



# De la modélisation du rayonnement solaire à la production d'énergie : recherches sur l'optimisation de la production photovoltaïque en contexte amazonien

Laurent Linguet

## ► To cite this version:

Laurent Linguet. De la modélisation du rayonnement solaire à la production d'énergie : recherches sur l'optimisation de la production photovoltaïque en contexte amazonien. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Guyane, 2016. <tel-01359819>

**HAL Id: tel-01359819**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01359819>**

Submitted on 4 Sep 2016

**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.

Rapport de synthèse

Présenté à

L'Université de Guyane

En vue d'obtenir

**L'Habilitation à Diriger des Recherches**

Spécialité : Génie Electrique

Par

Laurent LINGUET

Docteur en Génie électrique de l'Université Paris-Sud Orsay

---

**De la modélisation du rayonnement solaire à la  
production d'énergie : recherches sur l'optimisation de  
la production photovoltaïque en contexte amazonien**

---

Soutenue le 7 juillet 2016

**Membres du jury**

M. Philippe BLANC	Directeur de Recherches MINES ParisTech	Rapporteur
M. Henri CLERGEOT	Professeur émérite, Université de Guyane	Examineur
M. Bernard MULTON	Professeur, ENS de Rennes	Président
M. Adel OMRANE	Professeur, Université de Guyane	Examineur
M. Pierre SAINT-GREGOIRE	Professeur, Université de Nîmes	Directeur
M. Belkacem ZEGHMATI	Professeur, Université de Perpignan	Rapporteur
M. Georges ZISSIS	Professeur, Université de Toulouse	Rapporteur

## REMERCIEMENTS

Les résultats présentés dans ce manuscrit sont avant tout issus d'un travail collectif auquel a participé une grande partie des enseignants chercheurs de l'équipe UMR-Espace-Dev de Guyane. Mes remerciements vont donc à tous ceux, techniciens, ingénieurs, enseignants-chercheurs, dirigeants, qui par leur action individuelle ont contribué au développement des thématiques de recherche présentés dans ce mémoire.

Je tiens à remercier tous les étudiants (doctorants, post-doctorants et stagiaires), qui ont oeuvré sous ma responsabilité, et qui reconnaîtront leurs travaux dans ce manuscrit. J'adresse une mention particulière à Tommy, Youven, Justine, Mouhamet avec qui j'apprécie chaque jour de discuter et de travailler.

Une partie des recherches présentées dans ce mémoire a été possible grâce à des collaborations avec Jamal Atif, Christian Olivier, Yannis Pousset et Lucien Wald. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont accordée, et leur contribution à ces recherches.

Je voudrai exprimer également toute ma gratitude au Professeur Pierre Saint-Grégoire pour ses encouragements et son engagement. Ses remarques et recommandations m'ont été précieuses pour la réalisation de ce mémoire et la soutenance de cette habilitation.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail. Les Professeurs Georges Zisis, Belkacem Zegmati, ainsi que Phillipe Blanc, Directeur de Recherche ont accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. Je leur suis sincèrement reconnaissant de l'attention portée à mon travail, ainsi que des conseils prodigués. Je remercie Bernard Multon pour avoir accepté d'être présent à ce jury et pour ses discussions enrichissantes. Enfin je remercie Henri Clergeot pour ses conseils avisés ainsi qu'Adel Omrane qui a bien voulu participer à ce jury.

Merci à Frédérique Seyler, directrice de l'UMR Espace-Dev pour ses encouragements et la confiance témoignée tout au long de ces années.

Enfin, je termine cet exercice avec une pensée toute particulière pour mes parents et ma famille.

## SOMMAIRE

<b>I. SYNTHÈSE DE L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE</b>	<b>4</b>
Table des indices	5
<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>PARTIE 1. MODELISATION</b>	<b>10</b>
1.1 Introduction	10
1.2 Modèle d'évolution	12
1.3 Modèle d'observation	16
1.4 Filtrage particulaire	20
1.5 Conclusion	24
<b>PARTIE 2. ESTIMATION DE LA RESSOURCE</b>	<b>27</b>
2.1 Etat de l'art des méthodes opérationnelles existantes	28
2.2 Evaluation de la méthode Heliosat-2	31
2.3 Optimisation de la méthode Heliosat-2	33
2.4 Application de la méthode Heliosat-2 modifiée au Plateau des Guyanes	35
2.5 Conclusion	40
<b>PARTIE 3. OPTIMISATION DE LA PRODUCTIVITÉ</b>	<b>42</b>
3.1 Situation électrique de la Guyane	43
3.2 Bilan des expérimentations de systèmes photovoltaïques en Guyane	44
3.3 Amélioration de la productivité d'une centrale hybride photovoltaïque-diesel en site isolé	45
3.4 Sociologie et analyse de la productivité des systèmes photovoltaïques domestiques	51
3.5 Conclusion	54
<b>PARTIE 4. PERSPECTIVES</b>	<b>56</b>
4.1 Objectifs	56
4.2 Projets	60
<b>ANNEXE 1 : CURRICULUM VITAE</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXE 2 : LISTE DÉTAILLÉE DES PUBLICATIONS</b>	<b>70</b>



## **I. SYNTHÈSE DE L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE**

## Table des indices

### Indice de clarté et indice de clarté journalier moyen : $K_t$ et $K_{tm}$

L'indice de clarté noté,  $K_t$ , correspond au rapport entre l'irradiance globale observée au sol  $G$  et l'irradiance extraterrestre sur un plan horizontal  $G_0$ :

$$K_t = G / I_{sc} \cdot \varepsilon \cdot \cos\theta_z \quad (1)$$

avec :  $I_{sc}$ , constante solaire ;  $\varepsilon$ , facteur de correction de l'excentricité ;  $\theta_z$ , angle zénithal solaire ;  $G_0 = I_{sc} \cdot \varepsilon \cdot \cos\theta_z$  correspond à l'irradiance extraterrestre.  $K_{tm}$  est la valeur moyenne journalière de l'indice de clarté.

### Indice de ciel clair : $K_c$

L'indice de ciel clair noté,  $K_c$ , correspond au rapport entre l'irradiation globale observée au sol  $G$  par l'irradiance qui devrait être observée par ciel clair :

$$K_c = G / G_c \quad (2)$$

où  $G$ , est l'irradiance globale sur un plan horizontal au sol, et  $G_c$  est l'irradiance de ciel clair obtenue grâce à l'utilisation d'un modèle de ciel clair (modèle ESRA par exemple, Rigollier, 2004) toutes les deux sont exprimés en  $W.m^{-2}$ . La différence entre  $G_c$  et  $G_0$  vient au fait que  $G_c$  tient compte de l'absorption atmosphérique en l'absence de nuages.

### Indice d'ennuagement : $n$

L'indice d'ennuagement est le rapport entre ce qui est observé par le capteur et ce qui serait observé si le ciel était clair (sans nuages). Il est calculé à partir des informations extraites d'un pixel  $(i,j)$  d'une image satellite, il n'a pas d'unité et est égal à :

$$n = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_c - \rho_g} \quad (3)$$

$\rho$  : albédo apparent vu par le capteur satellite au-dessus du pixel  $(i,j)$ ;  $\rho_g$  : albédo apparent du sol ;  $\rho_c$  : albédo apparent des nuages les plus réfléchissants. L'albedo vu par le satellite peut être représenté par une fonction de l'albedo du sol (pondéré par la probabilité de ne pas avoir de nuages :  $n > 0$ ) et de l'albedo des nuages (pondéré par la probabilité qu'il y ait des nuages :  $n > 1$ ) :

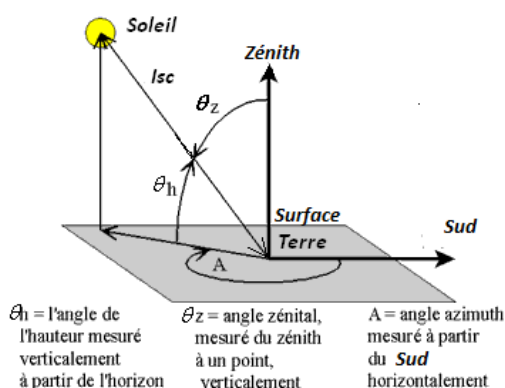
$$\rho = (1-n) \rho_g + n \cdot \rho_c$$

### Réflectance : $R$

La réflectance est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente :

$$R = \pi L / (I_{sc} \cdot \varepsilon \cdot \cos\theta_z) \quad (4)$$

où  $I_{sc}$  est la constante solaire,  $\varepsilon$  est le facteur de correction de l'excentricité, et  $\theta_z$  est l'angle zénithal.  $L$  est la radiance.



Représentation de l'angle zénithal solaire  $\theta_z$

## INTRODUCTION

La nécessité impérieuse de concevoir des modes de développement économique plus durables et plus protecteurs de la planète ouvre un champ d'action inédit aux énergies renouvelables. Cependant le recours aux énergies renouvelables n'est pas dénué de contraintes et nécessite encore des développements visant à les rendre aptes à assurer un service aussi efficace qualitativement et quantitativement que les procédés mis en œuvre depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle.

Actuellement, les modes les plus répandus de production d'énergie électrique génèrent sur le plan mondial des effets nocifs dont les plus connus sont : le rejet de gaz à effet de serre et le rejet de déchets radioactifs. Les énergies renouvelables permettent de s'affranchir de ces nuisances tout en contribuant au développement durable de la planète.

Parmi les énergies renouvelables disponibles, le photovoltaïque est la source d'énergie qui devrait être la plus déployée à l'avenir dans le monde. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE - PVPS, Trends in 2015), la capacité installée de production d'électricité photovoltaïque au niveau mondial connaît une augmentation importante depuis plusieurs années et les perspectives de croissance sont d'environ 40GW/an de 2015 à 2020 pour atteindre une puissance installée de 600 GW d'ici 2025. A 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. Une des raisons de la croissance du photovoltaïque est liée 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 (IEA, 2015), 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.

En France, le soutien au développement des énergies renouvelables s'exprime notamment à travers la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015. Cette loi a pour objectif de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030 ; pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent représenter 40 % de la production d'électricité.

Parmi les énergies renouvelables disponibles, la France reconnaît l'enjeu industriel que représente le photovoltaïque (dont la puissance cumulée atteint 5,6 GW en 2014 DOM inclus) et a fixé la contribution de l'énergie d'origine photovoltaïque dans sa consommation finale d'énergie à 5,2 GWh (450 000 tonnes équivalent pétrole) en 2020. A travers cette décision la France indique son souhait de se positionner sur ce secteur afin de participer activement à son développement dans les prochaines années et favoriser le développement de sources de production d'énergie photovoltaïques partout en France y compris les départements d'outremer. Dans les DOM-TOM la ressource naturelle nécessaire existe et se prête à la réalisation de multiples unités de production. La Guyane par exemple étant positionnée à 5° Nord de l'équateur, bénéficie d'une irradiation solaire relativement intéressante et suffisante en tous cas pour offrir de sérieuses opportunités de développement de systèmes de production d'énergie à base solaire. C'est sans doute pour cette raison que la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (2015) fixe pour les départements d'outre-mer, un objectif d'intégration de 50% d'énergie renouvelables dans le bilan d'énergie final en 2020 et un objectif d'autonomie énergétique à l'horizon 2030.

Mais la banalisation du recours aux énergies renouvelables ne se fera pas naturellement, des freins, des contraintes d'ordre technologique existent. Des stratégies doivent être mises en place afin de les

lever. Les recherches pour améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques doivent être poursuivies dans les départements d'outre-mer.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les activités de recherche que j'ai poursuivies ces dernières années. Les objectifs du projet de recherche décrit dans ce mémoire sont de répondre aux problématiques de la filière photovoltaïque en contexte amazonien afin d'assurer le développement de cette dernière. Les actions initiées devront contribuer à l'amélioration du fonctionnement des installations photovoltaïques et à la diminution des risques associés aux projets et technologies photovoltaïques implantés dans cette région. Parce que l'enjeu de l'accès et de la fourniture d'énergie est un enjeu majeur et sensible en Guyane mais aussi sur tout le Plateau des Guyanes (Nord de l'Amazonie) nous avons souhaité développer des actions de recherche : 1- dont les résultats sont suffisamment génériques pour être appliqués à différentes sources d'énergie renouvelable, 2- ayant un potentiel de transfert vers l'industrie et/ou vers la société.

La problématique principale que posent les systèmes énergétiques alimentés par une source d'énergie renouvelable est la suivante : comment exploiter de façon optimale un flux énergétique d'origine naturelle en entrée (rayonnement solaire, vent, courants fluviaux ou marins,...) fluctuant dans le temps et dans l'espace pour répondre à un besoin énergétique des populations ?

L'exploitation optimale de la ressource renouvelable peut être réalisée grâce au suivi du flux énergétique en vue d'assurer le contrôle et la gestion de l'énergie produite. Le suivi du flux énergétique dans l'espace et dans le temps peut s'apparenter à un suivi de cible ou de mobile, problématique que l'on rencontre dans le domaine de l'Automatique. Cette problématique nécessite la mise en œuvre de méthodes et de modèles visant à simuler, observer, estimer et parfois prédire le signal représentant l'état de la ressource naturelle renouvelable (intensité du rayonnement solaire, vitesse du vent, vitesse des courants fluviaux ou marins,...). C'est la raison pour laquelle le premier axe de mes travaux s'intéresse à la conception de modèles.

L'exploitation optimale d'un flux énergétique naturel passe aussi par une bonne connaissance dans l'espace et dans le temps du potentiel de la ressource associée à ce flux. Cette information est indispensable par exemple pour : 1- choisir l'emplacement du système de production d'énergie afin de maximiser l'intrant et donc maximiser l'exploitation de la ressource, 2- dimensionner le système de production d'énergie en fonction des besoins et des contraintes identifiés. La problématique de l'estimation dans l'espace et dans le temps de la ressource nécessite la mise en œuvre de méthodes de Télédétection visant à extraire des informations pertinentes d'images satellites afin d'optimiser l'exploitation de la ressource à des fins énergétiques. C'est la raison pour laquelle le second axe de mes travaux s'intéresse à l'estimation spatiotemporelle de la ressource.

Une autre considération contribue à l'exploitation optimale d'un flux énergétique, il s'agit de l'évaluation de la capacité du système de production à transformer correctement la ressource énergétique. La ressource ne sera correctement exploitée que si les indicateurs de performance du système de production d'énergie indiquent qu'il fonctionne dans de bonnes conditions et assure au mieux de ses capacités la transformation de la ressource énergétique fournie en entrée. Pour cela on utilise les méthodes du Génie électrique afin de contrôler, surveiller la performance du système de production grâce au calcul de grandeurs telles que : le rendement, l'efficacité, la productivité, etc. Cette surveillance peut conduire à la mise en œuvre d'actions correctives qui visent à améliorer ou à optimiser l'exploitation de la ressource.

Enfin, un autre paramètre qui influe sur l'exploitation de la ressource concerne l'acceptation sociale des contraintes liées à l'utilisation de l'énergie renouvelable, car tout déphasage entre l'attente énergétique et la production d'énergie peut compromettre l'exploitation de la ressource et entraîner un rejet de la technologie. C'est la raison pour laquelle le troisième axe de mes travaux s'intéresse à l'analyse de la productivité de systèmes de production d'énergies renouvelables en sites isolés en



contexte amazonien en tenant compte tant des aspects techniques liés au système de production qu'aux aspects sociologiques liés aux attentes des consommateurs.

Les travaux que j'ai menés ces dernières années s'appuient sur le développement de trois axes de recherche :

- la conception de modèles permettant d'assurer le suivi de la ressource naturelle renouvelable en vue de gérer et contrôler la production d'énergie créée, en utilisant les méthodes de l'Automatique
- l'estimation spatiotemporelle de la ressource naturelle renouvelable en s'appuyant sur les méthodes utilisées en Télédétection
- l'analyse de la productivité des systèmes de production d'énergies renouvelables et la formulation de recommandations visant à améliorer leur performance, en utilisant les méthodes du Génie Electrique

Ces axes de recherche sont appliqués à la ressource solaire et à la production d'énergie photovoltaïque. J'ai donc intitulé cette synthèse : De la modélisation du rayonnement solaire à la production d'énergie : recherches sur l'optimisation de la production photovoltaïque en contexte amazonien.

Le manuscrit est divisé en quatre parties :

### **1. Modélisation**

Nous aborderons dans un premier temps la question de la formalisation de modèles capables d'assurer le suivi de la ressource naturelle renouvelable en vue d'assurer le contrôle et la gestion de l'énergie produite, et pour cela nous utiliserons le formalisme de la modélisation par espace d'état.

Il sera question de filtre Bayésien récursif utilisé comme une méthode de résolution d'un problème à espace d'état dont les observations sont issues d'images satellites. Nous veillerons au caractère générique de la méthode proposée afin qu'elle soit utilisable avec différentes ressources naturelles.

En vue d'améliorer le caractère prédictif du filtre bayésien nous nous intéresserons à la définition des propriétés statistiques des termes d'erreur intervenant dans des modèles mathématiques simulant l'évolution de l'état d'une ressource naturelle renouvelable. Il sera question de la définition d'une méthode de sélection des densités de probabilité des termes d'erreur qui interviennent dans de nombreux modèles d'évolution, puis de l'application de cette méthode de sélection à deux modèles d'évolution du rayonnement solaire, ce qui nous a amené à remettre en cause des aspects, pourtant réputés solides, de principes communément admis.

Nous proposerons la définition d'une méthode de construction de fonctions/modèles d'observation pour extraire des images satellites une information pertinente sur l'état de la ressource, en particulier nous analyserons la possibilité d'utiliser une loi de probabilité jointe non-paramétrique pour formaliser un concept générique qui serait applicable à d'autres variables représentatives des ressources renouvelables. Puis nous évaluerons l'efficacité et la précision du filtre bayésien conçu avec les modèles d'évolution et d'observation que nous avons développés.

### **2. Estimation de la ressource**

Nous aborderons ensuite la question de l'estimation de la ressource renouvelable. Nos travaux portent sur l'estimation du potentiel d'irradiation solaire au sol sur la zone du continent qui entoure la Guyane. Compte tenu de l'étendue de la zone étudiée et de la parcimonie des stations de mesures présentes dans cette zone, nous choisissons d'utiliser un algorithme permettant d'estimer l'irradiance solaire en utilisant des images satellites.

La recherche développée dans cette partie s'apparente à de la recherche industrielle dans la mesure où les travaux réalisés nous ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances et aptitudes en vue de procéder à l'amélioration d'un algorithme existant utilisé en mode opérationnel. Il s'agit d'un

---

algorithme exploité en Europe et en Afrique avec le satellite Meteosat et que nous modifions afin d'étendre sa capacité de traitement à des images du satellite géostationnaire GOES situé au-dessus du continent Amérique. Le résultat permet de produire plusieurs cartographies du potentiel de l'irradiance solaire sur un plan horizontal (Global Horizontal Irradiance - GHI) mais aussi du potentiel d'irradiance directe (Direct Normal Irradiance - DNI) ainsi que des cartographies d'indicateurs liés à l'exploitabilité du potentiel solaire, comme la variabilité journalière ou le pourcentage d'énergie reçue au sol avant et après le midi solaire par rapport à la quantité d'énergie journalière.

### ***3. Optimisation de la production photovoltaïque en contexte amazonien***

Dans la troisième partie du rapport, nous aborderons le thème de la production d'énergie photovoltaïque en sites isolés en contexte amazonien, nous présentons les études menées et les résultats obtenus qui visent à l'amélioration de la productivité des systèmes photovoltaïques dans un tel contexte. Le but de ces travaux n'est pas simplement de décrire les analyses faites sur la productivité des systèmes solaires mais d'établir des recommandations à partir de cas concrets, et proposer quelques pistes claires et opérationnelles pour exploiter au mieux la ressource solaire afin de satisfaire les besoins énergétiques des populations non raccordées au réseau électrique.

### ***4. Perspectives***

Enfin, en guise de conclusion, nous proposerons un état synthétique des principales avancées issues de ce parcours et nous présenterons les perspectives scientifiques et techniques qu'elles ont permis d'ouvrir.

## PARTIE 1. MODELISATION

Mon activité de modélisation concerne la formalisation de concepts dans des modèles permettant au final d'assurer le suivi (Simulation, Observation, Prédiction) d'une variable dynamique représentant l'état d'une ressource naturelle renouvelable (intensité du rayonnement solaire, vitesse du vent, vitesse des courants fluviaux ou marins,...). Pour cela, j'ai eu recours à la modélisation par espace d'état. Le formalisme à espace d'état offre une grande souplesse dans la conception de modèles pour le suivi d'une ressource naturelle, car il permet de répondre au besoin de simulation (via un modèle dynamique ou d'évolution), d'observation (via un modèle d'observation) d'estimation et de prédiction de la ressource tout en offrant la possibilité d'intégrer différents types de données et d'observations.

Dans le contexte qui nous intéresse le modèle d'évolution peut être assuré par les différents modèles de simulation de l'évolution temporelle de la ressource étudiée, tandis les observations disponibles (mesures, données, images satellites,...) peuvent être assimilées par des modèles d'observation adaptés.

Cependant, la modélisation par espace d'état pose de nombreuses questions de recherches. Les questionnements abordés dans cette partie concernent le développement de modèles d'observation (opérateurs « d'observation») pertinents qui lient les observations faites dans des images satellites aux variables du modèle à espace d'état, ou encore la non connaissance des distributions statistiques des termes d'erreurs intervenant dans les modèles d'évolution, ou la prise en compte des non-linéarités du signal représentant l'état de la ressource étudiée.

Nos travaux ont permis de développer et d'implémenter des concepts originaux pour réaliser les modèles utilisés. Les développements obtenus sont transposables à différentes ressources naturelles renouvelables, tout en sachant que la spécificité de chaque ressource naturelle interdit une transposition à l'identique. Les travaux méthodologiques présentés dans ce chapitre, bien qu'appliqués au rayonnement solaire sont suffisamment génériques pour ne pas être spécifiques à un domaine d'application particulier, ils sont applicables à d'autres processus dynamiques.

### 1.1 Introduction

De nombreuses applications nécessitent d'observer, de suivre et parfois de prédire l'état d'un système et l'Automatique est un domaine qui propose de nombreuses méthodologies et outils pour réaliser ces fonctions. Lorsqu'il est impossible de connaître exactement l'état de la (ou des) variable(s) du système étudié, la solution à adopter est basée sur la reconstruction de cet état à partir d'un nombre limité d'observations. Cette reconstruction est souvent basée sur des approches de type "Observateur d'état" ou "Filtre", qui peuvent rentrer dans le cadre général de ce qu'on appelle communément l'"Estimation d'état".

Le but de l'estimation d'état consiste à utiliser un modèle mathématique pour prédire le comportement du système à partir d'un état donné, et à comparer l'état du système prédit avec des observations faites sur le système afin de corriger les paramètres du modèle et déterminer quel est (ou quels sont) l'état (les états) du système le(s) plus conforme(s) aux observations. Tout ceci dans le but de corriger, d'une manière optimale, la trajectoire de l'état du système et de la rapprocher des observations disponibles.

La recherche sur les estimateurs d'état a véritablement pris son envol dans les années 1973. Durant les quarante dernières années plusieurs estimateurs d'état ont été proposés que l'on peut classer en deux catégories: les estimateurs locaux qui fournissent des estimations locales (point de

fonctionnement) et les estimateurs globaux qui génèrent une fonction de densité de probabilité de l'état estimé.

Sur le plan académique, les problèmes d'estimation d'état non linéaires ont été étudiés dans le domaine des Statistiques. Dans ce domaine, le thème de recherche sur l'estimation d'état des systèmes non linéaires et non Gaussiens est relativement récent au regard de l'histoire. En fait, ce thème émerge véritablement comme un thème de recherche à part entière depuis environ quelques années. Il suscite un intérêt croissant, notamment, dans les applications liées à la météorologie, l'océanographie, la climatologie...:

Dans ce contexte en émergence, les objectifs de la recherche sur l'estimation d'état de systèmes non linéaires et non Gaussiens peuvent se résumer aujourd'hui aux points suivants :

- proposer des approches algorithmiques performantes et efficaces
- proposer des recommandations spécifiques
- valider l'ensemble des approches en situation réelle

La solution générale du problème d'estimation d'état est basée sur les relations récursives bayésiennes et sur l'équation de Fokker-Planck qui génère la fonction de densité de probabilité conditionnelle de l'état inconnu du système. Une solution exacte des équations récursives bayésiennes ne peut être obtenue que dans le cas de systèmes linéaires Gaussiens. Le filtre de Kalman standard résout ce problème dans le cas où le lien entre les données et les inconnues est linéaire, et où les erreurs affectant les données suivent une loi de distribution gaussienne. Les solutions obtenues sont alors optimales.

Dans le cas non-linéaire ou non-gaussien qui nous intéresse, le problème est beaucoup plus difficile. Certaines approches dérivées du filtre de Kalman consistent à faire évoluer un ensemble de points (représentatifs de l'état du système) suivant la loi d'évolution du système et à linéariser les équations du système autour de chaque état (estimateurs locaux). Alors les formules du filtre de Kalman standard peuvent être utilisées. D'autres approches sont purement bayésiennes (estimateurs globaux) et c'est à ce type d'approches que nous nous intéressons.

Nous proposons tout d'abord de définir le système dynamique sur la base duquel le problème d'estimation d'état sera posé. Le système dynamique est représenté par deux équations : une équation d'évolution pour prédire le comportement du système à partir d'un état donné et une équation d'observation pour comparer l'état du système prédit avec des observations faites sur le système afin de corriger la trajectoire de l'état. Les problématiques associées à la définition de ces équations sont les suivantes :

- Le suivi de l'évolution de l'état d'un système dynamique au cours du temps et dans l'espace, nécessite une modélisation mathématique du processus étudié. Cependant, en dépit de leur amélioration permanente, les modèles sont toujours caractérisés par une physique imparfaite (due à la complexité des systèmes) et certains paramètres restent mal connus (par exemple, les distributions statistiques des termes d'erreur) ce qui engendre des erreurs importantes dans les estimations et dans les prévisions de l'évolution de l'état du processus. En particulier, dans l'approche qui nous intéresse (bayésienne), l'évolution a priori (prédiction) de l'état du processus se fait via la distribution statistique des termes d'erreur, ce qui rend nécessaire la connaissance des lois statistiques que suivent les termes d'erreur des modèles. C'est l'objet de la partie 1.2.
- Etre informé sur l'évolution de l'état d'un système nécessite de disposer d'observations régulières sur le système, qu'elles soient directes ou indirectes. Dans le contexte qui nous intéresse et à cause de la variabilité spatiale et temporelle du processus étudié (ressource naturelle renouvelable) les observations seront d'origine satellite. Cependant, utiliser les images et données satellites en tant qu'observations régulières d'un système dynamique

constitue un défi d'un intérêt particulier. Car, en dépit de leur énorme potentiel informatif, les données satellites, les images et les séquences d'images, sont actuellement sous-utilisées principalement en raison de l'absence d'un cadre méthodologique approprié. L'une des difficultés majeures à surmonter consiste à développer des « opérateurs » d'observation, qui lient les données satellites et les variables du modèle. C'est l'objet de la partie 1.3.

Nous concluons enfin dans la partie 1.4 en présentant les résultats obtenus suite à la mise en œuvre de la méthode de résolution du problème d'estimation d'état défini avec les modèles que nous aurons conçus.

## 1.2 Modèle d'évolution

Cette partie s'intéresse aux modèles permettant de simuler l'évolution temporelle d'un signal associé à l'état d'une ressource naturelle renouvelable. Ces travaux ont été réalisés avec la collaboration des professeurs Yannis Pousset et Christian Olivier de l'équipe RESYST (REseaux et SYStèmes de Télécommunication) de l'Institut XLIM UMR CNRS n°7252 de l'Université de Poitiers.

La définition d'un modèle simulant l'évolution d'un processus naturel (notre ressource renouvelable) qui évolue dans le temps doit respecter la condition suivante : produire des séries ayant le même contenu statistique que celui de séquences temporelles mesurées au sol.

Parmi les méthodes statistiques les plus connues on peut citer : les méthodes utilisant un modèle *ARMA* (Auto Regressive Moving Average) celles utilisant un modèle markovien associé à une matrice d'évolution (Markov Transition Matrix Model) incluant éventuellement l'utilisation de réseaux de neurones pour configurer la matrice de transition; les méthodes qui associent modèle autorégressif (*AR*) et l'analyse de Fourier ; les méthodes qui permettent de modéliser une série temporelle à partir d'une valeur moyenne à laquelle on rajoute une fluctuation aléatoire.

La grande majorité des modèles statistiques fait intervenir un terme d'erreur aléatoire dont l'ignorance impacte la qualité de la simulation. Les méthodes citées précédemment utilisent, par facilité, une distribution gaussienne pour représenter le terme de l'erreur (bruit) de modélisation. Ce choix est adopté par la plupart des modèles autorégressifs (*AR* ou *ARMA*) car, dans le domaine de l'analyse des séries temporelles l'hypothèse d'un bruit gaussien est une condition simplificatrice à la détermination du modèle. Cependant dans la réalité, les séries temporelles des processus naturels qui nous intéressent sont physiquement bornées : elles ne comportent souvent que des valeurs positives et elles ne peuvent dépasser une valeur maximale. La distribution gaussienne n'est donc peut-être pas celle qui donne la meilleure représentation de l'erreur associée aux modèles.

L'objet de cette étude consiste à déterminer les lois de probabilité qui décrivent le mieux la distribution statistique des termes aléatoires intervenant dans deux modèles de génération d'irradiance solaire synthétique. Dans le cadre de cette collaboration, il m'a semblé pertinent d'utiliser une méthode de sélection de lois de probabilité basée sur les critères d'information (*IC* pour Information Criterion) appelés aussi critères entropiques généralisés, qui seront préférés au simple maximum de vraisemblance (Alata et al., 2013).

### Critères d'information

Les critères d'information sont des outils qui fournissent une réponse partielle au problème de parcimonie : étant donnée une suite de réalisations ou données ou observations  $x^N = (x_1, \dots, x_N)$  d'un processus aléatoire  $X$ , et étant donnée une famille de lois de probabilité paramétriques choisie à priori, quel est la loi  $\hat{\theta}$  de  $\Theta$  qui correspond le mieux au processus  $X$  ? En d'autres termes, cela signifie que l'on recherche le nombre et les valeurs des paramètres libres du modèle  $\hat{\theta}$ , optimaux au sens des *IC*. Le principe de la méthode de sélection des lois de probabilité basée sur les *IC* est le

suivant : assigner à chaque modèle  $\theta_i$  de  $\Theta$  en compétition une pénalité "compensant" la - log-vraisemblance classique  $L(\theta_i)$ , ce qui reviendra à minimiser l'expression :

$$IC(i) = L(\theta_i) + |\theta_i|C(N), \quad (1)$$

où  $C(N)$  est un terme dépendant en général du nombre d'observations  $N$  et  $|\theta_i|$  est le nombre de paramètres libres du modèle  $\theta_i$ . Rappelons que le seul critère du maximum de vraisemblance (ici la minimisation de  $L(\theta_i)$ ) est insuffisant lorsque  $|\theta_i|$  varie.

