



HAL
open science

Variabilité spatiale et temporelle du rayonnement solaire global sur une topographie à relief marqué et complexe. Cas de l'île de La Réunion

Pauline Mialhe

► **To cite this version:**

Pauline Mialhe. Variabilité spatiale et temporelle du rayonnement solaire global sur une topographie à relief marqué et complexe. Cas de l'île de La Réunion. Physique [physics]. Université de la Réunion, 2018. Français. NNT : 2018LARE0029 . tel-02059865

HAL Id: tel-02059865

<https://theses.hal.science/tel-02059865>

Submitted on 7 Mar 2019

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.

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

École doctorale n° 542 : Sciences, Technologies et Santé
Spécialité : Physique de l'environnement

Présentée et soutenue par : Pauline Mialhe
Date de soutenance : 14 septembre 2018

VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL SUR UNE TOPOGRAPHIE À RELIEF MARQUÉ ET COMPLEXE Cas de l'île de La Réunion

Directeur de thèse : Pr. Jean-Pierre Chabriat
Co-directeur de thèse : Pr. Miloud Bessafi

JURY COMPOSÉ DE :

P. Blanc	Pr, Mines ParisTech	<i>Rapporteur</i>
N. Philippon	CR1 CNRS - HDR, LTHE, Grenoble	<i>Rapporteur</i>
J. Badosa	Dr, LMD, Palaiseau	<i>Membre du jury</i>
Y. Brou	Pr, Espace-Dev, La Réunion	<i>Membre du jury</i>
B. Morel	MCF - HDR, LE2P, La Réunion	<i>Membre du jury</i>
B. Pohl	CR CNRS - HDR, Biogéosciences/CRC, Dijon	<i>Membre du jury</i>
J-P. Chabriat	Pr, LE2P, La Réunion	<i>Directeur de thèse</i>
M. Bessafi	Pr, LE2P, La Réunion	<i>Co-directeur de thèse</i>

Cette thèse a reçu le soutien financier de la Région Réunion et de l'Union Européenne – Fonds européen de développement régional (FEDER).

Résumé

Parmi les îles de l’Indianocéanie, La Réunion présente une topographie complexe soumise à un climat tropical fortement variable. Sa localisation dans le sud-ouest de l’océan Indien lui octroie un potentiel solaire important. Concomitamment, son isolement géographique dirige le territoire vers l’autonomie énergétique, par la meilleure intégration des énergies renouvelables dans son mix énergétique. Le verrou de l’exploitation du gisement solaire local réside dans la forte intermittence de cette ressource qui est grandement tributaire de la couverture nuageuse. Ainsi, il est de première nécessité d’approfondir les connaissances du potentiel solaire local, autant en ce qui concerne sa variabilité temporelle que sa répartition spatiale. Les travaux de recherches ici menés s’axent autour de cet approfondissement nécessaire du gisement solaire local.

La mesure *in situ* du rayonnement solaire global n’est pas équitablement répartie sur le département et ne permet donc pas d’établir une cartographie aussi équilibrée que celle offerte par les résolutions de l’imagerie satellitaire. Dans le cadre des travaux de recherches, nous exploitons le produit satellitaire SARAH-E (Solar surFAce RAdition Heliosat – East) prodigué par le SAF Climat (CM SAF) d’Eumetsat. Les résolutions spatiales et temporelles de SARAH-E permettent d’étudier l’irradiance à la surface de La Réunion sur un total de 89 pixels et de 16 ans de données horaires ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$, 1999-2015, excluant 2006). Grâce à ces données, nous articulons l’approfondissement de la connaissance du gisement solaire autour de deux méthodologies complémentaires.

Dans une première étude, une cartographie du potentiel solaire moyen est établie en combinant ses deux composantes orbitales, soit : les cycles diurne et saisonnier. La complémentarité de cette considération nous permet d’extraire des zones cohérentes tant au niveau spatial que temporel, à l’image de la dynamique atmosphérique locale. En seconde partie, il sera ensuite question de quantifier et qualifier les perturbations possibles pouvant moduler le potentiel solaire moyen dans la journée. Cinq journées-types sont retenues et caractérisées selon leurs structures spatiales et temporalité associée. Par la suite, nous proposons un premier lien entre les perturbations solaires locales et certains processus atmosphériques de plus large échelle. Ainsi, nous estimons des modulations relatives selon l’oscillation de Madden-Julian, les talwegs tropicaux-tempérés et les cyclones. Finalement, nous décomposons la ressource solaire réunionnaise en (1) un potentiel moyen cyclique, selon une combinaison de la variabilité saisonnière à l’évolution diurne, et (2) des perturbations journalières types, présentant des liens avec les dynamiques atmosphériques à plus large échelle.

Remerciements

Enfin, en fin, et face à ce nouvel exercice rédactionnel des remerciements.

Écrire ces quelques lignes en préambule du manuscrit déjà rédigé, c'est poser la cerise sur le gâteau. À ce moment-là, je repense aux années passées, aux personnes rencontrées, aux expériences, tant scientifiques qu'humaines, vécues. Cette cerise conclura ce chapitre de ma vie. Ces remerciements offriront, je l'espère, un sourire aux concernés et un moment de lecture agréable à tout curieux qui s'aventurera jusque-là !

*En premier lieu, je remercie Messieurs **Jean-Pierre CHABRIAT** et **Miloud BESSAFI**, mes deux directeurs de thèse, sans lesquels je n'aurais pas entrepris ce périple. Je ne pourrais résumer en quelques mots ce que vous m'avez appris, et qui va au-delà de mes années de doctorat. En effet, vous étiez aussi mes professeurs en licence et en master. Vous êtes donc les deux témoins les plus légitimes de mon passage du cap de l'étudiante à l'après. Merci à vous deux, pour cette opportunité que vous avez construite, vers laquelle vous m'avez guidée et grâce à laquelle j'ai tant évolué.*

*Parmi les autres témoins et acteurs de la finalisation de ce manuscrit, je remercie mes deux rapporteurs : **Philippe BLANC** et **Nathalie PHILIPPON**. Vos retours sur mon manuscrit l'ont indéniablement amélioré. Je tiens aussi à vous remercier de nos échanges lors de ma soutenance. Défendre ma thèse avait l'image d'une épreuve que je n'ai finalement pas vécue en tant que telle. En effet, j'en garderai plutôt le souvenir d'un moment d'échanges et de partage. J'étais agréablement étonnée d'y prendre autant de plaisir.*

*Les autres membres de mon jury de thèse ont tout autant participé à cette conclusion et je les en remercie aussi. Merci à **Jordi BADOSA** pour les questions pertinentes dont une à laquelle j'ai particulièrement aimé répondre. Merci aussi à **Téléphore BROU** des échanges et, plus particulièrement, d'avoir présidé mon jury de thèse.*

*Et comme le meilleur est pour la fin, je remercie maintenant les deux membres de mon jury de thèse restant : **Béatrice MOREL** et **Benjamin POHL**. Vous êtes les acteurs incontournables de ces années de doctorat. Que je sois à La Réunion ou à Dijon, votre présence, votre soutien, et j'en passe, m'ont motivée et me motive toujours. Je ne me rappelle qu'aucun de nos échanges, directs ou par écrans interposés, ne fut sans un conseil avisé et ponctuel et/ou encadré d'humour. Merci **Béa**. Merci **Ben**. Je suis heureuse de pouvoir prolonger ce plaisir qu'est de travailler avec vous.*

*Après avoir remercié les individus constituant le noyau de cette thèse, je me tourne vers son cortège électronique. En effet, je ne peux oublier de remercier les personnes que j'ai eu l'occasion, parfois même l'honneur, de côtoyer, que ce soit quotidiennement ou ponctuellement. Du **LE2P** au **CRC**, il y a tant d'autres personnes que j'aimerais citer ici. Je présente déjà mes plus plates excuses à ceux qui, peut-être victimes des aléas de la mémoire, seront passés sous silence.*

Remerciements

Invariant soutien de la biblio à la rédaction, je remercie le grand frère que j'ai trouvé en **Farid**, pilier de la bonne humeur et du bon humour. Le petit groupe Faims des midis RU aura été le soleil d'une première période de ma thèse, les heureux -ou pas- nombreux élus se reconnaîtront. Parmi eux, merci à **Kévin**, **Thomas**, dear **John**, **Marine**, **Charlotte** et même **Brice**, **Alicia**, **Sarah**, **Pierre**, **Alban** et al.

Après les Faims, j'ai eu l'honneur de rencontrer et de côtoyer de bien joyeux lurons hippiques-épiques. Vos aventures toujours colorées sont indélébiles. Merci à **Mathieu** qui d'ailleurs n'a jamais manqué d'R, à **Pierre**, à **PO**, **Olga**, **Marco**, à la douce **Anne-lise** et j'en passe.

Pépites de ces années, j'ai rencontré les deux plus drôles copines que je n'ai jamais eues : mes deux supers nanas **Coralie** et **Noëilly**. Chaque jour avec vous avait sa propre péripétie, de la branche à la chenille, de ces histoires de pirates et d'aérobic revisité, de la palissade jaune et blanche... et j'arrête la liste là avant d'en écrire une deuxième thèse. Nos rires et sourires me manquent terriblement.

Un changement d'hémisphère m'aura fait découvrir un monde de « Bisounours », aussi chaleureux que les températures, bien loin de mes normales réunionnaises, ne l'étaient pas. Merci aux personnes qui ont rendu mes séjours possibles et agréables : **Ben**, **Jess** et les **boys** ; **Béa** et al. ; **Julita** et al. É **Julie** et al. ; ce cher dromois-daire **Florian**, son-mon chameau le **Séb**, il signore **Mario**, **Jules** et al., et **Albin**, et bien d'autres **CRCiens** que j'ai eu l'honneur de côtoyer.

Retour la tête à l'envers, il y a d'autres collègues et amis **LE2Piens** qui m'ont supporté et à qui je ne peux oublier de dire merci : The starvation attenuator **Étienne**, le ninja **Christophe**, ce cher cousin **Jean-Maurice**, **Fabrice** Kiforparl, **Lionel-sensei** et **Yannick**, la relève. D'autres collègues méritent des mercis, pour des bonjours toujours souriants ou des conversations sur les sens de la vie et de la thèse. Merci **Chao** et al., les **Li**, **Yi**, **Jonathan**, **Yassine**. Merci à **Carole**, et particulièrement pour un conseil avisé qui m'aura aidé à tenir la distance. Merci aussi à nos deux piliers du laboratoire **Patrick** et **Kelly**. Merci aux collègues des OS 1 et 3, de **Dominique** à **Michel**. Merci aussi aux personnes des autres laboratoires avec lesquelles j'ai pu partager un midi ou une soirée de fin de thèse : particulièrement **Pierre-Éric**, **Charifat**, **Keshika** mais j'en oublie encore. Merci aux copains-copines des cafés, parfois +chocolat, du 3^{ème} étage, parmi eux : **Édith**, **Delphine**, **Marie-Laure**, **Aurélie**, **Emeric**, sans oublier **Georges**, notre incontournable fournisseur de capsules.

En ce qui concerne **ma famille** et **mes amis**, je les remercie de leur soutien car ils auront vécu, de près ou de loin, ces années de doctorat avec moi et même avant. Si n'importe lequel de vous s'aventurerait jusque-là, j'espère qu'il comprendra mes moments d'absence ou de manque de réactivité à donner des nouvelles. **L'un bien particulier** de vous pourrait en écrire de même. D'ailleurs, s'il lit ces lignes (et puisqu'il les lira), je l'invite à bien vite s'occuper de sa bête à lui. Quant à **la plus têtue de vous** qui passera par là, je l'encourage à continuer de l'être car elle est bien partie pour devenir plus têtue que moi (et que l'un d'avant). Je suis fière de vous deux. Merci pour votre soutien et parfois compréhension.

Un autre bien particulier s'aventurera dans la lecture de ces lignes qui complétera celles des suivantes. Les siennes arriveront aussi tôt que possible, comme une étoile posée sur son

sapin ? Toutes ces distances et durées, étoile ou cerise, on ne les dépasse que si on le veut. À ce jour, je suis heureuse de les avoir dépassées. Merci à **toi** de m'y avoir aidé.

Parmi mes derniers mercis, j'en offre tout naturellement à **mes Papas**. D'ici et d'au-delà, puissiez-vous tous les lire. Le plus grand de mes mercis, il revient à **ma Maman**, pour plus que je ne pourrais l'écrire ici.

Et voilà ! J'ai essayé de faire le tour de ce microcosme de vie de thèse et alentours. Je réitère mes excuses auprès de ceux que je n'ai pas nommés, par oubli ou pour ne pas trop allonger ces plus de deux pages. Après un long syndrome de la page blanche, ces remerciements ont finalement été plus fluides que prévu à écrire. Me voici donc à cet instant où **BAAAM**, c'est fini ! Je conclus cette page, jolie page de remerciements, que je tourne vite en me rappelant toutes les expériences enrichissantes de ces années-là ! Je vous abandonne donc au début de ce manuscrit. Moi, je suis prête pour la **Suite**...

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Acronyms	xi
Introduction générale	1
I. La ressource solaire : une grandeur complexe soumise à la forte variabilité de l'atmosphère	7
1. Description de la ressource solaire de la Terre	8
1.1. Le potentiel énergétique solaire	8
1.2. Les cycles de la ressource solaire	10
1.3. Les interactions avec l'atmosphère	12
2. Les modes de variabilité de la circulation atmosphérique	20
2.1. La variabilité saisonnière et la circulation générale	21
2.2. La variabilité intra-saisonnière	23
2.3. La variabilité synoptique	25
2.4. La variabilité inter-annuelle	27
3. La Réunion	31
3.1. Une topographie complexe	32
3.2. De fortes pluies	38
3.3. Des circulations locales	40
3.4. Deux processus nuageux	43
3.5. Une ressource solaire intermittente	45
II. Base de données solaires : choix des données et méthodes de classification induites	49
1. Choix d'une base de données	50
1.1. Description des bases de données sélectionnées	50
1.2. Limite des bases de données d'observation in situ	57
1.3. Choix d'une base de données satellites	61
1.4. Estimation de la qualité des données satellites choisies	66
2. Méthodologie de caractérisation de la ressource solaire	76
2.1. Caractérisation spatiale des états moyens	76
2.2. Caractérisation temporelle en régime d'anomalies	78

III. Cartographie du potentiel solaire	87
1. Explicitation de la structuration du potentiel solaire moyen	88
1.1. Description du rayonnement global moyen de La Réunion	88
1.2. Mise en évidence des principales structures spatiales solaires	89
1.3. Estimation de la pertinence des structures	91
2. Mise en évidence de la complémentarité des deux composantes orbitales	94
2.1. Évolution diurne	94
2.2. Le cycle saisonnier	97
2.3. L’apport des états moyens	100
3. Régionalisation de la ressource solaire moyenne	108
3.1. Structuration spatiale	108
3.2. Caractérisation des zones solaires	110
4. Conclusion du chapitre	116
IV. Perturbations du potentiel solaire : « régimalisation » et influence des circulations atmosphériques	117
1. « Régimalisation » des perturbations solaire	118
1.1. La limitation de l’étude sur le potentiel solaire moyen	118
1.2. Choix d’un nombre de régimes	120
1.3. Définition des cinq régimes d’écart au potentiel solaire orbital	122
1.4. Description spatiale des anomalies de chaque régime	124
1.5. Caractérisation temporelle des régimes	129
2. La modulation du gisement solaire par les circulations atmosphériques	138
2.1. De méso-échelle : L’influence des systèmes dépressionnaires tropicaux	138
2.2. D’échelle synoptique : L’influence des talwegs tropicaux-tempérés	140
2.3. D’échelle globale : L’influence de l’oscillation de Madden-Julian	143
3. Conclusion du chapitre	147
Conclusion générale	149
Perspectives	151
Annexe A. Figures annexes de la description des stations <i>in situ</i>	177
1. Données du laboratoire	177
2. Données Météo-France	178
Annexe B. Compléments de la comparaison des produits CMSAF	181
Annexe C. Compréhension des grilles aberrantes	183

Annexe D. Compléments de la comparaison entre les données <i>in situ</i> et satellite	191
1. Tableau pour Gillot	191
2. Détails de la comparaison	191
3. Comparaison pour le cas de Gillot	192
4. Complément de la visualisation graphique de la comparaison : pour tous les sites	193
Annexe E. Compléments de la caractérisation spatiale	211
1. Visualisation des 120 états moyens du potentiel solaire de La Réunion	211
2. Classification	216
Annexe F. Compléments de la caractérisation temporelle	219
1. Figures complémentaires de la « régimalisation » des perturbations solaire (IV1)	219
2. Figures complémentaires du lien avec la large échelle (IV2)	223
Annexe G. Captures d'écran des applications html développées	225

Acronymes

ACP analyse en composantes principales.

AERONET AErosol RObotic NETwork.

CDR Climate Data Record.

CEPMMT Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme.

CHA classification hiérarchique ascendante.

CM-SAF Satellite Application Facility on Climate Monitoring.

CMRS Centre Météorologique Régional Spécialisé.

CNRTL Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales.

CRC Centre de Recherches de Climatologie.

ECMWF The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

ENSO El Niño-Oscillation Australe.

Eumetsat European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites.

GEBA Global Energy Balance Archive.

GIEC Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

IOD Dipôle de l'Océan Indien.

IODC Indian Ocean Dipole Coverage.

LE2P Laboratoire d'Énergétique, d'Électronique et Procédés.

LIM Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques.

LWR LongWave Radiation.

MJO oscillation de Madden-Julian.

OLR Outgoing Longwave Radiation.

OMM Organisation Météorologique Mondiale.

PPE Programmation Pluriannuelle de l'Énergie.

RCIGS Réseau de Capteurs Intelligents pour une meilleure connaissance du Gisement Solaire.

SARAH Solar surfAce RAdiation Heliosat.

SARAH-E Solar surfAce RAdiation Heliosat - East.

SDT systèmes dépressionnaires tropicaux.

SIOD Dipôle Subtropical de l'Océan Indien.

Acronyms

SIS Surface Incoming Shortwave radiation.

SST Sea Surface Temperature.

SWR ShortWave Radiation.

TTT talwegs tropicaux-tempérés.

ZCIT zone de convergence intertropicale.

ZCSI Zone de Convergence Sud-Indienne.

ZNI zones non-interconnectées.

Introduction générale

De nos jours, à l'ère du réchauffement climatique (Von Schuckmann et al., 2016), la communauté internationale est appelée à construire des stratégies articulées autour de deux mots-clés : l'adaptation et l'atténuation. En effet, le système climatique présente depuis plusieurs décennies « des changements climatiques », se manifestant aussi bien au niveau des continents (Trenberth et al., 2014) que des océans (Shepherd et al., 2018; Cheng et al., 2017), et de toutes les autres sphères terrestres. En la circonstance, l'influence de l'homme est indéniable et son rôle ne doit pas s'en arrêter à là.

Depuis sa création en 1988, le [Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat \(GIEC\)](#) a rédigé cinq rapports. Ainsi, en 2014, dans leur 5^{ème} rapport, la nécessité de répondre de l'impact climatique est construite autour de la complémentarité entre l'adaptation et l'atténuation. Une synthèse de ce rapport est d'ailleurs rédigée et adressée aux responsables sociaux et décideurs. L'objectif est de les aider à diriger des plans d'action vers un avenir meilleur (SPM, 2014).

L'atténuation se traduit par la modification des comportements actuels pour pallier les amplifications futures de ce qui est déjà associé à une influence néfaste. Massivement, la course à la diminution des émissions anthropiques a été lancée. Cependant, elle n'est qu'une réponse partielle. Cette démarche semble insuffisante pour éviter la tendance actuelle et la marche vers une situation catastrophique. En effet, le forçage radiatif de ces émissions combiné à leur durée de vie dans le système climatique rend la portée de l'atténuation trop longue. De plus, des incertitudes existent quant à la stabilité des modifications déjà existantes. Ainsi, limiter l'ampleur est certes une action incontournable, néanmoins elle doit être combinée à un plan global.

L'adaptation, quant à elle, c'est l'amélioration de la prévision et de la gestion des conséquences de l'impact déjà observé. Nous sommes donc appelés à élaborer des stratégies adaptées pour compléter les actions d'atténuation. C'est un véritable défi sociétal que l'Humanité aura à relever et, dans ce cas, les contraintes et les possibilités d'adaptations couvrent tous les domaines et toutes les échelles spatiales. Nous voulons ici souligner avec force qu'agir sur « tous les domaines et toutes les échelles » ne saurait être apporté par une solution locale, fût-elle complète. En effet, les spécificités locales diffèrent d'un endroit du globe à un autre. Une synergie pourrait être composée à partir de la mosaïque des spécificités. Le champ des innovations est donc large et les gouvernances ont la responsabilité de les appréhender dans leur complémentarité.

Finalement, il est question d'un enchevêtrement des échelles et des domaines pour lutter contre le dérèglement climatique, à court et à plus long termes. Les solutions de demain doivent être créées tout à la fois en limitant notre pression anthropique, en

préservant la nature et notre histoire et en anticipant les impacts et les conséquences d’avenir. La construction de cet équilibre est un enjeu mondial. D’ici octobre 2018, le **GIEC** publiera le premier des trois rapports spéciaux de son 6^{ème} cycle. Avant fin 2019, les deux autres suivront et d’ici 2021, le 6^{ème} rapport sera finalisé. Ce 6^{ème} rapport alimentera en 2023 le premier des bilans quinquennaux mondiaux de la mise en œuvre de l’Accord de Paris. Au cours de ce 6^{ème} cycle, le **GIEC** s’est aussi engagé à traiter en profondeur la question, plus locale que globale, des villes et sur les défis auxquels elles sont confrontées en termes d’atténuation et d’adaptation.

Au sein de l’Europe, la transition énergétique s’installe de plus en plus, en écho aux problématiques mondiales posées par le **GIEC**. En 2017 et pour la première fois, 30 % de la production d’énergie électrique de l’Europe a été assurée par les ressources solaire, éolienne et de la biomasse (**Jones et al., 2018**). Ainsi, dès 2020, il pourrait être question d’assurer à 36 % cette production énergétique par ces mêmes ressources renouvelables.

En ce qui concerne la France en 2017, sa production électrique inclut à 18,4 % renouvelable, ce qui traduit une diminution de 1,3 % par rapport à l’année précédente. Présenté le 6 juillet 2017, le Plan Climat est à l’origine de la fermeture de cinq groupes thermiques au fioul pendant l’année passée. De la sorte, la production d’électricité française est « décarbonée » à près de 90 % en 2017. Cependant, assurant 4 TWh, le nucléaire génère 71,6 % de la production électrique française de 2017. Cette grandeur représente tout de même la plus basse production depuis 10 ans (**Jones et al., 2018**).

Par ailleurs, une révision de la **Programmation Pluriannuelle de l’Énergie (PPE)** aura lieu d’ici la fin de l’année 2018. Pour le moment, une phase de débat est ouverte pour les prochaines **PPE**, soit 2018-2023 et 2024-2028. Les **PPE** concernent aussi bien le territoire français continental que les **zones non-interconnectées (ZNI)**. En ce qui concerne ces dernières, les **PPE** sont co-élaborées avec les autorités locales pour mieux appréhender les spécificités de chaque territoire. En effet, leur isolement géographique ne leur permet pas, ou peu, de bénéficier d’interconnexions à un réseau électrique continental. Dans un tel contexte, le caractère intermittent des ressources solaire et éolienne limite leur intégration dans un mix énergétique des **ZNI**. Pour La Réunion, cette limite a été fixée à 32 % de puissance instantanée en 2016, et devrait évoluer à 35 % en 2018 et 45 % en 2023 (**Réunion, 2016**). Bien que dites « énergies fatales », les ressources solaire et éolienne réunionnaises présentent un fort potentiel à exploiter. Dans la circonstance, à La Réunion et dans les autres **ZNI**, les **PPE** doivent considérer les particularités de chaque entité aussi bien pour en comprendre les limites locales que les pistes d’amélioration exploitables.

Comme n’importe quelle entité isolée, le réseau électrique réunionnais est contraint de se suffire à lui-même. D’abord l’énergie hydraulique, puis les énergies fossiles ont assuré pendant longtemps la stabilité du réseau. Depuis la loi de la transition énergétique pour la croissance verte, la production énergétique s’oriente vers les énergies renouvelables.

En effet, le territoire réunionnais baigne dans un environnement dont le fort potentiel solaire et éolien est indéniable et d'autant plus à valoriser (Praene et al., 2012). La forte dépendance aux ressources fossiles en est d'autant moins justifiable. En 2016, le mix énergétique de la production électrique de La Réunion est tel que présenté en figure .1. Dans le PPE réunionnais de 2016 (Réunion, 2016) est annoncé l'ambition d'atteindre

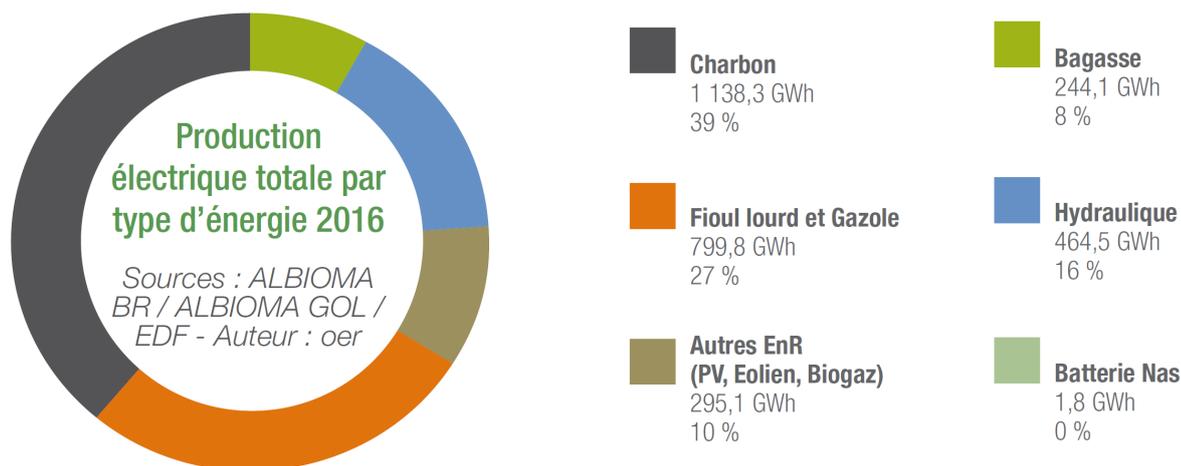


FIGURE .1. – Mix électrique de La Réunion en 2016 de OER (2017)

50 % d'énergies renouvelables dans le mix électrique de 2020, contre 34 % en 2014. Pour se faire, de nombreux axes sont à développer (Réunion, 2016) parmi lesquels sont l'amélioration de la prévision de la production des énergies renouvelables intermittentes et le développement des smart grids. Ces deux derniers s'avèrent particulièrement complémentaires et offrent une solution adaptative au sens de ce que le GIEC préconise.

Les smart grids, ou réseaux électriques intelligents, sont un modèle de réseau électrique ajustant la production diffuse à la consommation, et donc faisant le lien entre fournisseurs et consommateurs, selon une collecte d'information en temps réel. Le réchauffement climatique pouvant être vu comme un défi énergétique, les smart grids offrent une solution innovante qui permettrait la meilleure intégration des énergies renouvelables (ADEME et al., 2017; RTE, 2017). Cependant, ces solutions doivent être dimensionnées aussi bien en terme d'installations de la production et du stockage qu'en des termes de variabilité des flux électriques.

En considérant La Réunion et sa volonté de construire une autonomie énergétique (d'abord électrique) verte mais stable, la production décentralisée de l'électricité et la gestion intelligente relative aux smart grids se présente comme une solution « rationnelle » (ADEME et al., 2017). Cependant, des travaux préliminaires sont nécessaires à la meilleure compréhension de l'exploitabilité des ressources électriques locales telles que l'éolien, le photovoltaïque et l'hydraulique. L'énergie solaire est celle dont la production

est la plus décentralisable allant de l'échelle de l'île à l'échelle d'un quartier. Ainsi, nous avons choisi de nous intéresser à la ressource solaire de La Réunion et à sa forte variabilité. La question directrice de mes travaux est : « *Comment appréhender les spécificités intrinsèques et extrinsèques de la ressource solaire réunionnaise ?* »

La littérature fait état de peu d'études du rayonnement solaire de La Réunion. En début de thèse, deux articles présentent une caractérisation de la variabilité du cycle diurne solaire au travers de 5 régimes (Badosa et al., 2013; Bessafi et al., 2015a). Il existe aussi un livre publié par Météo-France qui détaille la variabilité saisonnière du rayonnement globale de La Réunion (Jumaux et al., 2011). Dans ces trois cas, les données utilisées sont des mesures *in situ* qui ne sont pas équitablement réparties sur le territoire complexe réunionnais. De plus, les périodes d'études sont relativement courtes. L'utilisation des solutions satellitaires peut répondre à la nécessité d'un équilibrage spatiale des mesures mais aussi au besoin d'avoir une vision plus large d'un phénomène local. Par ailleurs, la variabilité de la ressource solaire de l'Afrique du Sud est étudiée grâce à des données satellitaires (Tang et al., 2018). La Réunion faisant partie de la fenêtre d'observation, l'imagerie satellitaire peut donc servir à réaliser une caractérisation de la ressource solaire réunionnaise. Les satellites Météosat proposent même une série d'image dont la position centre presque l'image sur La Réunion. Découlant de ces images, la base de données Solar surfAce RAdiation Heliosat - East (SARAH-E) contenant des données radiatives est directement utilisable pour les études sur La Réunion. Récemment, un tel emploi est fait pour valider une méthode de descente d'échelle offrant par ailleurs un détail de l'évolution saisonnière de la ressource solaire moyenne de La Réunion (Bessafi et al., 2018).

Ainsi, deux constats ont permis d'élaborer une réponse à la question directrice de ce manuscrit.

Tout d'abord, un état de l'art présente l'utilisation des données satellites pour La Réunion comme une opportunité pour en approfondir la connaissance de sa ressource solaire. De plus, le cycle diurne est fortement variable et présente des caractéristiques saisonnières (Badosa et al., 2013, 2015). La combinaison de ces deux composantes apparaît donc comme une idée pertinente à concrétiser, combinant et complétant les études existantes (Badosa et al., 2013; Jumaux et al., 2011). Le dimensionnement de moyens de production et stockage y trouve donc des informations complémentaires puisque la variabilité moyenne du cycle diurne dépend de la localisation mais aussi de la saison.

Un second constat est qu'il est nécessaire d'ouvrir l'étude moyenne du potentiel solaire sur la question de sa réalité horaire. En effet, les questionnements énergétiques ne trouvent de réponse complète dans la seule étude d'une moyenne. Un état de l'art présente des régimes types sur la base de mesures *in situ* dont la répartition spatiale limite l'analyse. L'utilisation des données satellites permet d'apporter une nouvelle vision spatiale, proposant ainsi une évolution diurne de l'ensemble de la ressource solaire sur l'île.

Cependant, pour compléter le premier constat et les recherches menées en résultant, le deuxième constat est complété par l'étude non pas de données horaires mais d'écart horaire à un comportement moyen. De plus, la compréhension des liens entre une variable observée et les phénomènes atmosphériques de plus large échelle (Macron et al., 2016) nous amène à ces mêmes questionnements. Ainsi, le deuxième constat souligne à la fois la nécessité d'une étude de la variabilité horaire de la ressource solaire et aussi de la compréhension de l'influence de son contexte de plus large échelle.

Finalement, ces deux constats amènent à répondre à la question : « *Comment appréhender les spécificités intrinsèques et extrinsèques de la ressource solaire réunionnaise ?* » par la présente étude de la « *Variabilité spatiale et temporelle du rayonnement solaire global sur une topographie à relief marqué et complexe* ». Le manuscrit détaille les recherches induites selon quatre chapitres :

1. Un premier chapitre présente les éléments de contexte scientifique qui sont nécessaires à la compréhension de la ressource solaire et de sa variabilité. Le rayonnement solaire reçu à la surface terrestre est une grandeur complexe que nous décrivons dans un premier temps. Nous détaillons ensuite son partenaire antagoniste qu'est la couverture nuageuse au travers de son gestionnaire que sont les circulations atmosphériques. Enfin, les spécificités de La Réunion sont telles que nous lui consacrons une section entière.
2. Un deuxième chapitre expose les choix de base de données et de méthodologie qui ont été construits. Dans un premier temps, les bases de données sont recensées puis comparées pour asseoir un choix dont nous estimons la qualité. Puis, les méthodologies de caractérisation de la ressource solaire sont détaillées.
3. Un troisième chapitre détaille la construction d'une cartographie locale du potentiel solaire moyen de La Réunion. Des structures locales sont définies en moyenne, puis nous mettons en évidence l'utilité de considérer ensemble les variabilités diurne et saisonnière de la ressource solaire locale. L'estimation de régions types est ensuite faite en considérant les deux cycles juste cités.
4. Un quatrième chapitre s'intéresse à qualifier les écarts entre la réalité diurne de La Réunion et son comportement moyen défini dans le chapitre 3. Une première étape construit cinq régimes types de ces perturbations de la ressource solaire locale. Ensuite, il est question de comprendre ces régimes types et d'en estimer le lien avec les circulations atmosphériques dans lesquelles le territoire réunionnais baigne.
5. Ensuite, une conclusion générale est présentée suite à laquelle des perspectives sont détaillées pour ouvrir l'étude menée.

Chapitre I.

La ressource solaire : une grandeur complexe soumise à la forte variabilité de l'atmosphère

Une étude sur le gisement solaire se doit d'examiner les caractéristiques de la variabilité spatio-temporelle du rayonnement solaire. Il est en fait question de s'imprégner de la connaissance de la ressource moyenne tout en appréhendant son intermittence. Dans ce premier chapitre, nous aborderons donc non seulement (1) l'aspect potentiel « moyen » mais aussi (2) les processus de l'atmosphère responsables de la qualification d'intermittente de la ressource. Ensuite, il sera nécessaire de replacer (3) le cadre de l'étude dans son contexte local.

Sommaire

1. Description de la ressource solaire de la Terre	8
1.1. Le potentiel énergétique solaire	8
1.2. Les cycles de la ressource solaire	10
1.3. Les interactions avec l'atmosphère	12
2. Les modes de variabilité de la circulation atmosphérique	20
2.1. La variabilité saisonnière et la circulation générale	21
2.2. La variabilité intra-saisonnière	23
2.3. La variabilité synoptique	25
2.4. La variabilité inter-annuelle	27
3. La Réunion	31
3.1. Une topographie complexe	32
3.2. De fortes pluies	38
3.3. Des circulations locales	40
3.4. Deux processus nuageux	43
3.5. Une ressource solaire intermittente	45

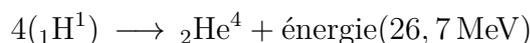
1. Description de la ressource solaire de la Terre

Une première description du potentiel solaire moyen se fera donc au travers de la quantité d'énergie que représente le Soleil pour la Terre, puis, par le détail des grands cycles pilotant l'amplitude de la ressource pour enfin mettre en place l'impact général de l'atmosphère au travers des interactions entre le rayonnement solaire entrant et l'atmosphère terrestre.

1.1. Le potentiel énergétique solaire

Étoile centrale de notre système solaire, le Soleil est la source d'énergie des planètes en orbite autour de lui. Avec une masse de $1,99 \times 10^{30}$ kg, il concentre plus de 99,85 % de la masse totale de notre système planétaire dont la limite gravitationnelle s'étend sur 1 ou 2 années lumières à partir de son centre. D'un rayon moyen de $6,96 \times 10^5$ km, le volume qui couvre le premier quart de son rayon représente approximativement 40 % de sa masse totale. Cette dernière est composée à 90 % d'hydrogène, à 10 % d'hélium et comporte des traces d'oxygène, de carbone et d'autres éléments lourds. De plus, la structure complexe du Soleil présente une forte variation de sa densité allant de 150 g.cm^{-3} en son centre à $10^{-7} \text{ g.cm}^{-3}$ à sa surface. Son profil de température quant à lui passe de 15 100 000 K en son noyau à 6 000 K à sa surface et remonte jusqu'à 5 000 000 K à la couronne solaire grâce à la complexité de son champ électromagnétique (Amari et al., 2015).

Réunissant des conditions de températures et de pression extrêmes, les éléments fortement agités rentrent en collision et permettent alors la réalisation de réactions de fusion nucléaire. Différents types de réactifs et produits sont identifiés mais la principale chaîne de réactions nommée *pp-chain* (ie. réaction pp) est la fusion d'hydrogène sous forme de protons pour obtenir de l'hélium. Cette réaction génère 99% des $3,843 \times 10^{26}$ J par seconde que représente la ressource solaire (Borexino Collaboration, 2014). Quatre protons sont donc transformés en un hélium et, selon la loi $E = mc^2$, la perte de masse de cette réaction entraîne une libération d'énergie comme suit :



L'énergie colossale libérée est transférée en 170 000 ans à la surface du soleil pour, ensuite, rayonner dans l'espace jusqu'à la Terre en à peine plus de 8 minutes (Haxton, 2014).

L'énergie du Soleil provenant de ces réactions de fusion nucléaire génèrent des ondes dites électromagnétiques qui sont définies par la notion de longueur d'onde. Couvrant le domaine allant de $0,2\text{-}4 \mu\text{m}$ (Wild, 2008), ces longueurs d'onde forment le spectre solaire et sont le vecteur du transfert de l'énergie du Soleil vers la Terre. Les ondes électromagnétiques qui définissent le spectre solaire sont chacune, selon leur longueur d'onde, le support d'une quantité d'énergie que l'on nomme irradiance spectrale. En figure I.1 est représentée l'irradiance spectrale du rayonnement solaire. On la mesure

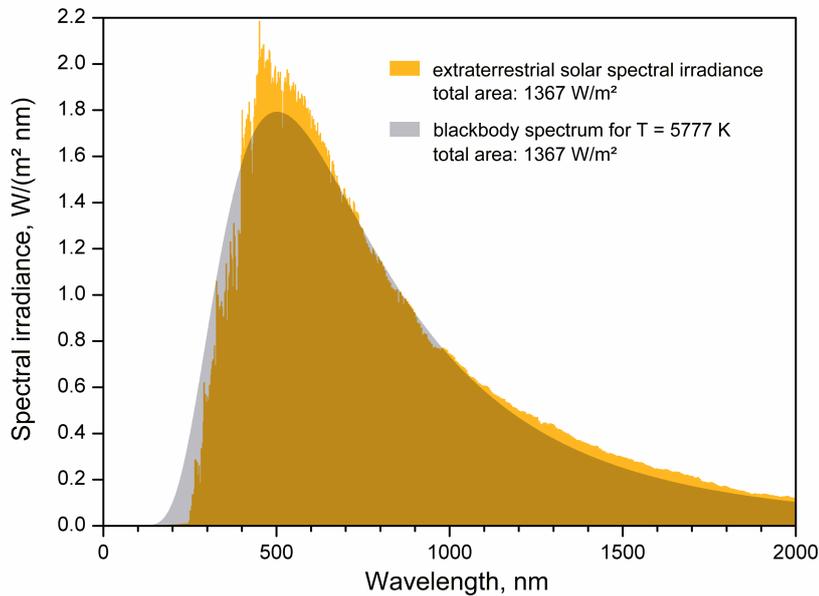


FIGURE I.1. – L’irradiance spectrale du rayonnement solaire reçue au sommet de l’atmosphère (en couleur) et celle du corps noir associé à la même quantité d’énergie (en gris). *Figure "File :EffectiveTemperature 300dpi e.png" sur <https://commons.wikimedia.org/>*

au sommet de l’atmosphère, avant toute interaction avec les éléments de la Terre qui l’absorbent et le réémettent dans d’autres longueurs d’onde. En intégrant sur tout le spectre solaire, on quantifie à $1\,367\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ l’irradiance solaire totale. C’est une valeur de référence que l’on désigne par le nom de constante solaire. En comparaison, la même quantité d’énergie est émise par un corps noir à $5\,777\text{ K}$, température à l’image de celle de la surface du Soleil. De récents travaux de recherches mettent en évidence une valeur de la constante solaire de $1\,372,3 \pm 16,9\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Meftah et al., 2017), ce qui représente un écart de $11\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ à la valeur de $1\,361\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Kopp and Lean, 2011) préconisée en 2015 par l’Union Astronomique Internationale. Bien que plus représentative de l’énergie moyenne reçue par la surface de la Terre, elle ne renseigne pas sur les écarts énergétiques entre les différentes latitudes du globe terrestre. Rien qu’en considérant la quasi-sphéricité de la Terre, la constante solaire est finalement divisée par 4 pour devenir un total énergétique de $340\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Cette valeur est établie par Wild et al. (2013) sur la base des $1\,361\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ de Kopp and Lean (2011). On parle alors de constante solaire par unité de surface réelle. La forme de la Terre induit de fortes inégalités quant à la quantité de rayonnement solaire entre la zone équatoriale et celles des latitudes plus lointaines. En effet, un rayonnement incident arrivant perpendiculairement à l’axe des pôles célestes va se répartir sur une surface de 1 m^2 à l’équateur qui équivaldra à 2 m^2 à 60° de latitude (figure I.2). La quantité d’atmosphère traversée s’en verra d’ailleurs modulée.

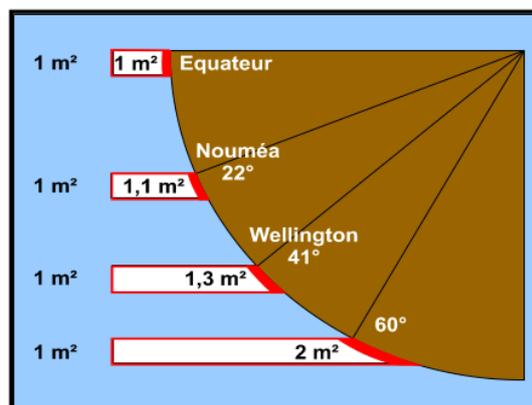


FIGURE I.2. – Étalement du rayonnement solaire incident associé à une surface d'un mètre carré selon la latitude. *Figure empruntée à Maitrepierre and Divoul (2001).*

Cependant, la ressource solaire de la Terre n'a pas qu'une répartition variable dans l'espace. La révolution de la Terre autour du Soleil induit des modulations de la ressource au travers de différents cycles qu'on lui connaît. Nous détaillons dans la partie suivantes la temporalité intrinsèque de la ressource solaire.

1.2. Les cycles de la ressource solaire

L'accrétion d'un système planétaire est une étape d'agglomération et de mise en mouvement de la matière. De façon synthétique, les tensions de surface agrègent les éléments entre eux puis, quand le regroupement est assez volumineux, ce sont les interactions gravitationnelles qui prennent le relais et mettent en orbite la matière autour du centre du système. De là découlent les mouvements d'ensemble et auto-centrés des planètes du système solaire qui, de part leur complexité, présentent un grand nombre de cycle.

Dans une première approche, nous avons détaillé le rayonnement solaire en lissant sa temporalité. Cependant, les mouvements planétaires modulent le gisement solaire dans le temps selon différentes échelles bien connues. Nous détaillerons ci-suit les cycles les plus pertinents à l'étude, soit : les cycles diurne et saisonnier mais aussi le cycle solaire.

Le cycle diurne

La Terre tourne sur elle-même selon l'axe des pôles. Cette rotation gouverne le cycle diurne de la ressource solaire et fait support à la notion de jour. Première définition¹ de l'adjectif diurne est : « Qui s'accomplit en un jour » et donc au cours des 24 heures qui composent la journée. En fait, le jour est une mesure qui dépend de la rotation de la

1. Définition provenant du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) : www.cnrtl.fr/definition/diurne

Terre sur elle-même mais aussi de son orbite autour du Soleil. Si l'on considère un astre fixe et donc plus lointain que le Soleil, la Terre se retrouve à nouveau dans la direction de cet astre en moyenne 23 heures et 56 minutes après. Ensuite, c'est le mouvement relatif de la Terre par rapport au Soleil qui nous ramène à la valeur de 24 heures.

Dans le cadre de la présente caractérisation du rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre, l'adjectif diurne prend le sens plus particulier de « au cours de l'exposition au Soleil » puisque, de nuit, le Soleil étant de l'autre côté du globe, l'ensoleillement est nul. La quantité d'énergie reçue à la surface de la Terre va donc dépendre de ce qu'il se passera entre le lever et le coucher du Soleil. La Terre tournant sur elle-même, un observateur terrestre supposé fixe verra varier la position du Soleil dans le ciel au cours de la journée. Il en résulte que le rayonnement solaire reçu sur une surface donnée va dépendre de son angle avec le rayonnement incident, une valeur maximale est observée au moment du zénith. Le changement relatif de position du Soleil aura donc une influence sur l'interaction entre la surface et le rayonnement solaire. Dans le cas de panneaux photovoltaïques, nous savons que ce paramètre pilote le dimensionnement du système car il en impacte directement le rendement. Des solutions différentes sont proposées allant de l'optimisation de l'installation du panneaux jusqu'au mouvement du système selon la position du Soleil (Nsengiyumva et al., 2018). Outre la meilleure pénétration du rayonnement solaire dans le système PV, le rayonnement solaire va interagir avec l'atmosphère terrestre sur une plus ou moins grande distance selon son angle d'incidence (Roumpakias et al., 2015).

Le cycle saisonnier

L'orbite de la Terre autour du Soleil sert de base à la mesure de l'année qui, tout comme pour le jour, est complexe. L'année de notre calendrier grégorien vaut 365,2425 jours. Ce nombre à décimales se traduit par l'alternance entre 3 années à 365 jours et une année bissextile d'un jour de plus, combiné ensuite à l'ajout d'un second jour à l'année bissextile tous les 400 ans. Plus d'une dizaine d'adjectifs sont associés au mot année mais, dans chacune des expressions alors formées, il est question de la durée entre deux occurrences d'un événement lié à la révolution de la Terre autour du Soleil. En astronomie, l'année sidérale est la durée entre deux instants auxquels on retrouve la même position de la Terre par rapport au Soleil en prenant les étoiles pour référence. Cependant, bien que les saisons s'inscrivent dans la rotation de la Terre autour du Soleil, c'est de son obliquité que provient la saisonnalité de la Terre. Cette inclinaison de $23^{\circ}27'$ fait fluctuer la localisation de la latitude terrestre la plus proche du Soleil entre les hémisphères Nord et Sud et induit l'alternance des saisons. Ainsi, au cours de l'orbite d'un astre autour du Soleil, un point fixe passe de l'été à l'hiver en s'éloignant du Soleil, d'où l'opposition de phase entre les saisons australes et boréales.

Les cycles solaires

Pionnier de la physique solaire, George Ellery Hale élabore le premier spectrohélio-
graphe qui approfondira l'observation du Soleil. L'effet Zeeman (Zeeman, 1897) lui per-
met de mettre en évidence la nature électromagnétique des tâches solaires. L'intensité et
le déplacement de ces tâches présentent un cycle nommé de « Schwabe » qui est observé
depuis Samuel Heinrich Schwabe (Schwabe, 1844), soit bien avant les travaux de Hale.
On parle déjà d'une périodicité de l'ordre de la décennie, par l'observation de les occur-
rences de ces tâches. Au jour d'aujourd'hui, nous comptabilisons plus d'une vingtaine
de cycles solaires dont la période est d'une moyenne de 11 ans. Les variations induites
sont à l'amont de l'affinement de la constante solaire à $1\,372,3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 1,2\%$ (Mef-
tah et al., 2017). Cependant, parmi les cycles solaires, les mesures de l'occurrence des
tâches solaires présentent un cycle de moins de 7 ans et un autre de plus de 17 ans. Ceci
souligne la complexité de la mise en équation du système. De récents travaux ont établi
un loi inversement proportionnelle entre le cycle magnétique d'un astre et son nombre
de Rossby (Strugarek et al., 2017).

1.3. Les interactions avec l'atmosphère

Support des transferts énergétiques, l'atmosphère est une enveloppe gazeuse qui en-
globes certains corps célestes comme la Terre. On appelle « air » le mélange gazeux
constituant l'atmosphère terrestre. L'air contribue à l'équilibre thermique de la planète
si bien que, sans l'atmosphère terrestre, la température serait d'une moyenne de -18°C
au lieu des 15°C actuels (Tiwari, 2002, p.13). Ainsi, le rayonnement solaire interagit avec
l'air terrestre. Les constituants de l'atmosphère modulent le rayonnement solaire en le
bloquant et/ou le dévient. Les interactions rayonnement-atmosphère se décomposent en
deux phénomènes essentiels : l'absorption et la diffusion.

Ces derniers sont dépendants des caractéristiques électromagnétiques du rayonnement
incident, du constituant de l'air terrestre concerné par l'interaction et de l'épaisseur de
la couche atmosphérique à traverser.

Description des acteurs atmosphériques

L'atmosphère terrestre est composée d'un mélange de gaz détaillé en table I.1 selon
deux catégories : les gaz variables ou permanents. À l'opposé du terme « variable »,
l'adjectif « permanent » est utilisé pour les gaz dont la concentration est quasiment
constante jusqu'à environ 60 kilomètres d'altitude. La vapeur d'eau est le gaz qui a
la plus grande variabilité spatiale et temporelle mais aussi, il est le seul à changer de
phase. Les autres éléments de l'atmosphère restent à l'état gazeux car leur température
de condensation est trop basse pour se dérouler au sein de l'atmosphère terrestre. Il est
d'usage de considérer séparément la vapeur d'eau des autres constituants de l'atmosphère
terrestre. Sans vapeur d'eau, l'air est dit « sec ». En arrondissant aux entiers, le diazote, le

TABLE I.1. – Composition de l’atmosphère, repris de *Liou (2002, p.67)*.

Constituants permanents		Constituants variables	
Noms	% par volume	Noms	% par volume
Diazote(N ₂)	78,084	<u>Eau</u> (H ₂ O) ^a	0–0,04
Dioxygène(O ₂)	20,948	<u>Ozone</u> (O ₃)	0–12×10 ⁻⁴
Argon(Ar)	0,934	Dioxyde de soufre(SO ₂) ^b	0,001×10 ⁻⁴
<u>Dioxyde de carbone</u> (CO ₂)	0,036	Protoxyde d’azote(NO ₂) ^b	0,001×10 ⁻⁴
Néon(Ne)	18,18×10 ⁻⁴	Ammoniac(NH ₃) ^b	0,004×10 ⁻⁴
Hélium(He)	5,24×10 ⁻⁴	Oxyde nitrique(NO) ^b	0,000 5×10 ⁻⁴
Krypton(Kr)	1,14×10 ⁻⁴	Dihydrogène de soufre(H ₂ S) ^b	0,000 05×10 ⁻⁴
Xénon(Xe)	0,089×10 ⁻⁴	Acide nitrique(HNO ₃) ^a	Trace
Dihydrogène(H ₂)	0,5×10 ⁻⁴	<u>Chlorofluorocarbones</u>	Trace
<u>Méthane</u> (CH ₄)	1,7×10 ⁻⁴	(CFCl ₃ , CF ₃ Cl ₂ ,	
<u>Protoxyde d’azote</u> (N ₂ O)	0,3×10 ⁻⁴	CH ₃ CCl ₃ , CCl ₄ , etc.)	
<u>Monoxyde de carbone</u> (CO)	0,08×10 ⁻⁴		

a : vapeurs,

b : concentration proche de la surface terrestre,

Les gaz à effet de serre sont soulignés.

dioxygène et l’argon décrivent 100 % de l’air sec. Malgré la faible concentration des autres gaz, leur rôle n’en est pas moins important et leurs interactions avec le rayonnement électromagnétique sont différentes. Par exemple, les gaz « à effet de serre » absorbent le rayonnement tellurique alors qu’ils laissent passer le rayonnement solaire. Cependant, ce type de constituants de l’atmosphère n’est qu’une catégorie parmi quatre autres.

La figure I.3 présente les quatre principaux acteurs des interactions entre l’atmosphère et le rayonnement électromagnétique en considérant, d’une part, le rayonnement solaire et, d’autre part, le rayonnement tellurique. Le rayonnement solaire est associé aux courtes longueurs d’onde, en anglais *ShortWave Radiation (SWR)*, alors que le rayonnement tellurique est associé aux grandes longueurs d’onde, en anglais *LongWave Radiation (LWR)*. Tous deux ne réagissent pas avec les mêmes constituants de l’atmosphère terrestre, détaillés précédemment en table I.1. Ces éléments constitutifs sont associés à quatre catégories dont trois ont une influence sur le rayonnement solaire perçu à la surface de la Terre : les aérosols (a), les nuages (b) et l’ozone (c).

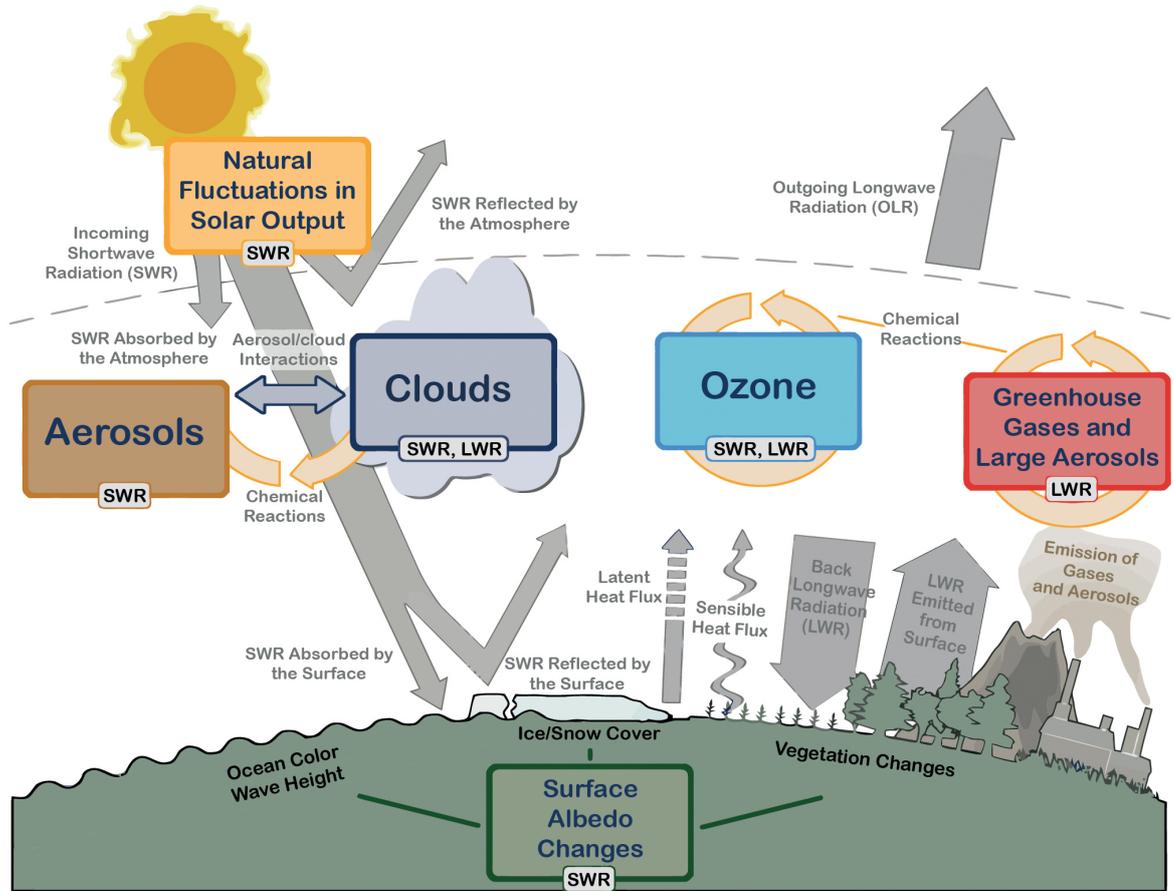


FIGURE I.3. – Schéma des acteurs atmosphériques interagissant avec le rayonnement électromagnétique, repris de *IPCC (2014, Chapitre 1, Fig 1.1)*, dont la légende initiale est :

Main drivers of climate change. The radiative balance between incoming solar shortwave radiation (SWR) and outgoing longwave radiation (OLR) is influenced by global climate 'drivers'. Natural fluctuations in solar output (solar cycles) can cause changes in the energy balance (through fluctuations in the amount of incoming SWR) (Section 2.3). Human activity changes the emissions of gases and aerosols, which are involved in atmospheric chemical reactions, resulting in modified O_3 and aerosol amounts (Section 2.2). O_3 and aerosol particles absorb, scatter and reflect SWR, changing the energy balance. Some aerosols act as cloud condensation nuclei modifying the properties of cloud droplets and possibly affecting precipitation (Section 7.4). Because cloud interactions with SWR and LWR are large, small changes in the properties of clouds have important implications for the radiative budget (Section 7.4). Anthropogenic changes in GHGs (e.g., CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , CFCs) and large aerosols ($> 2.5 \mu m$ in size) modify the amount of outgoing LWR by absorbing outgoing LWR and re-emitting less energy at a lower temperature (Section 2.2). Surface albedo is changed by changes in vegetation or land surface properties, snow or ice cover and ocean colour (Section 2.3). These changes are driven by natural seasonal and diurnal changes (e.g., snow cover), as well as human influence (e.g., changes in vegetation types) (Forster et al., 2007).

- (a) Les aérosols sont des particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère, d'une taille moyenne allant du nanomètre à la dizaine de micromètre et d'une persistance d'au moins quelques heures dans la troposphère². Ces particules ont deux types d'interaction avec le rayonnement solaire : absorption et diffusion. L'absorption contribue au réchauffement global alors que la diffusion a un effet contraire en dispersant le rayonnement incident. Par ailleurs, les aérosols ont des interactions indirectes avec le rayonnement solaire. Ils peuvent amorcer le développement de nuages mais aussi contribuer à leur persistance et modifier leurs propriétés optiques.
- (b) Météo-France définit un nuage comme étant « formé d'une multitude de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. Son aspect est fonction de la nature, de la taille et de la répartition des particules qui le composent, ainsi que de la lumière qui l'éclaire. Parfois, il nous apparaît blanc, presque transparent ou éclatant comme la neige, ou à l'inverse gris, voire noir et menaçant ». Ainsi, il existe différentes catégories de nuages qui sont détaillées dans l'atlas international des nuages (OMM, 1975; Rochas, 2017). Cette différenciation se traduit aussi dans leurs interactions avec le rayonnement solaire. Par exemple, différentes opacités expliqueront une plus ou moins grande absorption du rayonnement solaire.
- (c) En ce qui concerne l'ozone, c'est un constituant de l'atmosphère qui peut à la fois provenir d'une source naturelle ou bien d'origine anthropique. Dans son état naturel, il est localisé dans la stratosphère et forme la « couche d'ozone ». À cette altitude, l'ozone filtre des longueurs d'onde les plus énergétiques qui sont nocives pour la matière vivante. On le trouve aussi au niveau de la troposphère, dans laquelle il est alors un polluant nocif aussi bien pour l'humain que la faune et la flore.

Dans la littérature, la variabilité de la couverture nuageuse est identifiée comme étant la source dominante de fluctuations à court terme du rayonnement solaire arrivant à la surface terrestre (Lohmann, 2018). L'impact des aérosols n'est pas pour autant négligeable, cependant, les échelles concernées ne sont pas les mêmes que pour les nuages. En effet, les aérosols modulent la ressource solaire sur des échelles plus grandes, aussi bien en temps qu'en espace. Par exemple, en Inde, l'évolution inter-annuelle des concentrations des aérosols anthropiques y diminue la qualité des reconstructions satellites du rayonnement solaire, même pour le cas du rayonnement global (Riihelä et al., 2018). Par ailleurs, les poussières désertiques des tempêtes de sable ou encore les aérosols carbonés des feux de brousse peuvent aussi fausser les reconstructions du rayonnement

2. Plus d'informations sur les aérosols et nuages : (IPCC, 2014, Chapitre 7), avec une description de leur interaction avec le climat en (IPCC, 2014, FAQ. 7.1) pour les nuages et en (IPCC, 2014, FAQ. 7.2) pour les aérosols.

solaire à partir des images satellites (Mueller and Träger-Chatterjee, 2014). Cependant, l'influence des aérosols est 3 à 4 fois plus forte sur le rayonnement solaire direct plutôt que le global (Gueymard, 2012; Alfadda et al., 2018).

Le filtrage atmosphérique du spectre solaire

Le rayonnement solaire incident est défini sur une gamme de longueurs d'onde et chacune d'elles va interagir différemment avec les éléments de l'atmosphère terrestre précédemment détaillés. En figure I.4 est présentée le spectre de l'atmosphère terrestre selon les taux de transmission de chacune des longueurs d'onde du rayonnement solaire. L'eau est l'élément de l'atmosphère qui cumule le plus large domaine d'absorption aussi bien sur le visible que sur les autres longueurs d'onde. C'est par ailleurs l'élément support du cycle de l'eau et à l'origine de la nébulosité. Quant à elle, la nébulosité perturbe fortement la ressource solaire qui arrive à la surface de la terre. Ainsi, le spectre solaire n'est pas le même avant et après sa traversée dans l'atmosphère terrestre. De plus, l'angle d'incidence du rayonnement solaire a aussi une influence que l'on qualifie en terme de masse d'air, équivalent à une certaine distance d'atmosphère parcourue par le rayonnement solaire.

En figure I.5, le spectre solaire est représenté au sommet de l'atmosphère (AM0) et à la surface terrestre, dans des conditions de ciel-clair, pour une masse d'air de 1,5 et selon les deux composantes globale et directe (AM1.5, soit une traversée d'une fois et demi l'atmosphère terrestre). Le rayonnement global étant la somme des flux direct et diffus, l'écart observé est l'image de la faible diffusion de l'atmosphère quand les conditions sont de ciel clair. Dans une configuration plus nébuleuse, cet écart augmenterait en parallèle de la quantité d'énergie reçue à la surface terrestre qui diminuerait. Mambri et al. (2015, Fig.2) représentent le spectre solaire selon l'influence de la distance d'atmosphère traversée (AM) mais aussi celle de l'état de l'atmosphère (teneur en vapeur d'eau et épaisseur optique). Ainsi, les processus radiatifs au sein de l'atmosphère terrestre sont variables aussi bien selon l'incidence du rayonnement solaire entrant que selon les conditions atmosphériques. Le bilan radiatif offre une vision en moyenne de la quantité d'énergie associée aux composantes des transferts énergétiques du système Terre-Océan-Atmosphère.

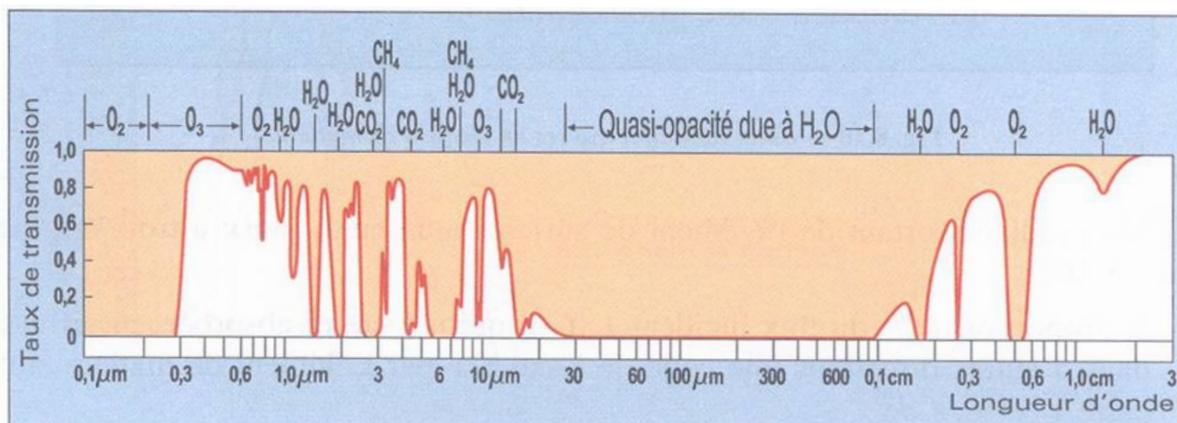


FIGURE I.4. – Spectre de l'atmosphère terrestre. *Figure empruntée à Malardel (2005)*

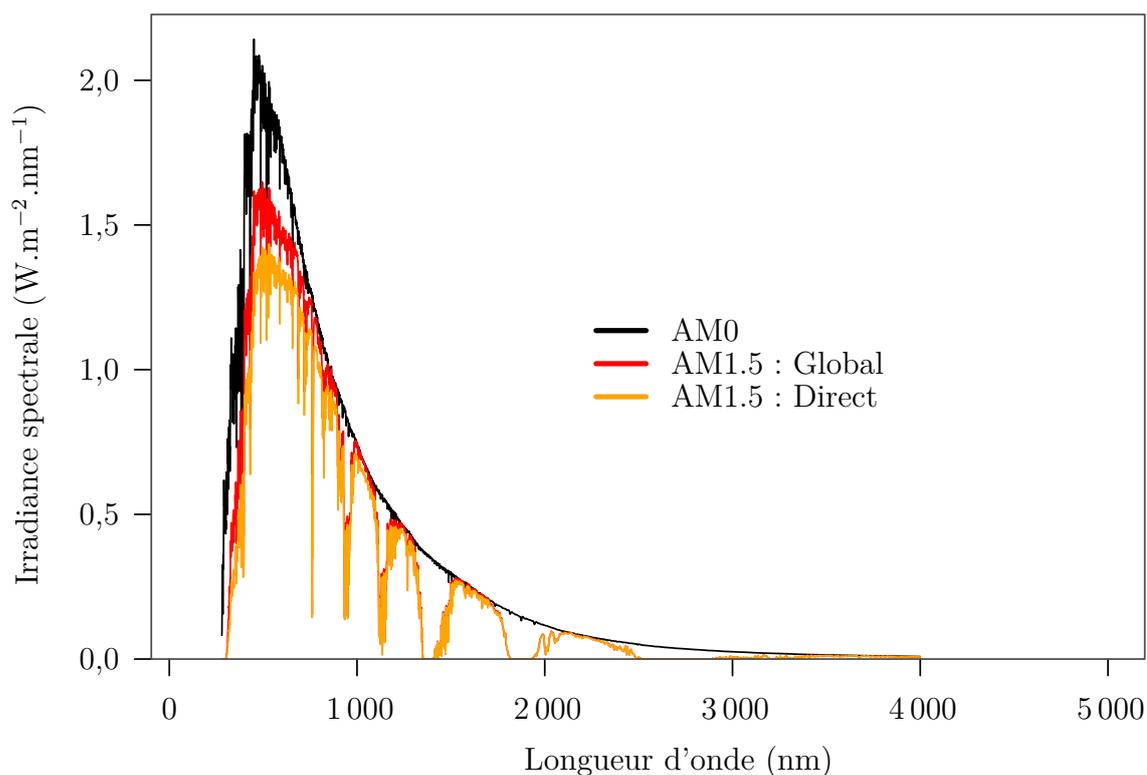


FIGURE I.5. – Irradiance spectrale du spectre solaire au sommet de l'atmosphère (AM0) et à la surface terrestre pour le rayonnement global et le rayonnement direct (AM1.5). *Données utilisées : ASTM G173-03 (2012)*. AM est l'abréviation de l'anglais « Air Mass » signifiant masse d'air. Le facteur 1.5 correspond à la traversée d'une masse d'air sur une fois et demi le rayon de l'atmosphère terrestre.

Le bilan radiatif moyen

Le filtrage atmosphérique est donc composé de multiples processus dont une vision moyenne est proposée au travers du bilan radiatif global de la Terre présenté en figure I.6 (Wild et al., 2017).

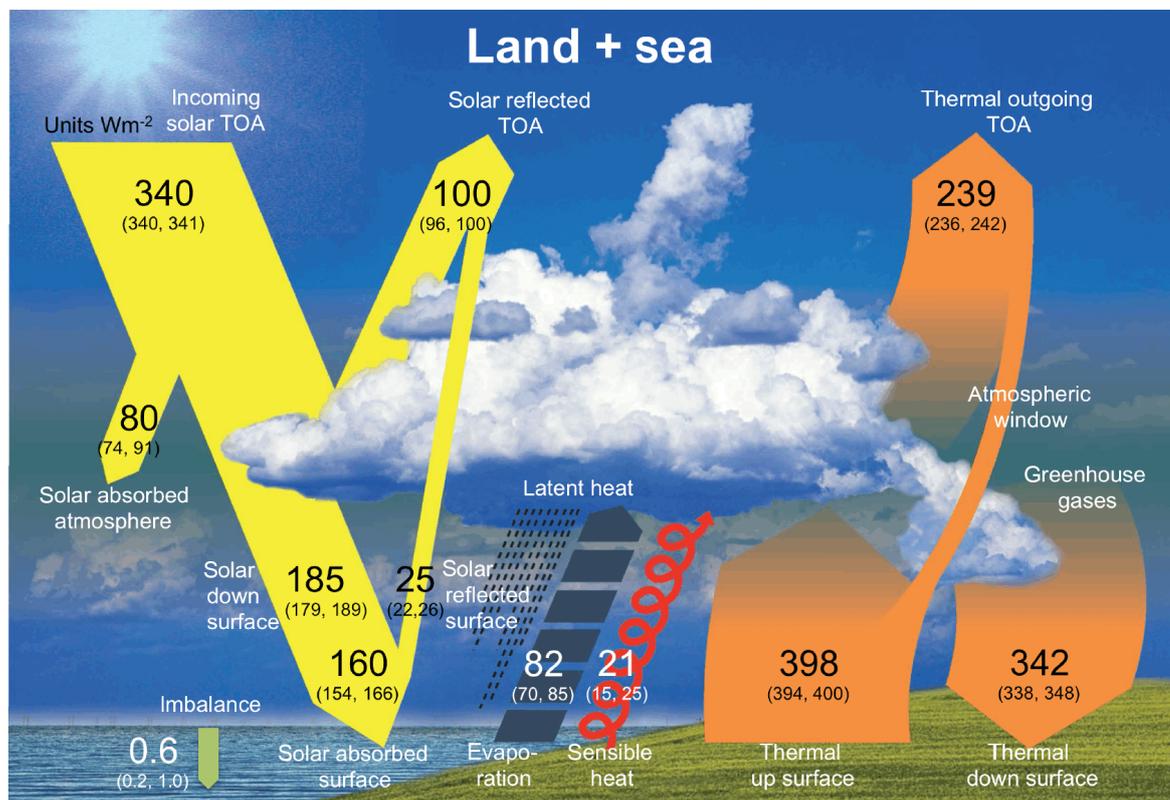


FIGURE I.6. – Schéma du bilan radiatif de la Terre, figure provenant de Wild et al. (2015a, 2017). Les nombres indiquent les meilleures estimations des amplitudes de chaque composante du bilan énergétique moyen mondial (en W.m^{-2}) ainsi que leurs plages d'incertitude entre parenthèses, représentant les conditions climatiques actuelles au début du 21^{ème} siècle. Les flux au-dessus de l'atmosphère sont déterminés à partir des observations satellitaires du CERES. Les estimations du flux radiatif de surface sont dérivées de la structure de biais du modèle CMIP5 en ce qui concerne les observations des réseaux GEBA et BSRN, comme indiqué dans Wild et al. (2013, 2015a).

Pour un flux entrant d'une moyenne de 340 W.m^{-2} , l'atmosphère en absorbe 80 W.m^{-2} et en réfléchit 100 W.m^{-2} . Ainsi, seulement 185 W.m^{-2} du rayonnement solaire interagit avec la surface terrestre qui en réfléchit 25 W.m^{-2} . Les 160 W.m^{-2} restants sont absorbés par la surface de la Terre qui va ensuite réémettre un rayonnement tellurique dans

l'infrarouge, un flux de chaleur latente (convection et évaporation) et un flux de chaleur sensible (conduction thermique). L'effet de serre est responsable d'un cycle de 342 W.m^{-2} qui est absorbé et réémis par la surface terrestre. Le rayonnement tellurique sortant de l'atmosphère est de 239 W.m^{-2} .

En faisant le bilan des flux au sommet de l'atmosphère, le système terre-atmosphère reçoit plus d'énergie qu'il n'en émet. En figure I.6, ce déséquilibre est représenté par les $0,6 \text{ W.m}^{-2}$ dans la mer car à 90 % emmagasiné par l'océan qui, en conséquence, voit sa température augmenter (Von Schuckmann et al., 2016). En fait, les émissions anthropiques amplifient l'effet de serre de la Terre qui alors absorbe une quantité d'énergie. Finalement, l'effet de serre de l'atmosphère peut se comprendre selon une décomposition en deux parties. Une première est naturelle mais surtout nécessaire au maintien des conditions de la Terre. Une seconde partie est anthropique et à l'origine du réchauffement climatique (Hansen et al., 2011; Trenberth et al., 2014; Von Schuckmann et al., 2016).

Déséquilibre pôles-tropiques

Un autre bilan se visualise en sortie de l'atmosphère terrestre et quantifie la quantité de rayonnement sortant du système Terre-Soleil selon les latitudes du globe. En figure I.7 est formalisé le déséquilibre radiatif entre la quantité de rayonnement solaire absorbé par la surface de la Terre et le rayonnement réémis vers l'espace, respectivement en courbes bleue et verte.

En effet, les pôles reçoivent une quantité plus faible de rayonnement solaire qu'ils n'en réémettent. Proche de l'équateur, le constat est inversé. Ainsi, au sein du système climatique Terre-atmosphère, il y a une redistribution énergétique en interne allant des zones excédentaires aux extrêmes déficitaires. Les deux vecteurs acteurs de ce rééquilibrage sont les fluides terrestres, soit l'atmosphère et l'océan.

Le bilan radiatif global synthétise les transferts radiatifs du système climatique Terre-océan-atmosphère. Cependant, des variations sont à considérer aussi bien en ce qui concerne les disparités entre les pôles et les tropiques que les rotations caractéristiques du système Terre-Soleil (sous-section 1.2). De plus, le rayonnement solaire perçu par la surface terrestre présente un partenaire principal mais surtout antagoniste : la nébulosité. Les transferts radiatifs sont à l'amont du changement de phase de la vapeur d'eau qui, dès lors qu'elle n'est plus un gaz, va d'autant plus moduler la quantité de rayonnement solaire qui arrivera à la surface terrestre. Outre ce changement de phase impactant les processus radiatifs, il est aussi question de circulations de l'atmosphère qui font partie des gestionnaires de l'énergie solaire de la Terre tout en contribuant au déplacement des flux d'humidité et des nuages.

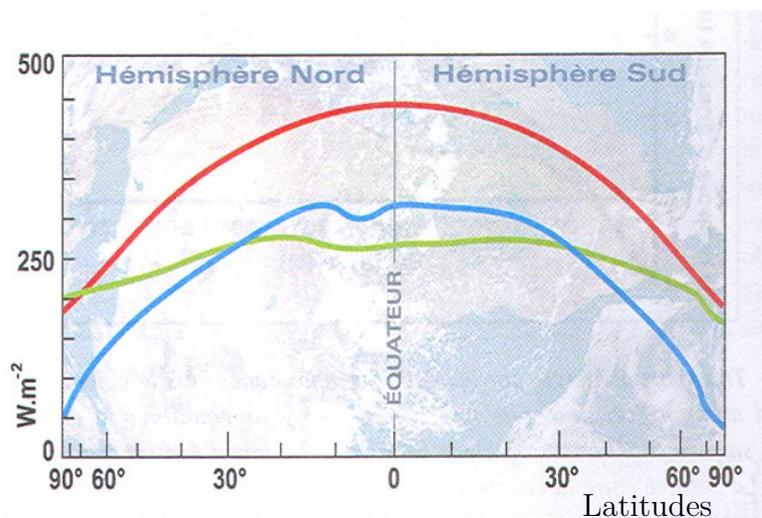


FIGURE I.7. – Bilan radiatif de la Terre, figure provenant de Malardel (2005, fig.3.3, p.85), d'après Gill (1982). La courbe rouge représente le rayonnement solaire moyen reçu au sommet de l'atmosphère par cercle de latitude, la courbe bleue montre la partie de ce rayonnement solaire qui est absorbée (la différence entre la courbe rouge et la courbe bleue est le rayonnement solaire réfléchi vers l'espace) et la courbe verte représente le rayonnement infrarouge moyen émis vers l'espace. L'échelle de l'axe des latitudes a été choisie de façon à ce que l'espace entre deux cercles de latitude soit proportionnel à la surface terrestre entre ces latitudes.)

2. Les modes de variabilité de la circulation atmosphérique

La ressource solaire est tributaire de la nébulosité dont elle est d'ailleurs l'instigatrice. En effet, en considérant la surface terrestre et son atmosphère environnante, le rayonnement solaire absorbé par la surface va réchauffer l'air ambiant et en provoquer la convection. Pour une parcelle d'air donné, ce déplacement d'air chaud va plus ou moins modifier la phase de l'eau pour devenir un nuage et / ou précipiter, selon le gradient thermique avec l'air à plus haute altitude.

Les mouvements de l'atmosphère dynamisent le cycle de vie des nuages, qu'ils aient des dimensions de l'ordre du globe, dites alors d'échelle globale ou planétaire, ou d'envergure plus fine. La complexité de détailler les différents modes de variabilité climatique réside dans l'imbrication entre elles des échelles aussi bien spatiales que temporelles. La figure I.8 présente la classification usuelle des phénomènes atmosphériques selon ces deux échelles caractéristiques. Dans un souci de synthèse et pour amorcer la contextualisation de l'étude ici menée, nous traiterons le cas des modes de variabilité climatique impactant le Sud-Ouest l'Océan Indien. Ci-suit, nous détaillerons à différentes échelles

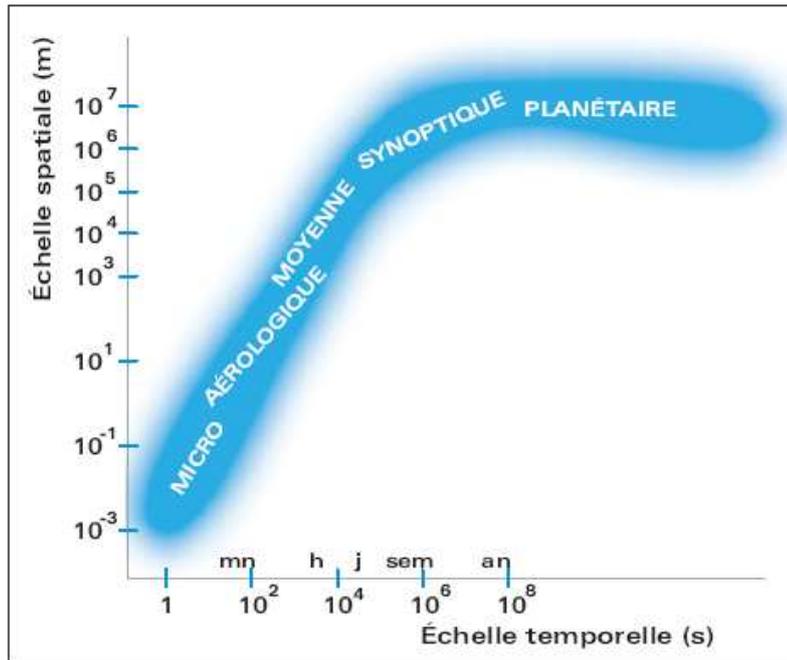


FIGURE I.8. – Les principales échelles troposphériques, figure provenant de Malardel (2005), d'après McIlveen (1992).

les transferts d'énergie et circulations induites qui dirigent la formation, le déplacement et la disparition, avec ou sans précipitation, des nuages.

2.1. La variabilité saisonnière et la circulation générale

Le rayonnement solaire n'est pas réparti équitablement à la surface de la Terre. Les pôles reçoivent en moyenne moins de rayonnement solaire que les zones intertropicales. Le déséquilibre énergétique qui en découle est à l'amont de la circulation dite générale de l'atmosphère. En effet, la forte convection induite à la surface de la bande équatoriale est écartée vers les pôles, redirigeant de l'énergie vers les zones déficitaires. L'atmosphère peut donc être vue comme le gestionnaire de l'énergie solaire, acheminant les excédents équatoriaux vers les pôles. Cependant, l'air n'étant pas un fluide parfait, la boucle de cette cellule ne se ferme pas au niveau des pôles mais découpe la circulation générale de l'atmosphère en les trois cellules différentes qui sont dites cellules de Hadley, de Ferrel et polaire.

En figure I.9 est représentée, pour le cas de l'hémisphère Sud, la cellule convective qui déplace le surplus d'énergie équatoriale : la cellule de Hadley. Le déplacement des masses d'air est tel qu'elles montent en altitude et puis sont écartées de part et d'autre de l'équateur en direction des pôles. Considérant la force de Coriolis et donc la rotation de la Terre, les vents induits en surface sont à l'opposé du déplacement des masses d'air. Il est donc question de vents de surface orientés Sud-Est dans l'hémisphère

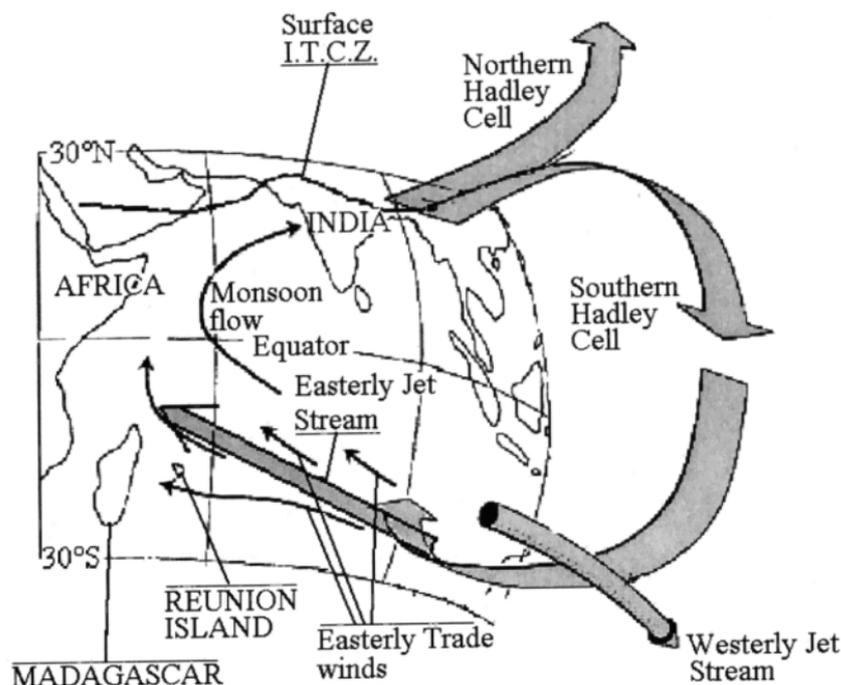


FIGURE I.9. – Conditions météorologiques prévalant pendant l'hiver austral dans l'Océan Indien de 30°S à 30°N, figure provenant de (Taupin et al., 1999). Pendant la période de l'été boréal / hiver austral.

Sud et de Nord-Ouest dans l'hémisphère Nord. Ces vents de surface, appelés alizées, sont donc, toujours plus ou moins directement, dirigés vers la bande équatoriale. Il en résulte une zone de convergence et convection tout autour du globe qui est nommé : **zone de convergence intertropicale (ZCIT)** (en figure I.9, nommé ITCZ pour l'anglais « *intertropical convergence zone* »). La ZCIT se déplace au cours des saisons et, à certains endroits du globe, passe même d'un hémisphère à l'autre. Dans le sud-ouest de l'Océan Indien, la ZCIT alterne de position entre les 15°S pendant l'été austral et les 25°N pendant l'été boréal, qui est le cas présenté en figure I.9. La zone concomitante de subsidence est localisée sur la figure I.9 vers les 30°S. Les conditions anti-cycloniques induites y assurent une stabilité qui est, cependant, variable selon la saison. Cette stabilité rend moins propice le développement d'un système dépressionnaire. Par ailleurs, la ZCIT est associée à des basses pressions du fait de la convection, qui elle est synonyme d'instabilité de l'atmosphère et de formation de nuages.

Cependant, le transfert énergétique de la ZCIT vers les pôles n'est pas seulement décrit par la cellule de Hadley. Les propriétés radiatives des continents diffèrent fondamentalement de celles des océans. Cette différence dirige aussi la localisation des zones de convection et de subsidence selon un transfert énergétique entre continents et océans. Les zones de convection sont localisées sur les terres alors que les zones de subsidence sont sur les mers. La circulation induite est appelée cellule de Walker et elle se combine à

la cellule de Hadley. Cette combinaison explique l'orientation Est des alizées (en anglais, « *trade winds* ») que l'on retrouve sur le figure I.9. La zone de haute pression induite au niveau de l'Océan Indien est appelée anticyclone des Mascareignes. Cette zone se déplace et s'intensifie selon la position de la ZCIT. La figure I.10 représente les états d'hiver et d'été australs de l' anticyclone des Mascareignes. En septembre, on remarque que les pressions sont plus élevées qu'en mars. De plus, l'anticyclone est aussi plus à l'ouest. Les circulations sont donc, en moyenne, différentes en intensité et en direction selon la saison.

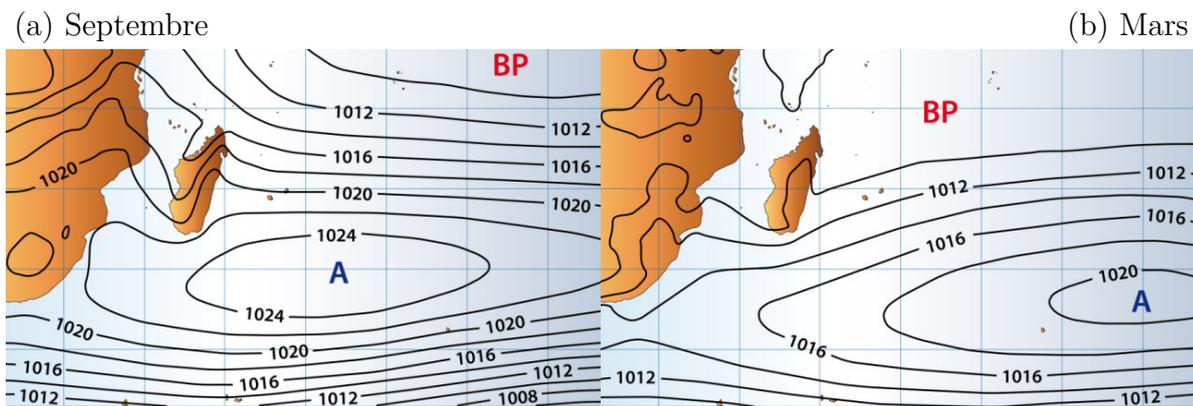


FIGURE I.10. – Champs de pression moyenne au niveau de la mer (hPa) en septembre (a) et en mars (b). Les lignes représentent les isobares dont la valeur associée est renseignée sur chacun des graphes. Figures de *Jumaux et al. (2011)*, données : ERA40, CEPMMT. Source : Figures téléchargées sur www.meteofrance.re

Ainsi, un transfert énergétique se fait de la zone équatoriale vers les pôles selon la saisonnalité des circulations. Cependant, des forçages externes de différentes échelles viennent perturber la circulation générale et la temporisent en différents modes de variabilité. La ressource solaire perçue à la surface de la Terre en est donc impactée selon ces mêmes temporalités. Finalement, dans l'Océan Indien, le climat régional est modulé par des modes de variabilité climatique à différentes échelles dont nous détaillons une partie ci-suit.

2.2. La variabilité intra-saisonnière

Dans les tropiques, l'oscillation de Madden-Julian (MJO)³ est le mode de variabilité dominant de l'échelle intra-saisonnière (*Madden and Julian, 1971*). Synthétisée en figure I.11, la structure de la MJO se décompose par l'alternance de régions de convections profondes et peu profondes. D'une période de 30 à 60 jours, la propagation de la MJO

3. Plus de précisions sur la MJO se trouvent dans le manuscrit de thèse de *Pohl (2007)*.

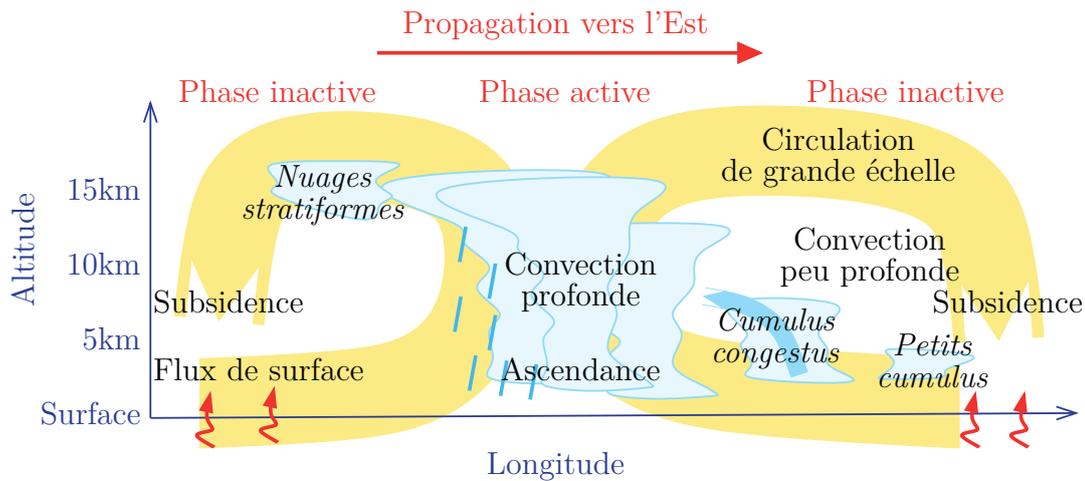


FIGURE I.11. – Schéma synthétique de la structure de la MJO en fonction de l'altitude et de la longitude, en un instant donné, figure provenant de Risi and Duvel (2014). Comme la MJO se propage vers l'est, ce schéma peut aussi représenter la structure de la MJO en fonction de l'altitude et du temps, à une longitude donnée. Les nuages dessinés représentent les types de nuages dominants. En réalité, les différentes types de nuages cohabitent dans des proportions diverses.

se fait vers l'est pendant l'été austral et vers le nord pendant l'été boréal (Pohl and Camberlin, 2014). La zone de convection profonde dite « phase active » est caractérisée par une ascendance d'air chaud alimentant une masse nuageuse précipitante, et donc à l'image d'une forte instabilité de l'atmosphère. Au sommet de l'atmosphère, le flux infrarouge sortant est un indicateur des zones de fortes et faibles convections selon des valeurs respectivement amoindries et renforcées. Ainsi, la phase active de la MJO est localisée par un faible rayonnement sortant au sommet de l'atmosphère. Les zones de convection peu profonde alimentent quant à elles une stabilité relative à la subsidence des masses d'air sec. Les « phases inactives » sont localisées par des flux de surfaces qui traversent l'atmosphère et donc des zones à rayonnement sortant plus élevé.

