield due to the ITCZ.

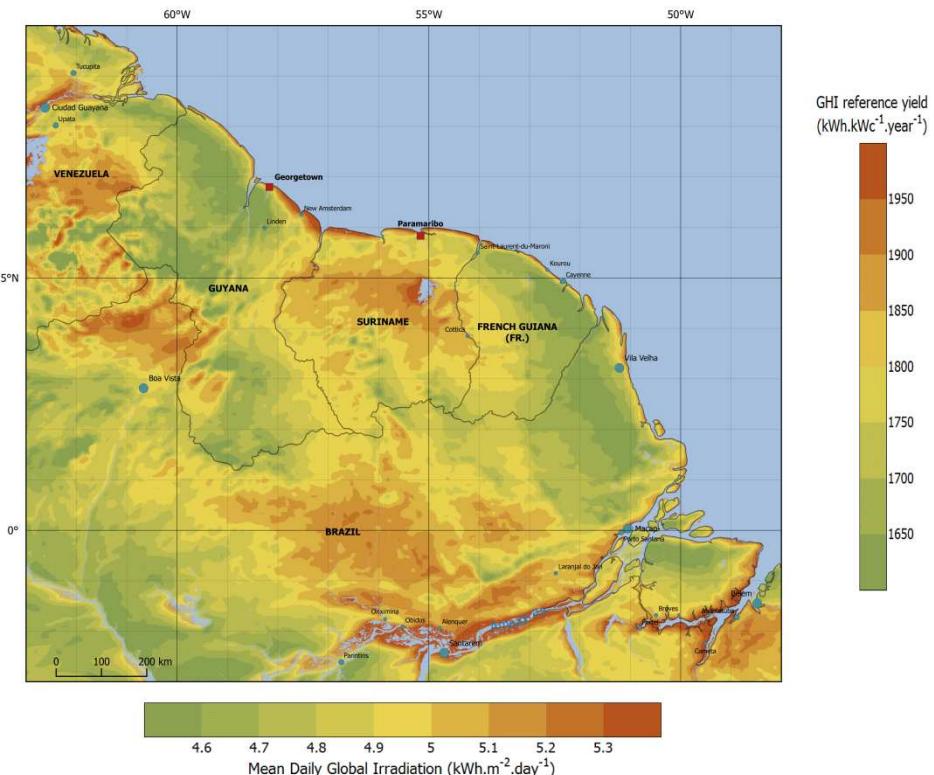


Figure 15 : Map of the annually averaged daily global irradiation (GHI) and the annual reference yield for photovoltaic energy production

On the other hand, the average GHI value agrees with that from (Pereira et al., 2006), in the framework of the SWERA (*Solar and Wind Energy Resources Assessment*) project that resulted in the creation of the Brazilian Solar Energy Atlas. The GHI reported in the Atlas is equal to 5.5 kWh.m^{-2} with a bias of 7 % (353.48 Wh.m^{-2}) and a RMSE of 15 % (640.29 Wh.m^{-2}). This average potential corresponds to the GHI values in Figure 15. Figure 15 also shows the spatial distribution of the annual average potential production of photovoltaic energy. The second scale of the map (annual reference yield) indicates the theoretical number of hours in the year that a photovoltaic system would run at maximum efficiency. The higher this indicator is, the higher the production of photovoltaic energy. This indicator is especially useful because it allows refining of the size of photovoltaic facilities as a function of the location and the amount of energy required. In terms of GHI, production potential is highest in the north of Brazil, Suriname, and Venezuela. On average, the production potential of photovoltaic energy of the Guiana Shield is about $1780 \text{ kWh/kWc.year}^{-1}$.

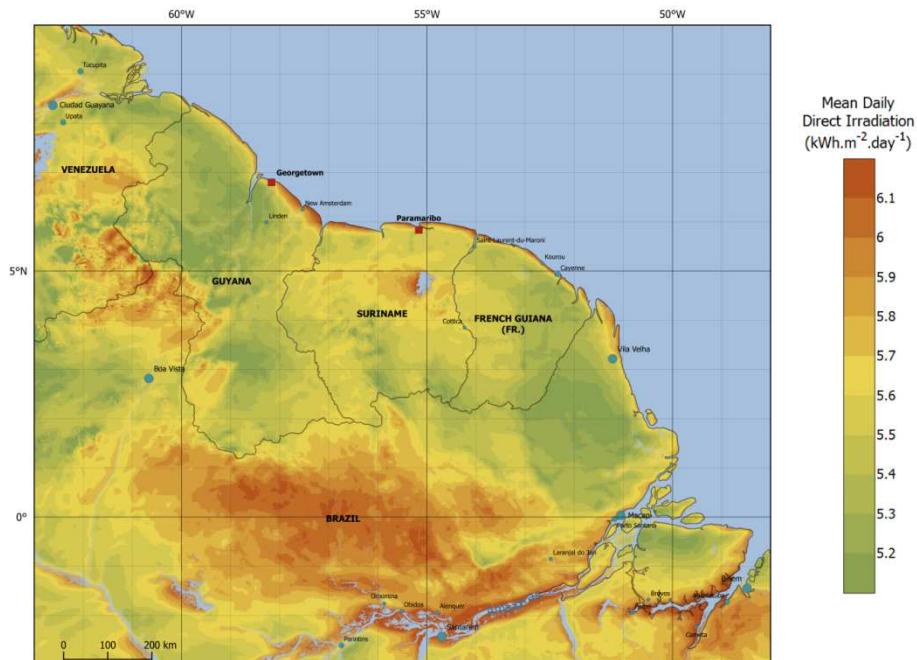


Figure 16 : Map of the annually averaged daily direct normal irradiation (DNI)

Figure 16 shows the distribution of the annually averaged daily DNI on the Guiana Shield. The direct irradiation values are between 5.11 and $6.24\text{ kWh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$. Three zones can be distinguished with a potential greater than $5.8\text{ kWh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$: the Venezuela/Guyana/Brazil border region, the surroundings of the Brokopondo reservoir in Suriname, and northern Brazil. The daily mean value of DNI reaches $5.64\text{ kWh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$, which corresponds to the average DNI from the Brazilian Atlas, which reaches 5.4 kWh.m^{-2} . Comparison of our estimates of GHI and DNI solar potential and the ones obtained in the framework of the SWERA project (solar Atlas of Brazil) shows that our results for the Brazilian part of the Guiana Shield agree with those obtained by other authors.

4.5.3 Spatiotemporal indicators

This section proposes the development of innovative maps for describing land relative suitability indices for the implementation of solar energy systems (PV and CSP) over the Guiana Shield. This implementation requires knowledge of: a) areas with specific characteristics of land slope and land use, although, since remote inhabited locations are common on the Guiana Shield, land accessibility (distance from the roads and electricity transmission grid) has not been considered as a constraint; and b) solar irradiance characteristics, since weather conditions of the Guiana Shield have high spatiotemporal variability (due to the ICTZ) characterized by extreme rainfall during the wet season and partly cloudy skies during the dry season. Consideration of these two conditions is challenging but necessary for understanding their effect on solar irradiance, as well as solar energy systems.