L'expression de la pénalité  $|\theta_i|C(N)$  est obtenue à partir de la minimisation d'un coût entre modèles, en général de type  $f$ -divergence, bayésien ou complexité stochastique, et diffère suivant les critères. Le plus connu et le plus ancien est le critère d'Akaike ( $AIC$ ). Dans notre étude, nous ne retenons que ceux de Schwarz (1978) et de El Matouat & Hallin (1996), notés respectivement  $BIC$  et  $\Phi_\beta$ .

Finalement, l'inégalité :  $IC(\theta_i) < IC(\theta_j)$  signifiera que le modèle  $\theta_i$  réalise un meilleur compromis entre l'adéquation aux données, mesurée par la vraisemblance  $L(\theta_i)$ , et le coût de ce choix de modèle, mesuré par  $|\theta_i|C(N)$ . Ainsi  $\theta_i$  sera préféré au modèle  $\theta_j$ . Le modèle retenu  $\hat{\theta}$  sera donc celui qui minimise le critère IC :

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta_i \in \Theta} [IC(\theta_i)]. \quad (2)$$

J'ai appliqué ces critères de sélection à l'identification des lois de probabilité des termes aléatoires intervenant dans deux modèles de génération d'irradiance solaire horaire synthétique : le modèle d'Aguiar et Pereira (Aguiar et al., 1992) et le modèle de Polo (Polo et al., 2011).

### Modélisation de l'irradiance solaire

Les deux modèles de notre étude utilisent une transformation de l'irradiance sous la forme d'un indice de clarté horaire,  $K_t$ , lequel correspond au rapport entre l'irradiance globale au sol  $G$  et l'irradiance extraterrestre sur un plan horizontal (voir page 4, Table des indices). La conversion de l'irradiance en un indice de clarté,  $K_t$ , permet d'en reproduire les variations saisonnières (Graham et al., 1988) et permet aussi de récupérer l'irradiance au sol car l'irradiance extraterrestre est une grandeur connue à tout instant et en tous lieux.

#### Le modèle TAG (Time-Dependent Autoregressive Gaussian) de Aguiar et Collares-Pereira

Ce modèle génère les données synthétiques d'irradiance horaire en utilisant un modèle autorégressif stationnaire. Comme seule entrée, il utilise l'indice de clarté journalier moyen, noté  $K_{tm}$ , (voir page 4). La grande disponibilité de cette donnée moyenne dans le monde entier, en fait un modèle facilement utilisable. L'étude des propriétés séquentielles de l'irradiance solaire par Aguiar et Collares-Pereira (1992) a montré qu'elle dépend essentiellement de la valeur de l'irradiance de l'heure précédente, ce qui les a conduit à proposer le modèle suivant :

$$y(h) = \phi(K_{tm}).y(h-1) + r_{TAG}(h) \quad (3)$$

C'est un modèle  $AR(1)$  où  $r_{TAG}(h)$  est le terme d'erreur (bruit) dont nous chercherons à identifier la loi de probabilité,  $h$  est la variable heure,  $\phi(K_{tm})$  est un coefficient de corrélation dépendant de l'indice  $K_{tm}$  (voir l'article de Aguiar et Collares-Pereira, 1992).  $y(h)$  est l'indice de clarté horaire,  $K_t$ , normalisé ce qui permet d'obtenir une série temporelle quasi-stationnaire. Le modèle ainsi obtenu permet de modéliser le rayonnement solaire à n'importe quel endroit de la planète.

#### Le modèle de Polo

Le modèle de Polo permet de modéliser une série temporelle à partir de l'indice de clarté horaire journalier moyen,  $K_{tm}$ , auquel se rajoute un terme aléatoire :  $A(h).signe(s)$ , dont nous chercherons à identifier la loi de probabilité.

$$K_t(h) = K_{tm} + A(h).signe(s) \quad (4)$$

avec :

- $K_{tm}$  est la valeur moyenne journalière de l'indice de clarté ;
- $A(h)$  est l'amplitude aléatoire de la fluctuation de l'indice de clarté,  $K_{tm}$ , pour l'heure  $h$  ;
- $s$  est la réalisation d'une distribution gaussienne normale centrée de moyenne nulle et d'écart-type unité.

### Identification

Pour produire des séries temporelles des termes d'erreur,  $r_{TAG}$  et  $A$ , des deux modèles nous utilisons des données horaires d'irradiance fournies par Météo France et mesurées au sol sur deux stations météorologiques localisées à Rochambeau et Ile Royale en Guyane Française. La plage temporelle des données s'étend des années 1996 à 2010. Nous disposons ainsi de données de l'ordre de  $O(10^5)$ . Pour le modèle de Polo, la recherche de la densité de probabilité du processus  $A$  est conduite sous différents types de ciel. Nous créons trois classes d'indices de clarté horaires moyens correspondant à 3 types de nébulosité du ciel:

- C1 : ciel nuageux :  $K_{tm} \leq 0.42$  ;
- C2 : ciel partiellement nuageux :  $0.42 < K_{tm} < 0.54$  ;
- C3 : ciel plutôt dégagé :  $K_{tm} \geq 0.54$  ;

Nous prenons comme hypothèses que les deux processus aléatoires ( $r_{TAG}$  et  $A$ ) sont indépendants et identiquement distribués (i.i.d.) et que nous pouvons produire une série temporelle des termes d'erreur horaires :

- $r_{TAG}(h)$  (par la formule 3),
- $A(h).signe(s)$  (par la formule 4).

Enfin, les lois candidates pour les deux processus sont les suivantes :

- Pour le modèle TAG, à la vue de la littérature et de l'allure des lois, nous choisissons comme lois candidates : la loi de Gauss, la loi Logistique (proche de la gaussienne), et la loi d'extremum généralisée (dont les sous familles correspondent aux lois de Gumbel, Fréchet et Weibull).
- pour le modèle de Polo, 9 lois à 1 ou 2 paramètres sont testées : les lois de Rayleigh, la loi exponentielle (à 1 paramètre), les lois Bêta, Nakagami, Gamma, log-normale, Rice, Weibull, gaussienne inverse (à 2 paramètres).

Pour identifier les lois de probabilités des termes d'erreur nous utilisons la méthode de sélection de lois sur la base des critères d'information  $BIC$  (Schwarz, 1978) et  $\Phi_\beta$ . Les étapes du processus d'identification des meilleures lois de probabilités de probabilité statistique des termes d'erreurs du modèle TAG :  $r_{TAG}(h)$  et du modèle de Polo :  $A(h)$  sont les suivantes :

1. Nous extrayons, à partir des données mesurées au sol, les séries temporelles des termes aléatoires  $r_{TAG}(h)$  et  $A(h).signe(s)$  comme suit :
  - valeurs horaires de  $r_{TAG}(h)$  sont obtenues à partir de l'équation (3), en calculant les différents paramètres  $y(h)$  et  $\phi(K_{tm})$ ,  $K_{tm}$  à partir des données d'irradiance solaire in situ.
  - les valeurs  $A(h).signe(s)$  sont obtenues à partir de l'équation (4).
2. Pour chaque modèle, nous répartissons les termes aléatoires ( $r_{TAG}(h)$  et  $A(h).signe(s)$ ) dans 100 paquets de 10.000 valeurs, puis
  - nous utilisons les lois candidates pour calculer les valeurs des deux critères  $IC$  ( $BIC$  et  $\Phi_\beta$ ) pour chacun des 100 paquets puis nous calculons la valeur moyenne des 100 valeurs obtenues pour chaque loi et chaque critère.



- nous comparons ensuite les valeurs moyennes des critères et déterminons la meilleure loi candidate pour chaque modèle comme étant celle dont les critères présente la valeur moyenne la plus faible.

Nous retenons les trois premières lois ayant les meilleurs taux de reconnaissance (valeurs minimales des  $IC$ ) (Tableau 1). Dans le cas du modèle de Polo, à l'issue du test, les résultats sont différents selon la nébulosité ce qui se justifie par la variabilité du modèle en fonction de l'intensité de l'irradiance solaire (nébulosité). Notons que la différence de valeurs des  $IC$  entre les lois Bêta et Nakagami pour la classe C2 se fait au millième près, à la différence des autres classes et modèle.

Tableau 1. : Identification des lois de probabilités des termes d'erreur des modèles TAG et Polo

	Modèle TAG	Modèle Polo		
		C1	C2	C3
Loi n°1	Logistique	Nakagami	Bêta	Weibull
Loi n°2	Gaussienne	Bêta	Nakagami	Gamma
Loi n°3	Extremum Généralisé	Weibull	Weibull	Nakagami

## Validation

Pour valider les conclusions précédentes, nous générons des séries synthétiques de termes aléatoires ( $r_{tag}$  et  $A$ ) avec les paramètres des lois de probabilité identifiées à l'étape précédente sur 11 années de données mesurées in-situ réservées pour cette étape (différentes des données de calibration). Les séries synthétiques de termes aléatoires sont transformées en séries synthétiques d'irradiance solaire selon les équations (17) et (18). La validation des lois de probabilité identifiées est faite en comparant les lois de probabilité cumulées entre séries synthétiques d'irradiance et séries d'irradiance solaire mesurées in-situ, et ce, en utilisant la divergence de Kullback-Leibler et la distance de Kolmogorov-Smirnov comme critères de comparaison.

Une bonne concordance entre la loi de probabilité identifiée et la loi de probabilité validée est relevée pour le modèle TAG d'Aguiar et Pereira: il s'agit de la loi Logistique. Ce résultat apporte la démonstration du caractère non gaussien du terme aléatoire  $r_{TAG}$  du modèle original AR d'ordre 1. On peut donc retenir qu'il vaut mieux considérer un bruit logistique plutôt que gaussien pour le modèle proposé par Aguiar et Collares-Pereira (1992).

Pour le modèle de Polo, une bonne concordance a été relevée entre les lois de probabilité identifiées et les lois de probabilité validées dans les cas de nébulosité faible et forte (classes C1 et C3), il s'agit respectivement de la loi de Nakagami et de la loi de Weibull. Dans le cas de nébulosité partielle (classe C2) la proximité des valeurs des critères d'identification ne permet pas de trancher de manière définitive entre les deux lois Bêta, et Nakagami tandis que la procédure de validation reconnaît la loi de Nakagami comme étant la loi de probabilité des données mesurées. Nous recommandons en cas de contestation (lorsque les critères d'identification génèrent des résultats très similaires entre plusieurs lois), d'utiliser la divergence de Kullback-Leibler pour séparer les lois identifiées et choisir la meilleure loi.

Cette étude a permis de formaliser une nouvelle procédure pour déterminer les lois de probabilités impliquées dans les termes aléatoires de modèles d'irradiance solaire et a débouché sur des résultats concluants. L'intérêt de la procédure d'identification des lois de probabilité basée sur les critères d'information réside dans le fait qu'elle assure aux modèles de génération synthétique la production de données d'irradiance solaire comparables dans leur contenu statistique aux données mesurées. Cette procédure peut être étendue à d'autres modèles de génération synthétique de données horaires ou journalières d'autres processus naturels.



## 1.3 Modèle d'observation

Cette étude concerne la construction de modèles d'observation du signal associé à l'état d'une ressource naturelle renouvelable. Un modèle d'observation est un modèle qui relie une variable (appelée observation) représentant les observations faites sur un processus, à une autre variable qui représente l'état du processus étudié (appelée variable d'état). Dans le cas qui nous intéresse le processus étudié est l'irradiance globale au sol sur un plan horizontal (GHI pour Global Horizontal Irradiance), tandis que les observations sont extraites d'images satellites. Notre objectif est d'obtenir une connaissance approximative de l'état du processus par l'observation des informations contenues dans des images satellites.

Classiquement, en météorologie un modèle d'observation de l'irradiance peut être obtenu en utilisant des lois physiques telles celles mises en œuvre dans les fonctions de transfert radiatif. Cependant, en raison de la complexité des processus physiques mis en jeu, il est difficile de développer une fonction mathématique non linéaire simple à mettre en œuvre sur le plan algorithmique (en évitant de recourir à de multiples paramètres sur la composition de l'atmosphère) en particulier en zone intertropicale (notre zone d'étude). Nous proposons ci-dessous deux modèles d'observation de type statistique.

### Modèle d'observation n°1

Pour résoudre la problématique de la construction du modèle d'observation de nombreuses méthodes utilisent une régression statistique pour corrélérer une information ( $z$ ) issue d'une image satellite avec une information sur le processus terrestre ou atmosphérique à suivre ( $x$ ). Le problème avec la régression statistique, est que la relation entre les deux variables ( $x, z$ ) se fait uniquement à travers l'estimation de l'espérance  $E[x/z]$ , tandis qu'avec une densité de probabilité jointe non paramétrique entre  $x$  et  $z$  on peut estimer la densité de probabilité conditionnelle  $f(x/z)$  qui est considérée comme une généralisation de la régression. Cette seconde technique est utilisée dans de nombreux domaines scientifiques où les connaissances acquises par des méthodes de régression ne suffisent pas à obtenir des conclusions pertinentes sur le problème étudié. Car, disposer de la densité de probabilité conditionnelle permet d'extraire presque tous les paramètres d'intérêt : moyenne ( $E[x/z]$ ), médiane, modes, intervalles de prédiction, seuils des valeurs aberrantes, échantillons, etc. La densité de probabilité conditionnelle facilite également la visualisation des données et leur exploration.

Nous proposons de construire notre modèle d'observation en utilisant une densité de probabilité jointe non paramétrique qui ne repose sur aucune hypothèse, connue sous le nom d'estimateur de densité par noyau (Kernel Density Estimator - KDE) (Rosenblatt 1956, Parzen 1962) La méthode KDE qui permet d'estimer une densité de probabilité  $f(x)$  à partir d'un ensemble de données  $x=\{X_1; X_2; \dots; X_n\}$  grâce à la formule suivante :

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nl} \sum_{i=1}^n D\left(\frac{x - X_i}{l}\right) \quad (5)$$

Plutôt que de représenter une densité de probabilité par un histogramme, cette méthode remplace la boîte centrée en  $X_i$  de l'histogramme par une fonction noyau  $D$  centrée en  $X_i$ . Le noyau  $D$  est la densité d'une loi statistique (fonction gaussienne très souvent), et  $l$  un paramètre nommé "fenêtre" qui régit le degré de lissage de la fonction noyau. On peut montrer que  $\hat{f}(x)$  est le produit de convolution entre le noyau et la densité de probabilité que l'on veut estimer et que la variance est proportionnelle à  $1/\sqrt{n}$ . La densité de probabilité estimée  $\hat{f}(x)$  est formée par la moyenne des fonctions noyau aux points  $X_i$  ce qui permet de réaliser une interpolation entre les données afin de prédire la densité sur les points pour lesquels il n'existe pas de données (Figure 1).

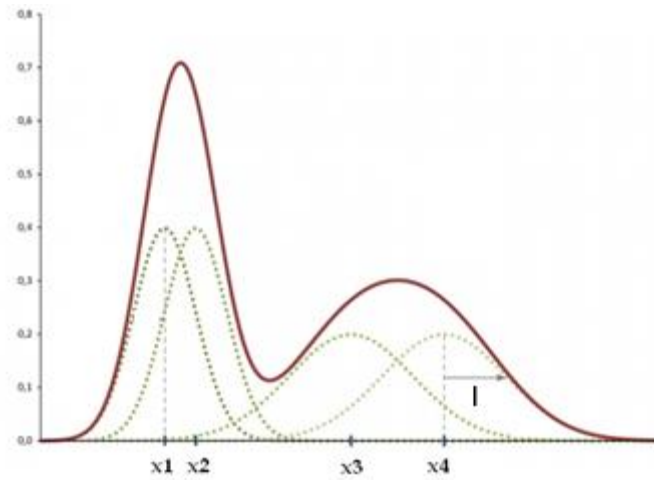


Figure 1. Exemple de densité estimée avec un noyau gaussien (cas à 1 dimension) copyright <https://cybergeo.revues.org/23782>

Si on applique cette méthode pour représenter la densité jointe entre deux variables aléatoires  $x$  et  $z$ , l'interpolation se produit selon deux directions : la direction  $x$  (terme  $D_{l_x}(x - X_i)$  de l'équation (6) et la direction  $z$  (terme  $D_{l_z}(z - Z_i)$  de l'équation (6)), ce qui conduit à un estimateur à double noyau (le dénominateur de l'équation (6) étant un terme de normalisation). La densité jointe entre deux variables aléatoires permet de mieux reproduire les relations entre une variable et un ensemble de covariables, en comparaison avec les méthodes de régression habituelles. La valeur de la densité est estimée en chaque point et la surface ainsi définie donne des courbes de niveaux (Figure 2). L'estimation de la densité conditionnelle  $f(x|z)$  d'une variable  $x=\{X_1; X_2; \dots; X_n\}$ , conditionnellement à une variable  $z=\{Z_1; Z_2; \dots; Z_n\}$ , s'obtient alors en utilisant la formule suivante :

$$f(x|z) = \frac{\sum_{i=1}^n D_{l_z}(z - Z_i) D_{l_x}(x - X_i)}{\sum_{i=1}^n D_{l_z}(z - Z_i)} \quad (6)$$

où :

$D_{l_x}$  désigne la fonction du noyau; et  $l_x$  la fenêtre de la fonction de noyau dans la direction  $x$

$D_{l_z}$  désigne la fonction du noyau; et  $l_z$  la fenêtre de la fonction de noyau dans la direction  $z$

Cette formule est connue sous le nom de Nadaraya-Watson (NW) : estimateur de densité conditionnelle (Gooijer & Zerom, 2003).

Pour la réalisation de notre premier modèle d'observation nous proposons de corrélérer l'indice de clarté  $K_t$  (voir page 4) appelé,  $x$ , avec deux variables d'observation extraites des images satellites. La première variable d'observation notée,  $z$ , est la réflectance bidirectionnelle d'un pixel  $(i,j)$ , notée  $R$  (voir page 4). La deuxième variable d'observation est l'écart-type  $sd(i,j)$  des valeurs de luminances  $L$  (voir page 4) d'une zone de 25x25 pixels entourant chaque pixel  $(i,j)$ . Nous procédons au classement des valeurs d'écart-type  $sd$  dans  $C$  catégories allant des plus petites valeurs jusqu'aux plus grandes. La modélisation de la densité de probabilité jointe  $p(x,z)$  est réalisée avec un ensemble de données d'apprentissage de données d'indice de clarté et de données de réflectance (Figure 2) selon la procédure suivante :

- Obtenir la densité de probabilité jointe  $p(x,z)$  avec des données historiques de l'indice de clarté historiques et des données de réflectance pour chaque catégorie des valeurs d'écart-type  $sd$

- Observer la réflectance  $z_k$  et l'écart-type  $sd_k$  pour le pixel  $(i,j)$  à l'instant  $k$
- Estimer la loi de probabilité conditionnelle  $p(x/z_k)$  pour réflectance  $z_k$  via la densité de probabilité jointe  $p(x, z)$  correspondant à la classe d'écart-type de  $sd_k$
- Obtenir une estimation de l'état de l'indice de clarté,  $x_k$ , grâce au calcul de la médiane de la densité conditionnelle  $p(x/z_k)$ .

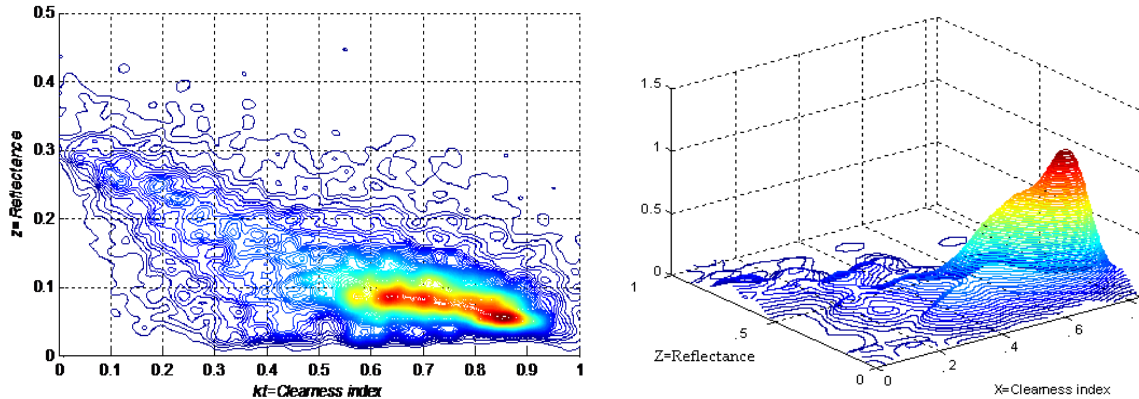


Figure 2.: Densité de probabilité jointe  $p(x, y)$  entre l'indice de clarté ( $K_t$ ) et la réflectance ( $z$ )

Au final, on obtient une observation de la valeur de l'irradiance globale horizontale au sol en multipliant l'indice de clarté obtenu par l'irradiance horizontale au sommet de l'atmosphère. Nous avons fait le choix de la médiane comme estimateur de la densité conditionnelle, car elle est particulièrement pertinente pour les distributions asymétriques (c'est le cas de nos données), elle correspond à la valeur centrale qui minimise la valeur moyenne des écarts absolus et est plus robuste que la moyenne arithmétique en présence de valeurs extrêmes.

Tableau 2. : Comparaison entre les moyennes horaires d'irradiance globale estimées et mesurées obtenues avec la validation croisée pour le modèle d'observation n°2

Stations	Number of observations	Correlation coefficient	Bias (%)	RMSE (%)
Saint-Georges	21055	84%	7%	31%
Rochambeau	21153	85%	3%	31%
Ile Royale	21432	89%	-6%	27%
Kourou	21388	88%	-7%	26%
Saint-Laurent	21706	84%	5%	31%
Maripasoula	22082	86%	2%	26%

Nous évaluons la précision du modèle d'observation, en estimant l'irradiance au sol à partir d'images du satellite GOES et en utilisant un schéma de validation croisée sur trois années de données, de 2011 à 2013. Nous comparons les données estimées avec les données mesurées sur six stations météorologiques de Météo France en Guyane (Tableau 2). La précision des estimations est comparable avec celle obtenue avec d'autres méthodes reconnues d'estimation de l'irradiance globale horizontale au sol à partir d'images satellites (Olseth and Skarveit 2001, Rigollier et al. 2004, Deneke et al. 2008). Ces résultats sont en cours de publication.

## Modèle d'observation n°2

Afin d'améliorer le modèle précédent, nous choisissons d'exploiter l'idée de base de la méthode de Cano (1986) reprise par Diabaté (1989) qui affirme l'existence d'une relation statistique entre

l'indice d'ennuagement  $n$  d'un pixel d'une image satellite et l'indice de clarté  $K_c$  (voir page 4, Table des indices):

$$n = A.K_c + B \quad (7)$$

Bien que largement utilisée, il existe une limite à l'exploitation de cette relation car l'hypothèse simplificatrice sous-jacente de la régression suppose que le terme d'erreur est de nature gaussienne, ce qui n'a pas été vérifié. En outre des travaux ultérieurs ont démontré que la relation entre les deux variables n'était pas tout à fait linéaire (Rigollier, 2004). Afin de reproduire la relation qui lie les deux variables avec plus d'exactitude que la régression statistique, nous proposons la réalisation d'un modèle d'observation basé sur la construction d'une densité de probabilité jointe non paramétrique entre la variable observée extraite de l'image satellite : l'indice d'ennuagement,  $n$ , et la variable cachée représentative du processus à suivre : l'indice de ciel clair  $K_c(i, j)$  (voir page 4, Table des indices). Nous utilisons la même méthode d'estimation de la densité conditionnelle à noyau (CKDE) que dans le modèle 1 pour réaliser la densité jointe paramétrique (Figure 3).

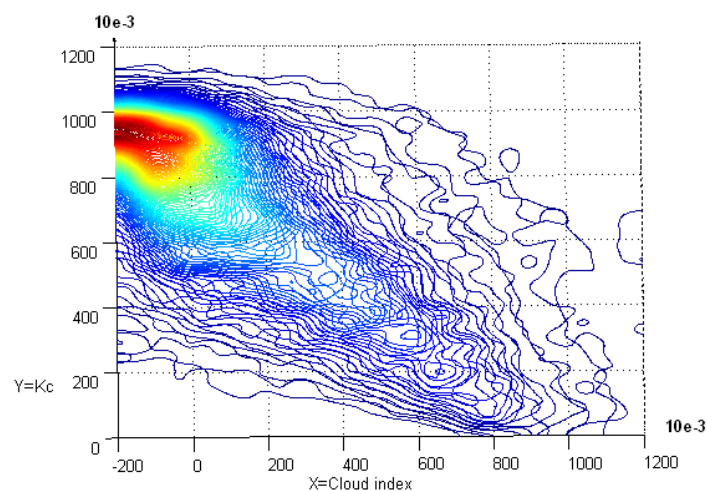


Figure 3.: Loi de probabilité jointe  $p(x, y)$  entre l'indice de ciel clair ( $K_c$ ) et l'indice d'ennuagement ( $n$ ) (Cas à 2 dimensions)

La mise en œuvre de ce modèle d'observation suit la procédure suivante :

- 1- construire une loi de probabilité jointe avec des données historiques  $n$  et  $K_c$  puisque la relation entre ces deux variables est dite invariante dans le temps et l'espace,
- 2- Observer l'indice d'ennuagement  $n$  à l'instant  $k$  en prenant pour albedo du sol et albedo des nuages les valeurs d'albedo min et max récurrentes d'une image \*
- 3- extraire de la loi de probabilité jointe la distribution de  $K_c$  conditionnellement à chaque valeur d'indice d'ennuagement observé pour le pixel  $(i, j)$  à l'instant  $k$ .
- 4- Obtenir une estimation de l'état de l'indice de ciel clair relatif à ce pixel en calculant la médiane de la densité conditionnelle extraite.

Au final, on obtient une estimation de la valeur de l'irradiance globale horizontale au sol en multipliant l'indice de ciel clair obtenu par l'irradiance de ciel calculée via un modèle de ciel clair (Modèle ESRA par exemple, voir Rigollier et al., 2000).

La précision du modèle d'observation n°2, est évaluée à travers une validation croisée sur 3 années de données : de 2011 à 2013. Nous calculons la moyenne des résultats des 4 simulations que nous comparons avec les mesures d'irradiance in-situ (Tableau 3). Nous concluons que le second modèle est plus simple à mettre en œuvre que le modèle n°1 avec une précision légèrement supérieure. Ces résultats sont en cours de publication.

Tableau 3. : Comparaisons entre les moyennes horaires estimées et mesurées de l'irradiance globale horizontale obtenues avec la validation croisée pour le modèle d'observation n°1

Stations	Number of observations	Correlation coefficient	Bias (%)	RMSE (%)
Saint-Georges	15146	0,86	2,1	31
Rochambeau	12810	0,86	-1,6	29
Ile Royale	13378	0,92	-5,5	23
Kourou	14411	0,90	-1,6	23
Saint-Laurent	14106	0,82	-1,2	32
Maripasoula	12780	0,85	-2,6	28
All stations	82631	0,87	-1,7	28

## 1.4 Filtrage particulière

Le suivi et la prédiction de l'évolution de l'état inconnu (caché) d'un processus naturel dynamique (tels que : l'intensité du rayonnement solaire, vitesse du vent, vitesse des courants fluviaux ou marins,...) pour lequel on dispose d'observations bruitées s'apparente à un problème d'estimation d'état dynamique auquel le filtrage bayésien récursif fournit un cadre méthodologique rigoureux. (Gordon et al., 1993, Wikle et al., 2007). Le filtrage bayésien récursif est très utilisé en traitement du signal et en automatique pour la reconnaissance de la parole, le suivi de cible ou d'objets mobiles dans des vidéos, des images radar, etc. Dans la plupart des cas il s'agit de suivre l'évolution de l'état (position, vitesse, ...) d'un objet mobile dans le temps ou l'espace. Par contre il est peu appliqué au suivi de variables environnementales (météorologie, climatologie, ...) principalement à cause de la dimension trop importante du vecteur d'état qui augmente le coût de calcul. On peut noter toutefois quelques travaux en océanographie (Bertino et al., 2003) et en météorologie (Van Leeuwen, 2003) qui ont obtenus des résultats prometteurs en s'appuyant sur des méthodes de filtrage bayésien récursif. Nous faisons le choix d'appliquer cette méthode au suivi de ressources naturelles renouvelables, car nous considérons que les processus naturels à suivre (intensité du rayonnement solaire, vitesse du vent, vitesse des courants fluviaux ou marins, etc.) sont assimilables à des cibles mobiles dans l'espace et dans le temps dont l'état est caché et que le vecteur d'état peut être choisi monodimensionnel.

Le filtrage bayésien récursif est une approche probabiliste générale pour estimer une fonction de densité de probabilité représentative de l'état (actuel ou futur) du processus (la densité «postérieure») en utilisant les données d'observations bruitées (via un modèle d'observation) et des prédictions sur l'état du système (via un modèle d'évolution) (voir figure 4). La résolution du problème d'estimation d'état dynamique est obtenue par l'estimation de la densité "postérieure" qui décrit la probabilité de l'état du système à un moment donné conditionnée à des observations. Pratiquement, le filtrage bayésien peut être mis en œuvre grâce à l'utilisation du filtre de Kalman et ses dérivés ou par l'intermédiaire des filtres Monte Carlo séquentiels. Le filtre de Kalman et ses variantes (Extended Kalman Filtering, Ensemble Kalman Filtering), ont fourni des solutions pour le filtrage bayésien en faisant l'hypothèse sous-jacente de la linéarité locale du système à l'étude et de gaussianité des distributions des erreurs de prévision et d'observation. Ces hypothèses ne sont pas réalistes pour des processus naturels dynamiques que nous souhaitons étudier (rayonnement solaire, vent, courants fluviaux ou marins,...). C'est la raison pour laquelle nous avons fait le choix d'une méthode qui relâche ces hypothèses (linéarité et gaussianité) : le filtrage de type Monte Carlo séquentiel et en particulier le filtre particulière (Gordon et al., 1993 ; Doucet et al., 2001 ; Arulampalam et al., 2002 ; Van Leeuwen, 2009).