La MJO contribue donc à la variabilité du rayonnement solaire par la formation et le déplacement de zone de convection amoindrie et renforcée. Bien que sa manifestation soit tropical, elle impacte aussi les zones extra-tropicales (Fauchereau et al., 2016). Plus loin dans ce manuscrit, en sous-section 2.2.3, est présenté un indice créé par Wheeler and Hendon (2004). Cet indice permet de caractériser le cycle de vie de la MJO selon une phase et une amplitude. En figure II.17, des cartes de rayonnement sortant au sommet de l'atmosphère permettent de visualiser, selon ses différentes phases, le déplacement de la MJO dans le sud-ouest de l'Océan Indien pendant la période privilégiée de l'été austral.

2.3. La variabilité synoptique

Dans le sud-ouest de l’Océan Indien, deux modes de variabilités de l’échelle synoptique sont ici détaillés : les talwegs tropicaux-tempérés (TTT) et les systèmes dépressionnaires tropicaux (SDT).

Les talwegs tropicaux-tempérés⁴ sont des perturbations tropicales-tempérées dont un cas est présenté en figure I.12. Ces dépressions s’étendent d’une zone continentale

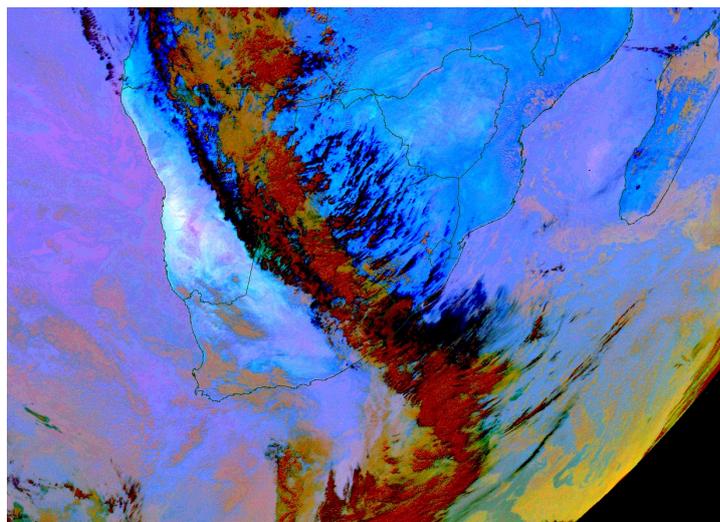


FIGURE I.12. – Talweg tropical tempéré au-dessus de l’Afrique du Sud, le 21 octobre 2004, figure provenant de Pohl (2015, fig.1.7). Composite RGB issue des canaux [IR12.0–IR10.8, IR10.8–IR8.7, IR10.8] du satellite géostationnaire Meteosat-8. Source : www.eumetsat.int.

à la région adjacente océanique. Plus précisément, il est question d’une bande orientée nord-ouest–sud-est allant de continent à océan. Cette bande se caractérise aussi bien en terme de nuages qu’en convection atmosphérique ou pluie. La durée de vie moyenne d’un TTT est de 6-7 jours.

Considérant le sud-ouest de l’Océan Indien, les TTT relient typiquement les tropiques sur l’Afrique australe aux moyennes latitudes au-dessus de l’océan. Rebaptisée Zone de Convergence Sud-Indienne (ZCSI) par Cook (2000), cette zone est l’une des trois zones sur lesquelles ces perturbations synoptiques se forment préférentiellement. Les deux autres régions concernées sont les zones de convergence de l’Atlantique Sud et du Pacifique Sud. En ce qui concerne la temporalité de leur occurrence, seule la ZCSI est limitée à l’été austral pendant lequel les TTT fournissent 30 % et plus des cumuls

4. Plus de précisions sur les TTT, se trouvent dans le manuscrit Macron (2014) ou le manuscrit d’HDR de Pohl (2015) ou dans la publication de Fauchereau et al. (2009).

pluviométriques mensuels, notamment en janvier il est question de 60 % des cumuls (Hart et al., 2013; Todd et al., 2004).

Les TTT contribuent donc à la variabilité du rayonnement solaire. De la même façon que pour la MJO, en sous-section 2.2.3, est présenté un indice nous permettant d'étudier le lien entre le rayonnement solaire et les TTT. En figure II.15, des cartes de rayonnement sortant au sommet de l'atmosphère permettent de visualiser les MJO dans le sud-ouest de l'Océan Indien pendant la période privilégiée de l'été austral.

Les systèmes dépressionnaires tropicaux sont des perturbations synoptiques de basses pressions, non frontales, occurring en mer tropicale ou subtropicale. Le cycle de vie d'un SDT est décrit en plusieurs stades selon son intensité. Sur le globe, sept régions sont délimitées selon les zones préférentielles de cyclogenèse (Gray, 1975). Dans chacune d'elle, un Centre Météorologique Régional Spécialisé (CMRS) est responsable du suivi de toutes les perturbations s'y déroulant, entièrement ou partiellement. Ces sept CMRS sont désignés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) qui coordonne la surveillance cyclonique à l'échelle internationale.

Chaque CMRS définit le cycle vie des SDT selon plusieurs stades. Plusieurs des CMRS utilisent l'échelle de Dvorak pour définir l'intensité d'un système dépressionnaire (Dvorak, 1984). Se basant sur l'analyse d'image satellite dans les domaines du visible et de l'infrarouge, cette échelle estime le stade du développement de la perturbation selon sa configuration nuageuse. En table I.2 est détaillée la classification faite dans le sud-ouest de l'Océan Indien, dont le CMRS désigné est Météo-France Réunion.

TABLE I.2. – Terminologie et classification des SDT appliquée dans le sud-ouest de l'Océan Indien. Selon les vents moyens et l'échelle de Dvorak.

Stade	Vent moyen* ($km.h^{-1}$)	Échelle de Dvorak
Dépression tropicale	51 - 62	2,5
Tempête tropicale modérée	63 - 88	3,0 - 3,5
Forte tempête tropicale	89 - 117	3,5 - 4,0
Cyclone tropical	118 - 165	4,5 - 5,5
Cyclone tropical intense	166 - 212	6,0 - 7,0
Cyclone tropical très intense	> 212	7,5 - 8,0

* moyenne sur 10 minutes, selon une recommandation de l'OMM.

Les cyclones tropicaux sont parmi les événements atmosphériques les plus dévastateurs. Les territoires impactés sont soumis à différents niveaux d'alerte selon le stade et la distance à laquelle se trouve la perturbation. Dans l'Océan Indien, parmi une moyenne

de 10,5 tempêtes tropicales par saison cyclonique, 4,5 atteignent le stade de cyclone (Neumann, 1993). Une climatologie des cyclones du sud-ouest de l’Océan Indien est établie sur la base de 17 années (Leroux et al., 2018). Il est montré qu’une intensification rapide occure au moins une fois au cours de la vie de tous les cyclones tropicaux très intenses et de 43% des autres catégories. Ils présentent donc un intérêt de prévision, aussi bien en ce qui concerne la zone de leur formation que leur trajectoire et l’évolution de leur intensité (Leroux et al., 2018). Un lien est mis en évidence entre la MJO et l’occurrence d’un cyclone tropical (Bessafi and Wheeler, 2006).

2.4. La variabilité inter-annuelle

Dans le sud-ouest de l’Océan Indien, les modes de variabilité inter-annuels pouvant impacter la ressource solaire sont les événements El Niño-Oscillation Australe (ENSO), le Dipôle de l’Océan Indian (IOD) et le Dipôle Subtropical de l’Océan Indian (SIOD). Tous trois sont des phénomènes couplés océan-atmosphère se détaillant selon deux phases opposées.

L’ENSO est donc un phénomène d’interaction océan-atmosphère se détaillant selon les deux phases opposées que sont : El Niño et La Niña, présentés en figure I.13.

Ces deux derniers sont des phénomènes océaniques du Pacifique équatorial, se formalisant par une anomalie de la température de surface de la mer. Cette anomalie est positive pour le cas d’El Niño et négative pour La Niña. Récemment, les études découpent en sous-groupes les événements El Niño et La Niña (Hsu and Xiao, 2017). La partie atmosphère du couplage de l’ENSO est l’oscillation australe, correspondant à des modifications de la cellule de Walker au-dessus du Pacifique. L’ENSO est donc la combinaison des deux éléments cités, tous deux occurring dans le Pacifique équatorial. Cependant, l’ENSO a des répercussions à l’échelle de la planète, jusque dans la couverture de glace de l’Antarctique (Gloersen, 1995; Cerrone et al., 2017). Il est le mode le plus énergétique de la variabilité climatique à l’échelle inter-annuelle, impactant le mode de variabilité saisonnière et la MJO (Hsu and Xiao, 2017) mais aussi les SDT (Wang and Wang, 2013). En 2015/2016, l’événement El Niño était fort et a eu un impact global après une longue période de calme (Santoso et al., 2017; Abellán et al., 2017).

Pendant un événement ENSO, une phase El Niño présente une anomalie positive de température de la mer au niveau de l’Océan Pacifique Ouest. La circulation générale est modifiée avec une convection renforcée au-dessus de l’Océan Pacifique. Une hausse de la température moyenne mondiale peut s’observer et sera plus ou moins persistante selon l’intensité de l’événement. Du côté de l’Indonésie, de l’Inde et de l’Australie, un fort déficit pluviométrique provoquera des sécheresses et incendies plus fréquents. Une phase La Niña aura, quant à elle, des effets contraires.

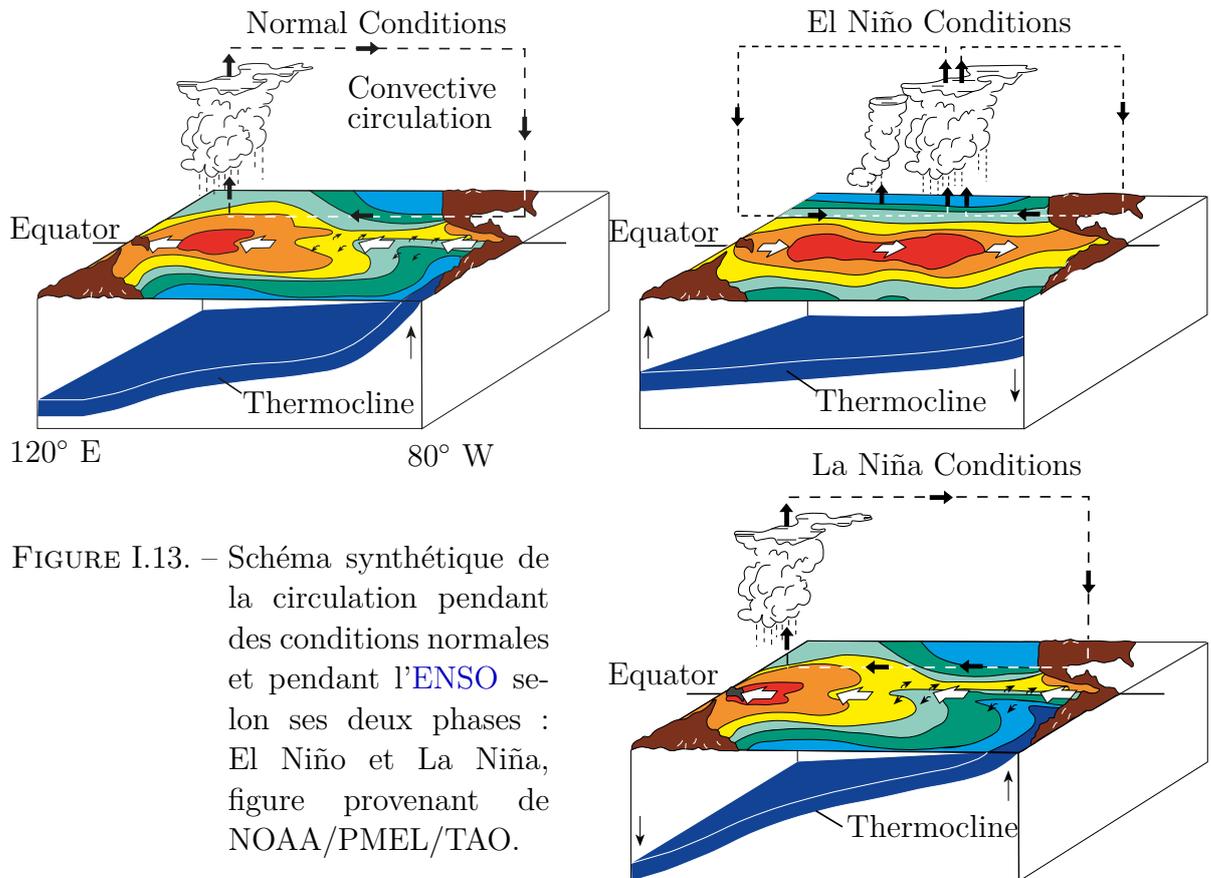


FIGURE I.13. – Schéma synthétique de la circulation pendant des conditions normales et pendant l'ENSO selon ses deux phases : El Niño et La Niña, figure provenant de NOAA/PMEL/TAO.

Source : <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/>, télécharger sur <https://commons.wikimedia.org/>.

Le Dipôle de l'Océan Indien est aussi un phénomène couplé océan-atmosphère alternant événements neutre, positif et négatif (Saji et al., 1999). Autrement appelé « *Indian Niño* », il présente les mêmes caractéristiques que l'ENSO mais du côté du sud-ouest de l'Océan Indien. Les phases positives et négatives correspondent à des températures de surface de la mer respectivement supérieures et inférieures à la moyenne. Une phase positive implique une activité convective plus forte et donc une saison plus humide du côté ouest de l'Océan Indien. Inversement, en phase négative, l'Océan Indien est dans des conditions plus sèches que la normale. Un indice est calculé par Saji et al. (1999) selon un gradient des anomalies de température entre deux zones de l'Océan Indien représentées en figure I.14.

L'IOD impacte la saisonnalité de l'Océan Indien (Saji et al., 1999; Shinoda and Han, 2005). Par ailleurs, bien que l'ENSO et l'IOD soient corrélés (Baquero-Bernal et al., 2002), il n'y a pas de relation linéaire entre leur intensité respective (Shinoda et al., 2004). Les événements El Niño et La Niña sont à considérer séparément pour caractériser le lien entre l'ENSO et l'IOD (Zhang et al., 2015).

Le Dipôle Subtropical de l'Océan Indien concerne, comme l'IOD, l'Océan Indien. Cependant, sa localisation est moins proche de l'équateur que l'IOD. Un indice est établi par [Behera and Yamagata \(2001\)](#) à partir du gradient thermique entre les anomalies moyennes de deux autres boîtes représentées en figure [I.14](#).

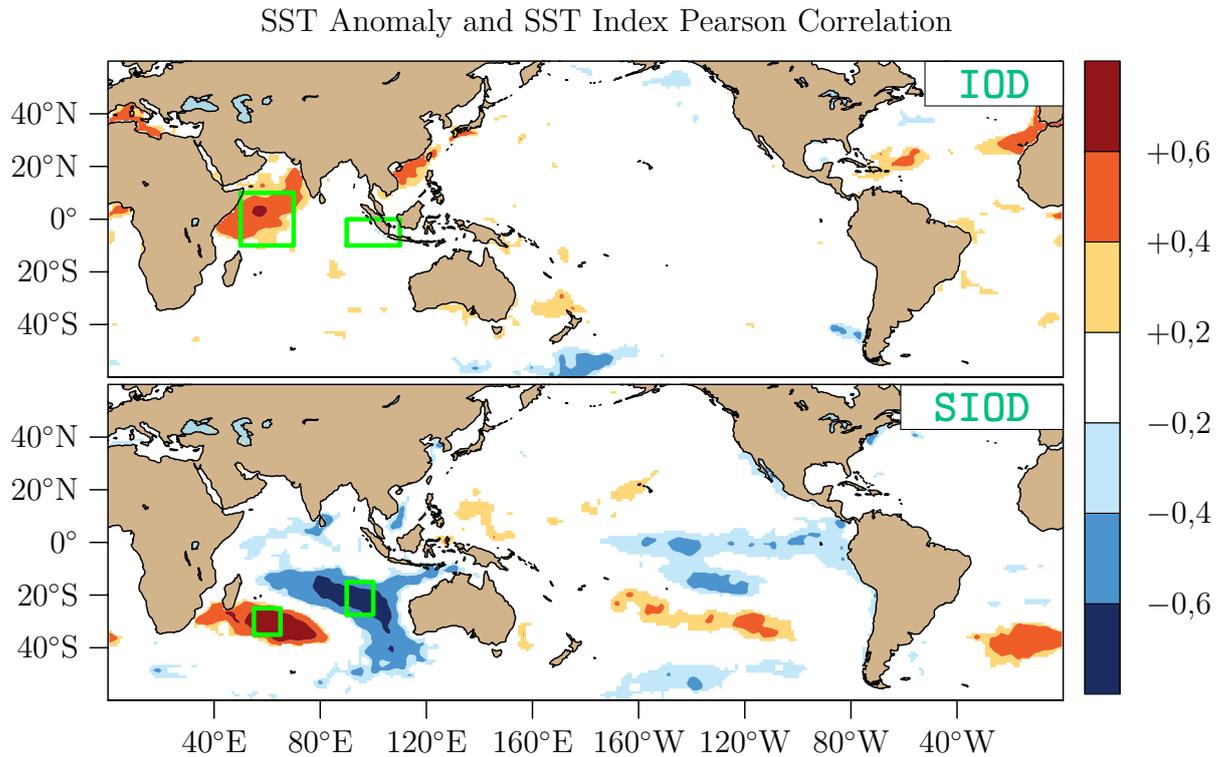


FIGURE I.14. – Représentation des dipôles de l’Océan Indien (IOD et SIOD) selon les boîtes utilisées pour l’estimation de leur indice et avec la corrélation de ces indices aux anomalies de températures de surface de la mer (de l’anglais « *Sea Surface Temperature (SST)* »). Figure adaptée de Hoell *et al.* (2017, Fig.1) dont la légende est : « Correlation of December-March 1979-2014 SST anomaly and the IOD index anomaly and the SIOD index anomaly. Shading indicates correlations significant at $p < 0.10$. The IOD index is defined as areal average SST over $10^{\circ}\text{S}-0^{\circ}\text{N}$; $90^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{E}$ subtracted from areal average SST over $10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$; $50^{\circ}\text{E}-70^{\circ}\text{E}$, both of which are shown as green outlines. The SIOD index is defined as areal average SST over $28^{\circ}\text{S}-18^{\circ}\text{N}$; $90^{\circ}\text{E}-100^{\circ}\text{E}$ subtracted from areal average SST over $37^{\circ}\text{S}-27^{\circ}\text{S}$; $55^{\circ}\text{E}-65^{\circ}\text{E}$, both of which are shown as green outlines »

3. La Réunion

Dans le sud-ouest de l’Océan Indien, La Réunion est une île localisée en $21^{\circ}07'S$, $55^{\circ}32'E$ (figure I.15). Elle fait partie de l’archipel des Mascareignes avec ces deux sœurs que sont l’île Maurice et Rodrigues (Duncan, 1981). Toutes trois résultent de l’activité d’un point chaud actif depuis quelques 10 millions d’années, ayant la particularité de prendre sa source dans une hétérogénéité datant de l’Hadéen⁵ (Peters et al., 2018). Cependant, La Réunion présente des particularités aussi bien intrinsèques, de sa topographie, qu’extrinsèques, en ce qui concerne son contexte atmosphérique. D’une topographie particulière, l’île est régulièrement soumise à des événements de fortes pluies. En y rajoutant les spécificités des processus nuageux locaux, la ressource solaire locale ne peut qu’être fortement variable, aussi bien dans l’espace que dans le temps.

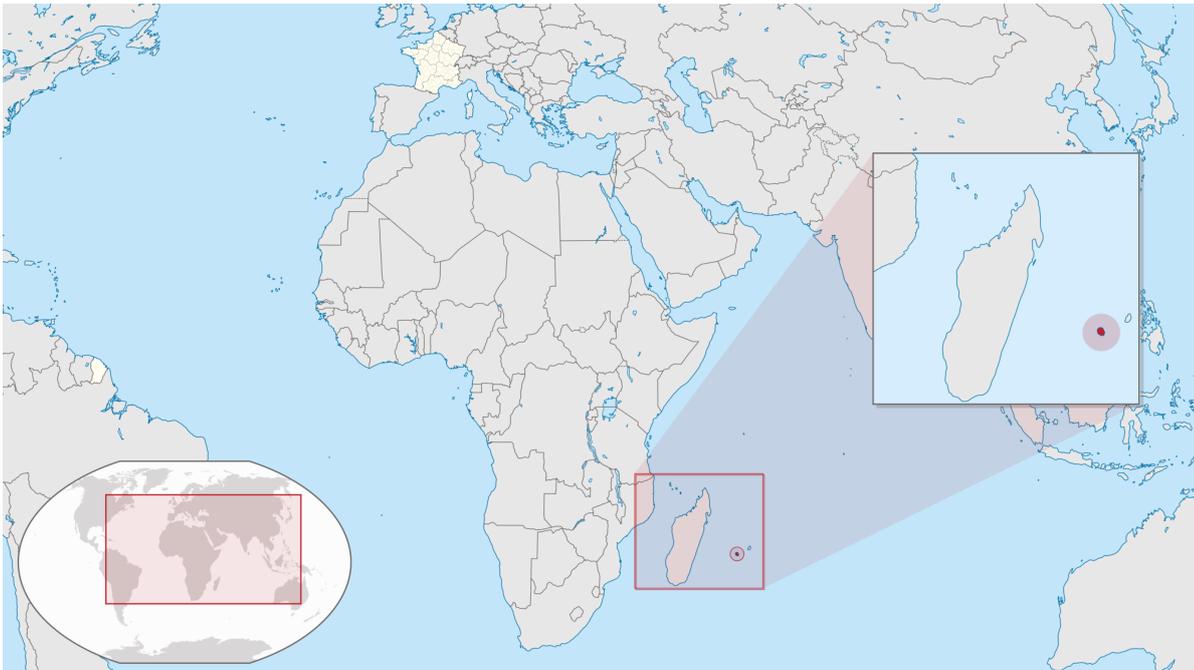


FIGURE I.15. – Localisation de La Réunion. *Figure provenant de Wikimedia Commons (2015).*

5. Débutant il y a 4,6 milliards d’année, l’Hadéen est une période de 600 millions d’années auxquelles on associe la formation et à la stabilisation de la Terre primitive mais aussi à la fin desquelles les conditions nécessaires à l’apparition de la vie sont réunies.

3.1. Une topographie complexe

Bien que la paternité de l'île de La Réunion revienne au Piton des Neiges et au peu connu volcan des Alizés, c'est maintenant le Piton de La Fournaise qui est le volcan actif de l'île (Lénat et al., 2012). Il est d'ailleurs l'un des plus actifs au monde (Staudacher et al., 2016). La forte activité volcanique de l'île est à l'origine de ses pentes abruptes qui caractérisent le relief du territoire réunionnais au-delà de sa partie émergée (Oehler et al., 2008). Alors que l'on parle toujours du climat tropical de La Réunion, la forte érosion de l'île a longtemps été négligée alors qu'elle est un processus majeur dans l'évolution de la géomorphologie de l'île (Salvany et al., 2012).

D'une superficie de 2 512 km², La Réunion présente une topographie complexe (figure I.16) avec des pentes abruptes (figure I.17). La plus grande diagonale de l'île est d'une soixante-dizaine de kilomètres. Le territoire réunionnais est structurée autour des deux points culminants que sont les deux volcans, tous deux au-dessus des 2 500 mètres d'altitude. Les trois cirques de Cilaos, Mafate et Salazie (figure I.18) résultent de l'effondrement des caldeiras du Piton des Neiges.

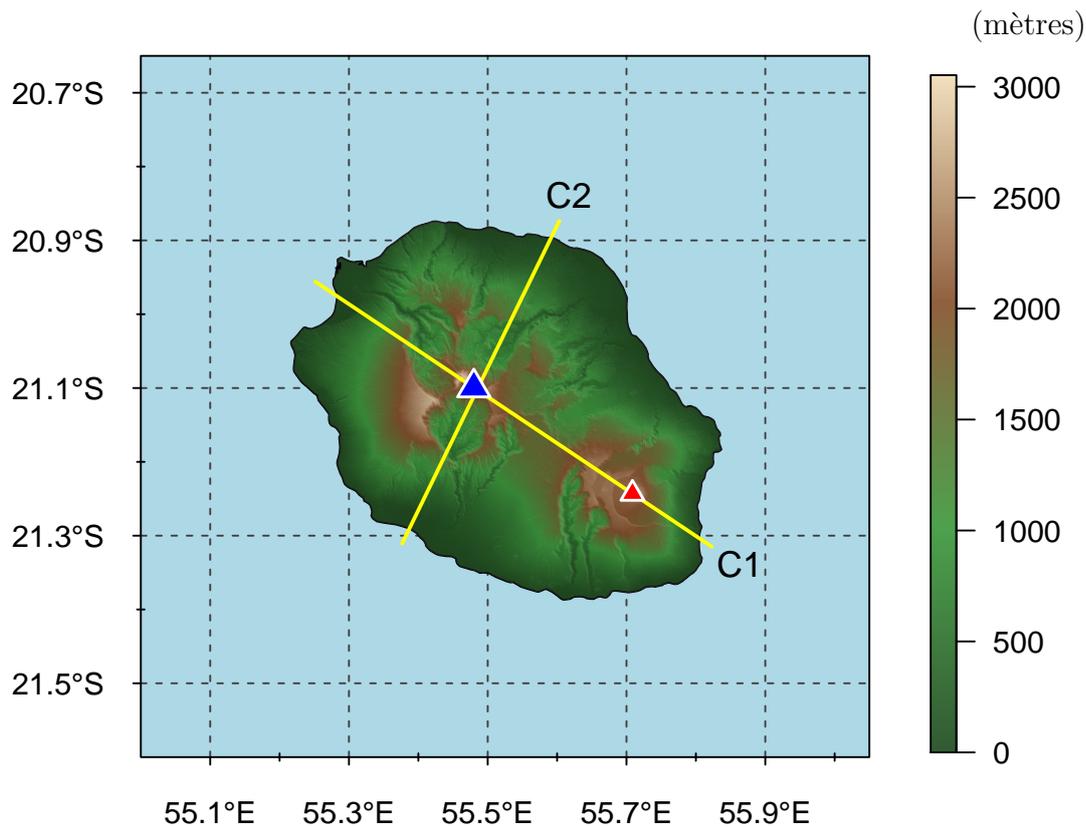


FIGURE I.16. – Carte topographique de La Réunion. Données : modèle numérique de terrain de 30 mètres NASA JPL (2009). ▲ et ▲ localisent respectivement le Piton des Neiges et le Piton de La Fournaise. C1 et C2 localisent les coupes altimétriques de la figure I.17.

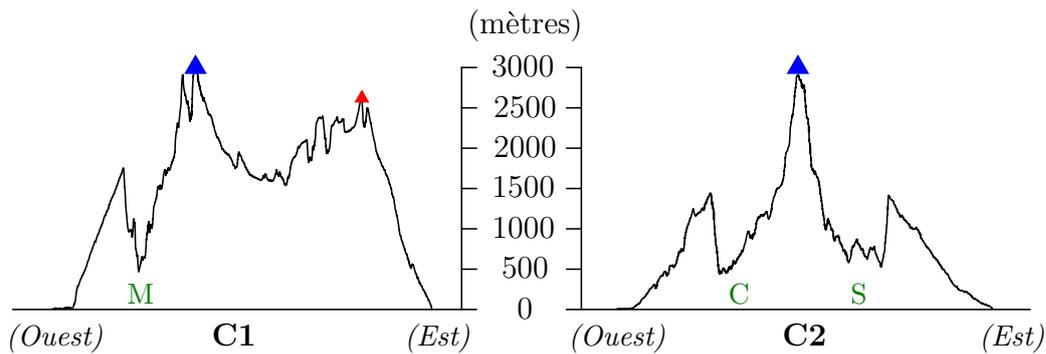
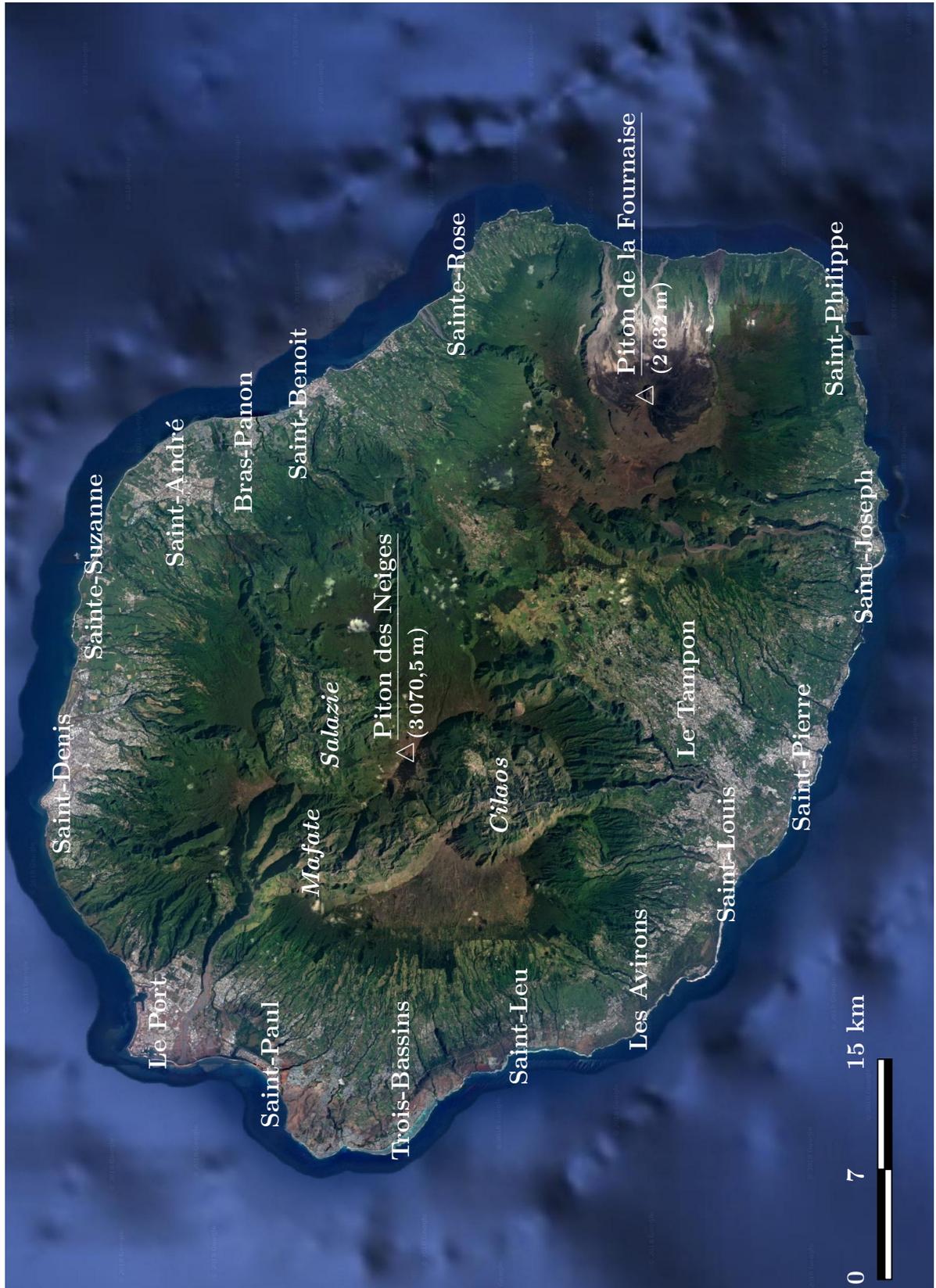


FIGURE I.17. – Profils altimétriques. Coupes réalisées de l'ouest à gauche vers l'est à droite, localisées sur la figure I.16. ▲ et ▲ localisent respectivement le Piton des Neiges et le Piton de La Fournaise. M, C et S localisent respectivement les cirques de Mafate, de Cilaos et de Salazie.

FIGURE I.18. – Vision satellite de La Réunion. Les localités de l'étude sont localisées ici.



Par ailleurs, la figure I.17 soulève la question de l'effet des ombrages sur le rayonnement solaire dont l'impact peut se quantifier par le calcul de l'indice du « *Sky View Factor* » (SVF) (Steyn, 1980; Zakšek et al., 2011). Cet indice est une estimation, en un point donné, de la proportion de ciel qui sera visible dans une demi-sphère, en considérant donc les masques topographiques. Pour le calcul du SVF, la demi-sphère du ciel est discrétisée en n angles dans chacun desquels est estimé l'angle d'élévation maximal γ_i . La formule du SVF est :

$$\text{SVF} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\gamma_i)$$

avec n le nombre d'angle pris égal à 360. Pour chaque i angle de 1° dans les 360° de la demi-sphère de ciel visible, l'angle d'élévation maximal γ_i est estimé.

En figure I.19, les valeurs les plus faibles du SVF localisent les fortes pentes de l'île au contraire des valeurs les plus fortes du SVF qui se trouvent sur les hauts plateaux et zones côtières.

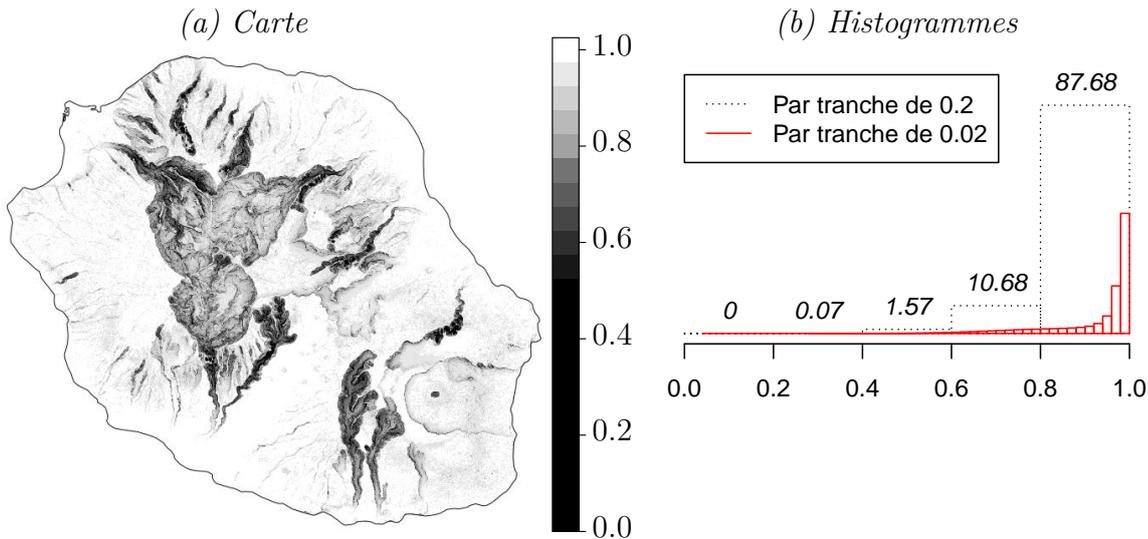


FIGURE I.19. – Représentation des valeurs du « *Sky View Factor* » : en (a) une carte de la répartition spatiale du SVF et en (b) des histogrammes par tranches de 0.2 (en pointillé noir) et de 0.02 (en ligne rouge). Les nombres sur les barres de l'histogramme en pointillé sont les pourcentages rapportés au nombre de pixels sur l'île. Le modèle numérique de terrain utilisé est de résolution 30 mètres NASA JPL (2009), le calcul du SVF se fait degré par degré en considérant la totalité de l'île.

La Réunion est donc un petit territoire caractérisé par de fortes pentes. Ces dernières modulent la quantité d'énergie perçue à la surface de son territoire du fait des ombrages

orographiques.

Une autre contrainte à l'exploitation du solaire est celle de la localisation de la demande électrique, c'est-à-dire de la population (Lajoie and Hagen-Zanker, 2007). En effet, les habitations et autres bâtiments ne peuvent pas se construire sur des pentes trop élevées. La répartition des habitants sur l'île est présentée en figure I.20. À partir de cet état de la population en 1999, Lajoie and Hagen-Zanker (2007) simulent différents schémas d'expansion urbaine.

Cependant, il est notable que des villes se développent aussi sur de hautes altitudes avec le cas de la ville du Tampon se situant entre les 287 et les 2 418 mètres d'altitude. On remarque aussi des habitations autour de l'axe routier de la nationale qui traverse l'île en reliant le Tampon et St-Benoît. Cette diagonale se remarque aussi en figure I.19 comme étant une zone avec peu d'ombrages orographiques.

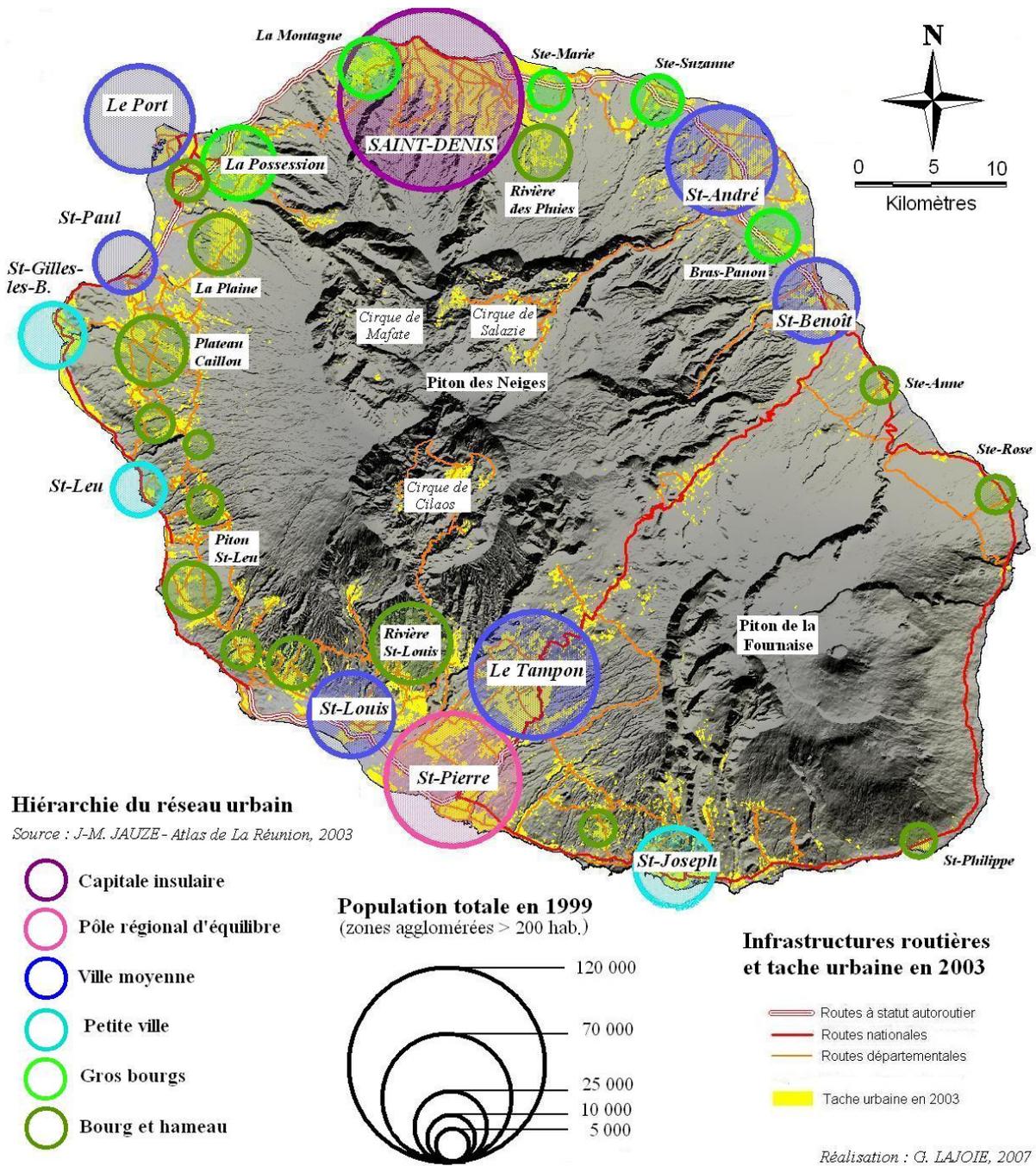


FIGURE I.20. – Armature urbaine et étalement urbain à La Réunion en 1999. *Figure reprise de Lajoie and Hagen-Zanker (2007).*

3.2. De fortes pluies

À quelques degrés au nord du Tropique du Capricorne, La Réunion est soumise à la circulation atmosphérique de l'anticyclone des Mascareignes vers la ZCIT. En hiver, l'île est située dans la partie descendante de la cellule de Hadley (Baldy et al., 1996), bénéficiant de conditions de stabilité particulière. À ce moment-là, l'anticyclone des Mascareignes est localisé au sud de l'île alors soumise à des vents plus intenses que pendant l'été. En effet, en été, l'anticyclone des Mascareignes est non seulement amoindri mais il est aussi plus éloigné de La Réunion. Par ailleurs, les conditions estivales sont propices à la formation de cyclones qui, de façon récurrente, impacte le territoire réunionnais.

La Réunion est donc alimentée par des flux d'humidité provenant de la mer qui favorisent la formation de nuages et l'occurrence des précipitations. Sa pluviométrie est décomposée en 7 différentes zones par Météo-France (figure I.21).

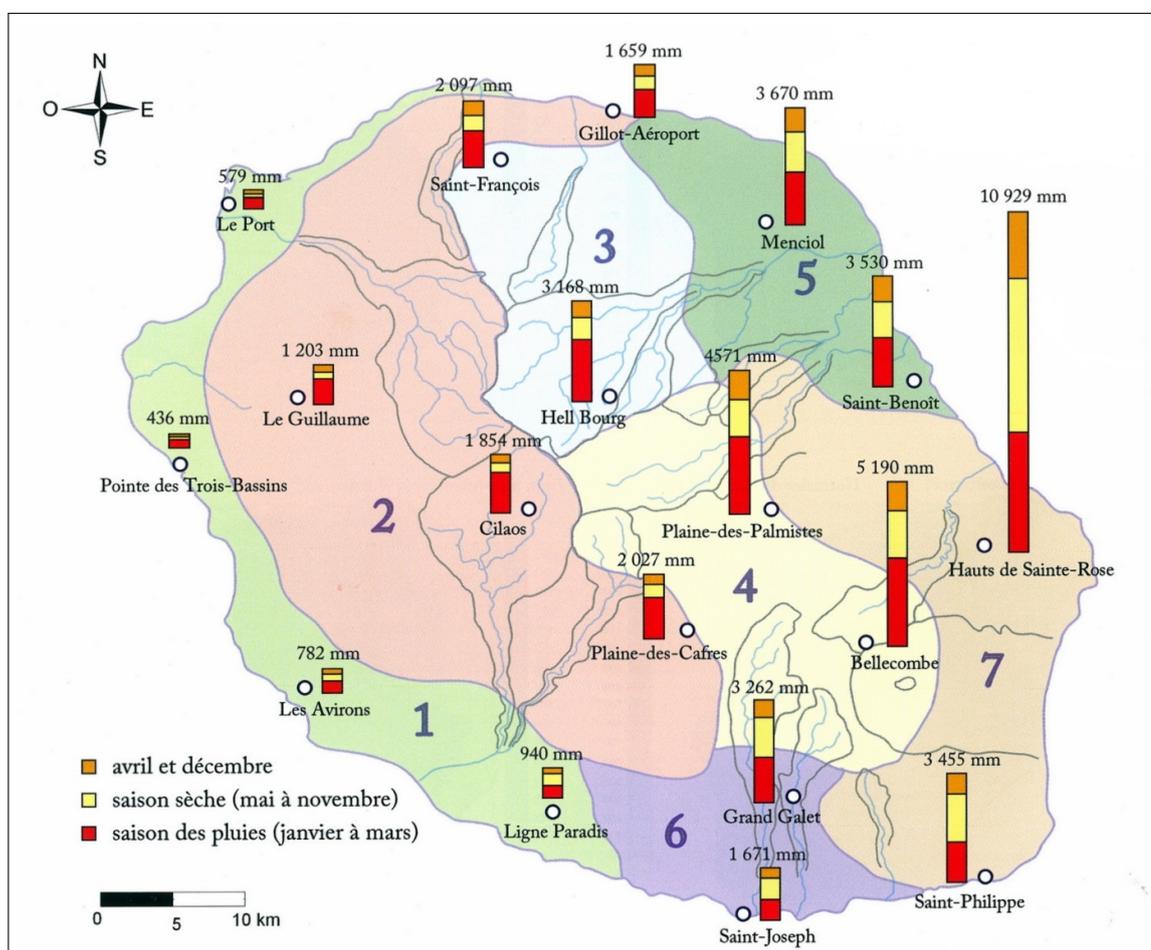


FIGURE I.21. – Répartition saisonnière des précipitations annuelles (normales 1981-2010) Figure reprise de *Jumaux et al. (2011)*. Les zones pluviométrique de l'île sont colorées et numérotées de 1 à 7. Les stations d'observation sont localisés par des cercles noirs.

Ce zonage a été réalisé par classification des 63 sites d'observation de Météo-France (Jumaux et al., 2011). La figure I.21 propose une carte moyenne de la pluviométrie de l'île de La Réunion et une représentation de ce cumul selon les saisons sèche et humide. De plus, Météo-France propose chaque année un bilan de la pluviométrie accessible au : <http://www.meteofrance.re/climat/pluies-annuelles>.

Détentricrice de records mondiaux (Cervený et al., 2007), la pluviométrie de l'île est alimentée par des événements extrêmes qui sont des sujets de recherches (Pohl et al., 2016; Quetelard et al., 2009). Elle présente aussi des particularités quant à son lien avec la végétation (André and Brou, 2016). Une étude récente propose une carte détaillée, reprise en figure I.22, de l'occupation du sol réunionnais selon 11 catégories (Dupuy et al., 2017). Au centre de l'île, les forêts, savanes et prairies sont les végétations que l'on observe le plus.

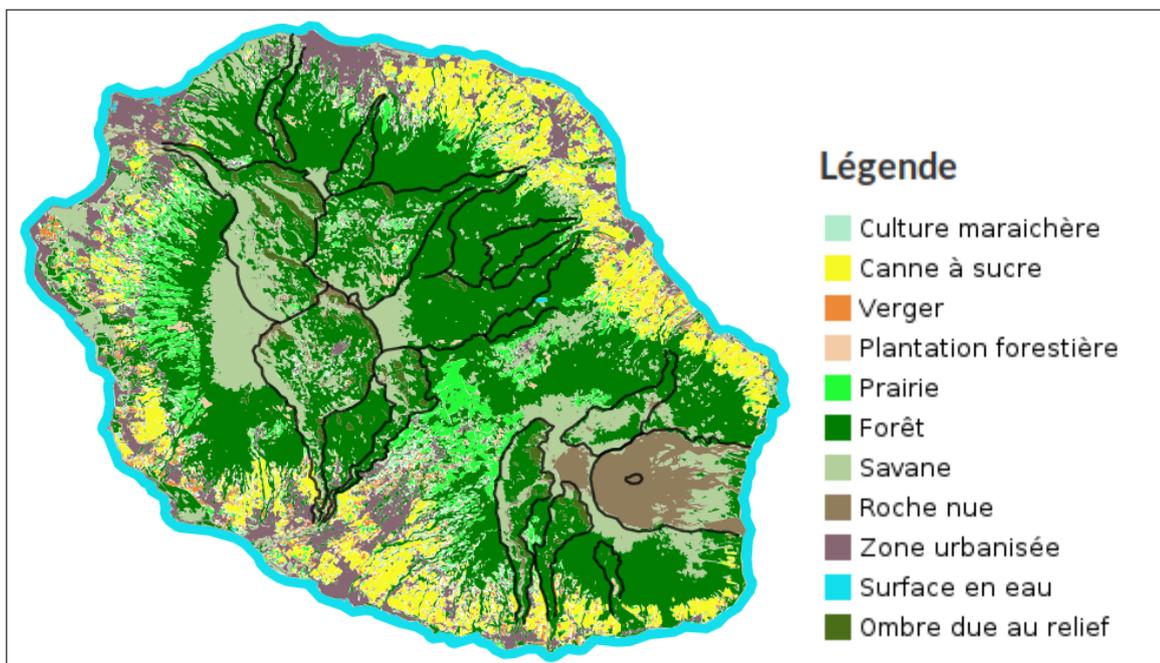


FIGURE I.22. – Carte d'occupation du sol de La Réunion 2016-2017. *Figure reprise de Dupuy et al. (2017) – CIRAD. Les lignes noires rajoutées proviennent de de Jumaux et al. (2011) et localisent les lignes de crêtes. Source : http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Aclassif_gabir_2016_2017*

3.3. Des circulations locales

L'île est un obstacle de taille pour les circulations atmosphériques. Lorsque ces écoulements rencontrent La Réunion, deux régimes d'écoulements orographiques sont possibles. En considérant un vent d'est (orientée de la balise 1 à la balise 3), ces deux cas de figures sont schématisés en figure I.23 :

– cas de figure (a) : l'écoulement est intense et les masses d'air transportées s'élèvent sur le relief réunionnais, le régime est dit de soulèvement orographique.

– cas de figure (b) : l'écoulement est faible et les masses d'air divergent en amont de l'obstacle, le régime est dit de contournement.

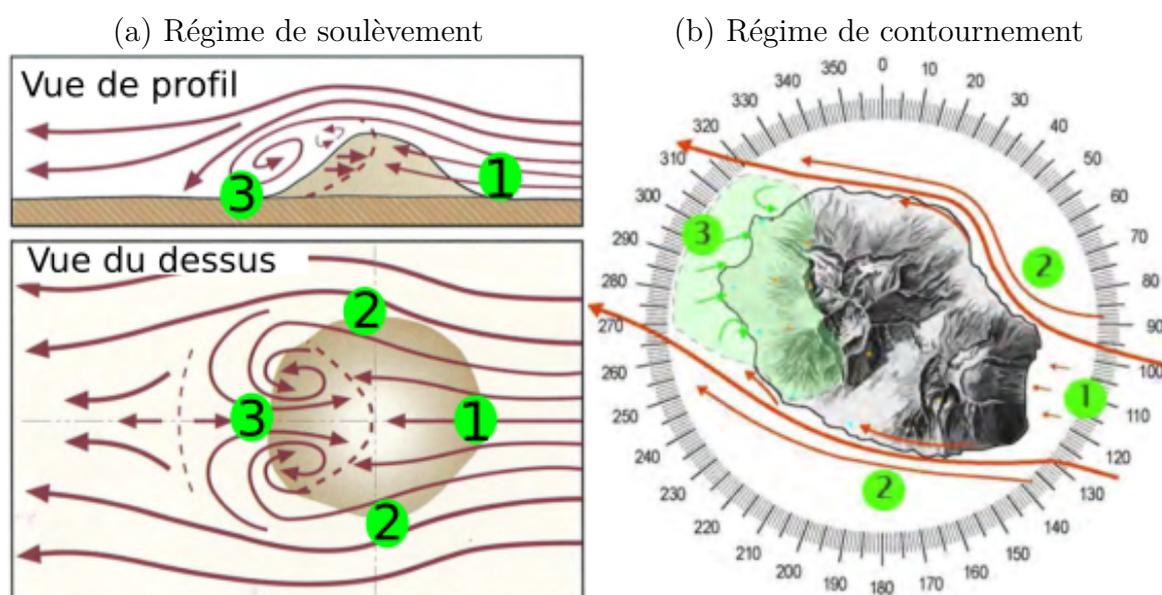


FIGURE I.23. – Représentation schématique des régimes d'écoulements orographiques : (a) de soulèvement et (b) de contournement. Les flèches localisent les lignes de champs associées au vent. Les balises de 1 à 3 décrivent différentes zones de l'île : (1) pour la zone exposée au vent, (2) pour les zones d'accélération et (3) la zone sous le vent. Figures de Guilpart (2018) selon Whiteman (2000) et Lesouëf (2010).

Dans le cas d'un régime de contournement (b), la région 3 est protégée du vent alors que la région 1 y est exposée. Les zones 2 connaissent quant à elles une intensification des vents du fait de l'accélération induite par effet Venturi. Pour un régime de soulèvement (a), la zone 3 n'est plus protégée du vent. Il y a un retour de l'écoulement qui s'y opère et qui provoque une ascension des masses d'air sur le relief.

Un flux d'alizé faible de 5 m.s^{-1} induira un régime de contournement (b) alors que pour un écoulement de 10 m.s^{-1} , il y aura un soulèvement orographique (a) (Lesouëf, 2010; Guilpart, 2018). Le seuil entre les deux régimes est estimé à 6 m.s^{-1} de vitesse

zonale moyenne réalisée sur le jour (Guilpart, 2018). Si La Réunion est soumise à des vents d'intensité strictement inférieure à ce seuil, l'écoulement se fera selon un régime de contournement. Dans le cas contraire, le régime sera de soulèvement. Guilpart (2018) estime à 36 % les cas de contournement et à 10 % les cas de soulèvement.

Les écoulements orographiques ne sont pas les seuls à dynamiser les circulations locales de l'île. Il est aussi question d'écoulements thermiques : les brises de terre et de mer (figure I.24). Les propriétés thermiques de la terre diffèrent de celles de la mer et induisent alors un gradient des températures. En effet, la terre a une meilleure absorption du rayonnement solaire que la mer et, donc, la température de la terre va se modifier plus rapidement que celle de la mer.

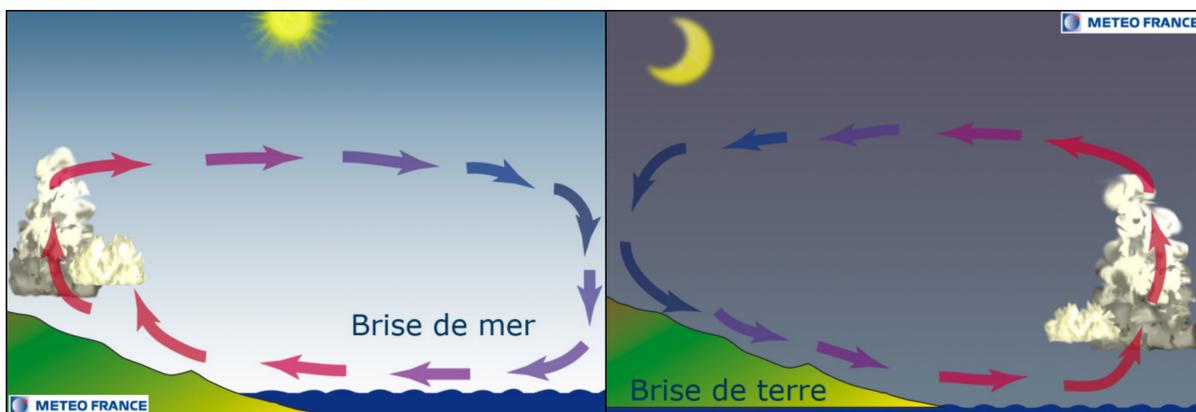


FIGURE I.24. – Représentation schématique des brises thermiques de mer et de terre. *Le sens de circulation de la brise est représenté par les flèches dont la couleur rouge (bleue) fait référence à des températures plus élevées (faibles). Figures de Jumaux et al. (2011). Source : téléchargées sur www.meteofrance.re.*

Ainsi, le matin, les masses d'air à la surface de la terre vont se réchauffer par conduction et puis, s'élever par convection. En conséquence, pendant la journée, cette élévation des masses d'air génère un écoulement, nommé brise de mer. Pendant la nuit, la brise de terre est le résultat d'un gradient thermique qui est inversé et, donc, d'un écoulement contraire de la terre vers la mer.

Le même genre de circulation est observé sur les pentes abruptes, particulièrement dans les cirques et sur leurs remparts. Il est question de deux types de brises de pentes : les vents ascensionnels dit anabatiques et les vents descensionnels dit catabatiques. Pendant la journée, le rayonnement solaire réchauffe la surface de la terre dont la température s'élève. Par conduction, l'air de surface devient plus chaud que l'air plus éloigné

de la pente. Ceci alimente un gradient thermique qui dirige l'écoulement anabatique à remonter la pente. En ce qui concerne la nuit, la terre n'est plus réchauffée par le rayonnement solaire. L'air de surface se refroidit plus vite que l'air plus éloigné de la pente. L'écoulement catabatique en résultant va donc descendre les pentes.

La Réunion est soumise aux alizés qui, selon leur intensité, se combinent aux régimes de brises et modulent la direction du vent (figure I.25). Pendant la journée, la résultante rapproche l'écoulement vers les côtes réunionnaises après le passage de l'île. Le contraire s'observe la nuit avec une divergence de l'écoulement selon la résultante qui s'éloigne.

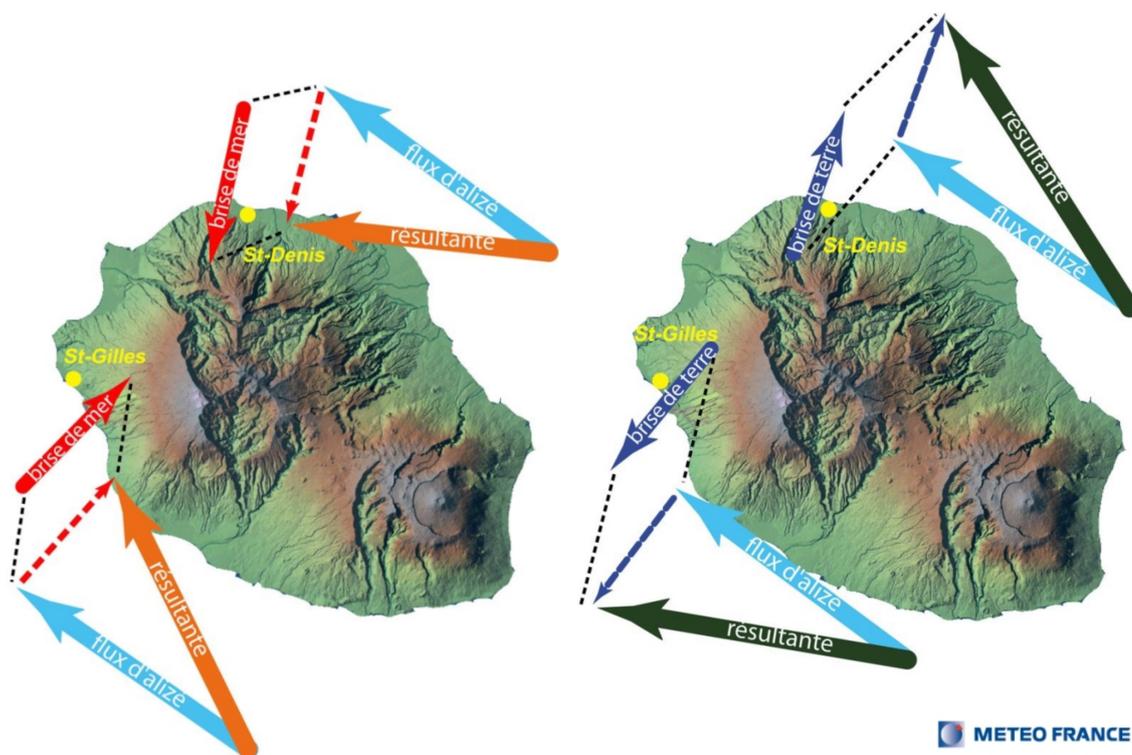


FIGURE I.25. – Représentation schématique de la combinaison entre l'alizé et les deux types de brise thermique. *Le sens de circulation des flux est représenté par des flèches de couleurs différentes : bleu clair pour le flux d'alizé, puis à gauche (à droite), le rouge (bleu) pour la brise de mer (de terre) et le vert (l'orange) pour la résultante des alizés et brise. Figures de Jumaux et al. (2011). Source : www.meteofrance.re.*

3.4. Deux processus nuageux

Pour chacun des écoulements précédemment détaillés, les déplacements de masse d'air peuvent se compléter par un changement de phase de la vapeur d'eau contenue. En effet, si la parcelle d'air est assez chargée en humidité et selon le gradient entre l'air transporté et son environnement d'arrivée, il y aura condensation et formation de nuages.

Il existe donc plusieurs circulations locales types et combinaisons possibles. Ces dernières modulent les processus de formation et de déplacement des nuages. Présentés en figure I.26, nous retenons principalement deux processus d'ennuagelement de La Réunion (Badosa et al., 2015).

En figure I.26.a, le processus explicité est celui de l'ennuagelement de l'île par formation de nuages orographiques Jumaux et al. (2011). Schématisé en figure I.27, le détail dans la journée de ce processus est le suivant :

- (a) le matin, le rayonnement solaire réchauffe la surface de la terre et amorce l'écoulement anabatique,
- (b) l'ascension des masses d'air le long des pentes a assez alimenté en humidité les altitudes plus hautes et il y a donc formation de nuages,
- (c) l'écoulement anabatique persiste et les premiers cumulus se forment,
- (d) selon l'intensification des cumulus, il peut y avoir précipitation de la vapeur d'eau contenue dans les nuages,
- (e) en fin de journée, le rayonnement solaire ne réchauffe plus assez les pentes de l'île, si bien que l'écoulement anabatique s'arrête et les nuages se désagrègent.

La figure I.26.b présente, quand à elle, un autre processus nuageux. Pendant la nuit, la combinaison d'une brise de terre et de vents catabatiques sont à l'amont de la formation de nuages au-dessus de la mer. Au matin, le régime de brise s'inverse et la brise de terre déplace les masses d'air de la mer vers la terre. Les nuages formés pendant la nuit sont alors advectés le matin sur l'île par les écoulements d'est.

Par la suite, ces deux processus nuageux seront appelés : débordements nuageux et nuages advectés. En figure I.3, nous avons défini les quatre acteurs qui modulent la ressource solaire arrivant à la surface terrestre. À La Réunion, la couverture nuageuse sera considérée comme principale source de la variabilité du rayonnement solaire.

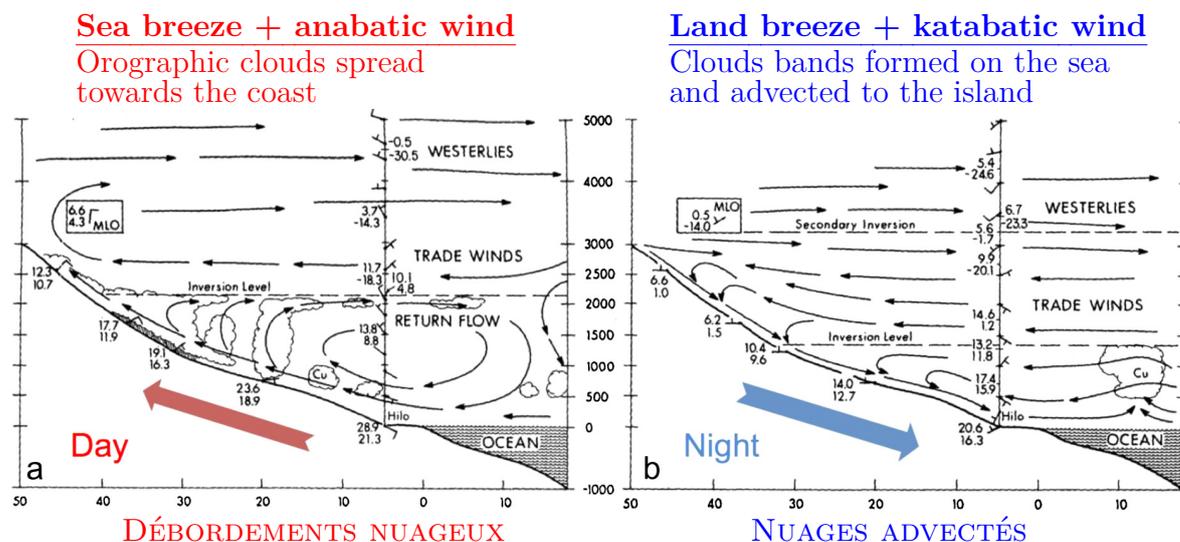


FIGURE I.26. – Processus de formation de nuage à l'échelle locale, figure provenant de [Badosa et al. \(2015\)](#) selon [Garrett \(1980\)](#). L'axe des abscisses est la distance entre la limite terre-mer (en kilomètres) et l'axe des ordonnées est l'altitude (en mètres).

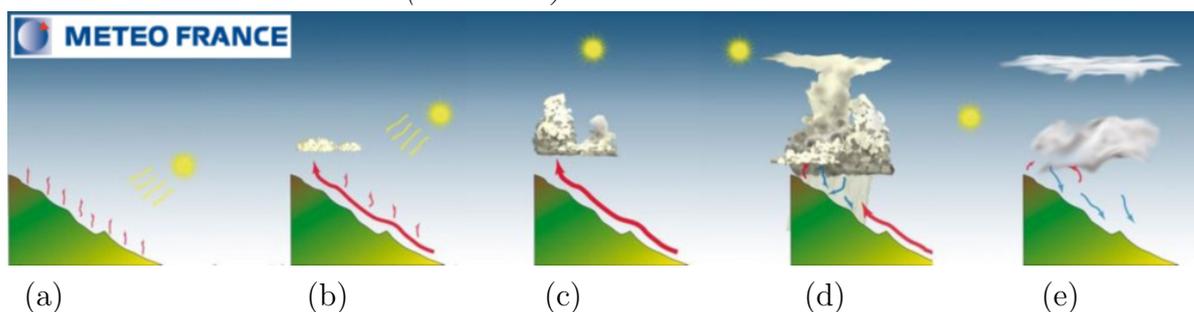


FIGURE I.27. – Détail au cours de la journée du processus de formation de nuage par débordements nuageux de la figure I.26. Source : www.meteofrance.re.

En ce qui concerne les aérosols, La Réunion est localisée dans un environnement à faible épaisseur optique ([IPCC, 2014](#), Fig.7.14). Au niveau local, la surveillance du taux d'aérosol peut se faire grâce au réseau de l'**AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET)**. Leur site, localisé à Saint-Denis, a permis de statuer sur la variabilité journalière du taux d'aérosols sur La Réunion qui est parmi les plus faibles du globe. En effet, l'indice de variabilité d'aérosol journalier local est estimé inférieur à 0.05 ([Gueymard, 2012](#), Fig.5). Ces données **AERONET** couvrent plus de 10 ans et permettent d'établir une climatologie de l'épaisseur optique à laquelle est soumise l'île de La Réunion (figure I.28). Une climatologie est faite sur le continent Africain au travers de 23 stations **AERONET**, comprenant alors les sites de Madagascar et de La Réunion ([Horowitz et al., 2017](#)).

Épaisseur optique d'aérosol

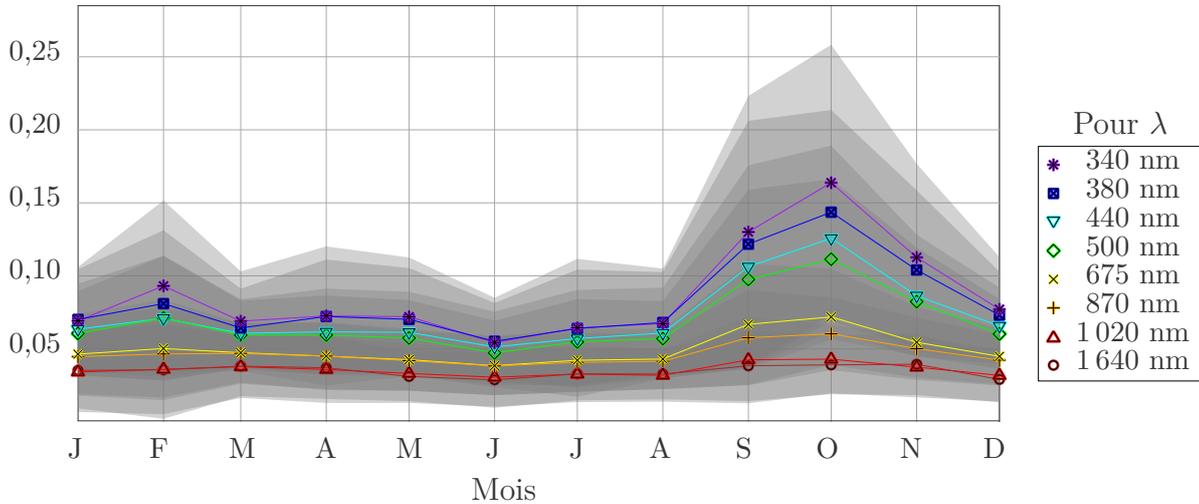


FIGURE I.28. – Moyennes mensuelles de l'épaisseur optique pour 8 canaux de longueurs d'onde à Saint-Denis. Données AERONET du site de Saint-Denis (LEVEL 2.0), couvrant la période du 08/05/2007 au 11/11/2017 avec environ 7-8 mesures par heure.

L'augmentation de l'épaisseur optique pendant les mois de septembre à novembre est associée aux retours de particules des feux d'Afrique (Randriambelo et al., 2000). Dans l'Océan Indien, le forçage radiatif des aérosols est estimé à -16 W.m^{-2} à la surface de la terre (Podgorny et al., 2000).

3.5. Une ressource solaire intermittente

La localisation de La Réunion lui octroie une ressource solaire colossale (Praene et al., 2012). Cependant, sa forte variabilité, particulièrement au travers de celle de la couverture nuageuse, est un frein à sa meilleure intégration dans le mix énergétique local. Ainsi, des études s'intéressent à mieux caractériser le gisement solaire de l'île.

Météo-France Réunion a édité deux livres présentant le climat local (Jumaux et al., 2011; Soler, 1997)⁶. Dans le plus récent des deux, une partie est réservée à la ressource solaire et propose des cartes en moyennes annuelle (en figure I.29) et saisonnières grâce à une interpolation spatiale. Cependant, les données interpolées sont des mesures *in situ* qui ne sont pas équitablement réparties sur la topographie complexe de l'île (sites localisés en cercle blanc en figure I.30).

Récemment, une même climatologie de la ressource solaire est proposée grâce une interpolation spatiale sur des données satellitaires (de résolution $\sim 5\text{km}$), en prenant en

6. Météo-France propose aussi l'accès à des bulletins climatiques annuels : <http://www.meteofrance.re/climat/publications-locales>

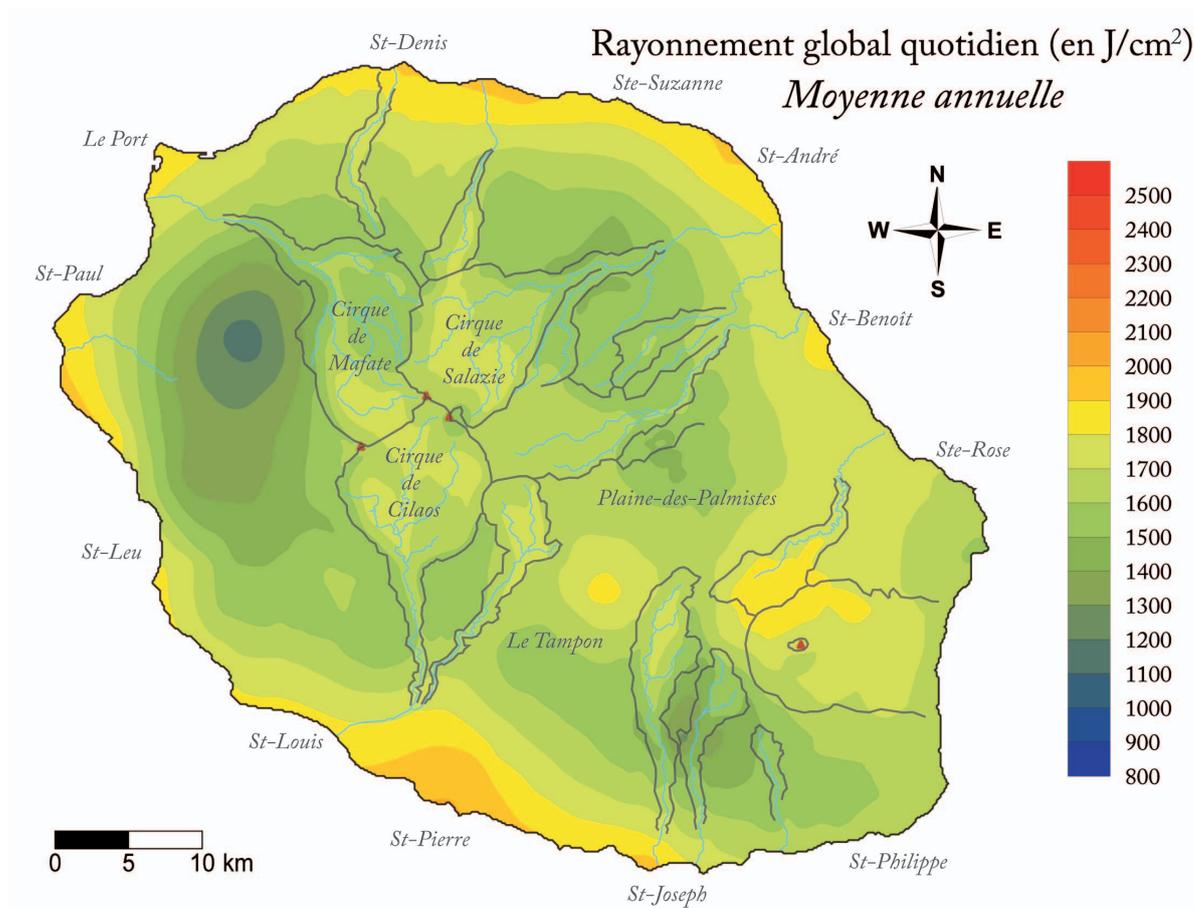


FIGURE I.29. – Carte de la moyenne annuelle du rayonnement global reprise de [Jumaux et al. \(2011\)](#). Les triangles rouges localises les points culminants de l'île.

compte la topographie de l'île et son impact sur le rayonnement solaire direct et diffus ([Bessafi et al., 2018](#)). Les résultats sont comparés aux données d'observations de Météo-France utilisées par [Jumaux et al. \(2011\)](#). La figure I.30 est reprise de [Bessafi et al. \(2018\)](#) et propose une vision spatiale du cumul moyen annuel du rayonnement solaire à la surface de l'île.

Cependant, malgré que la reconstruction spatiale de la ressource solaire selon l'altitude soit efficace ([Oumbe et al., 2011](#)), l'enneuagement de l'île est fortement variable. [Bessafi et al. \(2018\)](#) obtiennent des écarts entre les données d'observations *in situ* de Météo-France et leur équivalent interpolé, particulièrement sur les zones à débordements nuageux.

Par ailleurs, une climatologie renseigne le potentiel moyen mais ne permet pas d'appréhender l'intermittence de la ressource solaire locale alors lissée. Une décomposition multi-fractale de la ressource locale est proposée par [Li et al. \(2015\)](#) qui associe l'intermit-

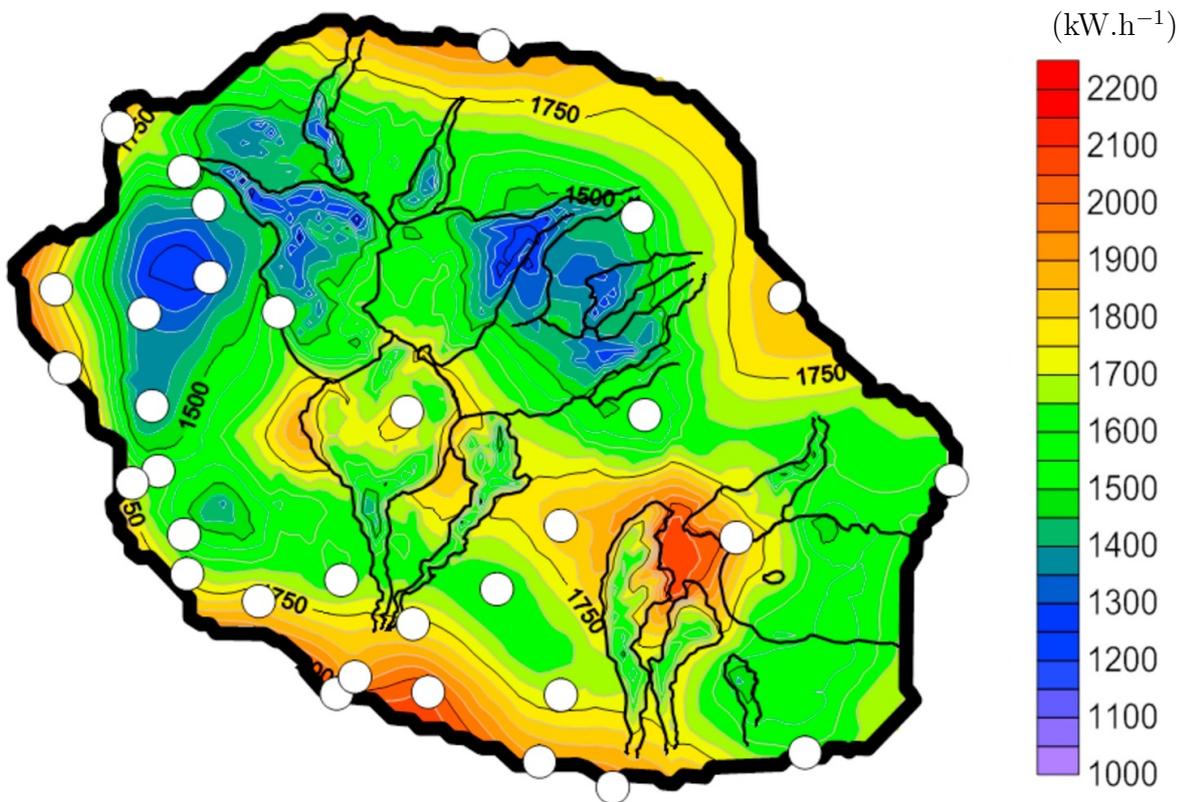


FIGURE I.30. – Carte du cumul annuel du rayonnement global de La Réunion, figure reprise de [Bessafi et al. \(2018\)](#). Selon une méthodologie de descente d'échelle à 250 mètres sur données satellitaires de ~ 5 km. Les points blancs représentent les stations d'observations de Météo-France utilisées pour comparaison par [Bessafi et al. \(2018\)](#).

tence à de la turbulence. D'autres études amorcent la compréhension de l'intermittence de la ressource solaire de La Réunion en abordant dans un premier temps la variabilité de son cycle diurne. Utilisant tous deux des mesures in situ, [Bessafi et al. \(2015a\)](#) et [Badosa et al. \(2013\)](#) décomposent la variabilité diurne de la ressource solaire en 5 régimes types. En figure I.31 sont présentés les régimes obtenus par [Badosa et al. \(2013\)](#) sur la base d'une classification de trois paramètres représentatifs de la variabilité journalière du rayonnement solaire. De façon similaire, [Bessafi et al. \(2015a\)](#) obtiennent des régimes de rayonnement solaire en classifiant les journées selon leur indice de ciel clair. Ils obtiennent des résultats similaires à l'exception d'un régime, celui d'« Après-midi clair ». À la place de ce dernier, il est question d'un autre régime de « Matin clair » mais dont l'ennuagement arrive plus tôt, soit aux alentours de 9h-9h30. Les pré-traitements des données sont pas les mêmes et expliquent cette différence.

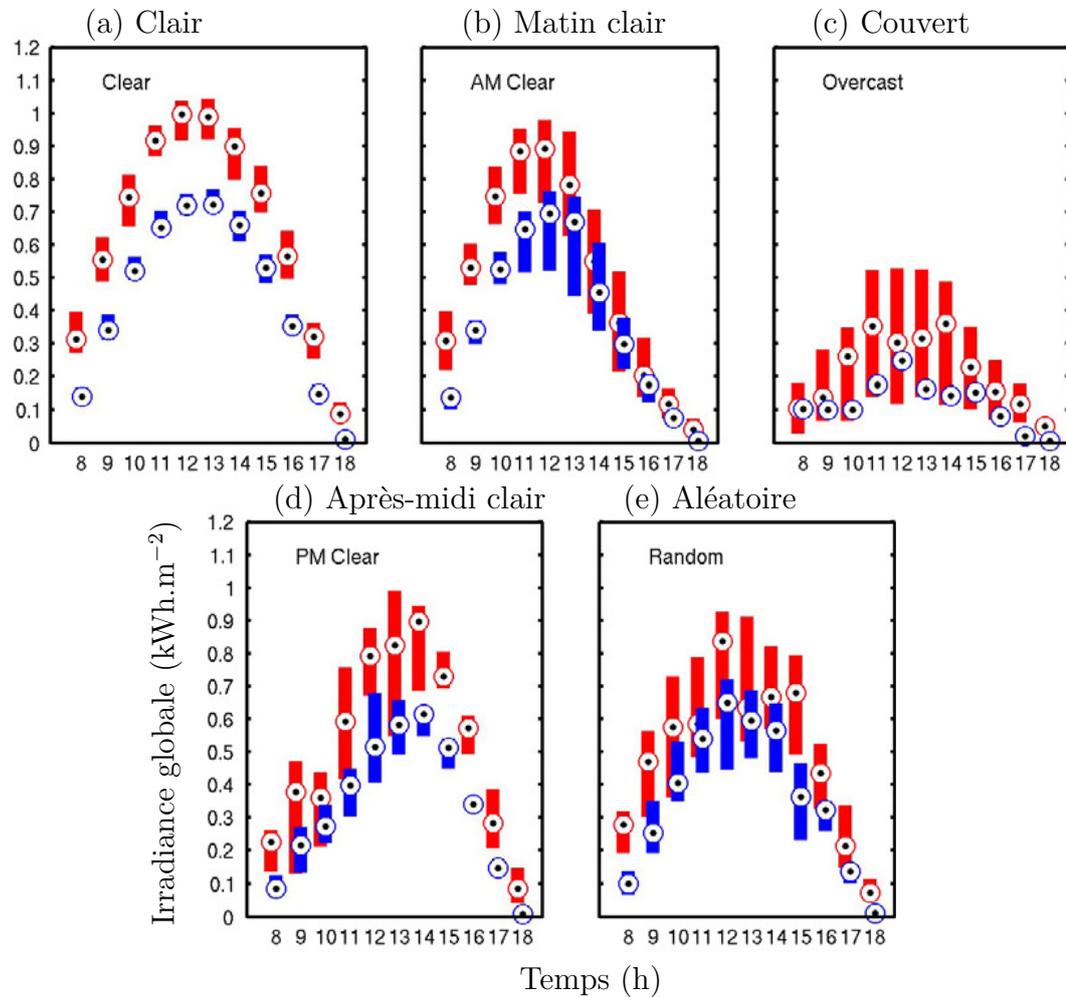


FIGURE I.31. – Représentation des régimes de rayonnements solaires de [Badosa et al. \(2013\)](#), dont la figure provient. La légende initiale est traduite dans les phrases suivantes. Distributions des cycles diurnes d'irradiance (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) pour chaque régime pour la station de Gillot, en été (rouge) et en hiver (bleu). Les points représentent les médianes tandis que les limites des boîtes correspondent au 25^{ème} et 75^{ème} percentiles des données.

Chapitre II.

Base de données solaires : choix des données et méthodes de classification induites

La littérature présente des travaux sur la caractérisation de la ressource solaire de La Réunion utilisant aussi bien des données *in situ* que des données satellitaires. La première question d'un choix de base de données s'est posée avant toute considération des méthodes à appliquer pour répondre à notre problématique. Nous choisissons de présenter dans ce chapitre (1) un état de ces différentes bases de données puis (2) les choix de méthodologie faits ensuite.

Sommaire

1. Choix d'une base de données	50
1.1. Description des bases de données sélectionnées	50
1.2. Limite des bases de données d'observation <i>in situ</i>	57
1.3. Choix d'une base de données satellites	61
1.4. Estimation de la qualité des données satellites choisies	66
2. Méthodologie de caractérisation de la ressource solaire	76
2.1. Caractérisation spatiale des états moyens	76
2.1.1. Définitions des états moyens	76
2.1.2. Classification hiérarchique ascendante selon un critère de Ward	77
2.2. Caractérisation temporelle en régime d'anomalies	78
2.2.1. Construction des anomalies	78
2.2.2. Méthode dynamique de classification en k-moyennes	79
2.2.3. Mise en lien avec les circulations atmosphériques	80

1. Choix d'une base de données

Le terme de rayonnement global que nous employons représente le flux d'énergie solaire perçue à la surface de la Terre. Les stations d'observation *in situ* en font directement la mesure puisqu'ils sont au sol. Cependant, la qualité de cette mesure est tributaire de la sensibilité des capteurs et des aléas techniques entre mesure et exploitation. Depuis l'espace, les satellites ne mesurent pas directement les flux d'énergie de la surface terrestre. Les satellites dits géostationnaires sont en orbite à environ 36 000 km de la surface terrestre et, de fait, les signaux arrivant jusqu'aux capteurs embarqués sont perturbés par leur traversée de l'atmosphère terrestre. En conséquence, il est nécessaire de recourir à des modèles ou relations empiriques pour corriger ces signaux perturbés, ce qui génère à nouveau des incertitudes. Finalement, les images satellites et *in situ* peuvent être qualifiées de complémentaires. D'une part, les stations d'observation au sol apportent une quantification plus proche de la réalité qui permet d'affiner les mesures des satellites. Et, d'autre part, les données satellitaires couvrent une large surface terrestre selon la résolution des capteurs. Les réseaux de mesure au sol sont alors une source d'information essentielle à la quantification des flux d'énergie en surface et qui complètent les estimations basées sur des données satellites (Wild et al., 2017, 2013).

Le choix d'une base de données est donc une étape importante qui s'ouvre sur différentes problématiques. La section ici détaillée s'est construite au début des travaux de recherche et selon les obstacles rencontrés avec les différentes bases de données. Initialement, il était question d'allier la prise en main des outils de programmation avec le début de la caractérisation spatiale de la ressource solaire. Les travaux ont donc débuté par une première étude de classification tout d'abord à partir des données du laboratoire, puis en y ajoutant les mesures d'observations Météo-France pour finalement s'axer sur l'utilisation seule des données satellitaires. Au final, ces premières études ont permis l'élaboration d'un choix de base de données au travers des étapes que sont : (1.1) la description des jeux de données sélectionnés, (1.2) les obstacles rencontrés menant à l'utilisation de données satellites, (1.3) une comparaison des différents produits satellitaires et (1.4) l'estimation du niveau de confiance des données satellites en comparaison avec des mesures d'observation *in situ*.

1.1. Description des bases de données sélectionnées

Parmi les réseaux de capteurs et les images satellitaires disponibles, nous détaillons ci-dessous les données du laboratoire, celles de Météo-France, celles de CM-SAF qui proviennent des satellites Météosat puis nous parlons brièvement des réanalyses de l'ECMWF. Cette description n'est donc pas un recensement exhaustif des données utilisables mais un détail des jeux de données sélectionnés. D'autres bases de données sont disponibles mais leurs caractéristiques spatiales et temporelles ne sont, à notre connais-

sance, pas optimales pour le cas d'étude de La Réunion. Par ailleurs, les jeux de données ci-après présentés ont déjà été utilisés dans le cadre de travaux de recherche du laboratoire et collaborations.

Données du laboratoire

Porté par les deux laboratoires de l'Université de La Réunion que sont le [Laboratoire d'Énergétique, d'Électronique et Procédés \(LE2P\)](#) et le [Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques \(LIM\)](#), le projet [Réseau de Capteurs Intelligents pour une meilleure connaissance du Gisement Solaire \(RCIGS\)](#) est né courant 2011 avec pour ambition de faire passer la production photovoltaïque de son état actuel de source intermittente à celui de source prévisible. Dans ce cadre, le projet a permis la construction d'une base de données d'observation à partir d'un réseau de boîtiers de capteurs installés stratégiquement sur l'île. Sur la base d'une moyenne par minute, chacun des boîtiers est équipé de sorte à mesurer les grandeurs thermophysiques que sont : le flux global (F_G), le flux diffus (F_D), la température extérieure (T_{ext}), l'humidité relative (RH), l'intensité et la direction du vent (WS, WD), la pression atmosphérique (P_{atm}) et la pluviométrie (Rain). Jusqu'à fin 2014, le rayonnement solaire global est exclusivement mesuré par des « *Sunshine Pyranometer 1* » (SPN1) de « Delta-T Devices Ltd. ». Ce capteur est doté de 7 thermopiles avec un masque d'ombrage fixe, l'ensemble donnant à la fois le flux global et le flux diffus sur un plan horizontal, selon une invention brevetée ([Wood, 1999](#)) et dont la documentation technique est accessible en ligne ([Wood et al., 2007](#)). Les incertitudes de l'utilisation du SPN1 sont largement étudiées avec la mise en place de méthodes pour y pallier ([Badosa et al., 2014](#); [Habte et al., 2016](#); [Vuilleumier et al., 2017](#)).

Faisant suite à [RCIGS](#), le projet GEOSUN est né d'une coopération régionale entre l'Université du KwaZulu-Natal en Afrique du Sud et le [LE2P](#). Le réseau de capteur du laboratoire s'est alors étendu jusqu'à la ville de Durban. Son déploiement continue de se faire dans le sud-ouest de l'océan Indien avec une station à Maurice et une autre à Rodrigues.

Début 2018, le réseau est spatialement réparti sur La Réunion comme le présente la figure [II.1](#). Parmi toutes les stations installées, une est fixée sur le terrasse technique du LE2P à Saint-Denis et sert de référence. Elle est nommée station n°1 ou du « Campus du Moufia ».

À l'heure actuelle, les données du laboratoire ont permis la caractérisation de 5 journées type selon une méthodologie de classification ([Jeanty et al., 2013](#); [Bessafi et al., 2015a](#)). Cependant, aucune considération sur la variabilité spatiale n'a été faite puisque seule la station de référence a été utilisée.