4.5.3.1 Slope indicator

Several research studies have demonstrated that a significant slope is a limiting factor for the implementation of both PV and CSP plants (Robbins, 2013). Figure 17 shows a map of suitable areas with a slope less than 4 % (or approximately 7°). The threshold value of the slope is based on the work of Gherboudj and Ghedira, (2016). It is noted that land within the center of the Guiana Shield is not favorable for installation of photovoltaic plants over very large areas (several km²), because of the hilly nature of the area. Areas with lower relief, allowing the installation of photovoltaic plants over large areas, are located on the coast, in the border region between Venezuela, Guyana, the southwest part of the Guiana Shield, and in the mouth of the Amazon.

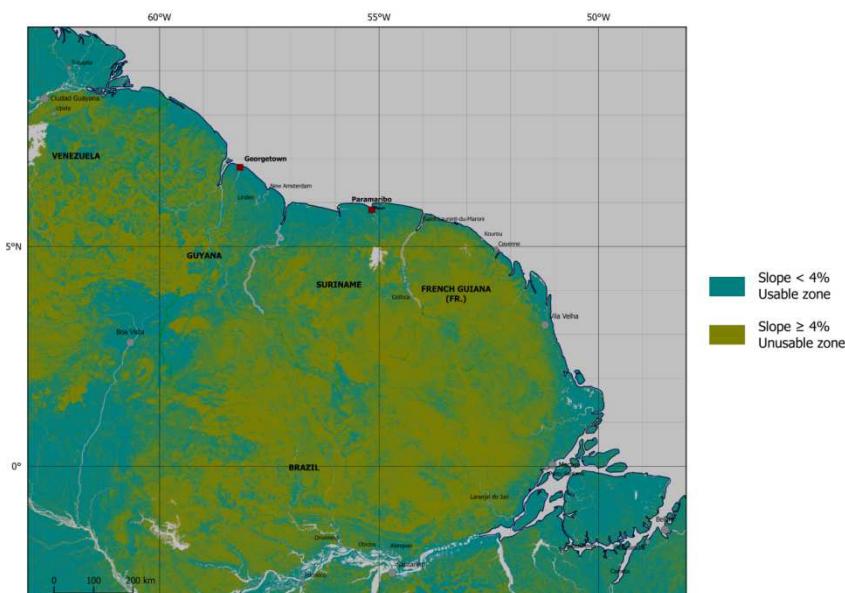


Figure 17 : Map of suitable areas according to slope

4.5.3.2 Operability Indicator

Figures 18 and 19 show the operability indicator maps. This spatial indicator represents areas where resource exploitation is sustainable, because the average annual energy potential is above a minimum threshold. This minimum level of exploitability is set to 1600 kWh.m⁻².year⁻¹ for GHI (Gherboudj and Ghedira, 2016) and 2000 kWh.m⁻².year⁻¹ for DNI (IEA, 2010). Very few areas are affected by this exclusion with regards to GHI. The areas excluded due to the DNI threshold are more important, especially in the northeast, Amapá, and across the mountainous areas on the border between Guyana and Venezuela.

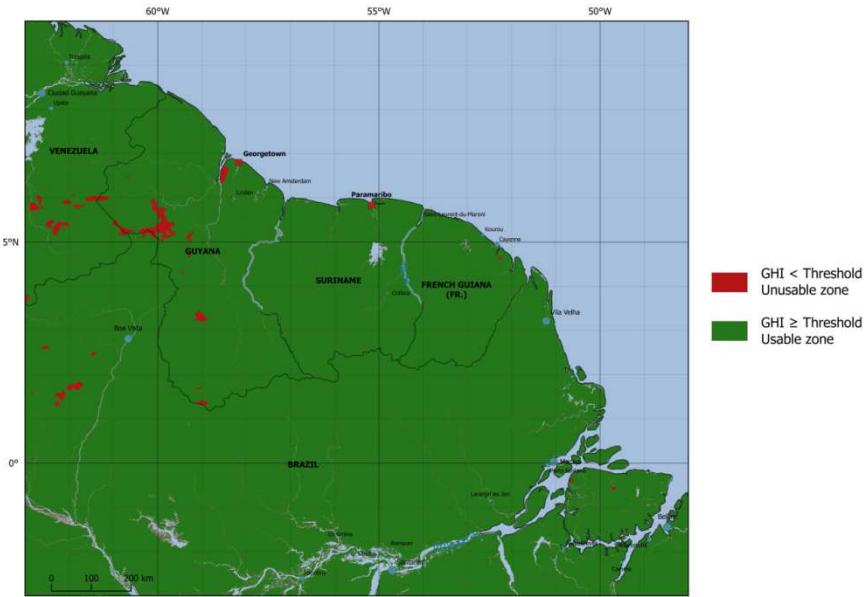


Figure 18 : Map of sustainable areas for GHI exploitation

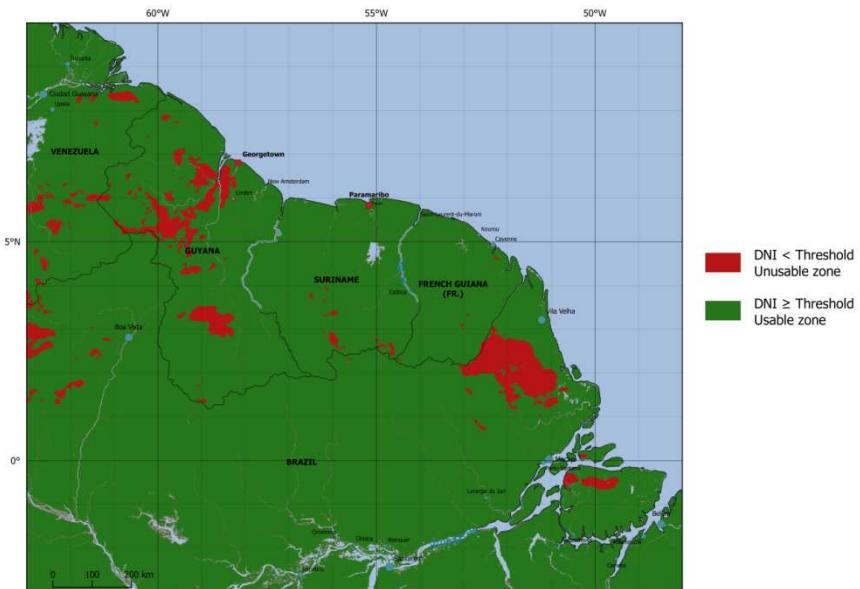


Figure 19 : Map of sustainable areas for DNI exploitation

4.5.3.3 Variability indicator

Figure 20 is a map of the inter-day GHI variability calculated for the period of 2010-2015. The inter-day variability was calculated as the standard deviation of daily radiation averaged over the year. Average GHI variability is 0.80 kWh.m^{-2} with a range from 0.54 to 1.20 kWh.m^{-2} . Figure 21 shows the map of the average inter-day DNI variability, also calculated on an annual basis from 2010-2015. The values range between 0.58 and 1.58 kWh.m^{-2} with an average of 1.00 kWh.m^{-2} . Overall, the Guiana Shield GHI has a variability of less than 0.8 kWh.m^{-2} except in three zones: northwest

Guyana, a region including northeast Suriname, French Guiana and northeast Brazil, and part of the northern region of Brazil.