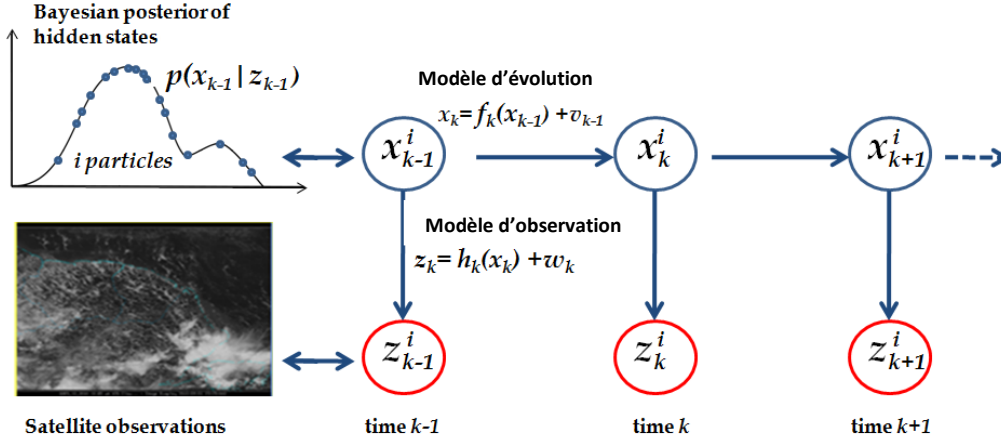


Figure 4.: Cadre bayésien récursif :  $x_k$ , indice de clarté, est l'état caché du processus et la réflectance extraite de l'image numérique par satellite,  $z_k$ , est l'observation.

Considérons le modèle d'état non-linéaire, non gaussien suivant :

$$x_k = f_k(x_{k-1}) + v_{k-1} \quad (8)$$

$$z_k = h_k(x_k) + w_k \quad (9)$$

Les équations du modèle sont données par les équations de l'espace d'état (8) et (9), qui combinent l'évolution de l'état d'un processus selon l'équation d'évolution (8) et des informations sur l'état faites par l'intermédiaire de mesures bruitées selon l'équation d'observation (9), où  $x_k \in \mathbb{R}^n$  est un vecteur représentant l'état du processus à l'instant  $k$ ,  $v_k$  est i.i.d. le bruit de processus aléatoire dont la fonction de distribution de probabilité est généralement inconnue (pdf).  $f_k$  est une fonction non linéaire, qui décrit l'évolution du vecteur d'état en fonction du temps (8). Le vecteur l'état  $x_k$  est supposé être inobservable ou caché. Les observations,  $z_k$ , sont reliées au vecteur d'état,  $x_k$ , grâce à la fonction d'observation non-linéaire entièrement spécifiée par  $h_k$  et la distribution de probabilité du bruit d'observation  $w_k$ . (9).

Le principe de base du filtre particulaire (figure 4) est de reproduire de façon récursive la distribution postérieure bayésienne grâce à un ensemble de particules aléatoires pondérées représentatives des différents états que peut prendre la variable d'état et dont le poids est proportionnel à la probabilité de chaque état. L'algorithme récursif produit, à chaque instant  $k$ , un nuage de  $N$  "particules" (échantillons de Monte Carlo), pondérées, dont la mesure empirique se rapproche de la vraie distribution postérieure pour  $N$  très grand.

$$p(x_k | z_k) \approx \sum_{i=1}^N \omega_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad (10)$$

où  $x_k^i$  représente une particule d'état extraite de la distribution postérieure  $p(x_k | z_k)$  avec un poids  $\omega_k^i$ , et où  $\delta$  désigne la fonction delta de Dirac.

C'est une méthode dans laquelle des particules explorent l'espace d'état, en évoluant de manière indépendante comme le processus naturel caché, et interagissent sous l'effet d'un mécanisme de sélection, qui concentre automatiquement les particules dans les régions d'intérêt de l'espace d'état. L'exécution du filtre est réalisée par l'intermédiaire de séquences de prédiction (ou échantillonnage), de pondération et de ré échantillonnage. La prédiction des particules, ou leur échantillonnage, est mise en œuvre en utilisant la densité d'évolution  $p(x_k | x_{k-1})$  obtenue à partir de l'équation d'évolution (8) (chaque particule,  $i$ , est projetée de son état à l'instant  $(k-1)$  à un nouvel état à l'instant  $k$  par application de l'équation d'évolution). Ensuite, intervient le mécanisme de sélection : on acquiert une observation bruitée du processus caché et chaque particule a d'autant plus de chance de se reproduire à la génération suivante qu'elle est cohérente avec l'observation courante ;



à cette étape chaque particule  $i$  est pondérée avec la valeur  $\omega_k^i$  obtenue par échantillonnage de la distribution postérieure inconnue  $p(x_k^i|z_k)$  avec une autre distribution,  $q(x_k^i|z_k)$ , aussi appelé densité d'importance:

$$\omega_k^i = \frac{p(x_k^i|z_k)}{q(x_k^i|z_k)} \quad (11)$$

Considérant le théorème de Bayes et la nature séquentielle du filtre à particules il est possible de définir une équation récursive de mise à jour de poids dans laquelle la distribution a posteriori inconnue, qui n'est pas accessible, n'apparaît plus:

$$\omega_k^i = \omega_{k-1}^i \frac{p(z_k|x_k^i)p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{k-1}^i, z_k)} \quad (12)$$

Par souci de simplicité, nous choisissons comme densité d'importance la même densité que la densité d'évolution  $p(x_k|x_{k-1})$  et nous obtenons une nouvelle équation récursive de mise à jour des poids qui donne au filtre particulaire sa spécificité : échantillonnage avec ré échantillonnage par importance (Sampling Importance Resampling Filter ou filtre SIR):

$$\omega_k^i = \omega_{k-1}^i p(z_k|x_k^i) \quad (13)$$

où  $p(z_k|x_k^i)$  est la distribution de vraisemblance obtenue à partir de l'équation observation (9). Les poids sont ensuite normalisés :

$$\tilde{\omega}_k^i = \omega_k^i / \sum_{j=1}^N \omega_k^j \quad (14)$$

avec :

$$\sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_k^i = 1 \quad (15)$$

Enfin, pour surmonter le problème principal qui affecte les méthodes à filtre particulaire, à savoir, la dégénérescence des particules (tous les poids, sauf un, finissent par être proches de zéro), une stratégie de ré échantillonnage est introduite. Ce ré échantillonnage élimine les particules de poids faible et duplique les particules de poids fort. La stratégie de ré échantillonnage adoptée est basée sur le ré échantillonnage stratifié proposé par Kitagawa (1996) considéré comme optimal en termes de variance.

Le filtre particulaire comporte les étapes récursives suivantes :

1. Prédiction : à l'instant  $k$ , les particules explorent l'espace d'état de façon indépendante, en suivant l'équation d'évolution. Le filtre particulaire simule de nouveaux états en partant des états de l'étape précédente ( $k-1$ ) en utilisant la densité d'évolution  $p(x_k|x_{k-1})$  issue de l'équation d'évolution (8).
2. Pondération (mise à jour) : les observations,  $z_k$ , extraites de l'image satellite, sont utilisées pour produire une information sur l'état de la variable cachée,  $x_k$ , grâce à l'utilisation de la fonction d'observation,  $h_k$  (2). Dès qu'une nouvelle observation est disponible, la proximité de l'état de chaque particule avec cette observation est évaluée grâce à la fonction de vraisemblance  $p(z_k|x_k^i)$ . La comparaison de l'état de chaque particule avec cette observation permet de définir le poids  $\omega_k^i$  à associer à chaque particule  $i$ .
3. Ré échantillonnage: Les particules sont éliminées ou multipliées, en fonction de leur poids, c'est-à-dire que les particules auront d'autant moins de descendants à la génération suivante que leur vraisemblance est faible. L'étape de ré échantillonnage élimine les particules de poids faible et de duplique les particules de poids fort. L'ensemble des particules est ensuite uniformément

pondéré et la distribution résultante représente alors la densité a posteriori sous une forme discrète.

4. Estimation de l'état : L'estimation de l'état,  $\hat{x}_k$ , est obtenue en faisant la moyenne de toutes les particules pondérées :

$$\hat{x}_k \approx \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_k^i \cdot x_k^i \quad (16)$$

Nous avons utilisé le filtre particulaire pour réaliser l'estimation de l'irradiance globale solaire sur un plan horizontal (Global Horizontal Irradiance - GHI, encore appelée irradiance solaire de surface - SSI). Dans cette étude, le processus caché, également défini comme la variable d'état cachée, est l'indice de clarté solaire. Nous avons choisi d'utiliser comme modèle d'évolution le modèle de génération d'irradiance solaire TAG (voir partie 1.2) et comme modèle d'observation le modèle 1 présenté en 1.3. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec le professeur Jamal Atif du Laboratoire Lamsade de l'Université de Paris-Dauphine.

J'ai développé et mis en œuvre un filtre particulaire SIR avec un vecteur d'état unidimensionnel et un pas de temps horaire. La variable d'état est considérée comme markovienne (l'état de la variable à l'instant  $k$  ne dépend que de l'état précédent ( $k-1$ )). Le choix de la distribution de départ des particules est celle d'un bruit blanc, et les particules de départ ont des poids uniformes. Nous avons vérifié la performance du filtre particulaire en mode estimateur. L'analyse de la précision de la méthode de filtrage particulaire sur une base horaire est faite par comparaison entre les estimations d'irradiance issues du filtre et les mesures in situ, en utilisant un schéma de validation croisée (Tableau 4).

Tableau 4. : Comparaison entre les moyennes horaires estimées et mesurées de l'irradiance globale horizontale obtenues avec une validation croisée pour le filtre particulaire

Stations	Correlation coefficient	Bias (%)	RMSE (%)
Saint-Georges	86%	6%	29%
Rochambeau	85%	2%	29%
Ile Royale	88%	-5%	27%
Kourou	88%	-5%	26%
Saint-Laurent	84%	3%	30%
Maripasoula	88%	1%	25%
Toutes stations	87%	4%	28%

Les résultats mettent en évidence la généralisation potentielle de la méthode tant dans une dimension spatiale que temporelle (faible sensibilité des résultats en fonction de la position des stations ou en fonction de la temporalité des simulations). La comparaison des résultats avec ceux obtenus avec d'autres méthodes d'estimation d'irradiance permet de vérifier la bonne concordance des erreurs statistiques. La capacité du modèle à reproduire des anomalies dans des séries temporelles d'irradiance est testée avec des résultats satisfaisants. La figure 5 présente les résultats des comparaisons entre estimations de l'irradiance issues du filtre particulaire et mesures in situ à une résolution journalière. Concernant la vérification du filtre particulaire en mode prédicteur, les simulations sont en cours dans le cadre de la thèse de Mouhamet Diallo, un doctorant sous mon encadrement qui vient d'arriver dans notre laboratoire et dont le sujet porte sur la prédiction solaire. Les simulations portent sur les prévisions à un horizon compris entre 1H et 7H en testant comme modèle d'évolution le modèle TAG amélioré décrit dans la sous-partie 1.2 de ce rapport (Critères d'information)

Au vu des résultats obtenus lors de l'exploitation du filtre particulaire en mode estimateur, l'utilisation d'un cadre bayésien récursif pour obtenir des estimations du rayonnement solaire en utilisant des observations satellites est pertinente. L'intérêt de l'utilisation du filtre particulaire réside



---

dans sa simplicité de mise en œuvre et dans la robustesse des résultats obtenus. En plus d'assurer la prédiction d'une série temporelle d'irradiance, le filtre particulaire permet l'estimation dynamique des valeurs manquantes. Cette méthode est suffisamment générique pour être étendue à d'autres processus, elle ouvre de nouvelles perspectives pour la prédiction et l'estimation de l'état de processus naturels associés à des ressources naturelles renouvelables.

## 1.5 Conclusion

En résumé, mes travaux sur la modélisation concernent principalement la formalisation de concepts et le développement d'algorithmes visant à construire des modèles permettant d'assurer le suivi (Simulation, Observation, Prédiction) d'une variable dynamique représentant un état d'une ressource naturelle renouvelable en utilisant le formalisme de la modélisation par espace d'état.

Nous avons fait le choix du filtre particulaire comme méthode de résolution du système à espace d'état parce que les processus mis en jeu sont fortement non linéaires et non gaussiens, et que le vecteur d'état est monodimensionnel. Dans ce contexte il a fallu améliorer les modèles d'évolution disponibles car l'étape de prédiction est réalisée à partir de la distribution du terme d'erreur des modèles, il a fallu poser le principe d'un modèle type d'observation rapide et simple à mettre en œuvre pour ne pas compromettre le coût computationnel et l'exploitation en temps réel de la méthode. J'ai implémenté chacun de ces modèles/algorithmes et je me suis assuré de leur consistance. Mes projets de conception de nouveaux algorithmes sont présentés dans la partie perspective. Ils concernent, l'étude de la prédiction de l'irradiance solaire à des échelles allant de 1H à 24H en utilisant le filtre particulaire développé dans cette partie. Je m'intéresse aussi au développement de modèles mathématiques qui intègrent un peu plus la complexité des processus dynamiques étudiés.

Le chapitre suivant est une synthèse des recherches que j'ai contribué à développer autour de l'estimation de la ressource dans le but d'en extraire des indicateurs utiles à son exploitation. Nous nous sommes intéressés au potentiel de l'irradiance solaire au sol exploitable dans la zone Nord de l'Amérique du Sud appelée le Plateau des Guyanes. Nous avons veillé à ce que les développements produits puissent déboucher sur une application industrielle. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas utilisé les algorithmes que j'ai développés car ils n'étaient pas les plus pertinents pour une mise en œuvre opérationnelle immédiate. Cependant la méthode utilisée a permis d'ouvrir d'autres perspectives de recherche.

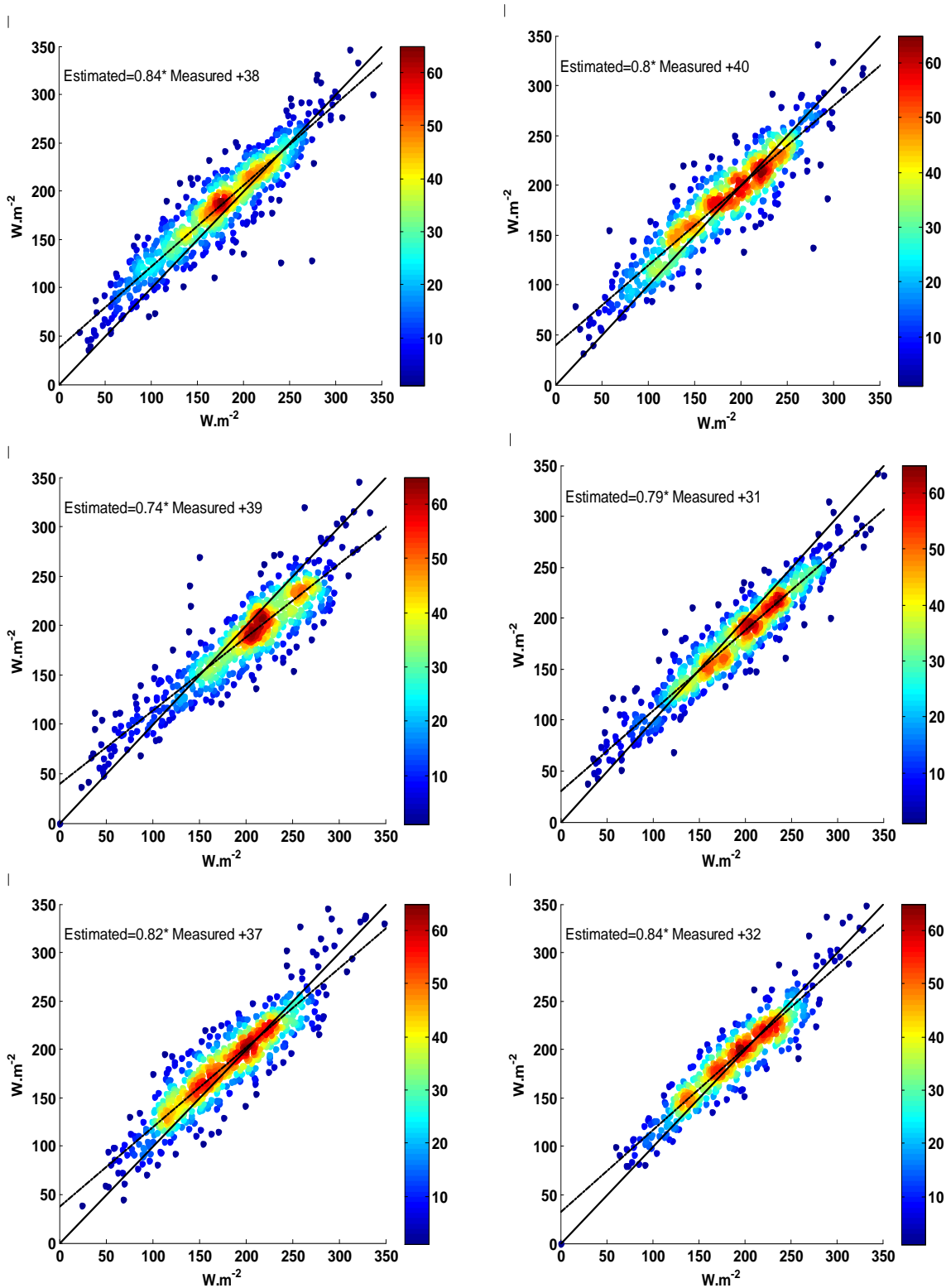


Figure 5.: Comparaisons entre les irradiances globales horizontales horaires estimées et mesurées en moyenne horaire pour les années 2010-2012-2013 avec 2011 prise comme année de calibration de la loi jointe.  
 (a) St-Georges (b) Rochambeau, (c) Ile Royale, (d) Kourou, (e) St-Laurent, (f) Maripasoula

### Publications associées

- 1. Identifying statistical properties of solar radiation models using information criteria**  
Linguet L., Pousset Y., Olivier C. Solar Energy, Vol. 132, pp 236–246, 2016,
- 2. Estimating solar surface irradiance from GOES satellite with particle filter and joint probability distribution**  
Linguet L., Atif J. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 41:2, pp. 71–85, 2015
- 3. A Markov Chain Monte Carlo-based Particle Filter Approach for Spatiotemporal Modelling of an Environmental Process".** Chapter In book: Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment. 2016. Springer International Publishing  
Linguet L., Atif J.
- 4. Application of Kernel Density Estimation for Mapping of Solar Potential in French Guiana.**  
Linguet L., Albarelo T., Marie-Joseph I., Atif J. En cours de soumission

## PARTIE 2. ESTIMATION DE LA RESSOURCE

La connaissance de la ressource énergétique liée à une source naturelle renouvelable est une condition indispensable au développement des énergies renouvelables. Cette connaissance se justifie par le besoin de disposer d'informations sur le gisement énergétique exploitable au sol (potentiel). Ces informations peuvent être de natures très diverses, elles peuvent prendre la forme de séries chronologiques ou de valeurs d'amplitude moyenne, de percentile, d'écart-type. Elles peuvent être de nature cartographique et représenter : la variabilité saisonnière du potentiel, les zones disposant d'un potentiel minimal exploitable, etc.

Identifier et faire connaître le potentiel des ressources en énergies renouvelables (solaire thermique et photovoltaïque, courants marins, géothermie, éolien, ...) d'un territoire présente de multiples intérêts. En mettant à la disposition des acteurs politiques et économiques des données sur le potentiel des ressources en énergies renouvelables d'un territoire on crée des conditions favorables à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, mais aussi à la dynamique du territoire et à la lutte contre le changement climatique. L'identification du potentiel des ressources en énergies renouvelables offre par exemple aux acteurs intéressés la possibilité d'établir un schéma de développement visant à développer tout ou partie du potentiel identifié afin de couvrir les consommations électriques des populations. Elle permet aussi de renforcer les politiques locales de soutien aux énergies renouvelables, par des mesures de sensibilisation, mais aussi économiques et réglementaires. Sur un plan plus technique, estimer la ressource permet de sélectionner les meilleurs sites d'implantation des systèmes de production énergétique afin de maximiser l'intrant et par conséquent l'exploitation de la ressource. Cela permet aussi de calculer des paramètres comme le rendement, l'efficacité, la productivité des systèmes d'exploitation, tous paramètres utiles à la mise en œuvre d'actions correctives visant à optimiser l'exploitation de la ressource. C'est donc pour ces raisons que l'estimation de la ressource doit être étudiée de manière très précise en vue d'optimiser tant la production que la productivité des systèmes d'exploitation d'énergies renouvelables.

Dans cette partie nous nous intéressons à l'estimation du potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes (région de plus d'un million et demi de km<sup>2</sup> qui réunit une partie du Vénézuéla, le Guyana, le Surinam, la Guyane Française et le Nord du Brésil). Dans cette région située à proximité de l'Equateur (3°S / 10°N), le rayonnement solaire reçu au sol semble abondant mais la présence d'un phénomène climatique appelé Zone Intertropicale de Convergence (ZIC, mousson) impacte fortement le rayonnement solaire en générant une couverture nuageuse et des précipitations importantes lors de son passage au-dessus des terres une à deux fois par an. Durant les périodes de transition ou pendant la présence de la ZIC les changements météorologiques sont rapides, fréquents parfois prolongés et induisent une très forte variabilité spatiale et temporelle du rayonnement solaire. Il est à noter que les systèmes de production d'énergie à base solaire sont peu développés dans cette région. En 2015, selon l'Agence Internationale des Energies Renouvelables (IRENA), la capacité maximale nette de puissance PV installée dans les pays qui composent le Plateau des Guyanes est de : 0 MW au Surinam, 2 MW au Guyana, 3 MW au Vénézuéla alors que la Guyane Française comptabilise 39 MW installés (IRENA, Renewable energy capacity statistic, 2015). Cet état de fait est sans doute lié au manque d'information sur la ressource car, selon nos recherches, il n'existe pas dans la littérature de connaissances publiées sur la ressource solaire dans cette région du monde.

Afin de combler cette lacune et répondre aux besoins précités, la seconde partie de mes travaux se concentre sur la recherche d'une solution méthodologique pour estimer le potentiel solaire sur la partie Nord du continent Sud-Américain (Plateau des Guyanes) à une haute résolution spatiale et temporelle. Pour cela, j'ai choisi une approche basée sur l'extension fonctionnelle d'une méthode actuellement exploitée avec le satellite Meteosat (zone Europe et Afrique) afin d'étendre son exploitabilité au satellite GOES (zone Amérique). Dans le cadre de la thèse de Tommy Albarelo, nous avons réalisé l'optimisation de cette méthode afin de proposer des estimations du potentiel 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, mais aussi l'extraction d'informations pertinentes dans les résultats produits afin de construire des indicateurs liés à l'exploitation de l'énergie solaire au sol. Nous avons d'abord évalué les estimations d'irradiance sur la Guyane faites avec des images du satellite Meteosat, puis nous avons procédé à la modification de l'algorithme et à l'optimisation de la méthode en vue de son exploitation avec des images du satellite géostationnaire GOES. Enfin nous avons appliqué la méthode optimisée pour produire des indicateurs relatifs au potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes.

Tous les travaux de cette partie ont été réalisés en collaboration avec le professeur Lucien Wald du Centre "Observation, Impacts, Énergie" de MINES ParisTech, à Sophia Antipolis.

## 2.1 Etat de l'art des méthodes opérationnelles existantes

Nous présentons succinctement les méthodes d'estimation de l'irradiance solaire basées sur des images satellites citées dans la littérature et susceptibles de produire des données sur la Guyane.

### 2.2.1 La méthode HELIOSAT-2

L'algorithme Heliosat-2 a été conçu en 2000/2001 par le groupe "Télédétection & Modélisation" du Centre d'Energétique de l'École des Mines de Paris, en collaboration avec plusieurs partenaires européens (projet SoDa, contrat DG "INFSO" IST-1999-12245 <http://www.soda-is.com>) Les bibliothèques de programmes constituant le logiciel ont été développées en langage C pour des stations UNIX et sont en accès libre sur le site web <http://www.oie.mines-paristech.fr/Valorisation/Outils/>.

L'algorithme convertit des images acquises dans le canal du visible du capteur Meteosat en cartes d'irradiance globale reçue au sol. La méthode originale Heliosat (Cano et al., 1986; Beyer et al., 1996) est basée sur le principe selon lequel un changement dans la couverture nuageuse au-dessus du sol affecte l'irradiance globale atteignant cette surface. Cette relation de dépendance a été traduite par une régression linéaire entre l'indice d'enneuagement,  $n$ , et l'indice de clarté,  $K_t$ , (voir Table des indices, page 4) de la forme :  $K_t = a.n + b$ .

Par la suite, Beyer (1996) a remplacé  $K_t$  par l'indice de ciel clair ( $K_c$ ), ce qui simplifie l'approche avec des résultats sensiblement identiques. Puis Rigollier en 2000 a proposé une nouvelle évolution de la méthode désormais appelée "Heliosat-2".

#### Description sommaire de la méthode Heliosat-2 :

La donnée d'entrée de la méthode consiste en une image satellite dont les comptes numériques (CN) des pixels de l'image satellite sont calibrés en luminance ( $L$ ). Ces valeurs de luminance sont ensuite converties en valeurs de réflectance ( $r_{sat}$ ) comme suit :

$$r_{sat} = \frac{\pi.L}{I_{0sat} \cdot \varepsilon \cdot \cos(\theta_s)} \quad (17)$$

où  $L$  est la luminance observée par le satellite ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ),  $I_{0sat}$  est l'irradiance totale sur le canal visible pour les capteurs Meteosat ( $\text{W.m}^{-2}$ ),  $\varepsilon$  est la distance Terre-Soleil et le facteur de correction  $\theta_s$  est l'angle zénithal ( $^\circ$ ). Puis la réflectance est convertie en albédo apparent ( $\rho$ ), (on parle d'albédo apparent car il s'agit de l'albédo du sol ayant subi l'influence de l'atmosphère) :

$$\rho = \frac{r_{sat} - \rho_{am}}{T(\theta_s) \cdot I(\theta_v)} \quad (18)$$

où  $\rho_{atm}$  est l'albédo apparent de l'atmosphère,  $T(\theta_s)$  est la transmittance atmosphérique descendante,  $T(\theta_v)$  est la transmittance ascendante,  $\theta_s$  est l'angle zénithal du soleil et  $\theta_v$  est l'angle de visée du satellite.

L'indice d'ennuagement ( $n$ ) est ensuite calculé en utilisant la formule présentée en page 4 (Tables des indices). L'albédo du sol qui intervient dans la formule de  $n$  est obtenu pour chaque pixel par sélection du 2° minimum dans une série temporelle de réflectance d'une trentaine de jours.

L'albédo des nuages est obtenu par la formule de Rigollier (2004):

$$\rho_c = \frac{\rho_{eff} - \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi)}{T(\theta_s)T(\theta_v)} \quad (19)$$

$$\rho_{eff} = 0.85 - 0.13 \left[ 1 - e^{-4(\cos(\theta_s))^5} \right] \quad (20)$$

avec  $\rho_{eff}$  est l'albédo effectif des nuages. Deux contraintes supplémentaires limitent les valeurs d'albédo des nuages :

$$\begin{aligned} \text{Si } \rho_c < 0.2, \quad \rho_c &= 0.2 \\ \text{Si } \rho_c > 2.24 \rho_{eff}, \quad \rho_c &= 2.24 \rho_{eff} \end{aligned} \quad (21)$$

Après le calcul de  $n$ , intervient le calcul de l'indice de ciel clair ( $Kc$ ) (Beyer et al., 1996; Hammer et al., 2003)

$$\begin{aligned} n \leq -0.2 & \quad Kc=1.2 \\ -0.2 < n \leq 0.8 & \quad Kc=1-n \\ 0.8 < n \leq 1.1 & \quad Kc=2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ 1.1 < n & \quad Kc=0.05 \quad n \leq -0.2 \quad Kc = 1.2 \end{aligned} \quad (27)$$

Les valeurs de GHI horaires ( $Gh$ ) sont ensuite calculées en utilisant la formule suivante:

$$G_h = Kc * G_{ch} \quad (22)$$

où  $G_{ch}$  est l'irradiance horaire ciel clair, calculée par le modèle ciel clair ESRA (Rigollier et al., 2000). Ce modèle intègre le coefficient de turbidité de Linke, ou Trouble de Linke, ( $TL$ ) qui décrit l'épaisseur optique d'une l'atmosphère pure sans nuage qui atténuerait le rayonnement direct tel que le fait l'atmosphère réelle par absorption et diffusion.

Cette méthode alimente la base de données HelioClim-3 (<http://www.soda-is.com/eng/index.html>) qui propose des données calculées toutes les quinze minutes à une résolution spatiale de 3 à 8 km. Les estimations d'irradiance journalière effectuées avec cette méthode présentent un biais moyen relatif de 5% et une erreur quadratique relative variant de 15 et 20% environ (Rigollier et al., 2004).

## 2.2.2 La méthode BRAZIL-SR

La méthode Brazil-SR a été développée par le Centre national de la recherche spatiale Brésilienne (INPE) et l'Université Fédérale de Santa Catarina (UFSC)/LABSOLAR (Martins et al., 2007). La méthode utilise des images du canal visible du satellite GOES pour estimer le rayonnement solaire au sol. Elle s'inspire du modèle de transfert radiatif IGMK de Moser & Raschke (1983) qui permet la prise en compte des multiples réflexions de l'irradiance solaire entre la surface terrestre et les couches de l'atmosphère. Elle utilise une approche "double flux" développée par Schmetz (1984) pour estimer la transmittance atmosphérique.

L'hypothèse de départ de la méthode stipule que les nuages sont le facteur le plus influent dans l'atténuation de l'irradiance solaire. L'objectif est donc de paramétrer l'influence des nuages (couvert nuageux, épaisseur optique) tandis que les autres contributions (aérosols, vapeur d'eau, ozone,

albédo de surface) sont considérées comme secondaires et peuvent être décrites par leur climatologie mensuelle. La valeur d'un pixel d'une image est convertie en valeur de luminance,  $L$ , puis transformée en un indice d'ennuage,  $n$ , au-dessus du pixel (voir Table des indices, page 4). Cet indice est associé aux valeurs limites de la transmittance atmosphérique :  $T_{nuageux}$  et  $T_{clair}$ , pour fournir une estimation de l'irradiance au sol ( $G_{sol}$ ) grâce à l'équation :

$$G_{sol} = [n * T_{nuageux} + (1 - n) * T_{clair}] * G_c \quad (23)$$

$G_0$  étant l'irradiance par ciel clair.

Cette méthode permet d'estimer l'irradiance journalière au sol à une résolution de 10km x 10km sur l'ensemble du Brésil avec un biais de 6% et une erreur quadratique (RMSE) égale à 13% (Viana et al., 2011). Cependant la méthode ne produit pas de résultats satisfaisants sous des atmosphères régulièrement ennuagées (au Nord du Brésil, en Amazonie par exemple) où l'erreur quadratique avoisine 40 %.