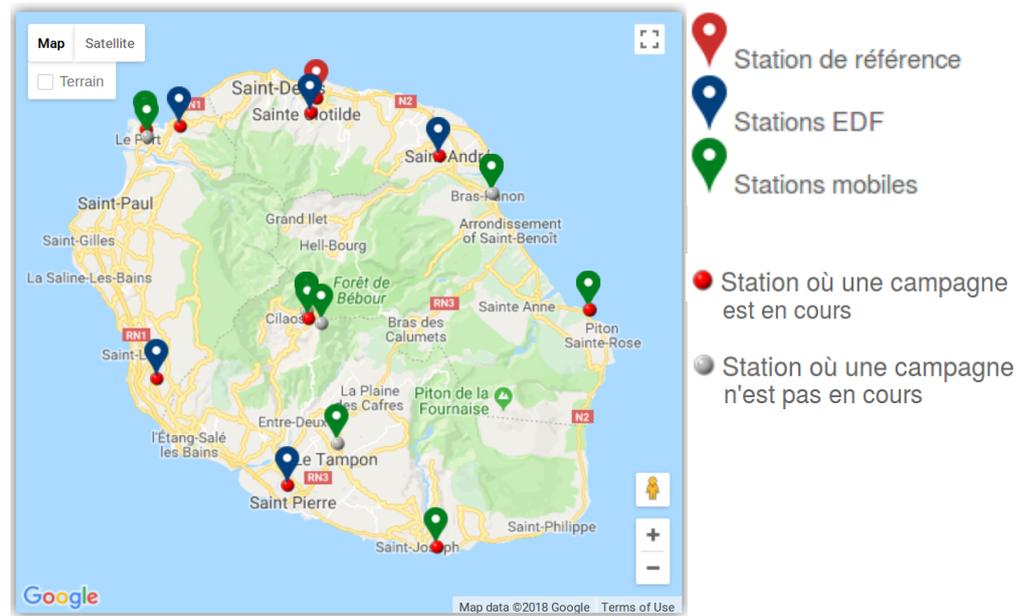


FIGURE II.1. – Répartition spatiale du réseau de capteurs du LE2P en 2018. Capture d'écran faite sur le site le2p.univ-reunion.fr/rcigsWeb/.

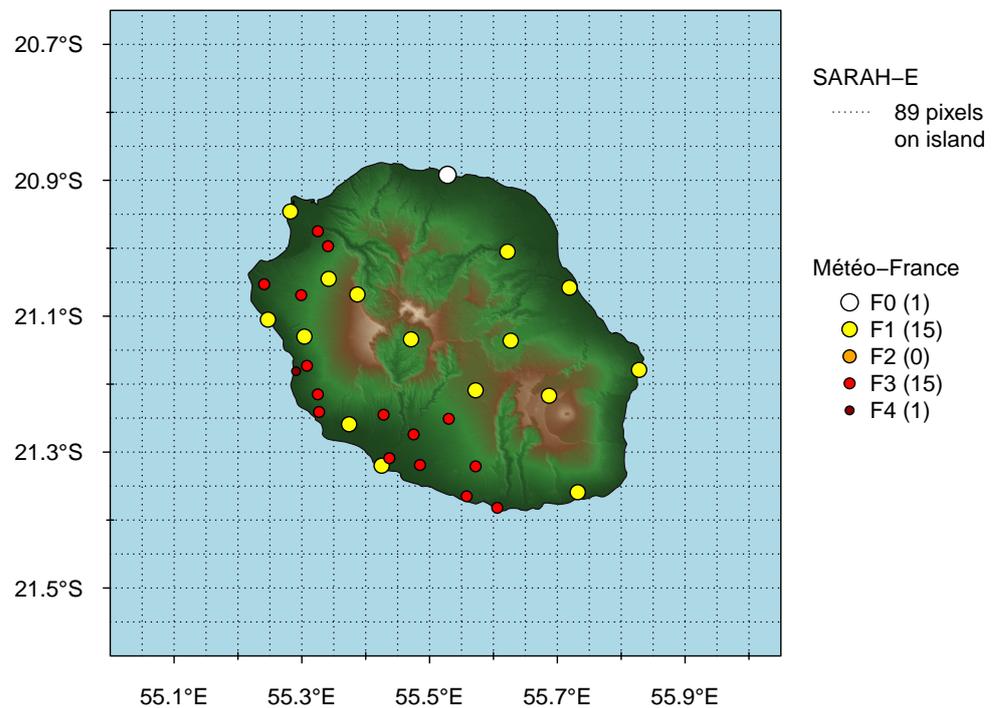


FIGURE II.2. – Carte des observations de Météo-France et de la grille satellitaire de SARAH-E. Les valeurs entre parenthèses sont les effectifs de chaque catégorie de flag Météo-France. Un complément d'information de la qualité des stations selon le classement de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) est en annexe A à la table A.1 et à la figure A.2.

Données de Météo-France

Au fil des années, Météo-France a construit un réseau de stations d'observation sur l'ensemble du département. Au-delà de l'amélioration des prédictions météorologiques, ce réseau permet l'approfondissement de la connaissance des différentes variables mesurées. Un portail d'accès aux données et métadonnées se fait sur le site : donneespubliques.meteofrance.fr/.

Les mesures de rayonnement solaire global que nous avons récupérées sont réparties sur 32 sites et couvrent les années 2011 à 2015, au pas de temps horaire. Chaque valeur est une moyenne horaire, calculée avec autant de points que l'échantillonnage à 1 point toutes les 6 minutes le permet. Cependant, les données de Météo-France sont des irradiances (en $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) et nécessitent donc une conversion pour les comparer aux irradiances solaires (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) des autres bases de données référencées ici. Parmi les métadonnées, un indice de confiance est renseigné pour chacun des sites dont la répartition spatiale est détaillée en figure II.2. Sur la figure II.2 est représentée la localisation des stations de mesures de Météo-France et leur indice de confiance. Cet indice de confiance prend des valeurs allant de F0 à F5 (F pour flag) avec pour plafond la plus fiable valeur notée F0 (Bessafi et al., 2018). La valeur F0 est utilisée pour une seule station : celle de l'aéroport qui est rattachée au réseau [Global Energy Balance Archive \(GEBA\)](http://www.geba.ethz.ch/) (Wild et al., 2017, <http://www.geba.ethz.ch/>). Par ailleurs, la classification des sites et capteurs est aussi faite selon les critères de l'OMM (OMM, 2014). Un détail de la répartition des classements de Météo-France et de l'OMM selon les sites est accessible en annexe A, à la figure A.2. Les mesures du rayonnement global sont toutes issues de thermopiles. Le réseau de capteur de Météo-France ne contient que des Kipp&Zonen dont les références sont à la table A.1.

Les données de Météo-France sont utilisées dans les atlas climatiques de La Réunion (Jumaux et al., 2011; Soler, 1997) mais aussi dans des publications pour décrire le rayonnement solaire (Bessafi et al., 2018) et les précipitations (Morel et al., 2014; Macron et al., 2016).

Données des satellites Météosat

Au travers d'une lettre ouverte aux visiteurs de leur site internet, Alain Ratier, directeur général de l'[European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites \(Eumetsat\)](http://www.eumetsat.org/), présente cette organisation intergouvernementale comme « une agence spatiale opérationnelle globale au cœur de l'Europe ». Fondée en 1986, ce sont aujourd'hui 30 États membres européens qui y collaborent permettant alors la construction d'une base de données satellitaires sur la météorologie, le climat et l'environnement. Eumetsat a organisé plus de 8 SAF (Satellite Application Facilities) autour du post-traitement de leurs images satellitaires, les rendant alors directement accessibles à la recherche scientifique. Chacun de ces SAF est spécialisé dans un domaine d'application. Parmi eux,

le [Satellite Application Facility on Climate Monitoring \(CM-SAF\)](#) s'axe autour du développement de données pour la climatologie offrant à l'utilisation une longue période de données radiatives, de températures et de nébulosité et vapeur d'eau ([Schulz et al., 2009](#)).

Dans le cadre de la caractérisation de la ressource solaire réunionnaise, nous utiliserons le produit radiatif [Surface Incoming Shortwave radiation \(SIS\)](#) qui correspond le mieux aux données de rayonnement global des mesures d'observations *in situ* présentées précédemment. Trois familles de produits sont proposées par [CM-SAF](#) : [Climate Data Record \(CDR\)](#)¹ ([Posselt et al., 2011](#); [Trentmann et al., 2013](#)), [Solar surfAce RAdiation Heliosat \(SARAH\)](#) ([Müller et al., 2015a](#); [Trentmann et al., 2014](#)) et [Solar surfAce RAdiation Heliosat - East \(SARAH-E\)](#) ([Huld et al., 2016](#); [Trentmann and Huld, 2017](#)). Toutes les trois sont générées à partir des satellites géostationnaires Météosat d'[Eumetsat](#) qui offrent une couverture sur La Réunion selon deux positions : une première centrée sur l'Afrique et une seconde sur l'océan Indien (position dite [Indian Ocean Dipole Coverage \(IODC\)](#)). De plus, l'amélioration des capteurs embarqués des satellites Météosat est à l'amont d'une différenciation faite par l'association des satellites à une génération. Ainsi, une première génération de sept satellites est appelée MFG (Meteosat First Generation). En 2017, Météosat-7 qui était en [IODC](#) depuis fin 2006 a laissé sa place à Météosat-8. Il est alors le premier des satellites MSG (Meteosat Second Generation) et il assurera la surveillance de l'océan Indien jusqu'à sa fin de vie, estimée à 2020. Les satellites MSG prévoient déjà d'être remplacés en 2021 par les MTG (Meteosat Third Generation) avec son lot d'améliorations associées ([Thies and Bendix, 2011](#)).

De la même façon que les différentes dénominations des générations, les capteurs sont aussi associés à des noms ([Trentmann et al., 2014](#), Page 13)². Pour les satellites MFG, on parle de capteurs MVIRI signifiant « *Meteosat Visible-InfraRed Imager* ». Sur la base d'une image toutes les 30 minutes, les trois bandes spectrales mesurées sont : 0,5-0,9 μm pour le visible, 5,7-7,1 μm pour l'infrarouge et entre 10,5-12,5 μm pour les vapeurs d'eau. En ce qui concerne les satellites MSG, deux dénominations sont associées : SEVIRI signifiant « *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager* » et GERB pour « *Geostationary Earth Radiation Budget* ». Les instruments SEVIRI font suite aux MVIRI avec un passage de 3 à 12 bandes ([Amato et al., 2008](#), Table.1) selon une période de 15 minutes. Les instruments GERB complètent SEVIRI sur les 0,32-4,0 μm pour le spectre solaire et sur 4,0-30 μm pour le rayonnement infrarouge émis par la Terre. En

1. Sur le portail de téléchargement des données de [CM-SAF](#), le produit que l'on nomme [CDR](#) n'a en fait pas de nom de famille. On a choisi arbitrairement ce nom puisque la version du produit est dénommée [CDRv001](#). La signification de [CDR](#) se retrouve dans l'onglet Overview dans la partie Products du site de [CM-SAF](#) accessible par le lien : <http://www.cmsaf.eu/>

2. En plus de la documentation technique mise à disposition par [CM-SAF](#), le détail des satellites à l'échelle mondiale est accessible au : <https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites> avec des précisions sur chaque capteur, satellite et génération associée.

parallèle à ces améliorations, les algorithmes de traitements des images évoluent aussi. On trouve leurs détails dans la documentation en ligne des produits satellites CDR, SARAH et SARAH-E, (Trentmann et al., 2013, 2014; Trentmann and Huld, 2017).

Dans le tableau II.1, on regroupe les informations principales de chacune des familles de SIS, au travers de leur période disponibilité, leur résolution spatiale, la génération et la position privilégiée des satellites.

TABLE II.1. – Détails des trois produits satellitaires de CM-SAF selon leur période de disponibilité et nombre d'années associé, leur résolution spatiale et le nombre de pixels sur La Réunion, la position puis la génération des satellites

Famille	Disponibilité	Résolution spatiale	Détails des satellites
CDR moyennes	1983 - 2005 23 années	0.03° ~3-4km 242 pixels sur l'île	centrée sur l'Afrique MFG
SARAH moyennes	1983 - 2013 31 années	0.05° ~5-6km 89 pixels sur l'île	centrée sur l'Afrique MFG+MSG
SARAH-E instantanées	1999 - 2015 (sauf 2006) 16 années	0.05° ~5-6km 89 pixels sur l'île	en IODC MFG+MSG

À l'heure actuelle, de nombreuses études visent à estimer le degré de fiabilité des produits de CM-SAF. Pour l'Europe, les données radiatives de SARAH sont d'une qualité dite de « *high accuracy* » sur les trois dernières décennies (Pfeifroth et al., 2018). Plus précisément, entre 2005 et 2015, ces données sont jugées de meilleure estimation que les celles des réanalyses, sur la base d'une comparaison avec 313 stations d'observation dont 7 BSRN (Urraca et al., 2017). Les moyennes mensuelles de rayonnement global de SARAH ont été estimées pour la Finlande et la Suède dont la position sur la fenêtre de l'image satellite est comparable à celle de La Réunion (Riihelä et al., 2015). Sur l'Est de la Méditerranée, les moyennes mensuelles de SIS de SARAH sont qualifiées d'homogènes et en bon accord avec les mesures d'observation de 5 stations *in situ* (Alexandri et al., 2017). Par ailleurs, la fiabilité des données de « *cloud-top temperatures* » de CM-SAF a été qualifiée de satisfaisante quant à la reproductibilité du cycle diurne des précipitations en Afrique tropicale (Pfeifroth et al., 2016). De la même façon, pour les données de CDR, des estimations sont faites sur l'Europe (Sanchez-Lorenzo et al., 2013; Hakuba et al., 2014; Badescu and Dumitrescu, 2013) aussi bien qu'à l'échelle globale (Posselt et al., 2012; Brinckmann et al., 2013). En ce qui concerne la famille SARAH-E, les données satellites sont estimées comme fiables pour la période 1999-2009 sur la base d'une comparaison avec les 17 stations du service météorologique indien (Riihelä et al., 2018). Pour les années post-2009, il est nécessaire de faire une étude comparative (Riihelä et al., 2018). En effet, SARAH-E utilise une climatologie des aérosols faite sur les années

2003-2010. Riihelä et al. (2018) ont mis en évidence les différences entre les journées de ciel clair pré- et post-2009, soulignant alors les récentes variations du taux d'aérosols de l'Inde qui sont à l'origine d'un écart plus important entre SARAH-E et le réseau *in situ* indien. Sachant que La Réunion est soumise à une pollution anthropique bien au-dessous de celle de l'Inde, les écarts seront moins importants pour La Réunion. Dans la suite du manuscrit, ils feront tous de même l'objet d'étude d'une section (voir chapitre II section 1.4).

Réanalyses ERA-Interim de l'ECMWF

Le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT)³ est une organisation intergouvernementale qui, depuis 1975, se donne une mission de surveillance du climat. Faisant partie de l'OMM, elle s'axe autour de la production et de la diffusion de prévisions avec une portée aussi bien météorologique que climatologique. D'échelle globale, la résolution de leurs produits ne permet pas de les utiliser pour caractériser la ressource solaire sur l'île de La Réunion qui ne serait alors représentée que sur un pixel ou deux. De plus, des comparaisons entre données radiatives de mesures *in situ*, de satellites et de réanalyses ont abouti sur la conclusion que les réanalyses sont relativement moins corrélées aux données *in situ* que les données satellites (Bengulescu et al., 2017; Boilley and Wald, 2015).

3. Aussi bien connu sous son nom anglais de : The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) et donc l'accès se fait par : <http://apps.ecmwf.int/datasets/>

1.2. Limite des bases de données d'observation in situ

En premier lieu, nous avons travaillé avec les données du laboratoire, puis avec celles de Météo-France. Ci-suit est retranscrit les étapes de prise en main et de découverte des deux jeux de données dont l'idée directrice était la mise en place d'une première répartition spatiale de la ressource solaire.

Estimation des données du laboratoire

En comparant les années selon le nombre de stations installées, nous avons choisi de travailler avec l'année 2014 regroupant alors 11 sites. En figure II.3 est présenté un graphe horaire type avec le profil normalisé du rayonnement solaire et le ratio de valeurs manquantes associé.

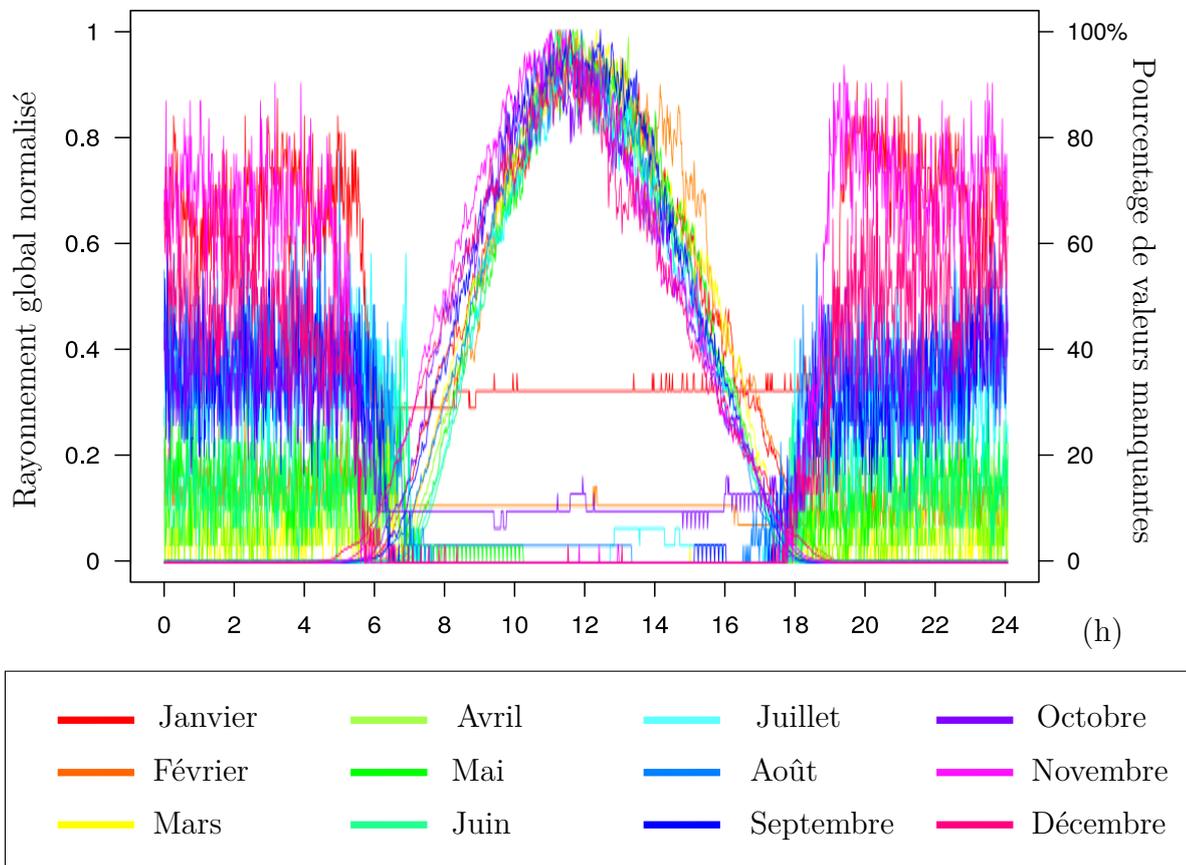


FIGURE II.3. – Profils moyens du rayonnement solaire et répartition horaire des valeurs manquantes du site n°1 du laboratoire pour chaque mois de l'année ; *Les profils mensuels sont normalisés selon leur valeur maximale ; Le ratio de valeurs manquantes est entre 0 et 100% des valeurs disponibles dans le mois.*

Nous avons généré ce graphe pour chaque station et avons décidé de filtrer les données pour ne conserver que celles allant de 6h à 18h. Ce filtre nous permet non seulement de travailler avec des mesures « de jours » mais aussi de nettoyer la base de données contenant beaucoup de valeurs manquantes de nuit dont l'ajout n'apporterait pas d'informations.

Dans un second temps, nous avons superposé les profils journaliers de tous les sites (cf. figure II.4). La fenêtre d'ensoleillement maximale de La Réunion est alors estimée entre 5h et 19h. De plus, il apparaît clairement que des valeurs aberrantes sont présentes puisque beaucoup trop élevées pour être des valeurs de nuit. Ces valeurs aberrantes font suite au cyclone Bejisa survenu en décembre 2013. La période associée est vérifiée pour tous les sites et deux sites sont répertoriés avec ce genre de valeurs. Ce constat s'explique du fait que le contrôle qualité de la base de données était à compléter, son avancement concordant avec le début de mes travaux de recherches. Les deux séries temporelles sont tracées en figure annexe A.1.

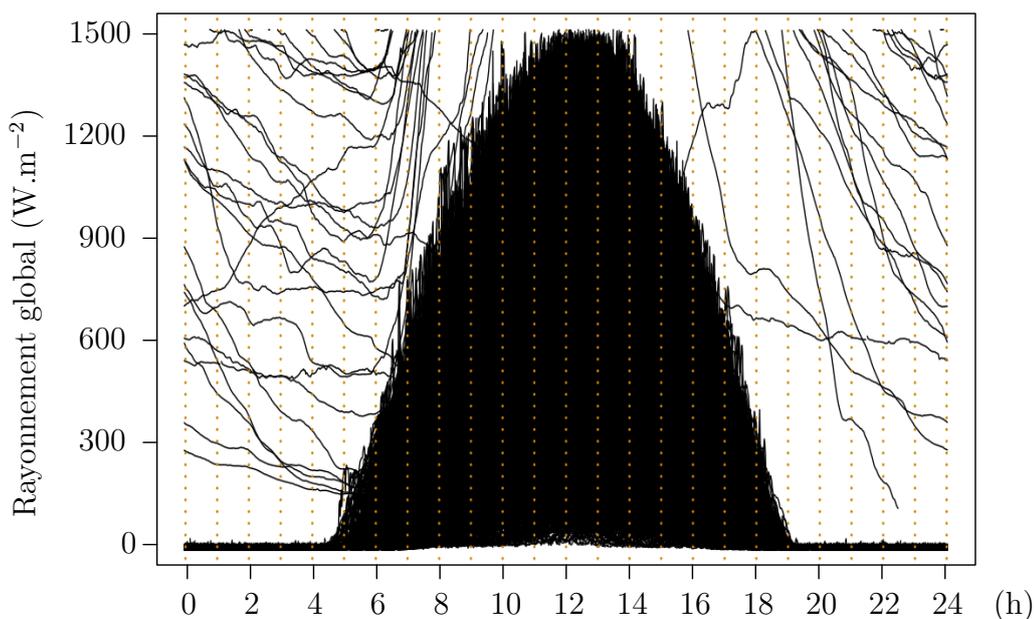


FIGURE II.4. – Représentation de l'ensemble des profils journaliers des données du laboratoire pour l'année 2014. *Visualisation complémentaire des séries temporelles des deux capteurs avec les valeurs aberrantes de nuit en figure annexe A.1.*

Classification des données RCIGS

Dans l'idée de les classifier, nous avons d'abord calculé le profil journalier moyen de chaque mois pour chacune des 11 stations. Puis, comme la figure II.5 l'explique, nous avons superposé à chacun des profils obtenus, et pour chaque heure, une boîte à moustache qui permet de visualiser la distribution de toutes les minutes associées à cette heure. Pour le site du Moufia (figure II.5.a), les saisons ont une influence plus visuelle sur le début de l'ensoleillement que sur la fin de la journée. En ce qui concerne la station de Cilaos (figure II.5.b), les premières heures de la matinée présentent un profil abrupt provenant des ombres portées du cirque.

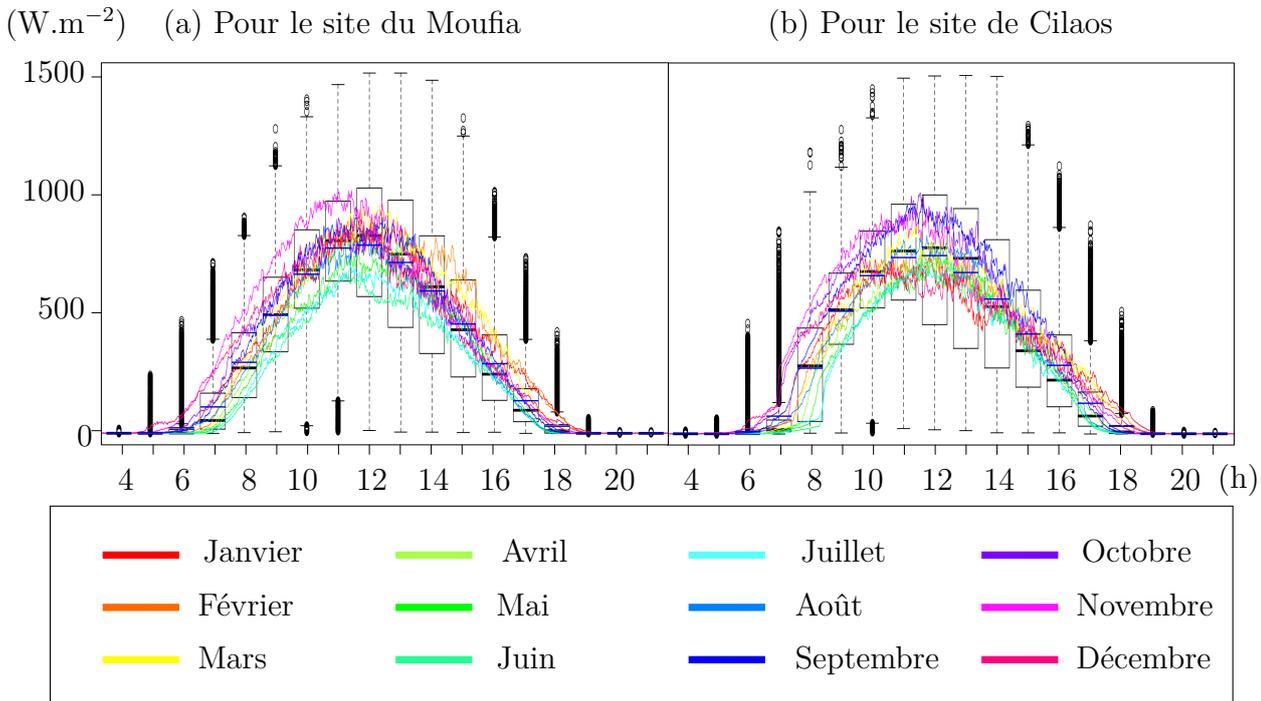


FIGURE II.5. – Profils journaliers moyens du rayonnement global des données du laboratoire pour 2014 avec une boîte à moustaches pour chaque heure de la journée.

Sur la base des profils moyens, nous avons classifié les 11 sites du laboratoire en utilisant une classification hiérarchique ascendante selon le critère de Ward (détail de la méthode abordé dans la sous-section suivante). Les groupes ont été fait de sorte à ce que chaque site soit décrit par les 12 profils journaliers de l'année, avec une valeur moyenne pour chaque minute (cf.figure II.5). Les cas à 2 et 3 classes sont présentés en figure II.6. Le cas à 2 classes présente une répartition est/ouest et le cas à 3 classes regroupe les deux stations 3 et 5 entre elles bien que l'une d'elle soit beaucoup plus proche de la station de référence. Ce groupe est formé des deux sites qui présentaient des valeurs aberrantes de

nuît, pourtant non considérées et donc laissant suggérer que les mesures sont altérées.

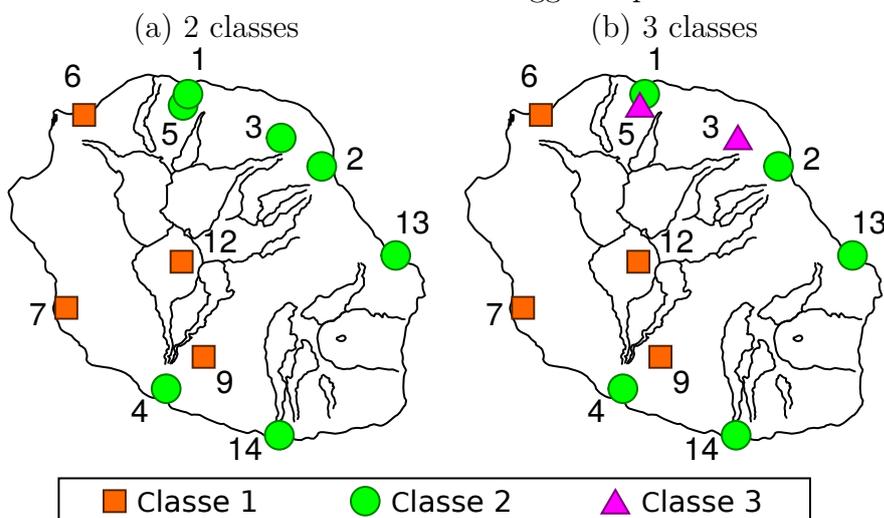


FIGURE II.6. – Classification spatiale des 11 sites du laboratoire pour l’année 2014. *Classification hiérarchique ascendante selon un critère de Ward sur les 12 profils moyens mensuels de chaque site (données minutes), (a) en choisissant un classification à 2 classes et (b) à 3 classes.*

Cette première classification de 11 sites présente une séparation est/ouest . Pour compléter ce début de caractérisation spatiale, nous avons voulu associer les données du laboratoire et celles des stations Météo-France. Une étude préalable de comparaison entre les données des deux provenances a été réalisée.

Comparaison entre données du laboratoire et de Météo-France

Dans un premier temps, nous calculons les distances entre les stations de sorte à comparer chaque site du laboratoire avec ses plus proches voisins Météo-France. Nous utilisons ensuite la fonction *gof* du package *hydroGOF* (Mauricio Zambrano-Bigiarini, 2017). Cette fonction permet de calculer une vingtaine d’indicateurs différents qui sont détaillés dans la documentation technique accessible en ligne. Nous calculons ces indicateurs sur chacun des mois de l’année de comparaison. Cette partie des travaux de recherche a permis le développement d’une application html accessible sur le réseau du laboratoire au <http://10.82.64.153:3838/siteComp/> permettant d’accéder à chacune des 11 comparaisons aussi bien à travers des graphes des mesures que de leurs indicateurs associés, avec un support de téléchargement des résultats. Quelques captures d’écran présentent l’application développée en annexe G.

L’analyse des valeurs des différents indicateurs n’apportant rien à la conclusion faite, nous notons plus généralement plusieurs choses. Tout d’abord, les deux réseaux de mesures sont inégalement répartis sur le territoire. La région des cirques et celle du volcan

présentent peu de stations de mesures alors que ce sont des zones complexes de leur topographie et donc aussi des paramètres qui en dépendent et qui modulent les processus de formation des nuages. De plus, au-delà du spatial, nous remarquons, pour un site Météo-France, un écart temporel entre les deux bases de données. Pour la station de Saint-Leu, son plus proche voisin Météo-France présente une avance d'une heure sur les trois stations (la station du laboratoire de Saint-Leu et les deux autres stations Météo-France les plus proches). De plus, une ombre portée impacte les premières heures de la journée de ce site (Bessafi et al., 2018). Les données d'observations soulèvent donc plusieurs questions sur la qualité des données aussi bien pour une étude spatiale que temporelle.

Malgré les précédentes considérations spatiale et temporelle, nous avons classifié les données des deux provenances ensemble. De la même façon que pour les données du laboratoire, nous avons réalisé une classification sur les profils moyens regroupant alors toutes les données d'observations. Le résultat étant que les stations étaient séparées en première branche selon leur provenance, nous avons donc reconsidéré l'utilisation des données d'observation *in situ* pour s'orienter vers ce que propose l'imagerie satellite.

1.3. Choix d'une base de données satellites

Face aux limitations des données d'observations *in situ*, autant sur la répartition spatiale qu'en des termes de qualité de mesures, les données satellites de CM-SAF ont été exclusivement utilisées. Une première utilisation du jeu de données CDR a abouti sur des questionnements quant à l'utilisation des autres produits existants et, donc, sur une comparaison des produits entre eux qui a abouti sur la découverte de certaines limitations. Enfin, le produit satellitaire SIS de la famille SARAH-E a été choisi comme support de l'étude. Il a ensuite été comparé aux données d'observation de Météo-France pour jauger la qualité de ces données satellites par rapport à des mesures *in situ*.

Première classification des données satellites

Au sein du laboratoire, les données CDR sont utilisées pour des études aussi bien sur La Réunion (Li, 2015) que sur le domaine plus grand de l'océan Indien mais aussi sur la voisine et sœur de l'île de La Réunion, l'île Maurice (Bessafi et al., 2015b). C'est donc naturellement qu'en premier lieu nous avons travaillé avec ces données offrant la meilleure résolution spatiale pour caractériser la ressource solaire sur l'île de La Réunion.

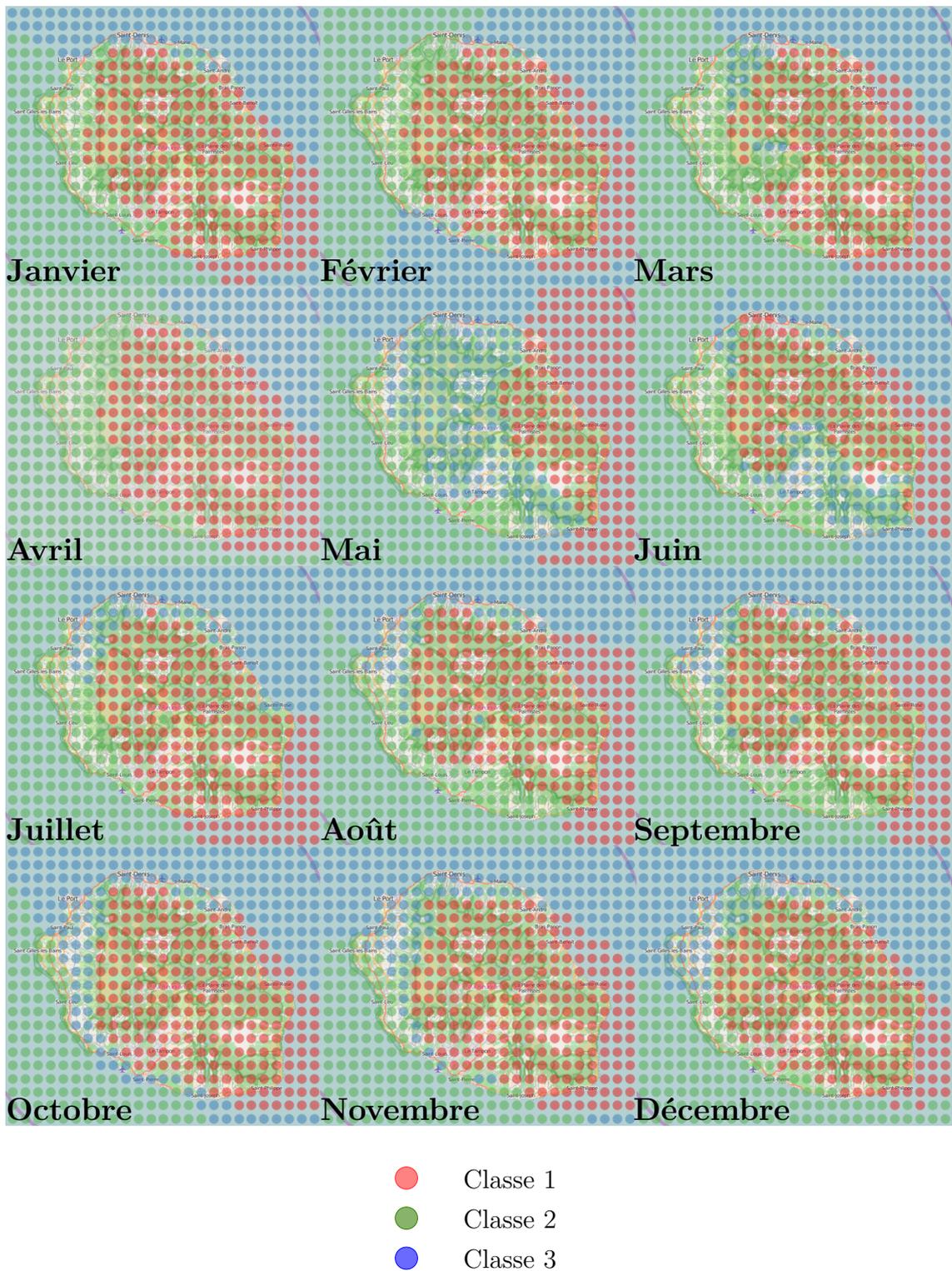


FIGURE II.7. – Classification pour chaque mois de 2005 sur les moyennes journalières des données satellites (de gauche à droite, de haut en bas : janvier à décembre 2005)

La première caractérisation de la ressource solaire s'est amorcée dans une approche mensuelle. Il était alors question de faire une classification pour chaque mois selon des moyennes journalières dans le but d'estimer l'évolution saisonnière des structures locales. Pour chacun des mois, nous avons calculé des moyennes journalières (avec pour seuil maximal de 10% de valeurs manquantes) dont nous avons extrait les signatures importantes par une analyse en composantes principales sur les jours en sélectionnant les jours expliquant plus de 90% de la variance du mois. Puis, nous avons regroupé les composantes sélectionnées par une classification en k-moyennes pour obtenir une répartition spatiale de la ressource. Cependant, cette étape aboutit à un questionnement sur l'interprétation des résultats qui sont présentés en figure II.7. Dans l'idée d'estimer la fiabilité des résultats, nous nous sommes intéressés aux autres familles de produits satellites proposant des données radiatives du même type, soit les familles SARAH et SARAH-E.

Un autre support html a été développé mais n'a pas été mis sur le site intranet regroupant les applications du laboratoire car il fallait intégrer les données satellitaires qui sont non seulement plus lourdes que les données de Météo-France mais aussi moins utiles puisque nous n'avons pas été plus loin sur l'utilisation de CDR.

Comparaison des produits CMSAF

Cette étape de comparaison des différentes familles du produit satellite SIS de CMSAF a finalement piloté le choix de la base de données. Au début, il était question d'utiliser le produit CDR qui propose presque trois fois plus de pixels sur La Réunion que les deux autres familles de produits ($242 > 89$ pixels). Cependant, la période de disponibilité couvrant 1983 - 2005 ne permettait pas de statuer sur la fiabilité des données en les comparant à des données d'observations et la précédente étape de classification a soulevé des questionnements sur la qualité de ce jeu de données.

Dans un premier temps, nous avons considéré les valeurs manquantes non pas comme un indicateur de qualité mais dans l'idée de faire d'un état des lieux des données pour ensuite les filtrer convenablement. Puis, nous avons calculé la grille moyenne de chacune des familles de produit. Nous avons alors choisi la base de données de notre étude.

Les valeurs manquantes sont référencées NA (*Not Available*) dans les bases de données et sont associées à la non disponibilité de la mesure. Les raisons peuvent être multiples allant d'une panne matériel ponctuelle au remplacement automatique de valeurs aberrantes ou nulles selon certaines conditions. Pour chaque famille de produit, le pourcentage de valeurs NA est présenté dans le tableau II.2 en considérant différents filtres horaires.

Sur leur disponibilité respective, les familles SARAH et SARAH-E contiennent environ 10% de valeurs manquantes, alors que CDR en contient plus de 50%. Pour ce

TABLE II.2. – Pourcentages de valeurs manquantes et de grilles pleines pour chaque famille de produit SIS

Famille	% de NA total			% de grille à 0% de NA		
	[0-23h]	[6-18h]	[8-17h]	[0-23h]	[6-18h]	[8-17h]
CDR	54,41	15,85	3,14	45,49	83,99	96,86
SARAH	9,84	5,90	6,20	90,16	94,10	93,80
SARAH-E	10,62	9,49	6,39	88,77	89,69	93,61

dernier, les heures de nuit contiennent beaucoup des valeurs NA de la base de données, avec passage de 54,40 % à 15,81 % pour le premier filtre horaire. Cet écart s’explique par la gestion des mesures de nuit : pour **CDR**, elles sont assignées à des valeurs NA alors que pour les deux autres familles, ce sont des valeurs nulles que l’on retrouve. Après filtrage des heures entre 6-18 h, il reste toujours 15,81 % de valeurs NA à la famille **CDR** contre 6-9 % pour les deux autres familles et en filtrant entre 8-17 h, le constat est inverse et c’est alors **CDR** qui présente moins de valeurs manquantes que les deux autres familles.

De plus, pour la famille **SARAH**, il est notable que le filtre 8-17 h contient relativement plus de valeurs NA que celui 6-18 h. De cette différence se pose la question de la temporalité des valeurs NA qui est traduite en figure II.8. Cependant, sachant la différente gestion des valeurs de nuit, nous comptabilisons aussi comme grilles manquantes celles qui contiennent à 100 % des valeurs nulles. Nous traçons donc en figure II.8 la distribution, selon l’heure et l’année considérées, du pourcentage de grilles manquantes qui est alors le pourcentage moyen de NA par grilles ou, pour les cas 100 %, à l’image d’une grille de nuit.

L’augmentation du pourcentage de NA de **SARAH** malgré un filtre horaire plus restrictif s’explique alors puisque l’on trouve un pourcentage de valeurs manquantes plus élevé dans la journée plutôt que vers les heures de coucher et de lever du soleil. De plus, on distingue en parallèle une amélioration selon les années avec plus de valeurs manquantes avant 1991 qu’après. Dans le « *Validation Report* » (Müller et al., 2015a, Table 5-1 p.24), on trouve le détail de 11 différentes périodes correspondant à 10 changements de satellite utilisé comme fournisseur d’images de **SARAH**. La période d’amélioration concorde avec le changement de satellite du 19 avril 1990 où l’on passe de l’utilisation des images de Météosat 3 à celles de Météosat 4. Ce changement marque la fin de l’utilisation des images de Météosat 3 qui est d’une durée de quelques mois⁴.

Les données **SARAH-E** présentent donc une répartition des valeurs manquantes plus constante au cours des années que les deux autres produits satellites. Par ailleurs, les pourcentages associés sont les plus faibles, notamment pour les heures entre 8 et 17h

4. Météosat 3 est utilisé pour deux périodes : (1) 11 août 1988 au 19 juin 1989 puis (2) 24 janvier 1990 au 19 avril 1990

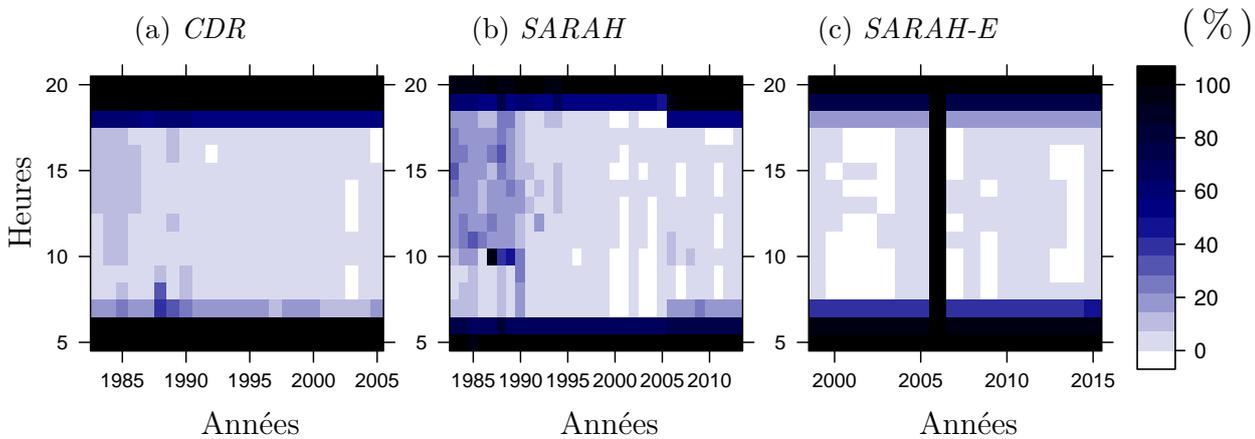


FIGURE II.8. – Distribution des valeurs manquantes de chaque famille de produits SIS ; les valeurs de nuit de 20h à 5h sont les mêmes que celle à $h+1$ et $h-1$; Pour rappel, 2006 n'est pas disponible pour SARAH-E d'où la bande noire à cette année.

qui ne dépassent pas les 8% de valeurs manquantes au cas pas cas (figure II.8) et de 6,39% en moyenne (table II.2, qui comptabilise l'année 2016). Ainsi, l'utilisation exclusive des heures entre 8 et 17h supprime les valeurs de nuit et assure de travailler avec le pourcentage le plus bas de valeurs manquantes. Des figures sur la répartition des valeurs manquantes dans le temps pour SARAH-E sont en annexe B (figures B.1, B.2 et B.3).

Outre la répartition des valeurs manquantes, il est intéressant de statuer sur la fiabilité des données existantes et, pour se faire, nous calculons la grille moyenne de chaque famille de produit.

La grille moyenne de chaque famille de produit SIS est calculée sur leur période de disponibilité respective. Les trois grilles moyennes obtenues sont présentées en figure II.9. Dans chaque sous-titre est précisé la moyenne de la grille associée dont l'écart maximal de 75 W.m^{-2} se trouve entre SARAH et SARAH-E.

On observe de nombreuses différences dont un net décalage des minima de CDR au-delà des contours de l'île. En comparaison, les deux autres familles de produits SARAH et SARAH-E ont leurs minima sur La Réunion. De plus, les contours superposés à la grille moyenne de CDR montre une sorte d'oscillation qui est référencé en tant que « *striping features* » (Müller et al., 2015b). Ces motifs aberrants ont été communiqués au service utilisateur de CM-SAF selon des détails qui se trouvent en annexe C. De fait, l'utilisation de CDR est totalement écartée.

En ce qui concerne la structure de grille moyenne de SARAH, la répartition locale des minima solaires diffère de celle de SARAH-E. Outre la position relative de La Réunion sur l'image satellite qui change, la différence entre ces deux familles est que SARAH-E

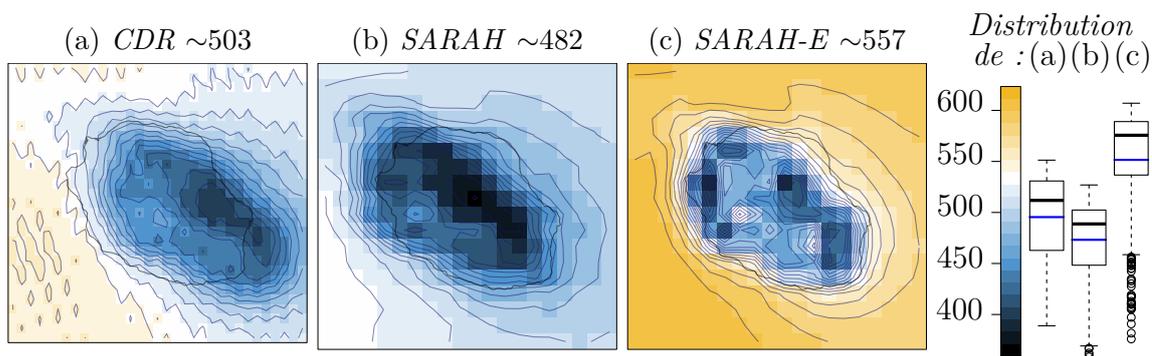


FIGURE II.9. – Grilles moyennes des trois familles ; toutes les valeurs sont en $W.m^{-2}$; dans chaque sous-titre est précisé la moyenne de la grille de la famille associée ; tout à droite, les boîtes à moustaches renseignent sur la distribution des valeurs des pixels des grilles moyennes de chaque famille et sont en concordance avec les valeurs de l'échelle de couleur.

contient des données instantanées alors que ce sont des moyennes pour SARAH (Trentmann et al., 2014; Trentmann and Huld, 2017). Connaissant les phénomènes de débordement nuageux dans l'ouest de l'île (Jumaux et al., 2011; Soler, 1997), notre choix se porte finalement sur l'utilisation de la famille SARAH-E qui reproduit mieux ce comportement.

Finalement, nous n'utilisons ni les données satellites à 242 pixels sur l'île de CDR, ni celles regroupant 31 années d'étude de SARAH. Bien que seulement sur 16 années et avec 89 pixels sur l'île, les données de SARAH-E sont plus cohérentes avec la météorologie locale (Jumaux et al., 2011; Soler, 1997). Les constats faits soulignent l'importance de la position relative d'un terrain aussi complexe que La Réunion sur les images satellites. Il faut cependant garder à l'esprit les limites SARAH-E, notamment sa reconstruction selon une climatologie des aérosols basée sur la période 2003-2010.

1.4. Estimation de la qualité des données satellites choisies

La nécessité d'une étude approfondie du produit SARAH-E pour les années post-2009 a été soulignée par Riihelä et al. (2018). Par conséquent, cette sous-section se veut d'estimer le niveau de confiance en les données SARAH-E en les comparant avec les données *in situ* de Météo-France. Cela n'enlève en rien les limitations des données d'observation *in situ* précédemment détaillées. Les résultats de la comparaison sont donc à pondérer selon les spécificités de chacun des deux jeux de données. En effet, les images satellitaires servent à reconstruire des grandeurs à la surface terrestre selon des flux ayant traversés l'atmosphère. Les mesures *in situ* sont quant à elles tributaires de la qualité de

la mesure, selon le site mais aussi le capteur. Cependant, les mesures *in situ* sont plus proches de la grandeur mesurée et donc restent tout de même la base de la qualification des données satellites (Wild et al., 2013, 2017).

Ci-suit, nous comparons les données satellites avec les mesures d'observations *in situ* de Météo-France sur les échelles de temps du mois, du jour et de l'heure. Chaque station *in situ* est donc comparée à ses 4 voisins satellites les plus proches (nommés N1 à N4), selon une distance euclidienne en 3 dimensions. Une régression linéaire est faite pour : (1) les moyennes mensuelles, (2) les moyennes journalières, (3) la variabilité journalière après retrait de la moyenne mensuelle à la moyenne journalière, (4) les valeurs horaires et (5) la variabilité horaire après retrait de la moyenne journalière aux valeurs horaires. La période de disponibilité couvrant les cinq années 2011 à 2015, elle nous permet de mettre en comparaison 60 mois, 1 826 jours ou bien 18 260 heures en considérant le filtre horaire entre 8 et 17h.

Dans un premier temps, le cas de Gillot a servi de support à l'élaboration de la comparaison puisque c'est la station de référence de Météo-France. En figure II.10 est présenté un visuel de toutes les comparaisons (1 à 5) faites avec chacun des voisins de la station de Gillot puis un tableau synthétique est en table II.3. Ce dernier détaille la pente a , le

TABLE II.3. – Tableau de comparaison entre données d'observations et satellites pour le cas de Gillot : N pour « near » et N1 à N4 pour les voisins du plus proche au plus éloigné ; en gras, les meilleures valeurs de chaque ligne ; à droite, le détail des échelles de temps

	N1	N2	N3	N4	
a	1,15	1,03	1,26	1,21	} M_{mois} (1)
r	0,98	0,98	0,98	0,99	
$rmse$	32,03	23,46	60,37	55,60	
a	0,96	0,96	0,95	0,96	} M_{jour} (2)
r	0,92	0,94	0,89	0,93	
$rmse$	62,71	51,94	87,28	73,68	
a	0,89	0,94	0,82	0,87	} $\Delta_{\text{jour}} = M_{\text{jour}} - M_{\text{mois}}$ (3)
r	0,90	0,93	0,86	0,91	
$rmse$	54,64	47,01	63,95	49,38	
a	0,89	0,90	0,89	0,92	} $inst_{\text{heure}}$ (4)
r	0,91	0,92	0,89	0,93	
$rmse$	123,38	111,05	142,98	119,68	
a	0,86	0,87	0,87	0,90	} $\Delta_{\text{heure}} = inst_{\text{heure}} - M_{\text{jour}}$ (5)
r	0,90	0,91	0,89	0,92	
$rmse$	106,40	98,22	113,44	94,43	

coefficient de corrélation r et l'erreur moyenne quadratique $rmse$ (en $W.m^{-2}$) de chaque régression linéaire⁵ faite entre les sites d'observations Météo-France et les 4 plus proches voisins sur la grille de SARAH-E. Chacun des écarts possibles sont repris ici, permettant de faire état de chaque échelle temporelle. Les valeurs obtenues pour la comparaison entre Météo-France Gillot et ses 4 voisins satellites les plus proches nous confortent dans l'utilisation des données satellitaires. Nous constatons tout de même que les données satellites surestiment le cycle saisonnier alors que les deux échelles temporelles du jour et de l'heure sont au contraire sous-estimées. De plus, les meilleures valeurs sont pas obtenues pour le voisin le plus proche spatialement mais pour les voisins N2 et N4 qui sont localisés à plus l'ouest. Ce dernier constat souligne la complexité de la ressource solaire et fait écho avec la première répartition est-ouest que l'on a observé lors de la classification des données du laboratoire.

Les mêmes considérations ont été portées pour chacune des 32 stations Météo-France. L'exposition de chacun des cas présentant peu d'intérêt ici, nous choisissons une vision synthétique de boîtes à moustaches. Pour ce faire, nous regroupons tous les voisins satellitaires ensemble sur chaque échelle temporelle. Tous les pixels voisins de la grilles de SARAH-E considérés pour la comparaison sont répartis spatialement comme le présente la carte (a) de la figure II.10. En figure II.11 se trouve le détail de chacun des trois types d'écart considérés précédemment pour jauger les différentes échelles temporelles une à une. Ces résultats nous confortent dans l'utilisation de données satellitaires surtout en considérant que (1) les données Météo-France sont des moyennes horaires alors que les données SARAH-E sont instantanées et que (2) les mesures *in situ* concernent un point alors que les pixels satellites sont rattachés à une surface.

Dans la littérature, Bessafi et al. (2018) présente en préambule une comparaison des moyennes mensuelles sur la base d'une climatologie entre SARAH-E et les 32 stations Météo-France sur la période de 2010 à 2015. Ainsi, l'écart entre les valeurs satellitaires et *in situ* est estimé sur les douze mois de l'année pour chaque station d'observation.

5. D'autres indicateurs ont été calculés, ils sont dans la section 1 de l'annexe D dans laquelle se trouve aussi le même détail pour les échelles de temps non présentés ici, soit les moyennes journalières et valeurs horaires.

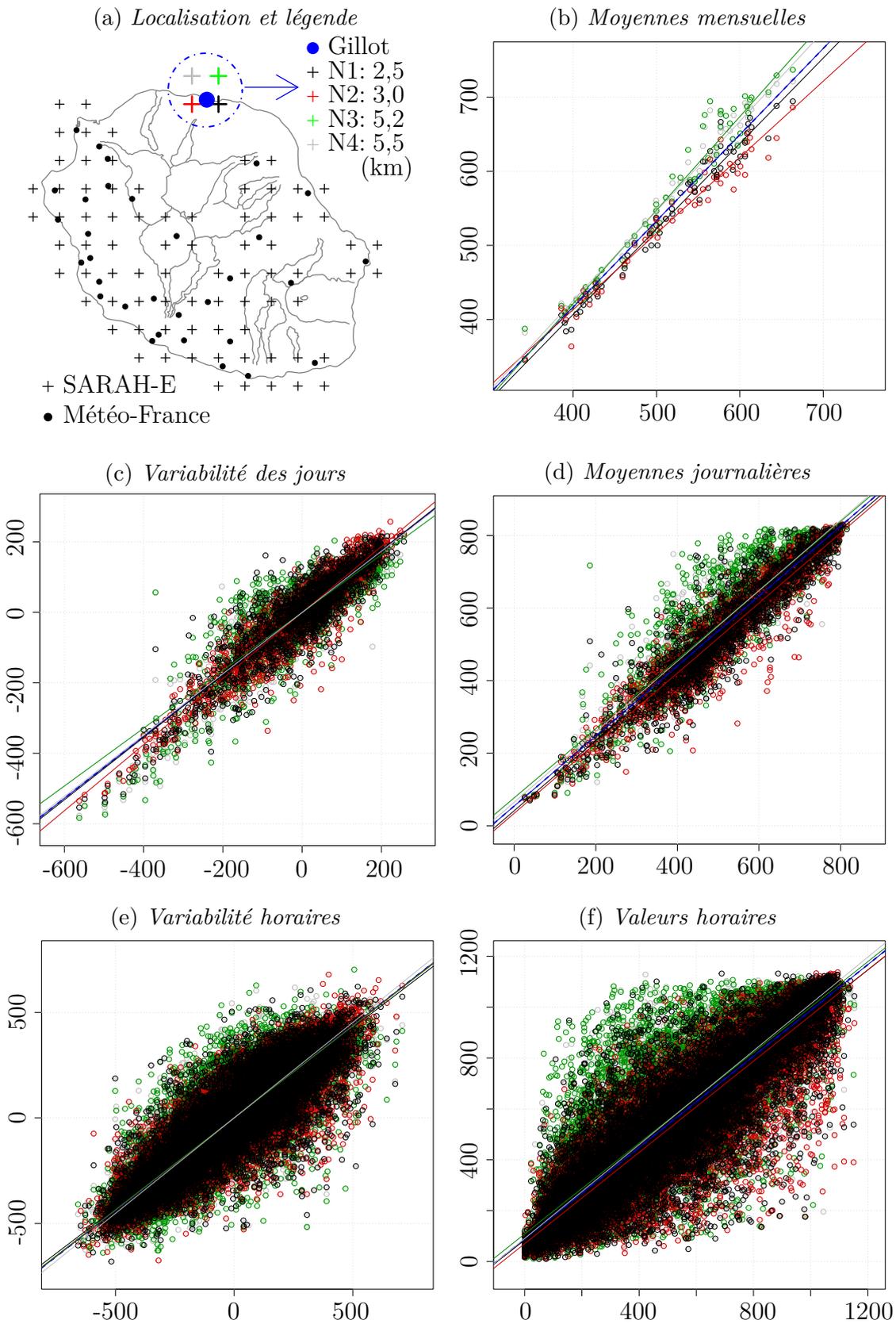


FIGURE II.10. – Comparaison entre les données satellites (*en ordonnée*) et de Météo-France (*en abscisse*) : exemple de la station de l'aéroport de Gillot ; toutes les valeurs sont en W.m^{-2}

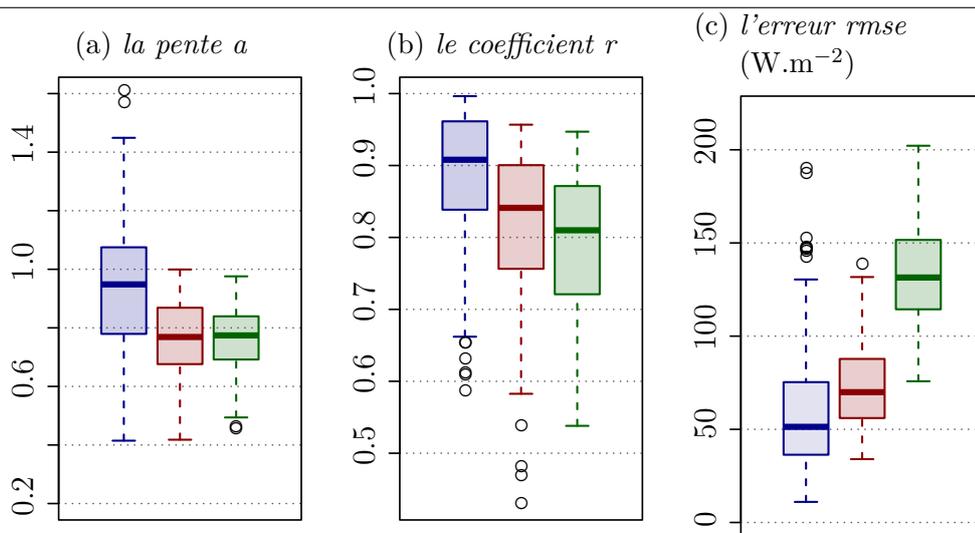


FIGURE II.11. – Estimation du lien entre les données Météo-France et SARAH-E : pour les moyennes mensuelles (bleu, à gauche), les variabilités journalière (rouge, au milieu) et horaire (vert, à droite).

Les données satellites surestiment d'en moyenne 10% les moyennes mensuelles par rapport aux données Météo-France. Cependant, la répartition spatiale des écarts est plus complexe sur des zones bien particulières. D'une part, on observe sur toute l'année une surestimation du rayonnement solaire sur les hauts de Saint-Paul à la station de Petite France (30% à 66%), localisation réputée par l'occurrence de débordements nuageux. D'autre part, le rayonnement est toujours sous-estimé du côté de la station du Pas de Bellecombe (-8% à -35%).

Par la suite, nous quantifions les écarts entre les données satellite et d'observation *in situ*. Dans un premier temps, nous reconstruisons, pour chaque site de Météo-France, son équivalent satellite comme étant la moyenne pondérée des 4 pixels les plus proches de la station *in situ*. Soit, pour une station Météo-France, son point fictif satellite sera :

$$FG_f = \frac{\sum_{i=1}^{n=4} (d_i^{-1} \times FG_i)}{\sum_{i=1}^{n=4} d_i^{-1}} \quad (\text{II.1})$$

avec

- FG_f : le rayonnement solaire global du point satellite fictif, aux mêmes coordonnées que le site Météo-France s ,
- FG_i : le rayonnement solaire global du voisin satellite i ,
- d_i : la distance entre le voisin satellite i et la station Météo-France s .

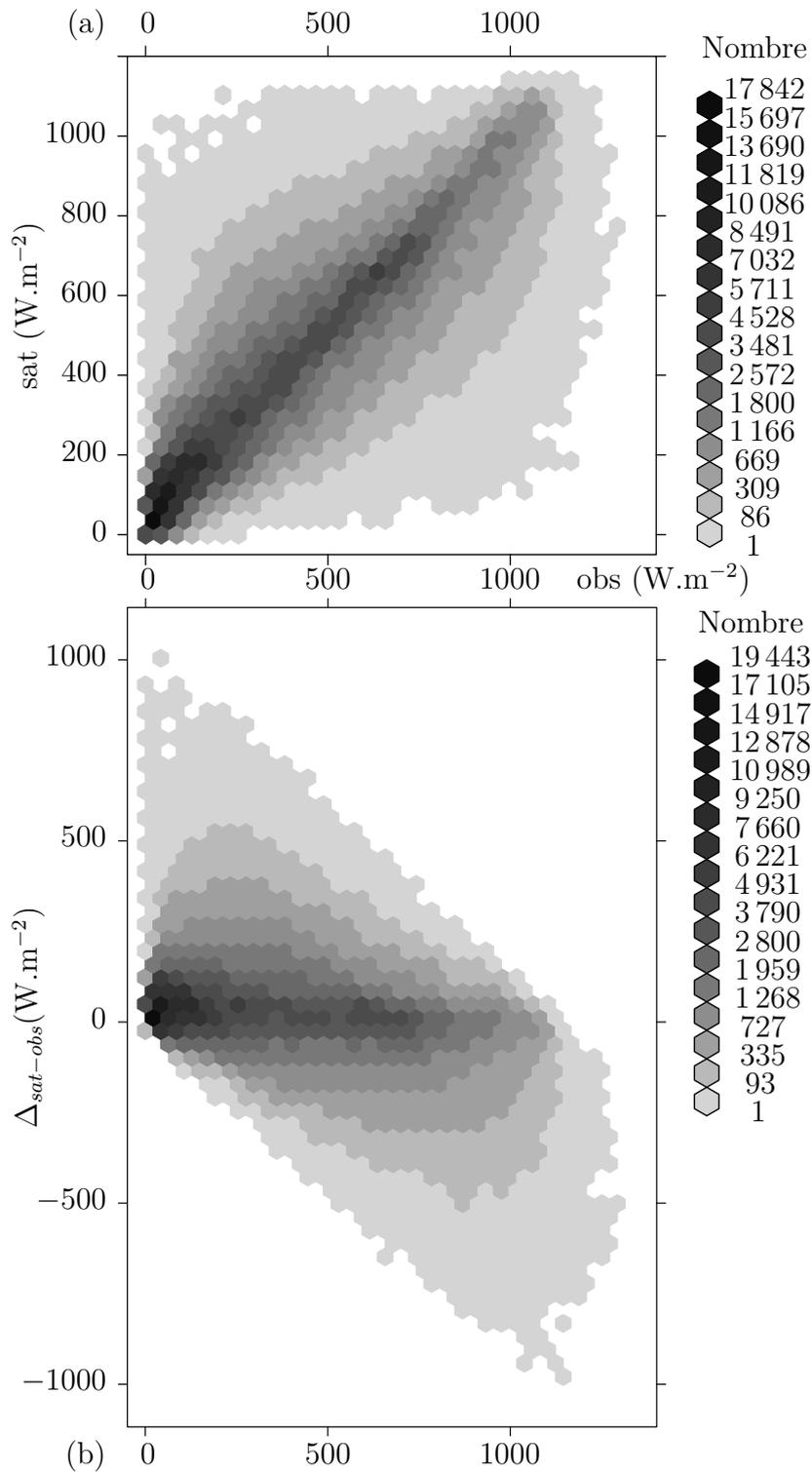


FIGURE II.12. – Représentation des données satellites selon les données d'observation Météo-France : (a) pour les valeurs du rayonnement solaire du point fictif satellite FG_f et (b) pour les écarts entre le rayonnement solaire du point fictif satellite et celui de Météo-France $\Delta_{\text{sat-obs}}$.

Ensuite, nous définissons un écart relatif et son pourcentage associé comme suit :

$$\Delta_{sat-obs} = FG_f - FG_s \quad (\text{II.2})$$

$$\Delta_{sat/obs-1} = \frac{\Delta_{sat-obs}}{FG_s} \quad (\text{II.3})$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} FG_f : \text{le rayonnement solaire global du point satellite fictif (équation II.1)} \\ FG_s : \text{le rayonnement solaire global du site Météo-France } s. \end{array} \right.$

La figure II.12 permet de jauger les écarts entre les données de tous les sites Météo-France et leur équivalent satellite. L'amplitude des écarts est grande mais le plus grand nombre des éléments se retrouvent majoritairement sur la diagonale $obs = sat$ pour le graphe (a) et sur la droite $\Delta_{sat-obs} = 0$ pour le graphe (b). Cependant, toutes les heures de la journée sont regroupées sur ces deux graphiques sans aucune distinction.

La figure II.13 complète la figure précédente et représente les écarts définis en équation II.2 et II.3 pour en visualiser la répartition selon l'heure et le mois concernés. Sur le graphe (a), les écarts prennent des valeurs entre -65 et $+85 \text{ W.m}^{-2}$. Sur le graphe (b), les pourcentages associés sont les plus élevés en début de journée, indépendamment du mois. Ainsi, les heures de la journée présentent certes des écarts plus élevés mais qui,

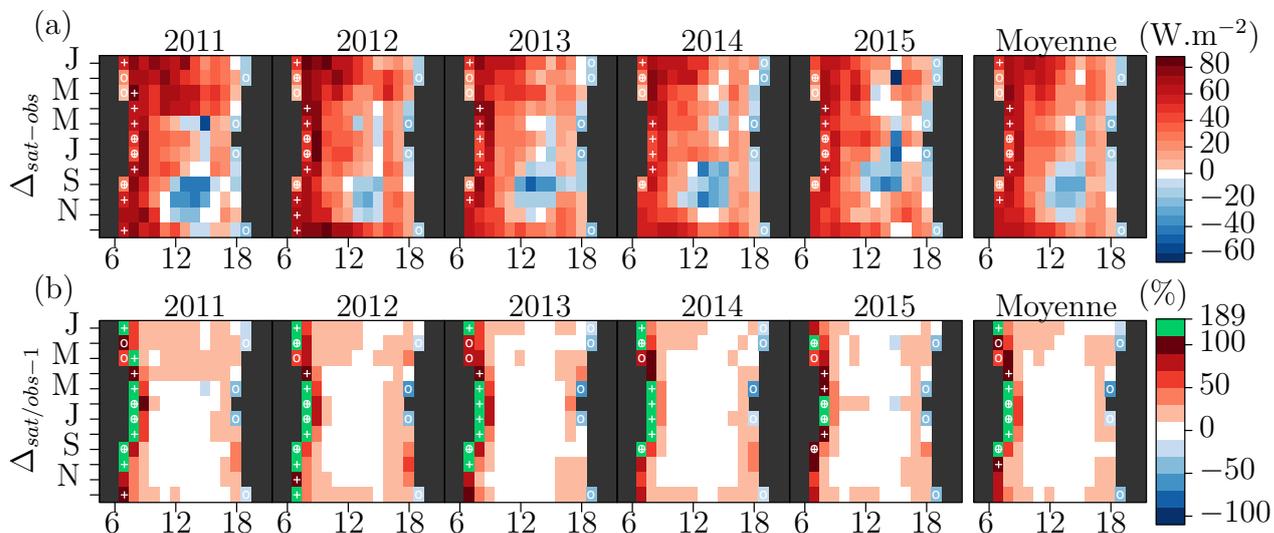


FIGURE II.13. – Variabilité diurne et saisonnière des écarts entre les données satellites et *in situ*. Les valeurs grises sont les observations de nuit qui sont associées à 0 dans la base de données Météo-France

relativement à l'observation, restent des pourcentages majoritairement compris entre $\pm 10\%$. De plus, sachant le classement des stations de Météo-France selon l'OMM (sites

et capteurs), les écarts associés peuvent aussi provenir des données *in situ*, allant de la sensibilité du capteur à la qualité du site d'installation, notamment s'il y a une influence des ombrages topographiques. Ces deux derniers critères sont donc évalués par les deux classements de l'OMM.

Pour le cas de la station de Gillot⁶, les écarts sont en moyenne de 10%, avec une médiane à 6% et un écart-type de 18% (moyenne et écart-type en annexe à la figure D.1, médiane en figure II.14). Par ailleurs, la figure II.14 nous donne un aperçu de la distribution des écarts selon les heures de la journée pour la station de Gillot, en complément de la vision moyenne de la figure II.13 concernant toutes les stations de l'île (dont un détail par station est en annexe D.1). Ces deux figures nous confortent dans l'utilisation de SARAH-E avec une quantification des erreurs aussi bien en moyenne qu'en distribution. Finalement, le choix de travailler avec les heures entre 8 et 17 heures nous permet d'écarter les heures avec les pourcentages d'écarts les plus élevés qui sont aussi avec les heures ayant le plus de valeur pendant toute l'année (plus de 1 800 jours pour chaque heure, en figure II.14).

6. Pour rappel, la station de Gillot est la station de référence de Météo-France mais aussi l'une des trois stations les mieux classées par l'OMM (voir A.2)

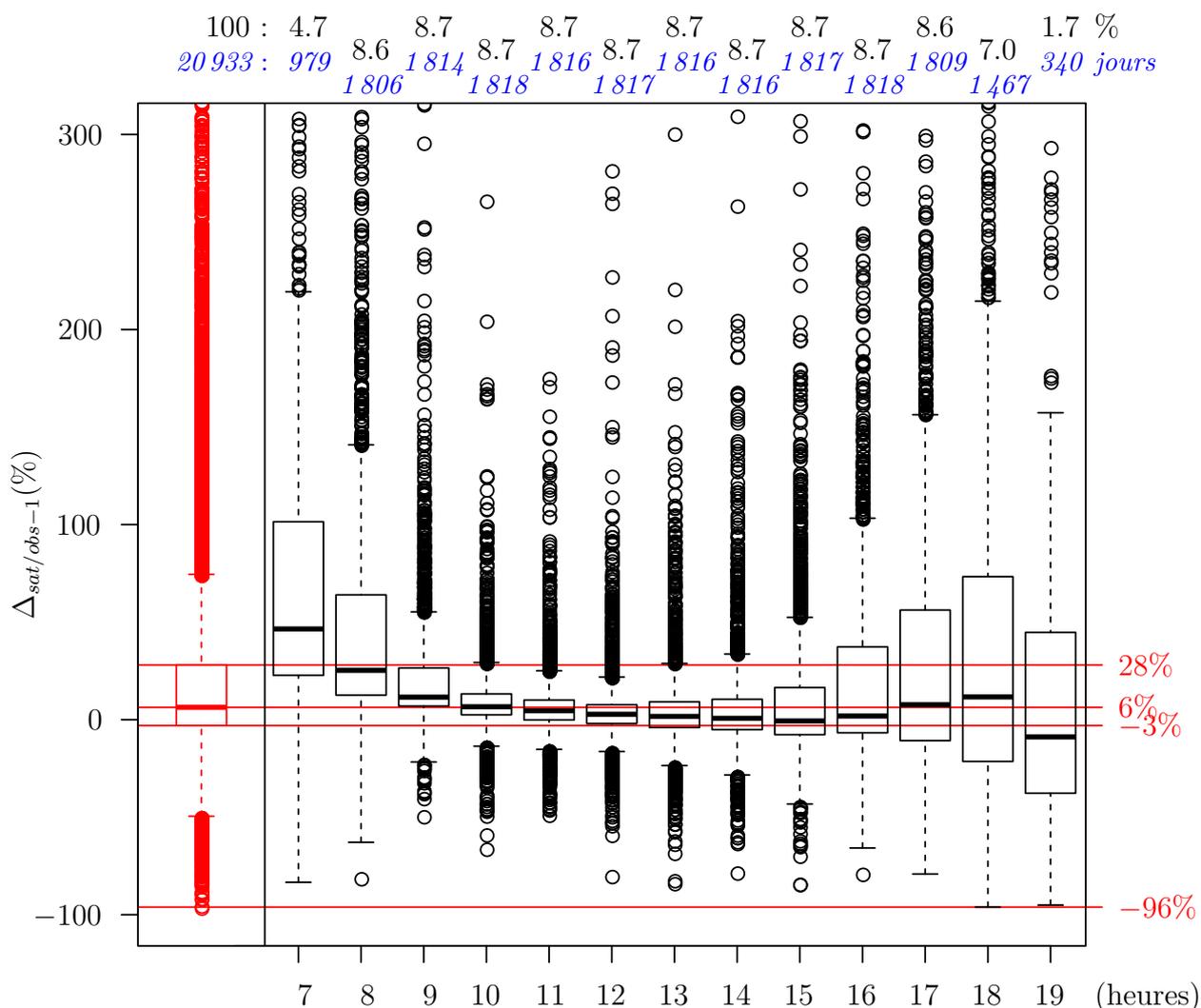


FIGURE II.14. – Distribution diurne des pourcentages d'écart satellite-observation ($\Delta_{sat/obs-1}$, défini en II.3) pour la station de Gillot. Chaque boîte à moustache représente la distribution de toutes les valeurs disponibles dont le nombre est donné, au-dessus du graphe, par les valeurs en italique bleu (sur les 5 années d'étude, le nombre de jours est de 1826, soit de 21 912 heures entre 7 et 19 heures). Les pourcentages au-dessus de chaque nombre en bleu sont le pourcentage que représente le nombre de jours de la boîte à moustache par rapport au total de 20 933 jours. Les outliers supérieurs à 300 W.m^{-2} (qui ne sont donc pas représentés ici) sont 0,95% pour la boîte à moustache regroupant toutes les heures et ne dépasse pas les 5,82% pour les boîtes à moustaches détaillant chaque heure (valeur maximum de 5,82% est obtenue à 7h).

Récapitulatif

Cette partie se conclut sur le choix de l'utilisation de la famille [SARAH-E](#) dont le degré de confiance a été jaugé selon une comparaison avec les données *in situ* de Météo-France. Les heures de l'étude seront celles entre 8 h et 17 h, ce qui nous assure d'utiliser les données avec le moins de valeurs manquantes et mesures de nuit mais aussi avec les écarts à l'observation *in situ* les moins élevés dans la journée. Cependant, il faut garder à l'esprit le caractère potentiellement partiel de l'analyse de variabilité sur la base de [SARAH-E](#). En effet, un satellite est par définition un témoin externe auquel on demande un renseignement sur ce qu'il se passe au sein de l'atmosphère. Mais aussi parce le produit [SARAH-E](#) choisi présente des limitations, par exemple, l'utilisation d'une climatologie des aérosols (2003-2010) ([Riihelä et al., 2018](#)). Cependant, les données [SARAH-E](#) n'en restent pas moins le meilleur choix pour notre étude, en offrant une vision plus large échelle, équilibrée en temps et surtout en espace. La section suivante présente la méthodologie qui a été construite en considérant le choix de la base de données satellitaires [SARAH-E](#).

2. Méthodologie de caractérisation de la ressource solaire

La forte variabilité temporelle de la ressource solaire lui confère sa qualification d'intermittente. Cependant, ces fortes variations lui proviennent du comportement stochastique de la couverture nuageuse. Une autre partie est déterministe et s'explique au travers des cycles diurne et saisonnier. Ainsi, dans un premier temps, nous estimons la distribution spatiale du potentiel moyen solaire sur l'île de La Réunion, puis, en seconde partie, l'idée directrice sera de comprendre les écarts à ce potentiel. La méthodologie ci-suit peut s'appliquer à n'importe quelle variable temporelle se décomposant en une part déterministe à caractère(s) cyclique(s) et une part stochastique représentant les écarts à ces cycles.

Le data mining et les méthodes de la statistique décisionnelle proposent un vaste choix d'étude des bases de données. Un ouvrage accessible et de référence est écrit par [Tufféry \(2012\)](#). Y est détaillé, d'une part, les différents algorithmes et techniques associées et, d'autre part, les méthodologies et principes de mise en œuvre du data mining. Parmi les méthodes descriptives de statistique décisionnelle présentées, les analyses typologiques retiennent notre attention. Les méthodes de partitionnement et les méthodes dites hiérarchiques permettent l'élaboration de regroupement dans tout l'espace en classes homogènes. Cette optique concorde à la volonté des travaux de recherche ici-menés, soit, dans un premier temps, de caractériser spatialement des zones de ressource solaire sur l'île de La Réunion, puis dans un second temps, de comprendre les perturbations de ce potentiel moyen. Les recherches menées s'axent autour de ces deux volontés dont les approches méthodologiques sont respectivement détaillées dans les deux sections suivantes.

2.1. Caractérisation spatiale des états moyens

2.1.1. Définitions des états moyens

Au-delà de son caractère intermittent, la ressource solaire présente deux grands cycles lui provenant de l'orbite de La Terre autour du Soleil : les cycles saisonnier et diurne. Nous définissons les états moyens comme une description moyenne de ces deux composantes orbitales.

Soit pour un m mois et une h heure fixés, on définit l'état moyen solaire $em(m, h)$ de la façon suivante :

$$em(m, h) = \frac{1}{nb_a} \sum_{i_a=1}^{nb_a} \frac{1}{nb_j} \sum_{i_j=1}^{nb_j} SSR(m, h, i_j, i_a) \quad (\text{II.4})$$

avec $\left| \begin{array}{ll} nb_a & : \text{ le nombre d'années,} \\ nb_j & : \text{ le nombre de jours du mois considéré.} \end{array} \right.$

Il y a donc autant d'états moyens que de combinaison heure \times mois. Pour l'étude ici menée sur le rayonnement solaire, les heures de nuit ne présentent pas d'intérêt et sont par la suite filtrées pour ne considérer que les heures entre 8 h et 17 h. Il est donc question de 120 états moyens pour les 10 heures et 12 mois considérés. Nous obtenons alors 120 grilles satellitaires décrivant sur La Réunion comment les structures solaires locales évoluent au cours de la journée pour chacun des mois de l'année. Les états moyens des grilles satellitaires téléchargées sont donc décrits dans une matrice de 360 pixels \times 12 mois \times 10 heures. Le but de la caractérisation spatiale de la ressource solaire va donc regrouper les 360 pixels (individus) entre eux selon le comportement de leurs 120 états moyens (paramètres).

Pour se faire, nous choisissons, parmi toutes les méthodes de descriptives, la [classification hiérarchique ascendante \(CHA\)](#) selon un « critère de Ward » ([Ward Jr, 1963](#)).

2.1.2. Classification hiérarchique ascendante selon un critère de Ward

La [CHA](#) est une méthode de partitionnement itératif qui produit des suites de partitions emboîtées allant du cas de partitionnement en n classes où chaque individu est isolé jusqu'à la partition en 1 classe qui regroupe tous les individus. Initialement, chacun des n individus que l'on a forme une classe. On calcule la dissimilarité entre toutes ces n classes. Les deux classes les plus proches sont regroupées en optimisant le critère d'agrégation. À nouveau, on considère la dissimilarité des nouveaux individus, c'est-à-dire la classe juste formée et les $n - 2$ individus restants. Ils sont regroupés selon le même critère d'agrégation. La procédure est répétée jusqu'à obtenir une seule classe. Ces regroupements successifs se visualisent sous la forme d'un dendrogramme à l'image de la hiérarchie des agrégations.

Nous choisissons de considérer les différences entre les individus selon une distance euclidienne et avec un critère d'agrégation appelé « critère de Ward » ([Ward Jr, 1963](#)). [Tufféry \(2012, p.289\)](#) présente le critère de Ward comme la condition d'agrégation correspondant le mieux à l'objectif de la classification. Ce critère maximise l'inertie inter-classe qui est une mesure de la cohérence d'une classe. La méthode de Ward utilise donc un critère d'agrégation qui va, à chaque itération, produire les classes les plus cohérentes possibles en maximisant leur inertie interne.

La [CHA](#) selon un critère de Ward est utilisée pour définir le rayonnement solaire en Afrique ([Diabaté et al., 2004](#)), aux États-Unis ([Willmott and Vernon, 1980](#)) mais aussi sur La Réunion ([Li, 2015](#)). On retrouve aussi de nombreuses descriptions des précipitations que ce soit spatialement en de zones type ([Muñoz-Díaz and Rodrigo, 2004](#)) ou temporellement avec une caractérisation des années entre elles ([Ramos, 2001](#)) ou une exploration des régimes temporelles en Afrique du Sud ([Crétat et al., 2012, 2015](#)) et sur La Réunion ([Morel et al., 2014](#)).

2.2. Caractérisation temporelle en régime d'anomalies

2.2.1. Construction des anomalies

La caractérisation temporelle que nous voulons faire répond à la nécessité de mieux appréhender l'intermittence de la ressource solaire. De cette volonté, les grilles horaires satellites sont transformées en anomalies qui, au même sens qu'en climatologie, sont des écarts à la moyenne.

Cependant, soustraire directement les états moyens heure \times mois (ie. $em(m, h)$) créerait un effet de bord sur les jours en début et fin de mois puisqu'ils seraient associés à la même moyenne mensuelle que les jours de milieu de mois. La saisonnalité se détaillant bien au travers des mois, il faut tout de même considérer l'échelle journalière pour construire les anomalies horaires de notre caractérisation temporelle. Cependant, nous ne calculons pas les états moyens heure \times jour (ie. $em(jj, h)$) de la même façon que pour les heure \times mois (ie. $em(m, h)$) car 16 années seulement ne suffisent pas à obtenir un comportement moyen. En climatologie, il est usuel de définir des comportements moyens sur un minimum de 30 années. Nous reconstruisons donc les 12 mois en 365 jours selon une interpolation par splines cubiques. Pour chaque heure, nous calculons les moyennes des jours selon celles des mois et nous les associons à la moitié exacte de chaque mois. Il est donc plus précis de dire que nous reconstruisons, à partir des 12 mois de l'année, 2×365 journées fictives, pour pallier les mois à nombre de jours impair et, ensuite, nous extrayons de ces journées fictives les 365 jours de l'année. Pour éviter un effet de bord, chaque interpolation est faite en considérant 3 réplifications des 365×2 journées fictives. Finalement, la procédure appliquée correspond à l'enchaînement des étapes suivantes :

1. Réplication des états moyens mensuels par 3, pour avoir 3 années consécutives avec les mêmes valeurs d'état moyen ; ainsi, pour une heure de la journée choisie, nous avons 3×12 états moyens mensuels,
2. Reconstruction par splines cubiques en 2×365 journées ; ainsi, pour une heure de la journée choisie, nous avons $3 \times 2 \times 365$ valeurs moyennes reconstruites,
3. Extraction des 365 journées sur l'année du milieu de la reconstruction ; ainsi, pour une heure de la journée choisie, nous avons plus que 365 états moyens journaliers.

À partir de ces états moyens heure \times jour (ie. $em(jj, h)$), nous construisons nos anomalies solaires. Soit pour une grille à h heure, jj jour julien et a année, on définit l'anomalie solaire $an(a, jj, h)$ de la façon suivante :

$$an(a, jj, h) = SSR(a, jj, h) - em(jj, h)$$

Par exemple, pour la grille du 12 mai 2011 à 12 h, l'anomalie est calculée en soustrayant la grille horaire à l'état moyen du 12 mai à 12 h. Une valeur positive témoignera d'une mesure supérieure à l'état moyen associé. De la même façon, une valeur négative sera représentative d'une valeur inférieure au rayonnement solaire moyen.

Dans l'idée de caractériser différents régimes journaliers, nous classifions les 5 844 jours de la base de données. Il est donc question de définir chaque individu par les pixels de la grille satellite des 10 heures de la journée.

2.2.2. Méthode dynamique de classification en k-moyennes

La classification en k-moyennes ou, en anglais, « *k-means* », est une méthode de partitionnement introduite par [MacQueen \(1967\)](#). Elle est aussi appelée méthode des centres mobiles ou classification en nuées dynamiques qui, au contraire des méthodes hiérarchiques, n'affecte pas définitivement un individu à une classe. En effet, une classe peut être créée selon la séparation de deux autres classes, chose qui n'est pas possible pour les méthodes hiérarchiques dont la philosophie repose sur le partitionnement itératif. L'avantage de cette méthode par rapport à la [CHA](#) est sa simplicité d'utilisation et sa non-dépendance hiérarchique donc *a priori* plus grande rapidité de calcul. Là où la [CHA](#) construit un dendrogramme de tous les cas de partitionnement, la méthode des k-moyennes va construire seulement le cas à n classes souhaité.

À partir d'un tirage initial de n centres, la méthode des k-moyennes va répartir tous les individus entre chacune des n classes selon un critère d'assignation. Suite à ce premier état de classification, les centres sont recalculés et les individus réassignés. Cette procédure est répétée jusqu'à une certaine stabilité de la classification. Cependant, non seulement le premier état du système est fait aléatoirement mais, aussi, la convergence peut être plus ou moins difficile d'un tirage initial à un autre.

Pour y palier, nous utilisons la méthodologie de partitionnement de [Fauchereau et al. \(2009\)](#) qui s'est construite selon les travaux de [Cheng and Wallace \(1993\)](#) et [Michelangeli et al. \(1995\)](#). Parmi les développements ultérieurs, cette méthodologie est utilisée dans le cadre de recherches sur les précipitations à Madagascar ([Macron et al., 2016](#)) mais aussi sur le plus large domaine de l'Afrique austral en considérant les systèmes dépressionnaires tropicaux-tempérés ([Macron et al., 2014](#); [Vigaud et al., 2012](#)). Indicateur des précipitations, des données de rayonnement infrarouge sont utilisées au cours de ces études dont la provenance est aussi bien satellitaire, que de réanalyses ou de simulations numériques.

Cette méthodologie associe une [analyse en composantes principales \(ACP\)](#) et un partitionnement en k-moyennes lui-même couplé au calcul d'un indice dit de « classifiabilité ». L'[ACP](#) permet de réduire le nombre de dimensions pour n'extraire que 70 % de la variance initiale au travers d'un nombre plus faible de composantes alors décorréelées. Le partitionnement en k-moyennes est ensuite exécuté 100 fois sur les sorties de l'[ACP](#) pour chacun des 9 cas allant de 2 à 10 classes. L'indice de classifiabilité permet de statuer sur l'évolution des moyennes au cours des itérations d'un cas de partitionnement : si l'indice vaut 1, les moyennes des classes ne varient pas au cours des itérations de la classification, ici fixé à 150. De plus, toute l'approche décrite est faite sur les données de [SARAH-E](#) mais aussi sur des données virtuelles qui sont générées sur la base d'un bruit des données

SARAH-E par un processus de Markov de premier ordre. Ainsi, la base de données bruitée possède les mêmes caractéristiques d'auto-corrélation que les données **SARAH-E**. La comparaison des indices de classifiabilité entre **SARAH-E** et données bruitées permet de choisir un nombre de classes et le cas le plus représentatif de la physique de notre système (Michelangeli et al., 1995).

Dans notre volonté de caractériser le comportement de La Réunion, nous filtrons nos données **SARAH-E** d'entrée selon les classes obtenues par la précédente caractérisation spatiale. En effet, lors de cette étape, nous obtenons une classe associée à la mer dont nous supprimerons les pixels pour la classification détaillée ci-dessus. Les régimes obtenus seront donc rattachés aux pixels non associés au comportement solaire de la mer.

2.2.3. Mise en lien avec les circulations atmosphériques

Dans cette partie, il est question de comprendre les classes d'anomalie solaire dans un contexte d'échelle plus grande. De la même façon que les régimes de perturbations solaires décrivent l'état de La Réunion, il existe différents indices décrivant les circulations atmosphériques. Ces indices associent alors une ou plusieurs valeurs à un état de l'atmosphère. Dans un premier temps, nous formalisons donc le lien entre les perturbations solaires réunionnaises et les circulations atmosphériques plus large échelle par le calcul des occurrences croisées, sous la forme d'un tableau de contingence.

Tout comme Bessafi and Wheeler (2006) et Hall et al. (2001), nous utilisons un test de χ^2 . Ceci nous permet de localiser les valeurs significatives pour lesquels la distribution des jours dans les classes d'anomalie solaire est modifiée par l'état-indice de l'atmosphère considéré. Nous testons alors l'hypothèse nulle que la distribution des jours dans les classes d'anomalie solaire ne dépendait pas de l'état de l'atmosphère par le calcul de Z (équation II.5). Ainsi, pour chacune des combinaisons possibles entre nos régimes d'anomalie solaire et les différents états-indices de l'atmosphère, nous calculons Z décrit par la formule suivante :

$$Z = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{p_0(1 - p_0)/N}} \quad (\text{II.5})$$

avec

- \hat{p} : la proportion attendue de jours dans la classe i d'anomalie solaire,
- p_0 : la proportion observée de jours dans la classe i pour notre cas d'état-indice de l'atmosphère,
- N : le nombre de jours total dans l'état-indice de l'atmosphère considéré.

Sachant que Z suit une distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type unitaire, Z supérieur (inférieur) à $+1,96$ ($-1,96$) permet de localiser les valeurs significatives, c'est-à-dire en dehors des 95% de la distribution. Ce test nous permet de repérer les états-indices de l'atmosphère qui vont moduler la distribution des jours dans les régimes d'anomalie solaire de La Réunion.

Parmi toutes les circulations atmosphériques, nous détaillons, ci-suit, celles dont nous envisageons l'influence sur le potentiel solaire réunionnais tout en considérant la période que couvre la base de données choisie. Ainsi, nous examinerons le cas des [systèmes dépressionnaires tropicaux \(SDT\)](#), des [talwegs tropicaux-tempérés \(TTT\)](#) et de l'[oscillation de Madden-Julian \(MJO\)](#). Le premier des trois est détaillé dans une base de données de Météo-France Réunion. Les deux derniers sont quant à eux traduits en des indicateurs qui associent leur état à des valeurs particulières.

Les systèmes dépressionnaires-tropicaux sont des perturbations synoptiques d'une durée de vie moyenne de 2 à 7 jours. Ils sont détaillés en plusieurs caractéristiques par Météo-France Réunion qui en agglomère les informations depuis 1981, et en propose une version au pas de temps de 6 heures. Nous utilisons la liste des [SDT](#) existants avec leur date de début et de fin ainsi que leurs coordonnées longitudinale et latitudinale, données contenues dans la base « *Best-track* » de Météo-France Réunion. Cette base de données a récemment été utilisée pour faire une climatologie des cyclones du sud-ouest de l'Océan Indien ([Leroux et al., 2018](#)).