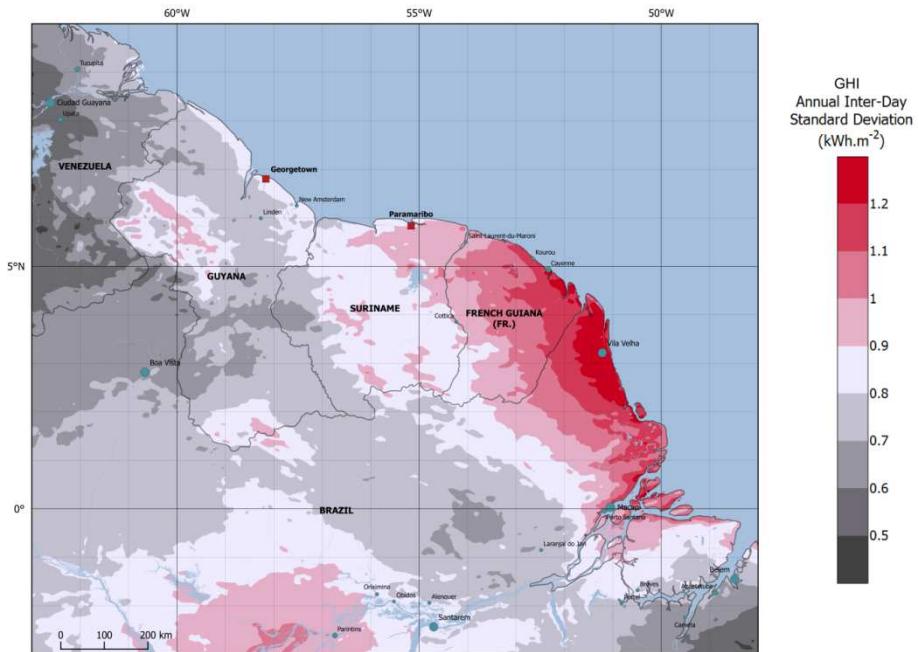


Figure 20 : Map of the annual inter-day standard deviation of GHI

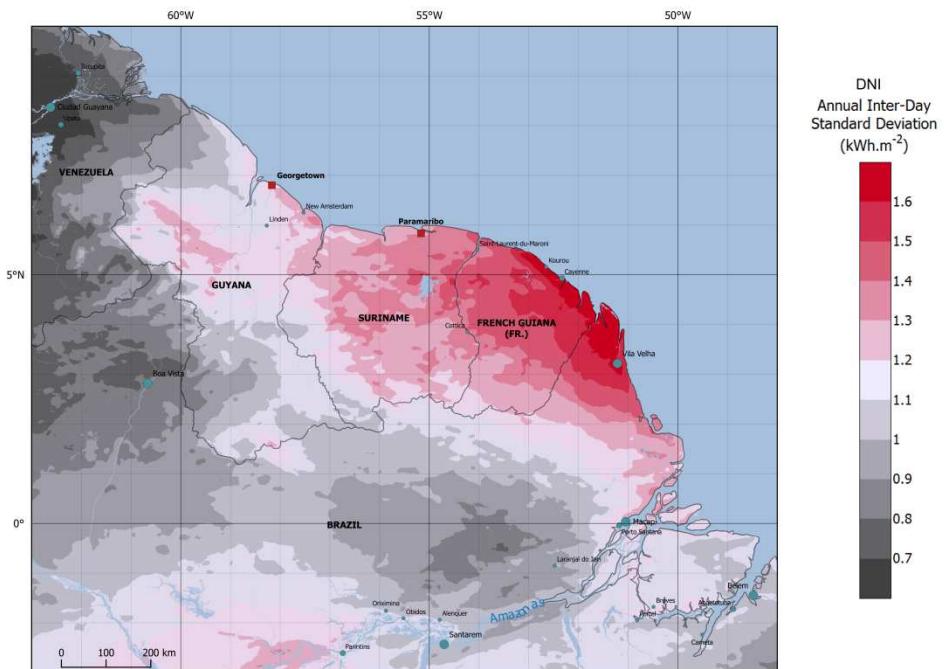


Figure 21 : Map of the annual inter-day standard deviation of DNI

In the context of photovoltaic power generation, knowledge of the standard deviation of the solar potential provides information on the variability of photovoltaic electricity. Variability characterizes the intermittency of the solar resource. In order to stabilize the production of solar energy, photovoltaic plants built in areas with a high

standard deviation of the solar potential will have higher energy storage requirements, and electricity production to the grid will be very unstable. Therefore, knowledge of the inter-daily standard deviation allows us to evaluate the need to integrate predictive photovoltaic systems that are connected to the network.

Indeed, when solar electricity production is anticipated, this reduces the electrical hazard for the network. The higher the standard deviation, the more prediction systems will be needed to reduce this hazard. Knowledge of inter-day standard deviation is also a support factor in the decision to install photovoltaic power plants in a given area, because the implementation strategy will differ depending on the standard deviation of solar potential. Several studies show that, in areas where the solar potential variability is high, it is best to deploy multiple small power plants instead of one large power plant (e.g., 9 plants of 1.1 MW instead of a 10 MW plant) (ARENA, 2015) because the "profusion effect" allows the grid to more effectively absorb solar electricity variations.

4.5.3.4 Optimal orientation indicator

Figure 11 shows a map of the orientation indicator, which allows for decisions regarding solar panel orientation in order to make optimal use of the solar resource. The orientation indicator was obtained by calculating the ratio between the energy received before and after solar noon (AM/PM ratio) for each pixel. This indicator represents the maximum direction of solar potential depending on the time of the day (before solar noon or after solar noon). In areas shown in green, the AM/PM ratio is greater than 1, which corresponds to a surplus of energy receipt before solar noon, thus optimal solar resource exploitation will prioritize an eastern orientation of solar collectors (in the case of fixed orientation solar systems).

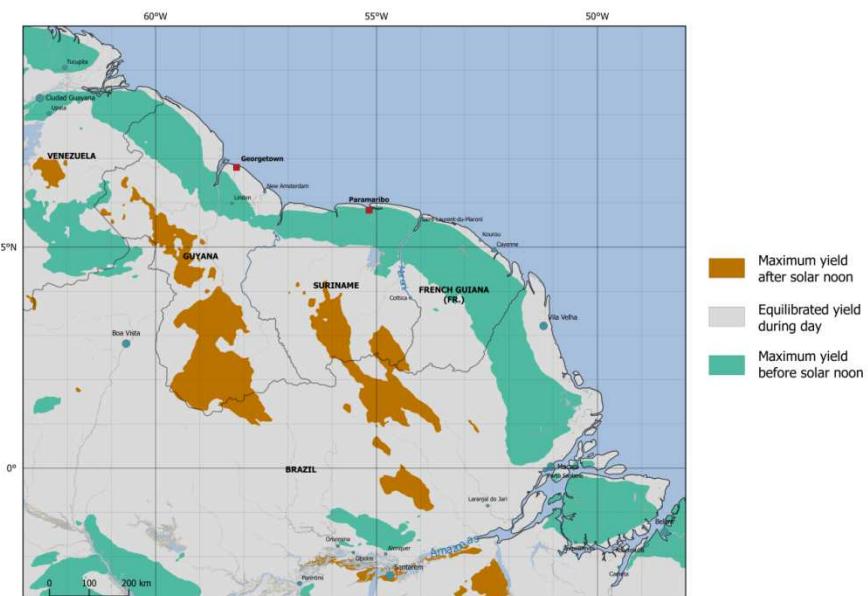


Figure 22 : Map of orientation indicator

In the areas shown in brown, the AM/PM ratio is less than 0.8, which corresponds to an energy surplus received after solar noon, therefore optimal use of the solar resource will favor an orientation towards the west. Of course, this orientation indicator only summarizes information on the most accurate optimum angle and adjusting the orientation of the solar collectors should be considered to maximize the performance of any proposed solar power plant.