### 2.2.3 La méthode GEWEX SRB (Global Energy and Water Exchanges Surface Radiation Budget)

L'algorithme GEWEX SRB de Pinker & Laszlo (1992) estime l'irradiance solaire au sol en utilisant des paramètres astronomiques et climatologiques obtenus à partir de données au sol et de mesures satellites sur l'ensemble de la planète :

- Angle solaire zénithal
- quantité d'ozone
- quantité de vapeur d'eau
- taux d'aérosols
- albédo,

Ces paramètres sont intégrés dans un modèle de transfert radiatif (Delta-Eddington) pour établir une bibliothèque de valeurs de transmittance et de réflectance. La connaissance de la luminance observée par le capteur satellite à un instant  $k$ , permet d'estimer la transmittance de l'atmosphère et de l'encadrer par deux transmittances pré-calculées de la bibliothèque. A partir des valeurs de la bibliothèque de valeurs, on peut alors estimer le rayonnement au sol et en procédant par itérations successives grâce à l'équation suivante :

$$G = T_s \cdot I_0 \cdot \cos \theta_z \quad (24)$$

avec :

$\theta_z$  : angle zénithal solaire

$I_0$  : rayonnement extraterrestre

$T_s$  : transmittance obtenue par itération et par encadrement par des valeurs pré-calculées incluses dans la bibliothèque

Les données produites par la méthode Gewex SRB sont accessibles via un service Web qui fournit des séries de données journalières à l'échelle mondiale (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>). Les images utilisées proviennent de divers satellites géostationnaires (GOES, Meteosat) et à orbite polaire (NOAA AVHRR). Les données climatologiques proviennent des projets ISCCP et CERES (satellite MODIS)

Les données d'irradiance produites ont une résolution de 1° x 1° (à peu près 100 km par 100km). Les moyennes d'irradiance journalières produites par la méthode SSE présentent les taux d'erreur suivants : Erreur de biais relative : -1.58 %, erreur quadratique relative : 20.57 % (Stackhouse et al., 2015).



## 2.2 Evaluation de la méthode Heliosat-2

La nécessité de produire des données d'irradiance sur toute la Guyane et sur la partie Nord-est de l'Amérique du Sud nous conduit à nous intéresser aux trois méthodes opérationnelles présentées ci-dessus. Nous choisissons la méthode qui propose la meilleure résolution spatiale et dont l'algorithme est accessible et libre de droit : Heliosat-2, bien que cette méthode utilise les images du satellite Meteosat (centré sur l'Afrique). Le champ de visée du satellite Meteosat comprend la zone Est de l'Amérique du Sud (Figure 6). Cette zone, qui contient aussi la Guyane (position :  $-54^\circ$  de longitude Ouest), est très excentrée par rapport à la position du satellite (position :  $0^\circ$  de longitude, Méridien de Greenwich) ce qui induit une augmentation importante de la masse d'air vue par le satellite au-dessus de la Guyane ainsi qu'une déformation importante de la zone vue par les pixels.

Nous décidons de procéder à l'évaluation de la qualité des données d'irradiance globale sur un plan horizontal (GHI) produites par l'algorithme Heliosat-2 avec les images Meteosat au-dessus de la Guyane (données accessibles à partir de la base de données Helioclim 3 - HC3) en réalisant une étude comparative entre les estimations HC3 et les valeurs d'irradiance in-situ mesurées par les stations météorologiques au sol de Guyane. Dans le cadre de cette étude, une collaboration démarre avec le professeur Lucien Wald de MINES Paris-Tech concepteur de la méthode Héliosat2 sur la base d'échanges d'informations et d'analyses. Cette étude est conduite avec le soutien de Mme Gobinddass recrutée en tant que post-doc sur ce projet et placée sous mon encadrement.

Tableau 5. : Latitude, longitude and altitude des stations de mesure in situ de Meteo France en Guyane.

Stations	Latitude ( $^\circ$ N)	Longitude ( $^\circ$ E)	Hauteur (m)
Saint-Georges	3.88	-51.8	6
Rochambeau	4.81	-52.37	4
Kourou	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

Les données de mesure in-situ exploitées dans le cadre de l'étude sont fournies par l'opérateur national Météo-France sur six stations de Guyane indiquées dans le Tableau 5.

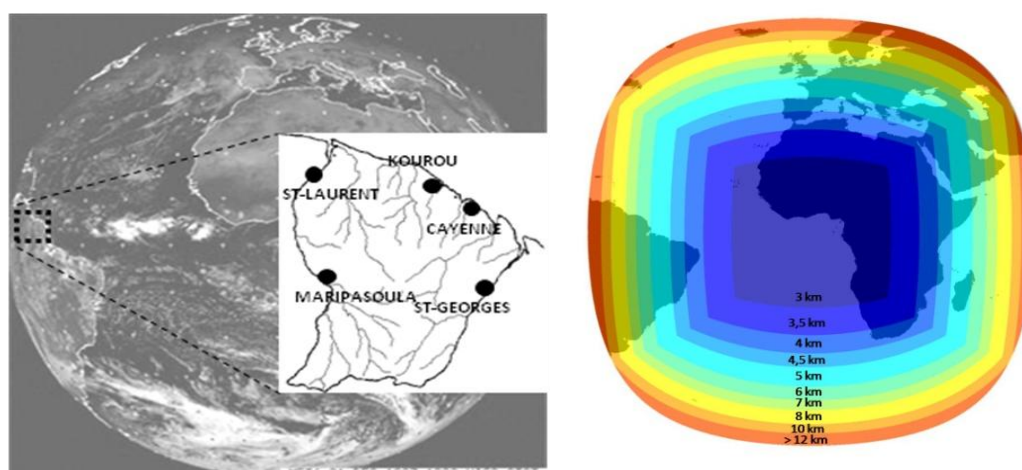


Figure 6. : Zone de couverture du satellite Meteosat SG-2 et taille des pixels (Copyright Mines ParisTech 2009)

La procédure de qualification des résultats issus des différents modèles d'estimation de l'irradiance fait intervenir le calcul d'indices statistiques tels que: le biais relatif à la moyenne des mesures, l'erreur quadratique moyenne relative exprimée en % par rapport à la moyenne des mesures (RMSE)



et le coefficient de corrélation, résultant de la comparaison entre séries de données estimées et séries de données mesurées. Il convient de rappeler que les deux séries chronologiques à comparer sont de nature différente : une est constituée de mesures de temps intégrée sur un point à la surface terrestre, l'autre correspond à des évaluations instantanées moyennées dans l'espace.

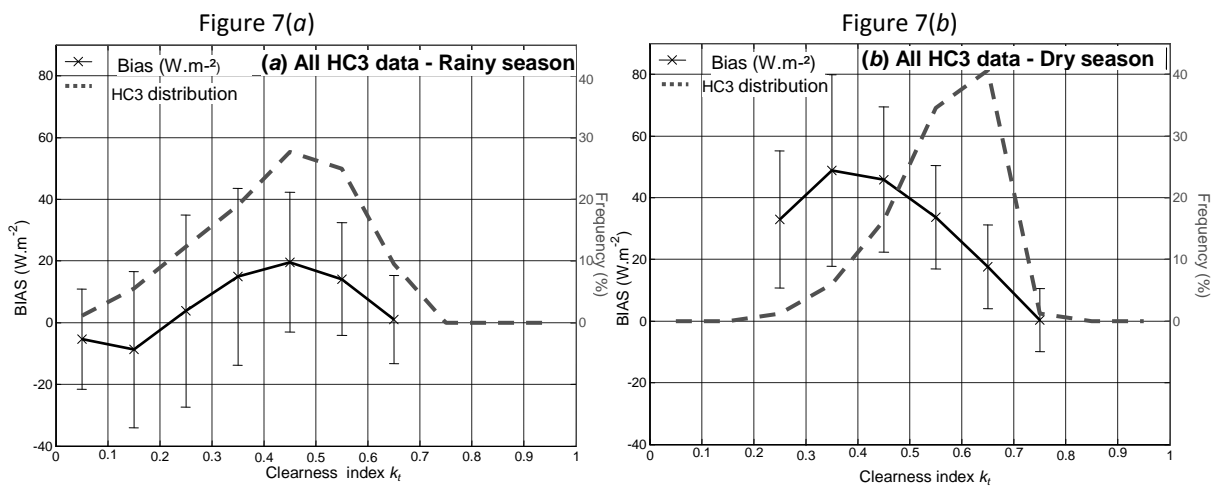


Figure 7.: Biais et fréquence de distribution selon l'indice de clarté ( $K_t$ ), (a) saison des pluies et (b) saison sèche

Différentes analyses basées sur la comparaison entre les moyennes de GHI estimées issues de la base HC-3 et des mesures in-situ sont conduites en fonction de plusieurs critères : situation géographique des sites, saisons climatiques, environnement des sites, irradiance moyenne des sites... Les résultats de ces différentes analyses ont permis de mettre en évidence certains paramètres qui influent de façon notable la précision de la méthode d'estimation.

Le calcul du biais moyen journalier sur l'ensemble des données de mesure est de 10% du GHI moyen mesuré, il change en fonction de l'année et de la saison. Cette valeur du biais est le double de celui prévu par la méthode (le RMSE est plus stable et se situe à environ 16% du GHI moyen mesuré).

Pour étudier les causes de variabilité de la précision des données HC-3, nous analysons les différences entre les estimations et les mesures en fonction du type de ciel. Le type de ciel est déterminé par l'indice de clarté :  $K_t$  (Voir page 4, Table des indices). La Figure 7 présente le biais et l'écart-type du GHI en fonction de l'indice de clarté pour toutes les stations, pour la saison des pluies (de la figure 7 (a)) et la saison sèche (figure 7 (b)).

Pour les deux saisons l'amplitude du biais n'est pas constante, elle prend la forme d'une courbe en forme de cloche qui atteint son maximum, pour un ciel partiellement ensoleillé ( $0,3 < K_t < 0,5$ ) et varie selon le type de ciel observé et le type de nuages de chaque saison

L'étude montre que les estimations HC-3 de la méthode Heliosat-2 avec des images Meteosat sont sensibles aux variations saisonnières et présentent un biais élevé. On formule l'hypothèse que l'amplitude des erreurs statistiques est liée aux grands angles de vision du satellite Meteosat par rapport aux stations étudiées. La position excentrée des stations par rapport au nadir du capteur de satellite peut contribuer à l'incertitude du biais parce que ce que le satellite voit n'est pas exactement ce qui se passe dans la colonne atmosphérique juste au-dessus d'une station.

Afin de réduire les incertitudes et améliorer la précision des estimations de l'irradiance nous avons décidé d'exploiter la méthode Heliosat-2 avec des images du satellite géostationnaire GOES positionné au-dessus du continent Amérique (75° Ouest) et qui offre de plus petits angles de vision de la Guyane Française.

## 2.3 Optimisation de la méthode Heliosat-2

Pour améliorer les estimations d'irradiance globale au sol sur la Guyane, la méthode Heliosat-II originale a été modifiée et optimisée afin qu'elle soit exploitable avec des images du satellite GOES codées en 8 bits. Cette tâche a été menée par T. Albarelo qui réalise une thèse sur la cartographie du potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes et dont j'assure l'encadrement. Ce travail a été effectué dans le cadre du projet Feder « SOLAREST ».

Le premier traitement appliqué aux images GOES afin qu'elles soient exploitables par la méthode Heliosat-2 consiste à calibrer les données des pixels en valeurs de radiance. La calibration des comptes numériques des pixels des images GOES en valeurs de radiance ne peut être appliquée qu'à des données en format 10 bits (Weinreb et al., 1997). Ainsi, les données 8 bits issues des images GOES doivent être converties en données sur 10 bits par la transformation non linéaire de l'équation (35) (D. Hillger, communication personnelle) :

$$CN_8 = 255 * \sqrt{\alpha} \quad (25)$$

où  $CN_8$  est le compte numérique à 8 bits et  $\alpha$  est le facteur de réflectance.

$$\alpha = k. L \quad (26)$$

$$L = m. CN_{10} + b \quad (27)$$

où  $k$ ,  $m$  et  $b$  sont des coefficients spécifiques GOES,  $L$  est le rayonnement normalisé ( $W / m^2.sr.\mu m$ ) et  $CN_{10}$  est le compte numérique codé sur 10-bit. En réorganisant les équations 35, 36 et 37, nous obtenons ce qui suit :

$$CN_{10} = \frac{\left( \frac{\left( \frac{CN_8}{255} \right)^2}{k} \right) - b}{m} \quad (28)$$

Pour les imageurs GOES-13, les coefficients utilisés sont les suivants (Weinreb et Han, 2009):

$$\begin{aligned} b &= -17,7428032 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1} \\ m &= 0.6118208 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}.\text{count}^{-1} \\ k &= 1,89544 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{sr}.\mu\text{m}.\text{W}^{-1} \end{aligned}$$

La figure 8 montre la comparaison entre les données de 8 bits et les données de 10 bits. Une fois converties de 8 bits à 10 bits, les données doivent être calibrées en valeurs de radiance. Deux formules de calibration des comptes numériques en valeurs de radiance existent. La première formule est fournie par la NOAA (Weinreb et al., 1997):

$$L_{NOAA} = g_0 (CN_{10} - CN_0) \quad (29)$$

$L_{NOAA}$  où est le rayonnement ( $W/m^2.sr.\mu m$ ),  $g_0$  est le gain initial,  $CN_{10}$  est le comptage numérique 10 bits et  $CN_0$  est un décalage d'offset (égal à 29 pour GOES imageur). La seconde formule est fournie par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Nguyen et al., 2004):

$$L_{NASA} = (g_2.d^2 + g_1.d + g_0) * (CN_{10} - CN_0) \quad (30)$$

où  $L_{NASA}$  est le rayonnement ( $W.m^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ ),  $g_0$  est le gain initial,  $g_1$  et  $g_2$  sont les termes polynomiaux du premier et deuxième ordre de la tendance du gain, respectivement,  $d$  est le nombre de jours depuis le lancement,  $CN_{10}$  est le comptage numérique 10 bits et  $CN_0$  est un décalage (égal à 29 pour le GOES imageur). Nous avons choisi la formule de la NASA (éq. 30) comme formule

d'étalonnage car elle offre l'avantage de corriger la dérive du capteur sur une base quotidienne car l'une des entrées est le nombre de jours depuis le lancement.

Une analyse de sensibilité est conduite afin de rechercher les paramètres susceptibles d'améliorer l'efficacité de la méthode Heliosat-2 exploitée avec des données issues du satellite GOES, elle a permis de sélectionner deux paramètres : l'albédo des nuages et le Trouble de Linke.

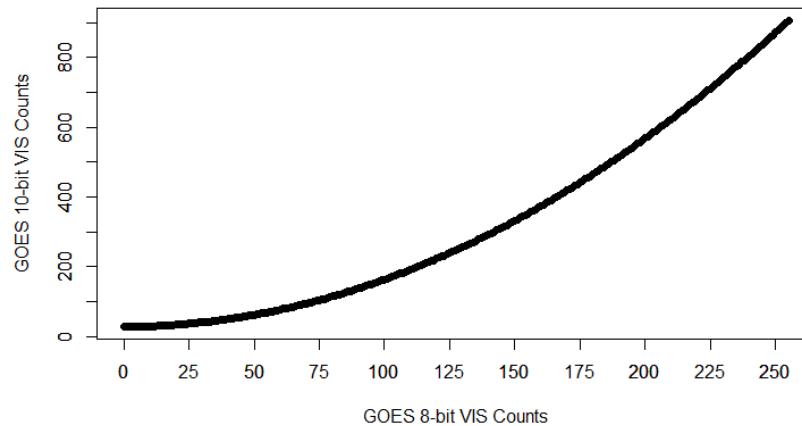


Figure 8.: Conversion non-linéaire entre données GOES 8-bit et données 10-bit.

Afin d'ajuster ces paramètres nous évaluons les performances de la méthode avec des images GOES en entrée en testant :

- 1- différents choix d'albédo des nuages,  $\rho_c$ , inspirés de ceux rencontrés dans la littérature:
  - $\rho_{c,eff}$  : valeur utilisée par Rigollier dans la méthode Heliosat-2 originale et calculée avec la formule de l'équation (25)
  - $\rho_{c,max}$  : valeur apparente maximale extraite d'une série d'images, valeur utilisée dans la méthode Heliosat originale
  - $\rho_{c,Q95}$  : valeur du 95e percentile des valeurs d'albédo apparentes extraites d'une série d'images, choix utilisé par Posselt et al. (2011) et Mueller et al. (2011)
- 2- différents choix pour le trouble de Linke,  $TL$  (paramètre décrivant l'atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère sous un ciel clair intervenant dans le modèle ciel clair de ESRA utilisé pour le calcul de  $G_c$  : irradiance par ciel clair)
  - $TL_{var}$  : trouble de Linke variable pour chaque site et chaque mois, en utilisant des valeurs mensuelles fournies par la base de données SoDa.
  - $TL_{fixe}$  : trouble de Linke fixe égal à la moyenne annuelle des valeurs mensuelles de toutes les stations au sol.

Les meilleures performances de la méthode sont obtenues pour  $\rho_{c,max}$  et  $TL_{fixe}$ , nous supposons que c'est à cause de la dynamique de la nébulosité en Guyane française qui semble mieux expliquée avec ces variables. Nous évaluons aussi la performance de la méthode Heliosat-II pour deux types de ciel: clair ou nuageux. La sélection des jours de ciel clair ou nuageux s'est faite sur la base de l'indice de clarté,  $K_t$ . Le Tableau 6 présente les résultats obtenus avec  $\rho_{c,max}$  choisi comme albédo des nuages, et  $TL_{fixe}$  choisi comme trouble de Linke.

Les estimations de la méthode sont meilleures par temps clair que durant les jours nuageux. La faible performance de la méthode pour les ciels nuageux peut être expliquée par deux facteurs :

- Selon Mueller et al. (2004), l'irradiance globale est surestimée parce la méthode intègre des informations redondantes sur la turbidité en comparaison avec un traitement séparé sur les types d'aérosol, la profondeur optique des aérosols et de la vapeur d'eau.
- Selon Dagestad (2004), le biais augmente lorsque la couverture nuageuse augmente en raison de la réflexion et la diffusion multiple. Quand les nuages sont épais au-dessus du sol, la GHI diminue en raison du phénomène d'absorption sans compensation de flux venant de la réflexion.

Tableau 6. : Estimations de l'irradiance selon les types de ciel

	BIAS (Wh/m <sup>2</sup> )	BIAS (%)	RMSE (Wh/m <sup>2</sup> )	RMSE (%)	r
<b>Jours de ciel clair</b>					
Saint Georges	3.66	0	73.05	13	0.96
Rochambeau	-2.76	-1	77.10	14	0.96
Kourou	-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
<b>Jours de ciel nuageux</b>					
Saint Georges	36.81	25	117.93	78	0.75
Rochambeau	32.29	20	111.95	67	0.77
Kourou	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

Nous comparons les GHI estimés avec le modèle Heliosat-2 appliqué à des images GOES, et les GHI estimées par Marie-Joseph et al. (2012) qui ont utilisé des données HelioClim-3 (application d'Heliosat-2 aux images Meteosat). Les résultats montrent que les valeurs de biais et de RMSE sont plus faibles avec l'utilisation de Heliosat-2 + images GOES, qu'avec Heliosat-2 + images Meteosat et rejoignent les taux d'erreur moyens de la méthode.

En conclusion à cette étude, les modifications de la méthode Heliosat-2 pour permettre son utilisation avec des images du satellite GOES portent sur : l'étalonnage, le calcul de l'albédo des nuages et les valeurs du trouble de turbidité Linke. Nous avons montré que l'utilisation de l'albédo apparent maximal comme albédo des nuages ( $\rho_c max$ ), l'utilisation d'une valeur fixe du facteur de turbidité Linke, produit les meilleurs résultats. Nous avons mis en évidence une meilleure qualité de la précision des estimations sur la Guyane avec les images du satellite GOES qu'avec les images du satellite Meteosat, ce qui montre que l'angle de vue du satellite a un impact sur l'exactitude des estimations : plus l'angle d'observation du satellite est faible, meilleure est la précision des estimations. En conclusion, l'utilisation de la méthode Heliosat-2 modifiée pour une utilisation avec des images GOES permet d'estimer l'irradiance globale solaire au sol avec une précision similaire aux estimations obtenues pour d'autres stations du monde avec la méthode Heliosat-2 et le satellite Meteosat.

## 2.4 Application de la méthode Heliosat-2 modifiée au Plateau des Guyanes

Nous décidons d'utiliser les modifications apportées à la méthode Heliosat pour produire de l'information pertinente sur la ressource solaire sur le Plateau des Guyanes en utilisant des images

GOES. Cette tâche a été conduite par E. Fillol recruté en tant que Post-Doc sur ce projet et placé sous ma direction.

Les données satellitaires utilisées pour cette étude sont issues du satellite météorologique géostationnaire américain GOES-13, en orbite à 74.5°W de longitude. Les images sont issues du canal visible (0,55 µm – 0,75 µm) et sont fournies toutes les 30 minutes environ, avec une résolution spatiale de 1km en latitude et 0.6km en longitude. Les images sélectionnées vont du 27 Avril 2010 jusqu'au 15 Juillet 2015 (5 ans et 2 mois 1/2), ce qui correspond à un volume de plus de 50 000 images, qui ont été fournies par la NOAA via le catalogue CLASS (Figure 9).

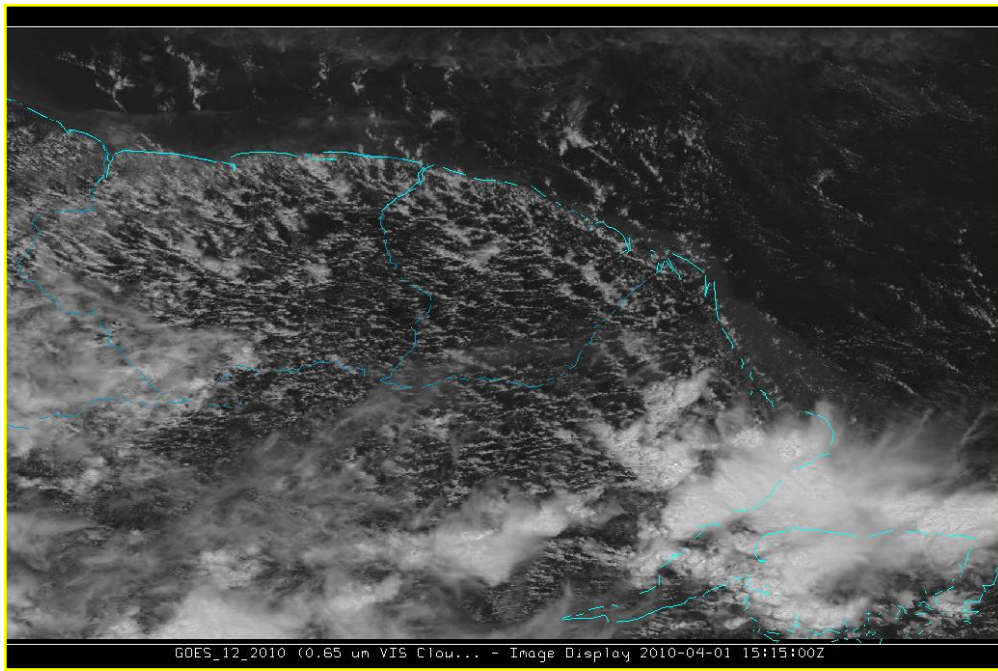


Figure 9. : Image prise par le satellite GOES EAST au-dessus de la Guyane

Les différentes étapes de calcul de la méthode Heliosat-2 sont effectuées en transformant les images brutes du catalogue CLASS en « cartes de variables », c'est-à-dire en des images constituées de chaque variable à chaque étape de la méthode (image brute -> image de Luminance -> image de Réflectance -> image d'indice de ciel clair, etc.) jusqu'à obtenir des images de  $K_c$  puis d'irradiance au sol. Dans le but d'obtenir des cartes de valeurs d'indice de ciel clair,  $K_c$ , à un temps  $k$  identique pour tous les pixels de l'image et avec un écart régulier entre les images d'exactly 30mn (à H+15mn et à H+45mn),  $K_c$  est ré-échantillonné par interpolation linéaire. Les valeurs de  $K_c$  manquantes en milieu de journée, dues à des erreurs d'acquisition satellite ou à des défauts du capteur satellite, sont interpolées. Seules les valeurs de  $K_c$  calculées pour un angle d'élévation solaire supérieure à 15° sont considérées valides. Le passage des valeurs de  $K_c$  discrètes à des valeurs intégrées sur une période de temps de 30 minutes (+/- 15 minutes) autour du pas de temps de l'image considérée se fait par une fonction convolution décrite par l'équation ci-dessous. On admet une évolution continue de la valeur de  $K_c$  entre les SLOT contiguës.

$$K_{c\_mean}(slot) = 0.25 * K_c(slot-1) + 0.50 * K_c(slot) + 0.25 * K_c(slot+1) \quad (31)$$

Pour construire une année moyenne, appelée « année type », les valeurs de  $K_c$  du même SLOT et du même jour de l'année sont moyennées sur toute la plage de l'étude. L'année type est calculée sur 365 jours et au pas de temps de 30 mn.

Tableau 7. : Comparaison des valeurs d'irradiance globale horaires estimées et mesurées pour tous les jours disponibles des années 2010 à 2013

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

La validation des estimations issues de la méthode Heliosat-2 optimisée est faite par comparaison avec des mesures d'irradiance globale in-situ issues de six stations de mesure situées en Guyane Française et gérées par l'organisme français de météorologie Météo France (Figure 10). Il n'y a pas, à notre connaissance, de stations de mesure d'irradiance globale au Guyana et au Surinam. Au Venezuela, bien qu'il y ait des stations de mesure d'irradiance globale, nous n'avons pas pu avoir accès à ces données.

Les erreurs statistiques calculées sur les 6 stations de Guyane (Tableau 7) sont conformes aux résultats obtenus avec la méthode Heliosat-2 sur d'autres zones géographiques (Lefèvre et al., 2007; Abdel Wahab et al. 2010 ; Blanc et al. 2011).

Nous créons plusieurs cartographies d'indicateurs liés à l'exploitation de l'irradiance solaire globale et directe. La figure 11 représente la cartographie du potentiel de production annuel lié à l'irradiance globale horizontale (GHI) moyenné entre 2010 et 2015. Cet indicateur renseigne sur la répartition spatiale du potentiel de production d'énergie photovoltaïque en moyenne annuelle. Cet indicateur correspond au nombre théorique d'heures dans l'année où une installation photovoltaïque fonctionnera à son rendement maximum. Plus cet indicateur est élevé, plus les installations photovoltaïques auront un rendement maximal, c'est à dire qu'elles produiront plus d'énergie. Cet indicateur est particulièrement utile car il permet d'affiner le dimensionnement des installations photovoltaïques en fonction de la zone d'implantation et de la quantité d'énergie à produire.

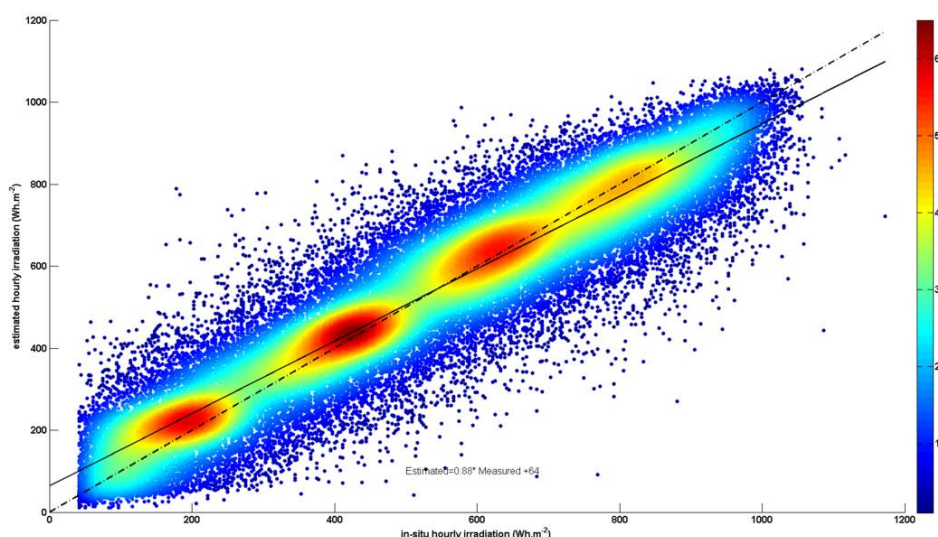


Figure 10. Comparaison de l'irradiance globale horaire estimée avec Heliosat-2 GOES et les mesures in-situ

Sur l'ensemble de la zone d'étude, les valeurs de GHI varient entre des moyennes quotidiennes de 4.46 à 5.48 kWh.m<sup>-2</sup>.jour<sup>-1</sup> avec une moyenne à 4.91 kWh.m<sup>-2</sup>. jour<sup>-1</sup>. Bien que le potentiel soit



inégalement réparti, du fait de la présence régulières de masses nuageuses sur le Plateau des Guyanes, les résultats montrent que la portée des valeurs de GHI du Plateau des Guyanes (entre 4,2 et 5,6 kWh.m<sup>-2</sup>. jour<sup>-1</sup>) est conforme bien que légèrement inférieure à la portée de valeurs de GHI de régions tropicales publiées dans d'autres. Le GHI moyen estimé tout au long de l'année (4.91 kWh.m<sup>-2</sup>. jour<sup>-1</sup>) est inférieur à celui de Myanmar et du Cambodge, qui est d'environ 5.1 kWh.m<sup>-2</sup>. jour<sup>-1</sup> (Janjai et al., 2013). Il est aussi inférieur à celui de Djibouti (5.92 kWh.m<sup>-2</sup>. jour<sup>-1</sup>) (Pillot et al., 2013). Les valeurs de GHI moyens mentionnés par Pereira et al. (2006) sur l'Atlas brésilien de l'Énergie Solaire rejoignent les valeurs que nous avons obtenues dans la figure 11, ce qui nous permet de considérer que les résultats obtenus sont cohérents.

La Figure 12 correspond à la cartographie de l'écart-type inter-journalier du potentiel solaire GHI lequel reflète la variabilité inter-journalière de la ressource solaire qui peut être utilisée à de multiples fins. Dans le contexte d'une production photovoltaïque la connaissance de l'écart type du potentiel solaire sur une zone donnée donne une information sur la variabilité de la production d'électricité photovoltaïque. Pour les d'installations raccordées au réseau, un écart type du potentiel solaire élevé est susceptible d'être à l'origine d'une grande instabilité de la production électrique injectée, ce qui peut compromettre la sécurité de la fourniture électrique et nécessite la mise en œuvre de moyens adaptés (systèmes de prédiction, stockage,.. par exemple).