Les talwegs tropicaux-tempérés sont associés à une durée de 6-7 jours et résultent d'une forte convection tropicale que l'on obtient en été austral, sur la période de novembre à février. La convection atmosphérique est modélisée par rayonnement infra-rouge sortant au sommet de l'atmosphère dont l'utilisation anglaise fréquente est [Outgoing Longwave Radiation \(OLR\)](#). Pour caractériser les [TTT](#), [Fauchereau et al. \(2009\)](#) utilisent les données journalières du fichier OLR NOAA ([Liebmann and Smith, 1996](#)) sur une zone étendue autour de l'Afrique du Sud et du sud-ouest de l'Océan Indien ([Fauchereau et al., 2009](#), Fig.2). Ils classifient les 120 jours⁷ de l'été austral des années 1979 à 2002 en 7 régimes différents. La figure [II.15](#) est celle de [Fauchereau et al. \(2009](#), Fig.6) et présente les anomalies de la convection atmosphérique associées à chacun des 7 régimes obtenus. Parmi eux, trois sont associés aux [TTT](#) : les régimes 5, 6 et 7 (figure [II.15](#) (e), (f) et (g)) . Ces 3 régimes ont des structures d'anomalies convectives qui ont la forme des [TTT](#), soit d'une bande orientée nord-ouest/sud-est. De plus, le régime 4 est un *précurseur* du régime 5. Ainsi, le cycle de vie des [TTT](#) se décompose du régime 4 au 6, avec les transitions de 5 à 6 et 6 à 7 qui sont à l'image de la propagation d'est en ouest des [TTT](#). Les convections renforcées de ces trois régimes sont respectivement l'Afrique du Sud, le Mozambique et Madagascar. De plus, le régime 1 présente une convection affaiblie sur une zone plus étendue qu'à son habitude ([Fauchereau et al., 2009](#), Fig.2). Inversement, pour le régime 3, on observe une convection renforcée plus étendue vers le sud.

7. excluant les 29 février des années bissextiles.

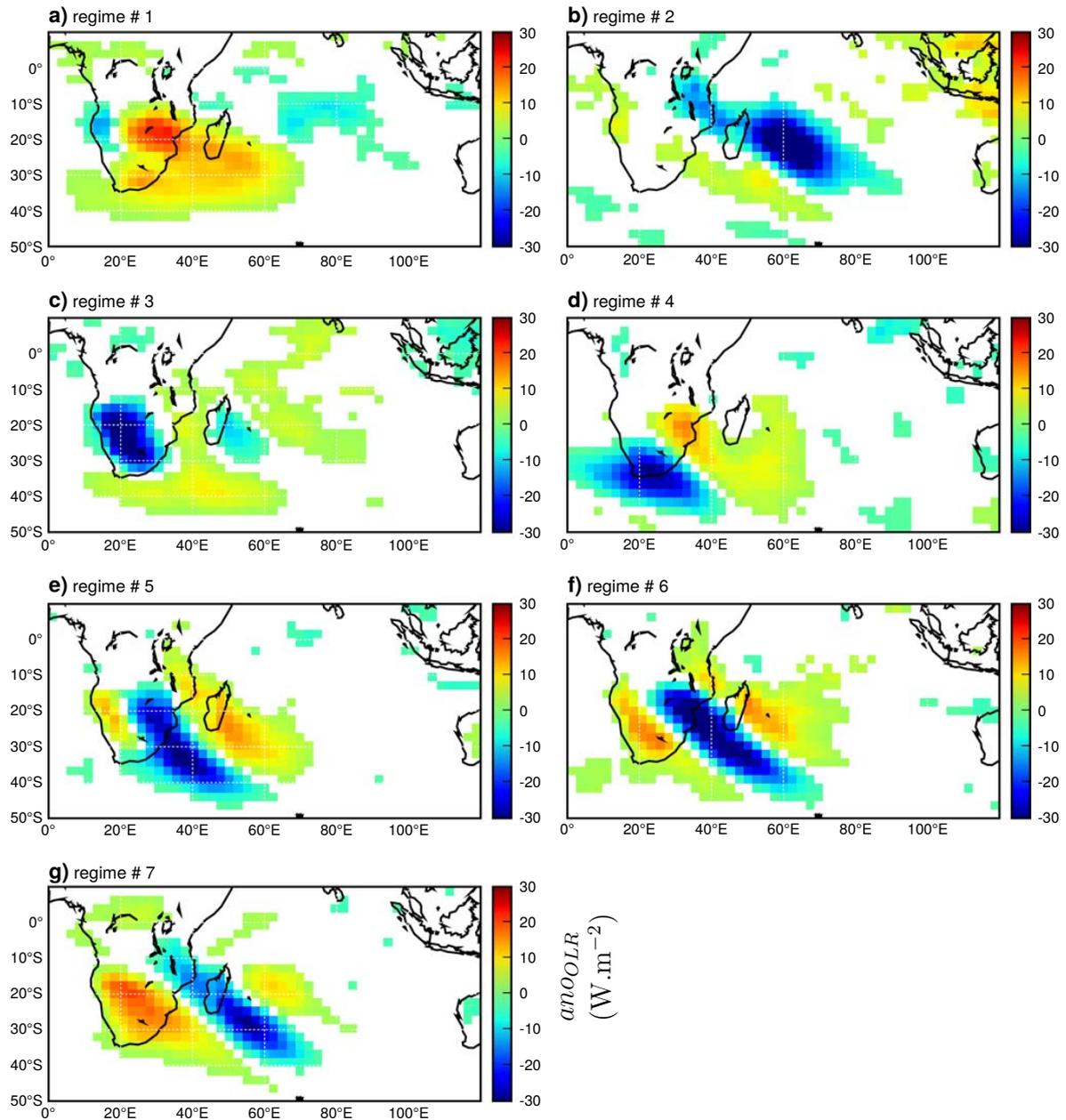


FIGURE II.15. – Anomalies dans la convection atmosphérique ($W \cdot m^{-2}$), estimée à partir du fichier OLR NOAA (Liebmann and Smith, 1996), pendant l'été austral (NDJF) et pour chacun des régimes établis par Fauchereau et al. (2009), dont les trois régimes 5, 6 et 7 concernent les TTT. Seules sont affichées les valeurs significatives au seuil de 95% selon un t -test de Student. Figure de Fauchereau et al. (2009).

En ce qui concerne La Réunion, la convection atmosphérique est amoindrie aux alentours proches de l'île pour OLR1, OLR4, OLR5 et surtout OLR6 durant lequel le centre de l'anomalie positive est localisé sur le territoire réunionnais. Pendant OLR3 et OLR7, La Réunion est en bordure de convection renforcée et affaiblie. On localise en OLR2 une forte convection renforcée centrée sur La Réunion et étendue autour de l'île, bien au-delà de l'île Maurice d'un côté et jusqu'aux côtes malgaches de l'autre.

Pour faire le lien avec notre base de données, nous avons récupéré une version actualisée⁸ qui renseigne le régime des jours de 1979 jusqu'à 2011 inclus. Dans notre étude, nous pourrions donc faire le lien sur les 12 années de 1999 à 2011 (excluant 2006) entre les régimes des anomalies du potentiel solaire et ceux des travaux de [Fauchereau et al. \(2009\)](#), auxquels nous nous référons par la dénomination de régimes d'OLR i . La disponibilité de notre base de données nous permettra de considérer 1 405 jours (35 journées manquantes contenues dans les étés australs de 1999 à 2011 inclus).

L'oscillation de Madden-Julian est onde atmosphérique intra-saisonnière d'une durée variant de 30 à 60 jours et dont le cycle de vie est retranscrit dans huit phases par [Wheeler and Hendon \(2004\)](#). Cette décomposition est faite selon des indices nommés « Real-time Multivariate MJO » (RMM) et associée, à chaque jour, deux composantes orthogonales statuant sur l'état de la MJO. Ces deux composantes orthogonales (RMM₁, RMM₂) se tracent dans un diagramme qui permet de combiner la progression de la MJO à son intensité. Ainsi, la MJO est quotidiennement associée à une phase et une amplitude. À titre d'exemple, nous représentons un cycle de 8 phases de la MJO en figure II.16.

Nous visualisons l'évolution de la MJO en figure II.17 selon la propagation des anomalies de la convection atmosphérique dans le sud-ouest de l'océan Indien pendant l'été austral. Au cours de la première phase, on observe une intensification de la convection qui va ensuite se propager vers l'est. Les trois phases suivantes (2, 3, 4) présentent une anomalie maximale de la convection dans l'Océan Indien, de l'est vers l'ouest. Puis, en phase 5, ce sont l'Indonésie et l'Océanie qui sont alors concernées par l'anomalie de convection renforcée qui continuera sa propagation vers l'est. En parallèle, le même chemin est suivi par la partie concomitante de la zone de convection renforcée de la MJO. La stabilité induite traverse de la même façon l'Océan Indien pendant les quatre dernières phases (5, 6, 7, 8).

8. fournie par Benjamin Pohl, co-auteur de [Fauchereau et al. \(2009\)](#), sur la période de disponibilité du fichier OLR NOAA ([Liebmann and Smith, 1996](#)).

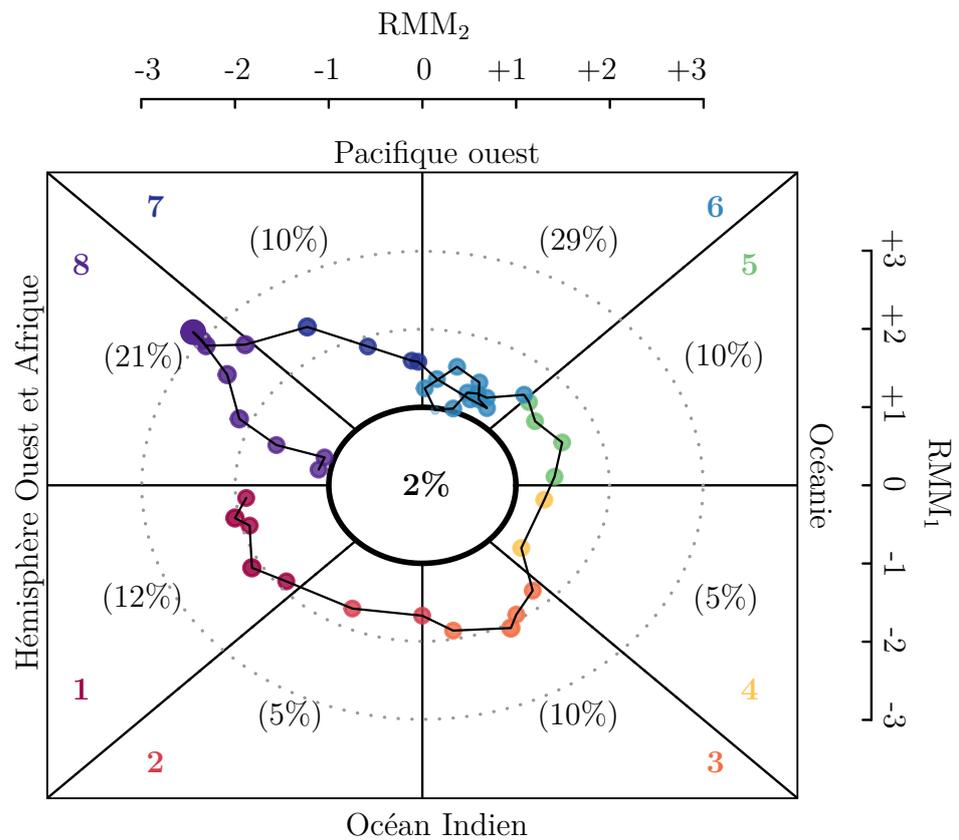


FIGURE II.16. – Représentation d'un cycle de la MJO selon les indices RMM sur 43 jours (du 13/01/1999 au 24/02/1999). Le numéro des phases de la MJO se trouve dans l'octant concerné, selon la même couleur que celle utilisée pour localiser les jours. La taille des points de chaque jour est proportionnel à l'amplitude de la MJO. Le 2% au centre du graphe est à l'image du nombre de jours d'amplitude faible, soit inférieure à 1. Les valeurs entre parenthèses détaillent le pourcentage (arrondi à l'unité) de jour dans chaque octant, sur la base de ceux dont l'amplitude est supérieure ou égale à 1.

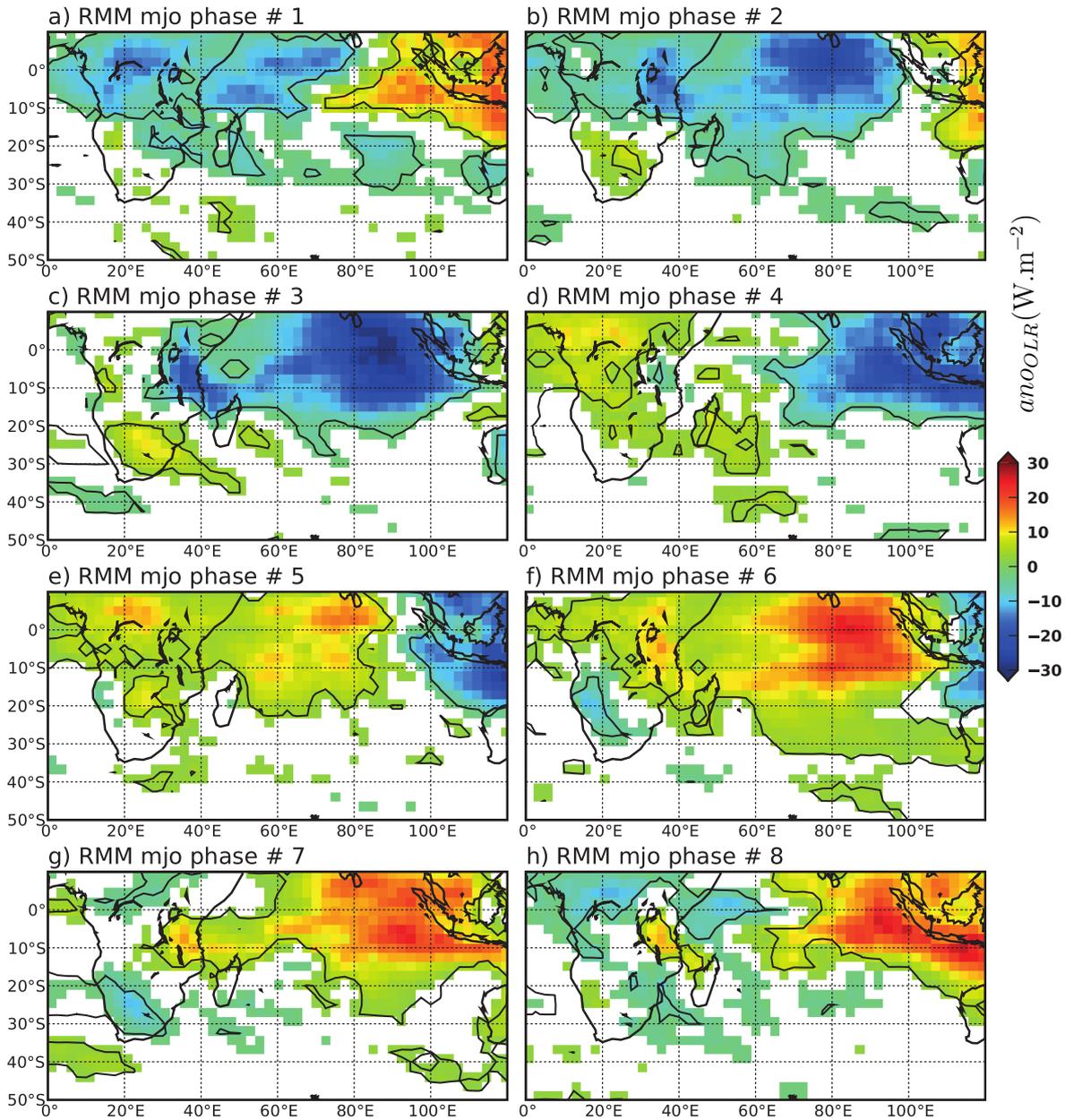


FIGURE II.17. – Anomalies dans la convection atmosphérique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), estimées à partir du fichier OLR NOAA (Liebmann and Smith, 1996), associées aux 8 phases de la MJO définies à partir des indices RMM de Wheeler and Hendon (2004), sur le sud-ouest de l’océan Indien en été austral. Les contours noirs indiquent les anomalies significatives au seuil de 95% selon un t -test de Student. Figure non publiée, fournie par Nicolas Fauchereau empruntée à Pohl (2015).

Chapitre III.

Cartographie du potentiel solaire

À ce jour, la compréhension du rayonnement solaire de La Réunion nécessite d'être affinée. L'état de l'art en détail des publications desquelles l'utilisation prépondérante des données d'observation *in situ* (Jumaux et al., 2011; Badosa et al., 2013, 2015) s'ouvre à l'heure actuelle sur celle des bases de données satellites (Bessafi et al., 2018). Ainsi, nous utilisons les données satellitaires préalablement choisies pour mieux caractériser spatialement la ressource solaire moyenne. Cette caractérisation s'articulera (1) autour d'une mise en contexte préliminaire selon la répartition spatiale du potentiel solaire moyen de l'île. Puis, (2) le détail de la saisonnalité et de la variabilité diurne aboutira sur l'utilité de leur combinaison. Finalement, (3) une cartographie de la ressource solaire moyenne est proposée selon la construction de plusieurs régions solaires.

Sommaire

1. Explicitation de la structuration du potentiel solaire moyen	88
1.1. Description du rayonnement global moyen de La Réunion	88
1.2. Mise en évidence des principales structures spatiales solaires	89
1.3. Estimation de la pertinence des structures	91
2. Mise en évidence de la complémentarité des deux composantes orbitales	94
2.1. Évolution diurne	94
2.2. Le cycle saisonnier	97
2.3. L'apport des états moyens	100
3. Régionalisation de la ressource solaire moyenne	108
3.1. Structuration spatiale	108
3.2. Caractérisation des zones solaires	110
4. Conclusion du chapitre	116

1. Explicitation de la structuration du potentiel solaire moyen

L'Océan Indien est une vaste surface, relativement lisse, sur laquelle les circulations atmosphériques opèrent au gré des conditions météorologiques. La Réunion est le sommet le plus haut de l'Océan Indien avec ses deux points culminants, le Piton des Neiges à 3071 mètres d'altitude et le Piton de la Fournaise à 2632 mètres. Les pentes abruptes et hauts plateaux associés à ses deux volcans vouent autant La Réunion à agripper les nuages qu'à les former et développer. D'une altitude maximale de 828 mètres, sa plus proche voisine et sœur, l'île Maurice capture et engendre beaucoup moins de couverture nuageuse. La Réunion est donc une île isolée dont la topographie chamboule les vents en les obligeant parfois le détour par ses côtes et, si d'intensité plus grande, ils visitent l'île en suivant les pentes fluctuantes locales. Terre de vie des nuages, sa topographie complexe module donc le rayonnement solaire moyen que l'on obtiendrait sur la surface de mer équivalente. D'une part, la topographie de La Réunion diminue son potentiel solaire moyen qui, d'autre part, se conjugue dans des structures spatiales particulières.

1.1. Description du rayonnement global moyen de La Réunion

Dans un premier temps, nous calculons la moyenne de chacun des pixels de la grille satellite téléchargée. La figure III.1 présente la répartition de ces potentiels moyens en comparant leur distribution sur toute la grille satellite téléchargée, sur la mer et puis sur l'île.

La majeure partie des points de la grille est associée à la mer puisque la médiane de la grille est proche des médiane et moyenne de la mer. La grille contient 38 valeurs extrêmes, localisées en cercle en dessous de la boîte à moustache de la mer et dont aucune n'est sur la mer. La mer et l'île ont donc des valeurs très différentes avec moins de 10% de leur distribution respective qui concordent.

La moyenne de l'île est représentative de sa distribution puisque moyenne et médiane sont quasiment confondues, avec moins de 1 W.m^{-2} d'écart. Le rayonnement solaire moyen de l'île, que l'on appellera par la suite « irradiance moyenne locale », est donc de 463 W.m^{-2} dont moyenne et médiane sont à $\pm 0,4 \text{ W.m}^{-2}$.

En comparaison, la mer aux alentours de l'île a un potentiel énergétique d'environ 576 W.m^{-2} , soit 19% de plus que celui de La Réunion. En s'éloignant encore des côtes réunionnaises, on estime que le potentiel moyen de la mer est plus proche des 600 W.m^{-2} , valeurs des 10% maximums de la mer. Ainsi, en considérant que cette valeur de 600 W.m^{-2} , la topographie de l'île a un impact de 23% sur le potentiel moyen.

Finalement, les estimations d'échelles globales, dont la résolution spatiale ne permet pas de considérer assez finement La Réunion, aboutissent à des valeurs sur-estimées du

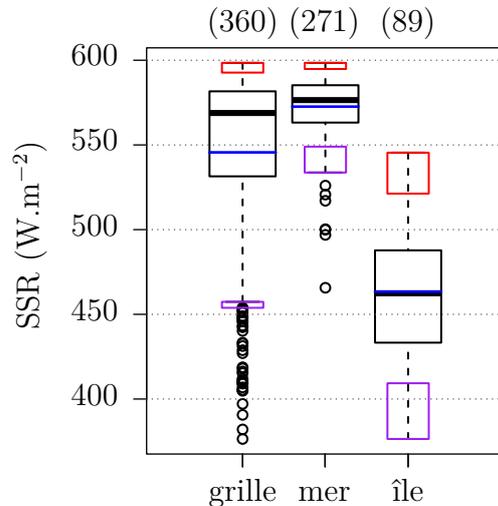


FIGURE III.1. – Comparaison des distributions des valeurs moyennes du rayonnement solaire des pixels : (1) de toute la grille, (2) de la mer et (3) de l'île ; Les rectangles en rouge (mauve) se réfèrent aux 10 % maximums (minimums) selon le calcul des boîtes à moustache ; La moyenne de chaque distribution est en bleu. Les valeurs entre parenthèses en dessus de la zone du graphe correspondent au nombre de pixels sur lequel la boîte à moustache a été calculée. Données instantanées horaires du produit satellitaire *Solar surFAce RAdition Heliosat - East (SARAH-E)* (1999-2015, sans 2006).

potentiel solaire de l'île. En effet, un pixel, de forme rectangulaire, prend toujours plus ou moins en compte la mer. Selon les grilles de 3-4 km des données satellites *SARAH-E*, nous définissons l'irradiance moyenne locale comme étant de 460 W.m^{-2} qui est d'au moins 20 % inférieure au potentiel de la mer. Cet écart énergétique entre île et mer est absorbé par l'atmosphère et engendre possiblement des nuages qui sont de fait plus présents sur l'île que sur la mer. Circulant selon les vents, les nuages sont cependant tributaires de la topographie complexe du territoire. Ils modulent mais surtout structurent spatialement la ressource solaire moyenne de La Réunion.

1.2. Mise en évidence des principales structures spatiales solaires

La figure III.2 explicite la distribution du potentiel solaire moyen sur La Réunion et ses alentours proches, selon la grille de 360 pixels de *SARAH-E*. Chacun des pixels est moyenné sur toutes les valeurs des 16 années disponibles, en considérant le filtre des heures de 8 h et 17 h. L'échelle de couleur dégrade de jaune à bleu foncé les maxima et minima solaires qui prennent respectivement place sur la mer et sur l'île. La répartition

spatiale de la ressource solaire permet de localiser les zones à plus et moins forte ressource solaire. Les maxima et minima de la ressource solaire de La Réunion, mer exclue, y sont respectivement localisés par des triangles rouges montants et mauves descendants.

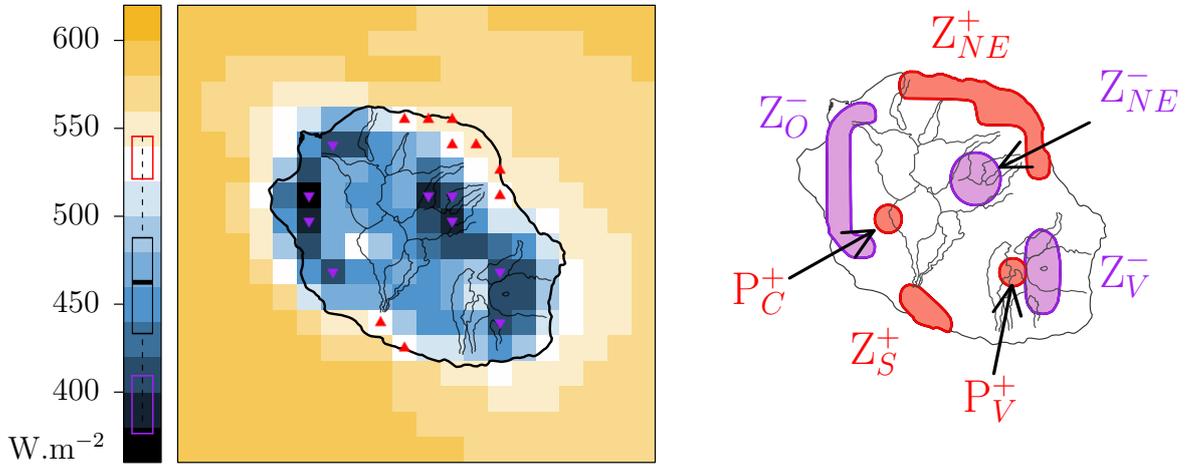


FIGURE III.2. – Carte du potentiel solaire moyen de La Réunion ; *La moyenne de chaque pixel est calculée sur les heures entre 8-17h. Sur la grille, des triangles informent de la localisation des extrema solaires sur l'île seulement (mer exclue) : en rouge (mauve) les 10% de valeurs les plus élevées (faibles) ; Dans la légende, la boîte à moustache de l'île (en figure III.1) est représentée, les deux extrema dans des boîtes en rouge et mauve sont donc à l'image des triangles de la couleur associée ; À droite est rajouté la vision schématique des zones auxquelles nous faisons référence dans le manuscrit.*

Parmi les maxima côtiers, on repère une zone¹ $\{Z_{NE}^+\}$ allant de Saint-Denis au nord à Saint-Benoît vers l'est et une zone $\{Z_S^+\}$ au Sud au niveau de Saint-Pierre. Ces deux maxima s'expliquent du fait du « *flow around regime* » qui dégage les côtes parallèles au régime d'Alizé moyen (ie. est, sud-est) (Lesouëf et al., 2011; Badosa et al., 2015). On trouve à des altitudes plus hautes deux pixels présentant des valeurs relativement élevées : un pixel $\{P_C^+\}$ sur le rempart ouest de Cilaos et un autre pixel $\{P_V^+\}$ à gauche du volcan au niveau du rempart du Pas de Bellecombe. Ces deux zones présentent à l'est des pentes de fortes amplitudes avec même une forme circulaire (ie. en "C" orienté vers l'est).

En ce qui concerne les minima solaire sur l'île, ils se répartissent sur trois zones. Une

1. Par la suite, nous utilisons des notations pour parler des différentes zones ou pixels de l'île. Ces notations seront une première fois définies entre accolades. Une lettre Z ou P pour Zone ou Pixel sera associée à un exposant + ou - pour parler, respectivement, des maxima ou minima et une lettre sera ajoutée en indice pour indiquer la localisation associée (N pour Nord, SE pour Sud-Est, C pour Cilaos, S pour Salazie, V pour Volcan,...).

première zone dans l'ouest de l'île $\{Z_O^-\}$ est en forme de "C". Elle est située dans les hauts de Saint-Paul, à mi-chemin entre la côte et le haut du rempart ouest du Cirque de Mafate. Une deuxième zone $\{Z_S^-\}$ est à l'est du Cirque de Salazie, sur de fortes pentes dont la topographie est sinueuse et complexe. Une dernière $\{Z_V^-\}$ se trouve au niveau du volcan. Chacune de ses trois zones présentent de fortes pentes sur lesquelles les nuages peuvent s'agripper facilement. Cependant, $\{Z_S^-\}$ et $\{Z_V^-\}$ sont de plus hautes altitudes que $\{Z_O^-\}$ qui est en dessous des 1 000 mètres d'altitude

Pour jauger la qualité de ces structures locales, nous comparons la figure III.2 avec ce que l'on trouve dans la littérature.

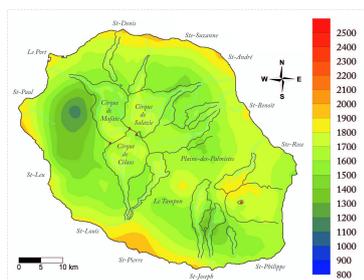
1.3. Estimation de la pertinence des structures

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs figures avec lesquelles une comparaison est faisable. Pour faire référence à chacune des figures concernées, nous utiliserons trois raccourcis au travers des termes de :

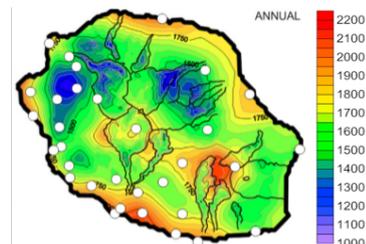
- « descente d'échelle » pour parler de la figure 11.a) de rayonnement solaire global en cumul annuel provenant des travaux de Bessafi et al. (2018) ; une descente d'échelle à 250 m est réalisée en combinant les données satellites de SARAH-E aux mesures *in situ* de Météo-France,
- « atlas climatique » en référence à la figure 68 de rayonnement solaire global en moyenne annuelle de Jumaux et al. (2011) ; obtenue à partir d'une interpolation spatiale des données *in situ* de Météo-France selon un modèle numérique de terrain,
- « ensoleillement direct annuel » pour la figure 23 de la thèse de Tapaches (2015) ; la méthodologie (détaillée sur la figure 22 de son manuscrit) associe une utilisation des images satellites de Météosat 7 sur la période 2008-2012, (*ie.* images de même provenance pour SARAH-E, et donc de même résolution de $0,05^\circ$) à une reconstruction spatiale selon un modèle numérique de terrain (à environs 200 mètres),
- et « fraction nuageuse » pour la figure 4-5 de (Li, 2015, Fig.4-5) à partir de données de fraction nuageuse de MODIS (résolution de 250 mètres).

Toutes les figures sont regroupées en figure III.3 avec pour lettre associée (a) pour l'atlas climatique, (b) pour la descente d'échelle utilisant les données satellites et *in situ* (*eng.* « both »), (c) pour la fraction nuageuse (*eng.* « cloud ») et enfin, (d) pour l'ensoleillement direct annuel.

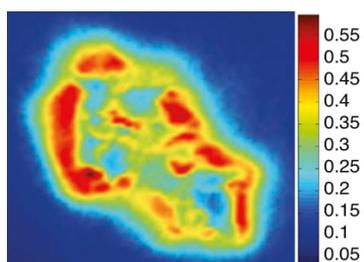
Les mêmes zones maximales en $\{Z_{NE}^+, Z_S^+\}$ se localisent sur l'atlas climatique (a) et la descente d'échelle (b). Elles trouvent aussi un écho sur la fraction de nuage (c) et sur l'ensoleillement direct annuel (d). Sur ce dernier (d), la zone $\{Z_{NE}^+\}$ s'étale sur les altitudes jusqu'au cirque de Salazie, étalement que l'on ne retrouve pas sur les trois autres figures (a,b,c). Au niveau de $\{P_C^+\}$, on observe un maximum sur l'ensoleillement direct



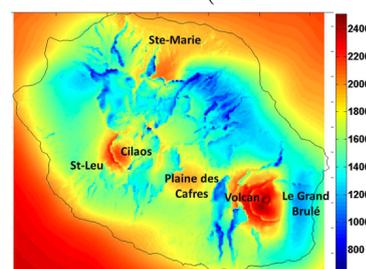
(a) Atlas climatique (Jumaux et al., 2011)



(b) Descente d'échelle (Bessafi et al., 2018)



(c) Fraction nuageuse (Li, 2015)



(d) Ensoleillement direct (Tapaches, 2015)

FIGURE III.3. – Figures d'autres auteurs, utilisées pour comparaison avec la figure III.2. (a) Moyenne annuelle du rayonnement global ($J.cm^{-2}$), (b) Cumul annuel du rayonnement global ($k.W.h.m^{-2}$), (c) Fraction nuageuse, (d) Ensoleillement direct normal ($kW.h.m^{-2}$).

annuel (d) mais aussi sur la descente d'échelle (b). Ce potentiel solaire est cependant lissé sur l'atlas climatique (a), du fait de l'absence de station de mesure à cet endroit.

En ce qui concerne les minimas, $\{Z_S^-\}$ est présent sur toutes les figures sauf sur l'atlas climatique (a), dont un lien se fait avec l'absence de mesure prononcée dans cette zone. Il en est globalement de même avec $\{Z_O^-\}$ sauf que des mesures *in situ* décalent ces minimas à plus haute altitude (ie. à l'est) sur l'atlas climatique (a). La descente d'échelle combinant les données satellites et *in situ* propose un étalement de $\{Z_O^-\}$ plus proche de ce que l'on observe en figure III.2. L'ensoleillement direct annuel (d) présente aussi une plus grande étendue mais c'est la fraction nuageuse (c) qui unifie largement la zone tout en soulignant la présence du triangle le plus bas de la zone $\{Z_O^-\}$ (selon les 4 triangles mauves sur la partie ouest de l'île en figure III.2). Ce minimum localisé au-dessus de Piton Saint-Leu n'est pas aussi marqué sur l'ensoleillement direct annuel (d) et sur l'atlas climatique (a). Ainsi, les données satellites SARAH-E apportent de l'information sur cette zone de l'île. La fraction nuageuse (c) souligne d'ailleurs qu'y poser un capteur serait intéressant et pallierait le lissage de l'interpolation de l'atlas climatique.

Par ailleurs, des valeurs élevées se localisent du côté du littoral de Saint-Paul sur l'atlas climatique (a) et la descente d'échelle (d). Cependant, elles ne sont pas dues à l'emploi des données *in situ* de Météo-France que font ces deux auteurs. En effet, l'ensoleillement

direct annuel (d) permet de jauger qu'il y a un fort potentiel s'étalant depuis la pointe de Saint-Paul jusqu'à Saint-Pierre. La répartition de la fraction de nuageuse (c) confirme que cette côte est dégagée. Ainsi, la variabilité interne de la côte ouest est plus fine que la résolution spatiale de [SARAH-E](#) et est donc à considérer avec précaution. Les pixels de la figure [III.2](#) qui sont en bordure de mer apportent tout de même de l'information puisque, dans le cas de Saint-Paul, le pixel blanc le plus à l'ouest de côte pointe la forte variabilité de la zone. Ce constat souligne l'importance de garder en mémoire la potentielle variabilité interne au pixel.

Récapitulatif

À l'image de sa topographie, la ressource solaire de l'île est complexe et se détaille en plusieurs structures particulières. Dans la littérature, nous trouvons des répartitions globalement similaires selon les auteurs et données utilisées. Il faut cependant souligner que la côte ouest est variable sur une échelle spatiale plus fine puisque le fort potentiel solaire du littoral est lissé par la résolution spatiale de [SARAH-E](#). En parallèle à ce maxima solaire, les données satellites apportent de l'information au niveau de $\{Z_O^-\}$ et de $\{P_C^+\}$. Cette zone particulière de l'ouest est réputé pour connaître des débordements nuageux au cours de la journée. Les nuages étant tributaires des conditions météorologiques et sachant que les ressources solaires et éoliennes présentent des cycles diurnes et saisonniers marqués ([Badosa et al., 2015](#); [Lesouëf et al., 2011](#)), nous nous intéressons par la suite aux deux principales modulations de la ressource solaire, soit dans le jour et dans l'année.

2. Mise en évidence de la complémentarité des deux composantes orbitales

La ressource solaire présente deux grands cycles, l'un saisonnier et l'autre journalier, et il en est de même pour toutes les grandeurs physiques terrestres dépendant de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Ainsi les structures solaires locales vont connaître des grandes modulations moyennes venant du cumul de ces variabilités cycliques. L'évolution diurne renseigne sur la répartition des structures selon les différentes heures de la journée et le cycle saisonnier présente de la même façon l'impact des saisons sur la répartition solaire locale. Le détail de ces deux modulations aboutissent sur la mise en évidence de leur complémentarité et la nécessité de les combiner pour caractériser la ressource solaire.

2.1. Évolution diurne

Comme précédemment, nous regardons les distributions puis les structures spatiales solaires pour chaque heure de la journée. La figure III.4 détaille donc les distributions avec une boîte à moustaches par heure. Ensuite, nous associons les distributions à leur répartition spatiale la figure III.5.

Modulation de la distribution

Pour chacune des heures de la journée définie entre 8-17 h, la figure III.4 présente la distribution des valeurs en considérant exclusivement les pixels de La Réunion.

Les boîtes à moustaches sont plus larges entre 11 et 15 h que sur le reste de la journée, plus particulièrement à 13 h avec un écart interquartile de 118 W.m^{-2} . De plus, pour les heures entre 8-12 h, la moyenne est inférieure à la médiane alors que c'est le contraire pour le reste de la journée. Considérer la moyenne pour valeur représentative de toute La Réunion sous-estime donc le potentiel du matin et sur-estime celui de l'après-midi. L'écart est d'ailleurs maximal le matin à 8-9 h avec un pourcentage de 12-13%. Sur la journée, moyenne et médiane (resp. 635 et 640 W.m^{-2}) sont maximales à 12 h alors que si l'on s'intéresse aux maxima, c'est à 13 h que l'on obtient la valeur maximale de 779 W.m^{-2} . Le potentiel moyen de La Réunion est maximal une heure avant que l'on ne trouve le pixel avec la valeur maximale. Ainsi, considérer une valeur moyenne ou médiane par heure peut, selon la localisation, spatiale menée à différer l'heure ayant la ressource solaire maximale. Il apparaît donc nécessaire de caractériser le cycle diurne de la ressource solaire spatialement.

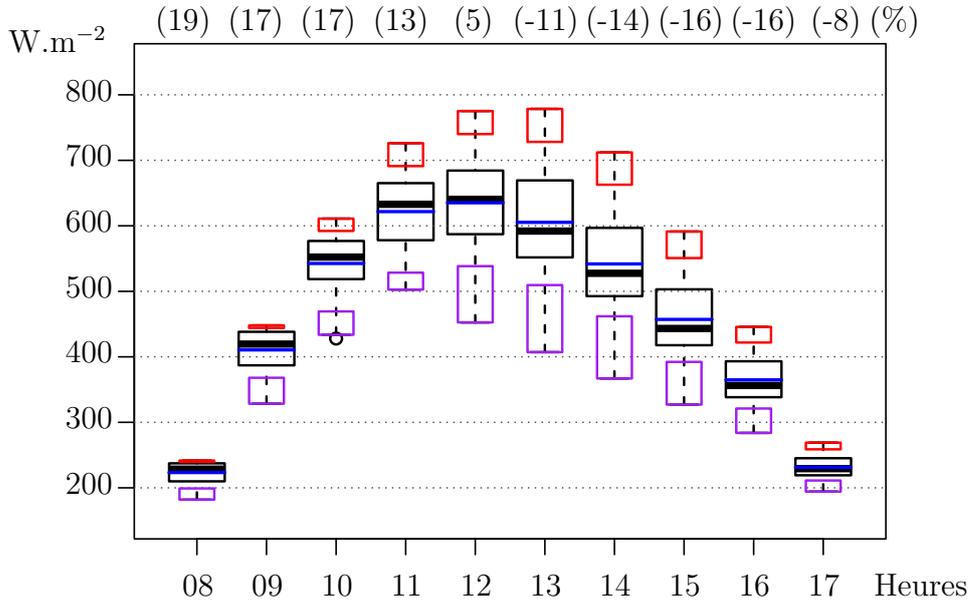


FIGURE III.4. – Évolution diurne de la distribution des pixels sur La Réunion selon des boîtes à moustaches; *Les boîtes à moustaches représentent la distribution des moyennes sur chacun des 89 pixels sur l'île de La Réunion. Leurs couleurs associées sont les mêmes qu'en figure III.1; Au-dessus du graphe, les valeurs entre parenthèses sont les pourcentages d'écart entre moyenne et médiane, normalisés par les écarts interquartiles respectifs.*

Répartition spatiale

La variation journalière présente des caractéristiques moyennes que nous complétons par une vision spatiale pour chaque heure. La figure III.5 présente la répartition moyenne des structures locales du rayonnement solaire global sur La Réunion, pour chacune des heures de la journée définie entre 8-17 h.

Tout d'abord, les maxima et minima solaires de l'île ne sont pas fixes spatialement au cours de la journée. Les maxima sont présents le matin entre 8-10 h à l'ouest et passent le reste de la journée sur la côte nord-nord-est $\{Z_{NE}^+\}$. Les minima quant à eux se déplacent de la zone du volcan $\{Z_V^-\}$ vers le rempart est de Salazie en $\{Z_{NE}^-\}$ pour finir la journée principalement sur les moyennes altitudes de la côte ouest à débordement nuageux $\{Z_O^-\}$. La matinée entre 8-10 h présente une séparation est-ouest selon la plus grande diagonale de l'île reliant le nord au sud. Un constat est similairement fait pour l'après-midi (13-17 h). Outre l'idée de variation, il est tout de même notable qu'en moyenne sur l'heure, on trouve une persistance des structures dont l'évolution se devine au cours des heures.

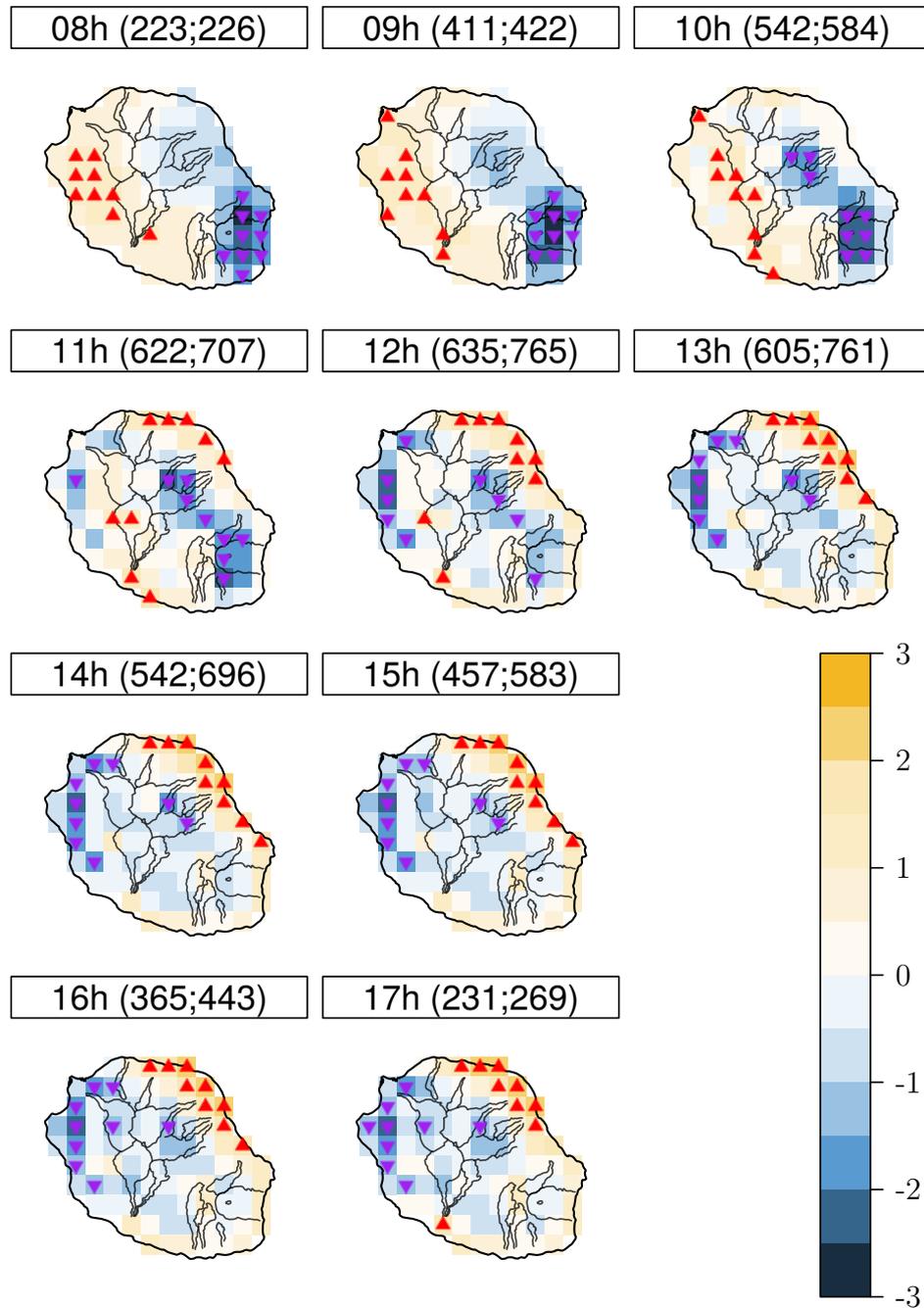


FIGURE III.5. – Évolution diurne des structures spatiales du rayonnement solaire global moyen de La Réunion; Une à une les grilles (excluant les pixels de la mer) ont été centrée réduite, chacune sur la base de son écart inter-quartile, visible en figure III.4; Sur la grille, des triangles informent de la localisation des extrema solaires sur l'île seulement (mer exclue) : en rouge (mauve) les 10% de valeurs les plus élevées (faibles); Dans chaque sous-titre le détail de l'heure concernée et, entre parenthèses à côté, la première valeur correspond la moyenne des pixels de La Réunion et la seconde est la moyenne de tous les pixels.

Dans l'ouest, le matin a donc relativement plus de potentiel solaire que l'est et, au cours de la journée, cette situation laisse place à des minima solaires à l'image des nuages orographiques réputés pour s'y former. En ce qui concerne le volcan à l'est, le matin est usuellement ennuagé par les nuages formés sur la mer et advectés sur l'île par les vents. On retrouve donc la temporalité des débordements orographiques qui apparaissent dans la journée mais aussi la temporalité de l'ennuagement au matin sur l'est de l'île et qui, au cours de la journée, se dégage. Sachant la saisonnalité de ces processus, nous détaillons aussi le potentiel solaire de La Réunion selon cet échelle de variabilité.

2.2. Le cycle saisonnier

De la même façon que pour le cycle diurne, nous détaillons les saisons selon leur valeur moyenne et distribution associée pour aboutir sur le détail des structures spatiales.

Modulation de la distribution

Pour chacun des mois de l'année, la figure III.4 présente la distribution des valeurs en considérant exclusivement les pixels de La Réunion et sur la base d'une moyenne sur les heures entre 8 et 17 h.

Les boîtes à moustaches n'ont pas la même hauteur. Entre juin et octobre, l'écart interquartile double en passant de sa valeur minimale à son maximum, soit de 39 à 82 $W.m^{-2}$. En moyenne en hiver, il est de 47 $W.m^{-2}$ contre 71 $W.m^{-2}$ en été. De plus, la moyenne est inférieure à la médiane pour l'hiver alors que c'est le contraire en été. Considérer la moyenne pour valeur représentative de toute La Réunion sous-estime donc le potentiel du matin et sur-estime celui de l'après-midi. En hiver, le potentiel est en moyenne minimal en juin mais on trouve des pixels ayant des valeurs aussi basse en juin qu'en juillet. En ce qui concerne l'été, la moyenne est maximale en décembre alors qu'on trouve le pixel ayant la valeur maximale en novembre. De la même façon que pour les jours, la vision moyenne des mois lisse totalement la répartition spatiale. Ainsi, considérer une valeur moyenne ou médiane par mois peut, selon la localisation, sous-estimer ou sur-estimer le potentiel solaire.

Répartition spatiale

La figure III.7 présente l'évolution au cours des mois de l'année des structures du rayonnement solaire global sur La Réunion. Selon la même statistique qu'en figure III.2, les triangles permettent de voir que les extrema solaires changent dans l'année.

Cependant, on note d'entrée que certains maxima et minima solaires de l'île sont spatialement fixés au cours de l'année. La zone $\{Z_{NE}^+\}$ persiste quelle que soit la saison avec toujours au moins 50 % des maxima en triangles rouges, avec son apogée en avril où elle en regroupe la totalité des 10 %. Par ailleurs, $\{Z_{NE}^+\}$ est un maximum solaire

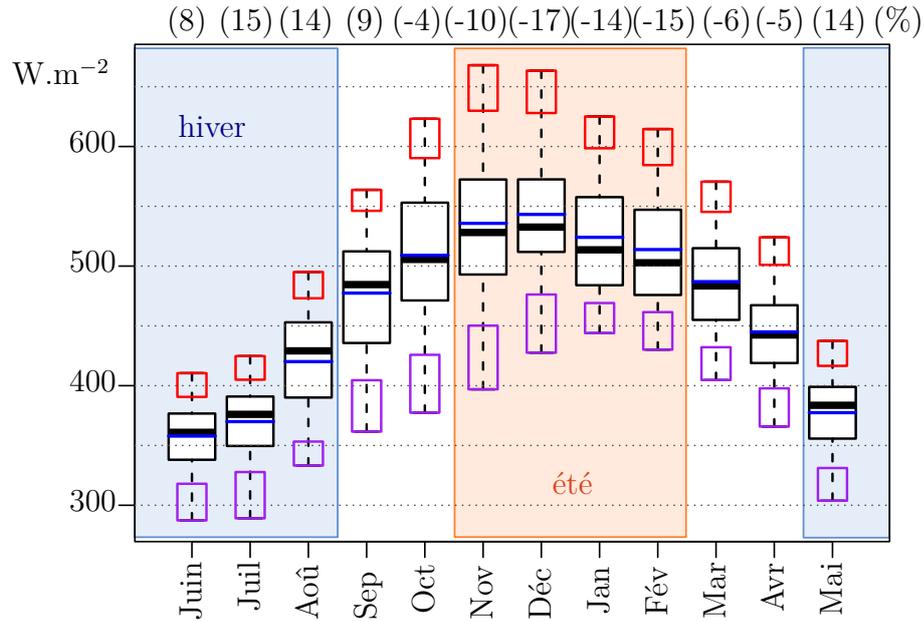


FIGURE III.6. – Évolution saisonnière de la distribution des pixels sur La Réunion selon des boîtes à moustaches ; Les boîtes à moustaches représentent la distribution des moyennes sur chacun des 89 pixels sur l'île de La Réunion. Leurs couleurs associées sont les mêmes qu'en figure III.1 ; Au-dessus du graphe, les valeurs entre parenthèses sont le pourcentage d'écart entre moyenne et médiane, selon l'écart interquartile.

quasiment toute l'année sauf pendant les mois d'intersaison d'avril et d'octobre. En ce qui concerne $\{P_C^+\}$, ce pixel est un maximum toute l'année sauf en été, soit de novembre à février inclus, et en avril. Les minima de $\{Z_O^-\}$ à débordement nuageux sont mois présents en hiver qu'en été, avec une surface maximale en début d'été pendant novembre et décembre. Similairement, la zone de $\{Z_{NE}^-\}$ est beaucoup plus étendue en été qu'en hiver, soit de 1-2 pixels en hiver jusqu'à 6 pixels en janvier. En novembre, $\{Z_{NE}^-\}$ s'étend jusqu'au Tremblet et regroupe la totalité des maxima de l'île. En ce qui concerne le volcan, c'est pendant l'intersaison de septembre-octobre que la zone présente un maximum solaire. Plus particulièrement, en octobre, elle présente un maximum et aucun minimum aux alentours. Pendant le reste de l'année, l'enclos du volcan et ses alentours proches sont des minima solaire, surtout en hiver pendant lequel plus de 50 % des minima solaires y sont localisés.

2. Mise en évidence de la complémentarité des deux composantes orbitales

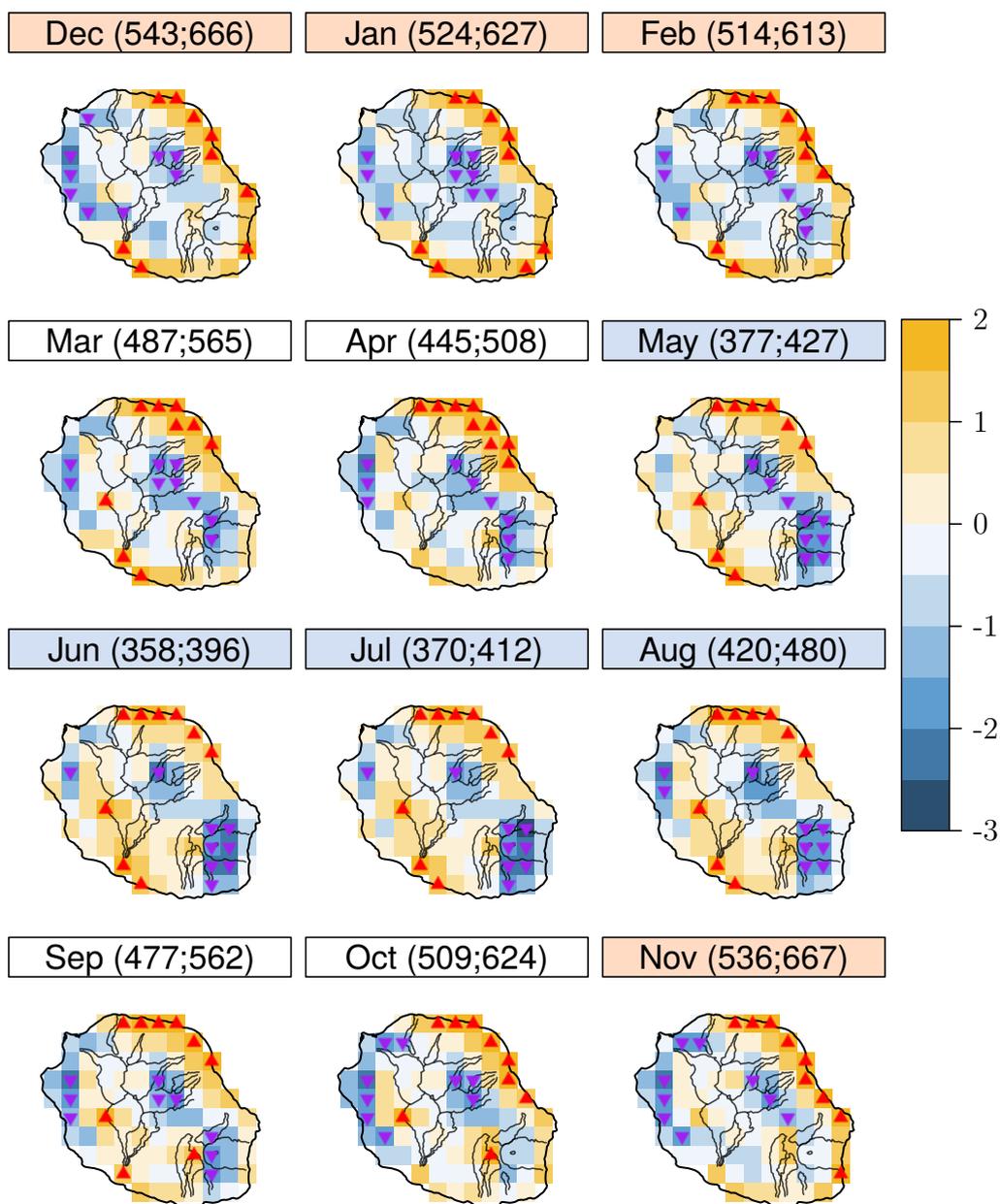


FIGURE III.7. – Évolution saisonnière des structures spatiales du rayonnement solaire global moyen de La Réunion ; Une à une les grilles (excluant les pixels de la mer) ont été centrée réduite, chacune sur la base de son écart interquartile, visible en figure III.6 ; Les couleurs des sous-titres se réfèrent aux saisons (été orange, hiver bleu) ; Pour le reste, les détails sont similaires à ceux de la figure III.5

Globalement, les minima et maxima sont associés à des zones qui dans l'année se diffusent plus ou moins spatialement. On ne trouve donc pas de zone à maximum qui présente à un moment un minimum. Ainsi, les saisons arbitrent la prépondérance relative

d'une localisation par rapport à tout le territoire mais n'en inverse pas son écart à la moyenne. Les zones côtières $\{Z_{NE}^+, Z_S^+\}$ et les deux pixels $\{P_C^+, P_V^+\}$ sont donc des localisations qui auront toujours le plus de potentiel solaire sur l'île. À l'inverse, $\{Z_{NE}^-\}$ est toute l'année associé à un ou plusieurs minima solaire. Il en est de même pour $\{Z_O^-\}$ qui s'étend plus au moins sur ses alentours avec un dégagement maximal en mai là où il ne présente aucun minimum. Pendant ce mois là, les débordements nuageux se développent très peu alors qu'en novembre-décembre, ils sont le plus étendu sur l'ouest.

2.3. L'apport des états moyens

Les saisons et les jours apportent deux informations complémentaires. En effet, la considération en moyenne, de l'une ou de l'autre, lisse les spécificités spatiales que nous avons détaillées précédemment. Le potentiel solaire oscille au cours des mois en alternant la prépondérance des structures locales pendant que, dans le jour, nous observons aussi des évolutions structurelles. Il semble alors pertinent de s'intéresser à l'évolution diurne de structures locales pour chacun des mois.

Pour considérer autant les apports d'un cycle que de l'autre, nous calculons les « états moyens » de la ressource solaire, en combinant alors les deux échelles de variabilité temporelle dans le jour et dans l'année. Dans une première vision, nous regardons la combinaison moyenne des deux composantes sur La Réunion. Puis, nous mettons en évidence l'apport de la considération de cette complémentarité.

Vision en moyenne

En figure III.8 est détaillée l'évolution des cycles diurne et saisonnier selon le calcul d'une moyenne sur les pixels de La Réunion pour chacune des combinaisons heure-mois possibles.

Les deux maxima solaires occurrent à 11 h en novembre et décembre, ce sont les deux seules valeurs au-dessus de 700 W.m^{-2} . Pour tous les mois de l'année, le potentiel solaire est maximale à 12 h, sauf pour les mois d'octobre à novembre. Les deux minima occurrent au cours de l'hiver, en juin et juillet.

Ainsi, le profil diurne varie selon la saison. La caractérisation selon les deux composantes orbitales prend donc un sens puisque même en associant La Réunion à une valeur moyenne, la saison module le comportement intra-journalier. La totalité des états moyens se trouvent en annexe. Ci-suit nous estimons l'apport de cette combinaison selon la présentation des différences pour deux mois choisis.

Modulation spatiale

Pour mettre en exergue les apports des états moyens, nous considérons les écarts à l'évolution diurne annuelle qui a été présentée en figure III.5. Nous choisissons de

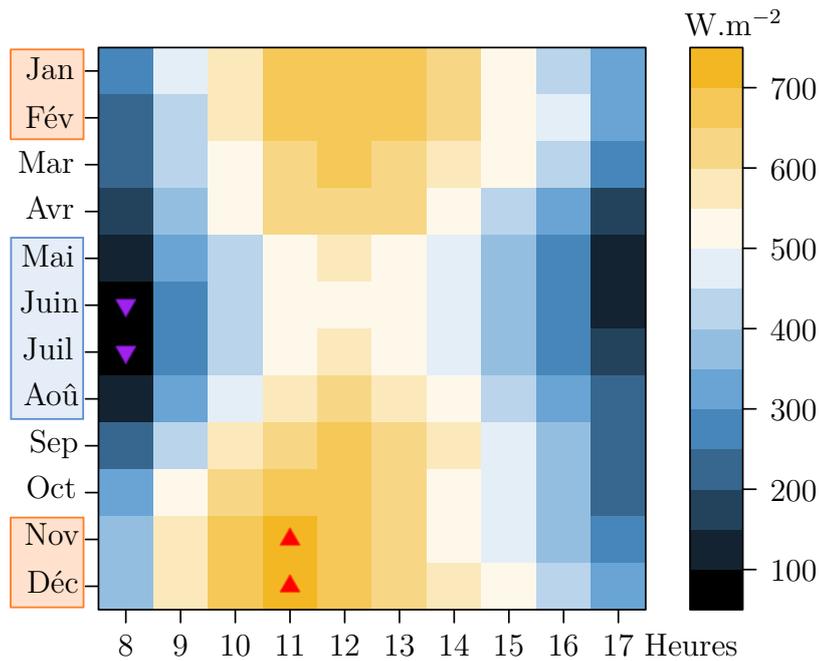


FIGURE III.8. – Évolution moyenne des deux cycles orbitaux de La Réunion; *Chaque valeur est la moyenne des 89 pixels associées à La Réunion; Les deux maxima sont localisés en triangles rouges montants et les minima en triangles mauves descendants; Les mois sont encadrés et colorés selon la saison (été en orange, hiver en bleu)*

présenter les mois de décembre et de juin à l'image des différences entre l'été et l'hiver. De la même façon que précédemment, nous estimons les distributions moyennes au travers de boîtes à moustaches sur les écarts entre mois et moyenne annuelle. Ensuite, nous visualisons la répartition spatiale de ces écarts avec la présentation des grilles horaires moyennes pour chacun des deux mois choisis.

Le mois de décembre est à 77 W.m^{-2} supérieur à la moyenne annuelle.

Il a été défini comme l'un des deux mois les plus solaires de l'île (figures III.6 et III.8) et sera donc le représentant du potentiel solaire maximal sur l'année.

En figure III.9, nous visualisons l'évolution horaire de cet écart moyen mais aussi des autres valeurs relatives aux boîtes à moustaches. De façon générale, moyennes et médianes présentent des écarts faibles entre $-4,1$ et $+4,2 \text{ W.m}^{-2}$. Cependant, on trouve des écarts moins importants associés à des pourcentages relativement élevés, à l'image de la concentration des écarts sur un écart interquartile plus court (par exemple, on a $-1,7$ à 8 h qui représente -23% de l'écart interquartile).

L'évolution diurne annuelle est au plus proche du mois de décembre à 14 h avec moyenne et médiane respectivement à 28 et 25 W.m^{-2} . Au contraire, on trouve l'écart maximal à

10 h avec un pixel à la valeur de 189 W.m^{-2} . À 8 et 9 h, l'écart à l'évolution annuelle est le plus important, selon les moyennes et médianes toutes deux à 144 W.m^{-2} .

Plus globalement, on remarque que les boîtes à moustache du matin sont plus éloignées du comportement moyen que celles de la fin de journée. Cependant, l'écart interquartile est minimal pour les heures extrêmes de la journée. Dans la journée, on trouve les boîtes à moustaches les plus étendues à l'image d'une distribution plus large que les autres heures. De plus, on remarque que, entre 11 et 15 h, il y a des valeurs inférieures au comportement annuel bien que ce soit l'été austral. Ainsi, bien qu'en été, des pixels ont des valeurs plus faibles en décembre qu'en moyenne sur l'année. Ce constat nous oriente dans l'idée qu'il y a un impact des saisons au-delà d'une simple modulation de l'amplitude de la ressource solaire.

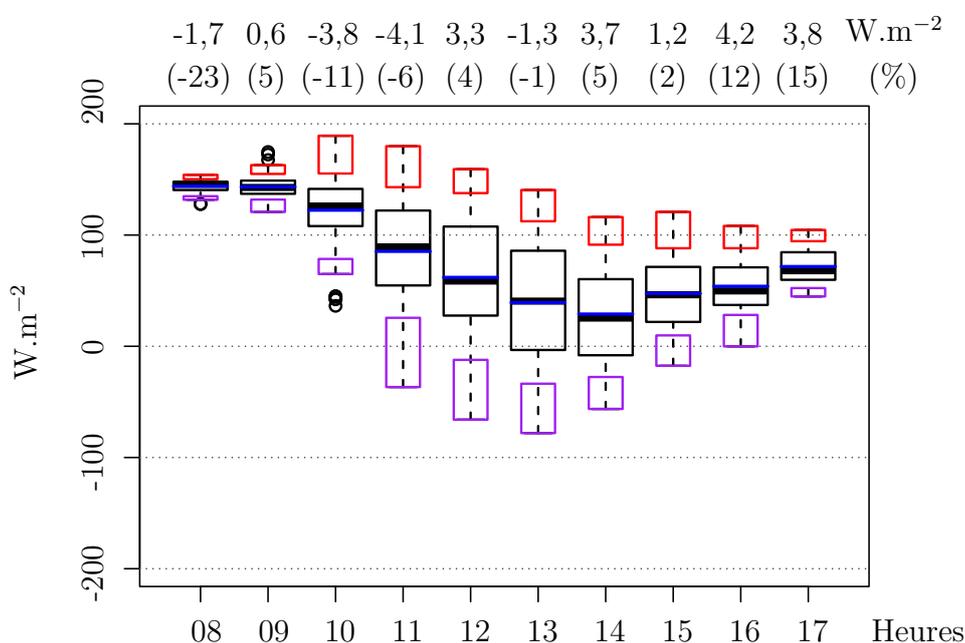


FIGURE III.9. – Écarts entre l'évolution diurne moyenne et celle du mois de décembre ; Les boîtes à moustaches représentent la distribution des moyennes sur chacun des 89 pixels sur l'île de La Réunion. Leurs couleurs sont les mêmes qu'en figure III.1 ; Au-dessus du graphe, les valeurs sont les écarts en W.m^{-2} entre moyenne et médiane des boîtes à moustaches, et les valeurs entre parenthèses sont ces mêmes écarts mais normalisés selon l'écart interquartile.

Bien que représentative de la distribution des écarts entre l'évolution diurne du mois et l'annuelle, la figure III.9 n'extrait pas spatialement l'apport de l'emploi des états moyens. Pour se faire, nous normalisons chaque heure de l'évolution diurne de décembre en centrant sa distribution selon sa moyenne et en la réduisant ensuite selon son écart

interquartile. Nous lui soustrayons son équivalent pour l'année (présentée en figure III.5). Ainsi, les changements de contributions à la moyenne vont se détacher de l'écart interquartile au même titre que les fortes amplifications. Visuellement, une zone aura des valeurs élevées si sa contribution à la moyenne est très différente entre l'année et le mois décembre. Les valeurs entre ± 1 sont donc celles contenues dans les 50 % représentatifs de la distribution alors que les valeurs au-delà seront celles dont le comportement en décembre évolue significativement par rapport celui sur l'année.

La figure III.10 présente donc les évolutions notables entre le mois de décembre moyen et le comportement annuel. On remarque que 7 sur les 10 grilles n'ont pas de pixels colorés. Les heures concernées ont donc un comportement relativement proche de la moyenne annuelle. Seules les heures entre 10 et 12 h ont des pixels colorés selon deux zones à considérer : la zone à débordement nuageux $\{Z_O^-\}$ et les alentours du volcan $\{Z_V^-\}$.

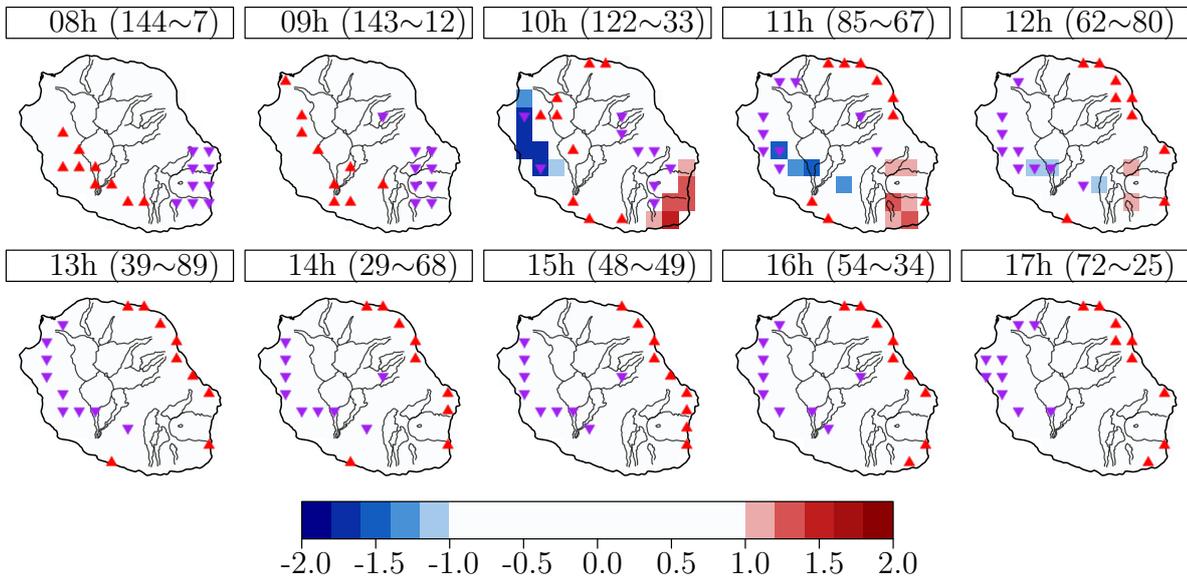


FIGURE III.10. – Mise en évidence de la contribution de l'utilisation des états moyens dans le cas du mois de décembre ; *Le code des triangles est le même que pour les figures précédentes, pour les valeurs de rayonnement solaire du mois de juin. Entre parenthèse dans chaque sous-titre, deux valeurs sont la moyenne de la grille et l'écart interquartile à l'image de la normalisation, en $W.m^{-2}$*

En ce qui concerne $\{Z_O^-\}$, la zone est associée à des couleurs négatives à 10 h. En plus d'y localiser des minima du mois (triangle en mauve), cette zone a des valeurs moyennes annuelles entre $\pm 0,5$ à 10 h sur la figure III.5. Sur l'année, cette zone a donc un potentiel similaire à 50 % de la distribution alors que, pendant décembre, elle fait partie des 10 %

d'extrêmes négatifs. Au cours des heures de la matinée, cette zone négative s'étend vers le sud-est tout en s'estompant. Sur la figure III.5 de l'évolution annuelle, le débordement nuageux s'observe légèrement à partir de 11 h et de façon plus prononcée à 12 h. Ainsi, pour le mois de décembre, il est donc question d'un débordement nuageux qui commence plus tôt que le comportement moyen annuel. En été, les vents synoptiques sont d'intensité plus faibles et la convection est d'autant plus renforcée. En conséquence, le débordement nuageux en $\{Z_O^-\}$ a un début anticipé par rapport à la moyenne annuelle.

Pour la zone de $\{Z_V^-\}$, ce sont des valeurs positives (en rouge) que l'on trouve localisées en figure III.10 entre 10-12 h. Ainsi, le comportement en décembre est significativement supérieur à celui de l'évolution annuelle. Sur la figure III.5 de l'évolution annuelle, on note que $\{Z_V^-\}$ compte 6 des 9 minimas en triangle mauve à 10 h, puis 1 seul minimum à 12 h pour finalement perdre en intensité tout au long de la journée. Le comportement estival est différent avec des minimas qui s'éloignent plus rapidement de la zone dès 10 h. Les vents moins forts d'été apportent donc moins de nébulosité sur l'île au matin de juin qu'en moyenne sur l'année.

Pour décembre, les états moyens permettent finalement de mieux représenter l'évolution des structures dans le jour, à savoir le débordement nuageux de $\{Z_O^-\}$ qui occure plus tôt dans la matinée mais aussi, en parallèle, le dégagement plus rapide des alentours de $\{Z_V^-\}$ alors moins encombrés.

Le mois de juin est inférieur de -103 W.m^{-2} à la moyenne annuelle.

Il a été défini comme étant le mois le moins solaire de l'île (figures III.6 et III.8) et sera donc le représentant du potentiel solaire minimal sur l'année. Le même détail que pour décembre est fait pour juin.

En figure III.11, nous visualisons donc l'évolution horaire des écarts moyens et autres valeurs représentatives des boîtes à moustaches. La moyenne des écarts à l'annuelle ne présente pas de différences importantes à la médiane avec des valeurs allant de $-8,7$ à $2,3 \text{ W.m}^{-2}$. Comme pour le mois de décembre, les pourcentages sont généralement plus élevés là où l'écart interquartile est plus concentré.

Les moyennes de l'évolution diurne annuelle sont au plus proche de celles du mois de juin à 13-14 h avec moyenne et médiane respectivement à -80 et -72 W.m^{-2} . En parallèle, on y trouve aussi de grands écarts sur les minima. Cependant, c'est à 12 h que l'on trouve l'écart maximal de juin avec un pixel à -198 W.m^{-2} en dessous de sa moyenne annuelle. Plus globalement, on remarque que les boîtes à moustache du matin sont plus éloignées du comportement moyen que celles de la fin de journée. Dans la journée, on trouve les boîtes à moustaches les plus étendues à l'image d'une distribution plus large que les autres heures. De plus, on trouve des écarts positifs qui sont à l'image de pixels dont potentiel solaire de juin est supérieur qu'à celui de l'année. Ainsi, en hiver aussi, l'impact des saisons est plus complexe qu'une simple modulation de l'amplitude de la

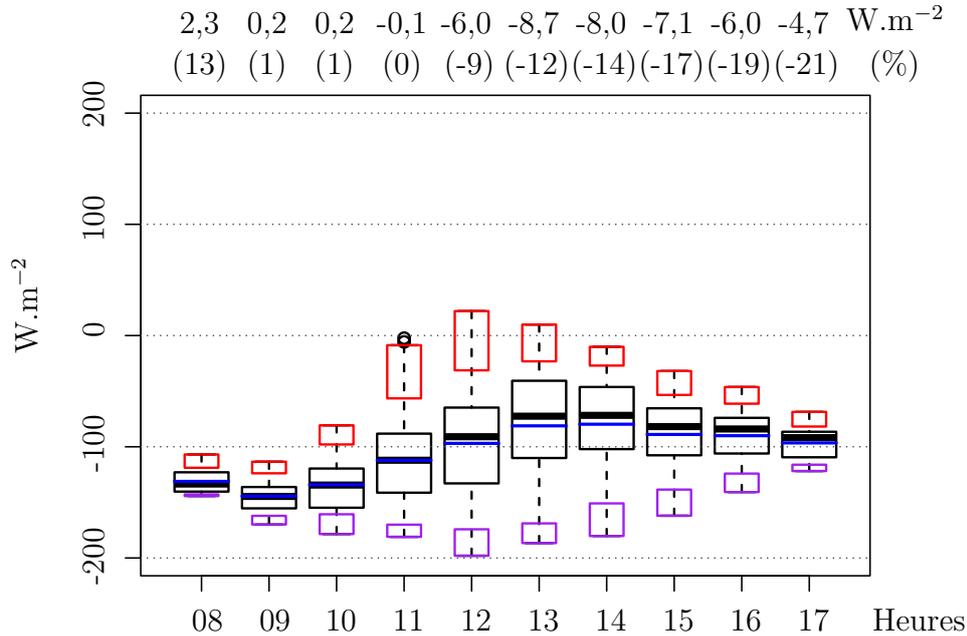


FIGURE III.11. – Écarts entre l'évolution diurne moyenne et celle du mois de juin ; Les boîtes à moustaches représentent la distribution des moyennes sur chacun des 89 pixels sur l'île de La Réunion. Leurs couleurs sont les mêmes qu'en figure III.1 ; Au-dessus du graphe, les valeurs sont les écarts en $W.m^{-2}$ entre moyenne et médiane des boîtes à moustaches, et les valeurs entre parenthèses sont ces mêmes écarts mais normalisés selon l'écart interquartile.

ressource solaire.

Pour mieux visualiser les écarts entre l'évolution diurne de juin et de l'annuelle, la figure III.10 détaille spatialement l'apport de l'emploi des états moyens. De la même façon que pour décembre, nous normalisons chaque heure de l'évolution diurne de juin en centrant sa distribution selon sa moyenne et en la réduisant ensuite selon son écart interquartile. Nous lui soustrayons ensuite son équivalent pour l'année (présentée en figure III.5) et estimons alors les écarts significatifs.

La figure III.12 présente donc les évolutions notables entre le mois de juin moyen et le comportement annuel. Les 2 des 10 grilles de la journée ont un comportement proche de la moyenne annuelle avec au maximum un pixel coloré dont la valeur est proche de -1 . Sur les 8 autres grilles, les deux mêmes zones que pour décembre sont à considérer, soit : la zone à débordement nuageux $\{Z_O^-\}$ et le volcan $\{Z_V^-\}$. On trouve aussi quelques pixels colorés sur une partie de la côte solaire du nord-ouest $\{Z_{NE}^+\}$.

Sur l'ouest, la zone $\{Z_O^-\}$ est associée à des couleurs positives pendant plusieurs heures de la journée dont l'intensité est maximale à 11 et 12 h, puis à 17 h. À 11 h, on y trouve

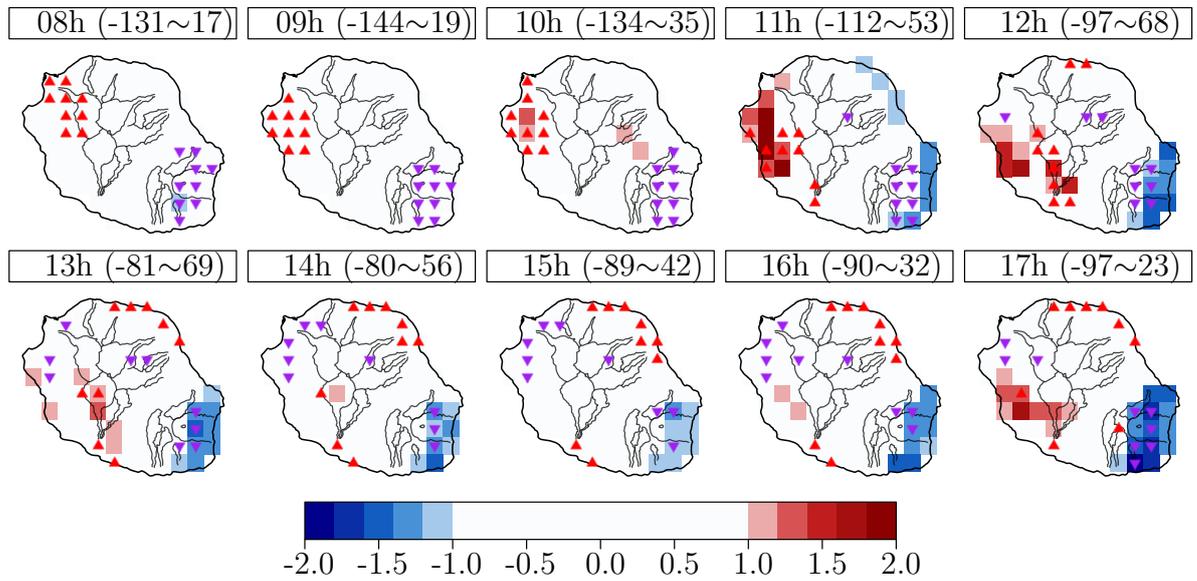


FIGURE III.12. – Mise en évidence de la contribution de l'utilisation des états moyens dans le cas du mois de juin ; *Le code des triangles est le même que pour les figures précédentes, pour les valeurs de rayonnement solaire du mois de juin. Entre parenthèse dans chaque sous-titre, deux valeurs sont la moyenne de la grille et l'écart interquartile à l'image de la normalisation, en W.m^{-2} .*

même plusieurs maxima du mois en triangles rouges. Les deux heures d'après, ce sont les pixels de part et d'autre de $\{Z_O^-\}$ qui sont en rouge (de façon plus prononcée à 12h qu'à 13h). On note aussi l'apparition sur la partie nord de $\{Z_O^-\}$ d'un triangle mauve de minima solaire du mois. Cette zone est donc plus solaire qu'à son habitude à l'image d'un ennuagement plus tardif. En effet, les débordements nuageux sont modulées par les vents d'hiver qui sont plus importants qu'en été.

Sur la zone $\{Z_V^-\}$ du volcan sont localisées des valeurs négatives à partir de 11h et des triangles mauves pendant toute la journée type de juin. Ainsi, $\{Z_V^-\}$ a un comportement hivernal qui est significativement inférieur à celui de l'évolution annuelle. Sur la figure III.5, on note qu'après 12h il n'y a plus aucun des triangles mauves localisés en $\{Z_V^-\}$. Le comportement en hiver est donc de contribution différente et $\{Z_V^-\}$ est la zone dont le potentiel solaire est le plus bas en juin. Ce constat vient en écho avec le débordement nuageux de $\{Z_O^-\}$ qui est moins présent en hiver.

Pour juin, les états moyens permettent tout autant que pour décembre de mieux représenter l'évolution des structures spatiales. Le débordement nuageux de $\{Z_O^-\}$ qui est modéré en hiver déplace la zone à minima solaire sur le volcan et ses alentours en $\{Z_V^-\}$.

Récapitulatif

Le potentiel solaire dépend de fait des composantes orbitales. Cependant, cette dépendance ne s'exprime pas seulement à travers une simple modulation de la ressource. En effet, des structures locales évoluent différemment dans l'année mais aussi dans le jour. Ces variations sont complexes et il est nécessaire de combiner les deux composantes de la ressource solaire pour mieux la caractériser.

Pour décembre et juin, nous avons jaugé l'apport des états moyens en estimant les zones dont les contributions changent significativement. Nous avons mis en évidence la variabilité du comportement du potentiel solaire sur l'ouest en $\{Z_O^-\}$ et sur l'est en $\{Z_E^-\}$. Cependant, la moyenne annuelle contient intrinsèquement les informations de tous les mois. Ainsi, les comportements que l'on trouve en moyenne dans l'année et qui sont accentués dans le mois sont aussi une raison d'utiliser les états moyens pour caractériser la ressource solaire.

3. Régionalisation de la ressource solaire moyenne

Nous caractérisons le rayonnement solaire de La Réunion sur la base des deux composantes orbitales. Ainsi, nous regroupons entre eux les 360 pixels de la grille satellite au regard de leurs 120 états moyens, selon la méthodologie présentée en section 2.1 du chapitre II.

3.1. Structuration spatiale

Tout d'abord, nous choisissons selon combien de classes nous voulons caractériser le potentiel solaire moyen. Pour se faire, nous comparons la répartition des classifications de 3 à 11 classes qui sont représentées en figure III.13. (en annexe E, les cas de 2 à 19 classes sont en figure E.5).

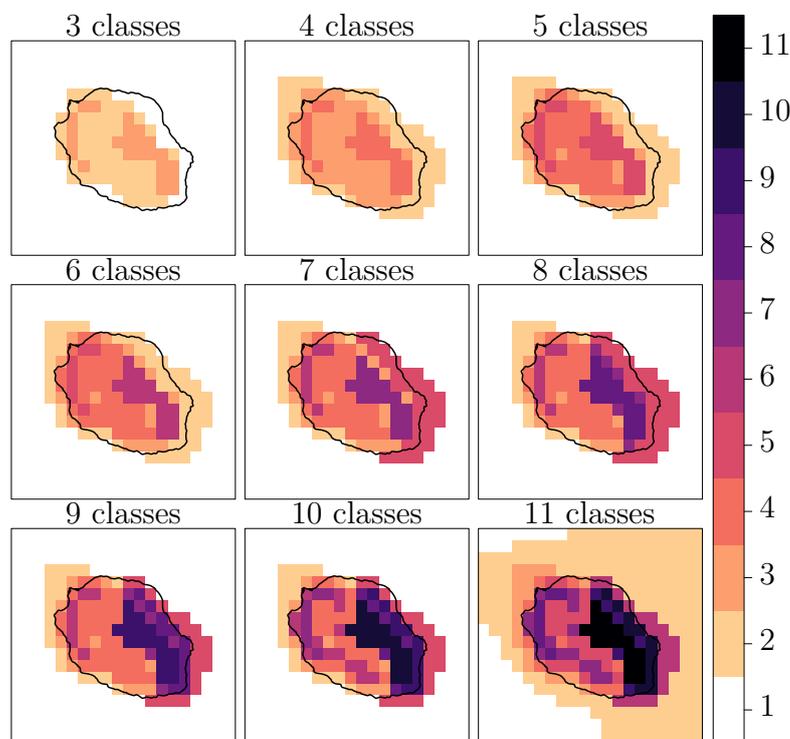


FIGURE III.13. – Répartition spatiale des cas de partitionnement de 3 à 11 classes ; Chaque classe est associée à une couleur selon les niveaux de l'échelle de couleurs à droite.

À partir du cas à 6 classes, nous trouvons une séparation est-ouest significative qui fait écho aux constats des sections précédentes. De 6 à 10 classes, les structures sur l'île sont donc affinées selon cette séparation est-ouest mais aussi avec une discrimination

apparente de l'altitude. Au-delà, le passage de 10 à 11 classes est fait en séparant les pixels de la classe 1 qui est alors localisée sur la mer. Le critère d'agrégation en vient donc à répartir les pixels de la classe 1 en deux groupes distincts. Le cas de 10 classes présente donc des structures sur l'île, selon les classes 2 à 10, dont la cohésion est plus élevée que celle de la classe 1. Cependant, cette séparation de la mer présente peu d'intérêt dans le cas de notre étude mais ce constat nous amène à choisir le nombre de 10 classes. En effet, le potentiel solaire moyen de la mer étant moins variable que celui de La Réunion, ce cas de partitionnement nous assure une certaine cohésion des zones de l'île en comparaison au comportement la mer.

Le cas de partitionnement à 10 groupes est donc choisi et présenté en figure III.14. Tout d'abord, nous notons que la classe de couleur blanche regroupe 233 pixels sur la mer. Les 127 restants caractérisent l'île et ses proches alentours en 9 classes. Sur l'île, on distingue une répartition est-ouest selon des couleurs orangées pour l'ouest et des verts pour l'est.

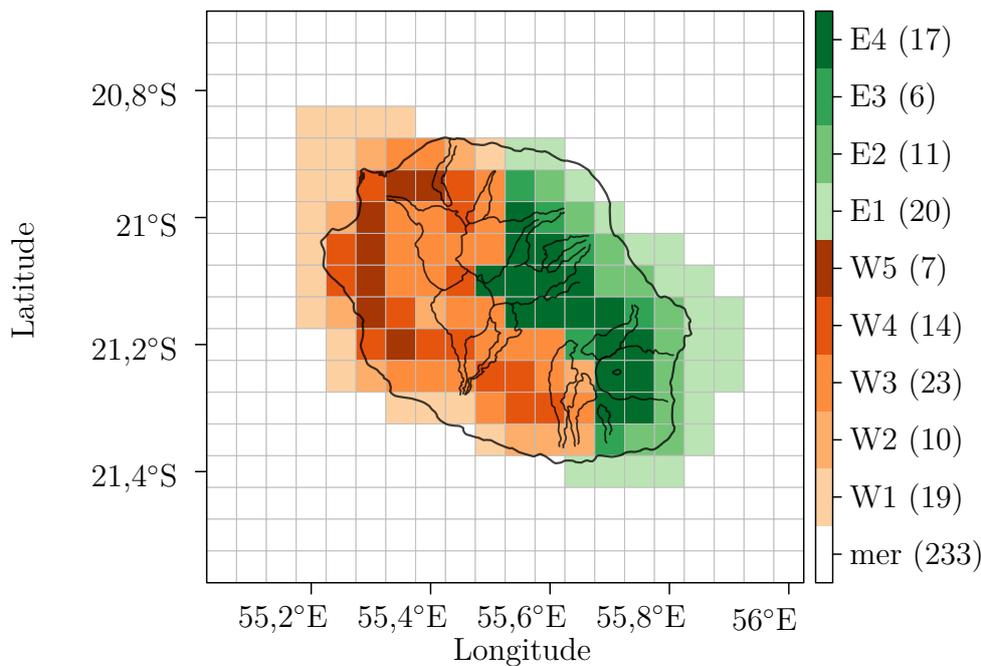


FIGURE III.14. – Classification de la ressource solaire moyenne de La Réunion ; *L'échelle de couleurs associe les verts aux 4 classes en est (E1 à E4) et les oranges aux 5 classes en ouest (W1 à W5, avec W pour « West »)*; *Entre parenthèses à côté du nom des classes est précisé le nombre de pixels contenus dans chacune d'elle. En annexe E, une figure présente chaque classe dans un graphe.*

De plus, on dégrade de vert clair à vert foncé les classes E1 à E4 sur l'est de l'île,

à l'image de leurs altitudes croissantes. On remarque que les deux zones $\{Z_{NE}^-, Z_V^-\}$ à minima solaire sont regroupées dans la classe E4. La classe E3 est parsemée de part et d'autre de la zone de E4 et la classe E2 est côtière à l'est volcan en remontant légèrement en altitude vers le nord-est, au-dessus des maxima de $\{Z_{NE}^+\}$. De plus, la zone $\{Z_{NE}^+\}$ à maxima solaire est dans la classe E1 avec une continuité vers le sud-est dans la mer, sur les proches alentours côtiers en dessous du volcan.

En ce qui concerne l'ouest, le dégradé est fait selon la zone à débordement nuageux $\{Z_O^-\}$ qui est associé à la classe W5. La zone à haut potentiel solaire $\{Z_S^+\}$ est associée à la classe W1 qui, elle aussi, est prolongée dans la mer mais vers le nord-ouest. La toute pointe de Saint-Paul appartient aussi à classe W1. Le pixel du volcan $\{P_V^+\}$ est contenu dans la classe W2 avec le pixel $\{P_C^+\}$ au bord ouest du cirque de Cilaos. On remarque que les cirques sont presque totalement contenus dans la classe W3. Le point culminant de l'île du Piton des Neiges est associé à W4 regroupant aussi les alentours côtiers de $\{Z_O^-\}$ et des pixels plus haut en altitude au-dessus de Saint-Pierre.

Cette séparation en zones met en évidence une différenciation nette entre les parties est et ouest de l'île qui sont dites sous le vent et au vent (Jumaux et al., 2011; Soler, 1997). De plus, on remarque une sorte de concentricité des classes d'est et d'ouest selon leur zone respective à minima solaires. Pour consolider la cohérence de cette répartition spatiale, nous caractérisons par la suite les classes obtenues.

3.2. Caractérisation des zones solaires

Notre classification se basant sur les deux composantes orbitales de la ressource solaire, nous jugeons pour chacune des classes les caractéristiques et spécificités temporelles de leurs états moyens.

Distribution du potentiel moyen solaire

Dans un premier temps, la caractérisation des différentes classes est faite au regard de leur distribution. Nous regroupons donc les états moyens de tous les individus d'un groupe et calculons des boîtes à moustache pour chacun de ces groupes. La figure III.15 compare les distributions de chaque classe (localisation spatiale en figure III.14 ou en annexe E.6) mais aussi la distribution des états moyens de tous les pixels sur l'île.

Les boîtes à moustaches explicitent donc la distribution de chacune des valeurs des états moyens, soit pour une classe de n individus, une distribution contient $n(\text{individus}) \times 10(\text{heures}) \times 12(\text{mois})$. Par classe, nous calculons aussi le potentiel moyen pour chaque pixel comme étant la moyenne de tous ses états moyens. La distribution de ces moyennes est représentée par les rectangles verts. Les classes sont bien séparées si l'on considère ces rectangles verts, cependant chaque rectangle est calculé sur autant de valeurs qu'il y a d'individu (cf. valeurs entre parenthèses en figure III.14).