4.6 Conclusions

In this article, we estimated the solar potential in the Guiana Shield and the operability of the solar resource. We used the Heliosat-2 method, optimized by Albarello et al., (2015), to exploit images of the geostationary meteorological satellite GOES. We estimated the global horizontal irradiation (GHI) and direct normal irradiation (DNI) for the entire area using the visible channel images from the GOES-13 satellite from April 2010 to July 2015, on an hourly basis and with a spatial resolution of 1 km x 1 km. The resulting time series allowed us to map the daily average global and direct solar radiation. In addition, we created indicator maps to identify:

- the annual average solar potential (GHI and DNI);
- operational areas that can be employed for solar systems, which correspond to areas with a slope less than 4 % (approximately 7°). Consideration of the impacts of the land capability map decreased the suitable areas for solar power plants to 60 %;
- areas where exploitation of the solar resource is not viable due to insufficient energy potential, i.e. energy potential below a minimum threshold ($1600 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{year}^{-1}$ for GHI and $2000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{year}^{-1}$ for DNI);
- inter-day variability of DNI and GHI over 5 years;
- the optimum orientation of the solar panels in order to effectively exploit the solar resource.

This is the first study to produce spatiotemporal indicator maps on the exploitability of the solar resource. They bring new knowledge regarding the solar potential in the Guiana Shield and can help promote the exploitation of solar energy systems such as photovoltaic plants, solar water heaters (GHI), or solar concentrators (DNI). By making such knowledge available, the authors wish to contribute to the development of renewable energy and help mitigate climate change. Future work is planned in order to map the solar potential on the entire South American continent by validating radiation estimates from Baseline Surface Radiation Network (BSRN) stations present in the region.

Chapitre 5 : Discussion générale

5.1 Estimation de l'irradiation solaire à haute résolution spatiale et temporelle sur le Plateau des Guyanes

Dans la première partie de la thèse, nous avons cherché à combler l'absence de données d'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle sur le Plateau des Guyanes. Bien qu'il soit possible d'obtenir des estimations d'irradiation à haute résolution temporelle à partir de la base de données Helioclim, qui exploite les données image du satellite météorologique géostationnaire Météosat, lorsque l'on s'éloigne du champ de visée de Météosat la résolution spatiale du pixel se dégrade. Cette dégradation ne permet pas d'obtenir des estimations d'irradiation solaire avec une précision spatiale correspondant à nos besoins (1km x 1km) sur le Plateau des Guyanes. De plus, l'augmentation de l'angle de visée entraîne un effet de parallaxe. Cet effet de parallaxe a été souligné par Marie-joseph et al., (2013) lors de leur étude à égard de la Guyane Française. Nous nous sommes alors proposés d'exploiter les images issues du satellite météorologique géostationnaire GOES-Est, qui présente un angle de visée réduit.

Les estimations obtenues avec les données image du satellite GOES-Est ont présenté des écarts inférieurs aux résultats présentés par Marie-joseph et al., (2013). Les écarts obtenus sont aussi inférieurs à ceux obtenus en exploitant les données HelioClim-3 V4. L'effet de parallaxe a donc une incidence sur la qualité des résultats.

En zone tropicale, la densité des stations est faible (par exemple, Janjai et al., (2005) ; Janjai et al., (2013)). Sur le Plateau des Guyanes, les seules mesures que nous avions en notre possession ne sont pas représentatives des zones climatiques : la majorité de ces stations se situe sur le littoral. La seule station en intérieur est celle de Maripasoula, en Guyane Française. Nos résultats ne sont donc représentatifs que d'une seule zone climatique (climat Tropical Marin Humide (Bovolo et al., 2012)). Or, le Plateau des Guyanes est constitué de deux autres zones climatiques : le climat de Savane et le climat de Forêt Tropicale (Peel et al., 2007) . Il serait intéressant de disposer de mesures dans ces trois types de climat afin de caractériser la variabilité du rayonnement.

À la suite de la validation de la version optimisée de la méthode Heliosat-2 sur les six stations de mesure de rayonnement solaire de la Guyane Française (cf chapitre 2), nous avons étendu l'estimation du rayonnement solaire à l'échelle du Plateau des Guyanes et produit des cartes. Les cartes que nous avons générées sont disponibles à une résolution spatiale (pixel de 1 km) supérieure à la plupart des autres cartographies (en général, un pixel de 3 km voire 5 km), mais la profondeur temporelle de nos cartes est plus faible (5 ans) que celle des autres études (10 ans en moyenne). Il aurait été intéressant d'étudier l'effet des conditions atmosphériques (taux d'humidité, présence d'aérosols dans l'atmosphère transportés depuis l'Afrique vers le Plateau des Guyanes phénomène appelé « brume de sable »), sur la précision des méthodes étudiées, ou sur la

variabilité des estimations de l'irradiation (Gherboudj and Ghedira, 2016). En effet, diverses stations d'observation de la qualité de l'air existent sur le territoire (stations de l'ORA en Guyane Française). À notre connaissance, notre étude est la première à rendre compte du potentiel solaire et des contraintes associées à l'utilisation de l'énergie solaire sur le Plateau des Guyanes, elle s'inscrit dans la liste des travaux dont l'objectif est de mieux appréhender le potentiel solaire dans les pays à climat tropical (par exemple, Janjai et al., (2005) ; Janjai et al., (2011) ; Janjai et al., (2013)).

5.2 Amélioration de la qualité des données d'irradiation en tenant compte des phénomènes climatiques

L'un des résultats de l'étude menée au chapitre 2 a montré que les estimations obtenues par ciel couvert étaient de mauvaise qualité en termes de précision. Nous avons proposé une méthode de correction de ces estimations par ciel couvert dans le chapitre 3, en exploitant le modèle physique de Gautier et Landsfeld (1997). Bien que les résultats obtenus soient encourageants, ils pourraient être améliorés notamment en affinant la détermination du coefficient d'absorption des nuages selon le type de saison et le type de nuages qui affectent l'atmosphère au-dessus de la zone étudiée.

À notre connaissance, peu de méthodes prennent en compte la configuration de l'atmosphère en cas de ciel couvert. Lorsque c'est le cas, la méthode se base soit sur un ajustement empirique (Badescu, 2002), soit sur des produits satellites de nuages, soit sur un Modèle de Transfert Radiatif (MTR) (Qu,(2013) ; Doicu et al., (2014)).

Par exemple, la méthode proposée par Badescu (2002) exploite des observations de couverture nuageuse in-situ, ce qui limite son caractère généralisable et son applicabilité à d'autres zones. La méthode Heliosat-4 (Qu, 2013) exploite des « produits de nuage » (produits *AVHRR Processing scheme Over cLOUDs Land and Ocean* (APOLLO, Kriebel et al., (1989), Gesell (1989), Kriebel et al., (2003)) et *Optimal Cloud Analysis* (OCA, Watts et al., (2011)) pour décrire l'état d'un pixel à égard des ses caractéristiques nuageuses : taux de couverture nuageuse, phase du nuage, altitude de base et type de nuage. Les produits de nuage exploités dans Heliosat-4 proviennent des canaux thermiques du satellite météorologique géostationnaire Météosat Seconde Génération (MSG). Nous aurions pu exploiter ces produits pour améliorer nos résultats, or comme nous avons vu au chapitre 2, l'angle de visée important entre le satellite MSG et le Plateau des Guyanes entraîne un effet de parallaxe, accentuant les erreurs en cas d'observation de nuages fractionnés. Qu, (2013) mentionne également des erreurs d'estimation survenues en cas de couverture nuageuse fractionnée et en cas de nuages fins non détectés par les produits exploités. Ce cas de figure se présentant sur le Plateau des Guyanes lors de la saison sèche (Marie-joseph et al., 2013), nous risquons de rencontrer ces mêmes erreurs de détection. Une autre solution aurait été d'exploiter des produits satellites de nuages sur la zone étudiée, cependant les produits de nuage

développés avec les données du satellite GOES ne sont disponibles pour le moment uniquement sur les États-Unis (*Continental United States – CONUS*³).