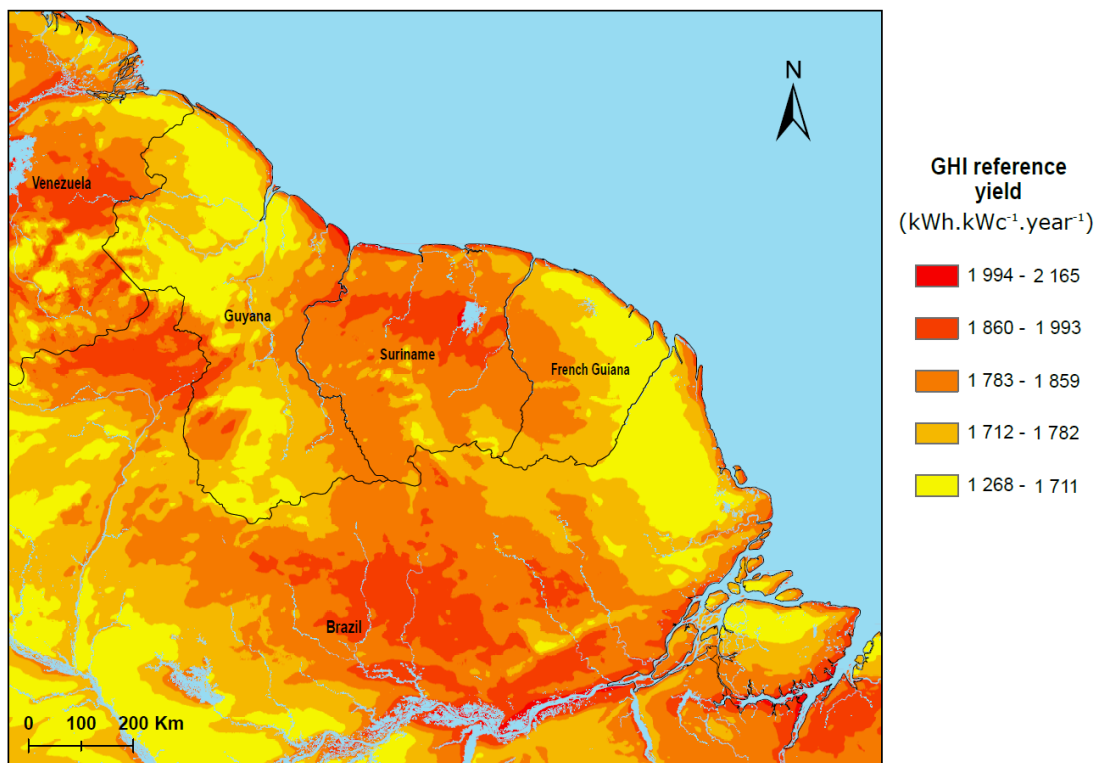


Figure 11. : Cartographie du potentiel de production moyen de 2010 à 2015

Enfin, la connaissance de l'écart-type inter-journalier est aussi un facteur d'aide à la décision pour le déploiement de centrales solaires dans une région donnée. En effet, plusieurs études montrent que dans les zones où la variabilité du potentiel solaire est importante il est préférable de déployer plusieurs centrales de petites puissances plutôt qu'une seule centrale de grande puissance (ex : 9 centrales de 1,1 MW plutôt qu'une centrale de 10 MW) (IRENA, 2015) car le réseau électrique absorbe mieux les variations du potentiel solaire à cause du "foisonnement" de la ressource solaire. La Figure 13 représente un indicateur d'orientation dont la valeur correspond au rapport entre l'énergie reçue avant et après le midi solaire (rapport AM/PM) pour chaque pixel. Cet indicateur permet de connaître les orientations pour lesquelles le potentiel solaire est maximal en fonction de

la période de la journée (avant le midi solaire ou après le midi solaire). Dans les zones indiquées en marron, le rapport AM/PM est supérieur à 1, cela correspond à un surplus d'énergie reçu avant le midi solaire : une exploitation optimale de la ressource solaire nécessite de privilégier une orientation des capteurs solaires vers l'Est (dans le cas de systèmes solaires à orientation fixe). Dans les zones indiquées en vert, le rapport AM/PM est inférieur à 0,8, cela correspond à un surplus d'énergie reçu après le midi solaire et une exploitation optimale de la ressource solaire tendrait à privilégier une orientation vers l'Ouest.

Bien entendu, cet indicateur d'orientation ne donne qu'une information sommaire sur l'angle optimal d'orientation et un réglage plus précis de l'orientation des capteurs solaires doit être envisagé afin de maximiser le rendement de tout projet de production d'énergie à partir de la ressource solaire. Les résultats présentés dans cette section sont en cours de publication.

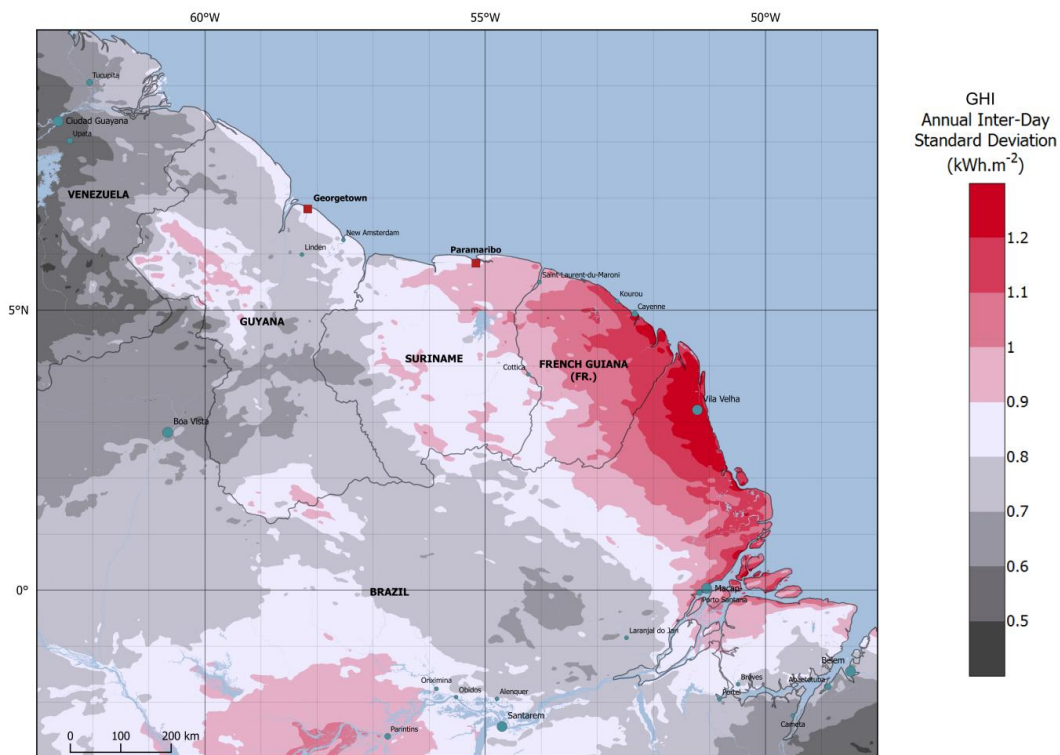


Figure 12. : Cartographie de la variabilité inter journalière de l'irradiance globale



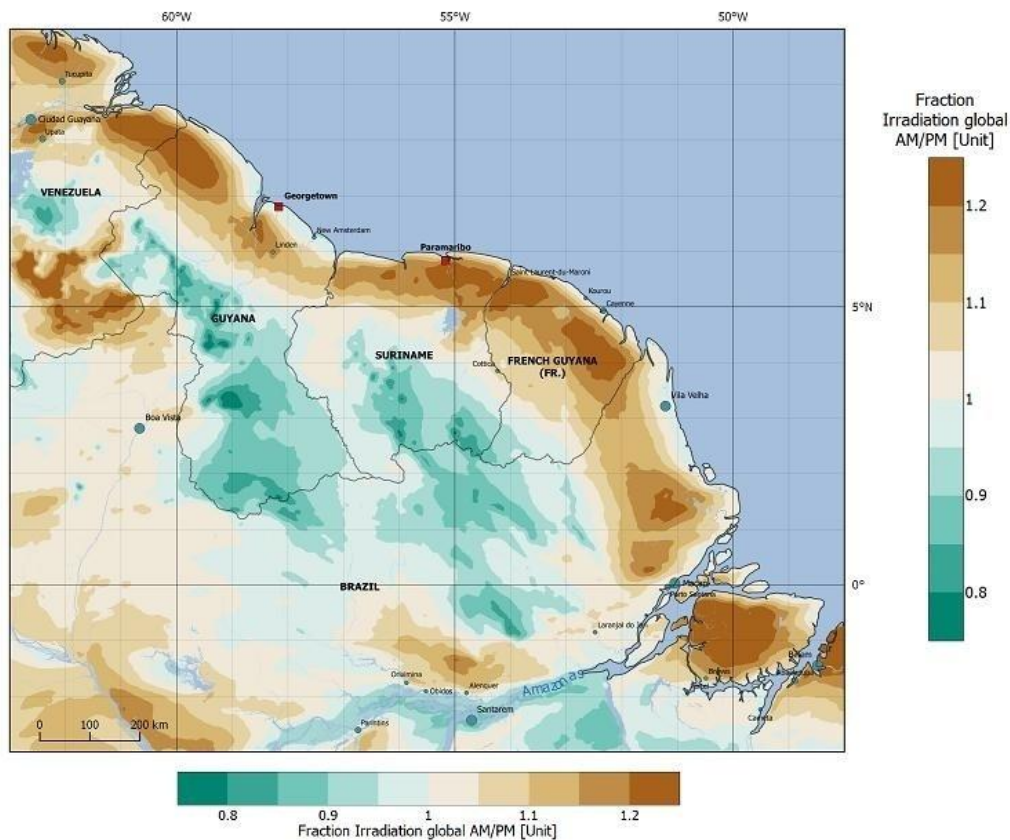


Figure 13. : Carte du rapport entre le GHI annuel moyen avant et après le midi solaire

## 2.5 Conclusion

La connaissance du potentiel lié à une ressource naturelle renouvelable est nécessaire pour le bon dimensionnement des systèmes de production à énergie renouvelable, le choix de leur emplacement et l'optimisation des différents transferts d'énergie.

La solution méthodologique mise en œuvre pour produire de la connaissance sur le potentiel solaire sur le Plateau des Guyanes comprend trois étapes : i- Evaluation de la méthode Heliosat-2 originale sur la Guyane, ii- Optimisation de la méthode Heliosat-2 avec des images satellites GOES et validation des modifications apportées iii Application de la méthode optimisée pour produire des indicateurs sur le potentiel solaire.

Nous avons mis en œuvre des techniques employées en Télédétection afin de produire les premières données spatiotemporelles sur le potentiel solaire sur la zone du Plateau des Guyanes à haute résolution spatiale (1 km) et temporelle (30 mn). Des séries temporelles d'irradiance solaire globale et d'irradiance directe ont été créées pour l'ensemble du plateau des Guyanes de 2010 à 2015 avec une précision comparable à celle des méthodes d'estimation existantes. Nous avons mis en évidence que les estimations du potentiel solaire par satellite sont sensibles aux variations saisonnières ainsi qu'aux types de ciel. L'extraction d'informations pertinentes dans les données produites a aussi permis de construire des indicateurs utiles à l'exploitation de l'énergie solaire au sol comme : la variabilité inter journalière, le potentiel de production ou la proportion d'énergie reçue entre le matin et l'après-midi. Ces données seront par la suite utiles pour mener des analyses de productivité sur les systèmes de production photovoltaïques.

Les analyses et travaux réalisés ouvrent la voie à l'exploitation opérationnelle de la méthode Heliosat-2 sur la zone Amérique avec les images du satellite GOES.

Dans la troisième partie du rapport, nous abordons le thème de la production d'énergie photovoltaïque en contexte isolé amazonien, nous présentons les études menées et les résultats obtenus qui visent à l'amélioration de la productivité des systèmes photovoltaïques sur les sites isolés de Guyane.

#### **Publications associées**

- 1. Optimizing the Heliosat-2 Method for Surface Solar Irradiation Estimation with GOES Images**  
T. Albarelo, I. Marie-Joseph, A. Primerose, F. Seyler, L. Wald, L. Linguet, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 41:86, pp–100, 2015, doi:10.1080/07038992.2015.1040876
- 2. On the applicability of the Heliosat-2 method to assess surface solar irradiance in the Intertropical Convergence Zone, French Guiana**  
I. Marie-Joseph, L. Linguet, M-L Gobindass, L. Wald, International Journal of Remote Sensing, Vol. 34, Issue 8, pp.3012-3027, 2013, doi: 10.1080/01431161.2012.756598
- 3. Assessment of Solar irradiation in the Guiana Shield derived from GOES satellite.**  
T. Albarelo, E. Fillol, A. Primerose, L. Linguet. En cours de publication

### **PARTIE 3. OPTIMISATION DE LA PRODUCTIVITE**

Dans cette partie nous nous intéressons aux systèmes photovoltaïques (PV) en sites isolés en milieu amazonien, dans le contexte de la Guyane. Contrairement à d'autres régions françaises, la situation électrique de la Guyane Française se distingue par une nette dichotomie entre le littoral et l'intérieur (voir Figure 15). Le littoral dispose d'un réseau de transport électrique qui s'apparente aux systèmes insulaires des autres DOM, tandis que l'intérieur de la Guyane, avec ses communes isolées où vivent 29 086 habitants en 2015 (15% de la population), n'est pas raccordé au réseau de transport électrique du littoral. Chacune des communes de l'intérieur dispose de son propre « système électrique isolé » constitué de groupes électrogènes, soit centralisés, soit individuels. Il en découle une situation de grande fragilité avec un important recours aux hydrocarbures ce qui génère de fortes contraintes liées à des coûts d'exploitation élevés et à la difficulté à garantir un service de qualité (pollution, approvisionnements irréguliers de carburant, rupture de la production...)

La problématique de l'accès à l'énergie des communes isolées de Guyane est une problématique qui a toujours existé, et c'est à la suite de la Conférence de Rio, en 1982, que la région Guyane et ses partenaires (Ademe, EDF Guyane) sensibles au concept de développement durable et à la préservation de l'environnement ont engagé les premières initiatives visant à intégrer les énergies renouvelables (solaire principalement) dans les moyens de production d'énergie électrique des zones non connectées. Cette politique a conduit durant ces trente dernières années à la mise en œuvre d'une succession d'expérimentations et d'implantations de systèmes photovoltaïques en sites isolés dont les résultats sont mitigés. L'absence de solution fiable à ce jour pour résoudre la problématique de l'électrification des sites isolés en Guyane nous a conduit à rechercher les causes de cette situation et à proposer des voies d'amélioration.

La troisième partie de mes travaux se concentre sur l'analyse et l'optimisation de la productivité des systèmes PV en sites isolés en Guyane. Nous présentons les travaux que nous avons menés dans l'objectif :

1. d'identifier les contraintes liées à la productivité des systèmes photovoltaïques en sites isolés,
2. d'apporter des éléments de réponses aux difficultés liées à ces contraintes,
3. de formuler et proposer des recommandations (Architectures et gestion des flux énergétiques)

Les questions de recherche abordées sont : Quels sont les facteurs qui conditionnent la productivité des systèmes PV ? Quels comparatifs peut-on faire avec les autres systèmes PV installés dans le monde ? Quelles sont les recommandations pour une bonne gestion opérationnelle et la maintenance ? D'autres questionnements d'ordre sociologique ont aussi été abordés notamment d'une part les facteurs comportementaux des consommateurs (et/ou producteurs) qui impactent la productivité des systèmes solaires et d'autre part l'acceptabilité.

Les résultats présentés donnent un aperçu de la performance des systèmes solaires en contexte amazonien dans des conditions réelles d'exploitation. Les défis liés à la mise en œuvre et à l'exploitation de systèmes solaires en sites isolés sont soulignés et des recommandations sont faites. Les résultats révèlent que tant l'aspect technique que l'aspect social jouent un rôle important dans la conception, la maintenance et le fonctionnement des systèmes solaires dans un tel contexte. L'objectif de nos recherches en la matière est de faire passer la Guyane du statut de territoire d'expérimentation à celui de territoire à énergie positive, et par voie de conséquence créateur d'activités et d'emplois.

Les travaux menés dans cette partie sont le fruit de collaborations entre EDF Guyane, l'Ademe Guyane et notre laboratoire sur la production d'énergie photovoltaïque dans le contexte des sites isolés de Guyane.

### 3.1 Situation électrique de la Guyane

Située dans la partie Nord-est de l'Amazonie entre 2 et 5° Nord, la Guyane possède un climat équatorial humide caractérisé par deux saisons des pluies, une de deux à trois mois et une autre de trois à quatre mois. Territoire d'une superficie de 83 000 km<sup>2</sup> couvert à 80% par la forêt amazonienne, la Guyane compte officiellement 250 000 habitants environ. Elle connaît une situation quasi insulaire de par son éloignement avec le continent européen mais aussi compte tenu du peu de connexions électriques avec ses pays voisins. Autre singularité, la population de la Guyane est en forte croissance (+3,6% par an, la plus forte des régions de France) et devrait atteindre 400 000 habitants d'ici 2030. Sur le plan énergétique, l'augmentation de la demande est donc liée à la démographie mais aussi à l'augmentation du taux d'équipement des ménages, la consommation d'électricité suit ainsi une croissance régulière de 3 à 4% par an. En 2014, le mix de la production électrique livrée au réseau guyanais se décompose comme indiqué dans le Tableau 8 et la figure 14. Les moyens de production électrique sont principalement thermiques et hydrauliques.

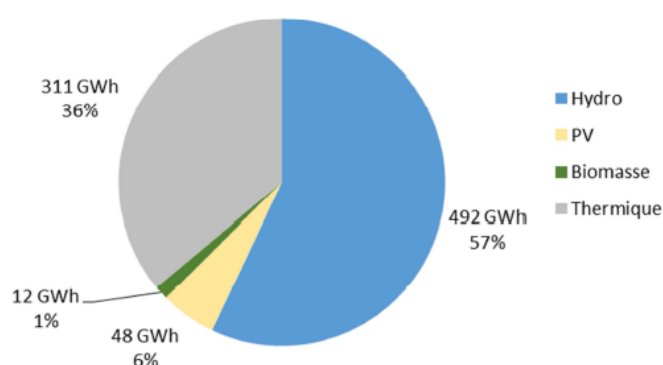


Figure 14. : Répartition du mix de production d'électricité livrée au réseau en 2014 (source : EDF)

Tableau 8. : Moyens de production électrique installés en Guyane

Producteur	Site	Type	Fonctionnement PCN (MW)
EDF		Centrales thermiques :	127,4 MW
EDF	Petit Saut	Hydraulique	120 MW
Volitalia	La Mana	Hydraulique	4,5 MW
Volitalia	Kourou	Biomasse	1,7 MW
(Multiples)	Photovoltaïque	Intermittent	34 MWc
<b>TOTAL</b>			<b>247,2 MW</b>

Le réseau électrique guyanais est composé d'un réseau de transport organisé le long de la frange littorale et de systèmes indépendants les uns des autres pour les communes de l'intérieur et les écarts (Figure 15). En effet, 35% de la population des communes de l'intérieur n'est aujourd'hui pas alimentée par le réseau électrique principal, de nombreux bourgs et écarts sont électriquement isolés. La production électrique des communes de l'intérieur se fait essentiellement à partir de centrales fonctionnant au diesel constituées d'une ou plusieurs unités de production d'électricité dont la capacité maximale n'excède pas le seuil de 2 MW fixé par le décret n°2004-46 du 6 janvier 2004. Dans certains bourgs isolés des moyens autres que thermiques existent : les générateurs photovoltaïques individuels à Saül, centrale hybride photovoltaïque-diesel à Kaw. La production électrique des communes de l'intérieur non raccordées au réseau s'élève à 17 GWh en 2014. Les coûts de production de l'énergie électrique en sites isolés non connectés au réseau sont très élevés. A cause des difficultés liées à l'éloignement et à l'accessibilité les coûts d'approvisionnement en combustible fossile varient entre 1200 €/MWh et 1300 €/MWh (à comparer avec les coûts moyens de 50€ le MWh).

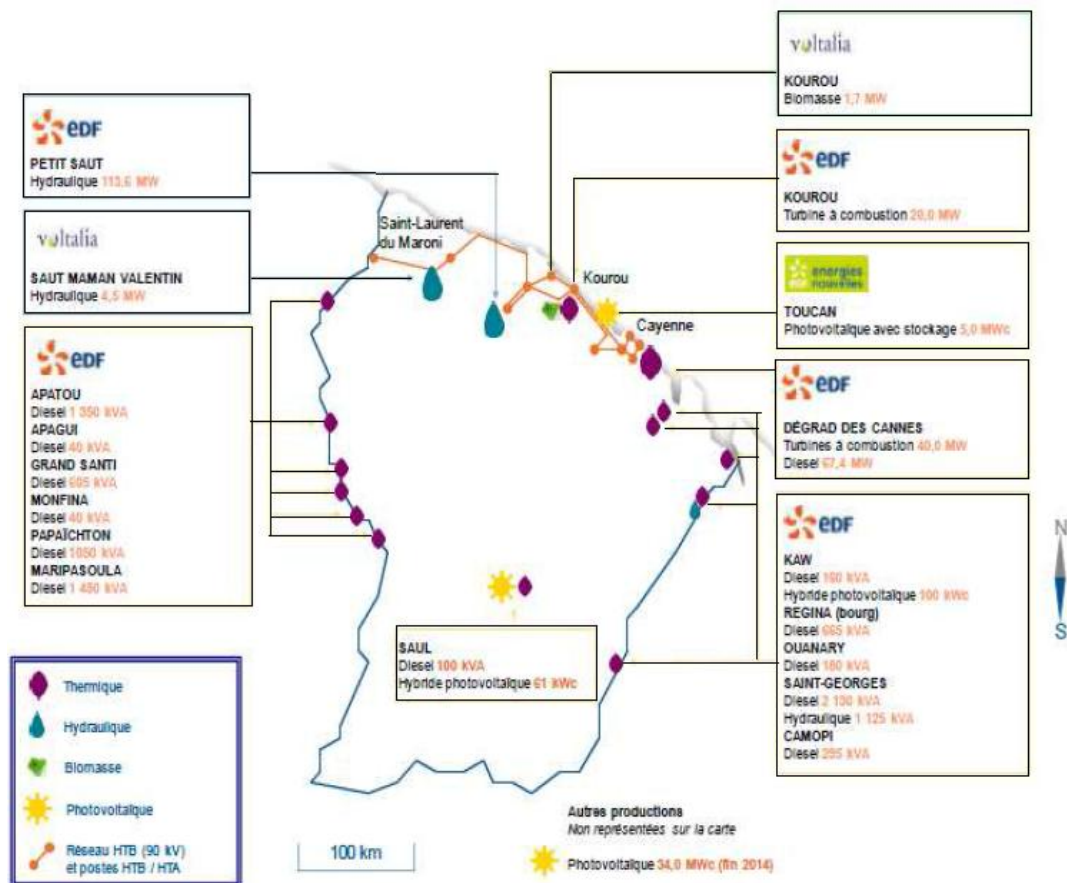


Figure 15. Schéma du système électrique de la Guyane (source EDF, 2015)

De par leur enclavement, certains sites ne sont accessibles que par voie fluviale ou aérienne par hélicoptère ce qui entraîne un renchérissement des coûts de transport et un risque de rupture d'approvisionnement. Développer les énergies renouvelables dans ces bourgs permettrait d'obtenir des coûts de production plus compétitifs et réduiraient les consommations importantes de produits pétroliers servant à alimenter les groupes électrogènes encore trop nombreux.

C'est une option qui a retenu toute l'attention des pouvoirs publics car en 2016 dans le cadre des compétences qui lui sont conférées la Collectivité Territoriale de Guyane a élaboré sa Programmation Pluri annuelle de l'Energie (PPE) avec trois objectifs forts: la valorisation des ressources naturelles renouvelables locales (le photovoltaïque, l'hydraulique, notamment au fil de l'eau, la biomasse), la sécurité de l'approvisionnement énergétique et en électricité, le développement de solutions adaptées à l'attention des territoires isolés.

### 3.2 Bilan des expérimentations de systèmes photovoltaïques en Guyane

Cette section traite du bilan des opérations liées à l'installation de systèmes photovoltaïques en sites isolés en Guyane menées par l'Ademe et EDF Guyane, et pour lesquelles nous avons apporté nos compétences en termes d'analyse du fonctionnement et des performances des systèmes installés. L'approche que nous avons utilisée a consisté au relevé des données de fonctionnement des systèmes sur les sites de production, en l'analyse des données de consommation et de production, au calcul de rendements, d'indices de performance et à la recherche des causes de dysfonctionnement. Au final, l'analyse de la succession d'"expérimentations" d'installations de systèmes photovoltaïques (domestiques ou centralisés (village de Kaw) ou mixtes (village de Saül voir

Figure 16)) en sites isolés en Guyane de 1983 à 2010, les difficultés de fonctionnement et les résultats mitigés obtenus, montrent que la question de la production d'énergie photovoltaïque en contexte amazonien est une question complexe qui ne peut être résolue par une simple approche technique. Les problèmes que nous avons relevés sur de multiples installations sont liés à des facteurs récurrents qui conditionnent la productivité et le bon fonctionnement des installations PV en sites isolés. Nous en déduisons que les performances sont dépendantes de ces facteurs et que leur insuffisante prise en compte par les concepteurs de systèmes s'est traduite par de multiples difficultés d'intégration du photovoltaïque en sites isolés. Nous avons dressé la liste des facteurs identifiés à partir desquels il importe de construire des recommandations, conditions minimales au succès de toute nouvelle initiative :

- la maintenance des systèmes photovoltaïques
- le climat, le potentiel solaire et sa variabilité
- la sociologie de l'utilisateur : l'évaluation de sa demande, l'acceptation, l'utilisation de l'outil photovoltaïque

Ce sont ces facteurs techniques et humains ainsi que leurs impacts sur la productivité d'une installation photovoltaïque qui ont constitué nos enjeux de recherche. Ces enjeux sont suffisamment importants pour constituer des écueils au bon fonctionnement de la technologie photovoltaïque en sites isolés et limiter l'accès à l'électricité à de nombreuses populations alors que le potentiel solaire existe. Nous présentons ci-après les résultats des études et recherches menées qui illustrent les contraintes identifiées.

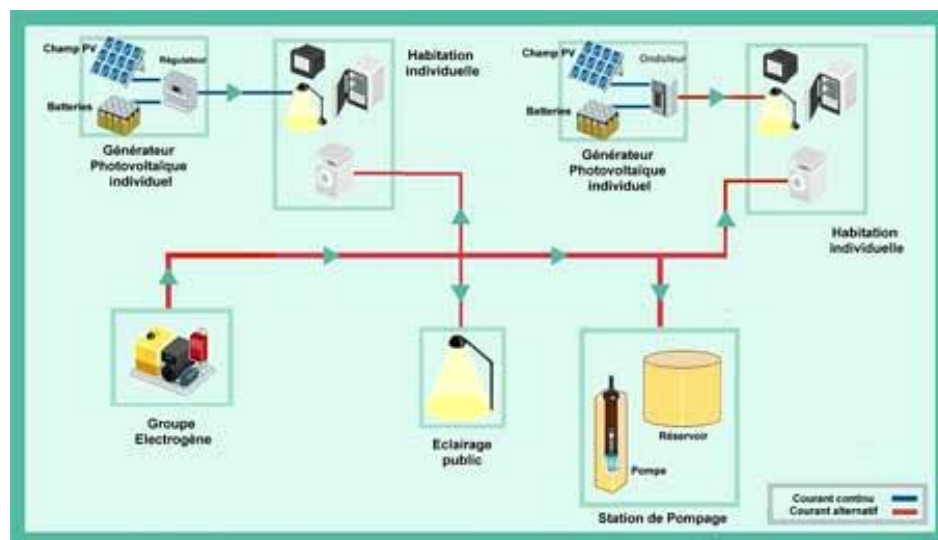


Figure 16. Schéma du mini réseau électrique du village de Saül (Guyane Française)

### 3.3 Amélioration de la productivité d'une centrale hybride photovoltaïque-diesel en site isolé

En 2010, la recherche d'une solution viable et pérenne pour la fourniture d'énergie décentralisée, non connectée au réseau, a conduit l'opérateur EDF et ses partenaires (Ademe, Région) à définir et à réaliser un prototype de centrale hybride photovoltaïque-diesel destiné à être déployé sur une dizaine de sites isolés de Guyane. EDF et ses partenaires tirant des expériences passées les enseignements indispensables décident de réaliser dans le village de Kaw (environ 100 habitants) un prototype de centrale censé répondre de façon satisfaisante (en termes de service public) aux besoins des utilisateurs tout en étant mieux adapté aux contraintes identifiées. La nouvelle centrale hybride de Kaw est un cas unique : à sa création elle est la plus grande centrale photovoltaïque



autonome en site isolé du monde et constitue donc un exemple de ce qui peut se faire en matière de production d'énergie renouvelable.

Le souhait de disposer d'un retour d'expérience a conduit EDF et l'Ademe à solliciter notre laboratoire pour la réalisation d'une étude visant à analyser les défauts survenus au cours de la première année de fonctionnement et à proposer des recommandations afin d'assurer le bon fonctionnement de cette centrale prototype en sites isolés. Je présente ici les résultats de l'étude qui a été réalisée par un groupe d'enseignants-chercheurs et dont j'ai assuré l'encadrement scientifique. La centrale hybride photovoltaïque-diesel associe un champ photovoltaïque à deux groupes électrogènes d'une puissance nominale de 80 kW chacun. Le champ photovoltaïque de la centrale hybride est constitué de 628 modules de 160 Wc de marque "Webel solar" en silicium monocristallin et la surface totale couverte par les panneaux photovoltaïques de 720,74m<sup>2</sup>. La puissance nominale (puissance crête) calculée à partir des puissances nominales unitaires des modules annoncées par les constructeurs est donc de 100 480 Wc. Le champ photovoltaïque est composé de plusieurs kits photovoltaïques type raccordé réseau qui produisent en parallèle sur un bus triphasé – 400 V. On appelle kit photovoltaïque (kit PV) un ensemble de modules photovoltaïques et l'onduleur associé qui assure la connexion au réseau comme indiqué dans la figure 17.

- Les onduleurs photovoltaïques

Les onduleurs photovoltaïques ont une puissance unitaire nominale maximale de 8 kVA, monophasé. Les onduleurs sont de type raccordé réseau, capables de fonctionner en parallèle avec le réseau de distribution d'électricité du village de Kaw. Chaque onduleur est donc connecté à un groupe de 4 panneaux photovoltaïques, afin de constituer 1 kit photovoltaïque.