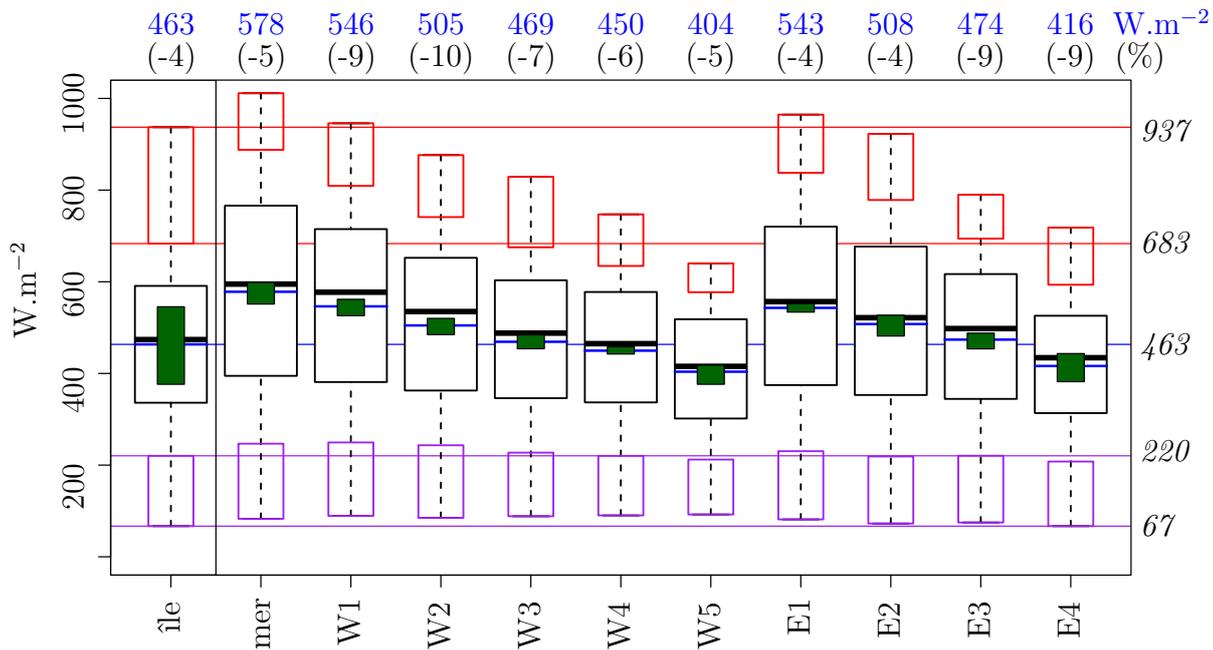


FIGURE III.15. – Distribution des états moyens de l'île et de chacun des 10 classes de la figure III.14; Les valeurs au-dessus du graphe sont la moyenne de la distribution (au-dessus, en bleu) et le pourcentage d'écart entre moyenne et médiane selon l'écart inter-quartile (entre parenthèse). Les lignes horizontales sont la prolongation des statistiques de l'île explicitées en italique du côté droit du graphe. Le code des boîtes à moustaches est détaillée en figure III.4. Les rectangles verts contiennent la distribution des moyennes des états moyens.

De façon générale, les distributions se ressemblent et présentent une symétrie selon leur moyenne. On remarque tout de même que chacune des boîtes à moustaches a une moyenne inférieure à sa médiane, à l'image d'une distribution un peu plus étendue sur les minima. Un écart maximal entre moyenne et médiane est obtenu dans la classe W2 avec -10% de médiane à moyenne. Cette valeur relativement faible dénote d'un certain équilibre dans le choix du filtre des heures. En effet, les heures de 8 à 17 h ne contiennent pas les valeurs de nuits, de lever et de coucher de soleil qui viendraient étendre encore plus les minima.

En regardant plus précisément les moyennes entre elles, on remarque plusieurs choses. Les classes d'ouest vont de W1 à W5, à l'image de leur potentiel solaire décroissant, allant de 546 à 404 W.m^{-2} . Il en est de même pour les classes d'est de E1 à E4 sur la plage de 543 à 416 W.m^{-2} . Les écarts entre maxima et minima sont globalement les mêmes dans l'est et dans l'ouest de l'île, respectivement 130 et 142 W.m^{-2} . Ils sont

cependant découpés d'un côté en 4 classes (E) et de l'autre en 5 (W).

Les plus faibles moyennes (en bleu) comptent les classes E4, W4 et plus particulièrement W5. Cette dernière a le plus faible potentiel solaire avec une moyenne de 404 W.m^{-2} . On note aussi que W5 a les maxima les plus faibles avec un maximum de 640 W.m^{-2} . Spatialement, W5 contient la totalité de la zone à débordement nuageux de l'ouest $\{Z_O^-\}$ définie en figure III.2. Le deuxième potentiel le plus faible est celui de E4 qui contient la zone du volcan $\{Z_V^-\}$ et les altitudes au nord-est $\{Z_{NE}^-\}$. Ainsi, les trois minima solaires définis en figure III.2 se retrouvent dans W5 et E4.

En ce qui concerne les forts potentiels solaires, ce sont les classes W1 et E1 qui ont les moyennes les plus élevées, respectivement de 546 et de 543 W.m^{-2} . De plus, leur maxima (en rectangles rouges) ont leur bord supérieur au-dessus du maximum de l'île (en ligne rouge), à l'image de certains pixels marins contenus dans ces classes. La classe E1 contient une grande partie des pixels de $\{Z_{NE}^+\}$ (les autres sont en E2) et la classe W1 contient la zone $\{Z_S^+\}$.

Finalement, les extrema de la figure III.2 sont contenus dans les classes numérotées W1 et W5 pour l'ouest et E1-2 et E4 pour l'est. Cependant, connaissant les variabilités diurne et saisonnière, nous complétons notre description par la description des deux composantes orbitales.

Modulation selon les composantes orbitales

Le partitionnement a été fait sur la base d'une comparaison des pixels selon leurs états moyens. Nous calculons donc les 120 états moyens de chacun des 10 groupes obtenus, sur la base d'une moyenne regroupant tous les individus-pixels qui y sont contenus.

Nous mettons en évidence la variabilité des composantes orbitales de chaque classe par deux représentations graphiques. Un premier graphe détaillera le pourcentage d'écart entre les 120 états moyens de la classe et ceux de l'île (en figure III.8 sont représentés les états moyens de l'île). Un second graphe représentera les écart-types associés, que l'on rapportera de la même façon aux moyennes de l'île pour parler en pourcentage. Il est donc question de comparer chacun des états moyens de chaque classe à ce que l'on a en moyenne sur l'île. Soit pour une heure h et un mois m , on a :

$$\Delta_{\%em}(m, h) = \frac{em_{Cl_i}(m, h)}{em_{île}(m, h)} - 1 \quad (\text{III.1})$$

avec $\left| \begin{array}{l} em_{Cl_i}(m, h) \\ em_{île}(m, h) \end{array} \right. \begin{array}{l} : \text{l'état moyen de l'heure } h \text{ et du mois } m \text{ de la classe } i, \\ : \text{l'état moyen de l'heure } h \text{ et du mois } m \text{ calculé sur les 89} \\ \text{pixels de l'île (en figure III.8).} \end{array}$

3. Régionalisation de la ressource solaire moyenne

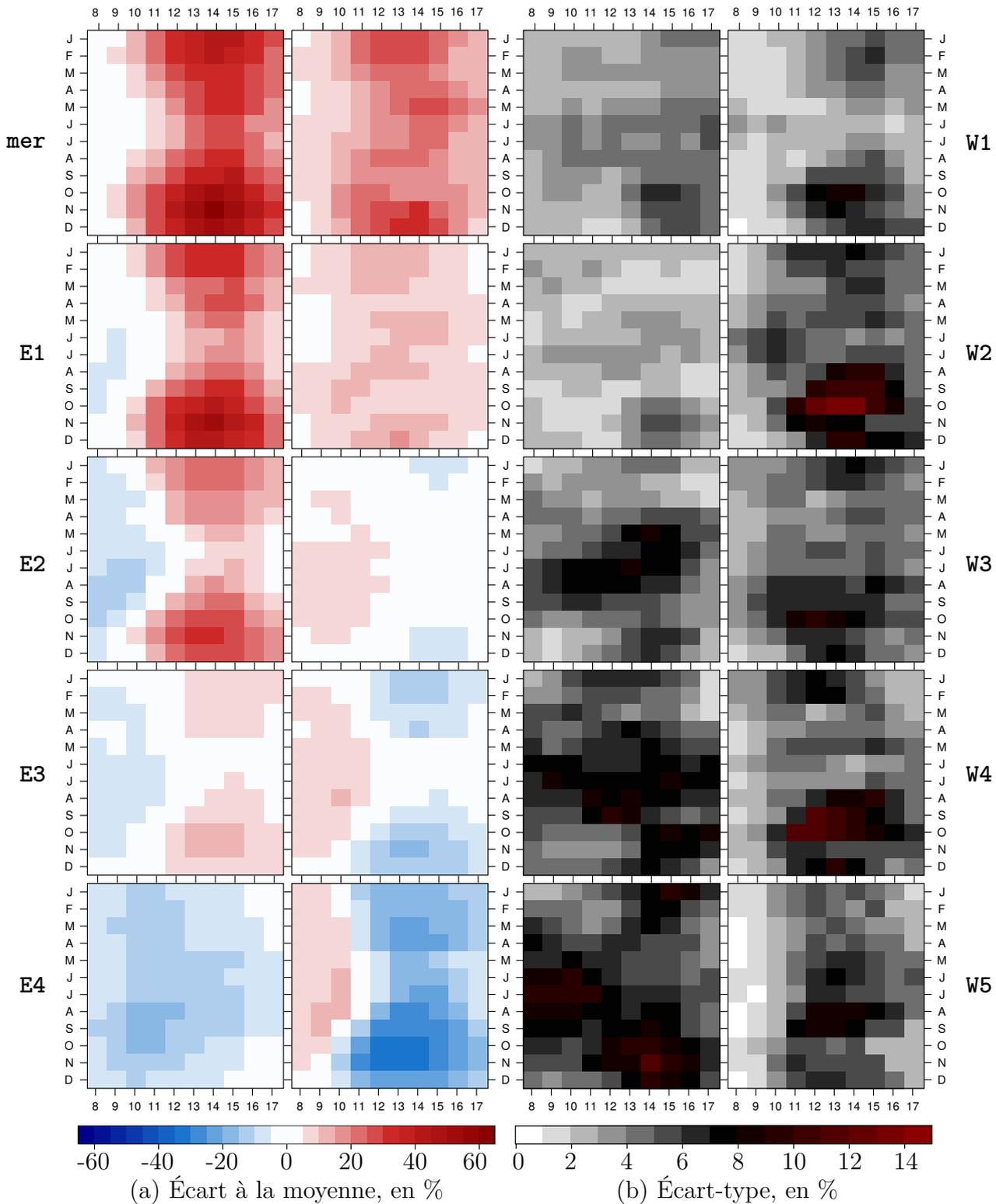


FIGURE III.16. – Caractérisation de chaque classe selon son écart au comportement moyen de l'île et les écart-types associés; *Les 10 graphes de gauche sont dans le même ordre que ceux de droite.*

Ainsi, nous jugeons pour chaque combinaison heure \times mois possible quelle sera la contribution de la classe à la moyenne de l'île et à quel moment la variabilité interne de la classe sera la plus grande. En figure III.16 se trouve le détail de ces deux types de graphiques. Dans un premier temps, nous présenterons les figures des écarts à la moyenne, puis celles des écart-types.

Au regard des **écarts à la moyenne**, nous avons décidé de regrouper les cinq classes d'est et la mer à gauche et les cinq classes d'ouest à droite. De chacun de ces deux côtés, on remarque une sorte de « développement » du potentiel solaire allant de la classe placée en bas vers celle tout en haut. Le terme de « développement » fait référence à l'idée que l'on pourrait passer les classes une à une en pensant qu'elles s'enchaînent dans le temps. Cependant, il n'est pas question d'un enchaînement dans le temps mais selon les localisations des classes. Pour les classes d'est, ce développement peut prendre le sens des altitudes croissantes/décroissantes.

Ainsi, la classe de la mer a un comportement supérieur mais similaire à celui de E1, le graphe juste en dessous. On leur remarque à toutes les deux (mer et E1) les mêmes formes, aussi bien dans les mois que dans les jours, avec un maximum qui occure à 14 h en septembre. Cependant, E1 présente quelques valeurs négatives en début de matinée de juin à octobre. De la même façon, les formes de E2 correspondent à celles de E1 de façon atténuée pour les écarts positifs et amplifiée pour les écarts négatifs. Pour le lien entre E2 et E3, la classe E3 présente des minima en bleu qui sont moins élevés que ceux de E2. En ce qui concerne E4, c'est la seule des classes qui présente exclusivement des valeurs négatives. Cependant, E4 a tout de même une alternance similaire aux autres classes d'est. Finalement, pour les classes de la mer et d'est, le matin présente des valeurs inférieures à celle de l'après-midi avec, en parallèle, avec une saisonnalité marquée. En effet, les maxima sont centrés sur les mois de novembre-octobre entre 13-15 h sauf pour E4 dont les maxima sont différés en décembre vers 15 h.

De la même façon que pour les classes d'est, nous détaillons le « développement » des graphes d'ouest. La classe W2 est similaire à la classe W1 avec des maxima dans les heures de 12 à 15 h pour l'été et plus tardivement dans la journée pendant l'hiver. Cependant, ces deux classes sont de contribution positive ou nulle à la moyenne de l'île. Elles ont donc toutes les deux un potentiel solaire supérieur au comportement moyen de l'île. De W2 à W3, il y a un changement notable sur les maxima et minima des écarts aux états moyens de ces deux classes. Les maxima sont déplacés vers les matins d'hiver et il y a une apparition de valeurs négatives entre 14 et 16 h dans les après-midis d'été. Pour les deux classes W4 et W5 suivantes, cette alternance entre matinée à valeurs positives et après-midi à valeurs négatives est encore amplifiée. La classe W5 est celle qui présente les valeurs les plus négatives (et parmi les deux plus étendues) en comparaison des autres classes. Finalement, les classes d'ouest n'ont pas la même alternance. Les deux classes W1 et W2 présentent des maxima ente 12 et 14 h pour les cœurs de l'été et de l'hiver avec

une atténuation pour les mois de transition (mai-avril et septembre-octobre). Les autres classes W3, W4 et W5 ont une alternance entre maxima et minima qui est inversée. Les matinées ont des comportements supérieurs à la moyenne de l'île et les après-midis, quant à eux, présentent des valeurs négatives ou nulles. Les maxima des matinées sont plus réparties sur les mois d'hiver alors que les après-midis contiennent plus de valeurs négatives en été. Cependant, les deux classes de W4 et W5 ont des minima qui ocurrent en octobre-novembre entre 13 et 14 h.

En ce qui concerne les **écart-types des écarts à la moyenne**, on ne retrouve pas de développement aussi visuel que pour les écarts moyens relatifs.

La classe E1 présente la plus faible variabilité sur la moyenne totale de ses 120 états moyens avec seulement 2,53 %. Cependant, en terme de minima, 10 % des états moyens de W5 sont en dessous des 1,37 %, ce qui la classe en première position, juste avant W1 et E1 (respectivement à 1,46 et 1,67 %). Parmi les classes les plus fluctuantes, E4 varie en moyenne de 6,43 %. On remarque que ses écart-types sont plus élevés sur deux diagonales : une entre 15 h en janvier et 10 h en juin, puis une autre entre 10 h de juin et 14 h de novembre. Une autre classe fortement variable est W2 avec 3 maxima en octobre entre au-dessus des 12 % de variabilité. Sur la même période de l'année, on trouve de fortes fluctuations chez E4 et W4 et c'est aussi en octobre qu'on trouve le pic de variabilité de la classe de la mer. Avec une vision diurne, on constate que les classes d'ouest ont des matinées moins variables que le reste de la journée, quel que soit le mois. Au cours de l'après-midi, les plus grandes variations y sont obtenues d'août-septembre à février. La classe W5, quant à elle, présente de forts écart-types pendant une large plage horaire des après-midis d'août-septembre.

Finalement, le potentiel solaire se répartit sur la journée entre les classes d'est de E2 à E4 et d'ouest de W3 à W5. Le matin, E2-4 ont un écart à la moyenne négatif et W3-5 positif. L'après-midi, le contraire est observé. Ainsi, la ressource solaire locale présente un cycle diurne avec une complémentarité spatiale. Le potentiel solaire moyen de l'île est alimenté d'ouest en est au cours de la journée. Cependant, la variabilité de ce potentiel présente des périodes dont l'écart-type est non seulement maximal mais aussi étendu dans le jour et persistant sur les mois. Les classes W2, W4 et E4 sont les plus concernées par ces critères. Elles présentent cependant une variabilité moins élevée pendant la période de transition d'avril.

4. Conclusion du chapitre

Le constat a été fait que le potentiel solaire de La Réunion nécessitait d'être mieux documenté. Dans cette dynamique, nous avons caractérisé spatialement la ressource solaire moyenne de l'île en plusieurs étapes.

Tout d'abord, nous avons mis en évidence que la distribution spatiale de la moyenne solaire est complexe. La topographie de l'île module d'emblée la ressource solaire de 20 % par rapport à la mer. La description spatiale de la ressource moyenne détaille les zones à fort et faible potentiel solaire sur le territoire réunionnais. La littérature nous a permis de jauger cette première spatialisation visuelle, plus particulièrement au travers des limites de la résolution spatiale des données satellitaires sur la côte ouest. Cependant, des endroits « stratégiques » ont été localisés principalement sur les littoraux mais aussi à deux zones à plus haute altitude, près de Cilaos et du volcan (nommées $\{P_C^+\}$ et $\{P_V^+\}$, en figure III.2).

Le rayonnement étant intrinsèquement variable dans le jour et dans l'année, nous avons détaillé par la suite la nécessité d'allier ces deux cycles. En effet, bien que nous ayons défini les structures locales selon la moyenne générale, ces différentes zones n'en restent pas moins fortement variables dans le jour et dans l'année (respectivement, en figures III.5 et III.7). La combinaison de ces deux composantes nous a amené à la construction des « états moyens » de la ressource solaire locale. Nous avons ensuite souligné la contribution de l'utilisation de ces états moyens solaires sur le territoire, au niveau de la zone à débordement nuageux de l'ouest et du côté du volcan (respectivement en $\{Z_O^-\}$ et $\{Z_V^-\}$).

Ces deux étapes ont abouti sur la détermination statistique de zones sur l'île, selon une méthodologie de caractérisation spatiale des états moyens. En d'autres termes, les pixels de la grille satellite de notre base de données ont été séparés en 10 groupes distincts selon leurs cycles diurne et saisonnier moyens (figure III.14). Premier constat de cette séparation est le découpage de la zone impactée par la topographie de La Réunion, qui s'étale bien au-delà des côtes du territoire. Ensuite, une forte séparation se remarque entre l'est et l'ouest de l'île, selon les deux connues côte au vent et côte sous le vent. Pour donner du sens à ces 10 zones, nous détaillons leurs caractéristiques solaires en moyenne et selon leurs composantes orbitales. Ce dernier point nous a permis de construire la complémentarité est-ouest de la ressource moyenne solaire dans le jour et au travers des mois.

Chapitre IV.

Perturbations du potentiel solaire : « régimalisation » et influence des circulations atmosphériques

Ayant préalablement précisé le potentiel solaire moyen de La Réunion, les écarts potentiels qu'il en résulte sont à considérer pour mieux représenter la réalité de chaque heure. Ces écarts représentent donc des perturbations au comportement moyen. Dans cette dynamique, nous employons le terme de « régimalisation » pour parler de la construction de régimes de temps qui est réalisée (selon les spécificités en chapitre II). Il est en fait question d'affiner la connaissance d'un phénomène en détaillant sa variabilité au travers de différents états caractéristiques. Nous définissons dans un premier temps (1) des régimes types de perturbations du potentiel solaire. Puis, nous en estimons (1) le lien avec les circulations atmosphériques de plus large échelle.

Sommaire

1. « Régimalisation » des perturbations solaire	118
1.1. La limitation de l'étude sur le potentiel solaire moyen	118
1.2. Choix d'un nombre de régimes	120
1.3. Définition des cinq régimes d'écart au potentiel solaire orbital	122
1.4. Description spatiale des anomalies de chaque régime	124
1.5. Caractérisation temporelle des régimes	129
2. La modulation du gisement solaire par les circulations atmosphériques	138
2.1. De méso-échelle : L'influence des systèmes dépressionnaires tropicaux	138
2.2. D'échelle synoptique : L'influence des talwegs tropicaux-tempérés	140
2.3. D'échelle globale : L'influence de l'oscillation de Madden-Julian	143
3. Conclusion du chapitre	147

1. « Régimalisation » des perturbations solaire

La structuration de la ressource solaire locale a été précédemment décrite selon ses deux composantes orbitales moyennes. Par la suite, nous cherchons à jauger les différents types de perturbations qui peuvent subvenir et nous parlons alors d'anomalies au potentiel solaire moyen, comme présentées en sous-section 2.2 du chapitre II de méthodologie. Pour reprendre rapidement la méthodologie, nous reconstruisons notre base de données de rayonnement global horaire de sorte à ce que chaque grille-heure soit représentative de l'écart au potentiel solaire moyen qui lui est associé. Il est important de rappeler que nous reconstruisons les états moyens heures \times mois en états moyens heures \times jours pour pallier l'effet de bord induit. Dans la suite, nous emploierons indifféremment les termes d'anomalies, de perturbations solaires ou de déficits/surplus d'énergie solaire pour parler de ces écarts au potentiel solaire moyen.

La partie précédente a mis en lumière des constats que nous associons à la méthodologie déjà développée. En effet, l'impact de la topographie de l'île par rapport au potentiel environnant est important, il a été estimé à environ 20% (figure III.1). De plus, la variabilité de la mer est de distribution large (en figure III.15) et se module fortement dans la journée et dans le mois avec un écart moyen maximal de 60% au comportement de l'île (en figure III.16). En conséquence, nous décidons de ne considérer que les pixels qui ne sont pas rattachés à la classe de la « mer » (pixels colorés de la figure III.14).

La période que couvre la base de données devrait regrouper 5 844 jours. Cependant, malgré le filtre des heures entre 8-17 heures, nous comptabilisons 117 journées manquantes (*ie.* contenant au moins une valeur manquante). Finalement, nous classifions par la suite les 5 727 jours de notre base de données selon le comportement des anomalies solaires sur 127 pixels \times 10 heures de la journée.

Cette partie nous amène en premier lieu à souligner la variabilité que l'étude des anomalies exploite. Puis, nous expliquons comment s'est construit le choix d'un nombre de régimes (*ie.* application des méthodes en sous-section 2.2 du chapitre II). Nous définissons ensuite les 5 régimes de perturbations du potentiel solaire moyen de l'île. Enfin, nous étudions les caractéristiques spatiales et temporelles de ces 5 journées d'anomalie type.

1.1. La limitation de l'étude sur le potentiel solaire moyen

La caractérisation spatiale du potentiel solaire moyen nous a permis de définir 10 zones type à l'image de deux grandes modulations orbitales de la ressource solaire (figure III.14). Nous détaillons en figure IV.1.(a) l'évolution diurne de la distribution de tous les états moyens du potentiel solaire réunionnais¹. Ainsi, chaque boîte à moustache est

1. *ie.* toutes les classes sauf la classe de la mer définie en figure III.14, soit sur 9 des 10 zones, autrement dit 127 des 360 pixels.

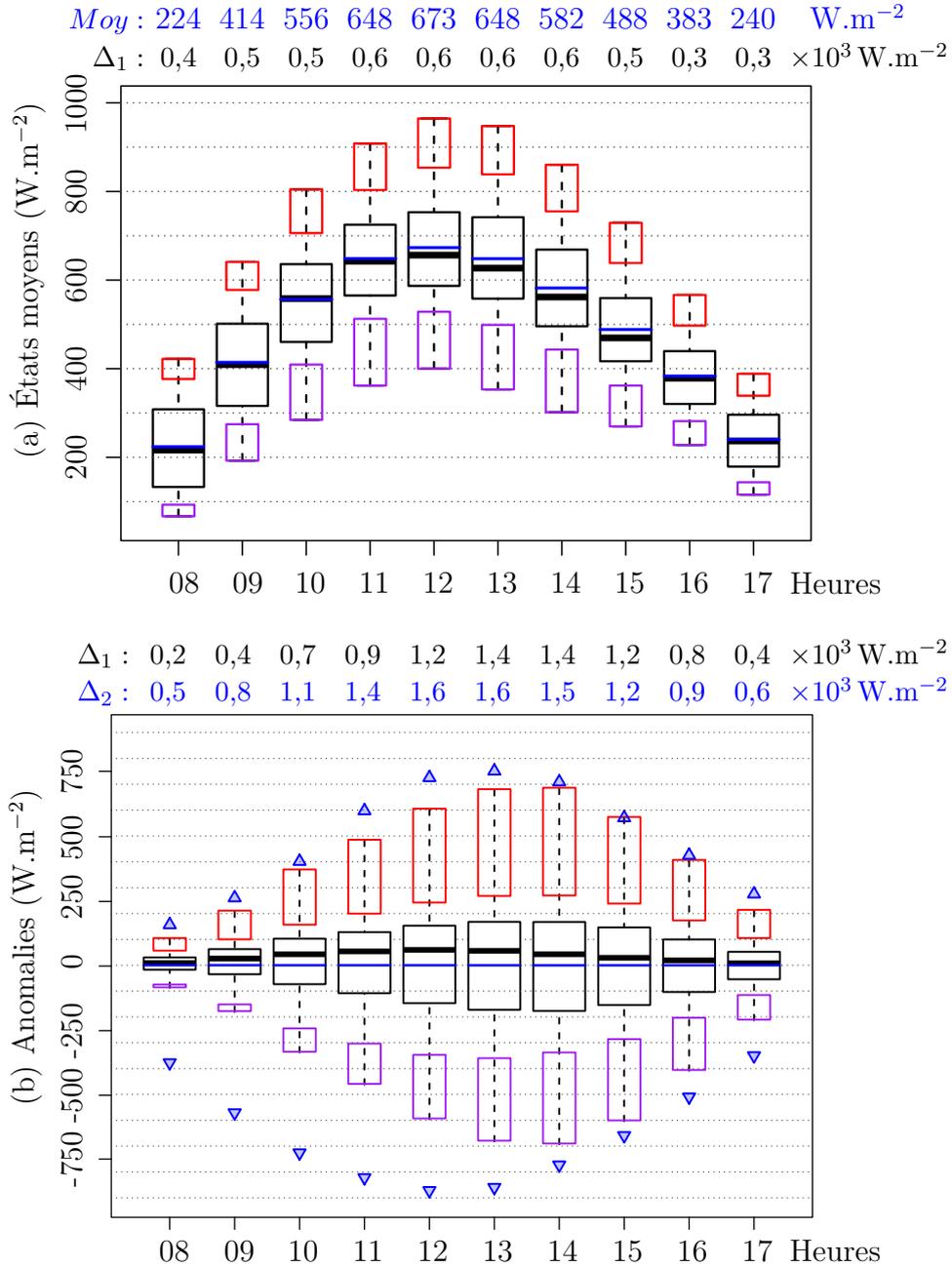


FIGURE IV.1. – Évolution diurne de la distribution des états moyens (a) et des anomalies (b); Le formalisme utilisé pour les boîtes à moustache est le même que pour toutes les figures précédentes; Pour les anomalies, des triangles bleus descendants (montants) pour localiser le minimum (maximum) de la distribution de l'heure; Au-dessus des graphes et pour chaque heure, « Moy » est la valeur de la moyenne, « Δ_1 » est l'amplitude entre le minima du rectangle mauve et le maxima du rectangle rouge et « Δ_2 » est l'amplitude entre le minimum et le maximum des valeurs extrêmes.

calculée sur les valeurs des 12 mois \times 127 pixels associés au comportement de La Réunion. Au-dessus du graphe, nous avons détaillé les moyennes et les amplitudes des boîtes à moustaches de chaque heure. À 12 heures, nous pouvons donc dire que nous avons défini le potentiel solaire réunionnais sur une amplitude allant de 400 à 1 000 W.m^{-2} . Cette gamme de valeurs décrit l'irradiation solaire qu'on a, à 12 heures, en moyenne au travers des mois de l'année et des pixels associés à l'île. Ce raisonnement se tient pour toutes les autres heures de la journée et permet donc de définir la gamme énergétique du potentiel solaire moyen que l'on a caractérisé dans le chapitre précédent.

Pour mettre en lumière la limitation de cette caractérisation exclusivement en moyenne, nous détaillons la distribution des anomalies solaires au travers de 10 boîtes à moustaches en figure IV.1.(b), soit une pour chaque heure de la journée. Ainsi, la figure IV.1.(b) nous permet de jauger l'amplitude des écarts au potentiel solaire moyen. Chacune des boîtes à moustache explicite la distribution des anomalies solaires de l'heure sachant les 5 727 jours \times 127 pixels considérés. Toujours pour le cas de 12 heures, nous visualisons une amplitude de 1 200 W.m^{-2} pour les boîtes à moustaches et de 1 600 W.m^{-2} si l'on considère les valeurs extrêmes de la distribution. Cette amplitude extrême ramène les valeurs moyennes (dont la moyenne est de 673 W.m^{-2} en figure IV.1) à une valeur nulle. Cependant, rien qu'au regard de l'écart interquartile, il est question à 12 heures d'une variabilité de 300 W.m^{-2} , correspondant à 47% de la valeur moyenne. Cela signifie que nous avons un surplus de 47% d'énergie solaire pour 25% des jours de la base de données et, inversement, nous avons un déficit de 47% pour un autre 25% de la distribution.

De façon générale, nous avons un écart de 100 W.m^{-2} au potentiel moyen solaire pour plus de 50% de la distribution des heures entre 11 et 14 heures. Au-delà, on observe des distributions qui s'étalent sur des amplitudes pouvant aller jusqu'à un écart de 750 W.m^{-2} à la moyenne. On ne peut donc pas baser la connaissance de la ressource solaire de l'île sur une seule vision en moyenne, quand bien même nous combinons les cycles diurne et saisonnier. En effet, cette forte amplitude de variabilité du potentiel solaire de l'île est lissée par l'étude spatiale précédemment menée. Son intermittence est limitante à sa meilleure utilisation en tant que source d'énergie et c'est dans la dynamique de lever ce verrou que s'inscrit l'étude des anomalies. De la même façon que la caractérisation de la moyenne du potentiel solaire en zones, nous groupons les journées d'anomalie en des régimes type.

1.2. Choix d'un nombre de régimes

Selon la méthodologie détaillée en chapitre II, nous présentons ici le choix du nombre de classes selon le calcul de l'indice de classifiabilité (Michelangeli et al., 1995; Fauchereau et al., 2009). En figure IV.2 est donc présentée la comparaison entre les indices de classifiabilité de notre base de données satellites et ceux de la base de données bruitées.

Pour les cas de 2 à 4 classes, on remarque que l'écart entre les boîtes à moustaches

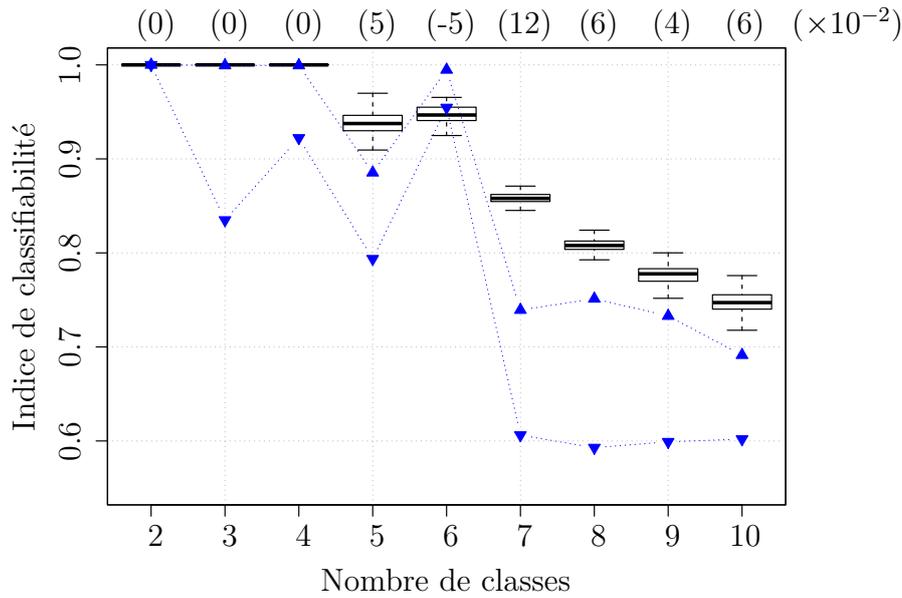


FIGURE IV.2. – Distribution des indices de classifiabilité en fonction du nombre de classes; Les boîtes à moustache renseignent la distribution des indices de classifiabilité des anomalies du potentiel solaire; Les lignes en bleu concernent la répartition des indices de classifiabilité de la base de données bruitées avec des triangles montants (descendants) pour les 95% (5%) de la distribution; Les valeurs entre parenthèses se réfèrent à l'écart entre la médiane des boîtes à moustaches et les 95% de la distribution des données bruitées.

et la ligne des 95% (triangles bleus montants) est nul à 10^{-2} . Le cas à 5 classes est le premier à présenter un écart visuel de 0,05 qui positionne la distribution des indices de classifiabilité de notre base de données au-dessus des mêmes calculs fait sur la base de données bruitées. Les cas de 7 à 10 classes présentent aussi un écart visuel, plus particulièrement le cas à 7 classes avec une valeur de 0,12. Il est notable que le cas à 6 classes a un écart opposé aux cas déjà détaillés.

Dans la littérature, deux publications présentent une classification des journées selon des données radiatives sur La Réunion. ? ont extrait 5 journées type à partir des données radiatives du laboratoire (chapitre II, sous-section 1.1). Ils dénomment ces classes obtenues : « *cloudy days* », « *intermittent bad days* », « *disturbed days* », « *intermittent good days* » et de « *clear sky days* ». Il est donc question de plusieurs échelles d'intermittence allant d'une journée de ciel clair à différents niveaux d'ennuagement. Avant eux, [Badosa et al. \(2013\)](#) ont classifié les données radiatives du site de référence de Météo-France (chapitre II, sous-section 1.1) en 5 journées type : « *clear* », « *AM clear* », « *overcast* », « *PM clear* », « *random* ». De la même façon, il est question de journée de ciel clair et de journées ennuagées (matin, après-midi ou toute la journée).

En considérant le premier écart visuel obtenu à 5 classes en figure IV.2 ainsi que le même nombre choisi dans les deux études précédemment détaillées, nous décidons de faire le même choix de 5 groupes. Ainsi, parmi les 100 partitionnements faits pour le cas à 5 classes, nous choisissons celui pour lequel l'indice de classifiabilité est le plus élevé. Nous détaillons par la suite ces 5 régimes de perturbation du potentiel solaire obtenus.

1.3. Définition des cinq régimes d'écart au potentiel solaire orbital

Nous décrivons donc les écarts au potentiel solaire moyen en 5 journées types. Chaque journée type est donc associée à une liste de jour. Nous calculons pour chacun de ces jours une valeur moyenne de l'anomalie de la journée, c'est-à-dire la moyenne des valeurs des $127 \text{ pixels} \times 10 \text{ heures}$ du jour en question. La distribution des moyennes est présentée pour chacun des 5 régimes types en figure IV.3.

Tout d'abord, les médianes et les moyennes présentent un écart faible et, donc, les moyennes sont représentatives de la distribution des valeurs de chaque classe.

La première classe présente une moyenne positive de 92 W.m^{-2} mais ses 10 % de minima (en mauve) prennent des valeurs négatives. Ce régime regroupe 1 628 journées, ce qui correspond à 28 % du total de la base de données. Ainsi, nous choisissons d'appeler cette classe **R1** : « *journée dégagée* » que nous associons à la couleur rouge.

Les deuxième et troisième classes ont des anomalies moyennes qui sont négatives, particulièrement pour **R2** dont la moyenne est de -277 W.m^{-2} . La quasi-totalité des journées de **R2** sont de valeurs moyennes négatives, soit un total de 98,5 % contre 85,6 % pour **R3** dont l'anomalie moyenne est de -111 W.m^{-2} . Nous nous référerons à ces deux classes sous la dénomination de « *journée ennuagée* » pour **R3** et de « *journée très ennuagée* » pour **R2**, d'où le choix du bleu et du bleu foncé.

Les distributions des régimes **R4** et **R5** sont quasiment face à face et nécessitent d'approfondir notre vision moyenne du groupe. Pour se faire, nous jugeons l'évolution diurne de chacun de ces deux régimes en figure IV.4. On rappelle que les écarts présentent les différences au potentiel solaire moyen détaillé dans le chapitre III précédent.

Ainsi, nous visualisons nettement les évolutions diurnes de la distribution des anomalies de chacun des deux régimes **R4** et **R5**.

Tout d'abord, nous remarquons que **R4** présente une matinée avec des anomalies exclusivement positives jusqu'à 11 h, heure à laquelle le rectangle des 10 % minimums de la distribution déborde sur des valeurs négatives (on comptabilise que seules 3 journées sont concernées). Au-delà de 12 h, la moyenne des distributions de chaque heure (en bleu sur le graphe) est de valeur négative, ce qui correspond à un potentiel solaire en dessous ce que l'on attend en moyenne. On trouve la moyenne la plus basse à 15 h alors que les minima les plus négatifs sont à 14 h. À l'échelle de la journée, il est donc question d'une matinée avec un potentiel solaire supérieur à ce que l'on observe en moyenne sur l'île, puis, l'après-midi présente un déficit de ce potentiel et donc moins d'énergie solaire qu'à

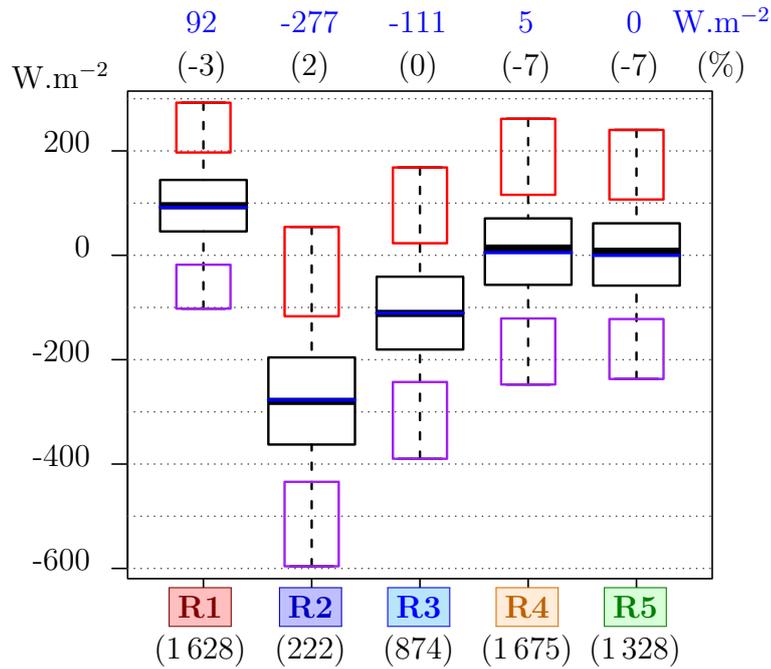


FIGURE IV.3. – Distribution des anomalies moyennées sur la journée selon le régime ; Les classes sont référencées C01 à C05 en dessous du graphe avec, entre parenthèses au-dessous des noms de classe, le pourcentage de jours contenu dans la classe ; Les couleurs choisies par classe sont en partie en lien avec leur valeur moyenne mais ce choix de couleur est plus amplement détaillé dans le texte. Le formalisme utilisé pour les boîtes à moustache est le même que pour toutes les figures précédentes ; Les valeurs au-dessus du graphe sont en bleu les moyennes et entre parenthèses les écarts relatifs à la médiane, selon l'écart inter-quartile (de la même façon qu'en figure III.15).

son habitude. En conséquence, nous nommons la classe **R4** « journée qui s'ennuage » et nous l'associons à la couleur orange.

En ce qui concerne la classe **R5**, le constat est inverse à ce que l'on a observé pour le régime de « journée qui s'ennuage » **R4**. En effet, on trouve des valeurs moyennes (en ligne bleu) qui sont négatives jusqu'à 12 h incluses et, dans l'après-midi, les moyennes sont toutes positives. Le régime d'anomalie **R5** a donc une matinée avec un potentiel solaire plus faible qu'en moyenne et un après-midi qui, au contraire, présente plus d'énergie solaire qu'à son habitude. Nous choisissons d'appeler le régime **R5** « journée qui se dégage ».

Sachant la répartition est-ouest du potentiel solaire moyen (établi en figure III.14 du chapitre III précédent et qui fait écho à Jumaux et al. (2011)), nous visualisons par la suite comment se répartissent spatialement les différents régimes. Tout d'abord,

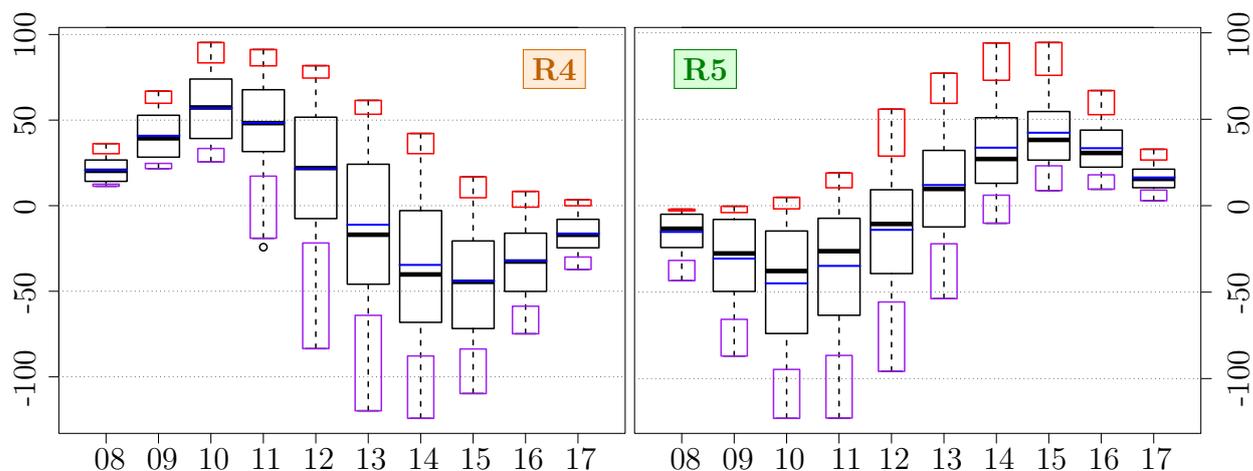


FIGURE IV.4. – Profil diurne des distributions des anomalies pour les classes **R4** et **R5** ; Les heures sont en abscisse et les anomalies (en W.m^{-2}) sont en ordonnée ; Les profils diurnes des autres régimes sont en annexe F, à la figure F.1.

nous présenterons une vision spatiale moyenne pour chaque régime. Ensuite, nous en détaillerons les différentes évolutions diurnes.

1.4. Description spatiale des anomalies de chaque régime

Pour approfondir la définition des régimes, nous nous intéressons à leur structuration spatiale sur le territoire réunionnais. Dans un premier temps, nous explicitons comment se distribuent les anomalies au regard d'une carte moyenne par régime (en figure IV.5). Ensuite, nous détaillons l'évolution diurne de ces structures spatiales (en figure IV.6).

Vision en moyenne : En figure IV.5 sont représentées les cartes moyennes de chacun des 5 régimes.

Le régime de « *journée dégagée* » **R1** l'est plus particulièrement sur la côte au vent, avec une surface de valeurs maximales englobant les zones $\{Z_{NE}^-, Z_V^-\}$ (en figure III.2). Le potentiel solaire de cette surface est d'au moins 110 W.m^{-2} supérieur au potentiel solaire moyen. Ce constat se généralise sur la totalité du territoire puisque toute l'île présente des valeurs supérieures à la moyenne. Au total, il est question d'environ 92 W.m^{-2} d'énergie solaire de plus que celui du potentiel solaire moyen.

Le régime de « *journée très ennuagée* » **R2** présente des structures similaires à celle que l'on a détaillé au regard du potentiel moyen solaire de l'île (en figure III.2). Cependant, les extrema sont inversés ce qui suggère un fort ennuagement généralisé à l'ensemble de l'île. De plus, le potentiel de la mer présente des anomalies plus négatives que celle de l'île alors que le contraire est d'usage. On calcule une anomalie de -262 W.m^{-2} sur l'île

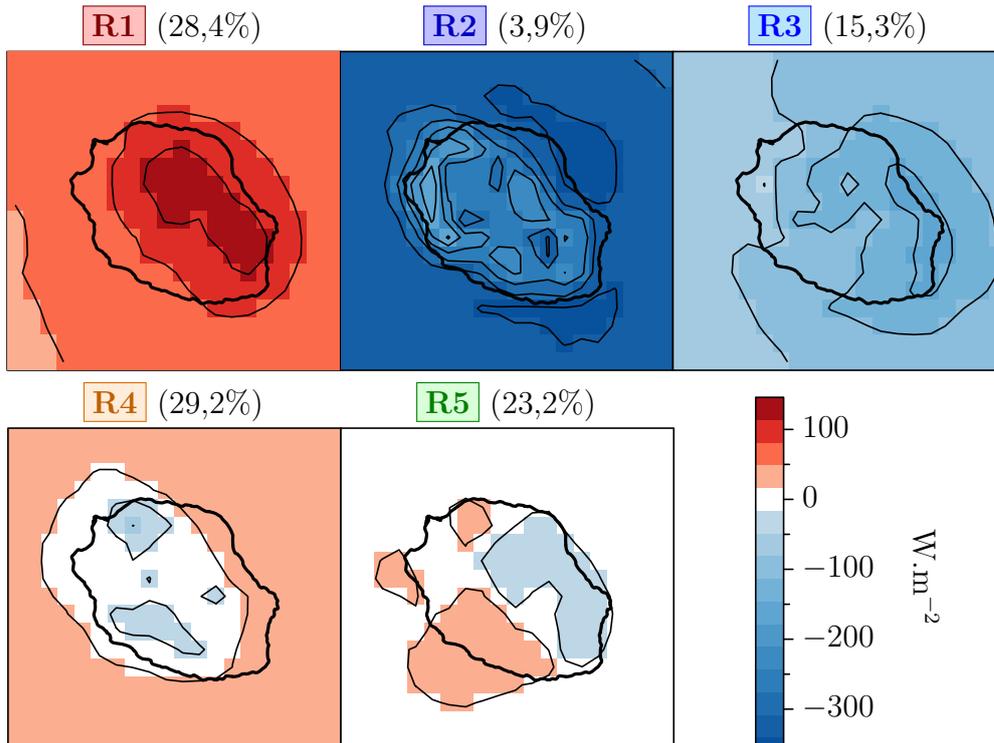


FIGURE IV.5. – Cartes des anomalies moyennes de chacun des régimes; *Dans chaque sous-titre des cartes se trouve le pourcentage de jours concerné par le régime.*

et de $-327 W.m^{-2}$ sur la mer, ce qui correspond un écart d'environ 19.6 % qui fait écho au 20 % obtenu en figure III.1. Ainsi, le régime de « *journée très ennuagée* » **R2** est une anomalie fortement négative qui est de plus large échelle que l'île. Sa faible occurrence de 3,9% suggère que ce régime est associable à des événements de très fortes pluies généralisées sur l'île (Morel et al., 2014), dont un cas particulier est lorsqu'il y a un cyclone (Pohl et al., 2016). Grâce au support de la base de données cyclones de Météo-France, nous faisons le lien entre le régime de « *journée très ennuagée* » **R2** et l'existence d'un cyclone dans le sud-ouest de l'Océan Indien. Nous comptabilisons que c'est le cas pour 48,2% des jours associés au régime, soit 107 sur un total de 222 jours. Ainsi, le régime de « *journée très ennuagée* » **R2** est associé aux fortes pluies généralisées à l'ensemble de l'île et qui sont des événements persistants dans le jour.

Le régime de « *journée ennuagée* » **R3** n'a pas les mêmes structures d'anomalie solaire que le régime de « *journée très ennuagée* » **R2**. Un contour englobe la côte est allant de Saint-Philippe jusqu'à Saint-Benoît, selon 7 pixels avec des anomalies de moins de $-150 W.m^{-2}$. On peut remarquer que, par ailleurs, le pixel avec valeur la plus élevée de $-48 W.m^{-2}$ se trouve dans la zone à débordement nuageux des hauts de Saint-Paul

$\{Z_O^-\}$ (en figure III.2). Cette zone est parmi les valeurs d'anomalie les plus proches de la moyenne, avec des valeurs supérieures à -100 W.m^{-2} . Ainsi, le régime de « *journee ennuagée* » **R3** présente une séparation est-ouest avec des valeurs plus écartées du potentiel moyen solaire sur la côte au vent que sur la côte sous le vent. De plus, on remarque que le littoral de la côte sous le vent est plus touchée que ses hautes altitudes, ce qui fait écho avec les apports d'humidité et de nuages que l'on connaît des vents synoptiques (Jumaux et al., 2011).

Le régime de « *journee qui s'ennuage* » **R4** a une moyenne de $+5 \text{ W.m}^{-2}$ (en figure IV.3). Sur la figure IV.5, on observe des anomalies positives principalement sur la mer mais aussi sur la côte de l'île allant de Saint-Philippe à Sainte-Marie, soit reliant le sud-est et le nord par le littoral. Sur le territoire, plusieurs zones présentent des valeurs d'anomalies solaires négatives. Les deux zones négatives les plus larges sont localisées en amont et aval du "C" observé en figure III.2 que l'on a associé aux débordements nuageux des hauts de Saint-Paul $\{Z_O^-\}$. Ainsi, ces deux zones négatives apparaissent comme une expansion plus large des débordements nuageux de l'île.

Enfin, le régime de « *journee qui se dégage* » **R5** présente une anomalie moyenne de 0 W.m^{-2} sur la journée qui se répartie spatialement selon les côtes au vent et sous le vent. Contrairement au régime de « *journee qui s'ennuage* » **R4**, le régime de « *journee qui se dégage* » **R5** est d'anomalie globalement positive sur la côte sous le vent et négative sur la côte au vent. Cette séparation fait écho au même genre de contribution des vents synoptiques que pour le régime de « *journee ennuagée* » **R3**, apportant alors humidité et nuages sur la côte au vent où les nuages se développent et s'installent. On remarque cependant dans l'ouest que la zone à débordements nuageux $\{Z_O^-\}$ est de couleur blanche à l'image d'une anomalie proche de la moyenne. Ainsi, le débordement nuageux de $\{Z_O^-\}$ est contenu sur sa localisation délimitée selon sa valeur moyenne en figure III.2. En parallèle, la côte sous le vent présente plus de nuage à son habitude moyenne, englobant les zones à minima $\{Z_{NE}^-, Z_V^-\}$. Finalement, le régime de « *journee qui se dégage* » **R5** présente une répartition spatiale particulière dont l'ennuagement est centré sur la côte au vent et suggère un apport en humidité des vents synoptiques.

Cette première vision moyenne a permis de mettre en évidence les répartitions spatiales de chaque classe. Sachant l'évolution diurne de la ressource moyenne solaire (en sous-partie 2.1 du chapitre III), nous détaillons alors pour chaque régime le développement des structures au cours de la journée.

Évolution diurne : En figure IV.6 sont représentées la grille moyenne de chacun des 5 régimes d'anomalies pour 8, 10, 12, 13, 15 et 17 heures. Cette vision est une synthèse de la journée dont l'accès en sa totalité se trouve en annexe F.

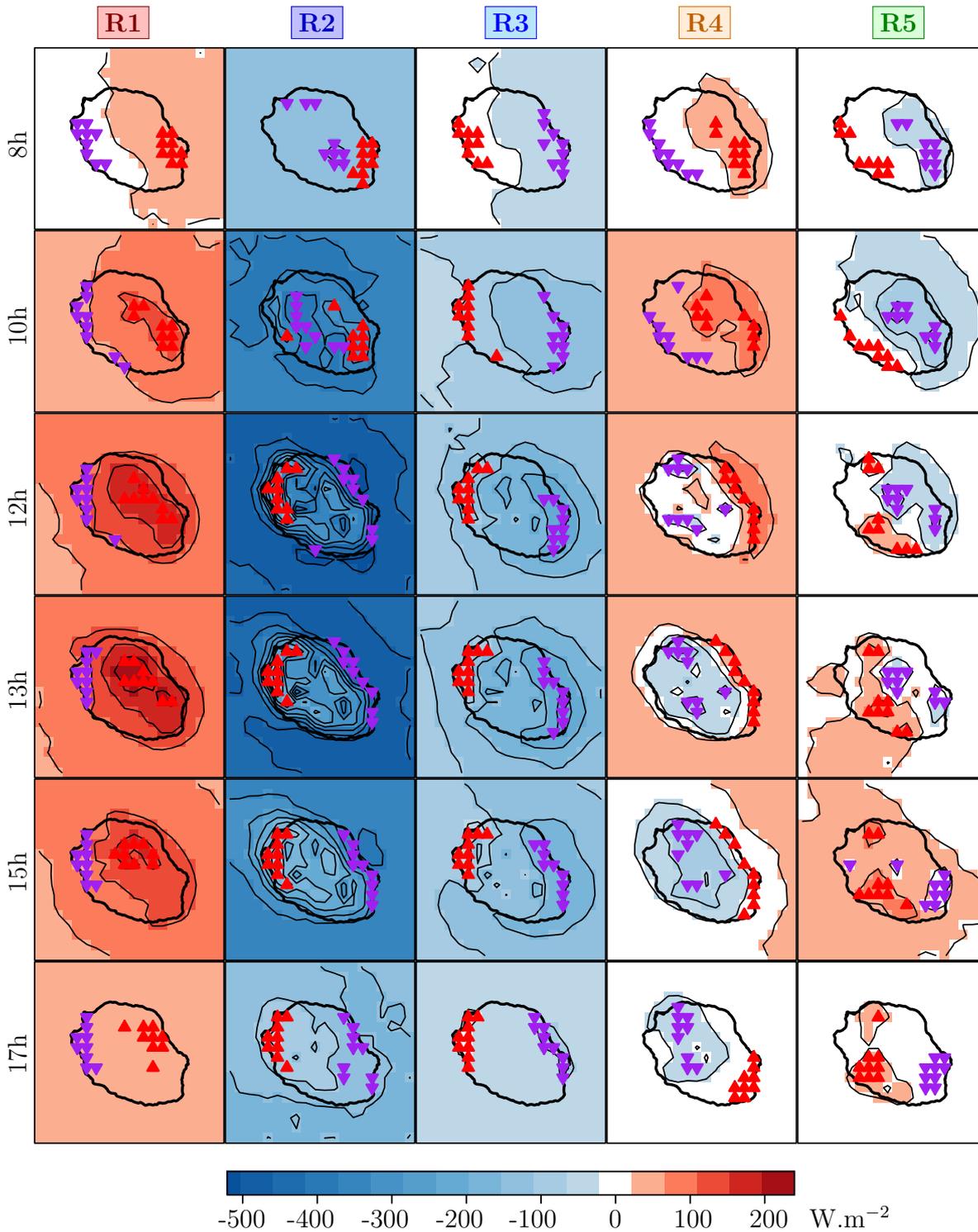


FIGURE IV.6. – Évolution diurne de chaque régime d'anomalie ; Les 10% maxima (minima) de l'île sont localisés par des triangles montants en rouge (descendants en mauve) ; La figure se voulant synthétique, nous sélectionnons 6 heures parmi les 10 disponibles qui, par ailleurs, se trouvent dans leur totalité en annexe F.

Le régime de « *journée dégagée* » **R1** présente une séparation est-ouest tout au long de la journée et avec un maximum obtenu à 13 h. La zone concernée par ce maximum s'étale sur les 9 maxima en triangles montants rouges dont l'anomalie moyenne est de $+209 \text{ W.m}^{-2}$. De 11 à 15 heures, cette zone présente un potentiel solaire d'au moins $+150 \text{ W.m}^{-2}$ supérieur à la moyenne. En ce qui concerne les minima d'anomalies solaires, à 13 h les triangles mauves sont d'une moyenne de $+91 \text{ W.m}^{-2}$. Finalement, le régime de « *journée dégagée* » **R1** présente un potentiel moyen de l'île qui varie selon un minimum de 24 W.m^{-2} à 8 h et un maximum de 156 W.m^{-2} à 13 h (45 W.m^{-2} à 17 h).

Le régime de « *journée très ennuagée* » **R2** présente globalement les mêmes formes que sa moyenne en figure IV.5, plus particulièrement sur les heures allant de 10 à 16 h. Les valeurs d'anomalies négatives varient d'une moyenne sur l'île allant de -111 W.m^{-2} à 17 h à -382 W.m^{-2} à 11 h. Par ailleurs, ces deux mêmes heures ont des anomalies moyennes entre -147 et -436 W.m^{-2} sur la mer, soit 25 et 12 % d'écart à la moyenne de l'île. Ainsi, ce régime d'anomalie présente un écart de potentiel solaire entre la mer et l'île qui est inversé par rapport aux 20 % supérieurs de la mer qu'on observe en moyenne sur la journée (figure III.1) L'association aux événements de fortes pluies se confirme d'autant plus après le constat de cette persistance dans la journée.

Le régime de « *journée ennuagée* » **R3** a la même répartition est-ouest des extrema (triangles) à chaque heure de la journée. Les anomalies varient entre une moyenne de -25 W.m^{-2} à 8 h et de -176 W.m^{-2} à 13 h.

En ce qui concerne le régime de « *journée qui s'ennuage* » **R4**, nous avons relevé, d'une part, sa temporalité au travers de la figure IV.4 et, d'autre part, sa répartition est-ouest moyenne en figure IV.5 La figure IV.6 permet de combiner les deux représentations. Ainsi, nous observons le développement de l'ennuage de l'île à partir de la fin de la matinée avec, à 12 h, des minima qui s'installent de part et d'autre du "C" de la zone à débordement nuageux (premièrement détaillé en figure III.2). Aux alentours de 15 h, le débordement nuageux se généralise sur l'île et reste présente jusqu'à 17 h. Le régime de « *journée qui s'ennuage* » **R4** s'installe dont en fin de matinée. Sa temporalité et sa répartition spatiale font écho à la formation des nuages orographiques qui combinent brise de mer et vents anabatiques (Badosa et al., 2015, Fig.1).

Quant au régime de « *journée qui se dégage* » **R5**, des déficits par rapport au potentiel solaire moyen sont localisés dans la matinée sur la côte au vent. À partir de 11 h, des structures d'anomalies positives s'installent autour des maxima du sud-ouest $\{Z_S^+\}$ (localisés en figure III.2). Ces anomalies positives s'intensifient jusqu'à 15 h mais perdurent jusqu'à 17 h. Les caractéristiques spatiales et temporelles de ce régime font écho avec le processus connu de formation de nuages sur la mer combinée à leur advection sur l'île par les vents d'est (Badosa et al., 2015, Fig.1).

Ainsi, la définition des régimes d'anomalies a été complétée par le détail de leurs structures spatiales et de leur évolution diurne. Nous avons donc localisé et visualisé

l'évolution des zones à déficit et/ou surplus d'énergie solaire. En rapportant les pourcentages (en figure IV.5) à une année de 365 jours, nous comptabilisons un peu plus de 106 « journées qui s'ennuagent » **R4**, un peu moins de 104 « journées dégagées » **R1**, 85 « journées qui se dégagent » **R5**, environs 56 « journées ennuagées » **R3** et 14 « journée très ennuagée » **R2**. Cependant, le nombre d'individus ne détaille pas explicitement la temporalité des classes à laquelle nous discernons la sous-section suivante.

1.5. Caractérisation temporelle des régimes

Cinq régimes ont été définis et nous nous intéressons à leurs caractéristiques temporelles. Dans un premier temps, nous déterminons la persistance de chaque régime (en figure IV.7). Nous comptabilisons ensuite les occurrences selon les enchaînements des « journée » (en table IV.1). Puis nous compléterons ces deux caractérisations en étudiant les cycles des occurrences des régimes.

La persistance des régimes

À chaque première occurrence d'un régime, nous comptons le nombre de jours pendant lequel il persiste. La figure IV.7 présente la distribution des durées d'occurrence de chaque régime. Les boîtes à moustaches sont complétées par les nombres d'occurrence de chaque durée de jours.

Tous les régimes d'anomalies ont des médianes et écarts interquartiles de 1 jour. Ainsi, 75 % des événements durent entre 1 et 2 jours. Plus particulièrement, il est même question de 90 % pour les régimes de « journée très ennuagée » **R2** et de « journée ennuagée » **R3**. Les valeurs extrêmes sont plus ou moins fréquentes et longues selon le régime et, donc, valeurs moyennes médianes sont plus ou moins distantes. Les régimes de « journée dégagée » **R1** et de « journée qui s'ennuage » **R4** sont ceux qui présentent la persistance avec la moyenne la plus élevée, respectivement de 1,75, et 1,73 jours. Le régime de « journée dégagée » **R1** a une persistance record avec des durées de 15, 12 et 10 jours.

Par ordre décroissant de persistance, les régimes sont : celui de « journée dégagée » **R1**, celui de « journée qui s'ennuage » **R4**, de « journée qui se dégage » **R5**, puis de « journée très ennuagée » **R2** et finalement de « journée ennuagée » **R3**. Cette vision ne nous permet cependant pas de savoir comment s'articule les changements de régimes que nous détaillons dans la partie suivante.

L'enchaînements des régimes

Pour un jour associé à un régime, nous regardons l'état du jour d'après, dans l'idée d'explicitier les enchaînements des régimes. En table IV.1 sont détaillés tous les enchaînements possibles et le nombre (et pourcentages) de jours alors concernées.

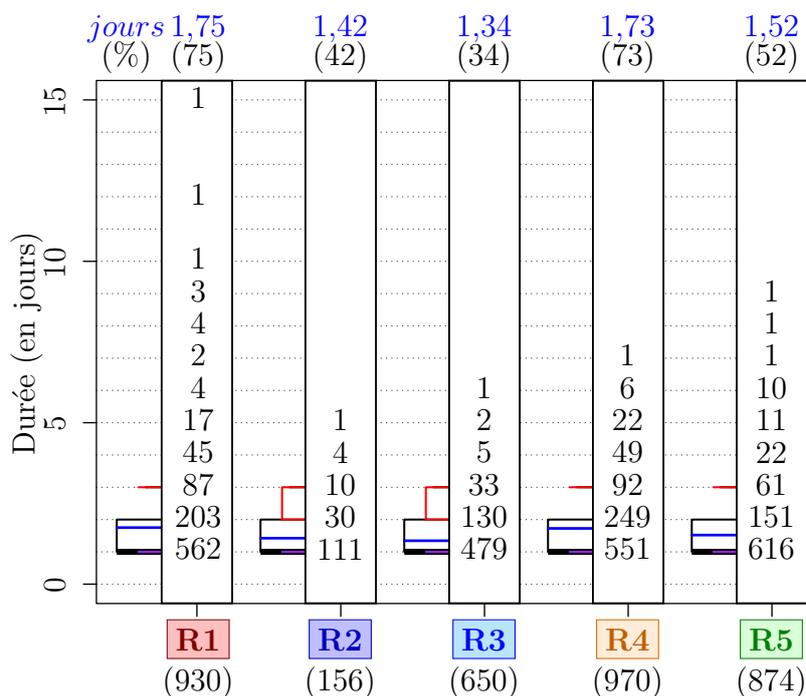


FIGURE IV.7. – Distribution de la durée des occurrences des régimes; *Le formalisme utilisé pour les boîtes à moustache est le même que pour toutes les figures précédentes; Les valeurs au-dessus du graphe sont, en bleu, les moyennes et, entre parenthèses, les pourcentages d'écart entre moyenne et médiane, selon l'écart inter-quartile (de la même façon qu'en figure III.15); Les valeurs entre parenthèses en dessous de chaque régime est le nombre d'événements concerné.*

Les régimes regroupant le plus de jours de la base de données sont les régimes de « journée qui s'ennuage » **R4** et de « journée dégagée » **R1**, à hauteur de 29,2 et 28,4 % respectivement. Ils sont par ailleurs les plus persistants avec 1,73 et 1,75 en figure IV.7. On remarque aussi qu'ils sont, l'un l'autre, le régime suivant le plus fréquent (25,6 et 25,7 %). De plus, en figure IV.6, ils sont les deux régimes qui se ressemblent le plus au regard des heures matinales.

Le régime de « journée qui se dégage » **R5** est le suivant avec 23,2 % des jours de la base de données et une persistance de 1,52 jour. Sur les jours suivant, 34,2 % restent dans le même régime contre 25,4 % de « journée dégagée » **R1** et 21,9 % de « journée qui s'ennuage » **R4**. On remarque que ces deux derniers régimes présentent la même répartition est-ouest sur les heures du matin. Ainsi, une « journée qui se dégage » **R5** a tendance à se répéter ou être suivie par une matinée dégagée.

En ce qui concerne le régime de « journée ennuagée » **R3**, il regroupe 15,3 % du total des jours disponible pour une persistance de 1,34 jour, soit la plus faible des 5 régimes. De

TABLE IV.1. – Occurrences et enchaînements des régimes ; Le pourcentage « %_{total} » exprime le rapport entre le nombre de jours du régime et le total des jours de la base de données ; Le pourcentage « %_{régime} » exprime le rapport entre le nombre de jours d'une catégorie de journée suivante et le total des jours du régime ; Les valeurs en gras sont les pourcentages maximaux à 1 % près.

	« Régime » Nombre de jours (et % _{total})	Journée suivante selon le nombre de jours (et % _{régime})				
		R1	R2	R3	R4	R5
R1	« journée dégagée » 1 628 (28,4)	698 (42,9)	36 (2,2)	152 (9,3)	419 (25,7)	323 (19,8)
R2	« journée très ennuagée » 222 (3,9)	24 (10,8)	66 (29,7)	55 (24,8)	32 (14,4)	43 (19,4)
R3	« journée ennuagée » 874 (15,3)	140 (16,0)	51 (5,8)	224 (25,6)	227 (26,0)	232 (26,5)
R4	« journée qui s'ennuage » 1 675 (29,2)	429 (25,6)	30 (1,8)	235 (14,0)	705 (42,1)	276 (16,5)
R5	« journée qui se dégage » 1 328 (23,2)	337 (25,4)	38 (2,9)	208 (15,7)	291 (21,9)	454 (34,2)

plus, il présente la particularité d'être presque aussi souvent suivi par le même régime, celui de « journée qui s'ennuage » **R4** ou celui de « journée qui se dégage » **R5** (respectivement 25,6, 26,0 et 26,5%). Ainsi, une « journée ennuagée » **R3** sera suivie par une journée qui sera entièrement ou partiellement d'anomalie négative.

Enfin, le régime de « journée très ennuagée » **R2** est d'occurrence la plus faible avec seulement 3,9% des jours. Sa persistance est de 1,42 jour, ce qui est plus élevée que pour le régime de « journée qui s'ennuage » **R4**. Le même régime occure le lendemain pour 29,7% des cas. Après cette répétition, le régime qui suit le plus souvent est le régime de « journée ennuagée » **R3**, puis celui de « journée qui se dégage » **R5**, celui de « journée qui s'ennuage » **R4** et enfin, de « journée dégagée » **R1**. Pour le cas présent de « journée très ennuagée » **R2**, les pourcentages de jours des 5 régimes se suivent avec une différence d'environ -5%.

Finalement, nous avons détaillé les enchaînements de régime qui occurent le plus souvent. Globalement, chaque régime a le plus de probabilité de persister par rapport à chacun des autres régimes (pourcentage le plus élevé). Par contre, il est moins probable qu'un régime persiste plutôt que le jour suivant change de régime (pourcentages de persistance toujours inférieurs à 50%). On note le cas particulier du régime de « journée ennuagée » **R3** qui persiste autant qu'il donne suite à une « journée qui s'ennuage » **R4** ou une « journée qui se dégage » **R5**. De plus, on souligne que les deux régimes de

« journée qui s'ennuage » **R4** et de « journée dégagée » **R1** présentent les pourcentages de persistance les plus élevés (entre 42-43%). Ils sont aussi, l'un pour l'autre et l'autre pour l'un, le changement de régime le plus fréquent (en moyenne sur les deux 25,65%). Les matinées avec un surplus d'énergie solaire sont donc un cas qui est récurrent et persistant.

La saisonnalité des régimes

Pour chacun des 5 régimes, nous représentons l'évolution des occurrences au cours de l'année. La figure IV.8 présente donc le nombre moyen de jours par mois pour chacun des régimes.

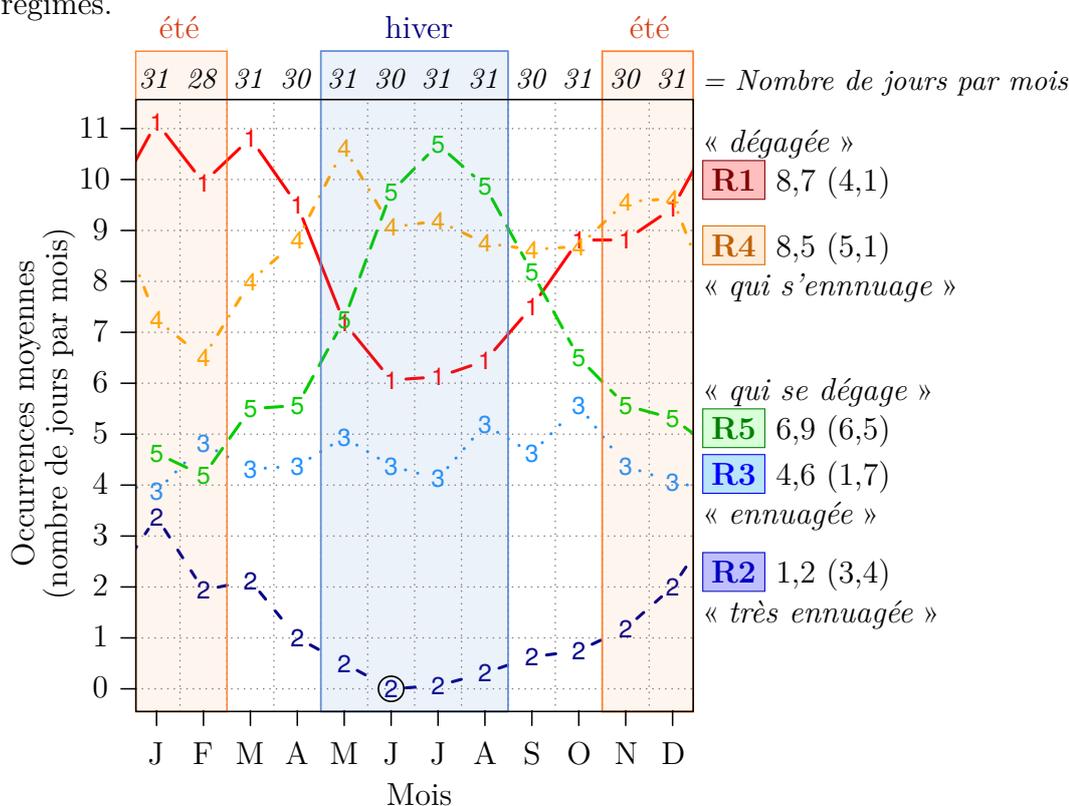


FIGURE IV.8. – Nombre d'occurrences moyenne par mois pour chacun des régimes ; Les valeurs entre parenthèses à droite du graphe correspondent à la moyenne du régime et entre parenthèse à l'amplitude maximale des occurrences au cours des différents mois ; Les valeurs en italique au-dessus du graphe rappelle le nombre de jours contenu dans chacun des mois d'une année non bissextile. Le cercle sur la courbe du régime R2 pour le mois de Juin encadre la présence d'une valeur nulle.

On constate que tous les régimes ont une saisonnalité marquée sauf en ce qui concerne

le régime de « *journée ennuagée* » **R3**. Ce dernier présente une occurrence moyenne de 4,6 jours par mois et un écart maximal 1,7 jours entre ses 12 occurrences moyennes à l'année.

Les régimes de « *journée dégagée* » **R1** et de « *journée très ennuagée* » **R2** ocurrent tous les deux plus souvent en été qu'en hiver. On constate une valeur d'occurrence nulle entourée en juin pour le régime de « *journée très ennuagée* » **R2**. En parallèle, le régime de « *journée dégagée* » **R1** est à son minimum d'occurrence de 6 jours dans le mois. Ce minimum des deux régimes persiste en juillet et commence à augmenter en août. Par ailleurs, ces deux régimes sont à leur occurrence maximale en janvier, avec 11 jours de « *journée dégagée* » **R1** et plus de 3 « *journées très ennuagées* » **R2**. Ainsi, l'hiver regroupe moins, ou bien l'été regroupe plus, les conditions nécessaires pour la réalisation de ces deux régimes.

De phase opposée, le régime de « *journée qui se dégage* » **R5** présente une saisonnalité aussi marquée que le régime de « *journée dégagée* » **R1**. On lui trouve ses extrema d'occurrence moyenne en juillet et en février, respectivement 10,7 et 4,2 jours. Son occurrence moyenne de 6,9 jours a donc une forte variabilité dans l'année avec une amplitude de 6,5 jours. C'est le régime qui présente la plus grande amplitude de ses occurrences moyenne au cours de l'année. De la même façon que pour les deux régimes détaillés dans le paragraphe précédent, les conditions de l'été ou de l'hiver augmentent ou diminuent l'occurrence moyenne du régime de « *journée qui se dégage* » **R5**.

La saisonnalité du régime de « *journée qui s'ennuage* » **R4** est moins arrondie que celle des régimes de « *journée dégagée* » **R1** et de « *journée qui se dégage* » **R5**. Ses extrema sont de 6,5 jours en février et de 10,6 en mai. Son amplitude au cours de l'année est la deuxième plus élevée avec une valeur de 5,1 jours. Il en est de même pour sa moyenne de 8,5 jours à l'année. Cependant, ce régime présente une sorte de palier pour les mois de juin à décembre, avec ensuite de fortes variations sur les mois de janvier à mai. De plus, on remarque que c'est le régime prépondérant du mois de mai et, de façon amoindrie, du mois de novembre. Ces deux périodes sont associées aux transitions entre été et hiver.

Finalement, le régime le plus présent en hiver est celui de « *journée qui se dégage* » **R5**, suivi de celui de « *journée qui s'ennuage* » **R4**, puis de « *journée dégagée* » **R1**, de « *journée ennuagée* » **R3** et enfin, dans des proportions très faibles, de « *journée très ennuagée* » **R2** (moins d'1 jour). En ce qui concerne l'été, l'ordre de prépondérance est différent avec, par ordre décroissant, le régime de « *journée dégagée* » **R1**, puis de « *journée qui s'ennuage* » **R4**, de « *journée qui se dégage* » **R5**, de « *journée ennuagée* » **R3** et enfin de « *journée très ennuagée* » **R2**. Ainsi, l'hiver présente pour la moitié de ces jours des anomalies négatives dans la journée, soit dans l'après-midi selon un régime de « *journée qui s'ennuage* » **R4**, soit dans la matinée selon une « *journée qui se dégage* » **R5**. Quant à lui, l'été présente plus de la moitié de ces jours avec un dégagement au moins pendant la matinée selon les deux régimes de « *journée dégagée* »

R1 et de « journée qui s'ennuage » **R4**.

Ces deux constats font écho avec la contribution des états moyens que nous avons détaillée en figure III.10 pour l'été et en figure III.12 pour l'hiver. Nous y avons déjà remarqué que ces deux saisons présentaient des caractéristiques solaires différentes. En effet, en été, les débordements nuageux des hauts de Saint-Paul en $\{Z_0^-\}$ sont importants, à l'image de la prépondérance du régime de « journée qui s'ennuage » **R4** devant celui de « journée qui se dégage » **R5** en figure IV.8. En ce qui concerne l'hiver, les contributions nébuleuses provenant de l'est ont été soulignées aux alentours de $\{Z_V^-\}$ en parallèle à une augmentation relative du potentiel solaire de $\{Z_0^-\}$. Ainsi, la figure IV.8 présente plus de « journées qui se dégagent » **R5** dont les anomalies négatives sont localisées aux alentours de $\{Z_0^-\}$.

Les tendances inter-annuelles

Pour compléter la caractérisation temporelle des régimes, nous avons comptabilisé les occurrences de chacun des 5 régimes au cours des 16 années disponibles². La figure IV.9 présente donc l'évolution inter-annuelle du nombre de jours de chaque régime.

Globalement, on trouve un même classement des régimes, c'est-à-dire : (1) un changement de régime le plus fréquent entre celui de « journée dégagee » **R1**, de « journée qui s'ennuage » **R4** et de « journée qui se dégage » **R5**, et (2) les deux régimes les moins fréquents sont, par ordre décroissant, celui de « journée ennuagée » **R3** puis celui de « journée très ennuagée » **R2**. Tous les deux sont visuellement en dessous des autres régimes et plus particulièrement pour le régime de « journée très ennuagée » **R2** (comme en figure IV.8).

De plus, on note une certaine ressemblance entre les moyennes et allures générales de l'évolution interannuelle des régimes de « journée dégagee » **R1** et de « journée qui s'ennuage » **R4**. Leur écart maximal est le même à 4 jours près (respectivement 51 et 55 jours) et leur moyenne est aussi écartée de quelques jours (respectivement 105 et 102).

Par ailleurs, on observe une opposition des régimes de « journée dégagee » **R1** et de « journée qui se dégage » **R5**. En 1999, ils sont opposés sur un écart de près de 50 jours, puis ils présentent une sorte de palier de 2000 à 2003, ensuite, ils présentent en 2004 une opposition du même ordre de grandeur qu'en 1999 mais de façon inversée (1999 : **R1** > **R5** ; en 2004 : **R5** > **R1**). Sur les années 2005 et 2007 (2006 manquante), ce jeu d'inversion se retrouve pour mener à un écart de 50 jours en 2008 qui persiste jusqu'en 2012, année à laquelle les occurrences des deux régimes sont visuellement confondues. Ensuite, on retrouve un écartement des deux régimes de 50 jours pour 2014 et aussi pour 2015, avec une diminution des occurrences de 20 jours environs pour les deux régimes.

2. On rappelle que les données satellites couvrent les années 1999 à 2015 mais que l'année 2006 est totalement manquante à la base de données.

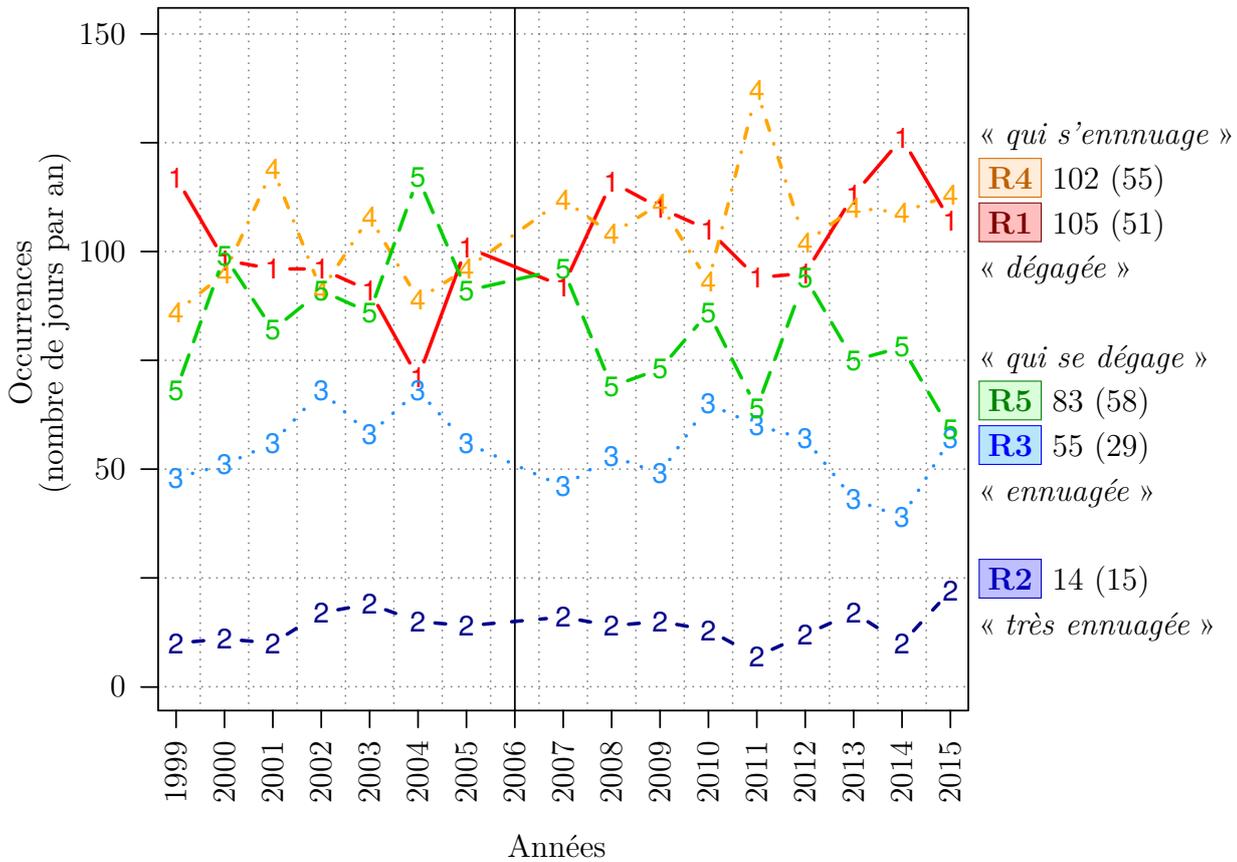


FIGURE IV.9. – Occurrences des régimes selon les années ; Les valeurs à droite du graphique correspondent à la moyenne du régime et entre parenthèse à l'amplitude maximale des occurrences au cours des différentes années ; La ligne verticale en noire rappelle que 2006 est une année non présente dans la base de données.

Sachant leur opposition en figure IV.8, on pourrait les associer aux années pendant lesquelles les hivers et/ou étés furent plus persistants.

De la même façon, on pourrait estimer une certaine opposition entre les régimes de « journée qui s'ennuage » **R4** et de « journée qui se dégage » **R5**. Particulièrement en 2001 et 2011, on leur trouve une opposition allant de 25 à plus de 50 jours d'écart.

On observe que les régimes **R1**, **R4** et **R5** ont des occurrences moyennes qui sont proches pour les années 2000, 2003, 2005 et 2012.

Dernier point, les occurrences des régimes **R1** et **R4** semblent être en opposition avec celles du régime **R5**. Cependant, on peut noter qu'il n'y a que la seule année 2004 pendant laquelle le régime **R5** concerne un plus grand nombre de jours que chacun des régimes **R1** et **R4**.

Cependant, il n'est pas aussi aisé qu'en figure IV.8 de statuer sur les évolutions des occurrences selon les années, surtout sachant la période de disponibilité des données qui ne couvre que 16 années.

Récapitulatif

Ainsi, nous avons choisi de détailler les perturbations du potentiel solaire orbital en 5 régimes d'anomalie. Leur définition a été complétée par le détail des structures spatiales et de leur évolution diurne mais aussi par le détail de leur temporalité. Une synthèse est présentée en table IV.2 et sert de support au résumé présenté ci-suit.

TABLE IV.2. – Récapitulatif des régimes et de leurs caractéristiques.

	Journée $Nb_{j,tot}$ (et $\%_{tot}$)	Moyenne (M, AM)	Persistance ($\%_{Ri}$) → et enchaînement	$Nb_{j,moy}$ (saison ?) Max (Δ_{min}^{max})
R1	« dégagée » 1 628 j (28,4%)	92 W.m ⁻² (+, +)	1,75 j (42,9% _{R1}) → R4 (25,7% _{R1})	≈ 8,7 j (été) 11,1 j (4,1 j)
R2	« très ennuagée » 222 j (3,9%)	-277 W.m ⁻² (-, -)	1,42 j (29,7% _{R2}) → R3 (24,8% _{R2})	≈ 1,2 j (été) 3,3 j (3,4 j)
R3	« ennuagée » 874 j (15,3%)	-111 W.m ⁻² (-, -)	1,34 j (25,6% _{R3}) → R5 ≈ R4 ≈ R3	≈ 4,6 j (±linéaire) 5,6 j (1,7 j)
R4	« qui s'ennuage » 1 675 j (29,2%)	5 W.m ⁻² (+, -)	1,73 j (42,1% _{R4}) → R1 (25,6% _{R4})	≈ 8,5 j (hiver) 10,6 j (5,1 j)
R5	« qui se dégage » 1 328 j (23,2%)	0 W.m ⁻² (-, +)	1,52 j (34,2% _{R5}) → R1 (25,4% _{R5})	≈ 6,9 j (hiver) 10,7 j (6,5 j)

Détails : Nb_j signifie nombre de jours et les indices associés tot et moy se réfèrent respectivement au total de la base de données et à la moyenne par mois. $\%_{Ri}$ est le pourcentage relatif au régime i . Moyenne rappelle la valeur moyenne de l'anomalie sur l'île sur la journée. Le couple « (M, AM) » présente les signes des anomalies moyenne sur l'île sur le matin (M) et l'après-midi (AM). « (Δ_{min}^{max}) » se réfère à l'amplitude saisonnière, ie. l'écart entre le minimum et le maximum (« Max »). « (saison ?) » rappelle la saison pendant laquelle le maximum occure, lorsque la variabilité est importante.

Tout d'abord, nous soulignons la persistance des structures spatiales dans la journée pour les trois régimes d'anomalie moyenne élevée (**R1**, **R2** et **R3**). À l'inverse, les deux autres régimes (**R4** et **R5**) n'ont pas une amplitude d'anomalie élevée mais présentent une évolution diurne de leurs structures spatiales, avec un échange est-ouest de leurs extrema d'anomalies (figure IV.6). Ainsi, une forte déviation au potentiel solaire moyen s'installe au cours de la matinée et perdure toute la journée. Les heures entre 10

et 12 heures sont cruciales quant à l'évolution du déficit ou surplus énergétique dans la journée.

De plus, les deux derniers régimes (**R4** et **R5**) trouvent un écho dans la description des deux processus nuageux locaux (Badosa et al., 2015, Fig.1). Ils présentent les anomalies caractéristiques d'une amplification des deux cas de processus, soit : les nuages orographiques qui se développent dans les hauts de Saint-Paul pendant le jour et les nuages advectionnés le matin sur la côte au vent. Ils sont donc à l'image d'une contribution extérieure assez forte pour moduler le comportement local mais assez faible pour ne pas se généraliser à l'ensemble de l'île. À l'inverse, les trois autres régimes (**R1**, **R2** et **R3**) ocurrent probablement selon des conditions dont l'intensité est plus importante et d'échelle plus grande. Ainsi, ces événements locaux s'inscrivent dans une dynamique atmosphérique plus large que la variabilité locale du territoire réunionnais. Par la suite, nous étudions donc les circulations atmosphériques (présentées chapitre I) dont nous avons suggéré l'impact sur le territoire réunionnais.

2. La modulation du gisement solaire par les circulations atmosphériques

Sachant la déclinaison des circulations atmosphériques en indice (détails en chapitre II), nous utilisons ces indices pour compléter notre analyse. Nous faisons donc le lien entre les valeurs de ces indices et les régimes obtenus dans la section 1 précédente. L'idée est donc de caractériser les anomalies diurnes dans une variabilité plus large que celle de La Réunion. Ci-suit, nous détaillons une à une les différentes échelles qui sont concernées.

2.1. De méso-échelle : L'influence des systèmes dépressionnaires tropicaux (SDT)

Les SDT induisant de fortes pluies généralisées à l'ensemble du territoire réunionnais, nous en estimons le lien avec les perturbations solaires types que nous avons définies précédemment. Durant la période d'étude, il est question de 154 systèmes dépressionnaires dans le sud-ouest de l'Océan Indien dont les trajectoires sont représentées en figure IV.10.

Au regard du nombre des jours concernées par un cyclone selon les mois de l'année (partie à droite du graphe en figure IV.10), nous considérons les mois de janvier à mars pour établir la distribution représentative des régimes de perturbations solaires pendant les mois contenant le plus de cyclone (Leroux et al., 2018; Jumaux et al., 2011; Gray, 1975). De plus, le compte des jours a une saisonnalité comparable à celle du régime de « journée très ennuagée » R2 (en figure IV.8), avec de faibles (fortes) occurrences pendant l'hiver (été) austral. Les autres régimes ont aussi une répartition similaire à celle présentée en figure IV.8 pour les mois de janvier et mars, avec une inversion en février avec plus de régimes de « journée ennuagée » R3 que de « journée qui se dégage » R5. De façon synthétique, nous parlerons ensuite de saison des SDT et nous filtrerons l'étude ici menée sur ces trois mois exclusivement.

La période d'étude contient un total de 154 SDT dont seulement 106 qui occurrent pendant la saison des SDT préalablement définie. Parmi eux, 48 SDT passent à $\pm 5^\circ$ ($\simeq \pm 600$ km) des côtes de l'île de La Réunion et 25 passent à $\pm 2.5^\circ$ ($\simeq \pm 300$ km). Nous supposons que, plus un cyclone sera proche des côtes réunionnaises, plus la perturbation du rayonnement solaire sera importante. Ainsi, nous détaillons en table IV.3 les occurrences de chaque régime de perturbation solaire pour les trois cas de passage des SDT.

Deux régimes présentent des écarts significatifs sur les trois lignes du tableau : les régimes de « journée très ennuagée » R2 et de « journée qui s'ennuage » R4. Ainsi, lorsqu'un cyclone existe dans le sud-ouest de l'Océan Indien, il y a significativement moins de « journée qui s'ennuage » R4 et plus de « journée très ennuagée » R2.