Toutes ces raisons nous ont conduit à l'utilisation du modèle de Gautier et Landsfeld, (1997) pour corriger les estimations de ciel couvert sans dégrader les estimations de ciel clair. Une ultime argumentation de ce choix confère aux travaux de Lee et Margulis (2007) qui ont comparé le modèle de Gautier et Landsfeld (1997) au modèle SRB GEWEX (Pinker and Laszlo, 1992), et ont conclu qu'en termes de performance, le modèle de Gautier & Landsfeld (1997) est équivalent à un modèle de transfert radiatif.

5.3 Amélioration de la connaissance du potentiel en énergie solaire sur le Plateau des Guyanes

L'exploitation des données d'irradiation produites via la méthode Heliosat optimisée avec des images GOES a permis la création d'une multitude d'indicateurs. Ces indicateurs sont d'un intérêt particulier à tout porteur de projet souhaitant mettre en œuvre des systèmes de production à base d'énergie solaire.

L'indicateur de potentiel de production est essentiel pour les porteurs de projet désireux d'implanter une centrale solaire. Cet indicateur rend compte de la rentabilité de la centrale solaire, plus cet indicateur de potentiel est élevé, plus la production et la quantité d'énergie vendue sera importante.

L'un des indicateurs proposés au chapitre 4 est la variabilité inter-journalière du rayonnement solaire, moyennée sur 5 ans. Cette variabilité est importante dans certaines parties du Plateau des Guyanes et l'analyse de la distribution de cet indicateur fait ressortir des contrastes entre zones littorales et zones d'intérieur. L'indicateur de variabilité permet d'apprécier l'intermittence de la ressource. Plus la ressource sera intermittente, plus cela aura des conséquences sur la stabilité du réseau et les moyens de gestion et de stockage à mettre en œuvre. Cet indicateur permet donc d'appréhender le dimensionnement des services à mettre en œuvre pour insérer efficacement la production d'énergie photovoltaïque dans un réseau électrique.

Un autre indicateur obtenu au chapitre 4 est l'indicateur d'orientation qui renseigne sur l'orientation qui maximise l'énergie reçue au cours de la journée. Bien que donnant une indication sommaire sur l'orientation optimale des systèmes qui ne disposent pas de dispositif d'orientation variable, cet indicateur fournit une information pertinente sur l'orientation qui assure une production maximale. Des premiers tests ont montré que plus le ratio s'éloigne de 1, plus l'angle d'inclinaison à adopter s'éloigne de l'horizontale.

³ <http://satcorps.larc.nasa.gov/>

5.4 Limites

Les modifications apportées à la méthode Heliosat-2 et la création des données de cartographie du potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes montrent quelques limites.

Le nombre de stations de mesure est faible par rapport au territoire étudié. Seulement six stations, et ce en Guyane Française et localisées en littoral, ont pu être exploitées afin de valider les données d'irradiation cartographiées (chapitre 4). Le Surinam, le Guyana et le Nord du Brésil ne disposant pas de stations, nous n'avons pas de comparaison avec des mesures in-situ sur ces lieux, bien que les données créées à égard du Nord du Brésil rejoignent celles publiées par Pereira et al., (2006).

Autre limite identifiée lors de la mise en place du modèle de ciel couvert (chapitre 3), seuls deux types de nuages ont été pris en compte (Cirrus et CumuloNimbus). Pourtant, plus d'informations auraient été nécessaires afin de modéliser correctement l'influence de chaque type de nuage (altitude de base, phase, épaisseur optique). Les produits de nuage disponibles ne couvrent pour le moment pas le Plateau des Guyanes, mais uniquement les États-Unis ou l'Europe et l'Afrique. Simplifier l'influence des nuages est source d'erreur ((Oumbe, 2009; Qu, 2013)), en particulier lorsque ce sont des nuages fractionnés, comme c'est le cas en saison sèche sur le Plateau des Guyanes (Marie-joseph et al., 2013).

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

L'objectif principal de cette thèse était de concevoir et développer une méthode d'estimation de l'irradiation solaire applicable à la zone intertropicale. Il était question notamment de proposer un algorithme qui prenne en compte les phénomènes nuageux qui interviennent sous ces latitudes, afin d'obtenir des estimations à haute résolution spatiotemporelle et de qualité tant par ciel clair que par ciel couvert.

Tout d'abord, nous avons adapté la méthode Heliosat-2, originellement utilisée avec des images du satellite METEOSAT, afin de pouvoir exploiter les données image issues du satellite météorologique géostationnaire GOES. Cette modification de la méthode Heliosat-2, qui incluait une modification du processus d'étalonnage et du calcul d'albédo des nuages, a été validée à égard de la Guyane Française. Cette validation confirme le caractère généralisable de la méthode Heliosat-2, et sa possible exploitation avec des données issues de divers satellites météorologiques géostationnaires.

Nous avons aussi vérifié les performances de la méthode Heliosat-2 modifiée sous conditions de ciel clair et de ciel couvert. Les performances dégradées par ciel couvert nous amené à proposer l'introduction d'un modèle de ciel couvert afin d'améliorer les estimations d'irradiation solaire. Cette amélioration, s'appuyant sur un modèle physique, a donné des résultats encourageants, sans dégrader les estimations par temps clair et sans augmenter le temps de calcul des estimations.

La méthode Heliosat-2 modifiée a permis de créer la première cartographie du potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes. Le potentiel énergétique relevé est comparable à celui publié dans d'autres études en pays tropicaux, en particulier en Asie du Sud-est et en Afrique Centrale. À partir des valeurs d'irradiation estimées nous avons produit divers indicateurs, renseignant sur le potentiel disponible, sa variabilité et sur la faisabilité de projets d'exploitation de l'énergie solaire. Ces résultats ont permis d'améliorer la connaissance de l'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle sur la zone du Plateau des Guyanes.

Cependant, la validation des modifications apportées à la méthode Heliosat 2 aurait été plus pertinente si le réseau de mesure in situ était plus dense et mieux réparti. En effet, le réseau de mesure in situ sur le Plateau des Guyanes est plutôt réduit, et pour le cas de la Guyane Française, concentré majoritairement sur le littoral. L'utilisation de stations de mesure in situ d'irradiation solaire avec une localisation mieux répartie sur l'ensemble de la zone étudiée devrait être envisagée dans l'avenir

afin de disposer d'un réseau de mesures plus conséquent pour la validation des estimations.

Nos travaux ont permis de créer des cartographies du rayonnement solaire sur le Plateau des Guyanes en exploitant des images du satellite GOES-13 prises entre 2010 et 2015. Il serait intéressant d'étendre la profondeur temporelle des estimations d'irradiation solaire en prenant en compte les données issues de GOES-8 et GOES-12. La réalisation de séries climatologiques à partir de données estimées sur une plus longue période (1985-2015) permettrait de réaliser de nouvelles études liées aux changements climatiques globaux dans cette région du monde.