- Stockage / Caractéristiques des batteries d'accumulateurs

Le stockage batterie a une capacité totale de 26 200 Ah C10 en 48 V et est constitué de 24 parcs batteries de 1 090 AhC10 en 48 V chacun. Ce total de 24 parcs batteries est partagé en 4 groupes modulaires. Chacun de ces groupes (qui comprend donc 6 parcs batteries) est connecté à trois onduleurs réversibles (un onduleur maître et deux onduleurs esclaves) que l'on appelle 'cluster'. Le cluster n°1 est le super cluster, il assure le pilotage des groupes électrogènes ainsi que la mesure de leurs caractéristiques de fonctionnement (Figure 18).

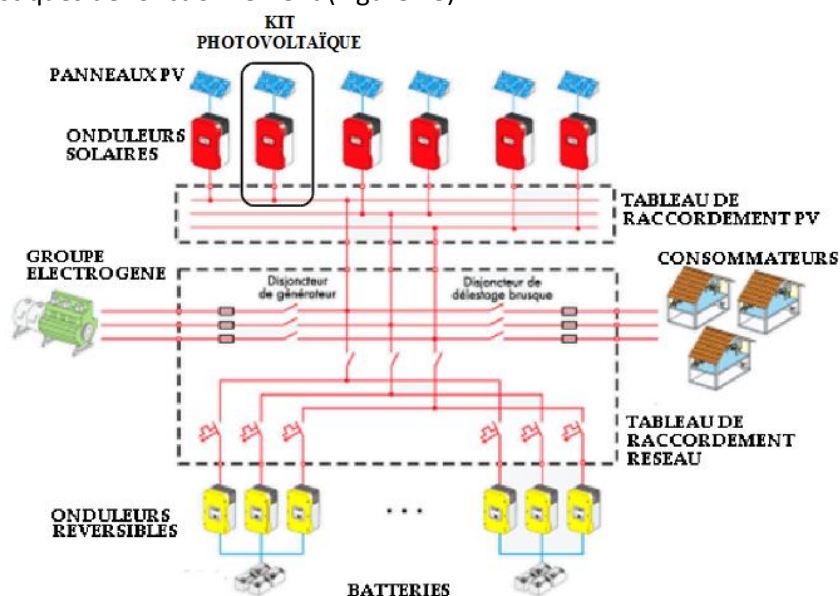


Figure 17. : Synoptique de la centrale

La commande du groupe électrogène est programmée pour palier à l'insuffisance de charge des batteries :



- état de charge des batteries inférieur à 70% à 16h : mise en route du groupe de 16h à 19h
- état de charge des batteries inférieur à 50% à 16h : mise en route du groupe jusqu'à 70% de l'état de charge
- état de charge des batteries inférieur à 40% à toute heure de la journée : mise en route du groupe jusqu'à obtention d'un état de charge précédemment exposé, et reprise des procédures antérieures.
- état de charge des batteries supérieur à 90% : Arrêt après 21h

- Onduleurs réversibles

Dans chaque cluster, un onduleur maître assure le contrôle du bus triphasé 400 V et aussi :

1. la synchronisation des onduleurs en parallèle sur une même phase
2. le déphasage des onduleurs pour réaliser le réseau triphasé
3. la commande de démarrage du groupe électrogène de service
4. l'homogénéité des puissances fournies par les onduleurs sur une même phase pour une décharge homogène des parcs batteries,
5. l'homogénéité des puissances appelées en mode chargeur pour garantir un niveau de charge équivalent des parcs batteries à tout moment.

Les deux autres onduleurs d'un cluster (appelés onduleurs esclaves) assurent les transferts d'énergies sur les autres phases du réseau en assurant :

1. la stabilité en tension et fréquence du bus triphasé 400 V,
2. la fourniture de puissance au réseau à partir de l'énergie stockée par les batteries
3. la recharge des batteries à partir de l'énergie injectée sur le réseau par la centrale photovoltaïque et les groupes électrogènes

Les systèmes d'acquisition de données Energrid (marque TENESOL) et Webbox (marque SMA) permettent d'assurer l'enregistrement de nombreux paramètres parmi lesquels les grandeurs de production des onduleurs (Tension Courant, Energie,...), l'exposition énergétique (kWh/m<sup>2</sup>), etc.

Les données enregistrées sur une année de mesure (du mois de juin 2009 au mois de mai 2010) sont analysées pour évaluer la performance de la centrale. L'énergie photovoltaïque produite et injectée sur le réseau durant cette année est de 73 345 kWh/an soit 51% de la production d'électricité injectée sur le réseau qui s'élève à 143 814 kWh/an. Sur l'année étudiée, l'irradiation solaire annuelle est de 1496.5 kWh/m<sup>2</sup>/an, soit une irradiation globale quotidienne moyenne de 4,10 kWh/m<sup>2</sup>/jour. L'énergie absorbée par l'ensemble des panneaux correspond à une irradiation solaire annuelle totale d'environ 1 GWh/an. En vue d'évaluer la performance de la partie photovoltaïque de la centrale, les quantités d'énergie sont normalisées par rapport à la puissance du champ photovoltaïque nominal (en accord avec la norme IEC 61724 de l'IEA). Les grandeurs suivantes sont calculées: le rendement final (Y<sub>F</sub>), le potentiel de production (Y<sub>R</sub>), l'indice de performance (PR) et le facteur de capacité (FC). Nous donnons leur définition ci-dessous.

- **Potentiel de production (Reference yield Y<sub>R</sub> ou Nombre d'heure équivalent)**

Le potentiel de production correspond au rapport entre l'irradiation solaire annuelle mesurée sur les panneaux de la centrale PV (kWh/m<sup>2</sup>) et la puissance théorique délivrée par m<sup>2</sup> de module (1000W/m<sup>2</sup>). Ce nombre correspond au nombre d'heure d'équivalence de fonctionnement à la puissance crête de l'installation. On le calcule ainsi :

$$Y_R = \text{irradiation solaire (kWh/m}^2\text{)} / \text{puissance théorique par m}^2\text{ de module (kWc/m}^2\text{)}$$

$$Y_R = 1496.5 \text{ heures}$$

- **Rendement final (Final yield Y<sub>F</sub>)**

Le rendement final est défini comme la production annuelle d'énergie de la centrale PV injectée sur le réseau alternatif divisée par la puissance crête de la centrale PV dans des conditions de test standard (STC) de 1000 W/m<sup>2</sup>. Il donne le productible annuel en kWh, ramené à l'unité de puissance kilowatt crête. Son unité est le kWh/kWc/an.

$$Y_F = \text{production annuelle (kWh)} / \text{puissance crête de la centrale PV (kWc)}$$

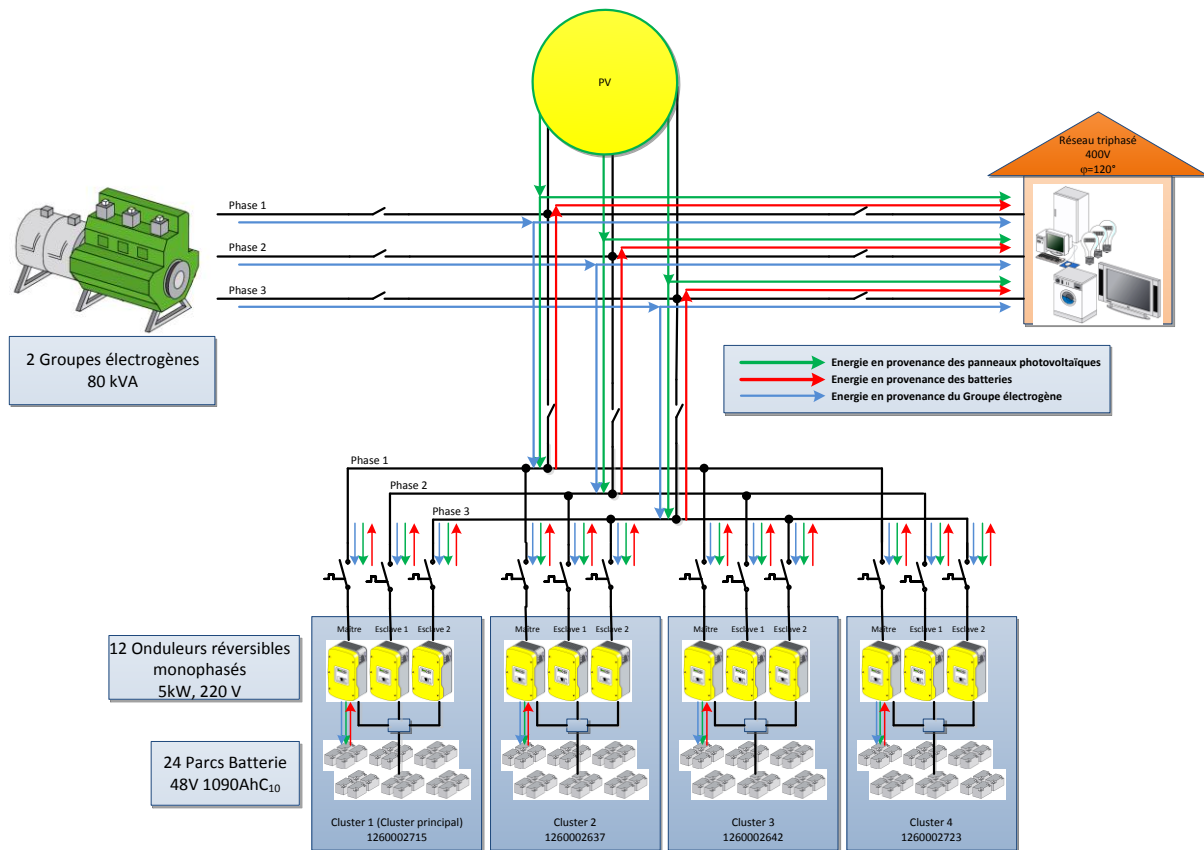


Figure 18. : Schéma de transfert d'énergie des clusters au réseau de distribution (ensemble onduleur réversible + parc batteries)

- **Productible théorique**

Le Productible théorique est égal à la puissance crête du générateur photovoltaïque multiplié par le potentiel de production :

$$P_{th} = \text{puissance crête du générateur (kW)} \times \text{potentiel de production}$$

$$P_{th} = 150\,368 \text{ kWh}$$

- **Facteur de capacité (FC)**

Le facteur de capacité est défini comme étant le rapport entre la production annuelle d'énergie et la quantité d'énergie que le parc photovoltaïque produirait s'il fonctionnait à pleine puissance nominale ( $P_r$ ) pendant 24 h par jour pendant un an. Selon plusieurs études de centrales solaires le facteur de capacité varie entre 16% et 20% (Doolla et Banerjee, 2010).

$$FC = \text{production annuelle d'énergie (kWh)} / \text{puissance crête centrale PV} \times 8760 \text{ (kWh)}$$

- **Indice de performance (Performance Ratio PR)**

C'est le rapport du productible réel sur le productible théorique aux conditions STC, ou encore le rapport du rendement final sur le rendement de référence. La mesure de l'indice de performance permet d'analyser la bonne santé d'une centrale indépendamment de l'irradiation reçue. Il représente la capacité de chaque watt crête de module photovoltaïque acheté, à produire un maximum d'énergie et ce indépendamment de la surface de pose. L'indice de performance permet de comparer des installations photovoltaïques à différents emplacements dans le monde entier.

$$PR = \text{Productible réel annuel (kWh)} / \text{productible théorique (kWh)}$$

Les systèmes photovoltaïques ayant un fonctionnement considéré comme correct font état d'un indice de performance ayant une valeur moyenne à peu près égale à 0,75, Les installations photovoltaïques les plus performantes atteignent un indice de performance pouvant aller jusqu'à 90 % (IEA, 2014 Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems).

- **Pertes totales (L)**

Les pertes d'énergie totales de la centrale photovoltaïque se produisent au niveau du capteur photovoltaïque et au niveau du système électrique (pertes de câblage, pertes dues aux onduleurs, aux diodes, dues à la défaillance d'un composant, etc..).

$$L = \text{rendement de référence} - \text{rendement final kWh}/(\text{kW-an})$$

### Identification des défauts:

La méthode utilisée pour la recherche des défauts est basée sur l'identification des pertes et des rendements des différents éléments de la centrale en les classifiant en groupes fonctionnels (Oozeki, 2003). Pour identifier les défauts entre éléments d'un même groupe fonctionnel, nous définissons et mettons en œuvre une méthode basée sur la comparaison des caractéristiques courant-tension de chaque élément appartenant à un groupe fonctionnel, puis nous identifions les modes de fonctionnement suspects en relevant les caractéristiques hors-gabarit associées à un rendement plus faible. Plusieurs types de défauts sont relevés. Les défauts de réalisation concernent en partie l'insuffisante prise en compte du climat et de son agressivité vis-à-vis des éléments de connexion électrique ce qui a conduit à la rupture de connectivité entre différents éléments de la centrale, notamment entre les panneaux photovoltaïques et les onduleurs PV. Conséquence : le champ photovoltaïque ne produit qu'au deux tiers (2/3) de sa capacité la première année de fonctionnement. On relève aussi que le réglage inadéquat des transferts d'énergie assurés par les onduleurs des clusters, réglage à l'origine d'une surproduction des groupes électrogènes (et de la sous-consommation de l'énergie photovoltaïque). Durant la première année, la proportion d'énergie photovoltaïque dans le bilan de production de la centrale hybride est de 51%. Parmi les défauts récurrents, près de 80% d'entre eux sont des défauts majeurs ayant entraîné l'arrêt d'un équipement de production (mais pas l'arrêt systématique de la production électrique) durant plusieurs heures avant qu'une intervention corrective ait lieu. Les défauts relevés sur la partie photovoltaïque représentent 40% du total des défauts. Les défauts relevés sur la partie thermique représentent 60% du total des défauts. Les causes des défauts ayant affectés la partie thermique ont été rapidement identifiées et corrigées, mais le diagnostic des pannes intervenues sur la partie photovoltaïque s'est révélé être plus délicat.

### Amélioration de la performance :

La méthode d'analyse de la performance de la centrale que nous avons mise en œuvre est basée sur l'utilisation de paramètres qui facilitent la comparaison des systèmes photovoltaïques (PV) indépendamment de leur conception, technologie, ou emplacement géographique. Ces paramètres définissent la performance globale du système par rapport à la production d'énergie, la ressource solaire, et l'ensemble des pertes globales du système (Jahn et al. 2003 ; Marion et al. 2005). Conduite un an après sa mise en service, l'analyse de la performance de la centrale hybride fait apparaître un niveau de sous production d'énergie photovoltaïque important : l'indice de performance moyen annuel est de 49% alors qu'il est de 70% en moyenne pour la plupart des centrales PV dans le monde à cette époque (IEA-PVPS, 2007). Suite à l'identification des défauts, les actions correctives permettent d'améliorer la productivité de la centrale hybride. La production totale d'énergie injectée sur le réseau alternatif passe alors à 143 845 kWh/an pour une irradiation solaire annuelle de 1503 kWh/m<sup>2</sup>/an tandis que la progression de la proportion d'énergie photovoltaïque dans le bilan de

production de la centrale passe de 51% à 68%. L'indice de performance moyen annuel passe de 49% à 65% et le rendement final annuel moyen est de 973 kWh/kWp (Tableau 9).

Tableau 9. : Comparaison des performances de la centrale solaire avant et après correction des défauts

Années	Conditions	P <sub>PV</sub> sortie kWh/an	Rend final kWh/kWp	FC	Pertes (L)	PR
2012	Avant correction	73 345	729	0.08	767,5	0.49
2013	Après correction	97 794	973	0.11	523,5	0.65

La comparaison de l'indice de performance de la centrale photovoltaïque avec d'autres indices de centrales PV installées (Tableau 10) dans le monde entier révèle cependant qu'il fait partie des indices les plus faibles. Environ 35 % de l'énergie rayonnée n'est pas utilisée, suite à des pertes de conductivité, des pertes thermiques ou des défauts sur les composants. La partie photovoltaïque pourrait produire davantage d'énergie, des études d'optimisation devraient être poursuivies afin de maximiser la production d'énergie photovoltaïque. La valeur élevée du rendement spécifique de l'installation indique que le dimensionnement du parc photovoltaïque de la centrale est correct.

Tableau 10. : Comparaison des performances avec d'autres centrales dans le monde

Localisation	P sortie kWp	PR	Rendt spec. kWh/kWp	Années	Référence
Thaïlande	500	0.70	–	2004	Chokmaviroj et al., 2006
Espagne	67.84	0.65	–	2007	Drif et al., 2007
Suède	60.4	0.75	800	1999- 2003	IEA, 2007
Allemagne	50.4	0.73	820	2002	Jahn and Nasse, 2003
Nottingham, UK	34	0.72	753	2001	IEA, 2007
Crète, Grèce	171.36	0.67	1336.4	2007	Kymakis et al., 2009
Inde	190	0.74	812.76	2013	Vikrant S. and Chandel, 2013
Kaw, Guyane	100	0.65	973	2012	Publication en cours

## Recommandations

Les recommandations font suite à l'analyse des défauts et visent à réduire des contraintes et à accroître les performances globales de la centrale en agissant sur les fonctions les plus critiques.

- 1- **Prendre en compte l'agressivité du climat** en contexte amazonien (100% d'humidité) en sélectionnant des composants robustes et de bonne qualité et en vérifiant régulièrement l'état des connexions électriques.
- 2- **Assurer la sécurité et la qualité de l'approvisionnement en gasoil des groupes thermiques :**
  - déployer un outil de gestion logistique de l'approvisionnement pour éviter les ruptures
  - Améliorer la logistique matérielle de la zone de dépotage des fûts de gasoil
  - Optimiser la configuration de la chaîne de transfert du carburant des fûts vers la citerne principale (en particulier l'emplacement de la centrifugeuse) en veillant à la simplicité des manœuvres et à la sécurité environnementale de la zone (éviter les fuites de carburant dans le sol)
- 3- **Optimiser la production photovoltaïque grâce à une meilleure gestion des flux de production photovoltaïque et thermique :**

- Développer des outils d'optimisation basés sur l'analyse des séquences de production d'énergie des panneaux photovoltaïques et des séquences d'affectation des énergies produites (PV, thermique injectées sur le réseau ou dans les batteries) afin d'optimiser l'utilisation de la ressource solaire.
- 4- **Mettre en œuvre une maintenance de type conditionnelle (prévisionnelle) afin d'assurer une meilleure disponibilité de la centrale** en se basant sur la réception des données des centrales d'acquisition :
- Transmission en temps quasi-réel des données de fonctionnement enregistrées par les automates de la centrale aux personnels chargés de la maintenance
  - Sélection, parmi les paramètres de fonctionnement, d'événements révélateurs de l'état de dégradation d'un (ou plusieurs) équipement(s) de la centrale
  - Elaboration d'un outil d'aide à la maintenance basé sur les données de fonctionnement transmises à distance et les événements présélectionnés

Toutes les préconisations sus-énoncées ont été reprises et mises en œuvre par l'exploitant EDF dans le cadre de la création de cinq nouvelles centrales photovoltaïques réalisées sur le modèle prototype précédemment décrit. Dans la perspective d'un partenariat avec EDF Guyane pour le suivi des nouvelles centrales hybrides en cours de réalisation, nous avons décidé de faire évoluer l'approche que nous avons menée à travers la mise en œuvre des nouvelles tâches suivantes :

- Développement d'une simulation numérique de la centrale prototype pour disposer de mesures de références, pour simuler de nouveaux modes de gestion afin d'optimiser la production.
- Développement d'un algorithme de détection des défauts basé sur des méthodes d'apprentissage et de classification des défauts pour assurer la maintenance préventive.
- Développement d'algorithmes pour optimiser la gestion des flux énergétiques de la centrale prototype (cas d'un micro-réseau).

### 3.4 Sociologie et analyse de la productivité des systèmes photovoltaïques domestiques

En situation réelle, la productivité des systèmes PV ne s'énonce pas seulement en termes techniques, elle est aussi dépendante des modes d'utilisation et inclue donc le facteur humain. Il est donc important de mener une étude sur les interactions entre les profils socioculturels, les attentes des populations et les performances des systèmes PV. J'ai donc proposé de conduire un projet de recherche sur cette problématique avec l'appui d'Isabelle Hidair, enseignant-chercheur en socio-anthropologie rattachée à l'Université des Antilles et de la Guyane. La méthode utilisée est basée sur une double approche mêlant enquête sociologique et analyse des paramètres de production afin d'identifier les inter-relations et les interactions entre comportements humains et productivité des systèmes.

Une centaine d'habitations équipées de systèmes photovoltaïques domestiques installés par l'Ademe et EDF, répartie sur cinq sites isolés de Guyane (Favard, Saül, Roura, Saint-Laurent, Apatou) fait l'objet de cette étude. Les caractéristiques des systèmes PV sont les suivantes : sur chaque site les installations étudiées sont de dimensions similaires. La puissance des systèmes sur les sites de Favard et Saül est de 1200 Wc (12 m<sup>2</sup> de panneaux PV), la puissance des systèmes installés à Apatou, Saint-Laurent et Roura est de 1500 Wc (15 m<sup>2</sup> de panneaux PV). Chaque site abrite des usagers appartenant à un groupe culturel différent : amérindien, noir-marron (descendants d'esclaves échappés), créole (descendants d'esclaves libérés) et européen. L'enquête aborde les questionnements relatifs à l'introduction et l'utilisation des équipements photovoltaïques par des populations de culture différente de la culture occidentale.

### 3.4.1 Impact du dimensionnement et des usages

Le premier volet de l'étude consiste à analyser les interactions entre le potentiel solaire, les groupes culturels et la productivité des installations photovoltaïques. Pour cela nous procédons à l'étude des corrélations entre données relatives à l'irradiation mesurée sur sites et données de production enregistrées par les systèmes d'acquisition de chacun des systèmes PV.

L'analyse du potentiel solaire sur les différents sites de l'étude (obtenu grâce aux résultats des études menées dans la partie 2 de cette synthèse) permet de découvrir que les systèmes de 1200 Wc ont été installés dans des sites où le potentiel solaire est le plus faible tandis que les systèmes de 1500 Wc ont été installés dans des sites où le potentiel est plus élevé. Cette méconnaissance du potentiel a conduit à un dimensionnement insuffisant sur Saul et Favard ce qui a eu comme conséquence : une consommation d'énergie associée aux systèmes de 1200 Wc deux fois inférieure à celle des systèmes de 1500 Wc.

L'analyse des défauts relevés sur les installations PV quelques années après leur mise en service indique que les systèmes utilisés par les populations non occidentalisées (Apatou, Favard) sont ceux dont la productivité est la plus faible car faisant l'objet du plus grand nombre de défauts de fonctionnement des batteries indépendamment de la puissance des systèmes. On relève un taux de défauts de 80%, une faible capacité de stockage des batteries, les systèmes PV ne fournissant de l'énergie qu'en journée ensoleillée. On peut en déduire que le mode d'usage des systèmes PV sur ces sites semble à terme porter atteinte à leur productivité. Une solution pour éviter la détérioration rapide du système est de renseigner l'utilisateur sur la fragilité et le suivi de l'état du système PV (charge de la batterie) et de le former à sa maintenance, car cette méconnaissance semble induire une détérioration rapide de la capacité de stockage.

Une campagne de mesure de la consommation des différents appareils électroménagers a aussi été effectuée. Parmi les appareillages électriques présents dans les habitations l'étude montre que plus de 70 % des besoins en électricité sert à alimenter des appareils de froid (réfrigérateur et congélateurs). L'analyse des consommations électriques des appareils montre que la consommation des appareils de froid (réfrigérateur, congélateur même de catégorie A+) est de 40 à 70% plus importante que celle annoncée par les constructeurs (étiquette énergétique) Cela est en grande partie dû aux différences climatiques des conditions de test et d'usage ainsi qu'aux besoins en conservation plus importants sous les tropiques. Cette surconsommation lorsqu'elle n'est pas prise en compte se traduit par un sous-dimensionnement des systèmes PV et une production insuffisante d'énergie pour faire face aux besoins de l'utilisateur.

### 3.4.2 Acceptabilité des systèmes photovoltaïques domestiques

Le second volet de l'étude concerne l'acceptabilité des systèmes photovoltaïques. L'analyse des enquêtes sociologiques conduites fait ressortir que l'introduction de technologies nouvelles au sein de populations d'origines socioculturelles différentes provoque des réponses spécifiques qu'il convient de prendre en compte très tôt et qu'il faut éviter de négliger au risque de susciter des réactions de rejet de la technologie et de ses acteurs. Pour illustrer notre propos, on peut citer les exemples suivants :

- Sur le village de Saül, on constate que l'insuffisance de l'énergie potentielle disponible semble être à l'origine d'une sensible dégradation des performances des installations solaires. La différence entre performances annoncées et réelles, la volonté des installateurs de maintenir ce choix de production en dépit des faibles performances semble avoir produit une attitude de rejet de la technologie parmi la population de Saul, majoritairement composée de créoles.

- Sur le village de Favard dont la population est exclusivement amérindienne, un faible potentiel énergétique solaire et un taux de défauts important sur les batteries dès les premières années de fonctionnement ont provoqué le rejet de la technologie et le rejet de toutes formes de contraintes (accords, paiement)
- Sur le village d'Apatou dont la population est exclusivement d'origine noir-marronne, un fort potentiel énergétique disponible les premières années de fonctionnement a certainement séduit et convaincu de la nécessité de disposer de l'énergie photovoltaïque. Cependant, l'insuffisance de maintenance et la dégradation des performances qui s'en est suivie ont provoqué un rejet d'autant plus important de la technologie.
- Sur le site de Mana/ St-Laurent dont les usagers interrogés sont principalement d'origine européenne, on constate qu'ils sont les seuls à avoir le mieux compris les accords passés avec l'entreprise installatrice. Les usagers acceptent volontiers la technologie et ses contraintes.

D'une façon générale le système photovoltaïque bénéficie d'une image ambivalente auprès des usagers. Ils jugent la technologie écologique dans plusieurs de ses aspects (silencieuse, naturelle), ils utilisent volontiers l'énergie électrique procurée qu'ils considèrent pour la plupart indispensable. Cependant, les inconvénients majeurs mis en avant par les usagers est la faible capacité des batteries, le mauvais fonctionnement du système par temps de pluie, et le manque de maintenance du système par la société installatrice. Les défaillances du système (météorologie, pannes) contribuent à exacerber l'insatisfaction ressentie.

En conclusion des deux volets de cette étude nous nous attachons à produire quelques recommandations dont les principales sont :

#### **1. Garantir un productible basé sur une bonne connaissance du potentiel d'irradiation**

La méconnaissance du potentiel semble avoir induit un dimensionnement insuffisant des installations et par conséquent une production d'énergie électrique insuffisante, ce qui provoque l'insatisfaction des usagers.

#### **2. Produire un référentiel relatif à la surconsommation des appareils de froid**

En contexte amazonien la destination principale des systèmes photovoltaïques est l'alimentation des appareils de froid. En conséquence la consommation des appareillages ménagers de froid doit être mesurée et testée dans les conditions de température et d'humidité rencontrées sous ces latitudes afin de servir au bon dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

#### **3. Favoriser l'appropriation du système par les usagers**

Le bon fonctionnement dans la durée des systèmes photovoltaïques est conditionné par un comportement adapté des utilisateurs. Les usagers doivent être formés et sensibilisés à l'usage des systèmes photovoltaïques.

#### **4. Réfléchir à des modes de maintenance plus adaptés avec une implication des utilisateurs**

Les questions posées par les usagers lors des entretiens indiquent que la priorité doit être accordée à la maintenance des batteries. La formation prioritaire à délivrer concerne l'entretien et la maintenance des batteries (ajout d'eau, d'acide, nettoyage des bornes sulfatées, mesure de tension, du pH, etc.) Cet élément est la cause principale des défaillances. Le mode de maintenance à adopter devrait être construit sur la base d'un tandem entre un ou plusieurs usagers des différents sites et les techniciens de la société installatrice via des moyens de communication à distance.

Cette étude montre que la problématique de l'énergie en sites isolés est considérée comme une problématique vitale par les populations, elle pose le défi de réussir à proposer une solution d'alimentation électrique fiable, écologique, pour les habitats isolés en contexte amazonien.



### 3.5 Conclusion

Bien que le photovoltaïque soit de plus en plus considéré comme un moyen efficace et économique pour alimenter en électricité les sites isolés dans de nombreuses régions du monde (rapport IEA-PVPS, Trends 2015 in PV Applications), l'intégration des systèmes photovoltaïques en sites isolés et en milieu amazonien constitue un défi environnemental, social, économique et technologique. La question de la productivité de ces systèmes dans un tel contexte reste une problématique qui appelle des réponses adaptées à l'environnement climatique et humain.

Dans ce chapitre nous avons analysé le bilan des trente années d'expériences de la technologie photovoltaïque en sites isolés en Guyane et mis en évidence les facteurs de dysfonctionnement des systèmes PV rencontrés en contexte amazonien, à savoir : la difficulté de maintenance, la connaissance insuffisante du potentiel solaire et de sa variabilité, la méconnaissance de la sociologie des usagers. Sur la base de cas concrets, nous avons analysé les dysfonctionnements, proposé des solutions aux défauts rencontrés et formulé des recommandations.

Concernant la maintenance de centrales photovoltaïques, nous avons mis en œuvre une méthode d'analyse de la productivité basée sur des indicateurs de performance et une méthode d'analyse des défauts qui permet d'identifier les dysfonctionnements de chaque entité composant une centrale photovoltaïque. Compte tenu de l'isolement des sites et de leur difficulté d'accès (voie fluviale ou aérienne), il est important de développer des techniques de prévision des défauts ce que ces méthodes ne permettent pas. C'est la raison pour laquelle nous formulons des recommandations visant à mettre en œuvre des outils de surveillance et d'analyse des évolutions des paramètres de fonctionnement pour anticiper la rupture de la production d'énergie électrique. Dans l'avenir nous envisageons de développer des méthodes de détection et de diagnostic des défauts à distance basées sur les techniques de discrimination par apprentissage supervisé en lien avec les travaux de notre collègue I. Marie-Joseph (Marie-Joseph, 2003). Nous nous intéresserons aussi aux micro-réseaux que constituent les réseaux de production des sites isolés et pour étudier l'optimisation de la gestion des flux d'énergie. Concernant le potentiel solaire et sa variabilité, l'absence de données disponibles a été comblée par les travaux réalisés au sein de notre équipe de recherche en 2015. Nous fournissons aujourd'hui à EDF Guyane des séries temporelles d'irradiance solaire pour les futurs sites d'implantation de centrales photovoltaïques. Enfin l'amélioration de la productivité des systèmes ne peut s'affranchir d'une approche sociologique visant à mieux identifier les besoins et les comportements des usagers.