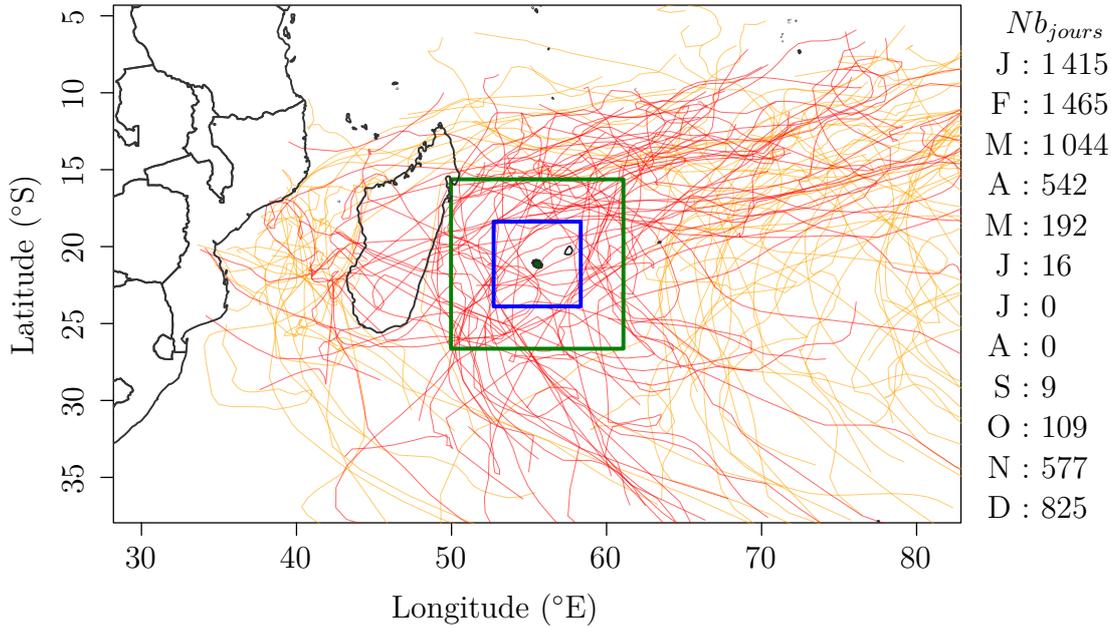


FIGURE IV.10. – Représentation des trajectoires des 154 SDT dans le sud-ouest de l’Océan Indien. Les trajectoires en rouge sont celles des SDT qui passent à $\pm 5^\circ \simeq \pm 600 \text{ km}$ des côtes de l’île de La Réunion, distance schématisée par le carré vert. De la même façon, le carré bleu représente les limites à $\pm 2.5^\circ \simeq \pm 300 \text{ km}$. À droite du graphe sont détaillés les nombre de jours concernés par un cyclone, pour chacun des mois, sur la période de 1999 à 2015, excluant 2006.

Les SDT induisent un ennuagement généralisé sur l’île et des pluies intenses (Quetelard et al., 2009). De plus, l’augmentation des occurrences relatives va de pair avec la diminution de la distance de passage du cyclone (+2,35, +6,57 et +8,85 % par rapport à la moyenne de +8,42). Plus la trajectoire du cyclone sera proche de l’île, plus il augmentera la quantité de « journées très ennuagées » R2. En parallèle, il y a une diminution croissante du pourcentage de « journée qui s’ennuage » R4 (déjà observé de manière générale, en figure IV.8). Ainsi, les conditions météorologiques d’un cyclone ne sont pas propices aux débordements nuageux et favorisent les déficits généralisés du potentiel solaire réunionnais.

On remarque aussi qu’il est question d’un autre écart significatif pour le régime de « journée dégagée » R1. Pour les SDT passant à moins de $\pm 5^\circ$, il est question de $-4,23 \%$ par rapport aux 36,07 % de la saison des SDT. Ainsi, soit il est question d’une propriété inverse à la distance entre l’île et le cœur du cyclone, soit l’intensité et les autres conditions météorologiques sont plus faibles pour le cas des 23 SDT qui font alors la différence entre le cas à moins de $\pm 5^\circ$ et celui à moins de $\pm 2,5^\circ$.

TABLE IV.3. – Table de contingence du nombre de systèmes dépressionnaires tropicaux pour chacun des régimes d’anomalies du potentiel solaire, selon la distance minimale entre la trajectoire du système dépressionnaire tropical et La Réunion, pendant la saison des SDT.

	R1	R2	R3	R4	R5	% _{cyclone}
Tous (106 cyclones)	−1,32 <i>368</i>	⊕ +2,35 <i>114</i>	+0,68 <i>163</i>	⊖ −3,46 <i>224</i>	+1,75 <i>190</i>	74,89 <i>1 059</i>
±5° (48 cyclones)	⊖ −4,23 <i>170</i>	⊕ +6,57 <i>80</i>	+2,14 <i>90</i>	⊖ −4,95 <i>105</i>	+0,47 <i>89</i>	37,77 <i>534</i>
±2,5° (25 cyclones)	−3,69 <i>90</i>	⊕ +8,85 <i>48</i>	+0,76 <i>43</i>	⊖ −6,27 <i>51</i>	+0,35 <i>46</i>	19,66 <i>278</i>
% _{Ri} <i>Nb_jours</i>	36,07 + <i>510</i>	8,42 + <i>119</i>	14,71 + <i>208</i>	24,61 + <i>348</i>	16,20 = <i>229</i>	100 <i>1 414</i>

Détails de la table : Dans chaque cellule, il y a deux valeurs : une au-dessus et une autre au-dessous en *italique*. Les valeurs en *italique* sont les nombres de jours associées à la ligne et colonne concernées. La valeur d’au-dessus est, si elle est en caractère **gras et souligné**, un pourcentage et, sinon, une contribution en pourcentage (selon le pourcentage de R_i associé). Les signes ⊕ (et ⊖) localisent les valeurs significatives maximales (et minimales) selon un test de significativité basé sur la répartition pendant la saison des cyclones (lignes : %_{Ri} et *Nb_jours*). Par exemple, il y a significativement +6,57% de régime de « journée très ennuagée » **R2** pour les 48 cyclones passant à ±5°, par rapport au 8,42% observés pendant la saison des cyclones.

2.2. D’échelle synoptique : L’influence des talwegs tropicaux-tempérés (TTT)

D’échelle spatiale plus large que les SDT, les TTT ont une signature synoptique qui s’étale en moyenne sur une durée de 6 à 7 jours. Présentés en chapitre II (figure II.15), les indices utilisés pour représenter les TTT sont les régimes d’OLR définis par Fauchereau et al. (2009), sur la base d’une classification de données journalières du rayonnement infrarouge sortant au sommet de l’atmosphère (Outgoing Longwave Radiation (OLR)) pendant la période de l’été austral (NDJF). Trois régimes sont associés aux TTT, les régimes d’OLR5, 6 et 7. Pour faire le lien entre perturbations solaires et régimes d’OLR, nous calculons en table IV.4 le tableau de contingence³ des combinaisons de ces deux types de régimes.

3. dont une représentation graphique est disponible en annexe en figure F.5.

La colonne « *comp.* » présente les effectifs, et pourcentages associés, des travaux de Fauchereau et al. (2009). Ces derniers ont utilisé 23 années d'OLR (1979-2002). Pour notre étude, nous avons récupéré les régimes d'OLR actualisés jusqu'à 2011 inclus et donc, nous travaillons avec 12 années (1999-2011), soit un peu plus de la moitié des effectifs des travaux de Fauchereau et al. (2009). Les effectifs des régimes OLR de ces 12 ans sont en colonne « *total* » et présentent une répartition similaire à ceux de Fauchereau et al. (2009), de laquelle une comparaison est en colonne « $\Delta comp.$ ». Les écarts sont, en valeur absolue, en dessous de 2,00% pour tous les régimes OLR sauf les OLR5 et 7. Pour ces deux derniers, il est respectivement question d'une différence de $-2,37\%$ et $+4,15\%$ entre les deux bases la base de données de rayonnement solaire avec laquelle nous travaillons. Ainsi, les années de notre base de données contiennent plus (moins) de TTT selon le régime d'OLR5 (OLR7) que celles de Fauchereau et al. (2009).

Dans les cinq premières colonnes de la table IV.4, un seul régime de perturbations solaires (R4) a une répartition des régimes d'OLR qui ne présente pas d'écart significatif avec ce que l'on observe en moyenne sur toute la base de données. On obtient des écarts significatifs pour les quatre autres régimes de perturbations solaires.

Le régime d'OLR4 est considéré comme un précurseur des TTT. Sur le graphe (d) de la figure II.15, La Réunion est dans une zone de convection atmosphérique amoindrie par rapport à la normale et dont le maximum est sur l'Afrique. Un écart significatif de $-11,14\%$ est obtenu dans le cas des perturbations solaires de type « *journée dégagée* » R1. Par ailleurs, les « *journées qui se dégagent* » *occurent plus souvent, à hauteur de $+6,30\%$. Ainsi, lorsqu'un TTT va se former, il y a significativement moins de « journées dégagées » R1 et plus de « journées qui se dégagent » R5. Nous rappelons que ces deux régimes présentent une saisonnalité inversée avec un pic maximal en été pour le régime de « journée dégagée » R1 et minimal pour celui de « journée qui se dégage » R5 (en figure IV.8). De plus, s'il ne persiste pas, le régime de « journée qui se dégage » R5 est préférentiellement suivi par une « journée dégagée » R1 (en IV.2). Les processus de formation des TTT induisent donc une modification de la prépondérance usuelle des régimes de perturbations solaires.*

En ce qui concerne le régime d'OLR5, il est associé aux TTT, au moment où la zone de convection renforcée présente une bande nord-ouest/sud-est dont la pointe ouest se localise sur le nord-est de l'Afrique du Sud. La Réunion est toujours dans une zone de convection amoindrie, dont le maximum s'est rapproché de l'île (au sud de Madagascar). La stabilité induite n'est donc pas propice à l'occurrence de « *journée très ennuagée* » R2, avec une diminution significative de $-3,24\%$.

Quant au régime d'OLR6, la pointe nord-ouest du TTT est orientée vers le milieu de la côte du Mozambique. La Réunion est toujours localisée dans une zone convective amoindrie dont le maximum s'est encore rapproché de l'île. Une diminution significative (de $-5,35\%$) est obtenue pour le régime de « *journée ennuagée* » R3. La stabilité induite de la faible convection atmosphérique est donc favorable à la diminution de

l'occurrence des « journées ennuagées » **R3**.

TABLE IV.4. – Table de contingence des régimes d'anomalies du potentiel solaire et des régimes d'OLR définis par Fauchereau et al. (2009).

	R1	R2	R3	R4	R5	$\%_{OLRi}$	$\Delta comp.$
OLR1	+0,04 <i>91</i>	-1,50 <i>15</i>	+0,24 <i>42</i>	+4,49 <i>87</i>	-3,28 <i>39</i>	19,50 <i>274</i>	-1,35 <i>+227</i>
OLR2	-8,87 <i>26</i>	+2,37 <i>10</i>	+6,41 <i>23</i>	+0,78 <i>30</i>	-0,69 <i>18</i>	7,62 <i>107</i>	+1,87 <i>+155</i>
OLR3	+3,27 <i>86</i>	+1,08 <i>19</i>	-0,26 <i>35</i>	-3,53 <i>56</i>	-0,56 <i>40</i>	16,80 <i>236</i>	-0,64 <i>+210</i>
× OLR4	⊖ -11,14 <i>37</i>	+3,14 <i>17</i>	+2,77 <i>30</i>	-1,07 <i>44</i>	⊕ +6,30 <i>40</i>	11,96 <i>168</i>	-1,85 <i>+111</i>
OLR5	+1,27 <i>83</i>	⊖ -3,24 <i>9</i>	+0,26 <i>37</i>	-1,53 <i>62</i>	+3,24 <i>50</i>	17,15 <i>241</i>	-2,37 <i>+167</i>
OLR6	+6,32 <i>77</i>	-1,85 <i>10</i>	⊖ -5,35 <i>19</i>	+0,43 <i>54</i>	+0,44 <i>35</i>	13,88 <i>195</i>	+0,18 <i>+193</i>
OLR7	+2,70 <i>66</i>	+2,81 <i>18</i>	-0,96 <i>26</i>	-0,09 <i>50</i>	-4,47 <i>24</i>	13,10 <i>184</i>	+4,15 <i>+292</i>
$\%_{Ri}$	33,17 +	6,98 +	15,09 +	27,26 +	17,51 =	100	+96,44
Nb_{jours}	<i>466</i>	<i>98</i>	<i>212</i>	<i>383</i>	<i>246</i>	<i>1 405</i>	<i>+1 355</i>

Détails de la table : similaire à la figure IV.3, vision graphique en annexe F à la figure F.5. Les signes ⊕ (et ⊖) localisent les valeurs significatives maximales (et minimales) selon un test de significativité basé sur la répartition des régimes pendant NDJF (lignes : $\%_{Ri}$ et Nb_{jours}). Par exemple, pour la première cellule, le croisement entre OLR1 et **R1** compte un total de 91 jours, ce qui correspond à +0,04 par rapport au pourcentage de régime **R1** contenu dans la base de données, qui est de 33,17% (ou 466 jours). La colonne « $\Delta comp$ » contient des éléments de comparaison avec la publication de Fauchereau et al. (2009) : la valeur du dessous, en italique, explicite le nombre de jours de plus que considère l'étude de Fauchereau et al. (2009) et la valeur du dessus est l'écart en pourcentage que cela représente par rapport à notre base de données. Par exemple, Fauchereau et al. (2009) contient -1,35% (+ 227 jours) d'OLR1 que notre base de données. À gauche du tableau, la croix rappelle le régime précurseur des TTT qui se propage vers l'est selon les régimes OLR de 5 à 7 à l'image la flèche.

2.3. D'échelle globale : L'influence de l'oscillation de Madden-Julian (MJO)

Au-delà de l'échelle synoptique des TTT, la MJO est une circulation globale de variabilité intra-saisonnière qui se déplace d'est en ouest au niveau de la zone équatoriale. Wheeler and Hendon (2004) ont mis en place des indices permettant de suivre l'évolution de la MJO (détails en chapitre II). Pour chacun des régimes d'anomalies solaires que nous avons obtenus, nous détaillons dans un tableau de contingence les occurrences propres à chacune des phases de la MJO en table IV.5, de la même façon que précédemment pour le TTT. Nous ne considérons que les journées pendant lesquelles la MJO est d'une amplitude strictement supérieure à 1.

Dans les cinq premières colonnes de la table IV.5, seul le régime de perturbations solaires R5 a une répartition des phases de la MJO qui ne présente pas d'écart significatif avec ce que l'on observe en moyenne sur toute la base de données. Parmi les autres régimes, les deux les plus concernés sont ceux de « journée dégagée » R1 et de « journée très ennuagée » R2. Ils comptabilisent 5 des 7 valeurs significatives. Les deux autres écarts significatifs sont obtenus pour les régimes de « journée ennuagée » R3 et de « journée qui s'ennuage » R4. Les phases de la MJO concernées sont les phases 1, 3, 4, 6 et 7.

Lors de la première phase PH1 de la MJO, des écarts significatifs, d'une valeur de $-2,01\%$, sont obtenus pour le régime de « journée très ennuagée » R2. Ainsi, pendant cette phase d'intensification de la convection sur l'Afrique, il y a moins de fort déficit solaire généralisés à l'ensemble du territoire réunionnais.

En ce qui concerne la phase PH3, une augmentation significative des « journées ennuagées » R3 est observée. À ce moment, la MJO est localisé dans l'Océan Indien sur une vaste zone de convection renforcée. L'instabilité induite de cet état de la MJO perturbe donc les circulations à l'échelle de La Réunion par une augmentation des déficits généralisés R3.

Pour la phase PH4 de la MJO, les deux régimes de « journée dégagée » R1 et de « journée très ennuagée » R2 présentent des écarts significatifs, respectivement de $-4,61\%$ et de $+2,02\%$. Cette phase correspond au passage de la zone de convection renforcée de la MJO de l'Océan Indien vers l'Océanie et l'Indonésie. En parallèle, une zone de convection amoindrie se développe sur l'Afrique. Au moment de cette stabilité sur l'Afrique, il y a significativement plus d'événements de déficits solaires généralisés (R2) et, en parallèle, on observe une diminution des événements de surplus solaires (R1).

Pour la phase PH6 de la MJO, il est question d'écarts significatifs pour les régimes de « journée dégagée » R1 et de « journée très ennuagée » R2, respectivement de $+5,35\%$ et $-2,12\%$. Pendant cette phase, une large zone de stabilité renforcée est localisée sur l'est de l'Océan Indien. À ce moment-là La Réunion est moins souvent soumise à des « journées très ennuagées » R2 et plus souvent à des « journées dégagées » R1. La

stabilité relative de cette zone de convection module le comportement de la ressource solaire de l'île avec une diminution (augmentation) de l'occurrence des déficits (surplus) solaires généralisés **R2** (**R1**).

La phase PH7 présente quant à elle une diminution significative des « journées qui s'en-
nuagent » **R4**, à hauteur de $-5,52\%$. Le déplacement vers l'est de la zone de convection amoindrie de la **MJO** induit des conditions météorologiques sur La Réunion qui ne sont pas propices aux développements des débordements nuageux du régime **R4**.

TABLE IV.5. – Table de contingence des régimes d'anomalies du potentiel solaire et des phases de la MJO définies par **Wheeler and Hendon (2004)**.

	R1	R2	R3	R4	R5	$\%_{PHi}$
PH1	+0,97 142	⊖ -2,01 9	-0,35 72	-1,30 135	+2,69 125	13,65 483
PH2	-2,48 130	+0,51 22	+1,71 85	+1,69 155	-1,43 109	14,16 501
PH3	+1,28 112	+1,69 21	⊕ +4,10 73	-2,99 99	-4,09 72	10,65 377
PH4	⊖ -4,61 101	⊕ +2,02 25	-1,11 60	+2,36 134	+1,34 104	11,98 424
PH5	+0,23 139	-0,58 16	+0,82 78	+0,24 143	-0,71 109	13,70 485
PH6	⊕ +5,35 154	⊖ -2,12 8	+1,41 76	-1,40 127	-3,23 91	12,88 456
PH7	+3,53 132	+0,48 18	-0,01 63	⊖ -5,52 98	+1,51 102	11,67 413
PH8	+0,32 115	+1,37 21	-1,01 57	-2,25 108	+1,56 99	11,30 400
$\%_{Ri}$	28,43	3,88	15,26	29,25	23,19	100
Nb_{jours}	1 628	222	874	1 675	1 328	5 727

Détails de la table : idem qu'en table IV.4 excepté pour la flèche qui souligne la propagation vers l'est de la **MJO** dans l'Océan Indien, vision graphique en annexe F à la figure F.4.. Les signes ⊕ (et ⊖) localisent les valeurs significatives maximales (et minimales) selon un test de significativité basé sur la répartition des régimes (lignes : $\%_{Ri}$ et Nb_{jours}).

Récapitulatif

Ainsi, nous avons étudié le lien entre les régimes de perturbations solaires de La Réunion et différentes circulations atmosphériques de plus large échelle. La table IV.6 en présente le récapitulatif.

TABLE IV.6. – Récapitulatif des liens entre les régimes et les circulations plus large échelle.

		R1	R2	R3	R4	R5
SDT		$\oplus ?$	\oplus		\ominus	
TTT		\ominus (OLR4)	\ominus (OLR5)	\ominus (OLR6)		\oplus (OLR4)
MJO	inst.	\ominus (PH4)	\ominus (PH1) \oplus (PH4)	\oplus (PH3)		
	stab.	\oplus (PH6)	\ominus (PH6)		\ominus (PH7)	

Détails : Les signes \oplus (et \ominus) localisent les augmentations (diminutions) induites, tirées des tables IV.3, IV.4 et IV.5. Entre parenthèses sont rajoutés les phases et régimes concernés. Pour la MJO, inst. et stab. signifient respectivement instable et stable pour différencier le passage dans l’Océan Indien de la zone de convection renforcée et celui de la zone de convection amoindrie.

Tout d’abord, les SDT modulent systématiquement deux régimes pendant les mois de janvier à mars. On retrouve l’évidente augmentation des « journées très ennuagées » R2 qui est inversement proportionnel à la distance entre le cyclone et l’île. De la même façon, les conditions météorologiques des SDT ne sont pas propices aux débordements nuageux du régime de « journée qui s’ennuage » R4, selon le même lien inversement proportionnel à la distance entre le cyclone et l’île. Un questionnement est soulevé pour le régime de « journée dégagée » R1. Les conditions cycloniques en diminuent l’occurrence mais sans la mise en évidence, pourtant attendue, d’un lien inversement proportionnel à la distance entre le cyclone et l’île. Une explication pourrait autant être du fait de la complexité de la nébulosité des systèmes dépressionnaires que de la disponibilité relativement faible de la base de données.

Pendant l’été, les TTT modulent l’occurrence des perturbations solaires. Tout d’abord, lorsque les conditions météorologiques sont propices au développement d’un TTT (ie. le régime précurseur d’OLR4), il y a une diminution des surplus généralisés (R1) concomitamment à une augmentation des journées de matinée marquée par les contributions humides et nuageuses des Alizés par l’est (R5). Ensuite, lorsqu’un TTT est formé (ie. en régime d’OLR5), la stabilité induite diminue significativement les occurrences des « journées très ennuagées » (R2) et, quand la zone de convection amoindrie se rapproche de l’île (ie. en régime d’OLR6), ce même constat est fait pour les « journées ennuagées » (R3).

En ce qui concerne la MJO, elle modifie principalement les occurrences des régimes ayant un impact généralisé à l'ensemble de l'île. Pendant le renforcement de la zone de convection de la MJO sur l'Afrique (*ie.* en phase 1), il y a une diminution des forts déficits généralisés (R2). Lorsque la phase humide de la MJO passe de l'est de l'Océan Indien vers l'Indonésie, les conditions atmosphériques induites sont propices aux déficits généralisés (R3 en phase 3 et R2 en phase 4). En parallèle à sa contribution en journée « journée très ennuagée » R2 (*ie.* en phase 4), nous observons une diminution des surplus solaires généralisés (R1). Ce constat s'inverse lorsqu'il y a une zone de stabilité au nord-est de l'Océan Indien (*ie.* en phase 6). À ce moment-là le nombre de journées à surplus augmentent en parallèle à une diminution des cas de forts déficits généralisés à l'ensemble de l'île. Enfin, lorsque la zone de convection amoindrie de la MJO se déplace vers l'Indonésie (*ie.* phase 7), les débordements nuageux (R4) diminuent significativement.

3. Conclusion du chapitre

La ressource solaire de La Réunion a été traduite en un potentiel solaire moyen qui, cependant, reste éloigné de la réalité de chaque heure. C'est cet écart qui a dirigé les travaux de ce chapitre.

Dans un premier temps, nous soulignons la nécessité de l'étude des écarts au potentiel solaire moyen. Le choix est ensuite fait d'une caractérisation de ces écarts en 5 journées-types. Ainsi, le potentiel solaire moyen du territoire réunionnais est modulé selon 5 régimes ayant chacun des caractéristiques spatiales et temporelles propres. Trois de ces régimes de perturbations du potentiel solaire présentent des amplitudes les associant à des journées de surplus ou déficit généralisé. Les deux autres régimes concordent avec les processus nuageux locaux décrits par [Badosa et al. \(2015\)](#).

Par la suite, nous lions les modulations de la ressource solaire aux différentes circulations atmosphériques. De méso-échelle, les [systèmes dépressionnaires tropicaux \(SDT\)](#) modifie significativement les régimes de perturbations solaires avec une augmentation des forts déficits généralisés et une diminution des débordements nuageux qui sont déjà à leur minima saisonnier. D'échelle synoptique, les [talwegs tropicaux-tempérés \(TTT\)](#) modifie aussi les occurrences des régimes de perturbations solaires. Lors de la formation d'une [TTT](#), les circulations induites contribuent à l'ennuage matinal de la côté est de l'île, aux dépens des journées à surplus généralisé. Ensuite, lorsque la bande du talweg est se rapproche de La Réunion, il y a une diminution des journées très ennuagés lorsqu'elle est centrée sur le nord-est de l'Afrique du Sud, et une diminution des journées ennuagées lorsqu'elle est au sud de Madagascar. Ainsi, les conditions météorologiques induites ne sont pas propices à l'obtention d'un déficit généralisés sur l'île de La Réunion. En ce qui concerne l'échelle globale, ce n'est pas lorsque la phase humide de l'[oscillation de Madden-Julian \(MJO\)](#) se localise au centre de l'Océan Indien qu'elle modifie significativement le potentiel solaire moyen, mais lorsqu'elle est en amont à l'est et en aval à l'ouest. Cependant, pendant que sa phase sèche concomitante est dans l'Océan Indien, la convection amoindrie module significativement les perturbations solaires de La Réunion (diminution des déficits généralisés et augmentation des surplus généralisés). Le passage de la phase sèche de la [MJO](#) vers l'Indonésie module aussi le comportement solaire de l'île avec un amoindrissement de l'occurrence des débordements nuageux.

Finalement, la combinaison des deux sections de ce chapitre permet de construire une connaissance sur les potentielles perturbations de la ressource solaire sur le territoire réunionnais et d'en ouvrir la compréhension à des échelles plus larges.

Conclusion générale

Dans cette partie, nous reprenons de façon générale les résultats dont une synthèse est faite en chaque conclusion de partie (soit, en section 4 et 3).

Le potentiel d'utilisation de la ressource solaire est le plus élevé en comparaison avec les autres réserves d'énergie de la planète (Perez et al., 2016). Plus particulièrement, La Réunion baigne dans un environnement dont le fort potentiel des énergies renouvelables est à exploiter (Praene et al., 2012). Cependant, l'intermittence de la ressource solaire est un frein qu'il faut impérativement lever. En effet, les variations du potentiel solaire sont très rapides et peuvent engendrer une perte d'énergie pouvant déstabiliser pour le réseau électrique. Cette diminution de la production énergétique doit être palliée par d'autres moyens de production. Ceux qui sont actuellement installés sur le territoire ont un temps d'activation plus ou moins long. Améliorer la réactivité de ces systèmes est indéniablement important mais coûteux. La meilleure compréhension de la ressource solaire sur le territoire est quant à elle incontournable tant par sa facilité de mise en œuvre que par sa nécessité incontestable. En effet, une analyse de la ressource moyenne apporte des informations pour le dimensionnement des postes de production et pour leur répartition stratégique sur le territoire.

Dans le chapitre III de ce mémoire, nous avons montré que le potentiel solaire de La Réunion est défini sous la forme d'un comportement moyen qui est variable dans le temps, selon ses deux composantes orbitales, et dans l'espace, selon des régions-types. Un dimensionnement et une répartition intelligente des postes de production permettraient d'allier la complémentarité spatiale des évolutions diurnes de la ressource solaire réunionnaise. Cet équilibrage doit tenir compte de la répartition est-ouest des côtes au vent et sous le vent ainsi que leur structuration spatiale différente. Ces premiers résultats construisent donc une vision moyenne de la ressource solaire en combinant les évolutions diurne et saisonnière complémentaires. En d'autres termes, cette étape de caractérisation décortique la variabilité « endogène / intrinsèque » de la ressource solaire, selon les limitations des données (soit la disponibilité des données et les limites de la reconstruction de la grandeur étudiée). Cependant, bien que ces considérations en moyenne soient importantes, elles lissent par ailleurs une grande amplitude de la réalité de chaque jour.

La production électrique est fortement tributaire de la variabilité de la couverture nuageuse. Cette dernière est identifiée comme étant la source dominante de fluctuations à court terme du rayonnement solaire arrivant à la surface terrestre (Lohmann, 2018). En ce qui concerne La Réunion, sa nébulosité fortement variable lui confère une intermittence plus difficilement prévisible que pour un continent (Boland et al., 2016; David et al., 2018). En effet, les processus de création, d'évolution et de déplacement des nuages sont complexes et, de fait, sont relativement mal anticipés à l'heure actuelle. De meilleures prévisions permettent de mieux appréhender les variations de la production, faisant alors passer la ressource primaire solaire de son statut d'intermittente à prévisible. Cependant, les processus nuageux sont d'autant plus variables que la topographie de l'île est accidentée et que son contexte météorologique est changeant. Ces deux entraves contraignent la meilleure intégration du solaire dans le réseau électrique dont la stabilité doit être assurée. La compréhension des modes de variabilité « exogène / extrinsèque » de la ressource solaire sur le territoire réunionnais est donc nécessaire car elle permet de préciser la prévision météorologique. Ainsi, un modèle de production de l'énergie électrique solaire doit construire sa robustesse sur la combinaison des informations spatiales et temporelles de la variabilité de sa ressource d'énergie.

Compte-tenu de nos premiers résultats, nous avons élaboré une cartographie « diurno-saisonnnière » de laquelle les perturbations énergétiques ont ensuite été précisées. Dans le chapitre IV, nous détaillons les cinq journées types des écarts au potentiel solaire moyen de La Réunion. Chacun de ces régimes présentent des spécificités à exploiter, soulignant la première considération du potentiel solaire local et ouvrant leur compréhension à des échelles plus grandes aussi bien dans le temps que dans l'espace. Ainsi, l'idée maîtresse est celle d'une gestion de l'énergie calibrée, d'une part, sur la prévision de ces cinq différentes catégories et, d'autre part, sur l'association de ces régimes à des stratégies particulières. S'ensuivra donc un enrichissement de la gestion de l'énergie solaire par des schémas appréhendant ces connaissances nouvelles.

Finalement, nos travaux esquissent la valorisation d'une stratégie de gestion de l'énergie adaptée au site de consommation, ajustant la demande du consommateur et « l'offre » des énergies renouvelables. La Réunion étant un terrain alliant complexité topographique et variabilité météorologique, la pleine utilisation de la ressource solaire est d'autant plus conditionnée par sa maîtrise. La construction de micro-grids inter-connectés présente un réel enjeu qui pourrait diffuser la forte intermittence du gisement solaire local. Pour ce faire, les premiers jalons ici posés sont à compléter en approfondissant, d'une part, les résultats déjà obtenus mais, aussi, d'ouvrir une vision plus générale sur la complémentarité des deux chapitres présentés.

Perspectives

Chapitre II : L'estimation de la qualité de SARAH-E

Bien que les résultats obtenus soient cohérents avec l'état de l'art, l'estimation de la qualité de la base de données satellites [Solar surfAce RAdiation Heliosat - East \(SARAH-E\)](#) pourrait être précisée, notamment en ce qui concerne l'impact de la climatologie des aérosols. Pour se faire, il faut comparer le flux radiatif entrant au sommet de l'atmosphère à celui qui arrive à la surface de la terre, dans le cas des journées de ciel clair et donc sans impact de la nébulosité. La reconstruction des heures en indice de clarté k_t se prête à cet usage et permet donc de quantifier l'atténuation de l'atmosphère. Cet indice est calculé comme suit :

$$k_t = \frac{I}{I_0} \quad (\text{IV.1})$$

avec I : l'irradiation solaire global sur un plan horizontal à la surface de la terre
 I_0 : l'irradiation extraterrestre équivalente.

Ainsi, il serait question de sélectionner les journées de ciel clair de nos données, *in situ* de Météo-France aussi bien que satellites de [SARAH-E](#), et d'en analyser les valeurs des indices de ciel clair. Cependant, La Réunion est soumise à un climat fortement variable qui lui confère un moins grand nombre de journées de ciel clair ([David et al., 2018](#)). Le modèle McClear¹ pourrait d'ailleurs en estimer les valeurs ([Lefèvre et al., 2013](#)). En effet, ce modèle calcule l'irradiance à la surface terrestre, en condition de ciel clair, selon les caractéristiques de l'atmosphère que sont : l'épaisseur optique des aérosols, la vapeur d'eau et l'ozone. Ces dernières proviennent de réanalyses du projet « *Monitoring Atmospheric Composition and Climate* » de l'[ECMWF](#). Par ailleurs, l'étude ici suggérée pourrait avoir à recourir à d'autres modèles numériques, par exemple le « *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine* » (SMARTS) ([Gueymard, 2005, 2001](#)). Ce dernier est utilisé pour générer les données [ASTMG173-03 \(2012\)](#) (à AM0 et AM1.5) (figure [I.5](#)).

Finalement, la modulation de chacune des sources de variations de la ressource solaire pour le territoire réunionnais pourrait être quantifiée. Pour en consolider l'influence ou non sur le rayonnement solaire, il serait intéressant de vérifier la robustesse des classifications spatiale et temporelle avec de nouvelles métriques, par exemple : l'indice de clarté précédemment défini mais aussi l'indice de ciel clair qui est le ratio du rayonnement global sur le rayonnement global en condition de ciel clair, sur un plan horizontal. Le premier renseignerait sur la robustesse des classes selon l'atténuation atmosphérique du

1. Accessible gratuitement sur le site www.soda-pro.com, moyennant une inscription.

potentiel solaire au sommet de l'atmosphère. Le second le ferait de la même façon mais seulement pour la nébulosité.

Chapitre III : La cartographie du potentiel solaire

Parmi les potentielles valorisations, nous notons que les méthodologies statistiques sont affinées par des données correctement pré-traitées. Sur le territoire réunionnais, ce point de pré-traitement pourrait être de considérer les états moyens construits et zones types que l'on a obtenues. Ainsi, il serait intéressant de tester l'efficacité des algorithmes de prévision sur des données, d'abord sur l'ensemble du territoire, puis en les filtrant par classes. Une ouverture complémentaire serait l'utilisation d'un traitement modulant les données d'entrée selon les états moyens solaires, par simple soustraction ou division, de façon comparable aux indices de clarté et de ciel clair.

Une autre perspective se baserait sur le fait que l'exploitabilité du potentiel solaire dépend de certaines conditions topographiques. Par exemple, les fortes pentes de l'île sont difficilement accessibles et, en conséquence, les coûts d'installation et de maintenance en sont d'autant plus élevés. Une étude complémentaire nécessiterait de délimiter précisément les zones installables en les filtrant selon la topographie de l'île, mais aussi les caractéristiques des surfaces au sol. Dans une première vision, nous avons jaugé en figure IV.1 la distribution des paramètres topographiques moyens des 10 classes obtenues. Ces calculs ont été faits sur la base d'un modèle numérique de terrain à 30 mètres (NASA JPL, 2009). Pour chaque classe, nous calculons la moyenne des altitudes et autres paramètres topographiques (pente, aspect et distance à la mer) mais aussi des paramètres moyens solaires (amplitude du jour, des saisons et température moyenne). Les distributions relatives obtenues au travers des classes font écho aux études menées pour détailler saisonnalité et évolution diurne de chacune des classes (en figures III.14 et III.16). Cependant, les paramètres topographiques sont calculés sur la même résolution que nos données satellites et lissent de la même façon la variabilité plus fine. Une descente d'échelle statistique permettrait de valider la répartition bien visuelle des distributions obtenues en figure IV.1. Ainsi, il serait intéressant d'appliquer des méthodes de descente d'échelle (Bessafi et al., 2018) à chacun de nos états moyens solaires pour les comparer plus finement avec les paramètres topographiques. Bien que s'agissant d'une reconstruction statistique, la descente d'échelle permettrait aussi d'avoir un aperçu plus précis sur les limites spatiales de nos classes solaires. Il faudra porter une attention particulière sur les zones ennuagées puisque la reconstruction d'une carte de rayonnement globale est plus efficiente en conditions de ciel clair qu'avec une configuration nébuleuse (Oumbe et al., 2011).

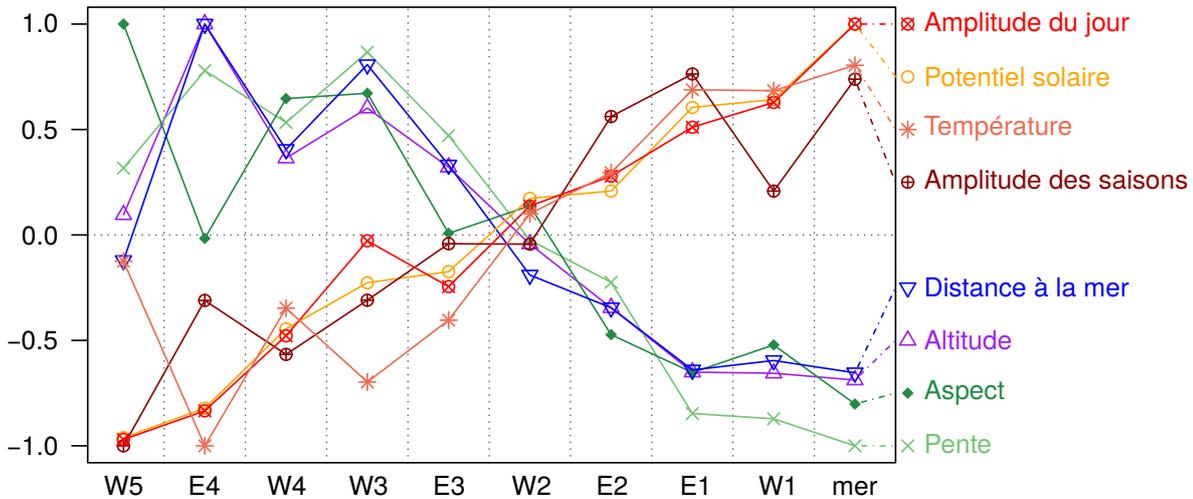


FIGURE IV.1. – Distribution relative des moyennes de chaque classe au regard des paramètres topographiques et solaires selon les différentes classes; *Les classes sont rangées par potentiel solaire moyen croissant. Les paramètres solaires sont calculés à partir des données SARAH-E : le potentiel solaire est le rayonnement solaire global moyen, l'amplitude du jour est le maximum du rayonnement solaire du jour, l'amplitude des saisons est l'écart entre les extrema des amplitudes du jour de chacun des mois de l'année, la température provient des données de l'atlas climatique de Météo-France, soit une climatologie mensuelle reconstruite à 250 mètres de résolution par interpolation spatiale (Jumaux et al., 2011), Les paramètres topographiques sont calculés à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) à 30 mètres (NASA JPL, 2009) : l'altitude est la moyenne sur la zone équivalente que couvrent les pixels de la classe (à ~ 5 km), la distance à la mer est calculée entre le contour de La Réunion et chacun des pixels du MNT selon une distance calculée avec les coordonnées UTM et l'altitude, l'aspect et la pente sont calculés en utilisant la fonction terrain du package raster sous R.*

Chapitre IV : Les perturbations du potentiel solaire

La première partie de « régionalisation » présente exclusivement des cartes à l'échelle de La Réunion. Cependant, les données satellites utilisées offrent une couverture plus large (10°O - 130°E , 70°S - 70°N). Ainsi, nous pourrions estimer les structures de plus grande échelle dans lesquelles s'inscrivent nos régimes de perturbations solaires, particulièrement pour le cas des régimes généralisés. De plus, d'autres grandeurs physiques permettraient d'approfondir l'étude des régimes de perturbations solaires et des structures atmosphériques régionales associées. Parmi elles, les réanalyses du [Centre Européen pour les](#)

Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) proposent un produit nommé ERA-Interim qui nous permettrait de travailler sur des variables caractéristiques des configurations synoptiques et apporter une vision large-échelle au-delà du rayonnement solaire.

Au-delà de la caractérisation des régimes, les réanalyses ERA-Interim sont aussi à utiliser dans le cadre de la deuxième partie du chapitre. Ainsi, les circulations atmosphériques peuvent être détaillées selon les variables que sont, par exemple, le flux radiatif sortant au sommet de l’atmosphère, la température de surface de la mer, les caractéristiques des différents champs de pression mais aussi les grandeurs qui nous permettraient de statuer sur les flux de masse et d’humidité. Plus particulièrement, les valeurs significatives observées dans les deux cas d’étude des [talwegs tropicaux-tempérés \(TTT\)](#) et de l’[oscillation de Madden-Julian \(MJO\)](#) sont à visualiser à des échelles plus larges. En ce qui concerne les [systèmes dépressionnaires tropicaux \(SDT\)](#), un approfondissement serait de trouver un indicateur de l’ennuagement de chacun des [SDT](#). Une autre idée serait de repérer des cyclones particuliers et d’en faire, au cas par cas, l’étude des perturbations solaires induites sur La Réunion. Par ailleurs, la première partie du chapitre aussi pourrait se prêter à une étude focalisée sur les événements de persistance des classes (en figure [IV.7](#)).

En dehors de l’utilisation de données « prête à l’emploi », les modèles numériques pourraient compléter notre étude. Au niveau de La Réunion, ils sont d’ores et déjà des outils utilisés (WRF : [Pohl et al. \(2016\)](#), [Morel et al. \(2014\)](#), [Diagne et al. \(2014\)](#) ; MésoNh : [Guilpart \(2018\)](#), [Guilpart et al. \(2017\)](#), [Durand et al. \(2014\)](#) ; AROME : [Tulet et al. \(2017\)](#)). En préambule, il serait question de consolider les résultats en qualifiant la robustesse des analyses menées avec les données satellites [SARAH-E](#). Puis, nous pourrions affiner les échelles spatiales et temporelles ainsi que de travailler sur les autres grandeurs physiques du modèle. Ainsi, la dynamique atmosphérique serait détaillée à des échelles spatiales plus fines que [SARAH-E](#) le permet.

L’inter-annualité est d’exploitation plus aisée pour des bases de données contenant un plus grand nombre d’années que les 16 ans que nous utilisons ici. Une version actualisée de la base de données utilisée ([SARAH-E v1.1](#)) a récemment rajouté deux années de disponibilité (2006 et 2016). Si l’étude de l’inter-annualité n’en semble pas plus évidente avec l’ajout de ces deux ans, il n’en est pas moins intéressant de tester la robustesse des résultats ici présentés, aussi bien pour le chapitre [III](#) que le chapitre [IV](#). De la même façon que l’actualisation de [SARAH-E](#), une nouvelle version du produit [Solar surfAcE RAdiation Heliosat \(SARAH\)](#) propose des valeurs instantanées que l’on pourrait comparer à celles de [SARAH-E](#). En fonction des résultats de la comparaison, nous pourrions ou non utiliser les 33 ans de [SARAH](#) (1983-2015) et ainsi, étudier l’inter-annualité de la ressource solaire réunionnaise. Ces données d’une période de disponibilité plus longue permettraient d’estimer l’influence des circulations atmosphériques ayant des modes de variabilité supérieurs à ceux que nous avons étudiés. Nous pourrions alors jauger l’influence de l’ENSO sur les perturbations solaires à l’échelle de l’île. Défini par [Wolter](#)

(1993), l'Indice Multivarié d'ENSO (MEI, de l'anglais « *Multivariate ENSO Index* ») décrit mieux le couplage océan-atmosphère du phénomène. La construction de cet indice repose sur des champs aussi bien océaniques qu'atmosphériques, soit de la pression au niveau de la mer, les composantes zonale et méridionale du vent de surface, les températures de surface de la mer et de l'air et la nébulosité. De plus, en ce qui concerne les modes de variabilité de l'Océan Indien, Saji et al. (1999) définissent l'Indice de Mode Dipolaire (DMI, de l'anglais « *Dipole Mode Index* »). Cet indice est un gradient sur les températures de deux zones l'Océan Indien, soit la première (50°E-70°E, 10°S-10°N) et la deuxième (90°E-110°E, 10°S-0°N). De la même façon, un autre dipôle a été mis en évidence dans la partie subtropicale de l'Océan Indien par Behera and Yamagata (2001). Les deux zones concernées par le calcul du gradient de température sont (55°E-65°E, 37°S-27°S) et la deuxième (90°E-100°E, 28°S-18°S).

Du rayonnement solaire global à la production électrique

Sans perdre de vue les problématiques énergétiques locales, nous avons initié la considération d'un modèle de production photovoltaïque.

En premier lieu, nous nous sommes orientés vers l'étude de la production électrique moyenne, en écho avec la méthodologie du chapitre III. Nous souhaitons donc calculer dans un premier temps chacun des états moyens de la production électrique de La Réunion. La production électrique d'un panneau photovoltaïque (P_{PV}) est tributaire de la quantité de rayonnement solaire reçue (G_{tot}) et de son taux de pénétration dans le système (η_c), qui lui-même dépend de la température de la cellule (T_c). En effet, cette dernière va modifier l'efficacité de la transformation du rayonnement en électricité. Ainsi, nous avons :

$$P_{PV} = \eta_c G_{tot} \quad (IV.2)$$

avec P_{PV} : la production électrique d'un panneau photovoltaïque (W),
 G_{tot} : l'énergie solaire totale reçue sur le panneau (W),
 η_c : le rendement du système, qui lui est décrit par l'équation suivante :

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{T_{ref}}) + \gamma \log_{10} G_T] \quad (IV.3)$$

avec $\eta_{T_{ref}}$: le rendement du système à la température T_{ref} ,
 T_{ref} : la température de référence (K),
 T_c : la température de la cellule (K),
 G_T : la quantité de rayonnement solaire ($W.m^{-2}$),
 β_{ref} : le coefficient thermique du système (K^{-1}),
 γ : le coefficient radiatif du système.

Dans une revue bibliographique, Skoplaki and Palyvos (2009) détaillent les formules utilisées pour le rendement et la température de la cellule. La formule détaillée ci-dessus

est celle utilisée par [Notton et al. \(2005\)](#) et plus récemment par [Crook et al. \(2011\)](#) et [Wild et al. \(2015b\)](#).

Par ailleurs, la température de la cellule est dépendante de son environnement (rayonnement solaire, température de l'air et vitesse du vent) mais aussi des caractéristiques du système (propriété du matériau, par exemple : la transmissivité et l'absorption de la plaque). Cependant, nous n'avons pas de mesure de la vitesse du vent à notre disposition et choisissons, à défaut, un modèle qui suppose que la vitesse du vent est nulle. En ce qui concerne la température, les données satellitaires ne fournissant pas des mesures de la température d'une finesse suffisante, nous nous orientons vers l'utilisation des mesures *in situ* de Météo-France (données horaires de 2011-2015). Ces dernières nous permettent d'ajuster une régression linéaire reliant température de l'air ambiant (T) et altitude (z) : $T = a + bz$, sur la base d'un modèle numérique de terrain à 30 mètres ([NASA JPL, 2009](#)). En figure IV.2, la pente (b), le coefficient de corrélation (R^2) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE) sont représentés pour chacune des combinaisons heure \times mois possibles. En atmosphère libre, le gradient thermique vertical est d'environ $-0,6^\circ\text{C}$ pour 100 mètres ([Jumaux et al., 2011](#), p.51). Les pentes obtenues en figure IV.2 en sont proches. Au regard du coefficient de corrélation et de l'erreur moyenne quadratique, nous remarquons que les heures matinales présentent des valeurs moins bonnes que par ailleurs. Il en est de même pendant les heures du milieu de la journée pour les mois de septembre à novembre, c'est-à-dire pendant la transition entre l'hiver et l'été.

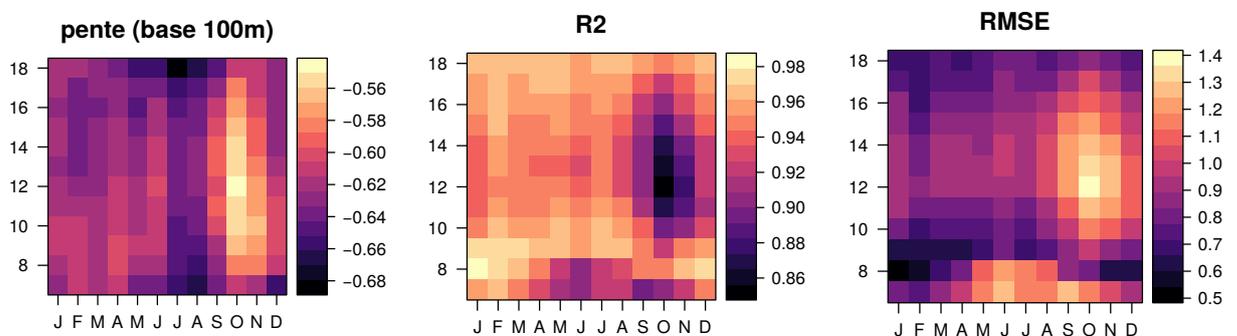


FIGURE IV.2. – Estimation de la reconstruction spatiale de la température selon une régression linéaire de l'altitude. La pente (b) est en $^\circ\text{C}$ par 100mètres, R^2 est le coefficient de corrélation et RMSE est l'erreur moyenne quadratique, en $^\circ\text{C}$. Les abscisses représentent les mois de l'année et les ordonnées sont les heures de la base de données des températures de Météo-France que nous avons utilisées. Les données d'altitudes proviennent du MNT de la [NASA JPL \(2009\)](#).

Ainsi, les cartes des températures de La Réunion pour chaque heure et chaque mois

nous permettent de calculer la température de la cellule T_c selon la formule suivante :

$$T_c = c_1 + c_2 T + c_3 G_{tot} \quad (\text{IV.4})$$

avec T la température de l'air ambiant et c_1 , c_2 , c_3 les variables représentatives du système. De la même façon que (Crook et al., 2011) et (Wild et al., 2015b), nous considérerons le cas de cellule au silicium monocristallin, soit : $c_1 = -3,75^\circ\text{C}$, $c_2 = 1,14$ et $c_3 = 0,0175^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$. En ce qui concerne les paramètres de l'équation IV.3, ils sont alors : $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, $\beta = 0,0045$ et $\gamma = 0,12$ (Skoplaki and Palyvos, 2009).

Pour estimer la qualité du modèle, il aurait fallu comparer les valeurs de production électrique obtenues à celles d'une base de données d'observation *in situ*. N'ayant pas pu en récupérer, nous avons choisi de regarder dans un premier temps la cohérence des structures issues de la même classification que celle appliquée pour les données de rayonnement solaire (méthode en chapitre II). La figure IV.3 présente les cas d'une classification de 2 à 10 classes au regard des états moyens de la production photovoltaïque.

Globalement, le premier cas de classification à 2 classes présente avec une séparation du cœur de l'île qui, à 3 classes, s'affine ensuite autour des côtes et, pour le cas à 4 et 5 classes sur les hautes altitudes. Une répartition est-ouest s'installe partiellement depuis le cas à 6 classes mais de façon moins prononcée que pour le rayonnement solaire (en figure III.13). Le cas à 11 classes (non montré ici) présente une séparation des pixels de la mer, de façon similaire à ce que nous avons obtenu avec le rayonnement solaire (en annexe E.5). En s'intéressant au cas à 10 classes que nous avons étudié pour le rayonnement solaire (en figure III.14), nous retrouvons des zones de production électrique similaires mais avec une séparation plus fine à l'est plutôt que celle du rayonnement solaire qui était plus fine à l'ouest.

Finalement, la caractérisation spatiale des états moyens de la production électrique ne présente pas de différences flagrantes sur les zones déjà établies en chapitre III. Ce résultat était attendu puisque le modèle choisi est simple et est utilisé selon une méthodologie basée sur des moyennes. De plus, la température est d'une variabilité moins importante que les processus nuageux qui impactent le rayonnement solaire, d'où son impact relatif sur les structures de rayonnement solaire.

Dans le cadre d'une étude sur les anomalies de la production photovoltaïque, il faudrait non seulement obtenir des données de températures mais aussi valider le modèle de production photovoltaïque à l'échelle horaire dont la variabilité est nettement plus importante. L'estimation de la reproductibilité du modèle passe par une étape incontournable de comparaison avec des mesures *in situ* de production. Il serait ainsi nécessaire de récupérer des données de production photovoltaïque et de flux solaire à la surface du panneau mais aussi de températures de la cellule. En effet, ceux-ci nous permettraient alors de jauger la cohérence de l'application des équations associées (équations IV.2, IV.3 et IV.4).

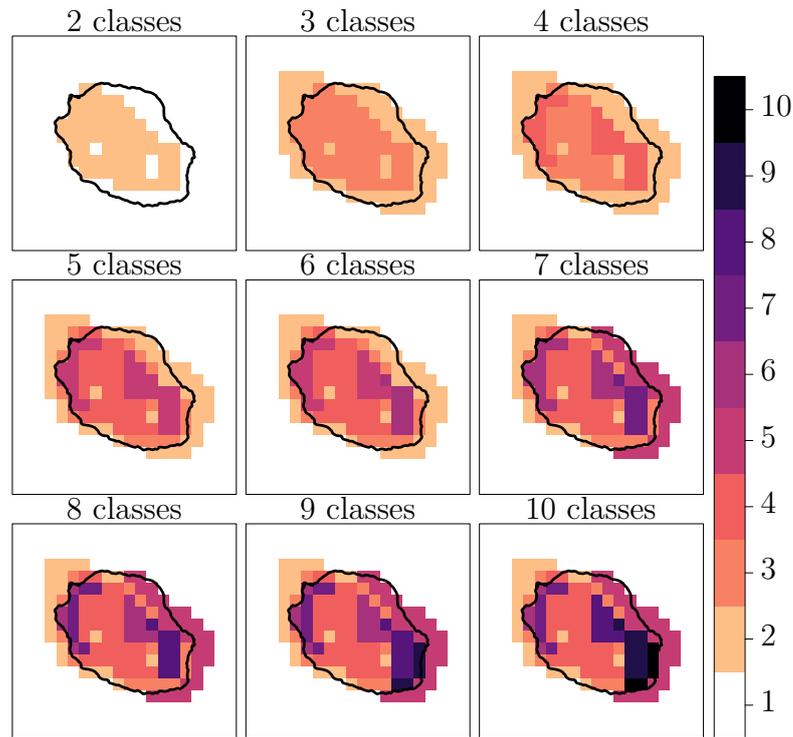


FIGURE IV.3. – Classification des états moyens de la production photovoltaïque de La Réunion. *Chaque classe est représentée par une couleur. Classification hiérarchique ascendante selon un critère de Ward (Ward Jr, 1963).*

De La Réunion aux îles de l’Indianocéanie

La Réunion présente des caractéristiques topographiques modulant fortement la météorologie locale. La comparaison avec d’autres îles de l’Indianocéanie permettrait de mieux cerner les spécificités de La Réunion en restant tout de même sur des territoires de mêmes dimensions et donc avec des problématiques énergétiques *a priori* proches. Ainsi, le cas de l’île Maurice pourrait mettre en avant la spécificité topographique de La Réunion avec ces deux points culminants bien au-dessus de celui de Maurice (828 mètres). D’ailleurs, la ressource solaire de Maurice est déjà un sujet d’étude (Bessafi et al., 2015b). De plus, le satellite Météosat-8, opérant en 41,5°S, ouvre l’application directe des travaux ici-menés bien au-delà de l’île Maurice, et donc sans changer de base de données d’étude. Ainsi, un autre cas d’étude intéressant serait celui de Madagascar (Macron et al., 2016). La comparaison avec un territoire de cette envergure permettrait de mieux appréhender les processus atmosphériques qui gouvernent les modulations du rayonnement solaire avec des façades au vent et sous le vent de dimensions plus grandes que celles de La Réunion.

Bibliographie

- Abellán, E., McGregor, S., England, M. H., and Santoso, A. (2017). Distinctive role of ocean advection anomalies in the development of the extreme 2015–16 El Niño. *Climate Dynamics*. 27
- ADEME, RTE, and ENEDIS (2017). Valorisation socio-économique des réseaux électriques intelligents. Technical report. 3
- Alexandri, G., Georgoulas, A. K., Meleti, C., Balis, D., Kourtidis, K. A., Sanchez-Lorenzo, A., Trentmann, J., and Zanis, P. (2017). A high resolution satellite view of surface solar radiation over the climatically sensitive region of Eastern Mediterranean. *Atmospheric Research*, 188 :107–121. 55
- Alfadda, A., Rahman, S., and Pipattanasomporn, M. (2018). Solar irradiance forecast using aerosols measurements : A data driven approach. *Solar Energy*, 170 :924–939. 16
- Amari, T., Luciani, J.-F., and Aly, J.-J. (2015). Small-scale dynamo magnetism as the driver for heating the solar atmosphere. *Nature*, 522(7555) :188–191. 8
- Amato, U., Antoniadis, A., Cuomo, V., Cuttillo, L., Franzese, M., Murino, L., and Serio, C. (2008). Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, 112(3) :750–766. 54
- André, M. and Brou, Y. T. (2016). Spatio-temporal variability of rainfall and impacts on vegetation in Reunion Island. In *32nd Annual Conference of the South African Society for Atmospheric Sciences (SASAS), At Cape Town (South Africa)*. 39
- ASTMG173-03 (2012). *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances : Direct Normal and Hemispherical on 37 Degree Tilted Surface*. 17, 151
- Badescu, V. and Dumitrescu, A. (2013). The CMSAF hourly solar irradiance database (product CM54) : Accuracy and bias corrections with illustrations for Romania (south-eastern Europe). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 93 :100–109. 55
- Badosa, J., Haeffelin, M., and Chepfer, H. (2013). Scales of spatial and temporal variation of solar irradiance on Reunion tropical island. *Solar Energy*, 88 :42–56. 4, 47, 48, 87, 121

- Badosa, J., Haeffelin, M., Kalecinski, N., Bonnardot, F., and Jumaux, G. (2015). Reliability of day-ahead solar irradiance forecasts on Reunion Island depending on synoptic wind and humidity conditions. *Solar Energy*, 115 :306–321. [4](#), [43](#), [44](#), [87](#), [90](#), [93](#), [128](#), [137](#), [147](#)
- Badosa, J., Wood, J., Blanc, P., Long, C. N., Vuilleumier, L., Demengel, D., and Haeffelin, M. (2014). Solar irradiances measured using SPN1 radiometers : Uncertainties and clues for development. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(12) :4267–4283. [51](#)
- Baldy, S., Ancellet, G., Bessafi, M., Badr, A., and Luk, D. L. S. (1996). Field observations of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (southern tropics). *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 101(D19) :23835–23849. [38](#)
- Baquero-Bernal, A., Latif, M., and Legutke, S. (2002). On Dipolelike Variability of Sea Surface Temperature in the Tropical Indian Ocean. *Journal of Climate*, 15(11) :1358–1368. [28](#)
- Behera, S. K. and Yamagata, T. (2001). Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 28(2) :327–330. [29](#), [155](#)
- Bengulescu, M., Blanc, P., Boilley, A., and Wald, L. (2017). Do modelled or satellite-based estimates of surface solar irradiance accurately describe its temporal variability? *Advances in Science and Research*, 14 :35–48. [56](#)
- Bessafi, M., de A.T. de Carvalho, F., Charton, P., Delsaut, M., Despeyroux, T., Jeanty, P., Lan-Sun-Luk, J. D., Lechevallier, Y., Ralambondrainy, H., and Trovalet, L. (2015a). Clustering of Solar Irradiance. In Lausen, B., Krolak-Schwerdt, S., and Böhmer, M., editors, *Data Science, Learning by Latent Structures, and Knowledge Discovery*, pages 43–53. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [4](#), [47](#), [51](#)
- Bessafi, M., Oree, V., Khoodaruth, A., and Chabriat, J.-P. (2015b). Mapping the incoming solar irradiance over Mauritius using time-series records of Satellite Application Facility on Climate Monitoring. pages 1–6. IEEE. [61](#), [158](#)
- Bessafi, M., Oree, V., Khoodaruth, A., Jumaux, G., Bonnardot, F., Jeanty, P., Delsaut, M., Chabriat, J.-P., and Dauhoo, M. (2018). Downscaling solar irradiance using DEM-based model in young volcanic islands with rugged topography. *Renewable Energy*. [4](#), [46](#), [47](#), [53](#), [61](#), [68](#), [87](#), [91](#), [92](#), [152](#)
- Bessafi, M. and Wheeler, M. C. (2006). Modulation of South Indian Ocean Tropical Cyclones by the Madden–Julian Oscillation and Convectively Coupled Equatorial Waves. *Monthly Weather Review*, 134(2) :638–656. [27](#), [80](#)

- Boilley, A. and Wald, L. (2015). Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy*, 75 :135–143. 56
- Boland, J., David, M., and Lauret, P. (2016). Short term solar radiation forecasting : Island versus continental sites. *Energy*, 113 :186–192. 150
- Borexino Collaboration (2014). Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun. *Nature*, 512(7515) :383–386. 8
- Brinckmann, S., Trentmann, J., and Ahrens, B. (2013). Homogeneity Analysis of the CM SAF Surface Solar Irradiance Dataset Derived from Geostationary Satellite Observations. *Remote Sensing*, 6(1) :352–378. 55
- Cerrone, D., Fusco, G., Simmonds, I., Aulicino, G., and Budillon, G. (2017). Dominant Covarying Climate Signals in the Southern Ocean and Antarctic Sea Ice Influence during the Last Three Decades. *Journal of Climate*, 30(8) :3055–3072. 27
- Cerverny, R. S., Lawrimore, J., Edwards, R., and Landsea, C. (2007). Extreme Weather Records : Compilation, Adjudication, and Publication. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(6) :853–860. 39
- Cheng, L., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Abraham, J., and Zhu, J. (2017). Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015. *Science Advances*, 3(3) :e1601545. 1
- Cheng, X. and Wallace, J. M. (1993). Cluster Analysis of the Northern Hemisphere Wintertime 500-hPa Height Field : Spatial Patterns. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(16) :2674–2696. 79
- Cook, K. H. (2000). The South Indian convergence zone and interannual rainfall variability over southern Africa. *Journal of Climate*, 13(21) :3789–3804. 25
- Crétat, J., Pohl, B., Chateau Smith, C., Vigaud, N., and Richard, Y. (2015). An original way to evaluate daily rainfall variability simulated by a regional climate model : The case of South African austral summer rainfall : A CLUSTERING APPROACH TO ASSESS SIMULATED DAILY RAINFALL. *International Journal of Climatology*, 35(9) :2485–2502. 77
- Crétat, J., Richard, Y., Pohl, B., Rouault, M., Reason, C., and Fauchereau, N. (2012). Recurrent daily rainfall patterns over South Africa and associated dynamics during the core of the austral summer. *International Journal of Climatology*, 32(2) :261–273. 77

- Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., and Crook, R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy & Environmental Science*, 4(9) :3101. [156](#), [157](#)
- David, M., Luis, M. A., and Lauret, P. (2018). Comparison of intraday probabilistic forecasting of solar irradiance using only endogenous data. *International Journal of Forecasting*, 34(3) :529–547. [150](#), [151](#)
- Diabaté, L., Blanc, P., and Wald, L. (2004). Solar radiation climate in Africa. *Solar Energy*, 76(6) :733–744. [77](#)
- Diagne, M., David, M., Boland, J., Schmutz, N., and Lauret, P. (2014). Post-processing of solar irradiance forecasts from WRF model at Reunion Island. *Solar Energy*, 105 :99–108. [154](#)
- Duncan, R. (1981). Hotspots in the southern oceans—an absolute frame of reference for motion of the Gondwana continents. *Tectonophysics*, 74(1-2) :29–42. [31](#)
- Dupuy, S., Londoño Villegas, M. M., Lebourgeois, V., Le Maire, G., Tran, A., and Gaetano, R. (2017). Cartographie de l’occupation du sol agricole à la Réunion utilisation d’images gratuites et de logiciels libres. [39](#)
- Durand, J., Tulet, P., Leriche, M., Bielli, S., Villeneuve, N., Muro, A. D., and Fillipi, J.-B. (2014). Modeling the lava heat flux during severe effusive volcanic eruption : An important impact on surface air quality :. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 119(20) :11,729–11,742. [154](#)
- Dvorak, V. F. (1984). *Tropical Cyclone Intensity Analysis Using Satellite Data*, volume 11. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service. [26](#)
- Fauchereau, N., Pohl, B., and Lorrey, A. (2016). Extratropical Impacts of the Madden–Julian Oscillation over New Zealand from a Weather Regime Perspective. *Journal of Climate*, 29(6) :2161–2175. [24](#)
- Fauchereau, N., Pohl, B., Reason, C. J. C., Rouault, M., and Richard, Y. (2009). Recurrent daily OLR patterns in the Southern Africa/Southwest Indian Ocean region, implications for South African rainfall and teleconnections. *Climate Dynamics*, 32(4) :575–591. [25](#), [79](#), [81](#), [82](#), [83](#), [120](#), [140](#), [141](#), [142](#), [224](#)
- Garrett, A. J. (1980). Orographic Cloud over the Eastern Slopes of Mauna Loa Volcano, Hawaii, Related to Insolation and Wind. *Monthly Weather Review*, 108(7) :931–941. [44](#)

- Gill, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics (International Geophysics Series)*. Academic press. 20
- Gloersen, P. (1995). Modulation of hemispheric sea-ice cover by ENSO events. *Nature*, 373(6514) :503. 27
- Gray, W. M. (1975). Tropical cyclone genesis. *Atmospheric science paper; no. 234*. 26, 138
- Gueymard, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5) :325–346. 151
- Gueymard, C. A. (2005). SMARTS Code, Version 2.9. 5 User's Manual. *Solar Consulting Services*. Available from http://www.solarconsultingservices.com/SMARTS295_manual.pdf. 151
- Gueymard, C. A. (2012). Temporal variability in direct and global irradiance at various time scales as affected by aerosols. *Solar Energy*, 86(12) :3544–3553. 16, 44
- Guilpart, E. (2018). *Etude de La Composition Isotopique (Deutérium et Oxygène 18) de La Vapeur d'eau Dans l'atmosphère Sur l'île de La Réunion : Apport à La Compréhension Des Processus Humides Atmosphériques En Région Tropicale*. PhD Thesis, Paris Saclay. 40, 41, 154
- Guilpart, E., Vimeux, F., Evan, S., Brioude, J., Metzger, J.-M., Barthe, C., Risi, C., and Cattani, O. (2017). The isotopic composition of near-surface water vapor at the Maïdo observatory (Reunion Island, southwestern Indian Ocean) documents the controls of the humidity of the subtropical troposphere : Water Vapor Isotopes in Reunion Island. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 122(18) :9628–9650. 154
- Habte, A., Sengupta, M., Andreas, A., Wilcox, S., and Stoffel, T. (2016). Intercomparison of 51 radiometers for determining global horizontal irradiance and direct normal irradiance measurements. *Solar Energy*, 133 :372–393. 51
- Hakuba, M. Z., Folini, D., Schaepman-Strub, G., and Wild, M. (2014). Solar absorption over Europe from collocated surface and satellite observations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 119(6) :3420–3437. 55
- Hall, J. D., Matthews, A. J., and Karoly, D. J. (2001). The modulation of tropical cyclone activity in the Australian region by the Madden–Julian oscillation. *Monthly Weather Review*, 129(12) :2970–2982. 80

- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., and von Schuckmann, K. (2011). Earth's energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24) :13421–13449. [19](#)
- Hart, N. C., Reason, C. J., and Fauchereau, N. (2013). Cloud bands over southern Africa : Seasonality, contribution to rainfall variability and modulation by the MJO. *Climate dynamics*, 41(5-6) :1199–1212. [26](#)
- Haxton, W. (2014). What makes the Sun shine : Neutrino physics. *Nature*, 512(7515) :378–380. [8](#)
- Hoell, A., Funk, C., Zinke, J., and Harrison, L. (2017). Modulation of the Southern Africa precipitation response to the El Niño Southern Oscillation by the subtropical Indian Ocean Dipole. *Climate Dynamics*, 48(7-8) :2529–2540. [30](#)
- Horowitz, H. M., Garland, R. M., Thatcher, M., Landman, W. A., Dedekind, Z., van der Merwe, J., and Engelbrecht, F. A. (2017). Evaluation of climate model aerosol seasonal and spatial variability over Africa using AERONET. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(22) :13999–14023. [44](#)
- Hsu, P.-C. and Xiao, T. (2017). Differences in the Initiation and Development of the Madden–Julian Oscillation over the Indian Ocean Associated with Two Types of El Niño. *Journal of Climate*, 30(4) :1397–1415. [27](#)
- Huld, T., Müller, R., Gracia Amillo, A., Pfeifroth, U., and Trentmann, J. (2016). *Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat, Meteosat-East (SARAH-E) - Edition 1*. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). [54](#)
- IPCC, editor (2014). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. [14](#), [15](#), [44](#)
- Jeanty, P., Delsaut, M., Trovalet, L., Ralambondrainy, H., Lan-Sun-Luk, J., Bessafi, M., Charton, P., and Chabriat, J.-P. (2013). Clustering daily solar radiation from Reunion Island using data analysis methods. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. [51](#)
- Jones, D., Sakhel, A., Buck, M., and Graichen, P. (2018). The European Power Sector in 2017. State of Affairs and Review of Current Developments. Technical report, Tech. rep. Agora Energiewende and Sandbag, 2018. [2](#)
- Jumaux, G., Quetelard, H., and Roy, D. (2011). *Atlas climatique de la Réunion*. Météo-France, Direction interrégionale de la Réunion, Sainte-Clotilde (Réunion). [4](#), [23](#), [38](#), [39](#), [41](#), [42](#), [43](#), [45](#), [46](#), [53](#), [66](#), [87](#), [91](#), [92](#), [110](#), [123](#), [126](#), [138](#), [153](#), [156](#)

- Kopp, G. and Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1). [9](#)
- Lajoie, G. and Hagen-Zanker, A. (2007). La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : Apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. *Cybergeo : European Journal of Geography*. [36](#), [37](#)
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., and Morcrette, J.-J. (2013). McClear : A new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(9) :2403–2418. [151](#)
- Lénat, J.-F., Bachèlery, P., and Merle, O. (2012). Anatomy of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion, Indian Ocean). *Bulletin of Volcanology*, 74(9) :1945–1961. [32](#)
- Leroux, M.-D., Meister, J., Mekies, D., Dorla, A.-L., and Caroff, P. (2018). A Climatology of Southwest Indian Ocean Tropical Systems : Their Number, Tracks, Impacts, Sizes, Empirical Maximum Potential Intensity, and Intensity Changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(4) :1021–1041. [27](#), [81](#), [138](#)
- Lesouëf, D. (2010). *Étude Numérique Des Circulations Locales à La Réunion : Application à La Dispersion de Polluants*. PhD Thesis, Université de la Réunion. [40](#)
- Lesouëf, D., Gheusi, F., Delmas, R., and Escobar, J. (2011). Numerical simulations of local circulations and pollution transport over Reunion Island. *Annales Geophysicae*, 29(1) :53–69. [90](#), [93](#)
- Li, P. (2015). *Temporal and Spatial Variability of Surface Solar Radiation over the South-West Indian Ocean and Reunion Island : Regional Climate Modeling*. PhD Thesis, La Réunion. [61](#), [77](#), [91](#), [92](#)
- Li, Q., Bessafi, M., Delage, O., Chabriat, J.-P., and Li, P. (2015). Intermittency study of global solar radiation on Reunion Island using Hilbert-Huang transform. 3rd Southern African Solar Energy Conference, South Africa, 11-13 May, 2015. [46](#)
- Liebmann, B. and Smith, C. A. (1996). Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(6) :1275–1277. [81](#), [82](#), [83](#), [85](#)
- Liou, K.-N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*, volume 84. Elsevier. [13](#)
- Lohmann, G. M. (2018). Irradiance Variability Quantification and Small-Scale Averaging in Space and Time : A Short Review. [15](#), [150](#)

- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, volume 1, pages 281–297. Oakland, CA, USA. [79](#)
- Macron, C. (2014). *Les Talwegs Tropicaux Tempérés En Afrique Australe : Mécanismes et Évolution Face Au Changement Climatique (2010-2099)*. PhD Thesis, Dijon. [25](#)
- Macron, C., Pohl, B., Richard, Y., and Bessafi, M. (2014). How do Tropical Temperate Troughs Form and Develop over Southern Africa? *Journal of Climate*, 27(4) :1633–1647. [79](#)
- Macron, C., Richard, Y., Garot, T., Bessafi, M., Pohl, B., Ratiarison, A., and Razafindrabe, A. (2016). Intraseasonal Rainfall Variability over Madagascar. *Monthly Weather Review*, 144(5) :1877–1885. [5](#), [53](#), [79](#), [158](#)
- Madden, R. A. and Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(5) :702–708. [23](#)
- Maitrepierre, L. and Divoul, L. (2001). *Le gisement solaire en Nouvelle-Calédonie*. Météo-France, Direction interrégionale de la Nouvelle-Calédonie et de Wallis et Futuna. [10](#)
- Malardel, S. (2005). Fondamentaux de météorologie. *Cépadués éditions*. [17](#), [20](#), [21](#)
- Mambrini, T., Dubois, A. M., Longeaud, C., Badosa, J., Haeffelin, M., Prieur, L., and Radivoniuk, V. (2015). Photovoltaic yield : Correction method for the mismatch between the solar spectrum and the reference ASTM G 173-03 spectrum. *EPJ Photovoltaics*, 6 :60701. [16](#)
- Mauricio Zambrano-Bigiarini (2017). *hydroGOF : Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series*. [60](#)
- McIlveen, R. (1992). *Fundamentals of Weather and Climate*. Springer. [21](#)
- Meftah, M., Damé, L., Bolsée, D., Hauchecorne, A., Pereira, N., Sluse, D., Cessateur, G., Irbah, A., Bureau, J., Weber, M., Bramstedt, K., Hilbig, T., Sarkissian, A., Thiéblemont, R., Marchand, M., Lefèvre, F., and Bekki, S. (2017). SOLAR-ISS : A new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations. *Astronomy & Astrophysics*. [9](#), [12](#)
- Michelangeli, P.-A., Vautard, R., and Legras, B. (1995). Weather regimes : Recurrence and quasi stationarity. *Journal of the atmospheric sciences*, 52(8) :1237–1256. [79](#), [80](#), [120](#)

- Morel, B., Pohl, B., Richard, Y., Bois, B., and Bessafi, M. (2014). Regionalizing Rainfall at Very High Resolution over La Réunion Island Using a Regional Climate Model. *Monthly Weather Review*, 142(8) :2665–2686. [53](#), [77](#), [125](#), [154](#)
- Muñoz-Díaz, D. and Rodrigo, F. S. (2004). Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain (1912-2000) using cluster and principal component analysis : Comparison. *Annales Geophysicae*, 22(5) :1435–1448. [77](#)
- Mueller, R. and Träger-Chatterjee, C. (2014). Brief Accuracy Assessment of Aerosol Climatologies for the Retrieval of Solar Surface Radiation. *Atmosphere*, 5(4) :959–972. [16](#)
- Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., Cremer, R., Trentmann, J., and Hollmann, R. (2015a). *Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 1*. EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). [54](#), [64](#)
- Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., Trentmann, J., and Cremer, R. (2015b). Digging the METEOSAT Treasure—3 Decades of Solar Surface Radiation. *Remote Sensing*, 7(6) :8067–8101. [65](#)
- NASA JPL (2009). *ASTER Global Digital Elevation Model*. NASA JPL. [33](#), [35](#), [152](#), [153](#), [156](#)
- Neumann, C. (1993). Global Overview. In : Global guide to tropical cyclone forecasting, WMO/TC-No. 560. *Report No.* [27](#)
- Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., and Poggi, P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18) :2854–2877. [156](#)
- Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., and Chen, X. (2018). Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS) : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 :250–279. [11](#)
- Oehler, J.-F., Lénat, J.-F., and Labazuy, P. (2008). Growth and collapse of the Reunion Island volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 70(6) :717–742. [32](#)
- OER (2017). Bilan énergétique de La Réunion 2016 - Édition 2017. Technical report. [3](#)
- OMM (1975). *Atlas International Des Nuages - Manuel de l'observation Des Nuages et Autres Météores*. Number I-407. [15](#)

- OMM (2014). Annex1.B. Siting classification for surface observing stations on land. Technical report. [53](#)
- Oumbe, A., Blanc, P., Gschwind, B., Lefevre, M., Qu, Z., Schroedter-Homscheidt, M., and Wald, L. (2011). Solar irradiance in clear atmosphere : Study of parameterisations of change with altitude. *Advances in Science and Research*, 6 :199–203. [46](#), [152](#)
- Perez, R., Rábago, K. R., Trahan, M., Rawlings, L., Norris, B., Hoff, T., Putnam, M., and Perez, M. (2016). Achieving very high PV penetration – The need for an effective electricity remuneration framework and a central role for grid operators. *Energy Policy*, 96 :27–35. [149](#)
- Peters, B. J., Carlson, R. W., Day, J. M. D., and Horan, M. F. (2018). Hadean silicate differentiation preserved by anomalous $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios in the Réunion hotspot source. *Nature*, 555(7694) :89–93. [31](#)
- Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., and Hollmann, R. (2018). Trends and Variability of Surface Solar Radiation in Europe Based On Surface- and Satellite-Based Data Records : TRENDS AND VARIABILITY OF SURFACE SOLAR RADIATION. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*. [55](#)
- Pfeifroth, U., Trentmann, J., Fink, A. H., and Ahrens, B. (2016). Evaluating Satellite-Based Diurnal Cycles of Precipitation in the African Tropics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(1) :23–39. [55](#)
- Podgorny, I., Conant, W., Ramanathan, V., and Satheesh, S. (2000). Aerosol modulation of atmospheric and surface solar heating over the tropical Indian Ocean. *Tellus B*, 52(3) :947–958. [45](#)
- Pohl, B. (2007). *L'Oscillation de Madden-Julian et La Variabilité Pluviométrique Régionale En Afrique Subsaharienne*. PhD Thesis, Université de Bourgogne. [23](#)
- Pohl, B. (2015). *Variabilité Climatique Régionale En Afrique Australe : Observations, Modélisation*. HDR. [25](#), [85](#)
- Pohl, B. and Camberlin, P. (2014). A typology for intraseasonal oscillations. *International Journal of Climatology*, 34(2) :430–445. [24](#)
- Pohl, B., Morel, B., Barthe, C., and Bousquet, O. (2016). Regionalizing Rainfall at Very High Resolution over La Réunion Island : A Case Study for Tropical Cyclone Ando. *Monthly Weather Review*, 144(11) :4081–4099. [39](#), [125](#), [154](#)

- Posselt, R., Mueller, R. W., Stöckli, R., and Trentmann, J. (2012). Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring — the CM-SAF retrieval in international comparison. *Remote Sensing of Environment*, 118 :186–198. [55](#)
- Posselt, R., Müller, R., Stöckli, R., and Trentmann, J. (2011). CM SAF surface radiation MVIRI data set 1.0—monthly means/daily means/hourly means. *Satellite application facility on climate monitoring*. doi, 10. [54](#)
- Praene, J. P., David, M., Sinama, F., Morau, D., and Marc, O. (2012). Renewable energy : Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1) :426–442. [3](#), [45](#), [149](#)
- Quetelard, H., Bessemoulin, P., Cervený, R. S., Peterson, T. C., Burton, A., and Boodhoo, Y. (2009). Extreme Weather : World-Record Rainfalls During Tropical Cyclone Gamede. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(5) :603–608. [39](#), [139](#)
- Ramos, M. (2001). Divisive and hierarchical clustering techniques to analyse variability of rainfall distribution patterns in a Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 57(2) :123–138. [77](#)
- Randriambelo, T., Baray, J.-L., and Baldy, S. (2000). Effect of biomass burning, convective venting, and transport on tropospheric ozone over the Indian Ocean : Reunion Island field observations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 105(D9) :11813–11832. [45](#)
- Réunion, R. (2016). Programmation Pluriannuelle de l'Énergie de La Réunion - 2016-2018/2019-2023. Technical report. [2](#), [3](#)
- Riihelä, A., Carlund, T., Trentmann, J., Müller, R., and Lindfors, A. V. (2015). Validation of CM SAF Surface Solar Radiation Datasets over Finland and Sweden. *Remote Sensing*, 7(6) :6663–6682. [55](#)
- Riihelä, A., Kallio, V., Devraj, S., Sharma, A., and Lindfors, A. V. (2018). Validation of the SARA-E Satellite-Based Surface Solar Radiation Estimates over India. *Remote Sensing*, 10(3) :392. [15](#), [55](#), [56](#), [66](#), [75](#)
- Risi, C. and Duvel, J.-P. (2014). L'oscillation de Madden-Julian, principal mode de variabilité intrasaisonnière dans les tropiques. *La Météorologie*, 8(86) :57. [24](#)
- Rochas, M. J. (2017). Le nouvel Atlas international des nuages. *Rubrique : Échos*. [15](#)
- Roumpakias, E., Zogou, O., and Stamatelos, A. (2015). Correlation of actual efficiency of photovoltaic panels with air mass. *Renewable Energy*, 74 :70–77. [11](#)

- RTE (2017). Réseaux électriques intelligents - Valeur économique, environnementale et déploiement d'ensemble. Technical report. [3](#)
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., and Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751) :360–363. [28](#), [155](#)
- Salvany, T., Lahitte, P., Nativel, P., and Gillot, P.-Y. (2012). Geomorphic evolution of the Piton des Neiges volcano (Réunion Island, Indian Ocean) : Competition between volcanic construction and erosion since 1.4Ma. *Geomorphology*, 136(1) :132–147. [32](#)
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., and Trentmann, J. (2013). Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation dataset over Europe against a homogenized surface dataset (1983–2005). *Remote Sensing of Environment*, 134 :355 – 366. [55](#)
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., and Cai, W. (2017). The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4) :1079–1129. [27](#)
- Schulz, J., Albert, P., Behr, H.-D., Caprion, D., Deneke, H., Dewitte, S., Durr, B., Fuchs, P., Gratzki, A., Hechler, P., and others (2009). Operational climate monitoring from space : The EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(5) :1687–1709. [54](#)
- Schwabe, M. (1844). Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843. Von Herrn Hofrath Schwabe in Dessau. *Astronomische Nachrichten*, 21 :233. [12](#)
- Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., van den Broeke, M., Velicogna, I., Whitehouse, P., Briggs, K., Joughin, I., Krinner, G., and others (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 556 :pages219–222. [1](#)
- Shinoda, T. and Han, W. (2005). Influence of the Indian Ocean Dipole on Atmospheric Subseasonal Variability. *Journal of Climate*, 18(18) :3891–3909. [28](#)
- Shinoda, T., Hendon, H. H., and Alexander, M. A. (2004). Surface and subsurface dipole variability in the Indian Ocean and its relation with ENSO. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 51(5) :619–635. [28](#)
- Skoplaki, E. and Palyvos, J. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5) :614–624. [155](#), [157](#)
- Soler, O. (1997). *Atlas Climatique de La Réunion*. Météo-France, Direction interrégionale de la Réunion. [45](#), [53](#), [66](#), [110](#)

- SPM, I. W. (2014). IPCC, 2014 : Summary for policymakers. *Climate change*. 1
- Staudacher, T., Peltier, A., Ferrazzini, V., Di Muro, A., Boissier, P., Catherine, P., Kowalski, P., Lauret, F., and Lebreton, J. (2016). Fifteen Years of Intense Eruptive Activity (1998–2013) at Piton de la Fournaise Volcano : A Review. In Bachelery, P., Lenat, J.-F., Di Muro, A., and Michon, L., editors, *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean*, pages 139–170. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 32
- Steyn, D. (1980). The calculation of view factors from fisheye-lens photographs : Research note. *Atmosphere-Ocean*, 18(3) :254–258. 35
- Strugarek, A., Beaudoin, P., Charbonneau, P., Brun, A. S., and do Nascimento, J.-D. (2017). Reconciling solar and stellar magnetic cycles with nonlinear dynamo simulations. *Science*, 357(6347) :185–187. 12
- Tang, C., Morel, B., Wild, M., Pohl, B., Abiodun, B., and Bessafi, M. (2018). Numerical simulation of surface solar radiation over Southern Africa. Part 1 : Evaluation of regional and global climate models. *Climate Dynamics*, pages 1–21. 4
- Tapaches, E. (2015). *Estimation Du Potentiel de La Technologie Solaire Thermodynamique à Concentration En Climat Non Désertique-Application à La Réunion*. PhD Thesis, Université de la Réunion. 91, 92
- Taupin, F. G., Bessafi, M., Baldy, S., and Bremaud, P. J. (1999). Tropospheric ozone above the southwestern Indian Ocean is strongly linked to dynamical conditions prevailing in the tropics. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 104(D7) :8057–8066. 22
- Thies, B. and Bendix, J. (2011). Satellite based remote sensing of weather and climate : Recent achievements and future perspectives : Satellite based remote sensing of weather and climate. *Meteorological Applications*, 18(3) :262–295. 54
- Tiwari, G. N. (2002). *Solar Energy : Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science Int'l Ltd. 12
- Todd, M. C., Washington, R., and Palmer, P. I. (2004). Water vapour transport associated with tropical–temperate trough systems over southern Africa and the southwest Indian Ocean. *International Journal of Climatology*, 24(5) :555–568. 26
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., and Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1) :17. 1, 19

- Trentmann, J. and Huld, T. (2017). Product User Manual SARAH-E - Meteosat-East Solar Surface Irradiance Data records. Technical report. [54](#), [55](#), [66](#)
- Trentmann, J., Träger-Chatterjee, C., and Müller, R. (2014). Product User Manual SARAH - Meteosat Solar Surface Irradiance and effective Cloud Albedo Climate Data records. Technical report. [54](#), [55](#), [66](#)
- Trentmann, J., Träger-Chatterjee, C., Müller, R., Posselt, R., and Stöckli, R. (2013). Product User Manual - Mteosat (MVIRI) Solar Surface Irradiance and effective Cloud Albedo Climate Data Sets. Technical report. [54](#), [55](#)
- Tufféry, S. (2012). *Data Mining et Statistique Décisionnelle : L'intelligence Des Données*. Éditions Technip. [76](#), [77](#)
- Tulet, P., Di Muro, A., Colomb, A., Denjean, C., Dufflot, V., Arellano, S., Foucart, B., Brioude, J., Sellegri, K., Peltier, A., Aiuppa, A., Barthe, C., Bhugwant, C., Bielli, S., Boissier, P., Boudoire, G., Bourriane, T., Brunet, C., Burnet, F., Cammas, J.-P., Gabarrot, F., Galle, B., Giudice, G., Guadagno, C., Jeamblu, F., Kowalski, P., Leclair de Bellevue, J., Marquestaut, N., Mékies, D., Metzger, J.-M., Pianezze, J., Portafaix, T., Sciare, J., Tournigand, A., and Villeneuve, N. (2017). First results of the Piton de la Fournaise STRAP 2015 experiment : Multidisciplinary tracking of a volcanic gas and aerosol plume. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(8) :5355–5378. [154](#)
- Urraca, R., Gracia-Amillo, A. M., Koubli, E., Huld, T., Trentmann, J., Riihelä, A., Lindfors, A. V., Palmer, D., Gottschalg, R., and Antonanzas-Torres, F. (2017). Extensive validation of CM SAF surface radiation products over Europe. *Remote Sensing of Environment*, 199 :171–186. [55](#)
- Vigaud, N., Pohl, B., and Crétat, J. (2012). Tropical-temperate interactions over southern Africa simulated by a regional climate model. *Climate Dynamics*, 39(12) :2895–2916. [79](#)
- Von Schuckmann, K., Palmer, M., Trenberth, K., Cazenave, A., Chambers, D., Champollion, N., Hansen, J., Josey, S., Loeb, N., Mathieu, P.-P., and others (2016). An imperative to monitor Earth's energy imbalance. *Nature Climate Change*, 6(2) :138. [1](#), [19](#)
- Vuilleumier, L., Félix, C., Vignola, F., Blanc, P., Badosa, J., Kazantzidis, A., and Calpini, B. (2017). Performance Evaluation of Radiation Sensors for the Solar Energy Sector. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(5) :485–505. [51](#)
- Wang, C. and Wang, X. (2013). Classifying El Niño Modoki I and II by Different Impacts on Rainfall in Southern China and Typhoon Tracks. *Journal of Climate*, 26(4) :1322–1338. [27](#)

- Ward Jr, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301) :236–244. [77](#), [158](#)
- Wheeler, M. C. and Hendon, H. H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index : Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 132(8) :1917–1932. [24](#), [83](#), [85](#), [143](#), [144](#), [223](#)
- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain Meteorology : Fundamentals and Applications*. Oxford University Press. [40](#)
- WikimediaCommons (2015). *Location of Department No. 974 in France*. [31](#)
- Wild, M. (2008). Short-wave and long-wave surface radiation budgets in GCMs : A review based on the IPCC-AR4/CMIP3 models. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, 60(5) :932–945. [8](#)
- Wild, M., Folini, D., Hakuba, M. Z., Schär, C., Seneviratne, S. I., Kato, S., Rutan, D., Ammann, C., Wood, E. F., and König-Langlo, G. (2015a). The energy balance over land and oceans : An assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Climate Dynamics*, 44(11-12) :3393–3429. [18](#)
- Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., and Müller, B. (2015b). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 116 :12–24. [156](#), [157](#)
- Wild, M., Folini, D., Schär, C., Loeb, N., Dutton, E. G., and König-Langlo, G. (2013). The global energy balance from a surface perspective. *Climate Dynamics*, 40(11-12) :3107–3134. [9](#), [18](#), [50](#), [67](#)
- Wild, M., Ohmura, A., Schär, C., Müller, G., Folini, D., Schwarz, M., Hakuba, M. Z., and Sanchez-Lorenzo, A. (2017). The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017 : A database for worldwide measured surface energy fluxes. *Earth System Science Data*, 9(2) :601–613. [18](#), [50](#), [53](#), [67](#)
- Willmott, C. J. and Vernon, M. T. (1980). Solar climates of the conterminous united states : A preliminary investigation. *Solar Energy*, 24(3) :295–303. [77](#)
- Wolter, K. (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. In *Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop, 1993*. [154](#)
- Wood, J., Potter, E., Nobbs, S., and Webb, N. (2007). User Manual for the Sunshine Pyranometer Type SPN1. *Delta-T Devices : Cambridge, UK*. [51](#)
- Wood, J. G. (1999). Solar Radiation Sensor. Brevet WO 99/13359. [51](#)

- Zakšek, K., Oštir, K., and Kokalj, Ž. (2011). Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3(2) :398–415. [35](#)
- Zeeman, P. (1897). The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance. *Nature*, 55(1424) :347–347. [12](#)
- Zhang, W., Wang, Y., Jin, F.-F., Stuecker, M. F., and Turner, A. G. (2015). Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship : Relation of IOD with Two-Type El Niño. *Geophysical Research Letters*, 42(20) :8570–8576. [28](#)

Annexe A.