Une autre perspective serait d'étendre cette étude sur l'ensemble de l'Amérique du Sud et du Nord. Nous pourrions ainsi comparer nos données avec celles issues du projet SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), au Brésil (Martins et al, 2006), et avec celles issues du NREL, pour les États-Unis. Couvrir l'ensemble du continent américain permettrait d'obtenir la première base de données de l'irradiation solaire à haute résolution spatiotemporelle sur ce continent.

Bibliographie

- Aculinin, A., 2008. Latitudinal variability of surface solar radiation in Moldova. *Mold. J. Phys. Sci.* 7, 247–253.
- Albarelo, T., Marie-Joseph, I., Primerose, A., Seyler, F., Wald, L., Linguet, L., 2015a. Optimizing the Heliosat-II Method for Surface Solar Irradiation Estimation with GOES Images. *Can. J. Remote Sens.* 41, 86–100. doi:10.1080/07038992.2015.1040876
- Al-Jumaily, K.J., Al-Salihi, A.M., Al-Tai, O.T., 2010. Evaluation of Meteosat-8 measurements using daily global solar radiation for two stations in Iraq. *Int. J.* 1, 635–642.
- Almorox, J., Benito, M., Hontoria, C., 2008. Estimation of global solar radiation in Venezuela. *Interciencia* 33, 280–283.
- Alonso Suárez, R., Abal, G., Siri, R., Musé, P., 2012. Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: Application to Uruguay. *Sol. Energy* 86, 3205–3215. doi:10.1016/j.solener.2012.08.012
- ARENA, 2015. Investigating the Impact of Solar Variability on Grid Stability. Australian Renewable Energy Agency. 39 p. Available online at <https://arena.gov.au/files/2015/03/150302-Impact-of-Variability-Report-for-public-release.pdf>
- Badescu, V., 2002. A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global solar irradiance. *Theor. Appl. Climatol.* 72, 127–136. doi:10.1007/s007040200017
- Beyer, H.G., Costanzo, C., Heinemann, D., 1996. Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Sol. Energy* 56, 207–212. doi:10.1016/0038-092X(95)00092-6
- Bisht, G., Bras, R.L., 2010. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sens. Environ.* 114, 1522–1534. doi:10.1016/j.rse.2010.02.007
- Blanc, P., Gschwind, B., Lefèvre, M., Wald, L., 2011. The HelioClim Project: Surface Solar Irradiance Data for Climate Applications. *Remote Sens.* 3, 343–361. doi:10.3390/rs3020343
- Bovolo, C.I., Pereira, R., Parkin, G., Kilsby, C., Wagner, T., 2012. Fine-scale regional climate patterns in the Guianas, tropical South America, based on observations and reanalysis data. *Int. J. Climatol.* 32, 1665–1689. doi:10.1002/joc.2387
- Cano, D., Monget, J., Albuissón, M., Guillard, H., 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Sol. Energy* 37, 31–39.
- Chambers, R.G., 1977. Thermoelectric effects and contact potentials (for teachers). *Phys. Educ.* 12, n° 6, 374 p.
- Dagestad, K.-F., 2004. Mean bias deviation of the Heliosat algorithm for varying cloud properties and sun-ground-satellite geometry. *Theor. Appl. Climatol.* 79, 215–224. doi:10.1007/s00704-004-0072-5
- Diabaté, L., Demarcq, H., Michaud-Regas, N., Wald, L., 1988. Estimating incident solar radiation at the surface from images of the Earth transmitted by geostationary satellites: the Heliosat Project. *Int. J. Sol. Energy* 5, 261–278.
- Diabaté, L., Remund, J., Wald, L., 2003. Linke turbidity factors for several sites in Africa. *Sol. Energy* 75, 111–119. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.002>

-
- Diak, G.R., Gautier, C., 1983. Improvements to a Simple Physical Model for Estimating Insolation from GOES Data. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 22, 505–508. doi:10.1175/1520-0450(1983)022<0505:ITASPM>2.0.CO;2
- Doicu, A., Efremenko, D.S., Loyola, D., Trautmann, T., 2014. Approximate models for broken clouds in stochastic radiative transfer theory. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 145, 74–87. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.04.025>
- Dürr, B., Zelenka, A., 2009. Deriving surface global irradiance over the Alpine region from METEOSAT Second Generation data by supplementing the HELIOSAT method. *Int. J. Remote Sens.* 30, 5821–5841. doi:10.1080/01431160902744829
- Fontoyonnot, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J.A., Skarveit, A., Ineichen, P., Reise, C., Page, J., Roche, L., Beyer, H.G., Wald, L., 1997. Satel-Light, Processing of Meteosat data for the production of high quality daylight and solar radiation data available on a World Wide Web Internet server. Mid-term progress report JOR3 - CT 95 - 0041. Project Satel-Light, for the Commission of the European Communities. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin, France.
- Gastli, A., Charabi, Y., 2010. Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 790–797. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.018>
- Gautier, C., Diak, G., Masse, S., 1980a. A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface from GOES Satellite Data. *J. Appl. Meteorol.* 19, 1005–1012. doi:10.1175/1520-0450(1980)019<1005:ASPMTE>2.0.CO;2
- Gautier, C., Landsfeld, M., 1997. Surface solar radiation flux and cloud radiative forcing for the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Southern Great Plains (SGP): A satellite, surface observations, and radiative transfer model study. *J. Atmospheric Sci.* 54, 1289–1307.
- Geiger, B., Meurey, C., Lajas, D., Franchistéguy, L., Carrer, D., Roujean, J.-L., 2008. Near real-time provision of downwelling shortwave radiation estimates derived from satellite observations. *Meteorol. Appl.* 15, 411–420. doi:10.1002/met.84
- Geiger, M., Diabaté, L., Ménard, L., Wald, L., 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. *Sol. Energy* 73, 475–480. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00121-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00121-4)
- Gesell, G., 1989. An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data An extension to the APOLLO software package. *Int. J. Remote Sens.* 10, 897–905. doi:10.1080/01431168908903929
- Gherboudj, I., Ghedira, H., 2016. Assessment of solar energy potential over the United Arab Emirates using remote sensing and weather forecast data. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 1210–1224. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.099>
- Girodo, M., Mueller, R.W., Heinemann, D., 2006. Influence of three-dimensional cloud effects on satellite derived solar irradiance estimation—First approaches to improve the Heliosat method. *Sol. Energy* 80, 1145–1159. doi:10.1016/j.solener.2005.09.005
- Gond, V., Freycon, V., Molino, J.-F., Brunaux, O., Ingrassia, F., Joubert, P., Pekel, J.-F., Prévost, M.-F., Thierron, V., Trombe, P.-J., Sabatier, D., 2011. Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 13, 357–367. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2011.01.004>
- Gschwind, B., Ménard, L., Albuission, M., Wald, L., 2006. Converting a successful research project into a sustainable service: The case of the SoDa Web service. *Environ. Model. Softw.* 21, 1555–1561. doi:10.1016/j.envsoft.2006.05.002