### Publications et rapports associés

1. **A detailed analysis of the productivity of solar home system in an amazonian environnement,**  
L. Linguet, I. HIDAIR. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, Vol. 14, Issue 2, pp.745-753
2. **Performance analysis of a hybrid solar photovoltaic power plant in French Guiana**  
L. Linguet, O. Tamarin, S. Idriss, M. Sébéloué, I. Marie-Joseph. En cours de publication
3. **Analyse de la première année de fonctionnement d'une centrale hybride Photovoltaïque-Thermique.**  
L. Linguet, O. Tamarin, S. Idriss, M. Sébéloué, I. Marie-Joseph : Rapport scientifique, Contrat Ademe-EDF 2010
4. **Analyse détaillée de la productivité des systèmes photovoltaïques à usage domestique en milieu amazonien.**  
L. Linguet. Rapport scientifique, Projet de recherche SOLAREST, Feder Guyane, 2005
5. **Suivi des installations photovoltaïques de Saül (site isolé Guyane)**  
L. Linguet, I. Marie-Joseph. Rapport d'étude, Contrat Ademe-EDF-Région Guyane, 2004
6. **Analyse du dimensionnement des installations photovoltaïques**  
L. Linguet. Rapport d'étude, Contrat Ademe-EDF-Région Guyane, 2004
7. **Campagnes de mesures énergétiques sur les générateurs photovoltaïques en sites isolés.**  
L. Linguet. Rapport d'étude, Contrat Ademe-EDF-Région Guyane, 2003

## PARTIE 4. PERSPECTIVES

Ce rapport a permis d'aborder trois thèmes importants de l'exploitation de l'énergie solaire : la modélisation, l'estimation de la ressource solaire par imagerie satellite et l'amélioration de la productivité de centrales photovoltaïques en sites isolés.

Nous avons modélisé des fonctions d'observation et d'évolution de l'irradiance solaire afin de réaliser un modèle de suivi de l'état de cette ressource, générique et évolutif vers un modèle prédictif. Nos travaux de traitement des images satellites GOES ont conduit à la création de données sur le potentiel solaire et sa variabilité sur le Plateau des Guyanes. Nous avons analysé le fonctionnement de centaines d'installations photovoltaïques domestiques en sites isolés afin d'améliorer la connaissance des facteurs contraignants, nous avons développé des méthodes d'analyse de la productivité et proposé des recommandations visant à améliorer de la performance des systèmes photovoltaïques non connectés en contexte amazonien. Ces recherches finalisées étaient nécessaires dans le contexte quelque peu "isolé" de la Guyane, car elles permettent de "*comprendre pour pouvoir mieux agir*" et répondre aux préoccupations sociales et économiques du territoire et de ses habitants.

Mes perspectives de recherche envisagées pour les prochaines années s'inscrivent dans la continuité des travaux que j'ai menés dans les trois axes de ma synthèse en veillant à y associer des collaborations extérieures actuelles et nouvelles.

### 4.1 Objectifs

Les travaux de l'axe « Modélisation » seront poursuivis afin de favoriser l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques (connectés ou non connectés). Les recherches seront orientées vers la conception et la mise en œuvre de modèles de prédiction de l'évolution de l'état des processus associés aux ressources renouvelables pour répondre aux besoins des gestionnaires des réseaux ainsi que de nombreux producteurs d'énergie renouvelable qui sont demandeurs de dispositifs intelligents permettant d'assurer la gestion anticipée de la production d'énergie (CRE, Cahier des charges Appel d'offre CRE ZNI, 2015). La problématique sous-jacente à ce besoin consiste à assurer des conditions de stabilité optimales à l'injection sur le réseau électrique d'énergies à caractère aléatoire et intermittent. Cet axe de recherche concernera le développement de méthodes de prédiction car en rendant prévisible la ressource renouvelable on élimine le caractère aléatoire de la production d'énergie.

Notre objectif principal dans cet axe de recherche est de développer des modèles de prédiction non seulement du rayonnement solaire mais aussi d'autres ressources renouvelables productrices d'énergie (vent, courant marin, hauteur d'eau) afin d'intégrer la connaissance prédite dans un outil de gestion intelligente de l'énergie. On s'attachera donc à préserver le caractère générique des modèles développés afin qu'ils soient applicables à des processus autres que l'intensité solaire : par exemple vitesse du vent, hauteur d'eau, vitesse des courants marins, etc. On développera pour cela des modèles d'évolution et des modèles d'observation spécifiques à chaque ressource étudiée sur la base des concepts posés précédemment (filtrage bayésien récursif utilisé comme méthode de suivi et de prédiction). L'amélioration des modèles d'évolution sera envisagée via le recours à un modèle de prévision numérique du temps (PNT) tel que le modèle WRF (Weather Research and Forecasting Model). Concernant la ressource solaire, nous envisageons d'utiliser le modèle de prévision numérique WRF Solar (version 3.6, 2014) qui propose une fonctionnalité pour la prédiction de l'irradiance globale au sol. Ce modèle découle du modèle original WRF sur lequel un certain nombre de modifications ont été opérées (prise en compte l'interaction aérosol et nuage, caractérisation de l'interaction des nuages sur le GHI et de l'influence des aérosols sur le GHI) afin de fournir en sortie la composante directe et diffuse de l'irradiance globale sur un plan horizontal (GHI). Pour l'instant les résultats obtenus ne traitent que des performances en ciel clair (Jimenez et al., 2015). Nous

souhaitons enrichir les performances du modèle WRF SOLAR en temps couvert en intégrant ce modèle dans notre stratégie de filtrage bayésien récursif. Dans ce contexte, nos recherches sur les modèles d'observation seront poursuivies dans l'objectif d'intégrer des observations toujours plus informatives sur l'évolution future du processus à prédire (par exemple déplacement des nuages pour la prédiction de l'irradiance solaire). La combinaison de ces différents modèles aura pour objectif de produire des prédictions à un horizon de 24H avec la meilleure précision possible. Les résultats issus des modèles de prédiction seront exploités pour la conception de systèmes de gestion intelligente de l'énergie dans l'objectif de contribuer à la sûreté des réseaux électriques (connectés ou non connectés).

Concernant le second axe, « Estimation de la ressource », notre ambition est de produire de la connaissance sur les ressources énergétique renouvelables à l'échelle régionale et sous-continentale en développant nos capacités en traitement et analyse de données satellites. Outre le potentiel solaire, pour lequel nous entendons poursuivre les travaux développés et produire des estimations sur l'ensemble des sous-continentaux américains (Nord et Sud), nous nous intéresserons au potentiel d'autres énergies susceptibles d'entrer dans le mix énergétique de la production électrique en contexte amazonien, notamment celui lié aux débits des fleuves source de production d'hydroélectricité au fil de l'eau ou celles liées aux courants marins présents sur la façade Atlantique. Par exemple nous avons l'ambition de produire des cartographies de potentiel d'énergie à haute résolution spatiale en collaborant avec des spécialistes de la mesure par satellite des hauteurs d'eau continentale et des courants marins océaniques. Nous avons d'ailleurs entrepris une collaboration avec l'entreprise CLS (Collecte Localisation Satellite, filiale du CNES) dans le cadre d'un projet sur la prévision hydrologique des phénomènes extrêmes (Linguet, 2015, Rapports de recherche contractuels, voir page 83) qui nous a permis de valider des mesures altimétriques satellites des hauteurs d'eau sur les fleuves de Guyane.

Au-delà de l'estimation de la ressource en énergies renouvelables, nous nous intéresserons à l'intégration d'informations connexes aux données produites sur le potentiel des énergies renouvelables. La superposition de données spatiales d'ordre technique, économique ou environnemental à des données cartographiques sur le potentiel des ressources renouvelables permet de générer des indicateurs géographiquement explicites signalant des zones prioritaires ou techniquement, économiquement et/ou environnementalement viables pour la production d'énergies renouvelables. La disponibilité de multiples sources d'information rend possible la création d'indicateurs spécifiques aux énergies renouvelables pour effectuer des analyses de scénarios, des analyses de sensibilité en fonction de l'importance accordée à tel ou tel critère. Dans le même ordre d'idée il s'avère indispensable de promouvoir de nouveaux modes de consultation du public pour favoriser des avis collectifs sur les informations spatialisées produites (Calvert et al., 2013). Le déploiement de toutes ces possibilités nécessite le développement de travaux visant à construire une « infrastructure de géo-information » numérique (plateforme web) qui constituerait un véritable outil d'aide à la prise de décision dès lors que l'on cherche à identifier les solutions de production d'énergies renouvelables présentant des contraintes "acceptables" sur les plans social, économique et environnemental.

Notre objectif principal dans cet axe de recherche est de développer, adapter et mettre en œuvre des modèles d'estimation de diverses ressources renouvelables afin de produire des estimations spatiales et temporelles du potentiel d'énergie ainsi que des indicateurs spatiaux associés tout en s'assurant des modalités de partage et de diffusion des résultats.

Le troisième axe de recherche est le débouché naturel des deux axes précédents, il concerne l'optimisation de la productivité des systèmes de production à base d'énergies renouvelables et vise à l'amélioration de leur performance en contexte isolé amazonien. Cet axe sous-tend la poursuite de travaux de recherche appliquée afin de répondre aux défis causés par l'importance du nombre de personnes n'ayant pas accès au réseau électrique, non seulement en Guyane mais sur tout le Plateau

des Guyanes. La configuration des systèmes de production électrique en sites isolés s'apparente à une production d'énergie renouvelable décentralisée, distribuée par micro-réseaux et nécessite le développement de recherches sur les micro-réseaux.

Dans ce contexte, l'un de nos objectifs concernera le développement d'outils de diagnostic et d'analyse visant à améliorer la performance des systèmes à énergies renouvelables en contexte isolé amazonien. Nous nous intéresserons en particulier au développement de méthodes de détection et de diagnostic des défauts basées sur les travaux d'Isabelle Marie-Joseph (2003) membre de notre laboratoire. Nous nous appuierons sur des méthodes de discrimination par apprentissage supervisé afin de reconnaître la classe associée à chaque pré-défaut grâce à l'utilisation d'une base d'apprentissage que nous aurons créée.

Un autre objectif concernera l'optimisation de la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux électriques non connectés à un réseau principal (modèle type du réseau électrique en site isolé). Sur le plan pratique nous nous intéresserons à la conception d'algorithmes pour la gestion énergétique de micro-réseaux sur la base du suivi d'un profil optimal en réalisant des prédictions des informations de consommation et production de la veille pour le lendemain (gestion off-line) (Parisio et al. 2011; Baziar et al. 2013, Rigo-Mariani, 2014). Différentes classes de méthodes d'optimisation seront testées : méthodes déterministes, méthodes à caractère stochastique (maxima de vraisemblance, processus de décision markovien, méthodes de Monte-Carlo, calcul d'espérances conditionnelles). Cependant, il conviendra aussi d'anticiper la correction des inévitables écarts entre les prévisions et les valeurs réelles de production et de consommation en prévoyant un contrôle court-terme dit "online". L'exploitation optimale de la ressource renouvelable par le micro-réseau est donc envisagée en améliorant la prédictibilité des puissances soutirées ou injectées sur le réseau (en lien avec l'axe 1). Dans un objectif à court terme, ces recherches se concentreront sur la problématique de la gestion par optimisation des flux d'énergie d'un micro-réseau comprenant un générateur photovoltaïque, un générateur diesel, un moyen de stockage, et un profil de consommation (prototype de centrale de production électrique mis en œuvre en sites isolés de Guyane). L'objectif est d'assurer la valorisation optimale de la ressource solaire pour diminuer la facture énergétique tout en tenant compte de l'intermittence de cette ressource, de la présence du stockage d'énergie et de celle du générateur diesel (Siddaiah et al., 2016). Enfin, une gestion intelligente du micro-réseau devrait aussi permettre de minimiser le critère lié aux émissions de CO<sub>2</sub>. A moyen-long terme nous nous intéresserons à d'autres systèmes de production telles que : centrale hydroélectrique au fil de l'eau, hydrolienne, voire centrale biomasse.

Nos efforts de recherche dans cet axe visent à résoudre les difficultés et les contraintes rencontrées pour satisfaire les besoins en énergie électrique des populations des sites isolés non connectés au réseau électrique. Les contraintes rencontrées en Guyane sont suffisamment proches de celles rencontrées sur l'ensemble du Plateau des Guyanes pour que les solutions que nous mettons en œuvre soient applicables à l'ensemble de la zone et puissent être considérées comme génériques à cette échelle. L'objectif à terme est de produire et diffuser les connaissances acquises afin d'améliorer la productivité des systèmes à énergies renouvelables dans la grande région du Plateau des Guyanes (référence à la Tâche 9 "Deploying PV services for regional development" du programme PVPS de l'Agence Internationale de l'énergie)

Les trois axes de recherche proposés ne sont pas indépendants, ils se complètent, présentent des intersections et convergent vers le dessein de changer les modes actuels de production d'énergie sur le Plateau des Guyanes afin de proposer une alternative basée sur les énergies renouvelables grâce à l'interconnexion, à court et long termes, des projets de recherches et des projet industriels dans ce domaine.

Les trois axes de recherche énoncés peuvent être rattachés à trois défis évoqués dans la stratégie nationale de la recherche française (Conseil Stratégique de la Recherche, 2015) comme représentés dans la figure 19 :

- L'activité de modélisation relève des technologies de l'information, défi n°7 de la SNR (Technologies de l'information), dans la mesure ou la construction de modèles d'observation ou d'évolution fait appel à des techniques d'extraction d'information ou de fouille de données.
- L'estimation de la ressource via l'observation spatiotemporelle de processus naturels renouvelables nécessite le développement de capacités permettant d'exploiter la multitude d'images satellites disponibles et de mettre en œuvre des outils et concepts du domaine de la météorologie et de l'observation du climat, ce qui relève du défi n°9 (l'Espace).
- Enfin l'activité liée à la production d'EnR en contexte amazonien est reliée au défi n°2 (Energies propres) dans la mesure où elle vise à développer les énergies "bas carbone" et les Réseaux d'énergie intelligents.

Ces axes forment l'ossature de notre projet scientifique, lequel s'intègre pleinement dans la thématique "*Technologies innovantes dans le champ du spatial et des énergies renouvelables*" de la stratégie de recherche de l'Université de Guyane. Ce projet sert d'adossement au Master « Energies et Territoires » que l'Université de Guyane entend ouvrir en 2017 et dont l'objectif est de former les étudiant-es à la maîtrise des méthodes et outils nécessaires à l'élaboration de projets énergétiques à dimension territoriale. Il offrira aux différents acteurs du projet scientifique la possibilité de s'investir efficacement dans la formation à/par la recherche des étudiants.

Enfin, nous veillerons, à travers la réalisation de ce projet, à préserver la cohérence scientifique entre production de connaissances, recherche appliquée et responsabilité sociale, ainsi qu'à renforcer le rôle stratégique et structurant de notre projet sur notre environnement scientifique, technologique et économique.

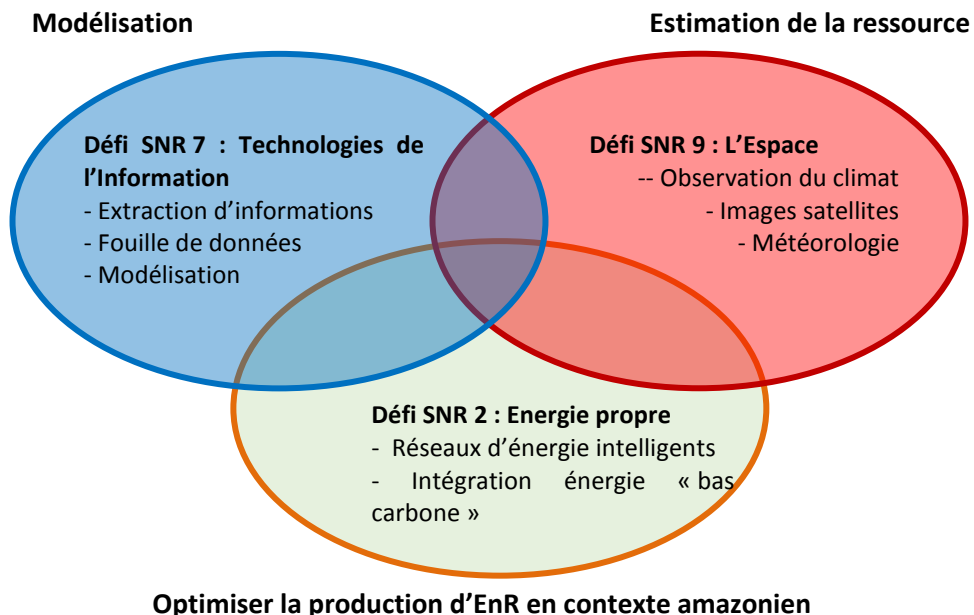


Figure 19. Organisation thématique du projet de recherche

## 4.2 Projets

Je présente ci-dessous les projets en cours ou futurs qui constituent des déclinaisons aux trois axes scientifiques définis dans mes perspectives. Je précise à chaque fois les objectifs scientifiques, les collaborations qu'entretiennent ces projets avec d'autres acteurs scientifiques et le monde économique, mon rôle ainsi que les moyens mis en œuvre.

### Axe 1 Modélisation

#### 1.1 PROJET SPESIS (Surveillance et prédiction de la production d'énergie solaire par imagerie satellite)

Ce projet de recherche d'une durée de trois ans s'intéresse à la modélisation et à la prévision microclimatique, il s'agit d'analyser et de modéliser le comportement d'un système complexe (microclimat), multi-échelle (spatiale et temporelle) à des fins de gestion intelligente de la production photovoltaïque.

L'objectif ultime de ce projet de recherche consiste à développer un outil d'aide à la décision en vue de rendre intelligente la gestion de l'énergie photovoltaïque. Sur le plan international de nombreux travaux de recherche sont actuellement menés sur la gestion intelligente de l'énergie d'origine solaire ainsi que sur son intégration dans le réseau électrique et nous entendons apporter notre contribution à ces travaux à travers ce projet.

La mise en œuvre de ce projet prévoit d'utiliser un modèle numérique de prévision météorologique à une échelle locale en combinaison avec une méthode d'assimilation de données basée sur le filtrage bayésien. Les observations seront issues d'images satellites et de mesures au sol. Outre les compétences nécessaires liées à l'exploitation des images satellites, les techniques d'assimilation de données utilisées feront appel à des connaissances en mathématiques statistiques. La prévision du rayonnement solaire fera appel à plusieurs horizons de prédiction allant du très court terme au moyen-terme, ce qui nécessitera l'utilisation combinée de différentes méthodes de prédiction. L'horizon de prédiction sera compris entre 0 et 24 heures. Les résultats seront exploités pour l'aide à la décision, et pour la modélisation de scénarios de production de l'énergie photovoltaïque en vue de rendre intelligente la gestion de la production.

L'un des enjeux de ce projet concerne l'étude du micro climat. En effet, la particularité de la zone d'étude est la haute fréquence des situations convectives dû au fait qu'elle est régulièrement soumise au passage de la zone intertropicale de convergence (ITCZ ou mousson) ce qui se traduit par de fréquents passages nuageux, complexes et imposants qui affectent le rayonnement au sol. Différents paramètres d'entrée devront être pris en compte comme : les paramètres atmosphériques, la caractérisation des nuages, la dynamique des nuages. Il s'agira d'explorer et de sélectionner des critères pertinents en vue d'élaborer un modèle de prédiction du rayonnement solaire au sol. L'étude d'un tel objet relève de l'étude d'un système complexe représenté à différentes échelles spatiales et temporelles et présente des enjeux scientifiques liés aux risques engendrés par la non-prise en compte de comportements fortement non- linéaires, des instabilités, des effets de seuil, des comportements critiques.

La compréhension, la description et la prédiction du comportement de ces systèmes dits-complexes nécessitent le développement de modèles mathématiques innovants capables de prendre en compte leur complexité et leur réalité. Des concepts, outils génériques et transverses sont alors nécessaires pour étudier les propriétés qualitatives (effets d'échelle, stabilité et instabilité, non-linéarité, non-stationnarité) et quantitatives des modèles mathématiques développés.

En outre, l'exploration multi-échelle (échelles spatiale et temporelle) d'un système complexe (comme l'est un microclimat) requiert aussi le développement de capacités associant toutes les



formes d'observation en temps réel, en particulier l'imagerie satellite. Un verrou à lever pour étudier les systèmes complexes à travers les données d'images satellites consiste à utiliser des techniques d'extraction de connaissances, d'apprentissage, d'agrégation de données comme autant d'instruments qui permettent d'observer et de découvrir des phénomènes, de valider des hypothèses et d'élaborer de nouveaux modèles.

Mon rôle dans ce projet est d'assurer la coordination scientifique et l'encadrement des moyens humains. Une thèse a démarré sur ce projet en novembre 2015 pour laquelle j'assure la codirection du doctorant qui a été recruté sur ce projet.

Statut du projet	En cours, démarré en novembre 2015. Projet soumis à un Appel à manifestation d'intérêt (AMI) pour l'obtention de moyens supplémentaire
Collaborations	Jamal ATIF Professeur de l'université Paris-Dauphine Météo-France
Financement	Contrat doctoral de l'Université de Guyane Subvention de la collectivité territoriale de Guyane si réponse favorable à l'AMI
Moyens	1 thèse en cours Post-Doc sur 1 an Stagiaires de Master
Objectif	Création d'un outil d'aide à la décision en vue de rendre intelligente la gestion de l'énergie photovoltaïque

### 1.2 PROJET : Assimilation de données satellitaires pour la prévision numérique météorologique régionale appliquée à la prévision du rayonnement solaire au sol

L'objectif général de ce projet est d'exploiter une méthode d'assimilation de données nuageuses issues de satellites météorologiques géostationnaires afin de réaliser des prédictions de la production photovoltaïque en milieu tropical insulaire.

Plus particulièrement, une méthode d'assimilation de données existante (exploitée dans l'hémisphère Nord) sera optimisée pour établir deux chaînes expérimentales de prédiction du GHI sur La Réunion et la Guyane avec le modèle Open Source WRF en utilisant respectivement les données issues des satellites Meteosat IODC et GOES-East.

Le développement de cette stratégie d'assimilation aura pour objectif de s'adapter facilement aux données des différents satellites géostationnaires afin d'ouvrir la voie vers la conception d'une méthode générique de prévision du GHI sur l'ensemble de la ceinture tropicale.

Le projet est porté par l'entreprise REUNIWATT de La Réunion.

Mon rôle dans ce projet est d'assurer la codirection de thèse du doctorant qui a été recruté sous contrat CIFRE par l'entreprise porteuse du projet, notre Laboratoire (UMR Espace-Dev) étant le laboratoire d'accueil de la thèse.

Statut du projet	En cours, démarré en novembre 2015
Collaboration	Entreprise REUNIWATT de l'Ile de la Réunion
Financement	Public et Privé
Moyens	1 thèse en cours sous contrat CIFRE
Objectif	Conception d'une méthode générique de prévision du GHI sur l'ensemble de la ceinture tropicale

### 1.3 PROJET GF (Guyane Forecast)

Le projet GF consiste à créer un modèle de prévision de l'irradiation solaire pour une entreprise spécialisée dans la production d'énergies renouvelables. Ce modèle sera implanté sur une des

centrales photovoltaïques en phase de développement par l'entreprise. L'entreprise a choisi de s'appuyer sur notre Laboratoire (UMR Espace-Dev) pour contribuer au développement de ses activités de recherche et développement car l'UMR dispose d'une connaissance approfondie de l'ensoleillement du territoire notamment au travers de la réalisation de cartographies de l'ensoleillement sur le plateau des Guyanes.

L'objectif du projet vise à améliorer la prédictibilité de l'énergie solaire et sa pénétration sur le réseau électrique.

Pour l'élaboration du modèle dédié GF, nous nous appuyons sur le modèle à filtre particulière que nous avons développé (voir Partie 1) en l'implémentant dans un mode de fonctionnement prédictif. Les observations seront issues des différents appareils de mesures dont sera équipée la centrale : un mini-tracker, deux pyranomètres, un anémomètre, une girouette, une sonde de température et un data logger. Un imageur hémisphérique (caméra au sol) permettra également de renforcer les prévisions locales d'irradiation en caractérisant de manière plus précise les apparitions de masses nuageuses, et de prédire au plus juste les incidences de ces phénomènes sur la production de la centrale solaire.

Toutes ces informations permettront d'approcher au plus juste les variations climatiques locales propres au site mais également les tendances à plus long terme avec une approche statistique.

Mon rôle dans ce projet sera d'assurer la coordination scientifique et l'encadrement des moyens humains.

Statut du projet	Projet soumis à un appel d'offre et en attente de réponse
Collaboration	Entreprise de Guyane œuvrant dans le domaine des ENR à l'international Météo-France
Financement	Privé
Moyens	Post-Doc sur 1 an Stagiaires de Master pour le développement des algorithmes Caméra hémisphérique avec un imageur IR pour prévision locale court terme Station météo complète pour structurer un modèle de prévision
Objectifs	Création d'un outil de prévision adapté aux conditions locales Optimisation des annonces et redéclarations à l'appui des observations « in situ » Amélioration du taux de pénétration de l'énergie solaire sur le réseau électrique Mise en place d'un modèle facile à dupliquer et implémenter sur d'autres projets solaires du territoire Guyanais

## Axe 2 Estimation de la ressource

### 2.1 PROJET : Validation de la méthode Heliosat-2-GOES sur l'hémisphère Amérique du Sud et du Nord

Ce projet consiste à étendre la validation de la méthode Heliosat-2 sur l'ensemble de l'hémisphère contenant l'Amérique du Nord et du Sud afin de combler le manque de données d'irradiance à haute résolution. Les seules données existantes ayant une résolution de 100km x 100 km (SSE) ou de 8km x 8km (Global Atlas for Renewable Energy sans évaluation scientifique de la précision des données)

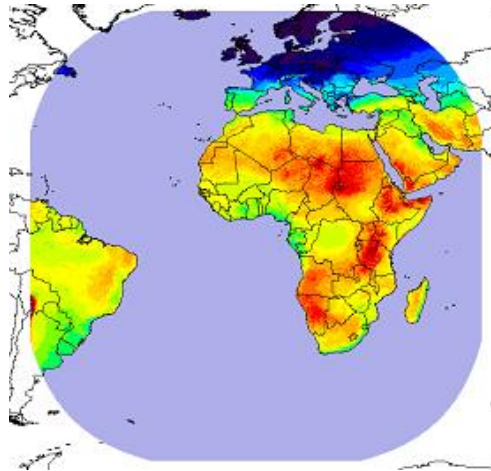


Figure 20. Carte de l'Irradiation Globale annuelle Horizontale (GHI) 2010 disponible sur le site SODA. Copyright Transvalor S.A., Produced in March 2011, Source Database HelioClim3v3

Une autre finalité du projet consiste à proposer en ligne des données sur le rayonnement solaire dans cette partie du monde. D'un point de vue technique et scientifique les objectifs de ce projet sont doubles :

- Procéder à la validation de la méthode Heliosat-2 en utilisant les données des stations du réseau BSRN (Baseline Surface Radiation Network) présentes sur les Amériques (par exemple : Brasilia, São Martinho da Serra, Petrolina, Florianopolis, Goodwin Creek, Langley Research Center, etc...)
- Contribuer à la création d'un service web pour la diffusion de données sur l'énergie solaire sur l'hémisphère Amérique, en partenariat avec les concepteurs de la méthode Heliosat-2.

Mon rôle dans ce projet sera de contribuer à l'encadrement de la tâche liée à la validation.

## 2.2 PROJET : Estimation du potentiel hydroélectrique au fil de l'eau

La Guyane dispose d'un réseau hydrographique très développé (plus de 12 000 km de linéaire) qui présente des débits importants et la présence de sauts. Ce réseau constitue un potentiel en énergie renouvelable intéressant (micro-hydroélectricité).

Ce projet consiste à estimer le potentiel de la ressource énergétique liée aux courants des fleuves de Guyane en modélisant les précipitations sur un bassin versant et les débits en un exutoire donné.

D'un point de vue technique et scientifique les objectifs de ce projet sont:

- Estimer les précipitations au-dessus de la région du plateau des Guyanes par correction des produits d'estimation satellites
- Estimer les courants fluviaux à travers une modélisation pluie-débit afin d'estimer le potentiel hydroélectrique au fil de l'eau des principaux fleuves de Guyane

Mon rôle dans ce projet est d'assurer la responsabilité scientifique et l'encadrement des moyens humains du projet.

Statut du projet	En cours, démarré en décembre 2014
Collaboration	Entreprise CLS, filiale du CNES Météo-France
Financement	Public
Moyens	1 thèse en cours
Objectif	Estimer les précipitations au-dessus de la région du plateau des Guyanes Estimer le potentiel hydroélectrique au fil de l'eau des fleuves de Guyane

## Axe 3 Production d'énergies renouvelables en contexte amazonien

### 3.1 PROJET : Optimisation des centrales solaires en sites isolés

Ce projet s'inscrit dans le contexte des habitats isolés situés à l'intérieur de la Guyane ou vivent plusieurs milliers d'habitants sans aucune possibilité de raccordement au réseau électrique. Dans ces villages, l'électricité est fournie par des groupes électrogènes ou par de petites installations solaires exploités directement par la population et qui débitent sur des micro-réseaux mal conçus et très souvent hors-normes.

Dans ce contexte, EDF Guyane a créé un "Service des Communes de l'intérieur" (SCI) dont la mission est de garantir la qualité et la continuité du service public de l'électricité, de la production à la distribution, dans les zones enclavées et non raccordées au réseau guyanais. La mission de ce service est d'électrifier, sur la période 2010-2020, plus de 10 villages, où vivent 3 000 à 5 000 personnes. Un programme d'électrification des villages isolés dotés d'équipements publics (écoles en particulier) a été initié par EDF "Service des Communes de l'intérieur" avec la mise en service prévue de 5 centrales solaires hybrides en 2016. En appui à ce programme EDF Guyane souhaite établir un partenariat scientifique avec notre laboratoire afin de développer des études et recherches autour des systèmes de production d'électricité en sites isolés.

L'objectif de ce projet consiste à : 1- analyser la productivité des nouvelles centrales solaires installées 2- optimiser les flux d'énergie et la performance afin de réduire la facture énergétique 3- proposer des pistes d'amélioration du dimensionnement des futures centrales solaires (orientation et inclinaison des modules, dimensionnement de la surface des panneaux et des batteries...) sur la base des connaissances acquises par notre laboratoire (voir Partie 2)

C'est un projet appliqué qui devrait permettre de réinvestir de manière opérationnelle les résultats de nos recherches sur le potentiel solaire et sur la productivité des centrales solaires en sites isolés.

Mon rôle dans ce projet sera d'assurer la coordination scientifique et l'encadrement des moyens humains.