Figures annexes de la description des stations *in situ*

1. Données du laboratoire

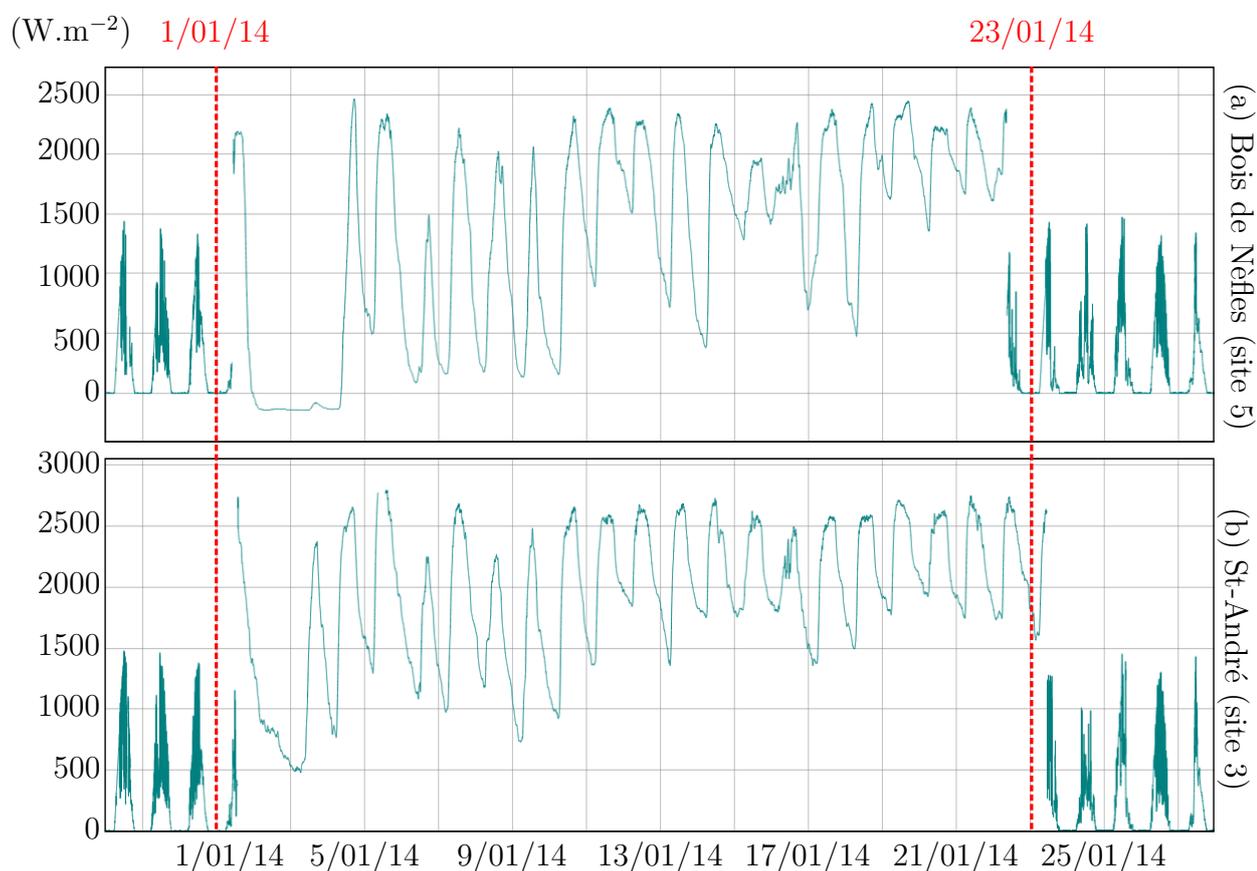


FIGURE A.1. – Rayonnement solaire global des deux stations du laboratoire perturbées par Bejisa : la station de St-André est en noir et la station du Moufia - Bois de Nèfles est en rouge. Les données couvrent la période du 1-01-2014 au 27-01-2014, au pas de temps de la minute.

2. Données Météo-France

En complément de la qualification interne de Météo-France de leur station, nous détaillons le classement de l'[Organisation Météorologique Mondiale \(OMM\)](#) des sites selon le site et le capteur au travers d'un tableau (table [A.1](#)) reprenant par ailleurs la référence de chaque capteur et d'une carte (figure [A.2](#)) représentant les trois différents classements.

TABLE A.1. – Tableau descriptif des stations Météo-France. *Le réseau auquel est rattaché la station est MF pour Météo-France ou C pour le CIRAD. Les capteurs sont tous des KIPP&ZONEN (noté K&Z). Les deux classes des sites et capteurs sont celle de l'OMM. Pour les capteurs, 1 signifie "First class" et 2 signifie "Secondary standard". Devant chaque ligne du tableau, à gauche, le numéro entre parenthèses est repris dans la figure suivante A.2.*

	Nom de la station	Lon (°E)	Lat (°S)	Alt (m)	Réseau	Référence K&Z	Classes des site & capteur	
1	Gillot-Aéroport	55.528	20.892	8	MF	CM6B	1	1
2	Bellecombe	55.687	21.217	2245	MF	CM6B	2	1
3	Bellevue Bras-Panon	55.622	21.005	480	MF	CM11	2	2
4	Cilaos	55.471	21.134	1197	MF	CM5	3	1
5	Colimaçon	55.304	21.130	798	MF	CM6B	2	1
6	Gros Piton Ste-Rose	55.828	21.179	181	MF	CM5	2	1
7	Le Baril	55.732	21.359	115	MF	CM6B	2	1
8	Le Port	55.282	20.946	9	MF	CM6B	2	1
9	Petite-France	55.342	21.045	1200	MF	CM5	2	1
10	Pierrefonds-Aéroport	55.425	21.320	21	MF	CM11	1	2
11	Piton-Maïdo	55.381	21.076	2150	MF	CM5	2	1
12	Plaine des Cafres	55.572	21.209	1560	MF	CM5	2	1
13	Plaine des Palmistes	55.627	21.136	1032	MF	CM6B	2	1
14	Pointe des Trois-Bassins	55.247	21.105	5	MF	CM5	2	1
15	Pont-Mathurin	55.380	21.265	19	MF	CM6B	2	1
16	St-Benoit	55.719	21.058	43	MF	CM6B	2	1
17	Bois de Nèfles St-Paul	55.341	20.997	595	C	CM6B	3	1
18	L'Étang St-Leu	55.308	21.173	429	C	CM6B	3	1
19	L'Ermitage	55.241	21.053	147	C	CM6B	3	1
20	Le Gol les Hauts	55.428	21.245	365	C	CM5	3	1
21	Le Tampon	55.530	21.251	860	C	CM6B	2	1
22	Les Avirons	55.327	21.239	180	C	CM6B	3	1
23	Ligne-Paradis	55.485	21.319	156	C	CM5	2	1
24	Petite-Île	55.558	21.365	155	C	CMP6	2	1
25	Pierrefonds	55.437	21.309	61	C	CM5	2	1
26	Piton St-Leu	55.325	21.215	530	C	CM6B	1	1
27	Piton-Bloc	55.572	21.321	813	C	CM6B	2	1
28	Ravine des Cabris	55.475	21.274	310	C	CM6B	2	1
29	St-Paul	55.325	20.975	186	C	CM6B	2	1
30	St-Joseph	55.606	21.382	17	C	CM6B	1	1
31	Tan-Rouge	55.299	21.069	750	C	CM6B	3	1
32	St-Leu	55.300	21.187	222	C	CM6B	3	1

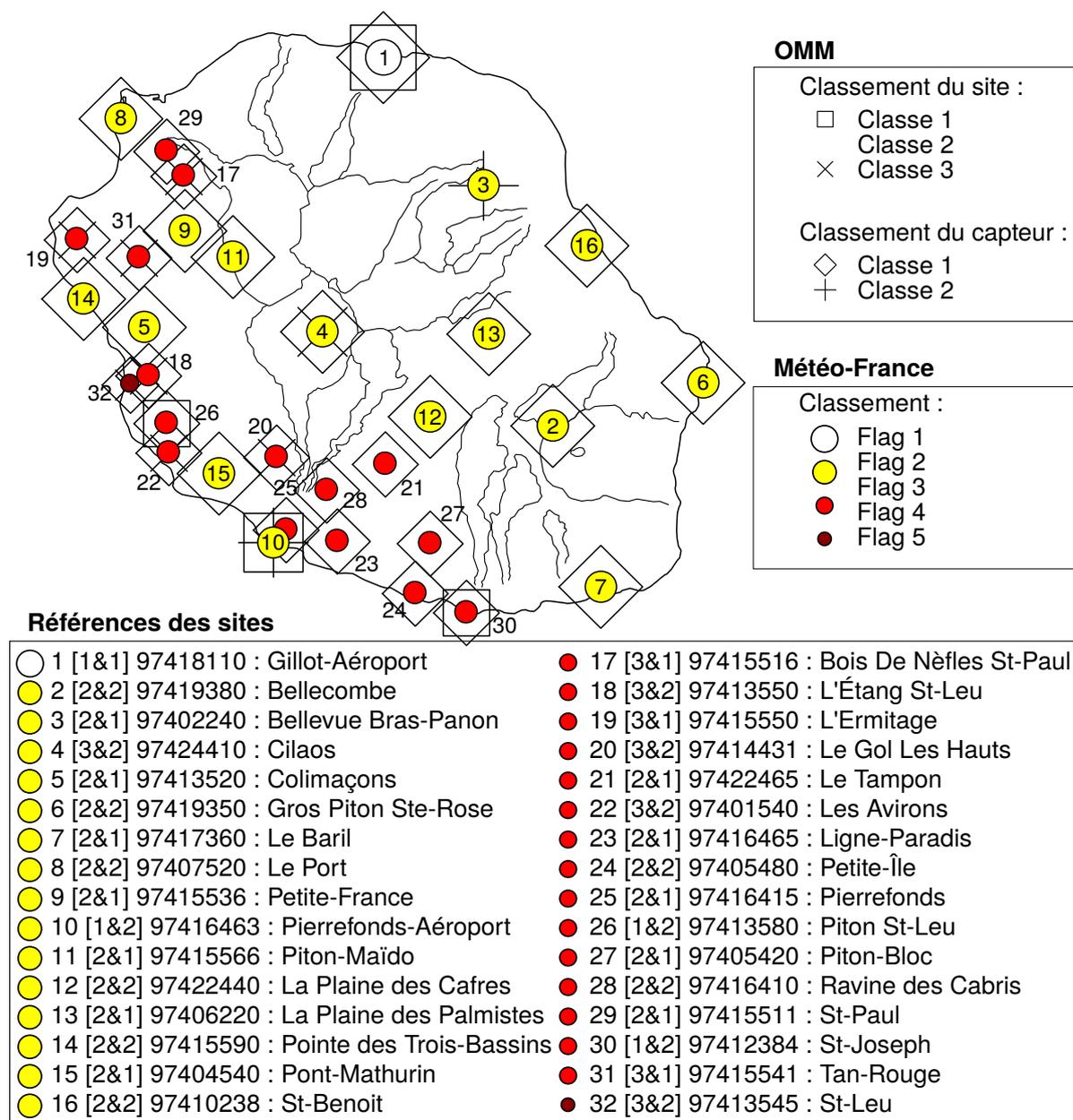


FIGURE A.2. – Carte des sites d'observation de Météo-France et de leurs classements. Chaque site est classé 3 fois : une fois par Météo-France (rond de couleur) et deux fois par l'OMM (autres symboles). Les sites sont numérotés de 1 à 32 pour mieux les détailler dans l'encart « Référence des sites »

Annexe B.

Compléments de la comparaison des produits CMSAF

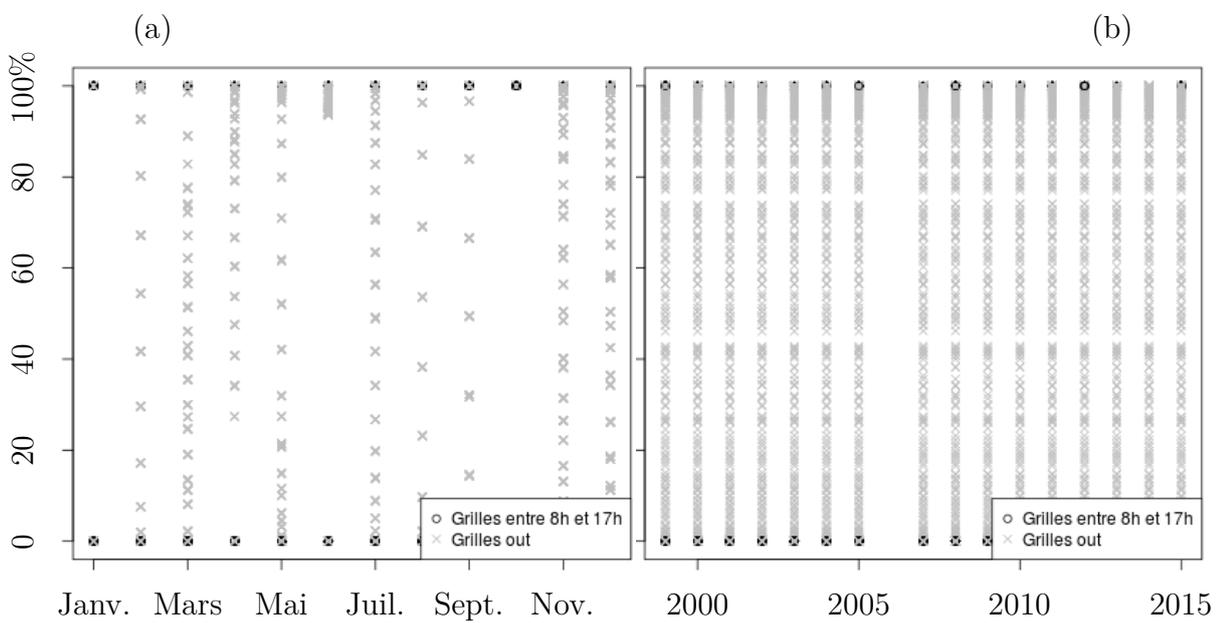


FIGURE B.1. – Répartition des pourcentages de valeurs manquantes par grilles-heures selon les mois (a) et selon les années (b). *Chaque rond ou croix représente le pourcentage de pixels associé à une valeur manquante. Les ronds sont pour les grilles entre 8 et 17h, et les croix pour les autres cas. Toutes les grilles partielles sont donc comprises entre 18 et 7h. Données : SARAH-E, sur 16 années d'études entre 1999 et 2015 (2006 manquant en rouge).*

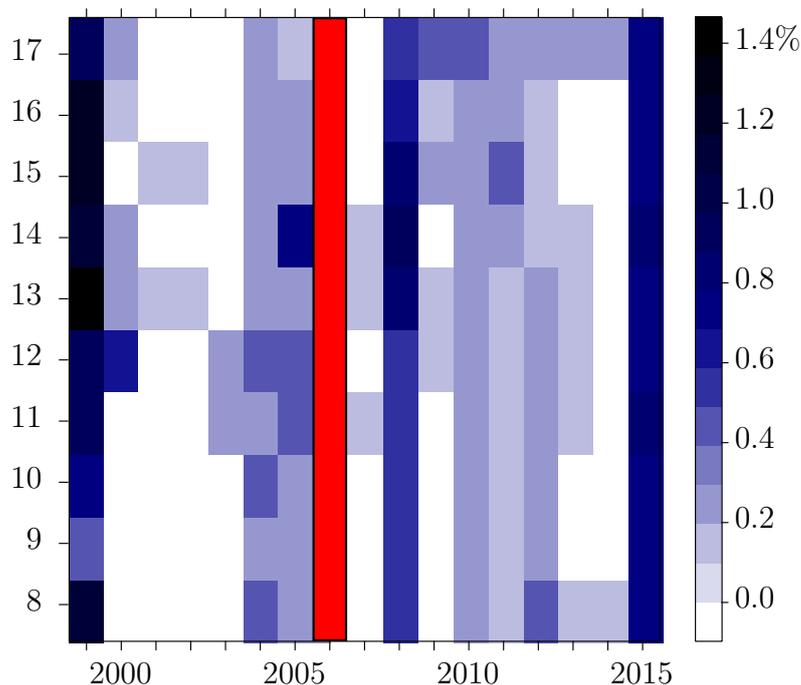


FIGURE B.2. – Répartition des pourcentages de valeurs manquantes selon les heures (en ordonnées) et les années (en abscisses). Chaque pourcentage est le nombre de grille manquantes entre 8 et 17h. Données : SARAH-E, sur 16 années d'études entre 1999 et 2015 (2006 manquant en rouge).

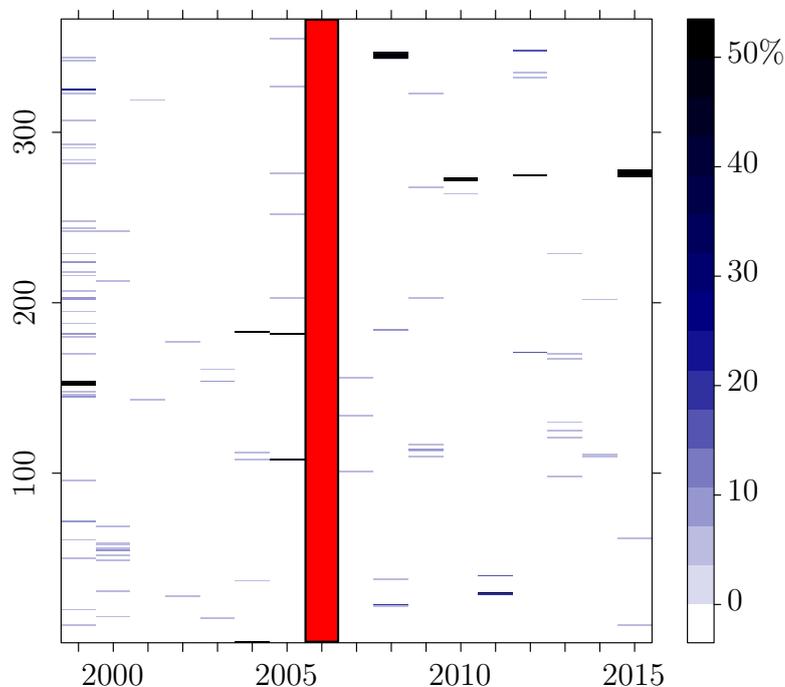


FIGURE B.3. – Répartition des pourcentages de valeurs manquantes selon les jours juliens (en ordonnées) et les années (en abscisses). Chaque pourcentage est le nombre de grille manquantes entre 8 et 17h. Données : SARAH-E, sur 16 années d'études entre 1999 et 2015 (2006 manquant en rouge).

Annexe C.

Compréhension des grilles aberrantes

Une partie de la comparaison entre les produits satellites n'a pas été présentée dans le manuscrit. En effet, une étude des grilles aberrantes pour essayer d'envisager l'utilisation du produit le plus fin spatialement sur La Réunion (pour rappel, [Climate Data Record \(CDR\)](#) propose 242 pixels sur l'île contre 89 pixels des deux autres produits de [Satellite Application Facility on Climate Monitoring \(CM-SAF\)](#)). Cependant, nous avons localisé un trop grand nombre de grilles aberrantes et des spécificités qui nous ont amené à contacter le service utilisateur de [CM-SAF](#). Nous reprenons tout de même les grandes lignes de cette étude dans cette annexe.

Nous avons dans un premier temps calculé la corrélation de chaque grille disponible avec une grille aberrante prise pour base (carte en haut à gauche de la figure [C.1](#)). La représentation de tous ces coefficients est en figure [C.2](#). Une période de corrélation forte avec la grille aberrante va au-delà des grilles numérotées 20 000, soit environs pendant les 4 premières années. Puis, s'ensuit une période de corrélation inversée jusqu'aux grilles numérotées 30 000, soit environs pendant les 2 années suivantes.

À la suite des deux figures présentées est repris le document (4 pages) qui a été communiqué au service utilisateur de [CM-SAF](#). Les échanges avec l'un des membres de leur équipe nous ont permis de faire le choix de l'utilisation de [SARAH-E](#). En effet, le service de [CM-SAF](#) nous a plus amplement parlé de ces « striping features » provenant de défaillance des capteurs (de la génération MVIRI). Le produit [SARAH](#) utilise ces mêmes capteurs et images satellites, mais en propose une meilleure reconstruction qui a encore été améliorée avec la deuxième version du produit [SARAH-2](#). Cependant, nous choisissons de travailler avec [SARAH-E](#) car sa fenêtre satellite s'avère être une réelle opportunité pour La Réunion avec sa topographie est complexe.

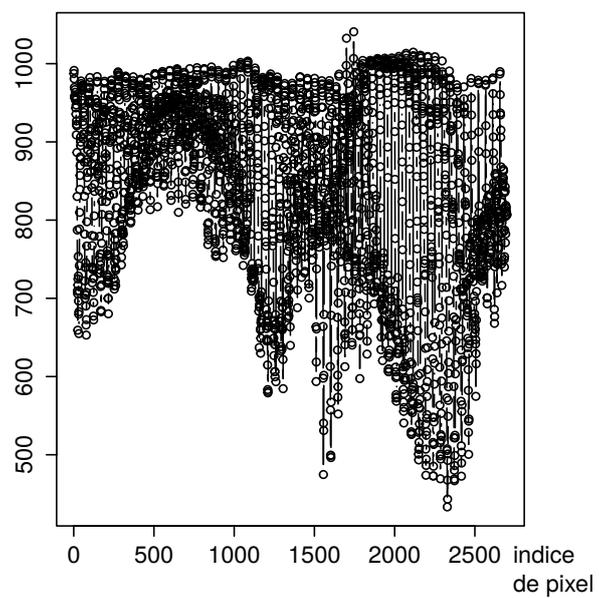
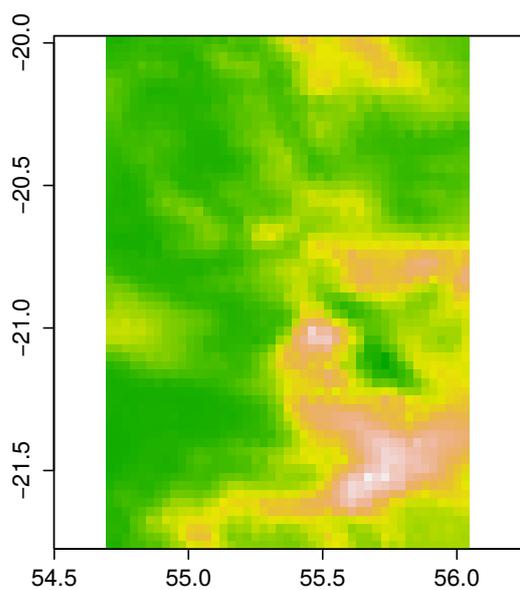
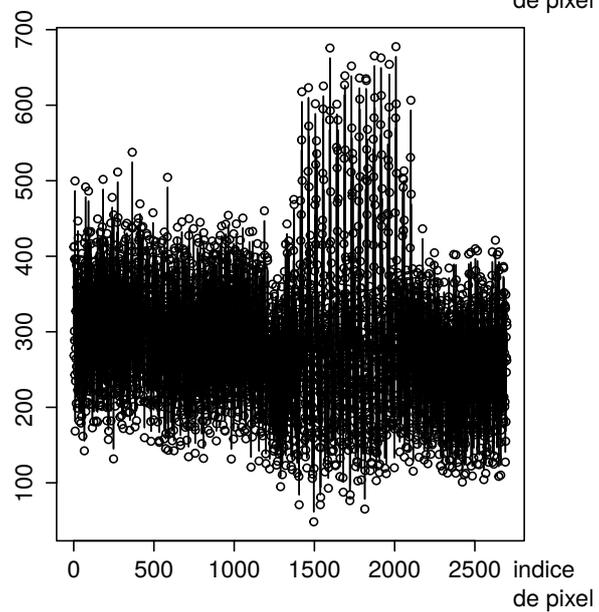
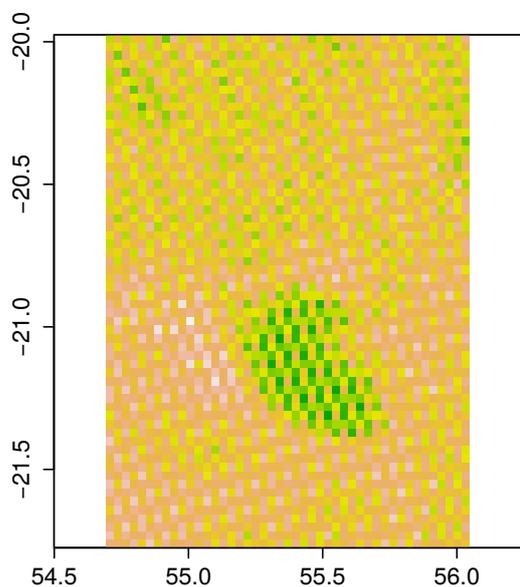
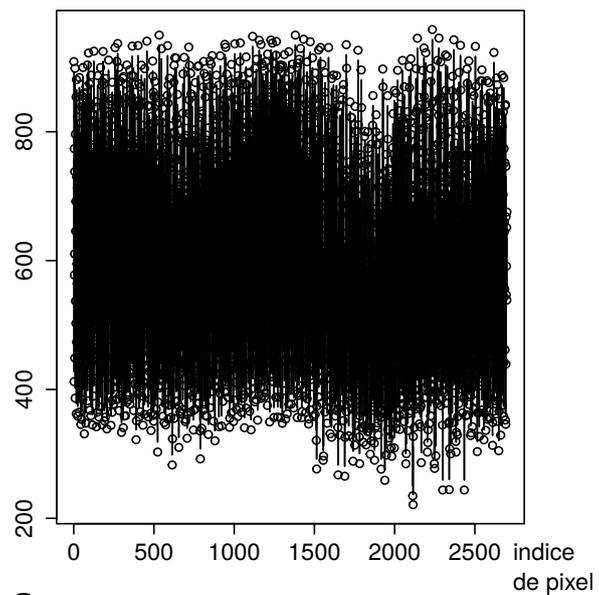
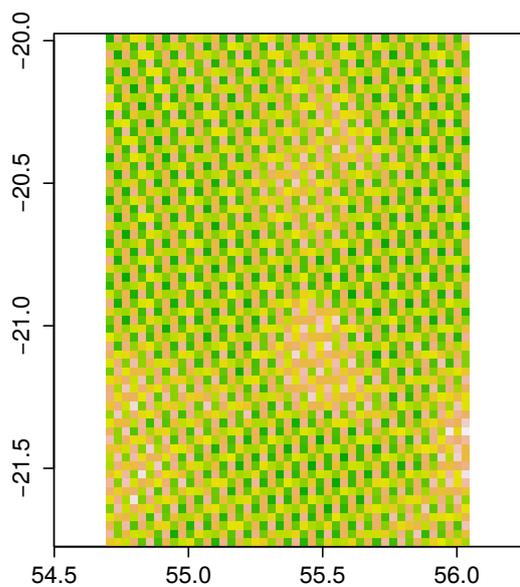


FIGURE C.1. – (figure de la page précédente) – Représentations graphiques de deux grilles aberrantes et une grille « normale ». La colonne des figures de gauche sont des cartes du produit satellites *CDR* pour différentes dates. À droite, les figures sont la représentation des valeurs de rayonnement global pour chacun des pixels de la grille. Les deux premières lignes de figures sont des grilles aberrantes (l'une sert de base, l'autre est un deuxième exemple) et la troisième est une grille « normale ».

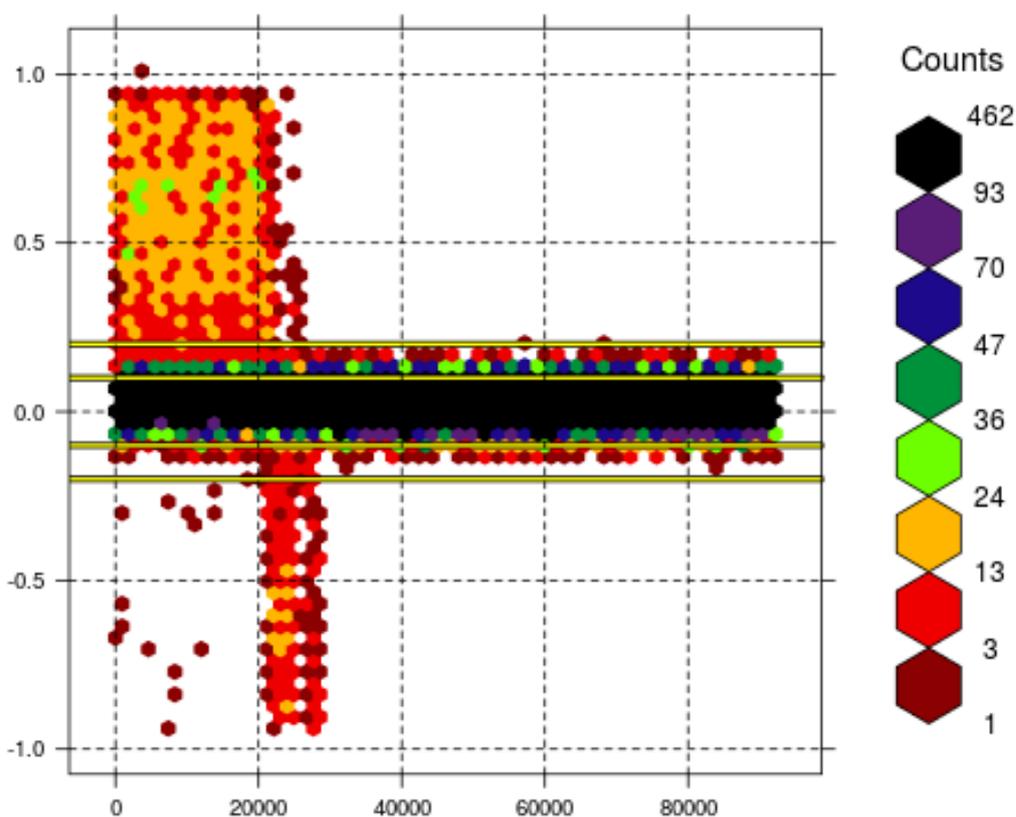


FIGURE C.2. – Corrélation (en ordonnée) de chaque grille disponible (numérotation en abscisses) avec une grille aberrante. Les lignes jaunes localisent les corrélations à $\pm 0,1$ et à $\pm 0,2$. Les hexagones et leurs couleurs renseignent sur la densité des grilles présentes.

CMSAF : CDR

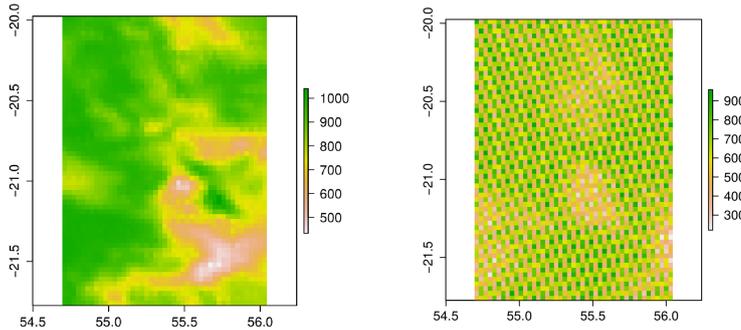
1 CMSAF orders details

Product group	Climate Data Records
Product name	SIS - Surface incoming shortwave radiation
Area	METEOSAT disk (70S-70N, 70W-70E)
Temporal resolution	Hourly
Statistics	Mean
Spatial resolution	Latitude/longitude grid (0.03x0.03 degree)
Data source	METEOSAT
Version	CDR v001
DOI	http://dx.doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/RAD_MVIRI/V001
lon/lat	(55.03, -20.69, 56.01, -21.56)

NB : If needed, I can forward the automatic mail received after the CMSAF product request.

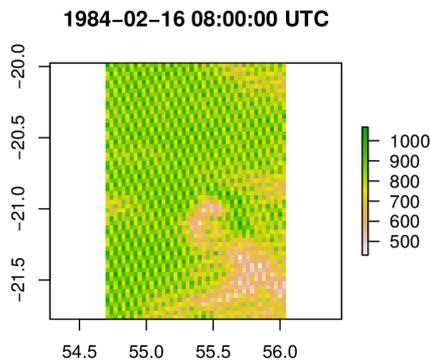
2 Striping feature

Between 1983-1991, there are some "aberrant" grids. To well-visualise it, you can find just under a "good" grid (at left) and a "bad" grid (at right) :



In the technical documents (page 22 in the *CDR Product User Manual*), those features are referenced as "striping features" and it is said that the years before 1995 and the hours not between 7:00 and 17:00 UTC can be concerned. And then, "*The fields between 07:00 and 17:00 UTC are not involved and can be used without limitations*".

First of all, for the 16th of February in 1984, the grid at 8:00 UTC is concerned by the striping feature.

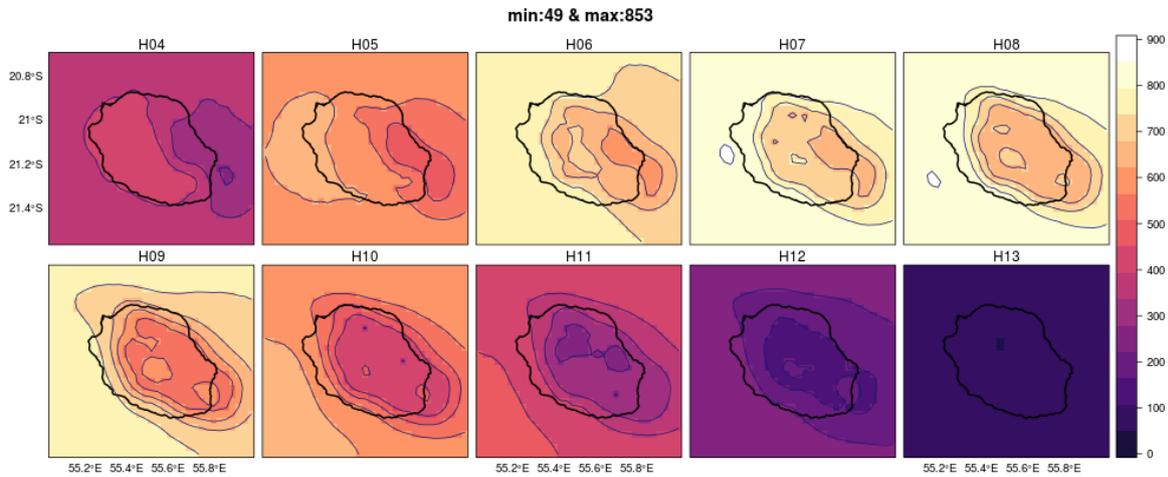


After that, we compute a correlation estimation between each grid and a "really-aberrant" one. For the grids between 7:00 and 17:00 UTC, we estimated more than 180 aberrant grids. And for all the CDR period (without filtering hours), more than 6000 grids are estimated as aberrant. A special point is that we found all the aberrant grids before 1991 and not 1995 as it is said in the PUM (ie. before Meteosat 5).

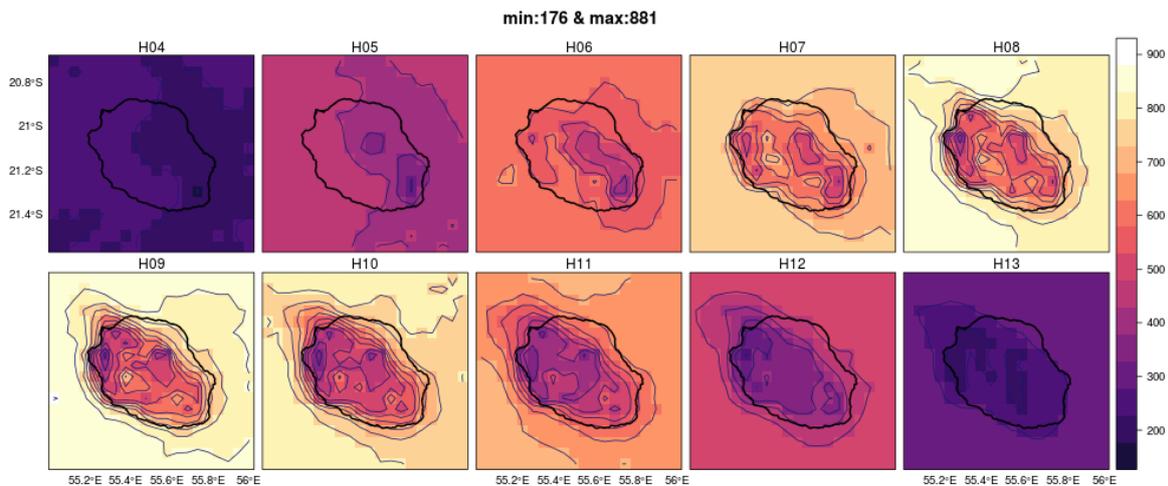
3 La Réunion shifting / spreading

We have compared CDR to SARAH-E product. So, for each product, we meaned the grids (considering the years from 1999 to 2005 and the hours from 4:00 to 13:00 UTC) in order to get one meaned grid for each hour / month combination (for example the meaned grid for 8:00 UTC and January represents the mean of all the 8:00 UTC of all January ie. meaned all the days / years grid).

Then, to better-visualise the meaned grids, we meaned one more time the grids in order to get one meaned grid for each hour. Just under, for CDR :



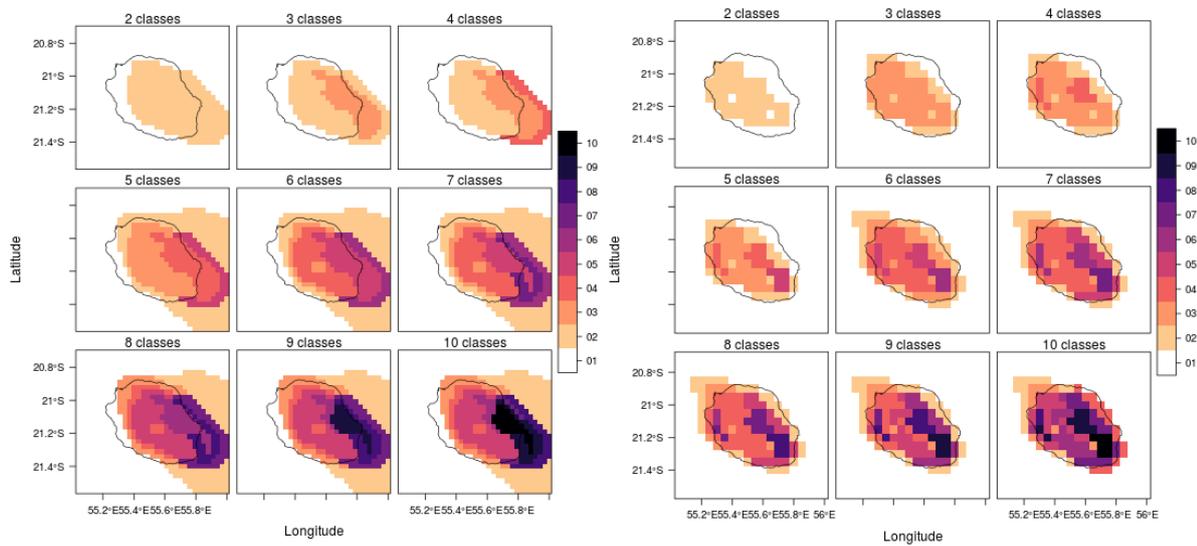
and for SARAH-E :



(NB: on each figure, we added La Réunion contours using the digital elevation model available from the NASA website : <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>)

After getting the meaned grids, we computed a spatial hierarchical clustering in order to mark out the island borders, because the solar radiation under the island has a different behavior as the under sea one.

As done before, we considered years between 1999 and 2005 and hours from 4:00 to 13:00 UTC. Then, CDR is figured in the ritgh side and SARAH-E in the left side :



The obtained classes clearly suggest the shifting / spreading of La Réunion in the CDR case.

Annexe D.

Compléments de la comparaison entre les données *in situ* et satellite

1. Tableau pour Gillot

in situ

Provenance	: Météo-France
Nom de la variable	: $R_G \sim$ "Rayonnement global"
Période	: 2011-2015
Résolution temporelle	: horaire (moyenne)
Nombre de stations	: 32

satellites

Provenance	: CM-SAF
Nom du produit	: SARAH-E
DOI	: 10.5676/DWD/JECD/SARAH_E/V001
Nom de la variable	: SIS \sim Shortwave Incoming Solar radiation
Période	: 1999-2015 (2006 manquant)
Résolution temporelle	: horaire (instantanées)
Résolution spatiale	: $0,05^\circ = \sim 5,3\text{km}$

2. Détails de la comparaison

période : 5 années, entre 2011 et 2015

heures : 10, entre 8 et 17 heures locales pour les tableaux et sur les 24h de la journée pour les graphiques,

nombre de valeurs mensuelles : 60 mois (moyenne)

nombre de valeurs journalières : 1,826 jours (moyenne)

nombre de valeurs horaires : 18,260 heures (valeurs instantannées)

seuil de valeurs manquantes pour le calcul de la moyenne : moins de 10 % de valeur « non-available » (NA)

Nom	Description
na_obs	nombre de NA dans les données d'observation
na_sat	nombre de NA dans les données satellitaires
cat_sat	= N1, le 1 ^{er} voisin le plus proche du site d'observation N2, le 2 ^{ème} voisin le plus proche du site d'observation N3, le 3 ^{ème} voisin le plus proche du site d'observation N4, le 4 ^{ème} voisin le plus proche du site d'observation All, tous les voisins regroupés Mean, la moyenne des 4 voisins
a	la pente de la régression linéaire entre satellite (N _i , All ou Mean) et observations
b	ordonnée à l'origine
r	coefficient de corrélation
R2	coefficient de détermination
rmse	l'erreur moyenne quadratique ($\sqrt{\text{mean}((\text{sat} - \text{obs})^2)}$)
p_bias	le biais ($100 * \text{sum}(\text{sat} - \text{obs}) / \text{sum}(\text{obs})$)

3. Comparaison pour le cas de Gillot

Moyennes mensuelles

na_obs	na_sat	cat_sat	a	b	r	R2	rmse	p_bias
0	1	Mean	1.16	-48.51	0.99	0.97	41.14	6.97
0	4	All	1.16	-48.51	0.97	0.93	45.59	6.97
0	1	N1	1.15	-54.15	0.98	0.97	32.03	4.84
0	1	N2	1.03	2.60	0.98	0.96	23.46	3.20
0	1	N3	1.26	-83.48	0.98	0.96	60.37	10.13
0	1	N4	1.21	-59.02	0.99	0.97	55.60	9.71

1/60 * 100 = 1.7% NA

Moyennes journalières

na_obs	na_sat	cat_sat	a	b	r	R2	rmse	p_bias
1	25	Mean	0.96	54.38	0.95	0.90	58.25	6.87
1	100	All	0.96	54.38	0.92	0.84	70.14	6.87
1	25	N1	0.97	41.46	0.92	0.86	62.71	4.73
1	25	N2	0.97	34.33	0.94	0.89	51.94	3.13
1	25	N3	0.95	76.98	0.89	0.80	87.28	10.02
1	25	N4	0.97	64.76	0.93	0.87	73.68	9.61

25/1,826 * 100 = 1.37% NA

4. Complément de la visualisation graphique de la comparaison : pour tous les sites

Valeurs horaires

na_obs	na_sat	cat_sat	a	b	r	R2	rmse	p_bias
1	95	Mean	0.90	88.34	0.94	0.89	101.17	6.87
1	380	All	0.90	88.34	0.91	0.83	124.82	6.87
1	95	N1	0.89	84.52	0.91	0.82	123.38	4.74
1	95	N2	0.90	70.07	0.92	0.85	111.05	3.14
1	95	N3	0.89	108.16	0.89	0.79	142.98	10.00
1	95	N4	0.92	90.61	0.93	0.86	119.68	9.60

95/18,260 * 100 = 0.52% NA

Moyennes journalières - Moyennes mensuelles

na_obs	na_sat	cat_sat	a	b	r	R2	rmse	p_bias
1	51	Mean	0.88	-0.50	0.94	0.88	42.20	-166.07
1	204	All	0.88	-0.50	0.90	0.81	54.13	-166.07
1	51	N1	0.89	-0.55	0.90	0.80	54.64	-180.52
1	51	N2	0.94	-0.57	0.93	0.86	47.01	-182.36
1	51	N3	0.82	-0.42	0.86	0.73	63.95	-146.00
1	51	N4	0.87	-0.46	0.91	0.84	49.38	-155.41

51/1,826 * 100 = 2.79% NA

Valeurs horaires - Moyennes journalières

na_obs	na_sat	cat_sat	a	b	r	R2	rmse	p_bias
10	250	Mean	0.88	-0.00	0.94	0.88	82.81	-97.96
10	1000	All	0.88	0.00	0.91	0.82	103.38	-105.14
10	250	N1	0.86	0.00	0.90	0.81	106.40	-111.72
10	250	N2	0.87	0.00	0.91	0.84	98.22	-130.06
10	250	N3	0.87	-0.00	0.89	0.79	113.44	-79.89
10	250	N4	0.90	0.00	0.92	0.85	94.43	-98.90

250/18,260 * 100 = 1.37% NA

4. Complément de la visualisation graphique de la comparaison : pour tous les sites

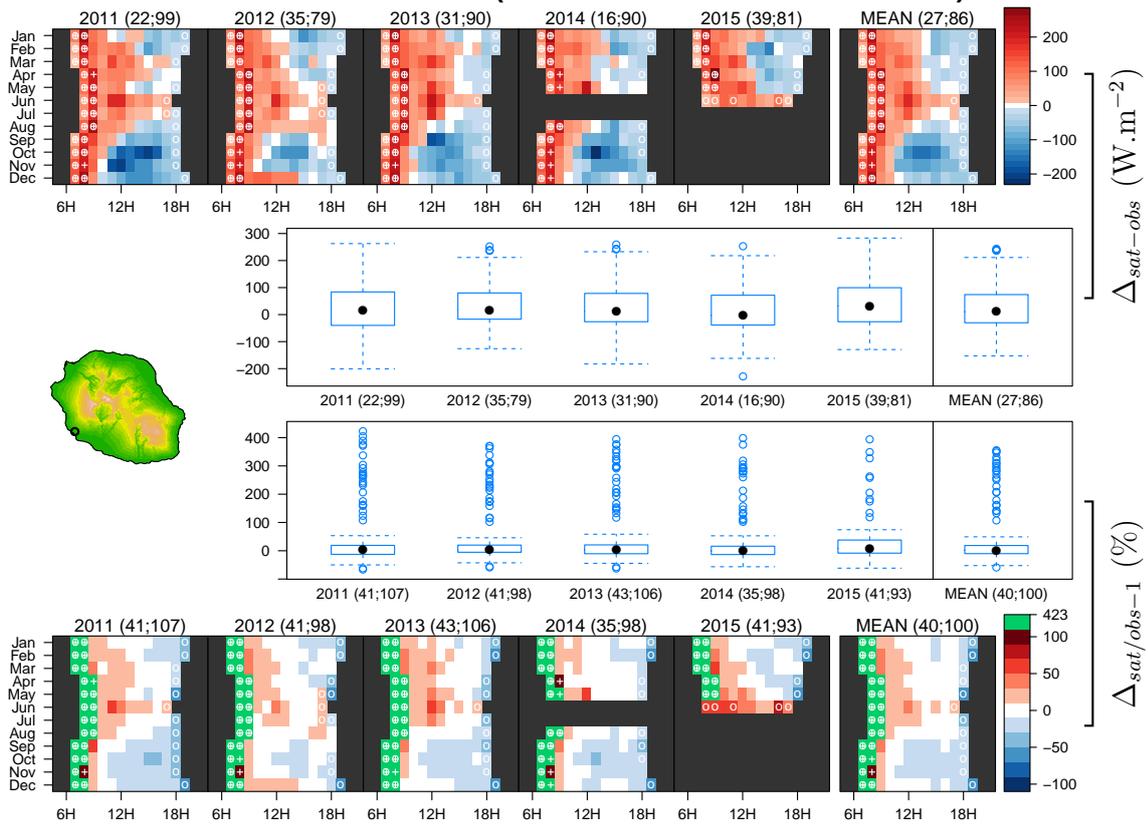
Cette deuxième section complète la comparaison satellite-observation de la sous-section 1.4 du chapitre II. Nous visualisons ici les écarts entre les données *in situ* de Météo-France et les données satellitaires de CM-SAF par deux graphiques type sur les écarts relatifs en $W.m^{-2}$ ($\Delta_{sat-obs}$ défini en équation II.2) et en pourcentage ($\Delta_{sat/obs-1}$

défini en équation II.3). Pour chaque année, et puis pour une moyenne des 5 années, le premier graphique type présente les écarts selon l'heure et le mois. De plus, les \circ localisent quand l'observation est mesurée d'une valeur inférieure ou égale à 50 W.m^{-2} et les $+$ localisent là où l'écart entre satellite et observation est supérieur à 100%. En ce qui concerne le second graphique type, ce sont des boîtes à moustache qui renseignent alors sur la distribution des écarts pendant le cas considéré (c'est-à-dire une année ou la moyenne sur les années). Chaque station fait donc l'objet d'un lot de ces 4 graphiques auxquels est ajouté une carte de La Réunion avec la localisation de la station Météo-France.

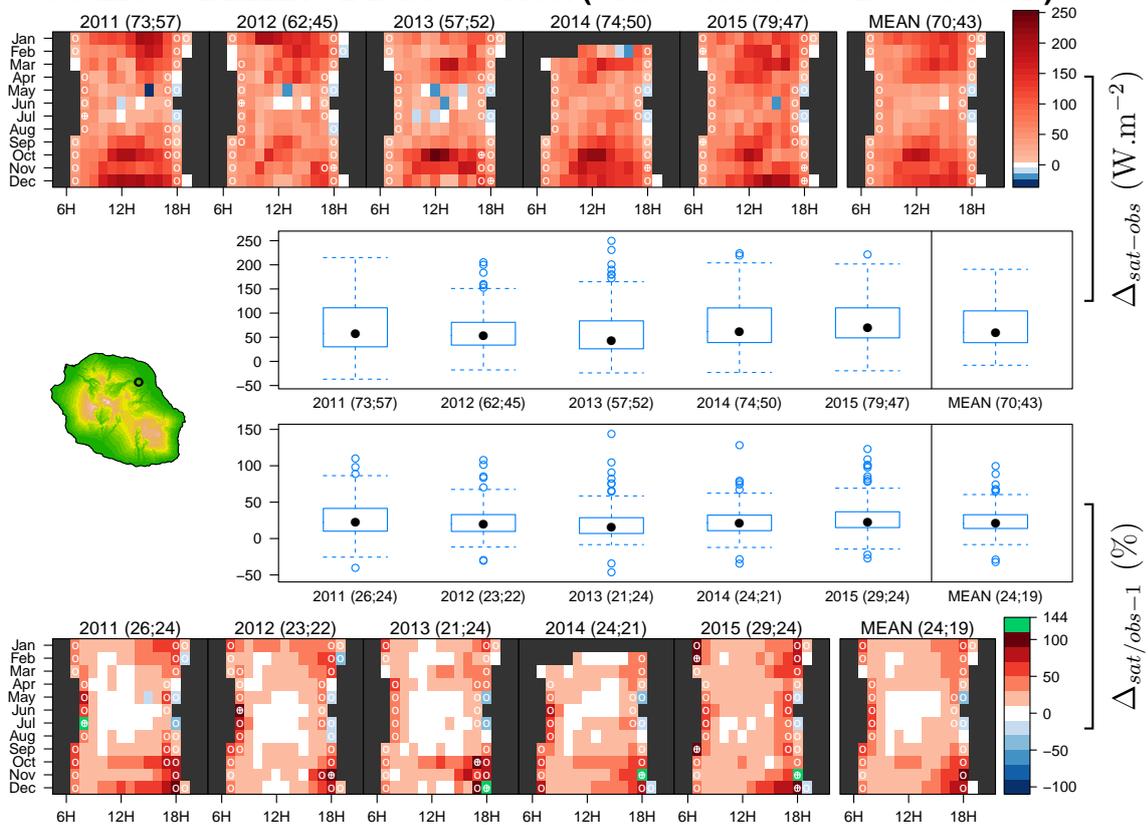
FIGURE D.1. – Figures de la comparaison satellite-observation de chacune des stations Météo-France, complémentaires à la figure II.13. La comparaison est en sous-section 1.4 du chapitre II. Les 16 pages suivantes présentent les 32 stations, à raison de deux sites par page, selon l'ordre dans les deux tableaux ci-dessous. La première colonne renseigne le numéro de référence Météo-France de la station et la deuxième colonne donne le nom de la station, selon sa localisation. Les numéros devant chacun des deux tableaux permettent de faire le lien avec la table A.1 et la figure A.2.

22	97401540 Les Avirons	9	97415536 Petite-France
3	97402240 Bellevue Bras-Panon	31	97415541 Tan-Rouge
15	97404540 Pont-Mathurin	19	97415550 L'Ermitage
27	97405420 Piton-Bloc	11	97415566 Piton-Maïdo
24	97405480 Petite-Île	14	97415590 Pointe des Trois-Bassins
13	97406220 Plaine des Palmistes	28	97416410 Ravine des Cabris
8	97407520 Le Port	25	97416415 Pierrefonds
16	97410238 St-Benoit	10	97416463 Pierrefonds-Aéroport
30	97412384 St-Joseph	23	97416465 Ligne-Paradis
5	97413520 Colimaçons	7	97417360 Le Baril
32	97413545 St-Leu	1	97418110 Gillot-Aéroport
18	97413550 Étang St-Leu	6	97419350 Gros Piton Ste-Rose
26	97413580 Piton St-Leu	2	97419380 Bellecombe
20	97414431 Le Gol les Hauts	12	97422440 Plaine des Cafres
29	97415511 St-Paul	21	97422465 Le Tampon
17	97415516 Bois de Nèfles St-Paul	4	97424410 Cilaos

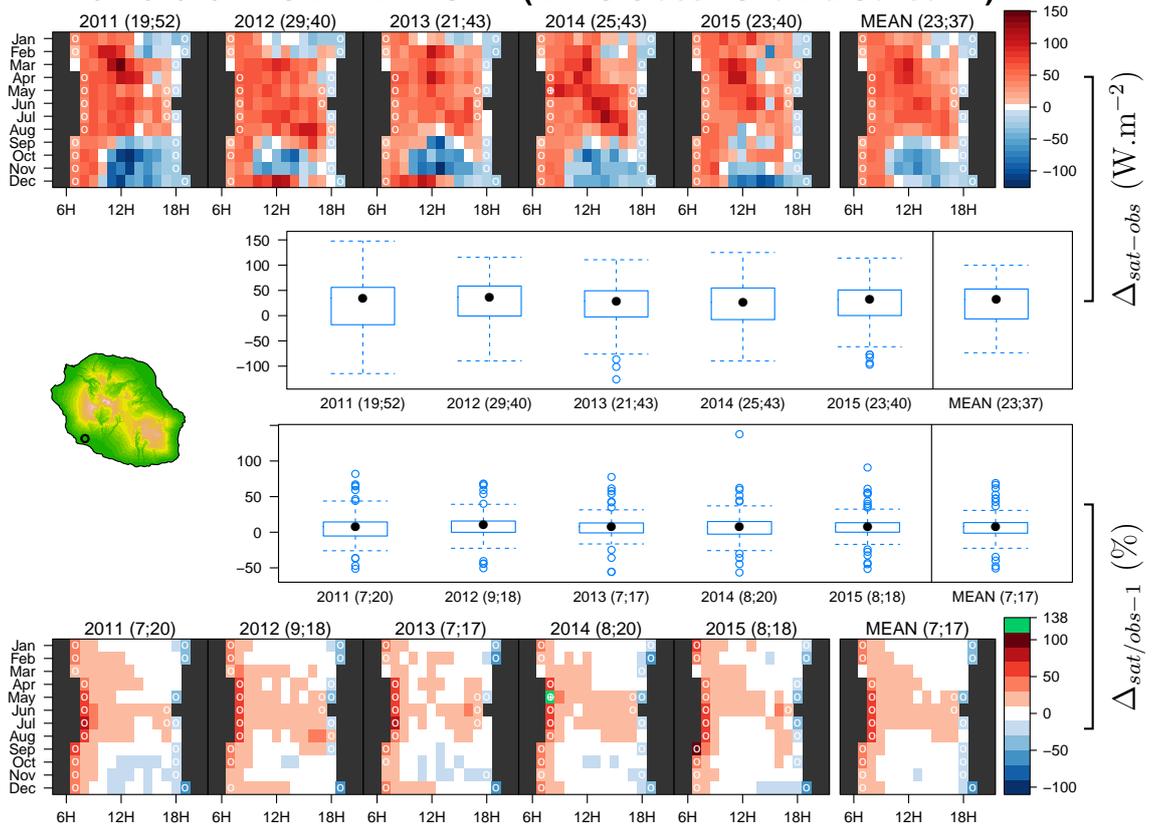
97401540 = LES AVIRONS (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



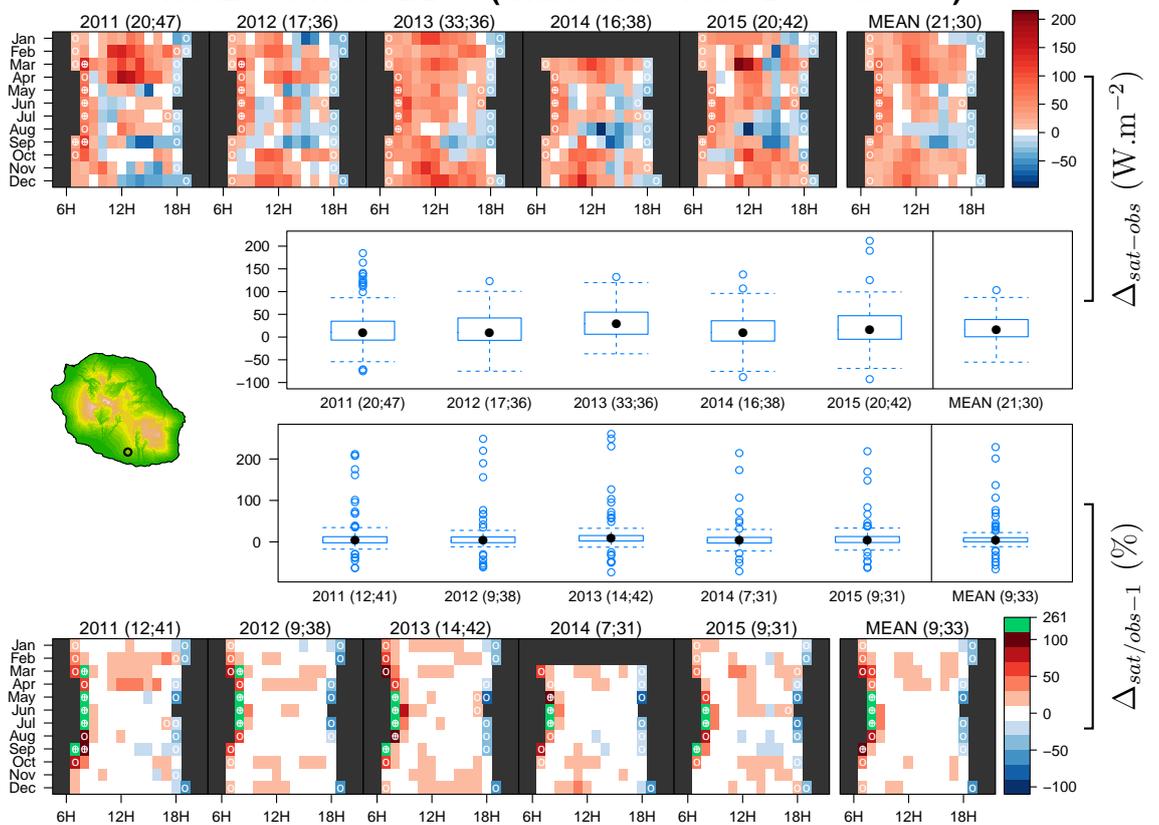
97402240 = BELLEVUE BRAS-PANON (WMO Class : Site 2 & Sensor 2)



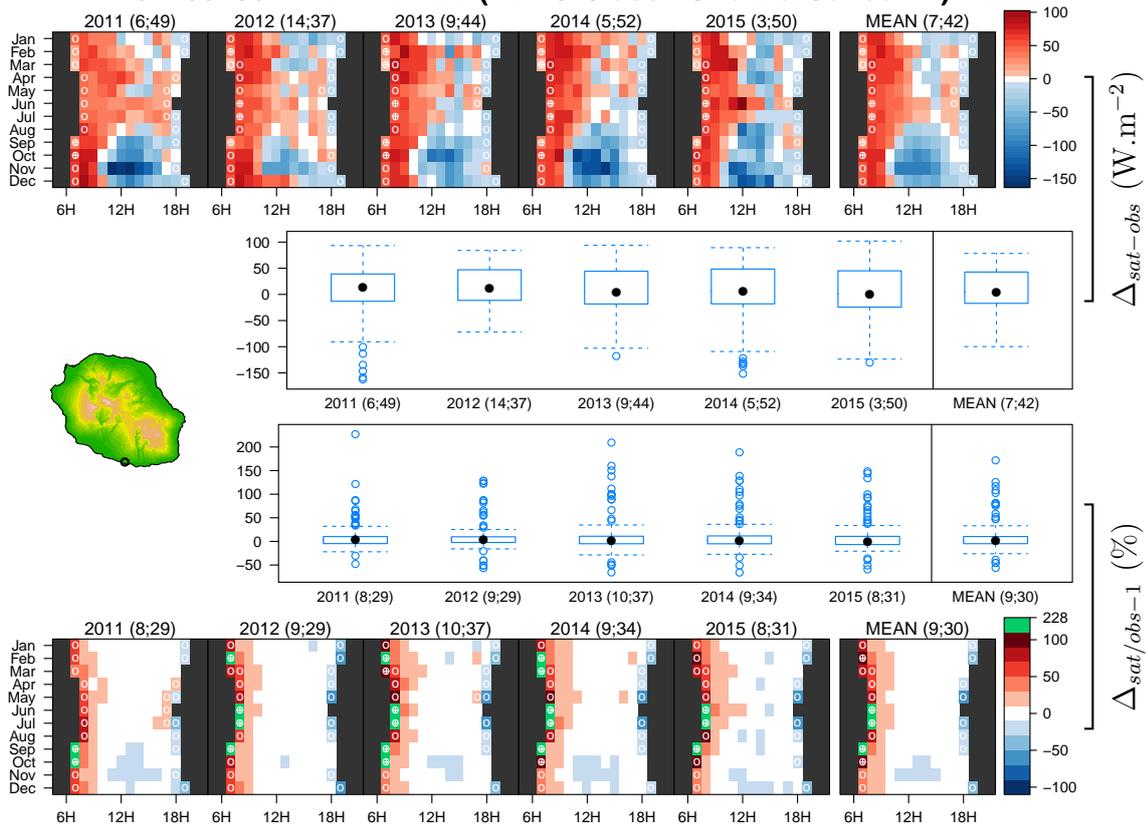
97404540 = PONT-MATHURIN (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



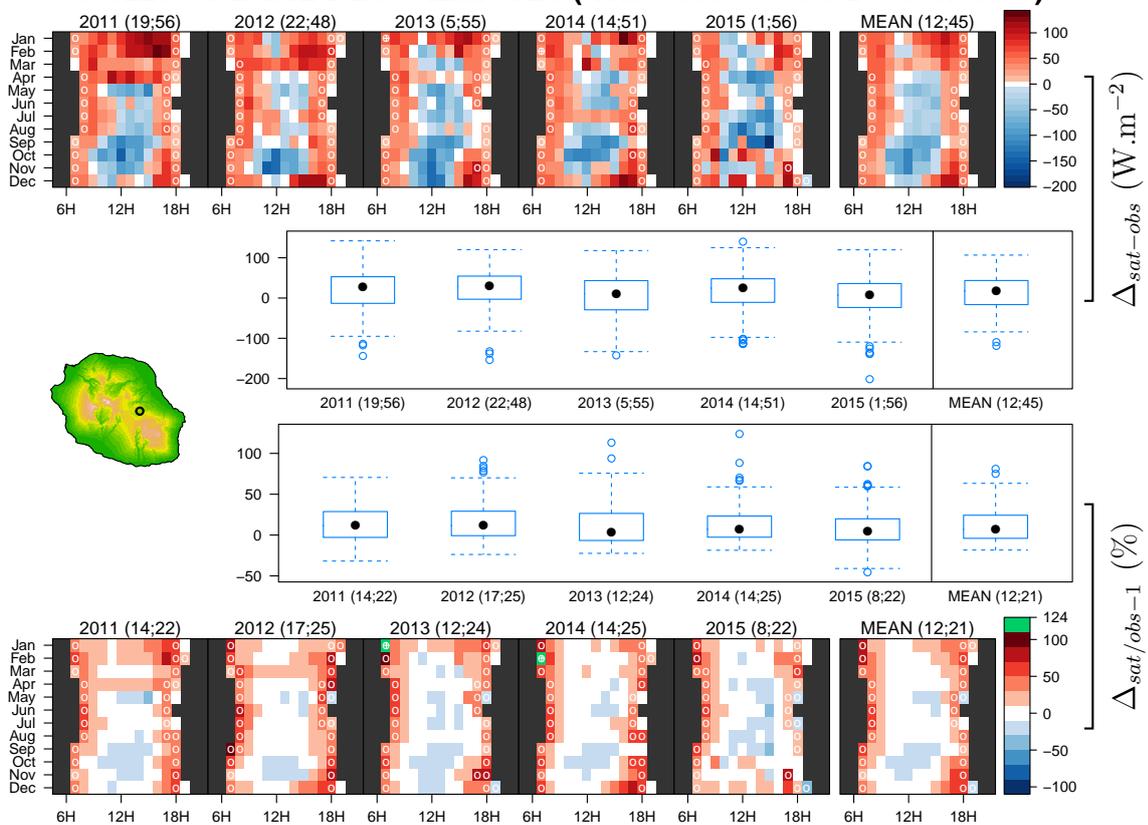
97405420 = PITON-BLOC (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



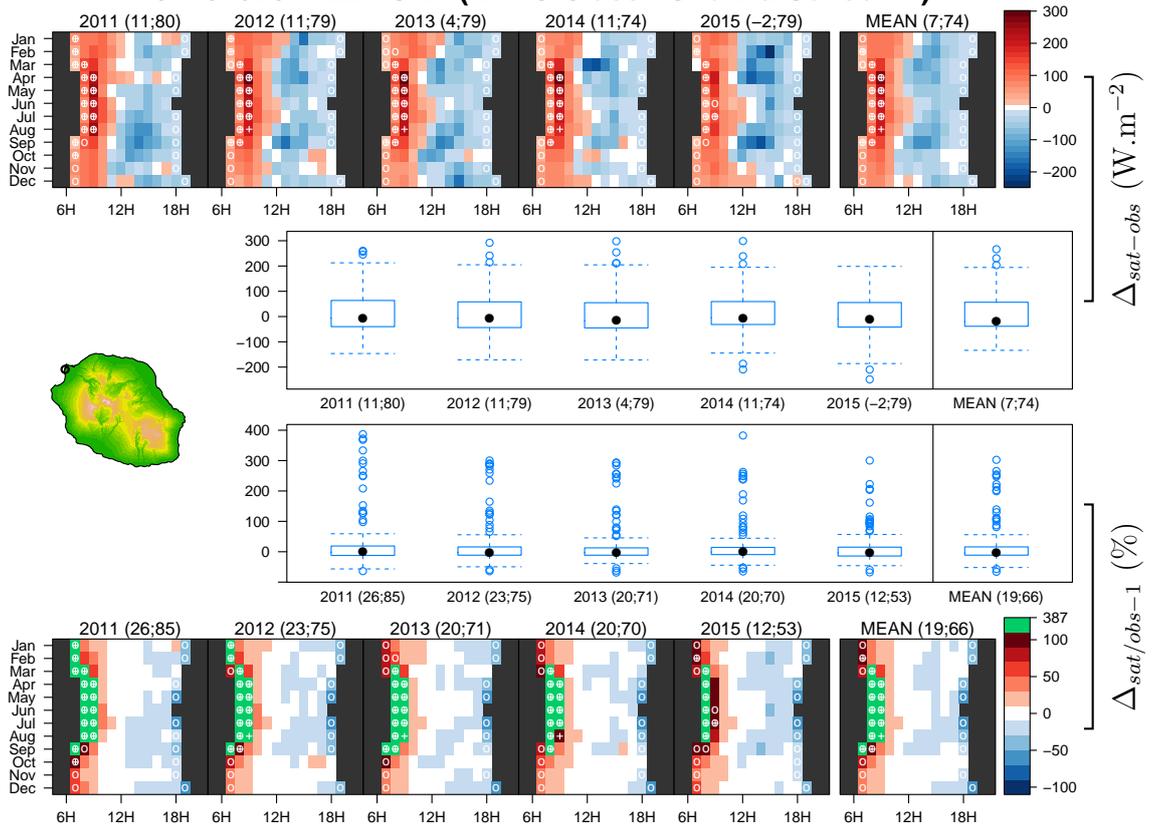
97405480 = PETITE-ÎLE (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



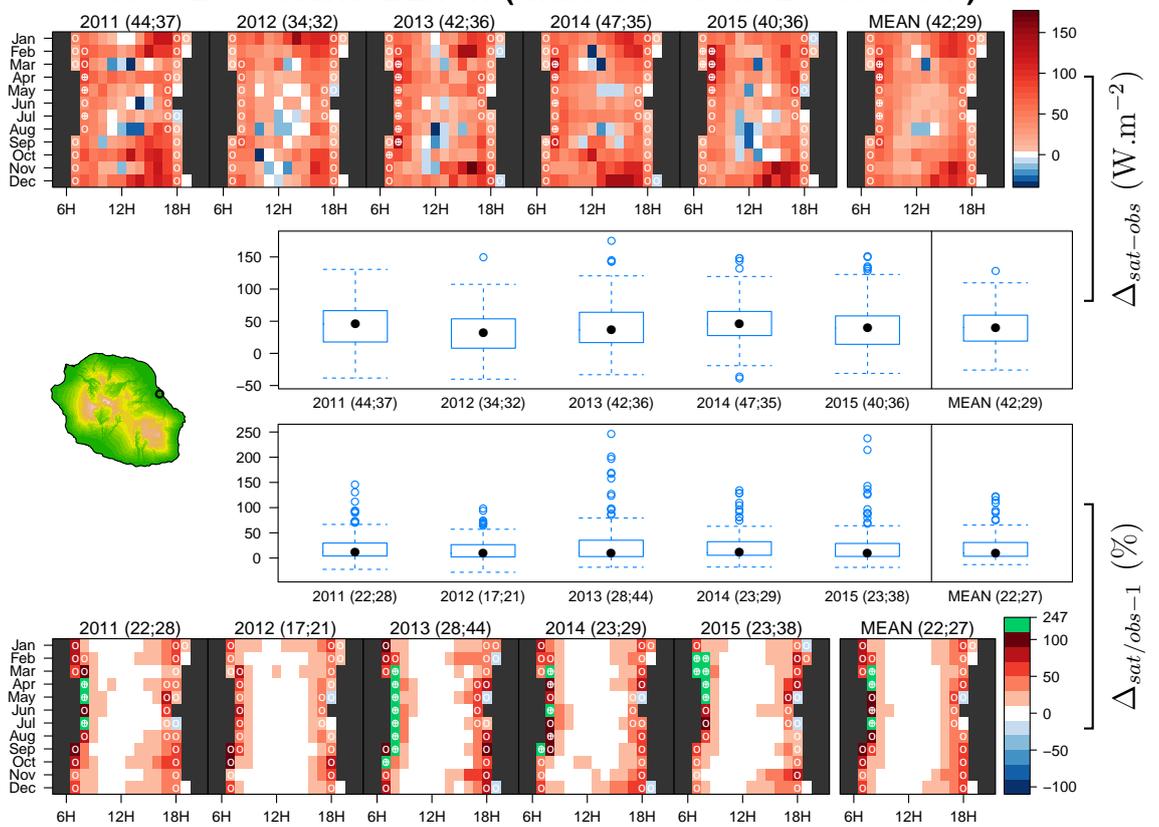
97406220 = PLAINE DES PALMISTES (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



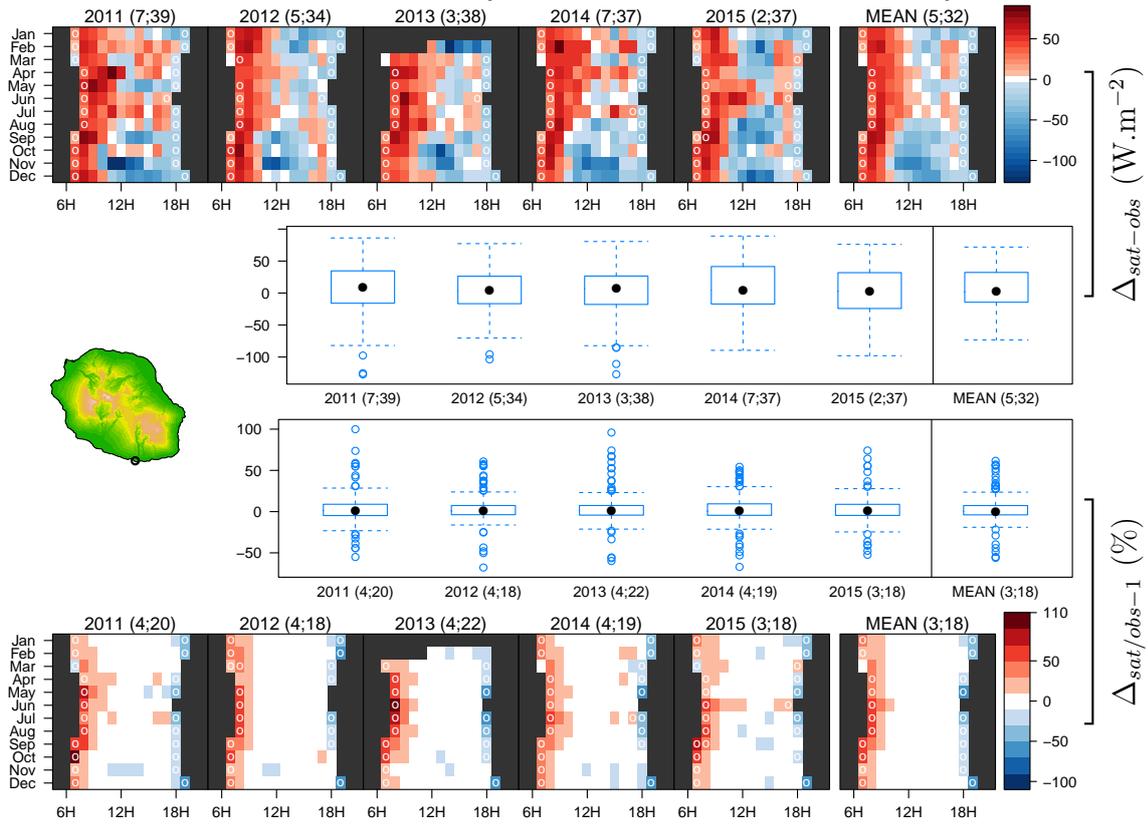
97407520 = LE PORT (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



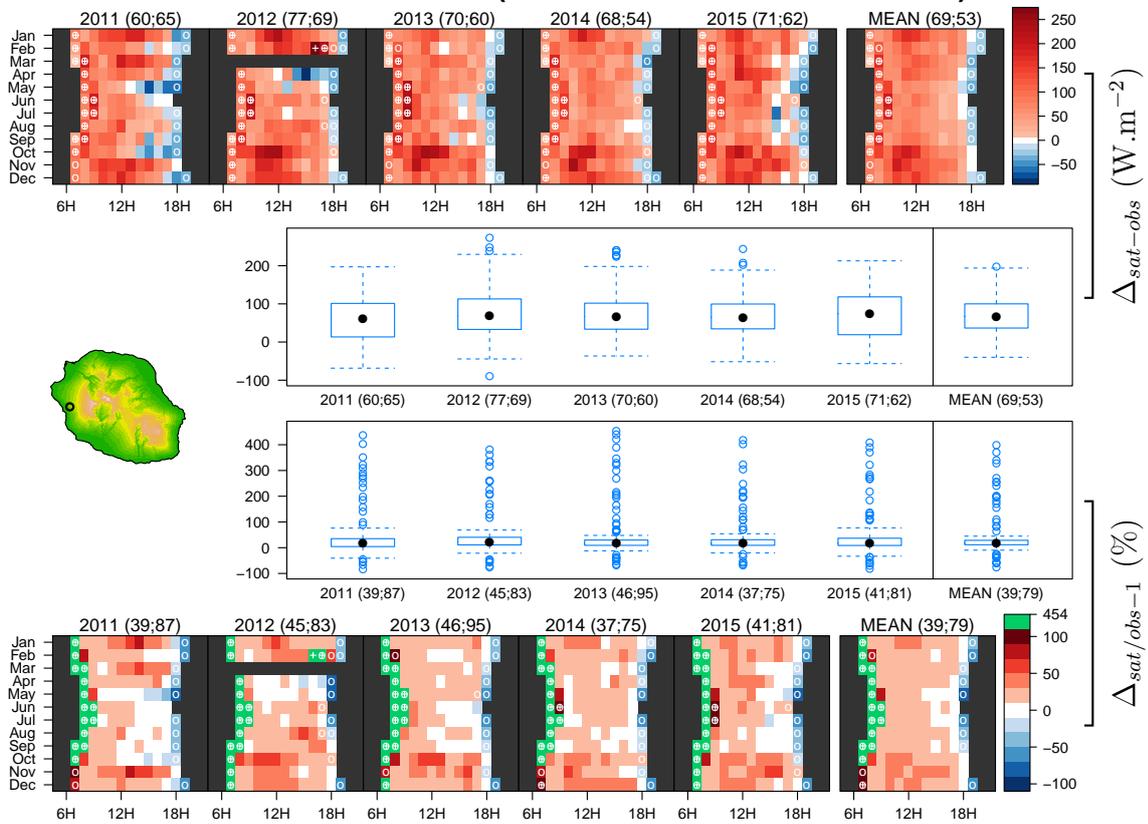
97410238 = SAINT-BENOIT (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



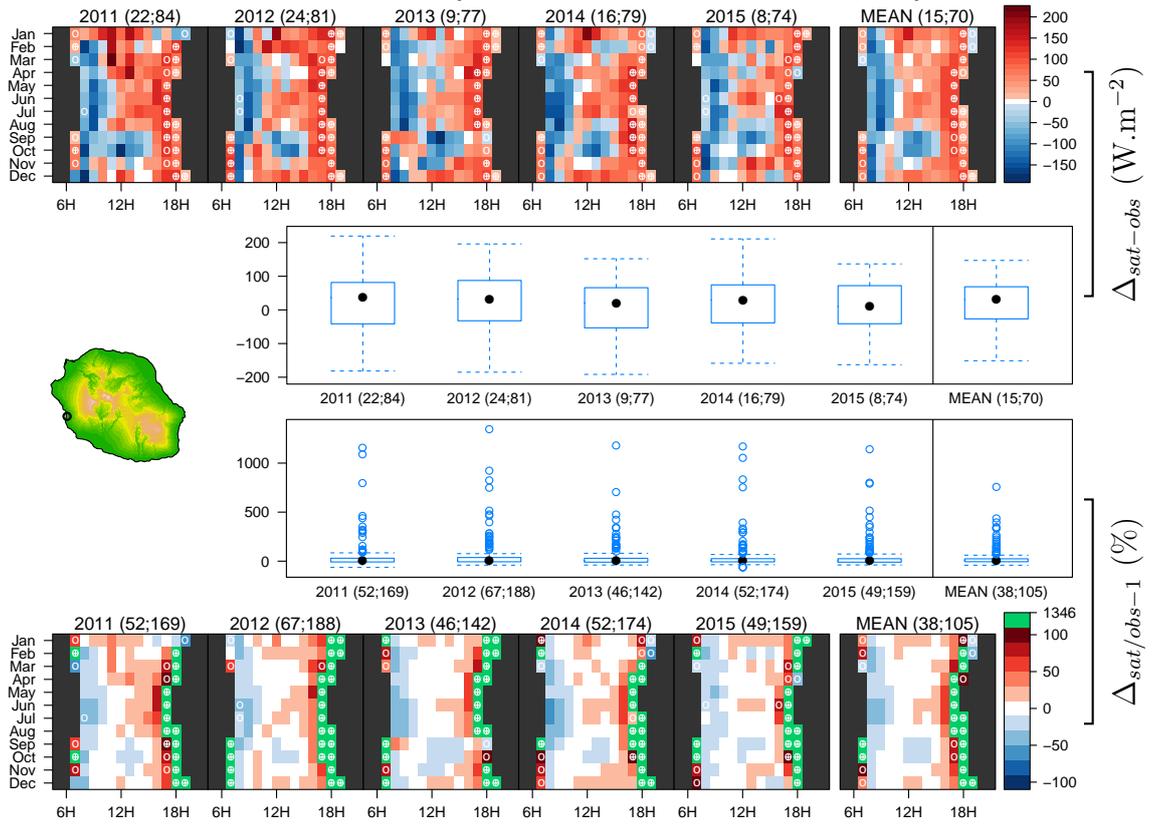
97412384 = ST-JOSEPH (WMO Class : Site 1 & Sensor 1)



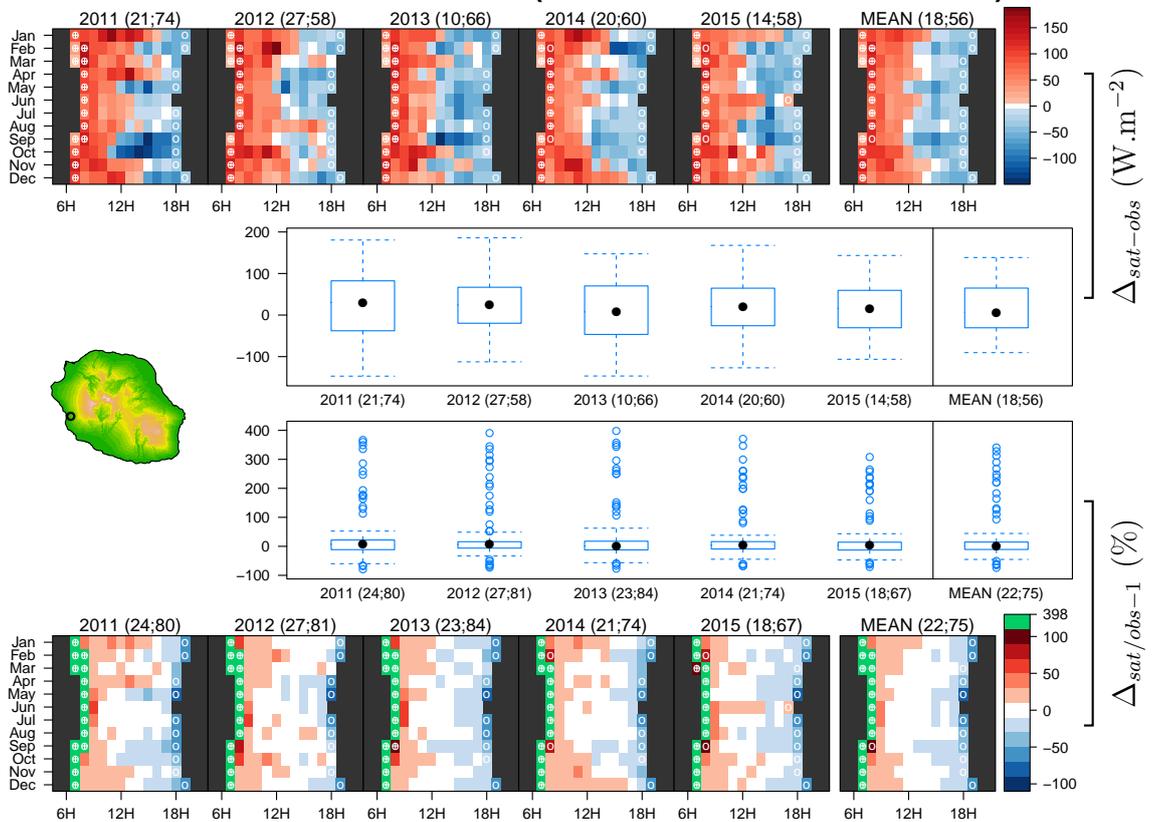
97413520 = COLIMACONS (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



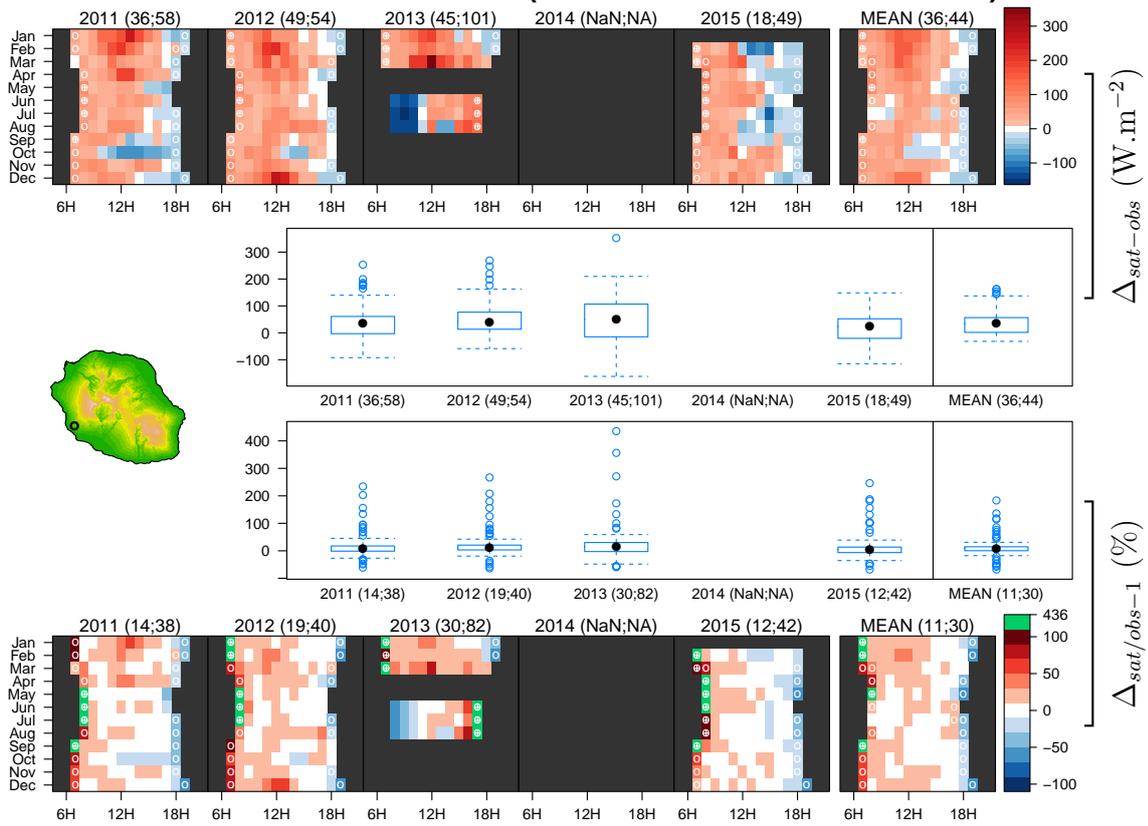
97413545 = ST-LEU (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



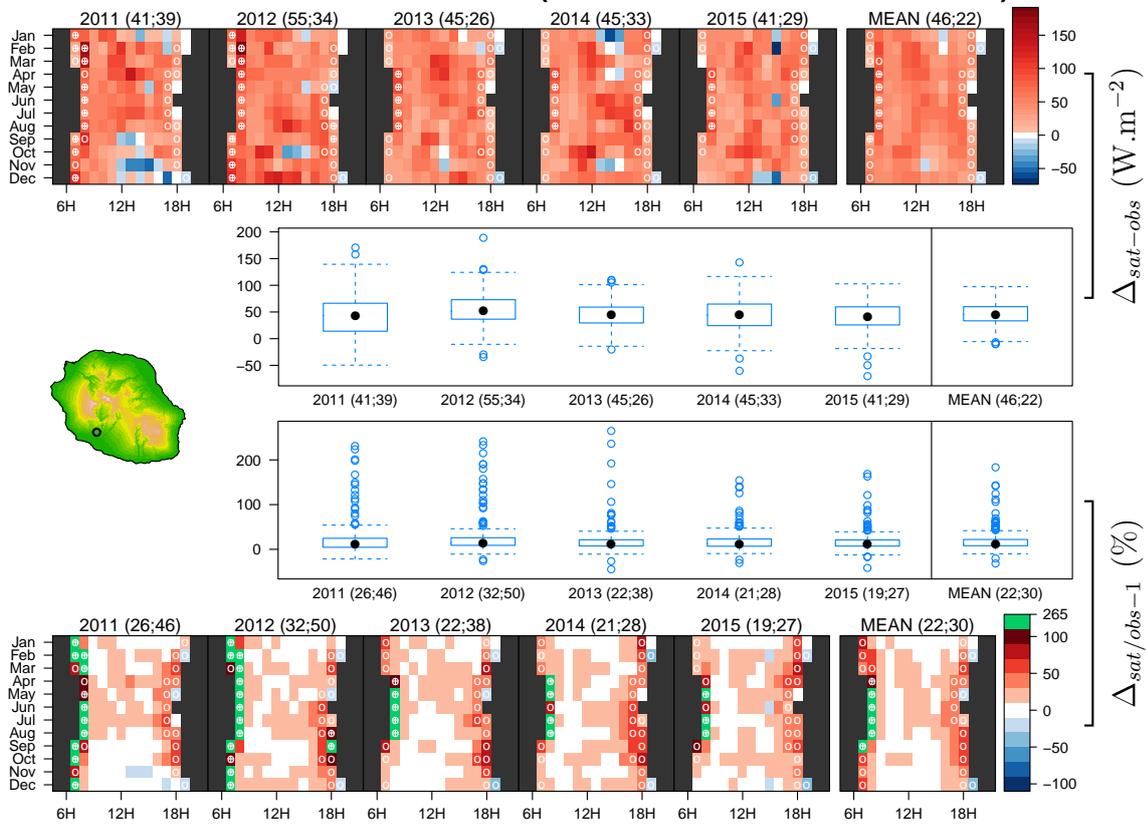
97413550 = ETANG SAINT-LEU (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



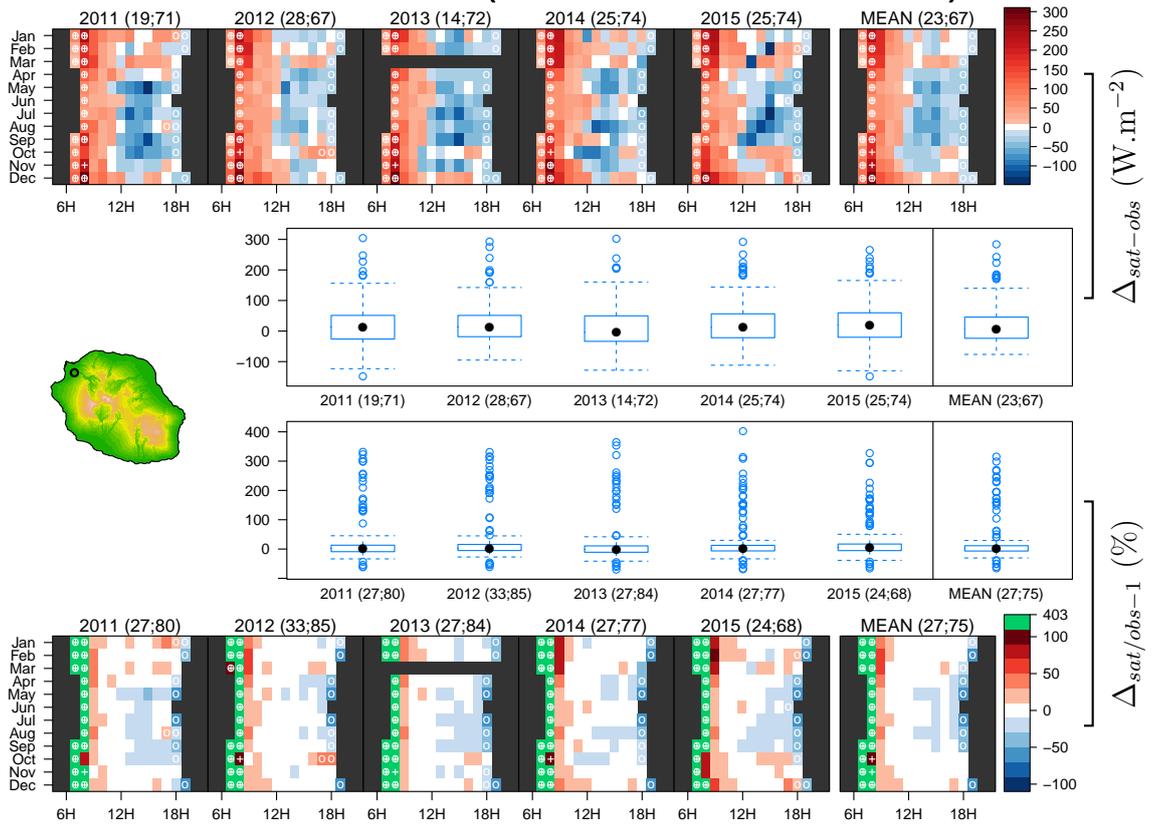
97413580 = PITON SAINT-LEU (WMO Class : Site 1 & Sensor 1)