-
- Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Müller, R., Beyer, H.G., 2003. Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sens. Environ.* 86, 423–432. doi:10.1016/S0034-4257(03)00083-X
- Hanson, K.J., 1971. Studies of cloud and satellite parametrization of solar irradiation at the earth surface., in: Proceedings of Miami Workshop on Remote Sensing. US Department of Commerce, Miami, Florida, USA, pp. 133–148.
- Heinle, A., Macke, A., Srivastav, A., 2010. Automatic cloud classification of whole sky images. *Atmospheric Meas. Tech.* 3, 557–567. doi:10.5194/amt-3-557-2010
- House, F.B., Gruber, A., Hunt, G.E., Mecherikunnel, A.T., 1986. History of satellite missions and measurements of the Earth Radiation Budget (1957–1984). *Rev. Geophys.* 24, 357–377. doi:10.1029/RG024i002p00357
- IEA, 2014. Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy. International Energy Agency. 60 p, Available online at <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy---2014-edition.html>
- IEA, 2010. World energy Outlook 2010. International Energy Agency. 650 p., available online at <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo-2010.html>
- Ineichen, P., Perez, R., 2002. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Sol. Energy* 73, 151–157.
doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00045-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00045-2)
- Inman, R.H., Pedro, H.T.C., Coimbra, C.F.M., 2013. Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Prog. Energy Combust. Sci.* 39, 535–576. doi:10.1016/j.pecs.2013.06.002
- IRENA, 2015a. Renewable Energy Policy Brief: Brazil. International Renewable ENergy Agency, Abu Dhabi. 12 p., Available online at <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=601>
- IRENA, 2015b. Renewable Energy Policy Brief: Guyana. International Renewable ENergy Agency, Abu Dhabi. 8 p., Available online at <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=601>
- IRENA, 2015c. Renewable Energy Policy Brief: Suriname. International Renewable ENergy Agency, Abu Dhabi. 7 p., Available online at <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=601>
- IRENA, 2015d. Renewable Energy Policy Brief: Venezuela. International Renewable ENergy Agency, Abu Dhabi. 8 p., Available online at <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=601>
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M., Thongsathitya, A., 2005. Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Sol. Energy* 78, 739–751.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.009>
- Janjai, S., Masiri, I., Laksanaboonsong, J., 2013. Satellite-derived solar resource maps for Myanmar. *Renew. Energy* 53, 132–140.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.014>

-
- Janjai, S., Pankaew, P., Laksanaboonsong, J., Kitichantaropas, P., 2011. Estimation of solar radiation over Cambodia from long-term satellite data. *Renew. Energy* 36, 1214–1220. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.023>
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT) [WWW Document]. URL <http://http://srtm.cgiar.org/> (accessed 10.1.15).
- Joseph, J.H., Wiscombe, W.J., Weinman, J.A., 1976. The Delta-Eddington Approximation for Radiative Flux Transfer. *J. Atmospheric Sci.* 33, 2452–2459. doi:[10.1175/1520-0469\(1976\)033<2452:TDEAFR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<2452:TDEAFR>2.0.CO;2)
- Kriebel, K., Saunders, R., Gesell, G., 1989. Optical properties of clouds derived from fully cloudy AVHRR pixels. *Beitr. Zur Phys. Atmosphäre* 62, 165–171.
- Kriebel, K., Saunders, R., Gesell, G., Kriebel, K.T., Gesell, G., Kästner, M., Mannstein, H., 2003. The cloud analysis tool APOLLO: Improvements and validations. *Beitr. Zur Phys. Atmosphäre* 24, 2389–2408. doi:[10.1080/01431160210163065](https://doi.org/10.1080/01431160210163065)
- Lee, S., Margulis, S.A., 2007. High-resolution ensemble surface insolation estimates through assimilation of coarse-scale retrievals into a simple physical model: 1. Physical model development and accuracy tests. *J. Geophys. Res.* 112. doi:[10.1029/2006JD007872](https://doi.org/10.1029/2006JD007872)
- Lefevre, M., Albuission, M., Wald, L., 2002. software Heliosat-II for the conversion of images acquired by Meteosat satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level. Ecole Mines Paris Tech Rep. 43 p. Available online at http://www.oie.mines-paristech.fr/Donnees/data09/964-heliosat2_soft_descr2.pdf
- Lefevre, M., Bauer, O., Iehle, A., Wald, L., 2000. An automatic method for the calibration of time-series of Meteosat images. *Int. J. Remote Sens.* 21, 1025–1045. doi:[10.1080/014311600210416](https://doi.org/10.1080/014311600210416)
- Lefevre, M., Diabate, L., Wald, L., 2007. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. *Sol. Energy* 81, 240–253. doi:[10.1016/j.solener.2006.03.008.USING](https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.03.008.USING)
- Lefevre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J.W., Morcrette, J.-J., 2013. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Meas. Tech.* 6, 2403–2418. doi:[10.5194/amt-6-2403-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013)
- Levanon, N., 1971. Determination of the sea surface slope distribution and wind velocity using sun glitter viewed from a synchronous satellite. *J. Phys. Oceanogr.* 1, 214–220.
- Liou, K.-N., 2002. An introduction to atmospheric radiation. Academic press.
- Liou, K.-N., 1976. On the Absorption, Reflection and Transmission of Solar Radiation in Cloudy Atmospheres. *J. Atmospheric Sci.* 33, 798–805. doi:[10.1175/1520-0469\(1976\)033<0798:OTARAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<0798:OTARAT>2.0.CO;2)
- Mahtta, R., Joshi, P.K., Jindal, A.K., 2014. Solar power potential mapping in India using remote sensing inputs and environmental parameters. *Renew. Energy* 71, 255–262. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.037>
- Marie-joseph, I., Linguet, L., Gobinddass, M.-L., Wald, L., 2013. On the applicability of the Heliosat-2 method to assess surface solar irradiance in the Intertropical Convergence Zone , French Guiana. *Int. J. Remote Sens.* 34, 3012–3027.

-
- Martins, F.R., Pereira, E.B., 2006. Parameterization of aerosols from burning biomass in the Brazil-SR radiative transfer model. *Sol. Energy* 80, 231–239. doi:10.1016/j.solener.2005.03.008
- Martins, F.R., Pereira, E.B., Abreu, S.L., 2007. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. *Sol. Energy* 81, 517–528. doi:10.1016/j.solener.2006.07.009
- Masson, G., 2015. Trends 2015 in PV applications. International Energy Agency. 64 p. Available online at http://iea-pvps.org/index.php?id=92&eID=dam_frontend_push&docID=2795
- Moser, W., Raschke, E., 1983. Mapping of global radiation and of cloudiness from METEOSAT image data. *Meteor Rundsch.* 36, 33–41.
- Mueller, R., Dagestad, K., Ineichen, P., Schroedter-Homscheidt, M., Cros, S., Dumortier, J., Kuhlemann, R., Olseth, J.A., Piernavieja, G., Reise, C., Wald, L., Heinemann, D., 2004. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sens. Environ.* 91, 160–174.
- Mueller, R., Trentmann, J., Träger-Chatterjee, C., Posselt, R., Stöckli, R., 2011. The Role of the Effective Cloud Albedo for Climate Monitoring and Analysis. *Remote Sens.* 3, 2305–2320. doi:10.3390/rs3112305
- Nguyen, L., Doelling, D., Minnis, P., Ayers, J.K., 2004. Rapid technique to cross calibrate satellite imager visible channels, in: SPIE 49Th Annual Meeting, Earth Observing Systems IX Conference. SPIE, Denver, Colorado, USA, pp. 227–235.
- Robbins, N., Burger, M., 2013. Feasibility of Solar Power in South Africa and the existing barriers to its implementation. EDIS - Publishing Institution of the University of Zilina, pp. 402–411.
- Noia, M., Ratto, C.F., Festa, R., 1993a. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. *Sol. Energy* 51, 449–456. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90130-G](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(93)90130-G)
- Noia, M., Ratto, C.F., Festa, R., 1993b. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models. *Sol. Energy* 51, 457–465. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90131-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(93)90131-7)
- Ohmura, A., Gilgen, H., Hegner, H., Müller, G., Wild, M., Dutton, E.G., Forgan, B., Fröhlich, C., Philipona, R., Heimo, A., König-Langlo, G., McArthur, B., Pinker, R., Whitlock, C.H., Dehne, K., 1998. Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 2115–2136. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<2115:BSRNBW>2.0.CO;2
- Oumbe, A., 2009. Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. doi:10.5194/hess-11-1633-2007
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S.L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S., 2000. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. *Sol. Energy* 68, 91–107. doi:10.1016/S0038-092X(99)00044-4
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S. de, Rüther, R., 2006. Atlas brasileiro de energia solar. INPE. 60p. Available online at http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html