Statut du projet	Prospectif
Collaboration	Entreprise EDF Guyane
Financement	Entreprise EDF Guyane Université de Guyane
Moyens	Stagiaires de Master
Objectifs	Optimisation des flux d'énergie et de la performance énergétique Optimisation du dimensionnement de futures centrales solaires en sites isolés

### 3.2 PROJET : Création d'un pôle de compétence en énergie photovoltaïque en contexte amazonien

Les énergies renouvelables d'origine photovoltaïque sont peu développées sur le Plateau des Guyanes (Nord de l'Amazonie). Cette situation est en grande partie liée à l'absence d'études sérieuses sur le potentiel solaire disponible.

Cependant, sur le Plateau des Guyanes comme partout ailleurs au monde les besoins en énergie sont croissants. Aujourd'hui le coût et la simplicité d'installation des panneaux photovoltaïques en font l'un des modes de production d'énergie le plus facilement exploitable dans cette région. D'une part parce que ce mode de production convient aux sites isolés nombreux sur le Plateau des Guyanes (principalement alimentés par des groupes électrogènes) et d'autre part parce que les installations photovoltaïques sont modulables et peuvent prendre différentes configurations en fonction de la puissance de sortie recherchée ou de la configuration des sites à alimenter : alimentation solaire domestique, parc solaire centralisé, parc solaire décentralisé, centrale hybride solaire-thermique

etc... Or, depuis plusieurs années la Guyane est un territoire d'expérimentation pour l'installation et la mise en œuvre de centrales photovoltaïques. Différentes configurations ont été installées et ont permis de faire progresser les compétences dans ce domaine :

- 1983 : création de la plus grande centrale photovoltaïque de France en site isolé, à Kaw en Guyane (35kWc)
- 2004 : Mise en œuvre de la centrale solaire décentralisée de Saül
- 2010 : Création d'une centrale hybride solaire-thermique non raccordée au réseau (100 kWc solaire), la plus grande du monde en site isolé
- 2015: création d'une centrale solaire (5 MW) raccordée au réseau équipée à la fois d'un système de pilotage à distance et d'une possibilité de stockage de l'énergie ; une première en France et dans le monde.

Toutes ces installations et d'autres qui allient conception et stratégie différentes font que le territoire de la Guyane est le seul territoire du Nord de l'Amazonie à avoir accumulé depuis une trentaine d'années une expertise significative dans le domaine de l'énergie photovoltaïque (39 MW installés à ce jour). En effet, il existe peu ou pratiquement pas de centrales solaires sur le Plateau des Guyanes. (IRENA, Renewable energy capacity statistic, 2015).

Ce projet a pour objectif de créer un pôle de compétences dans le domaine de la production d'énergie photovoltaïque en Guyane (convergence entre des entreprises et un laboratoire de recherche) afin de conduire de nouveaux projets de développement. Ce pôle de compétences aurait aussi pour mission d'établir des coopérations scientifiques et techniques avec les pays de la région du Plateau des Guyanes (Brésil-Amapa, Surinam, Guyana, Vénézuéla) afin de partager l'expertise technique et scientifique acquise en Guyane à travers la mise en place de formations, d'opérations de transfert des connaissances et des savoir-faire accumulés, d'aide à la conception, à l'installation de centrales solaires, au monitoring de la production, etc. En effet tous ces pays ont pris des dispositions politiques et administratives afin de favoriser des programmes et projets visant à développer l'accès à l'énergie des populations en sites isolés (ruraux) avec inclusion prioritaire des énergies renouvelables (IRENA, Renewable Energy in Latin America 2015: An Overview of Policies)

L'intérêt de ce projet est double. En favorisant l'utilisation des énergies renouvelables dans cette région, ce projet vise d'une part à préserver de la pollution une région riche en biodiversité (pollutions liées à l'utilisation des groupes électrogènes notamment) et à préserver du climat de la planète, d'autre part il contribue à l'accroissement des compétences et des connaissances des individus de la région du Plateau des Guyanes. Mon rôle dans ce projet sera d'apporter mon expertise dans le domaine de la création et de l'utilisation des données relatives au potentiel solaire pour l'analyse et l'amélioration de la performance de centrales solaires.

Statut du projet	Prospectif
Collaboration	Entreprises du GENERG : Groupement des ENTreprises du domaine des Energies Renouvelables de Guyane Collectivité Territoriale de la Guyane
Financement	Programme Opérationnel de coopération internationale INTERREG Amazonie
Moyens	Stagiaires de Master
Objectif	Créer un pôle de compétences dans le domaine de la production d'énergie photovoltaïque Contribuer à l'émergence d'une communauté d'acteurs la création de recommandations et de référentiels pour favoriser l'exploitation de centrales photovoltaïques en contexte amazonien

## Bibliographie

1. Abdel Wahab M., 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. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 1, 261-280.
2. Aguiar R., Collares-Pereira, M., **1992**. TAG: A time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. *Sol. Energy*. 49, 3, 167-174.
3. Alata O., Olivier C., Pousset Y. **2013**. Law recognitions by information criteria for the statistical modeling of small scale fading of the radio mobile channel. *Signal Processing*. 93(5), 1064-1078.
4. Arulampalam, Maskell S., Gordon N., Clapp T. **2002**. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50, No. 2, 174 - 188.
5. Baziar A., Kavousi-Fard A. 2013. Considering uncertainty in the optimal energy management of renewable micro-grids including storage devices. *Renewable Energy Vol 59*, 158-166.
6. Blanc P., Gschwind B., Lefèvre M. and Wald L. **2011**. The HelioClim Project: Surface Solar Irradiance Data for Climate Applications. *Remote Sensing*, 3, 343-361.
7. Beyer H.G., Constanzo C., Heinemann D. **1996**. Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy*, 56, 3, 207-212.
8. Bertino L., Evensen G, Wackernage H. **2003**. Sequential Data Assimilation Techniques in Oceanography. *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique*. 71, 2, 223-241.
9. Calvert K., Pearce J.M., Mabee W.E. **2013**. Toward renewable energy geo-information infrastructures: Applications of GIScience and remote sensing that build institutional capacity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, 416-429
10. Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., Wald L. **1986**. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31-39.
11. Chang G.W., Lu H.J., Su H.J. **2013**. Short-term Distributed Energy Resource Scheduling for a DC Microgrid. *Energy and Power Engineering*, 5, 15-21.
12. Chokmaviroj S., Wattanapong R., Suchart Y. **2006**. Performance of a 500 kWp grid connected photovoltaic system at Mae Hong Son Province, Thailand. *Renew Energy*, 31, 19-28.
13. Conseil Stratégique de la Recherche. Stratégie nationale de recherche. Rapport de propositions et avis, **2015**.
14. CRE, Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de techniques de conversion du rayonnement solaire d'une puissance supérieure à 100 kWc et situées dans les zones non interconnectées, **2015**.
15. Dagestad K.F. **2004**. Mean bias deviation of the Heliosat algorithm for varying cloud properties and sun-ground-satellite geometry. *Theoretical and Applied Climatology*, 79, 215-224.
16. Deneke H.M., Feijt A.J., Roebeling R.A. **2008**. Estimating surface solar irradiance from METEOSAT SEVIRI-derived cloud properties. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3131-3141.
17. Doucet, A. de Freitas J.F.G. and Gordon, N.J. Eds. **2001**. Sequential Monte Carlo methods in practice. Springer-Verlag, NewYork.
18. Diabaté L., Moussu G., and Wald L. **1989**. Description of an operational, tool for determining global solar radiation at ground using, geostationary satellite images. *Solar Energy*, 42, 3, 805 201-207.
19. Drif M., Perez P.J., Aguilera J., Almonacid G., Gomez P., Casa J. et al. Univer project. **2007**. A grid connected photovoltaic system of 200 kWp at Jaen University. Overview and performance analysis. *Sol Energy Mater Sol Cells*; 91, 670-83.
20. El Matouat A., Hallin M. **1996**. Order selection, stochastic complexity and Kullback-Leibler information, in: Athens Conference on Applied Probability and Time Series Analysis: Volume II: Time Series Analysis In Memory of E.J. Hannan. Springer-Verlag, Berlin, 291-299.
21. Gordon N. J., Salmond D. J., Smith A. F. M. **1993**. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. *IEE Proceedings F on Radar and Signal Processing*. 140 (2), 107-113.
22. Graham V.A., Hollands K.G.T., Unny T.E., **1988**. A time series model for Kt with application to global synthetic weather generation. *Solar Energy*. 40(2), 83-92.



23. De Gooijer, J. G. and Zerom, D. **2003**. On Conditional Density Estimation. *Statistica Neerlandica*, 57: 159–176.
24. IEA-PVPS (International Energy Agency). Costs and performance trends in grid connected photovoltaic systems and case studies. Report IEA PVPS T2-06. **2007**. (Available at: [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)).
25. IEA-PVPS (International Energy Agency) Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems. Report IEA-PVPS T13-03:**2014**.
26. IEA-PVPS (International Energy Agency), Report Trends 2015 in Photovoltaic Applications, Executive summary. Report IEA-PVPS T1-27:**2015**.
27. IEA-PVPS (International Energy Agency). A user guide to simple monitoring and sustainable operation of PV-diesel hybrid systems. Handbook for system users and operators. Report IEA-PVPS T9-16. **2015**.
28. IRENA (International Renewable Energy Agency). Renewable energy capacity statistic. **2015**. [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2015.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2015.pdf)
29. IRENA. Renewable Energy in Latin America 2015: An Overview of Policies, **2015**. [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Latin\\_America\\_Policies\\_2015.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Latin_America_Policies_2015.pdf)
30. Jahn U., Nasse W. Performance analysis and reliability of grid connected PV systems in IEA countries. Proc. 3rd world conference on photovoltaic energy conversion; Osaka, Japan, **2003**.
31. Janjai S., Masiri, I. and Laksanaboonsong J. **2013**. Satellite-derived solar resource maps for Myanmar. *Renewable Energy*, 53, 132-140.
32. Jimenez P.A., Joshua Hacker P., Dudhia J., Haupt S.E., Ruiz-Arias J.A., Gueymard C.A., Thompson G., Eidhammer T., Deng A. **2015**: WRF-Solar: An augmented NWP model for solar power prediction. Model description and clear sky assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
33. Kymakis E., Kalykakis S., Papazoglou T.M. **2009**. Performance analysis of a grid connected Photovoltaic Park on the island of Crete. *Energy Conversion and Management*, 50, 433-438.
34. Kitagawa G. **1996**. Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models. *Journal of computational and graphical statistics*, 5, 1, 1–25.
35. Lefèvre M., Wald L, and Diabaté L. **2007**. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. *Solar Energy*, 81, 240–253.
36. Marie-Joseph I., Linguet L., Gobinddass M.L. and Wald L. **2013**. On the applicability of the Heliosat-2 method to assess surface solar irradiance in the Intertropical Convergence Zone, French Guiana. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 8, 3012-3027.
37. Marie-Joseph I., *Méthodologie de diagnostic appliquée la maintenance préventive d'unités de production d'électricité en sites isolés. Thèse de doctorat. 2003*.
38. Marion B., Adelstein J., Boyle K., Hayden H., Hammond B., Fletcher T., Canada B., Narang D., D. Shugar, H. Wenger, Kimber A., Mitchell L., Rich G., Townsend T. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. NREL/CP-520-37358. **2005**.
39. Martins F., Pereira E. and Abreu S. **2007**. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project". *Solar Energy*, 81, 4, 517-528.
40. Mathiesen P., Collierb C., Kleissl J. **2013**. A high-resolution, cloud-assimilating numerical weather prediction model for solar irradiance forecasting. *Solar Energy*, 92, 47–61.
41. Moradi M.H., Eskandari M., Showkati H. **2014**. A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids utilizing renewable energy resources. *Electrical Power and Energy Systems*, 56, 241-258.
42. Möser W. and Raschke E. **1984**. Incident solar radiation over Europe. Estimation from METEOSAT data. *Journal of Applied Meteorology*, 23, 166-170.
43. Mueller R.W., Dagestad K.F., Ineichen P., Schroedter M., Cros S., Dumortier D., Kuhlemann R., Olseth J.A., Piernavieja C., Reise C., Wald L., Heinemann D. **2004**. Rethinking satellite based solar irradiance modelling - The SOLIS clear sky module. *Remote Sensing of the Environment*, 91, 160-174.
44. Mueller R., Trentmann J., Träger-Chatterjee C., Posselt R., Stökli R. **2011**. The role of the effective cloud albedo for climate monitoring and analysis. *Remote Sensing*, 3, 2305-2320.
45. Nguyen L., Doelling D.R., Minnis P., Ayers J.K. **2004**. Rapid technique to cross calibrate satellite imager visible channels. In Proceedings of SPIE 49Th Annual Meeting, Earth Observing Systems IX Conference, August 2-6, Denver, CO, United States. 5542, 227-235.



46. Olseth J.A. and Skartveit A. **2001**. Solar irradiance, sunshine duration and daylight illuminance derived from METEOSAT data for some European sites. *Theoretical and Applied Climatology* 2001, 69(3), 239-252
47. Oozeki T., Izawa T., Otani K., Kurokawa K. **2003**. An evaluation method of PV systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 75, 3, 687–695.
48. Polo J., Zarzalejo L.F., Marchante R., Navarro A.A. **2011**. A simple approach to the synthetic generation of solar irradiance time series with high temporal resolution. *Solar Energy*. 85, 1164-1170.
49. Rigo-Mariani M., Méthodes de conception intégrée « dimensionnement-gestion » par optimisation d'un microréseau avec stockage, Thèse de Doctorat, **2014**.
50. Rosenblatt M. **1956**. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function. *The Annals of Mathematical Statistics*, 27, 3, 832.
51. Parisio, Glielmo L., A Mixed Integer Linear Formulation for Microgrid Economic Scheduling", *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp 505-510, Brussels, **2011**.
52. Parzen E. **1962**. On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *The Annals of Mathematical Statistics* 33, 3, 1065.
53. Pillot B., Muselli M., Poggi P., Haurant P., Hared I. **2013**. Solar energy potential atlas for planning energy system off-grid electrification in the Republic of Djibouti. *Energy Conversion and Management*, 69, 131-147.
54. Projet SoDa, contrat DG "INFSO" IST-1999-12245 [http /www.soda-is.com](http://www.soda-is.com)
55. Pinker R. T. and I. Laszlo, **1992**. Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Application on a Global Scale. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 194-211.
56. Posselt R., Mueller R., Stöckli R., Trentmann J. **2011**. Spatial and temporal homogeneity of solar surface irradiance across satellite generations. *Remote Sensing*, 3, 1029-1046.
57. 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. *Solar Energy*, 68, 1, 33-48.
58. Rigollier C, Lefevre M, Wald L. **2004**. The method Heliosat2 for deriving shortwave solar radiation from satellite image. *Solar Energy*, 77, 159-169.
59. Schwarz, G. **1978**. Estimating the dimension of a model. *Ann. Stat.* 6, 461-464.
60. Schmetz, J. **1984**. On the parameterization of the radiative properties of broken clouds. *Tellus A*, 36A, 417–432.
61. Siddaiah R., Saini R.P. **2016**. A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376–396.
62. Stackhouse P.W., Westberg D., Hoell J.M., Chandler W.S., Zhang T. **2015**. Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology Version 3.1.2 June 24, NASA Langley Research Center.
63. Van Leeuwen P.J. **2009**. Particle Filtering in Geophysical Systems. *Monthly Weather Reviews*, 137, 4089–4114.
64. Viana T.S., Ruther R., Martins F.R., Pereira E.B. **2011**. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation, *Solar Energy*, 85 486–495
65. Vikrant Sharma, Chandel S.S. **2013**. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India, *Energy* 55 476-485.
66. Weinreb M.P., Jamison, M., Fulton, N., Chen, Y., Johnson, J.X., Bremer, J., Smith, C. and Baucom, J. **1997**. Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 imagers and sounders. *Applied Optics*, 36, 6895-6904.
67. Weinreb M.P. and Han D. **2009**. Calibration of the Visible Channels of the GOES Imagers and Sounders. Available online at <<http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/goes-vis-ch-calibration.htm>>.
68. Wikle C. K., Berliner L. M. **2007**. A Bayesian tutorial for data assimilation. *Physica D Nonlinear Phenomena* 230, 1–16.

---

# Annexe 1 : Curriculum vitae

## Fonction actuelle

---

Maître de conférences à Université de Guyane, UMR Espace-Dev, Campus Troubiran, 97300 Cayenne

## Parcours professionnel

---

1994 à 2014      Maître de conférences à l'Université des Antilles et de la Guyane /Institut d'Enseignement Supérieur de la Guyane

De 1993 à 1994      Chercheur associé au laboratoire LÉSIR de l'École Normale Supérieure de Cachan. Enseignant contractuel à l'IUFM de Créteil

De 1990 à 1993      Ingénieur-Chercheur à Thomson-CSF sous contrat CIFRE. Doctorant de l'Université Paris Sud Orsay

## Formation & Diplômes

---

1993 :              Doctorat en Génie Electrique de l'Université Paris-Sud Orsay. Directeur : Professeur François FOREST de l'ENS Cachan, Contrat CIFRE à Thomson-CSF. Mention : Très Honorable avec Félicitations. Titre: *Application de la commutation douce à la réalisation d'émetteurs radiofréquence à état solide de forte puissance*

1990 :              Diplôme d'Etudes approfondies « Matériaux pour l'électrotechnique » de l'Université Paul Sabatier- Toulouse III. Toulouse. Mention : Assez Bien

1989 :              Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées en Electronique de Puissance – de l'Institut National Polytechnique – ENSEEIHT – UPS Toulouse. Mention : Assez Bien

## Encadrements

---

Thèses de doctorat en cours : 5  
Post-doctorat : 2  
Masters 2° année : 9

## Publications

---

Brevets : 2  
Articles dans des revues à comité de lecture : 8  
Communications au niveau international avec comité de lecture : 24  
Chapitres d'ouvrages : 2  
Rapports de recherche contractuels : 10

## Projets de recherche et de valorisation

---

Projets Recherche FEDER – CNES - Région GUYANE : 4  
Contrats avec Ademe et/ou EDF : 7

## Organisation de manifestations scientifiques

---

Colloques et workshop : 5

## Enseignements

---

– Automatique, Modélisation, Commande  
– Génie Electrique, Physique  
– Informatique

## Annexe 2 : Liste détaillée des publications

### Brevets

---

[1] L. LINGUET, P. de BOISRIOU. "Process and device for amplitude modulation of a radiofrequency signal". Thomson-CSF.

- Brevet français, n° FR 9306420, 1993
- Brevet Européen n° EP 0626 754, 1994
- Brevet USA n° 5 410.280, 1995

[2] L. LINGUET. "Amplitude modulation method and apparatus using two phase modulated signals". Thomson-CSF.

- Brevet français, n°PCT/FR93/00639, WO 1995001005, 1995
- Brevet Européen n° EP 0705 498, 1996
- Brevet USA n° 5 659 272, 1997

### Articles dans des revues à comité de lecture (rang A)

---

[1] L. LINGUET, Y. POUSSET, C. OLIVIER, Identifying statistical properties of solar radiation models using information criteria, *Solar Energy*, Vol. 132, 136-246, 2016, doi:10.1016/j.solener.2016.02.038. (IF 2014 : 3.469)

[2] J. RINGARD, M. BECKER, F. SEYLER, L. LINGUET, Temporal and Spatial Assessment of Four Satellite Rainfall Estimates over French Guiana and North Brazil, *Remote Sensing Journal*, Vol. 7, Issue 12, 16441-16459; 2015, doi:10.3390/rs71215831. (IF 2014 : 3.180)

[3] T. ALBARELO, I. MARIE-JOSEPH, A. PRIMEROSE, F. SEYLER, L. WALD, L. LINGUET, Optimizing the Heliosat-II Method for Surface Solar Irradiation Estimation with GOES Images, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 41:86, pp-100, 2015, doi:10.1080/07038992.2015.1040876. (IF 2014 : 1.727)

[4] L. LINGUET, J. ATIF, Estimating solar surface irradiance from GOES satellite with particle filter and joint probability distribution, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 41:2, pp. 71-85, 2015, doi 10.1080/07038992.2015.1040150. (IF 2014 : 1.727)

[5] M. BECKER, J SANTOS DA SILVA, Q. CALMANT, V. ROBINET, L. LINGUET, I. MARIE-JOSEPH, F. SEYLER, Water Level Fluctuations in the Congo Basin Derived from ENVISAT Satellite Altimetry, *Remote Sensing Journal.*, Vol. 6, Issue 10, 2014, doi:10.3390/rs6109340. (IF 2014 : 3.180)

[6] I. MARIE-JOSEPH, L. LINGUET, M-L GOBINDDASS, L. WALD, On the applicability of the Heliosat-2 method to assess surface solar irradiance in the Intertropical Convergence Zone, French Guiana, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, Issue 8, pp.3012-3027, 2013, doi: 10.1080/01431161.2012.756598. (IF 2013 : 1.74)

[7] L. LINGUET, I. HIDAIR, A detailed analysis of the productivity of solar home system in an amazonian environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, Issue 2, pp.745-753, 2010, doi:10.1016/j.rser.2009.06.015. (IF 2010 : 4.567)

[8] L. LINGUET, F. FOREST, M. BASE, Soft switching for AM solid state radiofrequency transmitters, *European Power Electronics and Drives Journal (EPE)*, 1994.

## Conférences ou communications internationales avec publication complète des actes et avec comité de lecture

---

- [1] J. RINGARD, M. BECKER, F. SEYLER, L. LINGUET, Comparison Evaluation of Four High Resolution Precipitation Estimation Products over Guiana Shield. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015. IGARSS 2015, Milan, Italy; July 2015.
- [2] J. RINGARD, M. BECKER, F. SEYLER, L. LINGUET, Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Products over Guiana Shield. 26th International Union Geodesy and Geophysics General Assembly 2015, Prague, Czech Republic; June 2015.
- [3] L. LINGUET, J. ATIF, Modeling time series of solar irradiance from satellite data through particle filter and joint probability distribution, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2014, Quebec, Canada, July 2014.
- [4] T. ALBARELO, I. MARIE-JOSEPH, A. PRIMEROSE, F. DOLIQUE, F. SEYLER, L. LINGUET, Assessing surface solar irradiance in French Guiana using the Heliosat-2 method and GOES images, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2014, Quebec, Canada, July 2014.
- [5] L. LINGUET, P. AUDOIS, Calibration of TRMM 3B42-RT with Geographical Differential Analysis over Northern Amazonia, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2013, Melbourne, Australia, July 2013.
- [6] T. ZHANG, L. LINGUET, Y. POUSET ET C. OLIVIER, Identification de modèles par Critères d'Information pour la connaissance du rayonnement solaire, Traitement et Analyse de l'Information Méthodes et Applications, TAIMA 2013, Tunisie, Mai 2013.
- [7] L. LINGUET, J. ATIF, A Bayesian approach for solar resource potential assessment using satellite images, IOP Conferences Series Earth and Environmental Science . 17 012171 , 2014.
- [8] E. ESCLOUPIER, M. BECKER, I. MARIE-JOSEPH, L. LINGUET, P. TIMMERMANN, S. CALMANT, F. SEYLER, Reconstruction of Hydrological Archives in French Guiana by Radar Altimetry, Hydrodynamic Modeling and Nonlinear Analysis of Time Series, Proceedings 20 Years of Progress in Radar Altimetry" Symposium, 2012.
- [9] M. BECKER, B. MEYSSIGNAC, F. SEYLER, S. CALMANT, I. MARIE-JOSEPH, L. LINGUET, Reconstruction of the terrestrial water Storage of the Amazon Basin over the past Decades from GRACE and altimetry Data, Proceedings, 20 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium, Venice, 2012.
- [10] L. LINGUET, J. ATIF, A particle filter approach for solar radiation estimate using satellite image and in situ data, European Association on Remote Sensing Laboratories, EARSeL 1st Workshop on Temporal Analysis of Satellite Images, Mykonos, Greece, May, 2012.
- [11] I. MARIE-JOSEPH, H. CLERGEOT A. OUKAOUR, L. LINGUET, 'Dynamic model of an electrochemical accumulator'. Proceeding 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, Juin 2004.
- [12] S. JOVIAL, L. LINGUET: 'Method and process of diagnosis applied at an electrotechnic system drive' In 3th IEEE International conference on Industrial Applications, INDUSCON 98, Sao Paulo, Brazil, september 1998.

---

## Conférences ou communications internationales avec publication des résumés et avec comité de lecture

---

- [1] F. KURZROCK, S. CROS, F. CHANG-MING, L. LINGUET, R. POTTHAST, Satellite Data Assimilation in Regional Numerical Weather Prediction as a Key for Better Cloud Cover Forecasts in Tropical Environments, 32nd European PV Solar Energy Conference (EU PVSEC 2016), Munich, Germany June 2016.
- [2] F. KURZROCK, S. CROS, F. CHANE-MING, R. POTTHAST, L. LINGUET, N. SÉBASTIEN, The use of satellite data assimilation methods in regional NWP for solar irradiance forecasting, European Geosciences Union General Assembly (EGU) 2016 Vienna, Austria, April 2016.
- [3] Y. GOULAMOUSSENE, L. LINGUET, B. HÉRAULT, Detection and Distribution of Natural Gaps in Tropical Rainforest, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, California-USA, December 2014.
- [4] S. CALMANT, M. BECKER, J. SANTOS DA SILVA, T. CONCHY, V. ROBINET, F. SEYLER, L. LINGUET, Unprecedented Monitoring of the Water Levels in the Ungauged Congo Basin Using Satellite Altimetry, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, California-USA, December 2014.
- [5] F. SEYLER, L. LINGUET, S. CALMANT, Long Term Discharge Estimation for Ogoué River Basin, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, USA, December 2014.
- [6] J. RINGARD, M. BECKER, P. AUDOIS, F. SEYLER, L. LINGUET, Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Products over Guiana Shield, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, California-USA, December 2014.
- [7] L. LINGUET, I. MARIE-JOSEPH, M. BECKER, F. SEYLER, A Bayesian approach for calibration of TRMM 3B42 RT over Northern Amazonia, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, California-USA, December 2013.
- [8] P. AUDOIS, L. LINGUET, I. MARIE-JOSEPH, M. BECKER, Validation of satellite-based rainfall estimates over French Guiana for use in flood forecasting, XV<sup>e</sup> Symposium SELPER 2012, Earth Observation for a Green Co-developed World, French Guiana, November 2012.
- [9] S. SELENGUE, I. MARIE-JOSEPH, L. LINGUET, M. BECKER, High spatial resolution atlas for ecological monitoring in French Guiana, XV<sup>e</sup> Symposium SELPER 2012, Earth Observation for a Green Co-developed World, French Guiana, November 2012.
- [10] M-L GOBINDDASS, L. LINGUET, I. MARIE-JOSEPH, Toward a clear-sky model for the French Guiana Area, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, California-USA, December 2011.
- [11] A. ABBAS, I. MARIE-JOSEPH, L. LINGUET, H. CLERGEOT : Improvement of individual solar heater efficiency, International Symposium of Environment Identities and Mediteranean Area, ISEIM 2006, Corte-Ajaccio, France, Juillet 2006.
- [12] L. LINGUET, F. FOREST, M. BASE : 'A new amplitude modulation strategy for high power solid state broadcast transmitters', PCIM 94, Nuremberg, June 1994.

---

## Autres communications dans des congrès nationaux (avec acte)

---

- [1] R.-R. JOSEPH, L. LINGUET : Une approche réactive du problème d'arbre couvrant maximal basé sur l'algorithmme de Kruskal, 3e Journées Francophones de Programmation par Contraintes, Rocquencourt, France 4-6 Juin 2007.

[2] S. JOVIAL, L. LINGUET, H. CLERGEOT : 'Méthodes et procédés de diagnostic d'une chaîne électrotechnique' Congrès Electronique de Puissance du Futur, EPF 99, Douai, mars 1999.

[3] L. LINGUET, F. FOREST, M. BASE : 'Une nouvelle approche pour la réalisation d'émetteurs radiofréquence à état solide', Congrès Electronique de Puissance du Futur, EPF 94, Cachan, Septembre 1994.

## Chapitres d'ouvrages

---

[1] L. LINGUET, J. ATIF. "A Markov Chain Monte Carlo-based Particle Filter Approach for Spatiotemporal Modelling of an Environmental Process". In book: Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment. Edition: 2016. Chapter: Part IV, Publisher: Springer International Publishing, Editors: N. Janardhana Raju, pp. 617-621. doi: 10.1007/978-3-319-18663-4\_93.

[2] L. LINGUET, I. SADLI, A. PRIMEROSE, O. TAMARIN, A. ABBAS, A. OMRANE. "Between ecological systems and renewable energy production sites, looking for co-viability". In book: Co-viability of Social and Ecological Systems: Reconnect Man to the Biosphere in a Global Era of Change. Edition: 2016. Publisher: Springer International Publishing, Editor: O. Barrière Ed., Springer. *En cours de publication*.

## Rapports de recherche contractuels

---

### [1] Projet SOLAREST financé par le FEDER et la Région Guyane

L. LINGUET : "Estimation et prédiction de la ressource solaire via l'imagerie satellitaire en vue d'améliorer le taux de pénétration sur le réseau électrique". Rapport scientifique, 2015.

### [2] Projet PHEUS financé par le FEDER, le CNES et la Région Guyane

L. LINGUET : "Prévision des Evénements Hydrologiques Extrêmes par Utilisation de données Satellites". Rapport scientifique, 2015.

### [3] Projet financé par l'ADEME

L. LINGUET, O TAMARIN, S. IDRIS, M. SEBELOUE, I. MARIE-JOSEPH : "Analyse de la première année de fonctionnement d'une centrale hybride Photovoltaïque-Thermique". Rapport scientifique, 2010.

### [4] Projet financé par le FEDER et la Région Guyane

L. LINGUET : "Analyse détaillée de la productivité des systèmes photovoltaïques à usage domestique en milieu amazonien". Rapport scientifique, 2005.

### [5] Projet financé par l'ADEME et EDF

L. LINGUET, I. MARIE-JOSEPH : "Suivi des installations photovoltaïques de Saül (site isolé Guyane)". Rapport d'étude, 2004.

### [6] Projet financé par l'ADEME

L. LINGUET : "Analyse du dimensionnement des installations photovoltaïques". Rapport d'étude, 2004.

### [7] Projet financé par l'ADEME

L. LINGUET : "Campagnes de mesures énergétiques sur les générateurs photovoltaïques en sites isolés". Rapport d'étude, 2003.

### [8] Projet financé par la Région Guyane

---

S. JOVIAL, L. LINGUET : “Analyse technico-économique de la rénovation d’une Rhumerie”.  
Rapport d’étude, 2003.

**[9] Projet financé par l’ADEME et EDF**

A. ABBAS, A. PRIMEROSE, L. LINGUET : “Etude de la productivité d’un chauffe-eau solaire”.  
Rapport d’étude, 2003.

**[10] Projet financé par l’ADEME et EDF**

A. PRIMEROSE, L. LINGUET : “Etude de la récupération d’énergie sur climatiseurs individuels”.  
Rapport d’étude, 1995.