-
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., Vignola, F., 2002. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Sol. Energy* 73, 307–317.
- Perez, R., Seals, R., Stewart, R., Zelenka, A., Estrada-Cajigal, V., 1994. Using satellite-derived insolation data for the site/time specific simulation of solar energy systems. *Sol. Energy* 53, 491–495. doi:10.1016/0038-092X(94)90128-0
- Perez, R., Seals, R., Zelenka, A., 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Sol. Energy* 60, 89–96. doi:10.1016/S0038-092X(96)00162-4
- Pillot, B., Muselli, M., Poggi, P., Dias, J.B., 2015. Satellite-based assessment and in situ validation of solar irradiation maps in the Republic of Djibouti. *Sol. Energy* 120, 603–619. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.015>
- Pinker, R.T., Laszlo, I., 1992. Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Applications on a Global Scale. *J. Appl. Meteorol.* 31, 194–211. doi:10.1175/1520-0450(1992)031<0194:MSSIFS>2.0.CO;2
- Polo, J., Antonanzas-Torres, F., Vindel, J.M., Ramirez, L., 2014. Sensitivity of satellite-based methods for deriving solar radiation to different choice of aerosol input and models. *Renew. Energy* 68, 785–792. doi:10.1016/j.renene.2014.03.022
- Polo, J., Bernardos, A., Navarro, A.A., Fernandez-Peruchena, C.M., Ramirez, L., Guisado, M.V., Martinez, S., 2015. Solar resources and power potential mapping in Vietnam using satellite-derived and GIS-based information. *Energy Convers. Manag.* 98, 348–358. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.016>
- Posselt, R., Mueller, R., Stöckli, R., Trentmann, J., 2011. Spatial and Temporal Homogeneity of Solar Surface Irradiance across Satellite Generations. *Remote Sens.* 3, 1029–1046. doi:10.3390/rs3051029
- Qu, Z., 2013. La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Remund, J., Wald, L., Lefèvre, M., Ranchin, T., Page, J., 2003. Worldwide Linke turbidity information., in: Proceedings of ISES Solar World Congress. ISES, Goteborg, Sweden.
- REN21, 2013. Renewables 2013 global status report. REN21 Secretariat, Paris. 178 p.
Available online at
http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., 2000. On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Sol. Energy* 68, 33–48.
- Rigollier, C., Lefèvre, M., Blanc, P., Wald, L., 2002. The operational calibration of images taken in the visible channel of the meteosat series of satellites. *J. Atmospheric Ldots* 19, 1285–1293.
- Rigollier, C., Lefèvre, M., Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Sol. Energy* 77, 159–169. doi:10.1016/j.solener.2004.04.017
- Rigollier, C., Lefevre, M., Wald, L., 2002. Integration and exploitation of networked Solar radiation Databases for environment monitoring. European Commission.
- Rigollier, C., Wald, L., 1998. Using Meteosat images to map the solar radiation: improvements of the Heliosat method., in: Proceedings of the 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Eumetsat, Darmstadt, Germany, pp. 432–433.

-
- Schmetz, J., 1984. On the parameterization of the radiative properties of broken clouds. *Tellus* 36 A, 417–432. doi:10.3402/tellusa.v36i5.11644
- SoDa, Integration and exploitation of networked Solar radiation Databases for environment monitoring [WWW Document]. URL <http://www.soda-is.com/eng/index.html> (accessed 1.1.16).
- Stuhlmann, R., Rieland, M., Raschke, E., 1990. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *J. Appl.* 29, 586-603.
- Tarpley, J.D., 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteorol.* 18, 1172–1181.
- Vasquez, T., 2009. The Intertropical Convergence Zone - Weatherwise Magazine [WWW Document].URL <http://www.weatherwise.org/Archives/Back%20Issues/2009/Nov-Dec%202009/full-Intertropical-Converge.html> (accessed 1.1.16).
- Vonder Haar, T.H., Ellis, J.S., 1976. Solar Energy Microclimate as determined from Satellite observations. SPIE, pp. 18–22. doi:10.1117/12.978097
- Wahab, M.A., El-Metwally, M., Hassan, R., Lefèvre, M., Oumbe, A., Wald, L., 2010. Assessing surface solar irradiance and its long-term variations in the northern Africa desert climate using Meteosat images. *Int. J. Remote Sens.* 31, 261–280. doi:10.1080/01431160902882645
- Wald, L., 2007. Solar radiation energy (fundamentals), in: Blanco, J., Malato, S. (Eds.), *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK.
- Watts, P.D., Bennartz, R., Fell, F., 2011. Retrieval of two-layer cloud properties from multispectral observations using optimal estimation. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 116, n/a-n/a. doi:10.1029/2011JD015883
- Weinreb, M., Han, D., 2009. Calibration of the Visible Channels of the GOES Imagers and Sounders [WWW Document]. URL <http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/calibration/goes-vis-ch-calibration.html> (accessed 1.1.16).
- Weinreb, M., Jamison, M., Fulton, N., Chen, Y., Johnson, J.X., Bremer, J., Smith, C., Baucom, J., 1997. Operational calibration of geostationary operational environmental satellite-8 and-9 imagers and sounders. *Appl. Opt.* 36, 6895–6904.
- Welch, R.M., Cox, S.K., Davis, J.M., 1980. Solar radiation and clouds, *Meteorological Monographs*. Amer. Meteorol. Soc, Boston, Mass.
- WMO, 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8. World Meteorological Organization.
- Wu, Sun, F., 2005. Post-launch calibration of GOES imager visible channel using MODIS. SPIE. doi:10.1117/12.61540.
- Wyser, K., O'Hirok, W., Gautier, C., Jones, C., 2002. Remote sensing of surface solar irradiance with corrections for 3-D cloud effects. *Remote Sens. Environ.* 80, 272–284. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00309-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00309-1)
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., Renné, D., 1999. Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly Irradiances. *Theor. Appl. Climatol.* 62, 199–207. doi:10.1007/s007040050084
- Zhang, M., Liu, J., Li, G., Fan, J., Deng, H., Ren, Chen, Z., 2011. Solar Irradiance estimated from FY-2 data at some North China sites., in: *Proceedings of the Geoscience and*

Remote Sensing Symposium (IGARSS). IGARSS, Vancouver, BC, Canada, pp. 3284–3287.