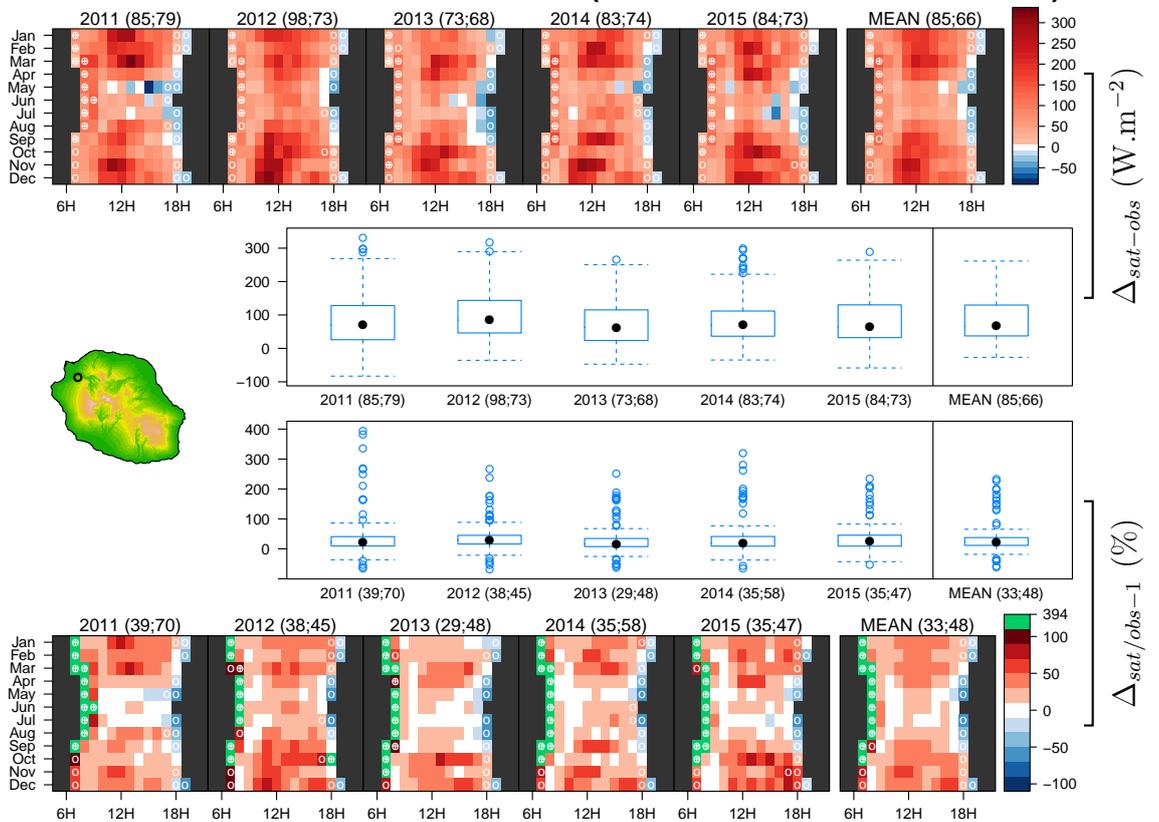
97414431 = LE GOL LES HAUTS (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



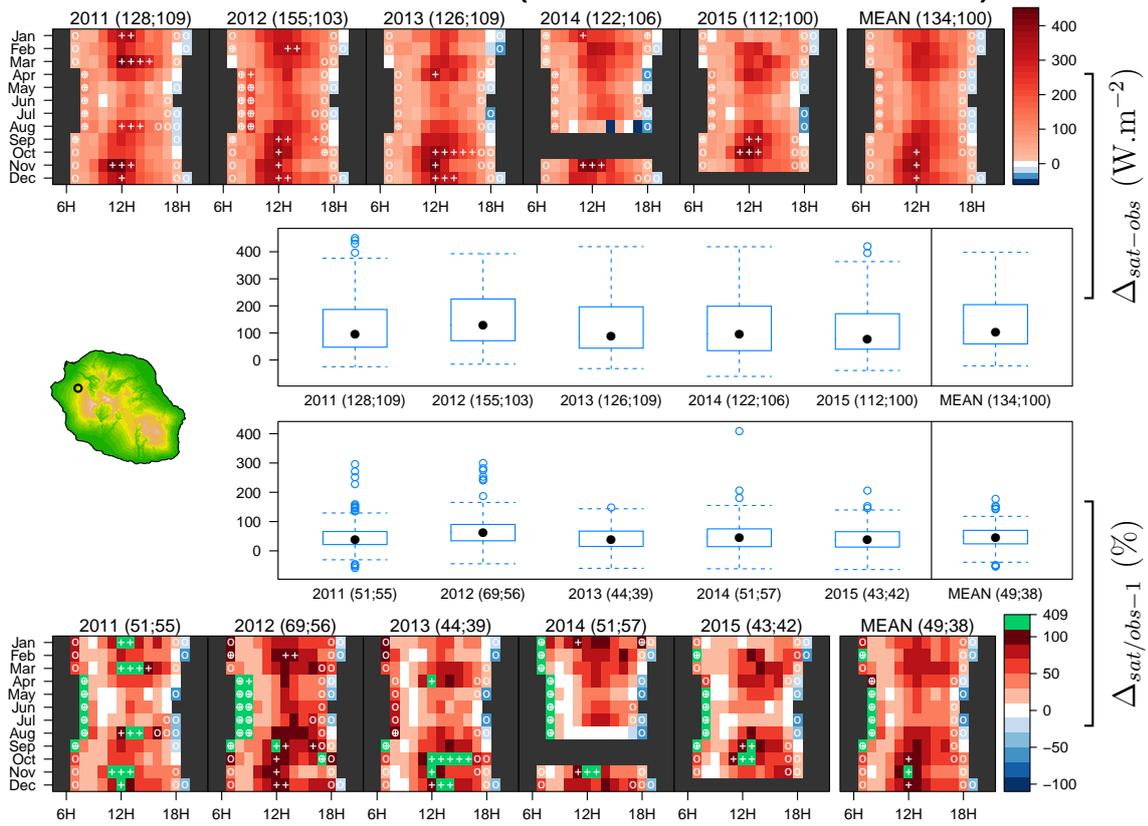
97415511 = SAINT-PAUL (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



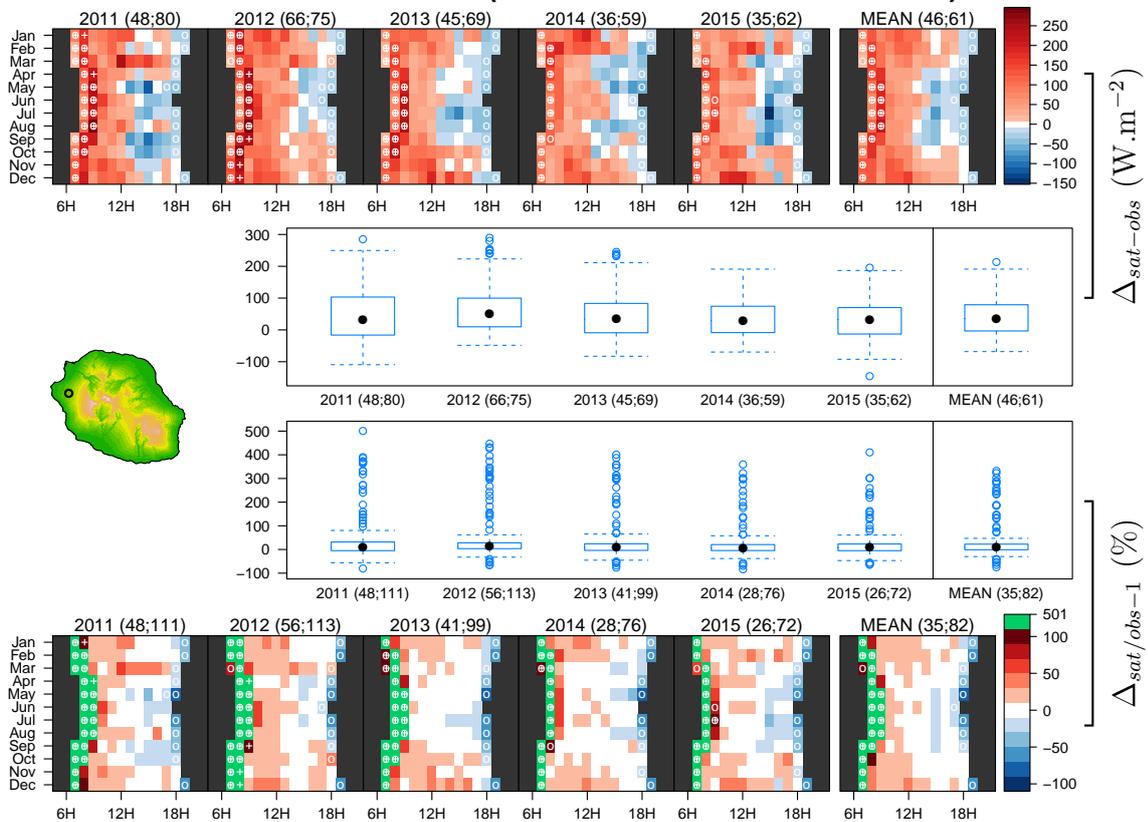
97415516 = BOIS DE NEFLES ST-PAUL (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



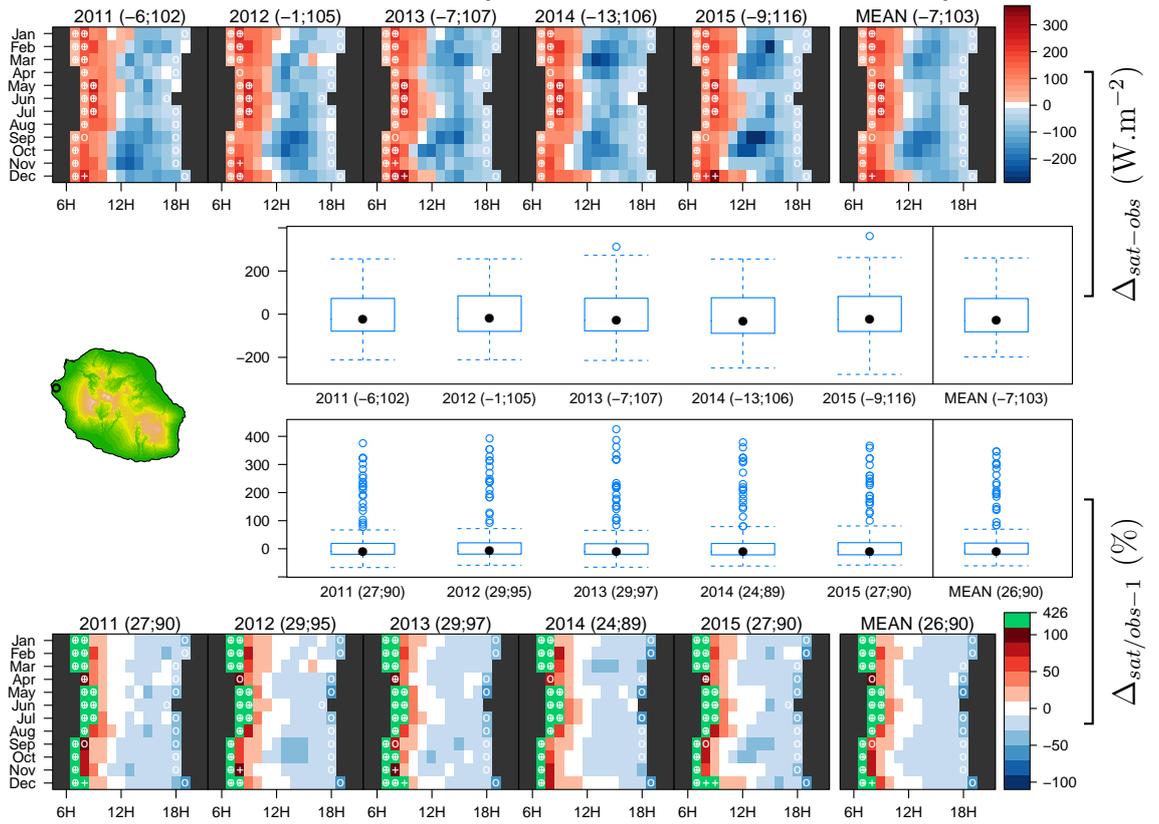
9741536 = PETITE-FRANCE (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



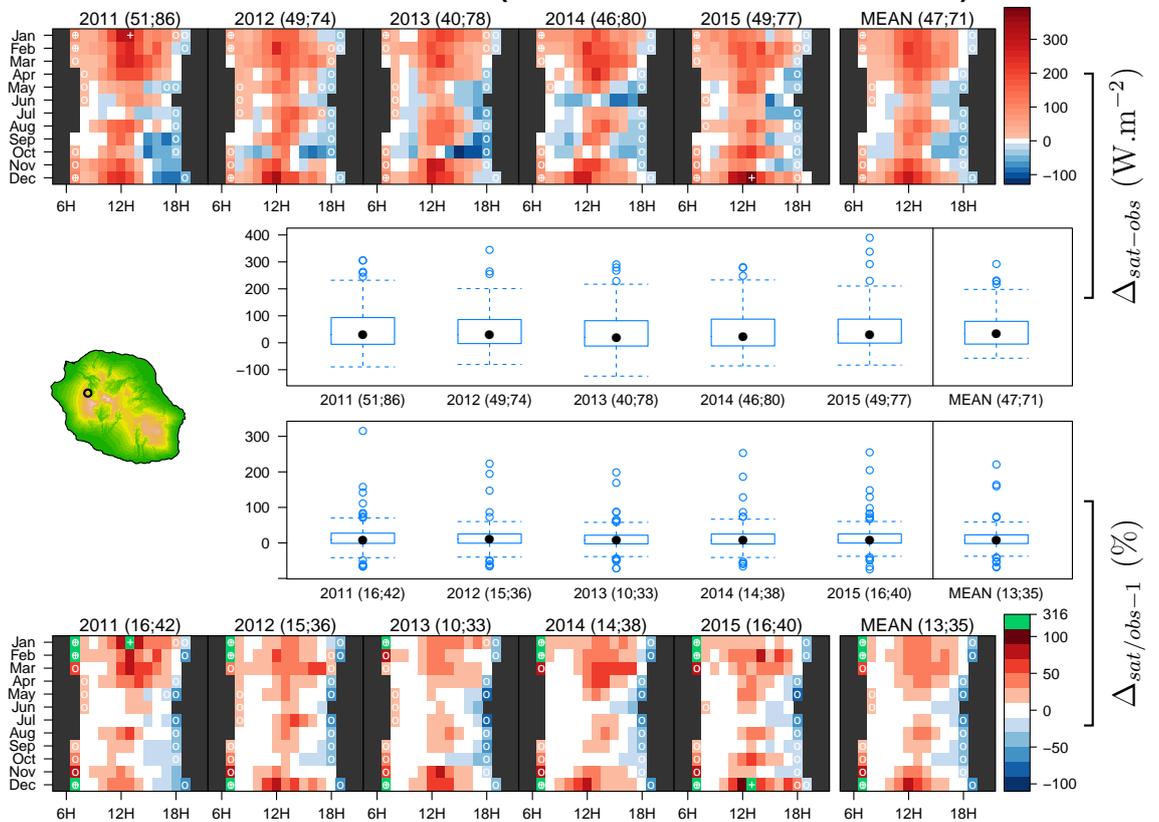
9741541 = TAN-ROUGE (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



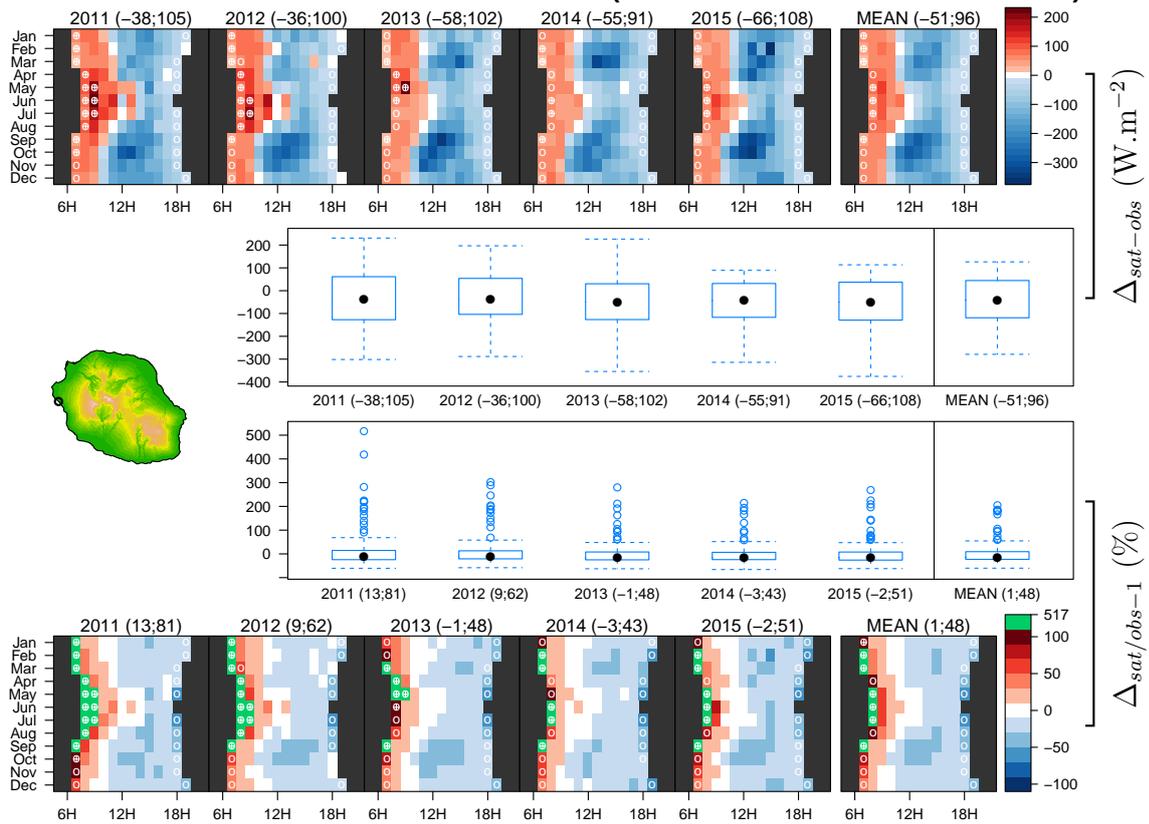
97415550 = L'ERMITAGE (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



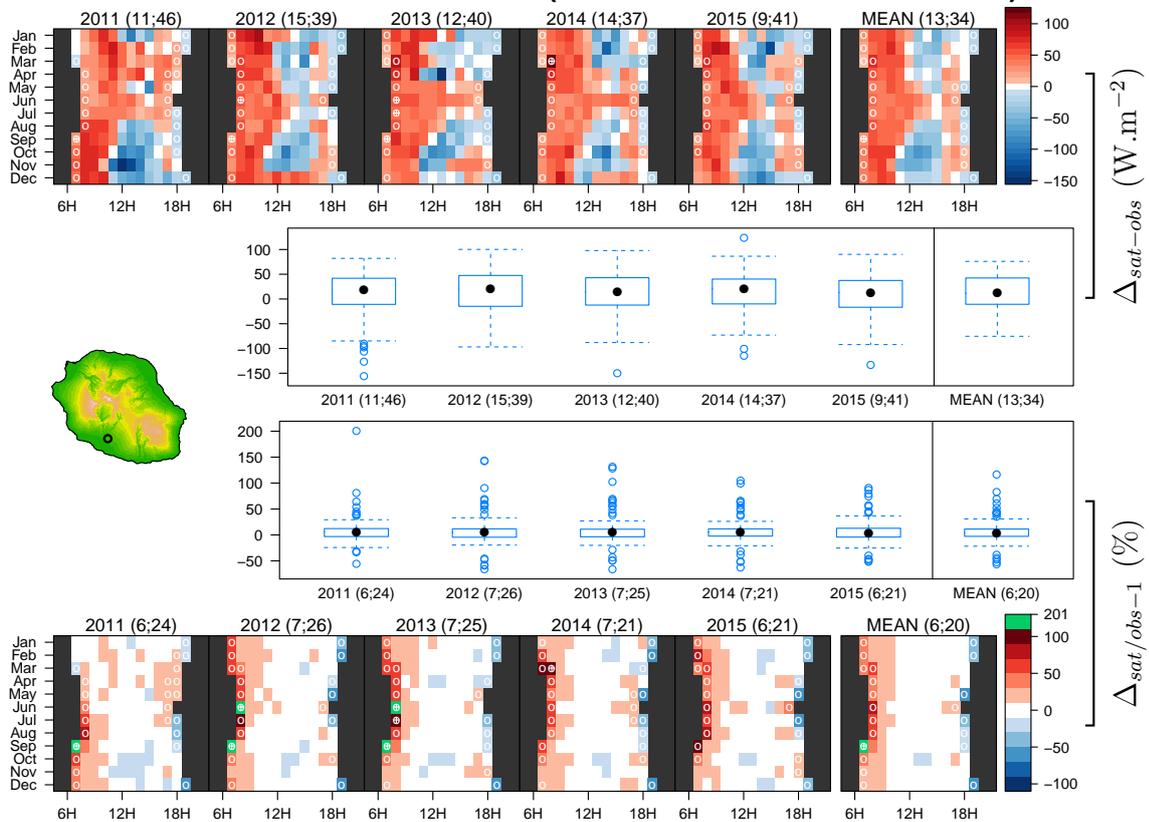
97415566 = PITON-MAIDO (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



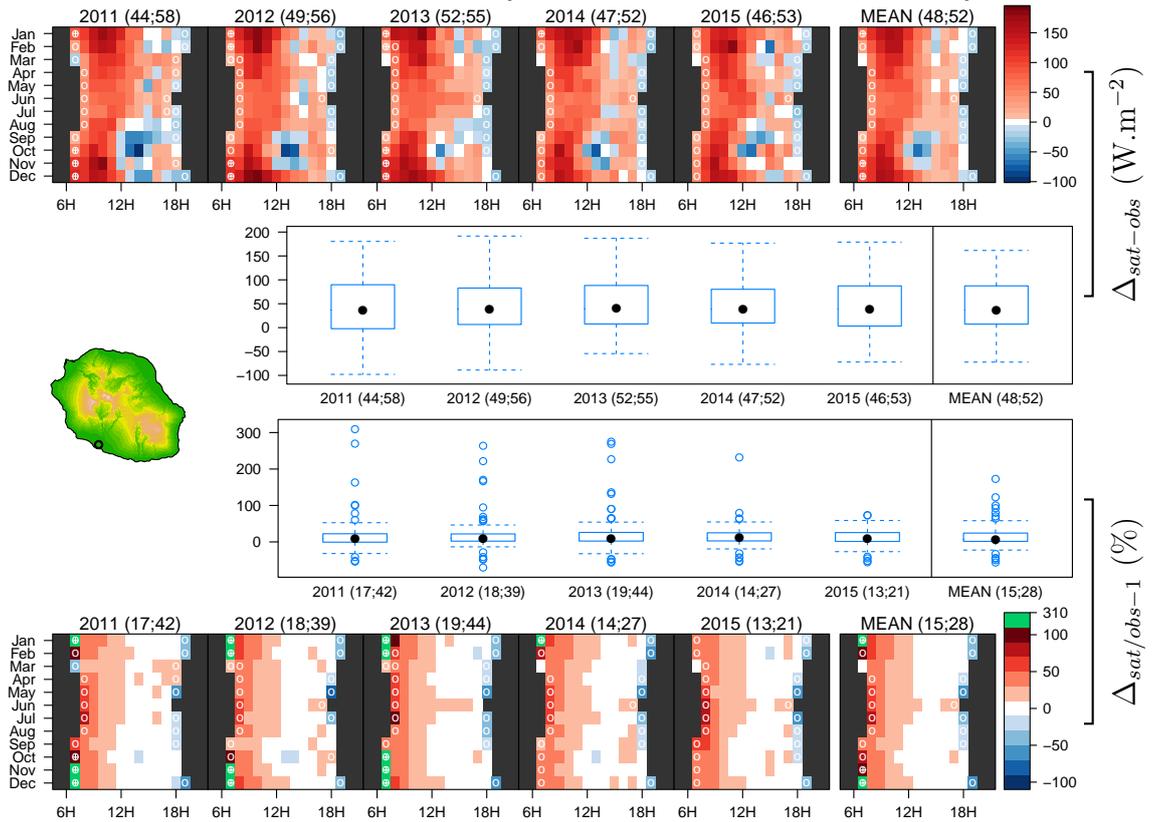
97415590 = POINTE DES TROIS-BASSINS (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



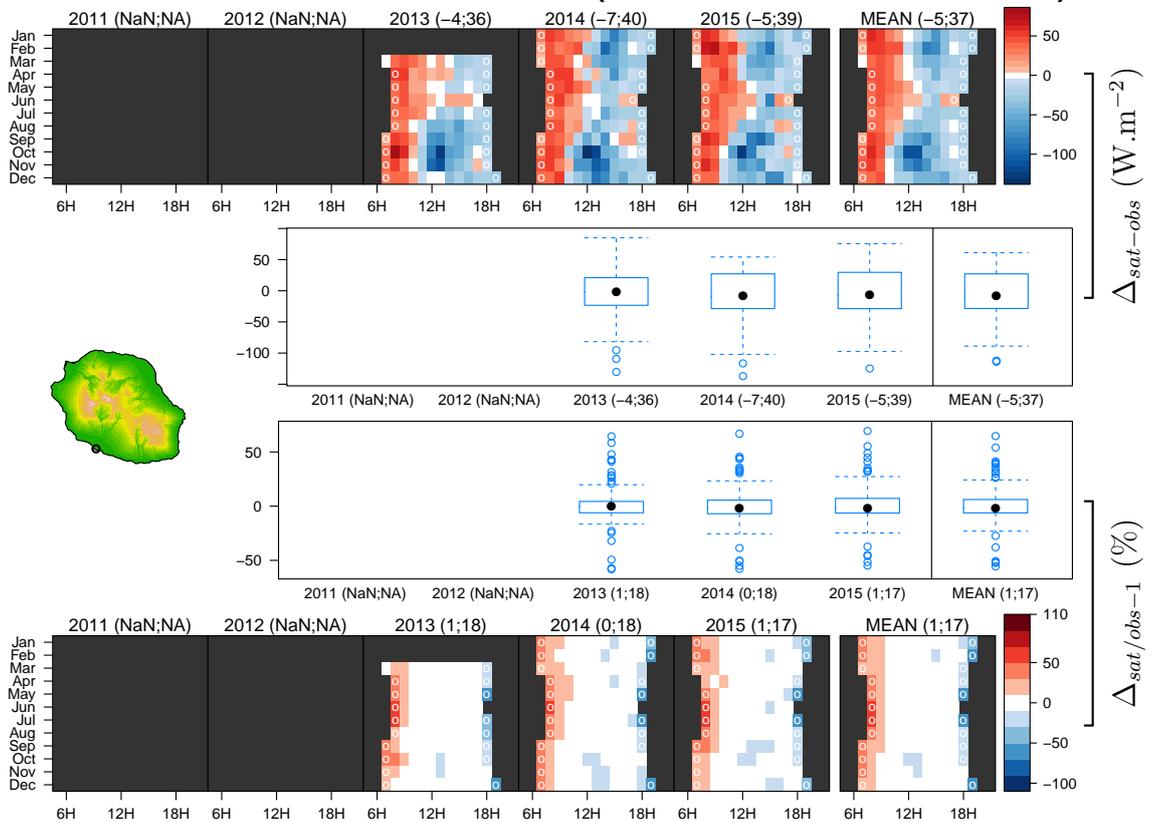
97416410 = RAVINE DES CABRIS (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



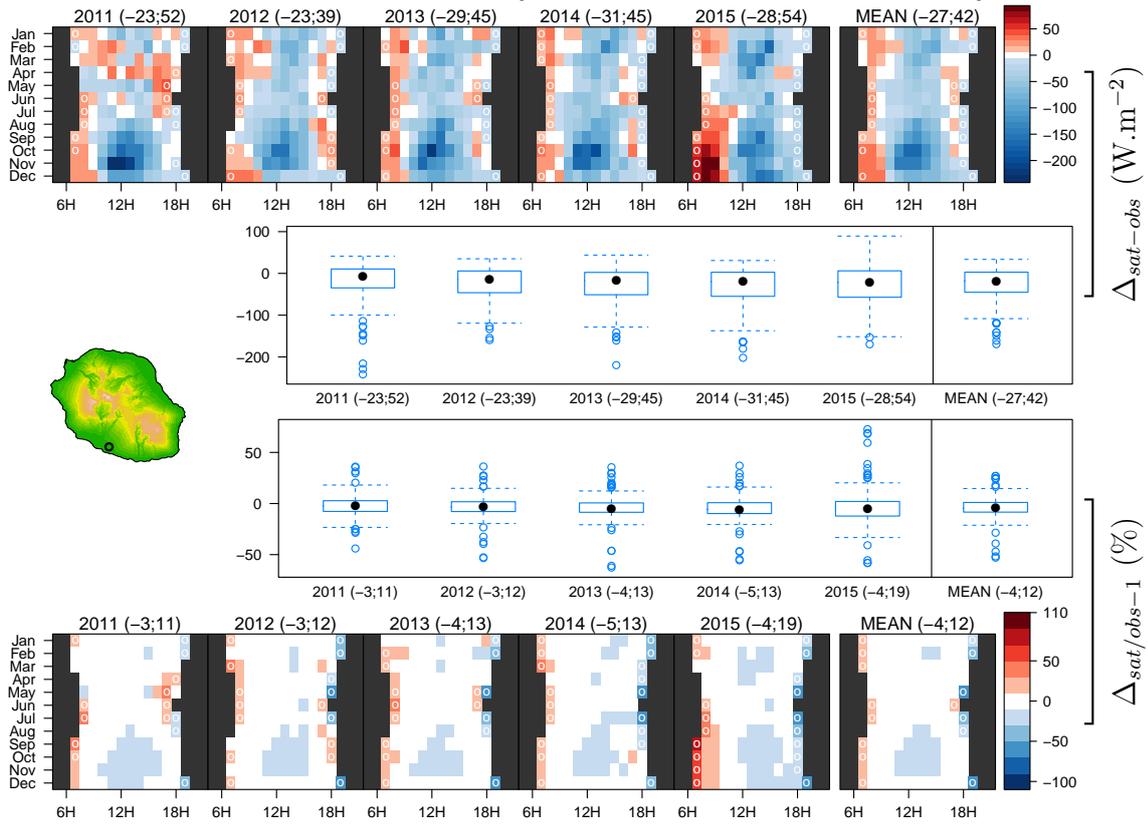
97416415 = PIERREFONDS (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



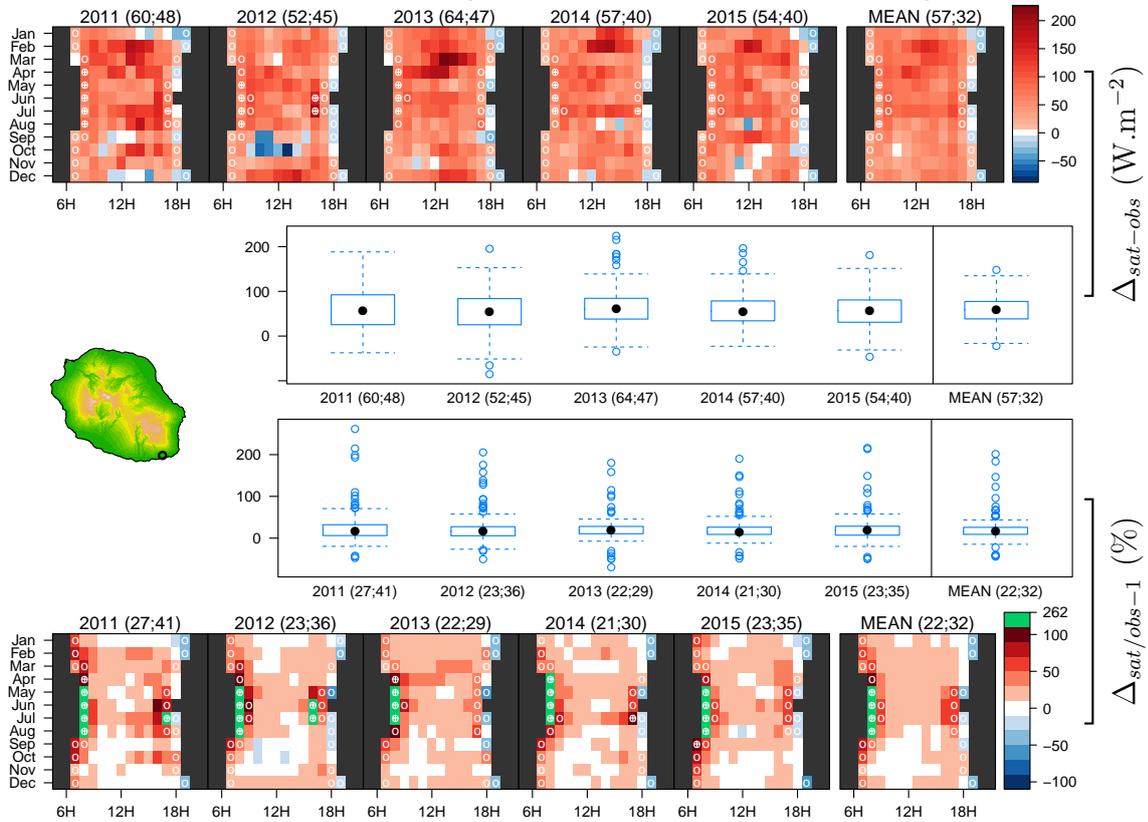
97416463 = PIERREFONDS-AEROPORT (WMO Class : Site 1 & Sensor 2)



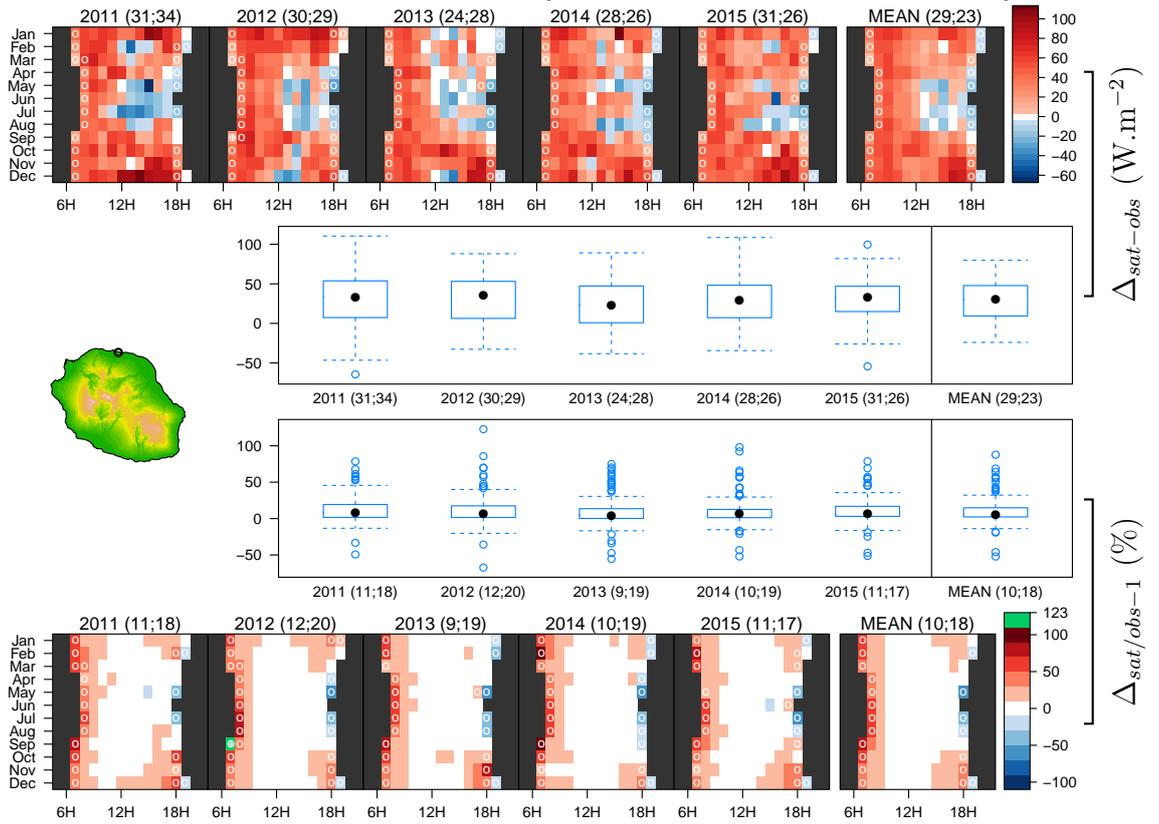
97416465 = LIGNE-PARADIS (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



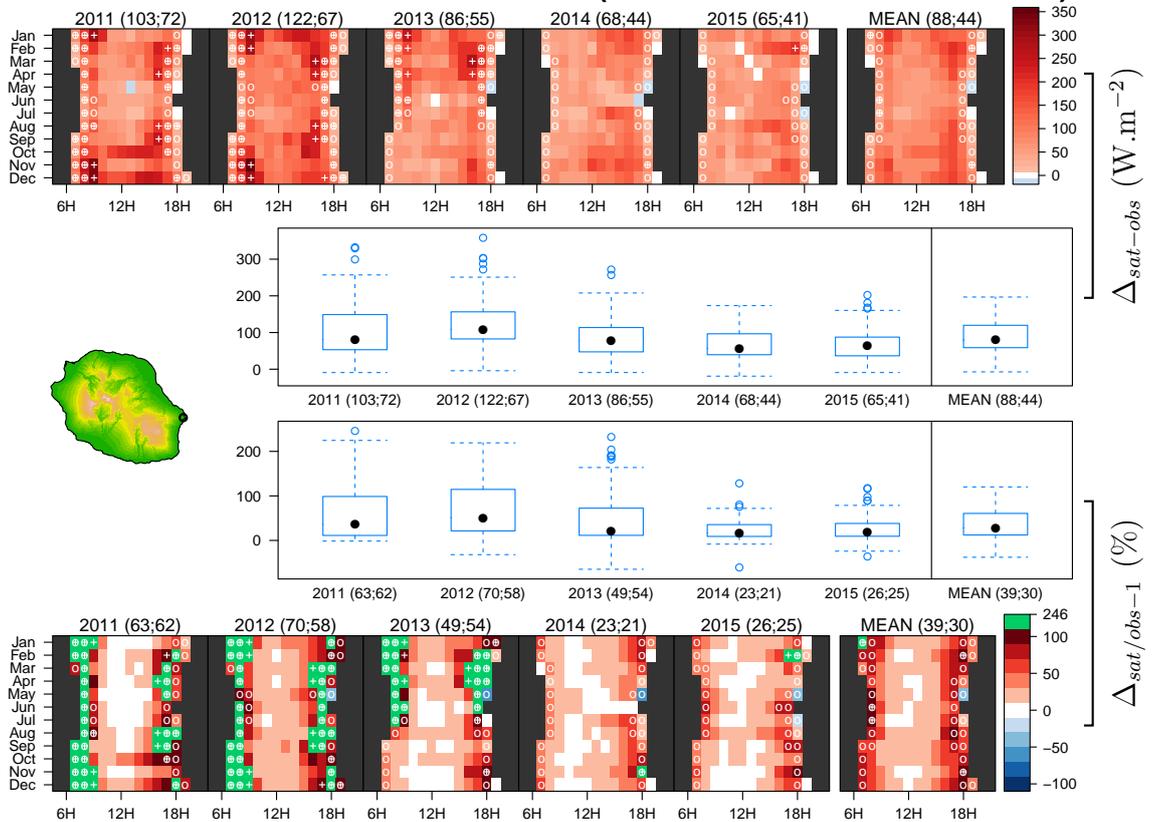
97417360 = LE BARIL (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



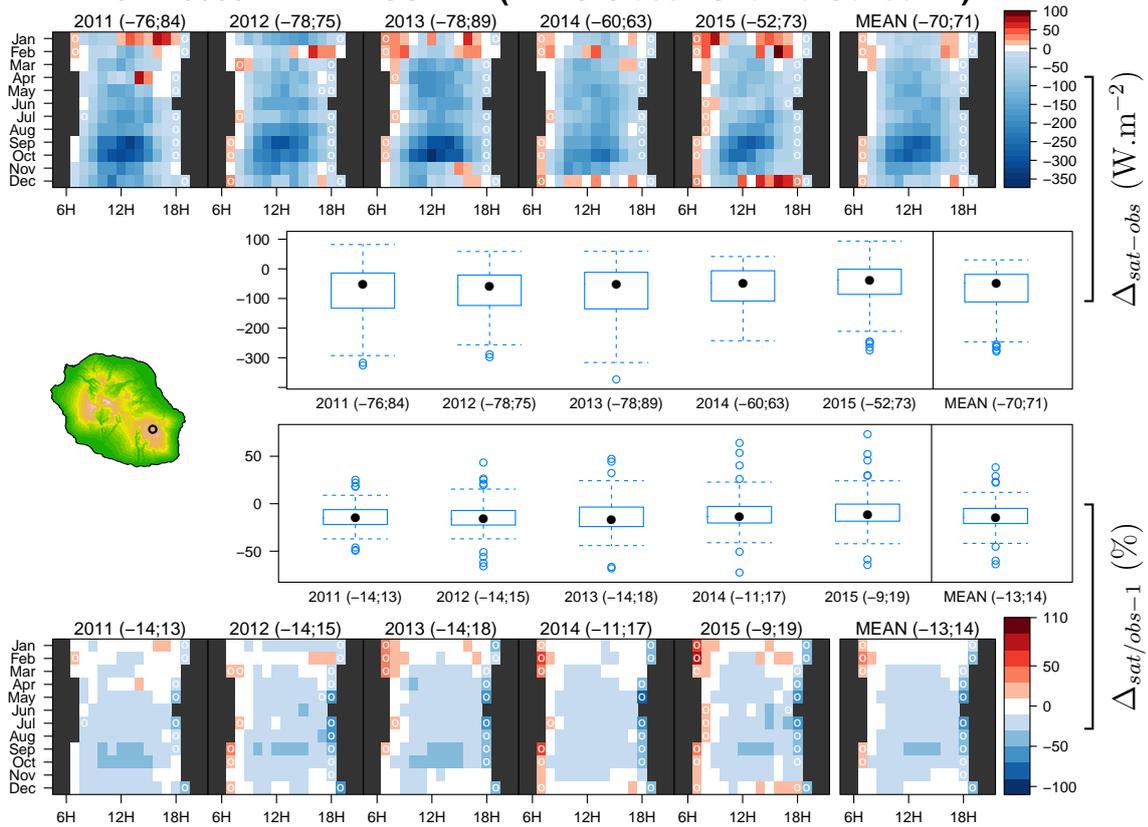
97418110 = GILLOT-AEROPORT (WMO Class : Site 1 & Sensor 1)



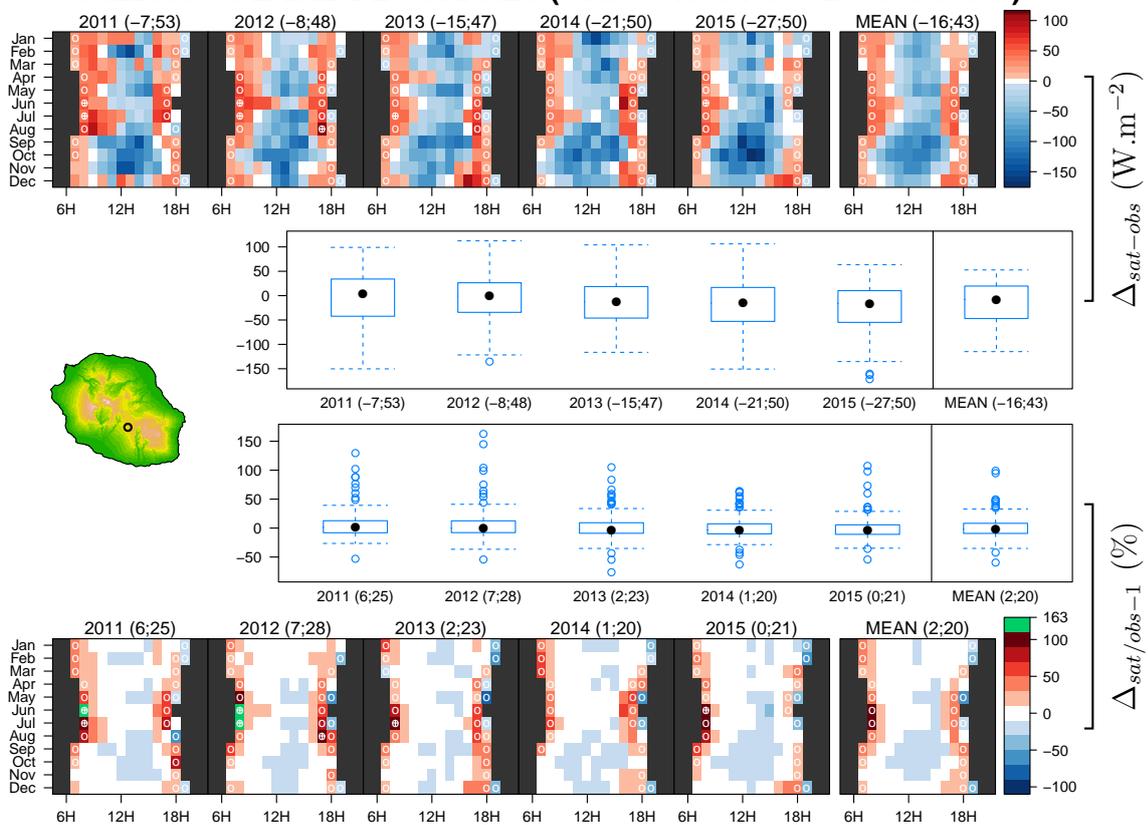
97419350 = GROS PITON SAINTE-ROSE (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



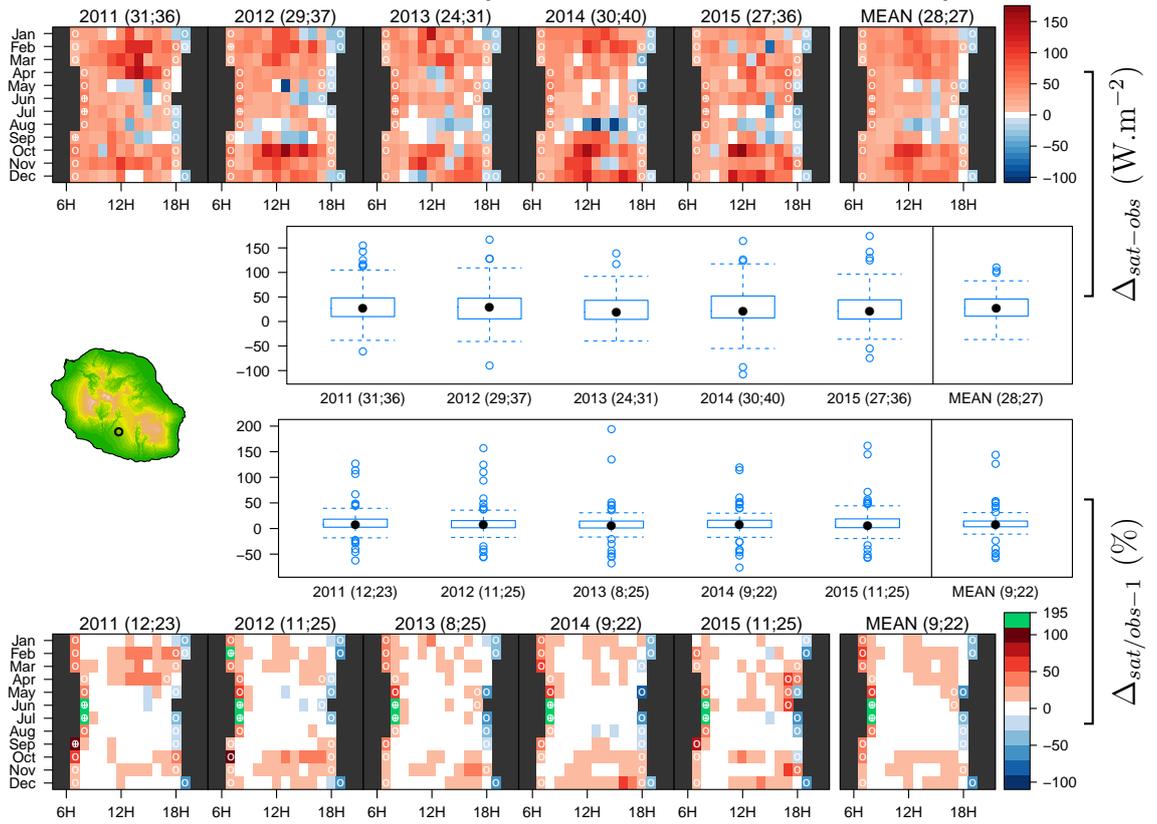
97419380 = BELLECOMBE (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



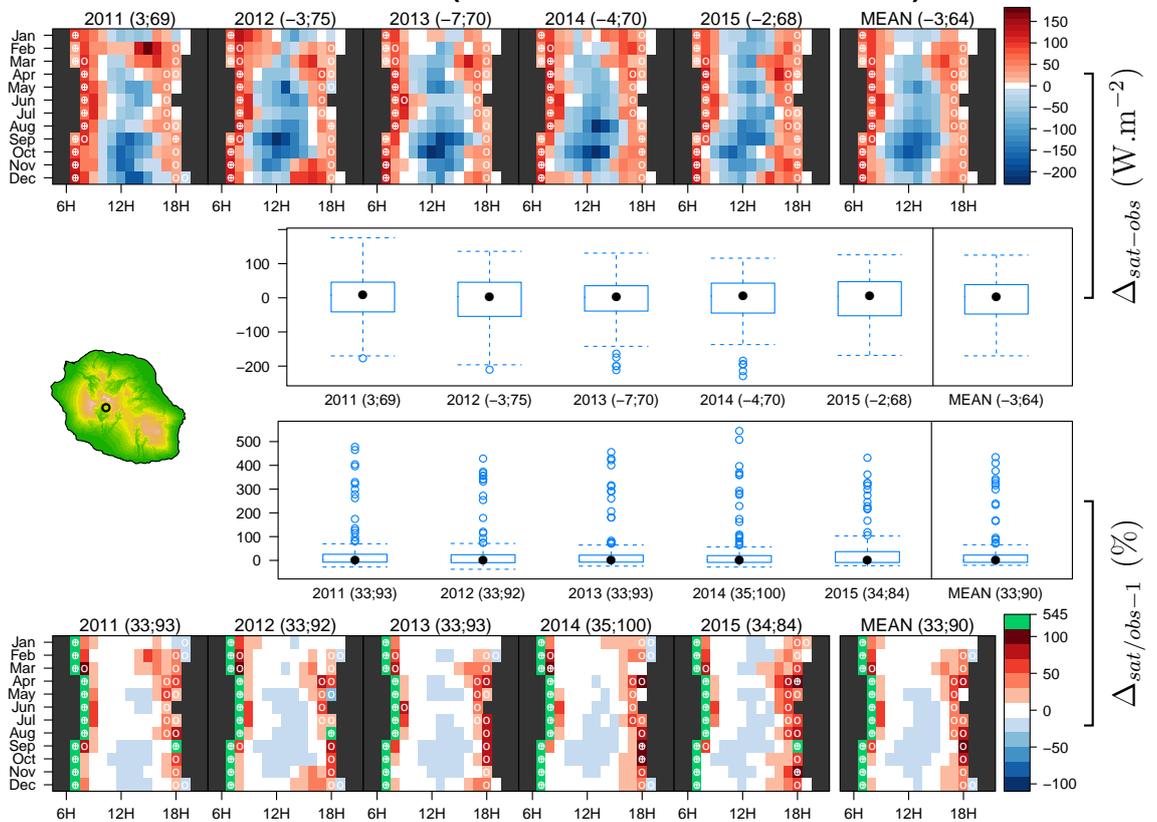
97422440 = PLAINE DES CAFRES (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



97422465 = LE TAMPON (WMO Class : Site 2 & Sensor 1)



97424410 = CILAOS (WMO Class : Site 3 & Sensor 1)



Annexe E.

Compléments de la caractérisation spatiale

Nous détaillons ici des compléments au chapitre III. Parmi eux, les descriptifs complets de chaque graphe et les figures non utilisées mais pouvant servir de support à une meilleure compréhension des analyses.

1. Visualisation des 120 états moyens du potentiel solaire de La Réunion

Dans cette section 1, nous présentons les 120 graphes des états moyens du potentiel solaire réunionnais dans les figures E.1, E.2, E.3 et E.4. Pour détailler ces 120 états moyens, nous utilisons la même démarche que pour les figures du chapitre. Bien que sur les figures tous les pixels sont représentés, nous normalisons centrons les données selon les seuls pixels représentatif de La Réunion, c'est-à-dire sur ou partiellement (à plus de la moitié) sur l'île. Les moyennes et écarts écart-type sont respectivement le premier et second éléments entre parenthèses dans les sous-titres de chaque heure. Les triangles localisent les 10 % des maxima en rouge (forme montante) et les 10 % de minima en mauve (forme descendante).

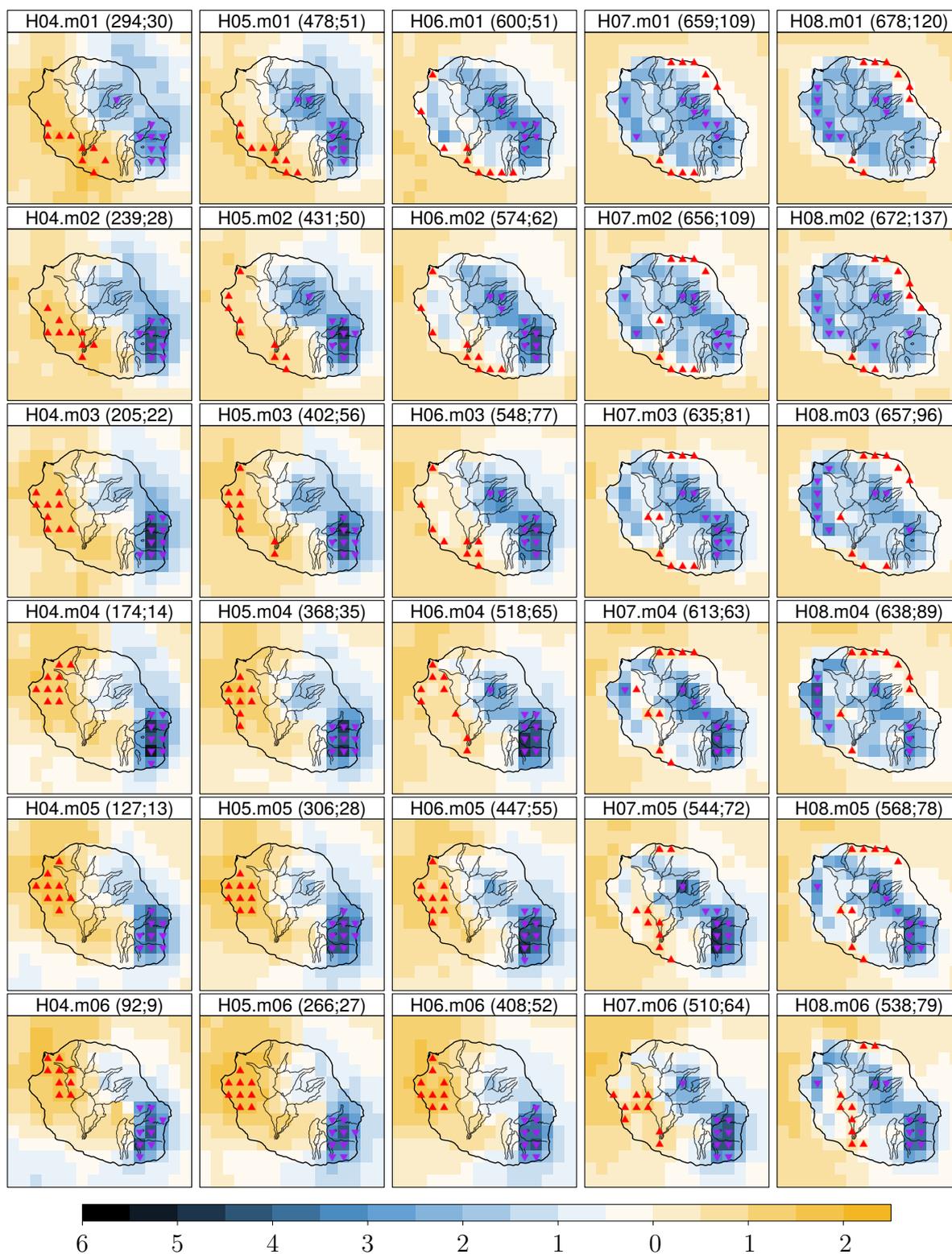


FIGURE E.1. – Carte des états moyens normalisés, entre 8 et 12 heures pour les mois de janvier à juin.

1. Visualisation des 120 états moyens du potentiel solaire de La Réunion

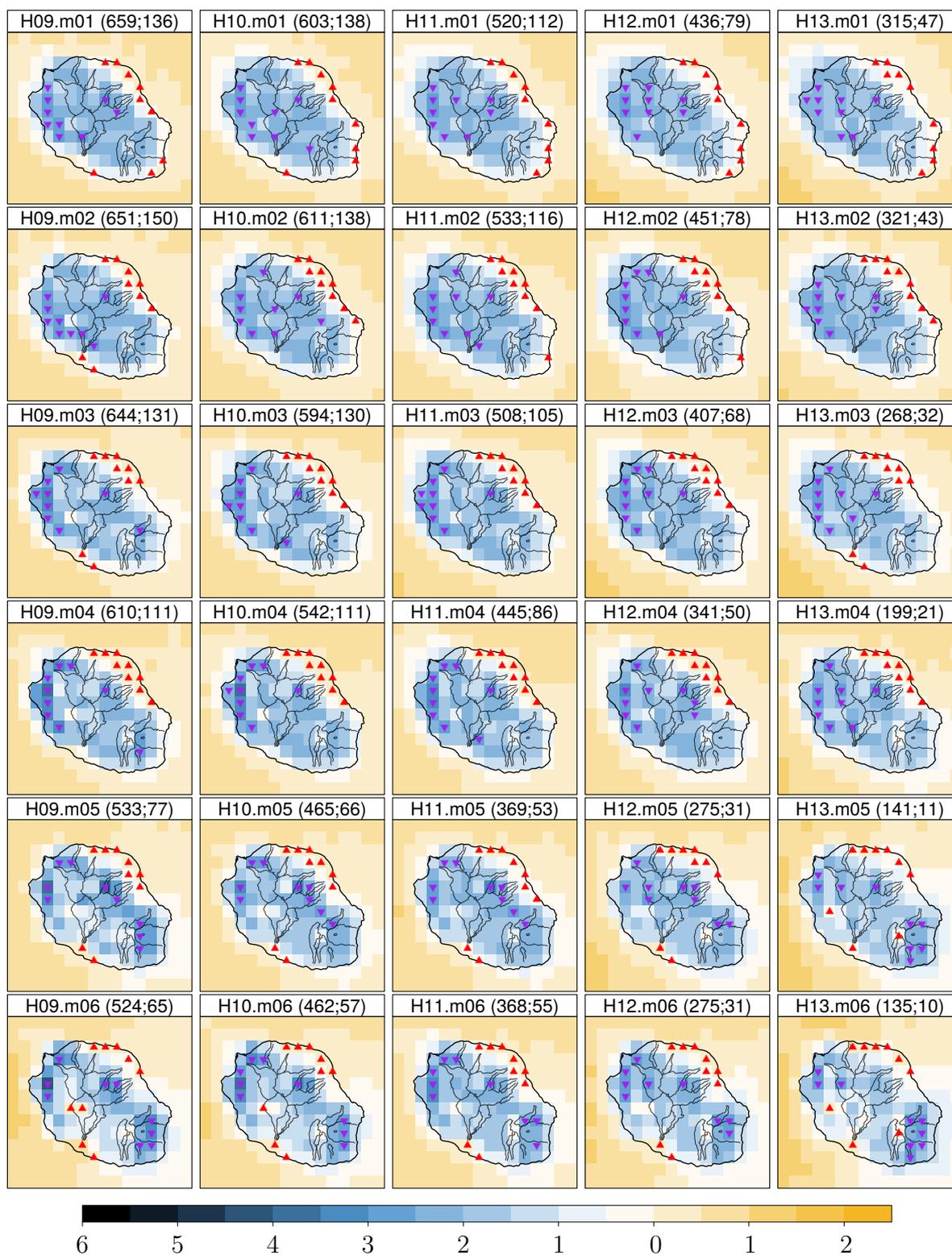


FIGURE E.2. – Carte des états moyens normalisés, entre 13 et 17 heures pour les mois de janvier à juin.

Annexe E. Compléments de la caractérisation spatiale

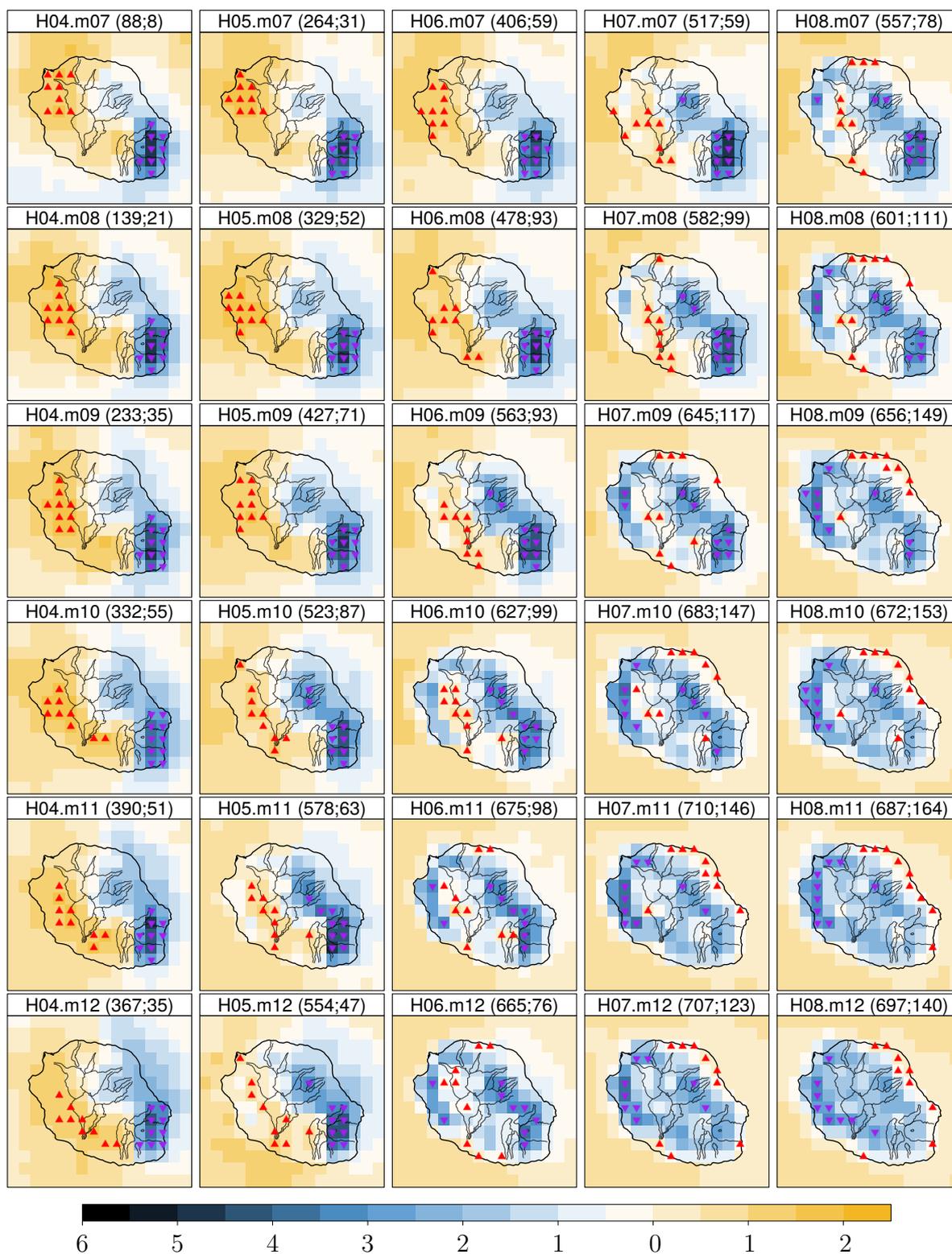


FIGURE E.3. – Carte des états moyens normalisés, entre 8 et 12 heures pour les mois de juillet à décembre.

1. Visualisation des 120 états moyens du potentiel solaire de La Réunion

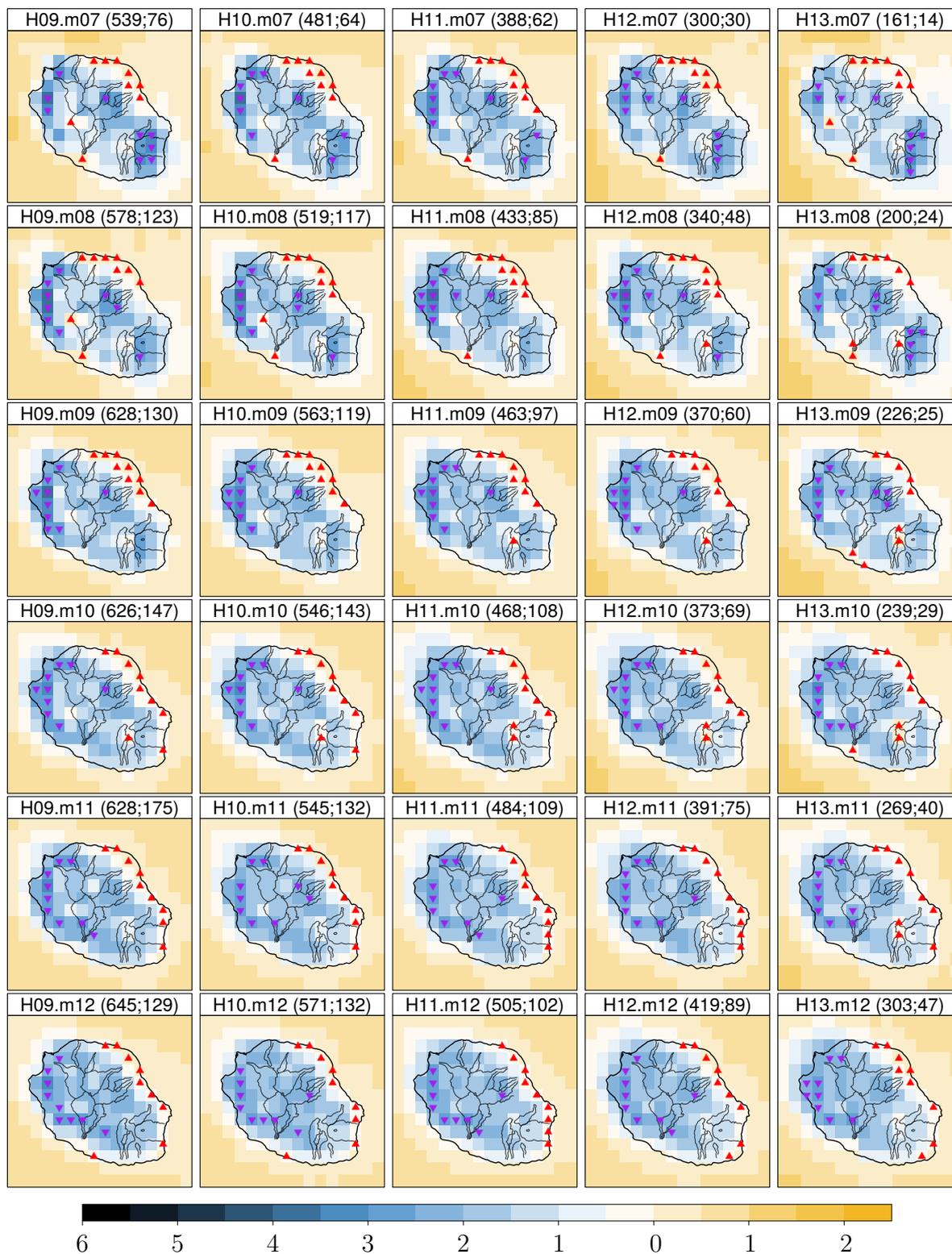


FIGURE E.4. – Carte des états moyens normalisés, entre 13 et 17 heures pour les mois de juillet à décembre.

2. Classification

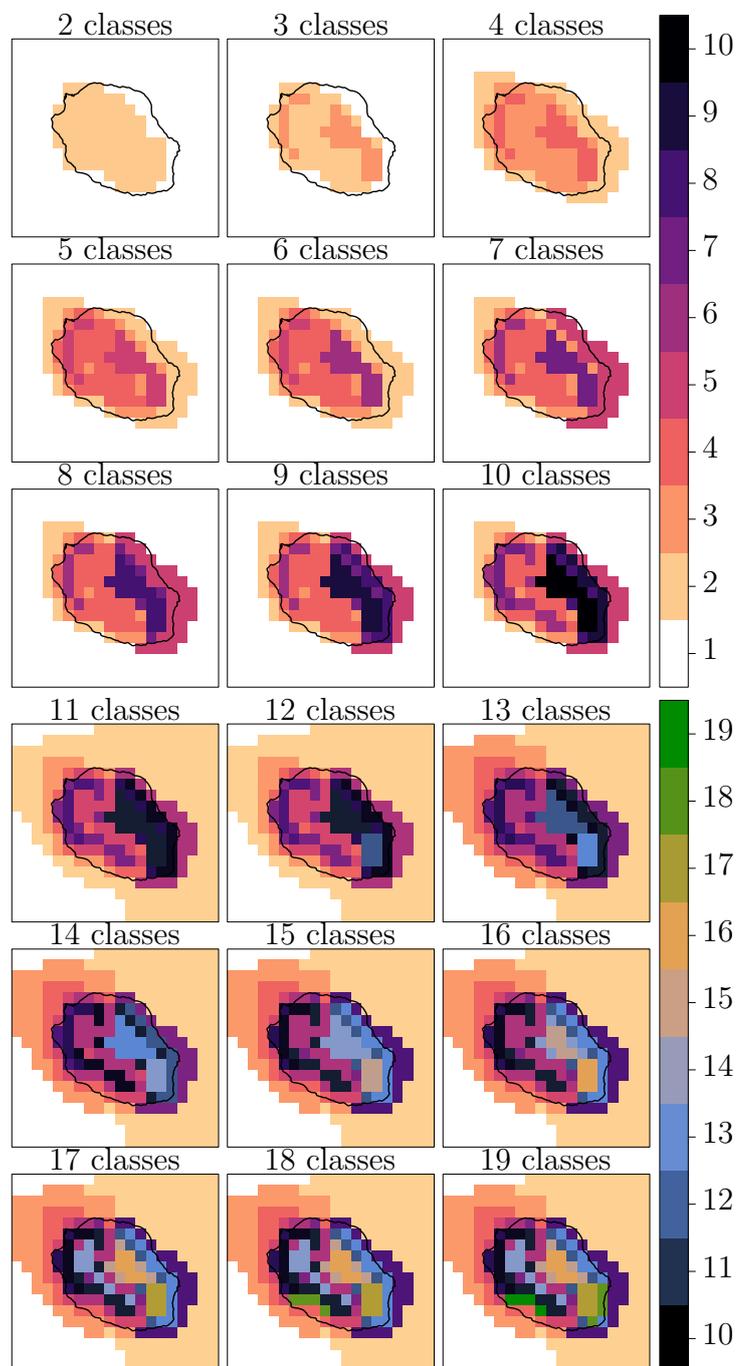


FIGURE E.5. – Cas de classification de 2 à 19 classes

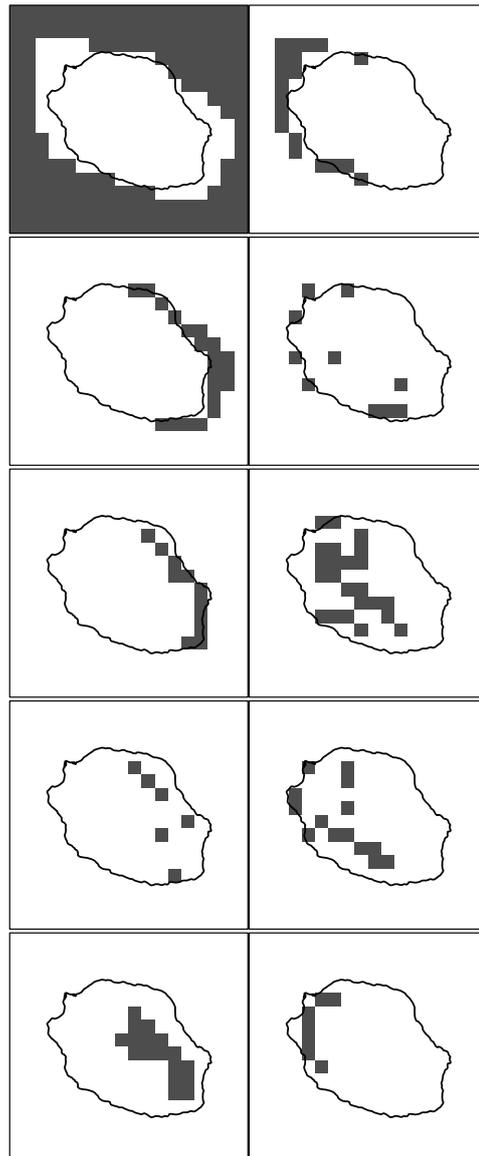


FIGURE E.6. – Visualisation séparée des 10 classes. *Pour rappel, c'est le cas de classification choisi. Nous disposons les graphes selon la même répartition que pour la figure III.16.*

Annexe F.

Compléments de la caractérisation temporelle

- 1. Figures complémentaires de la « régimalisation » des perturbations solaire (IV1)**

(W.m⁻²)

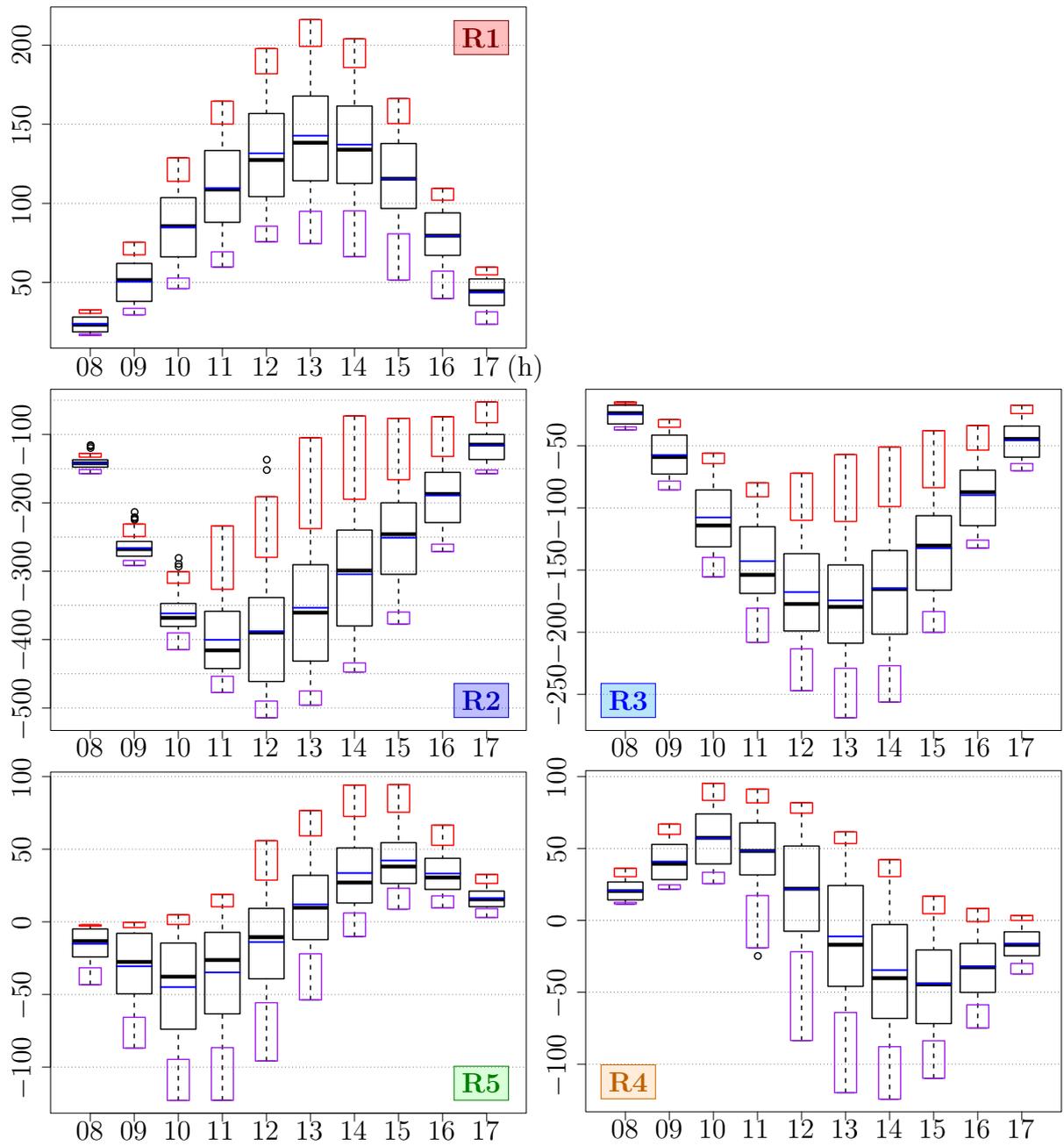


FIGURE F.1. – Profil diurne des distributions des anomalies de chaque régime. *Chaque boîte à moustache renseigne sur la distribution des 127 pixels représentatif de La Réunion (voir classification spatiale III.14).*

1. Figures complémentaires de la « régimalisation » des perturbations solaires (IV1)

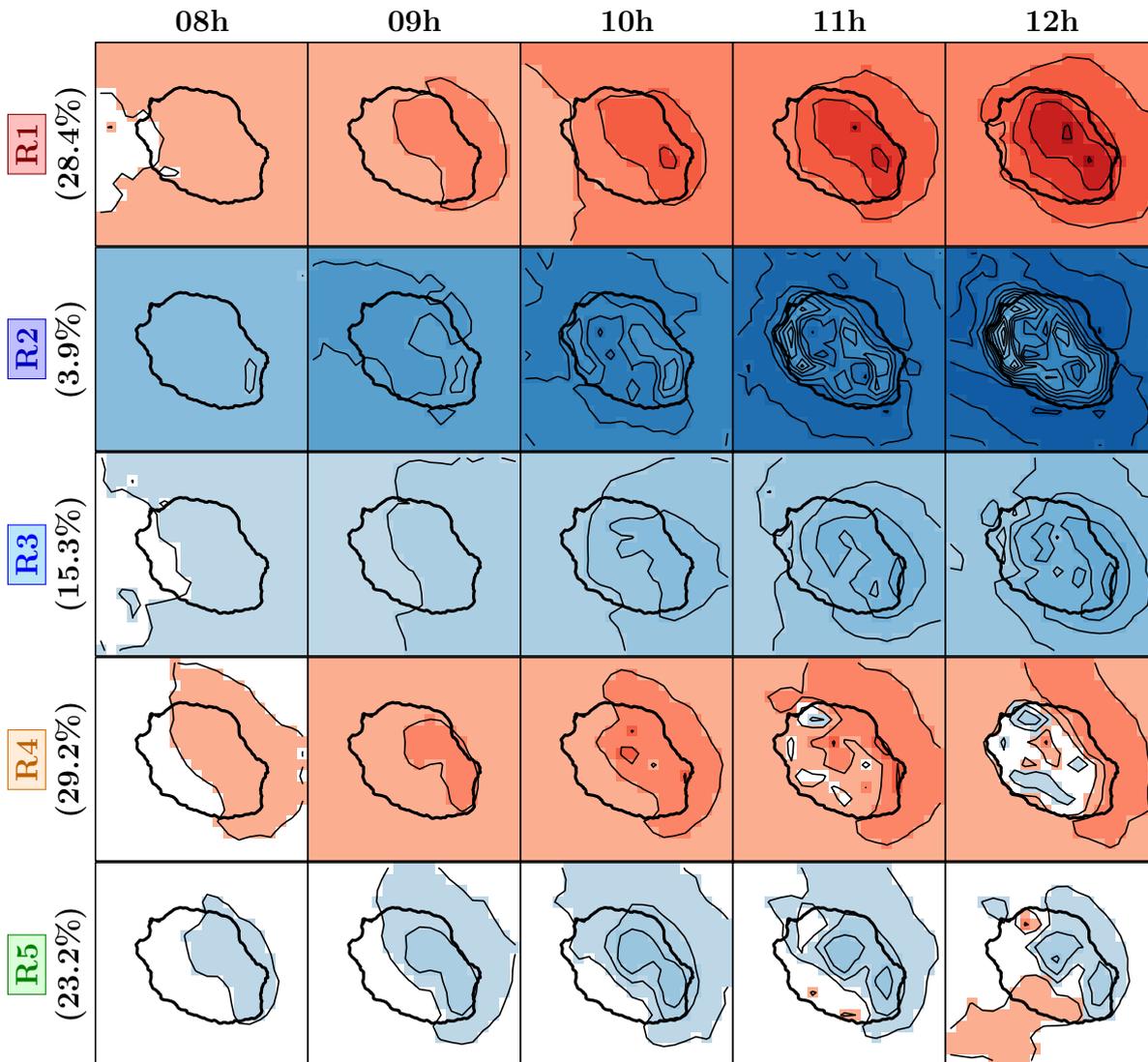


FIGURE F.2. – Évolution diurne des cartes des anomalies de chaque régime pour les heures entre 8 et 12h. Les valeurs entre parenthèses sont les pourcentages de jour dans chacun des régimes.

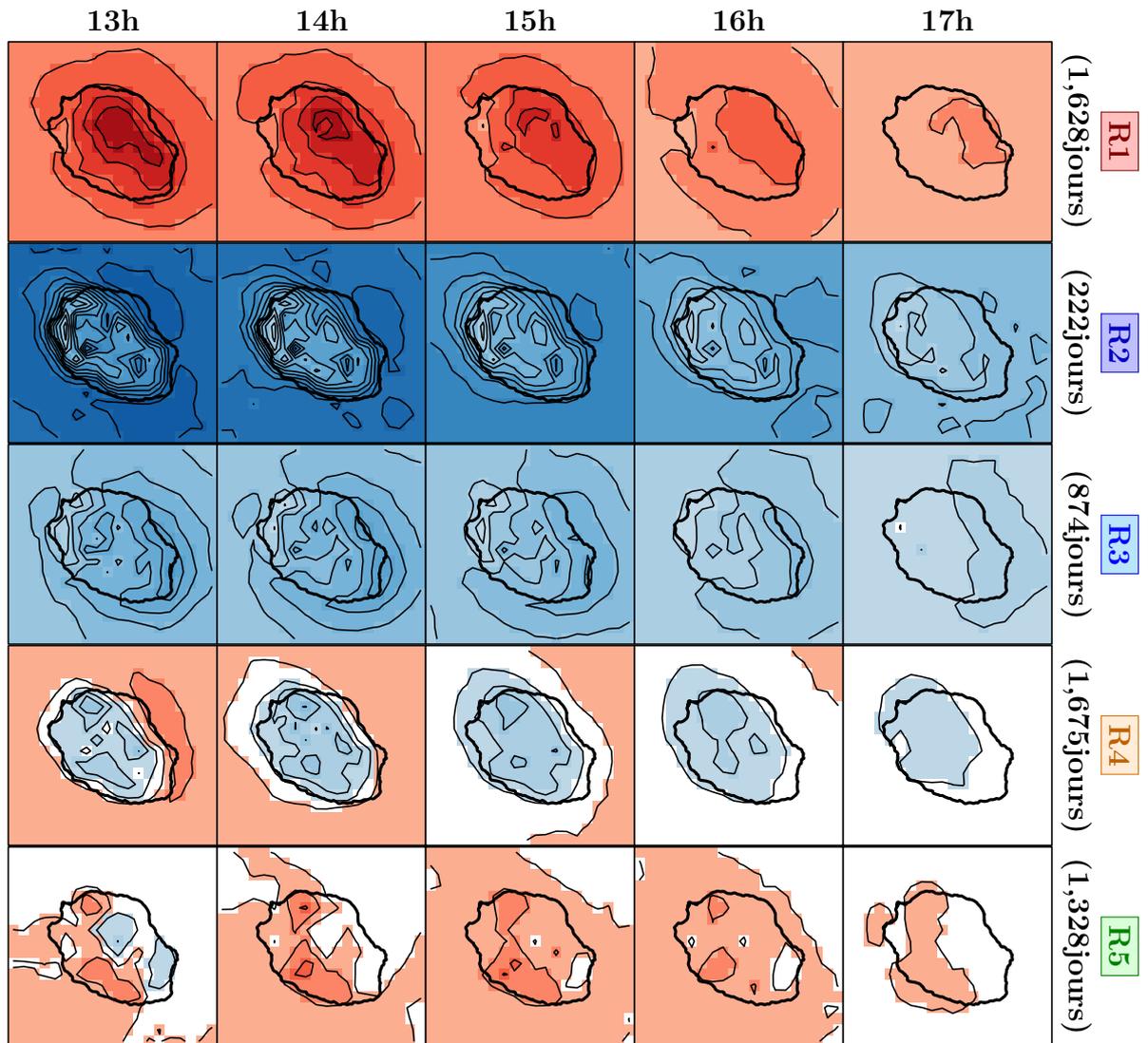


FIGURE F.3. – Évolution diurne des carte des anomalies de chaque régime pour les heures entre 12 et 17h. *Les valeurs entre parenthèses sont les nombres de jour dans chacun des régimes.*

2. Figures complémentaires du lien avec la large échelle (IV2)

2.0.1. Les phases de la MJO de Wheeler and Hendon (2004)

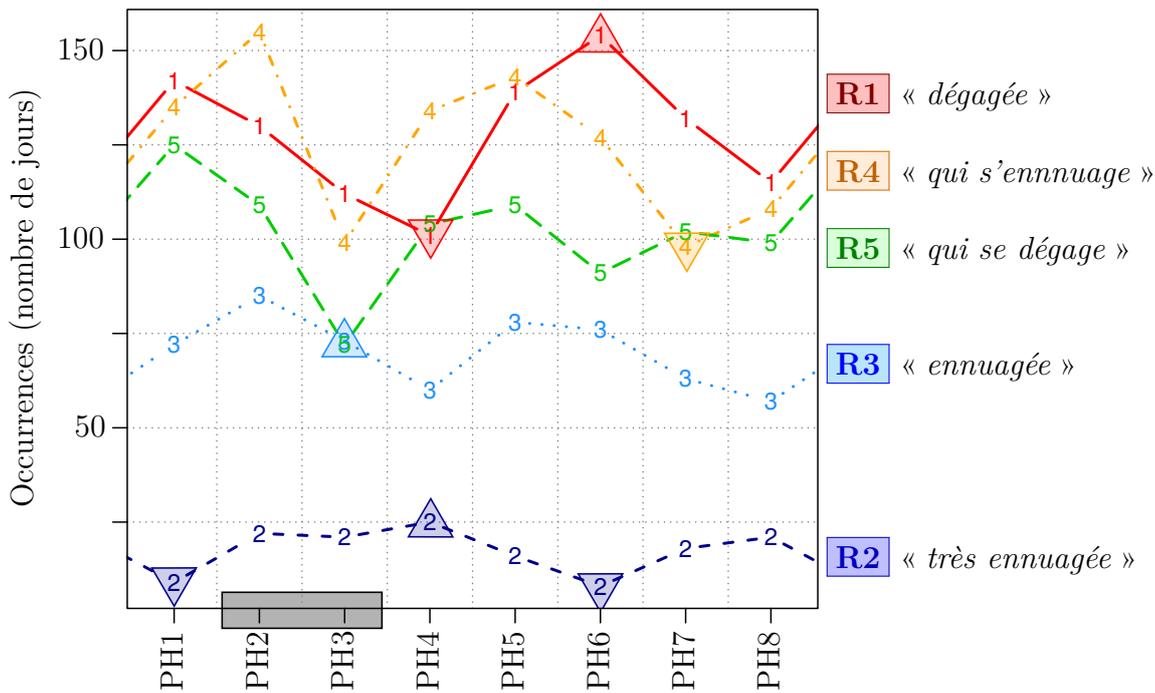


FIGURE F.4. – Occurrences des régimes selon les phases de l’oscillation de Madden-Julian, version graphique de la table IV.5. Le rectangle gris rappelle les phases pendant lesquelles le maximum de convection est dans l’Océan Indien. Les cercles localisent les occurrences significatives, selon un test de significativité à 95 %, par des triangles montants (descendants) selon si la valeur est significativement supérieure (inférieure).

2.0.2. Les régimes d'OLR de Fauchereau et al. (2009)

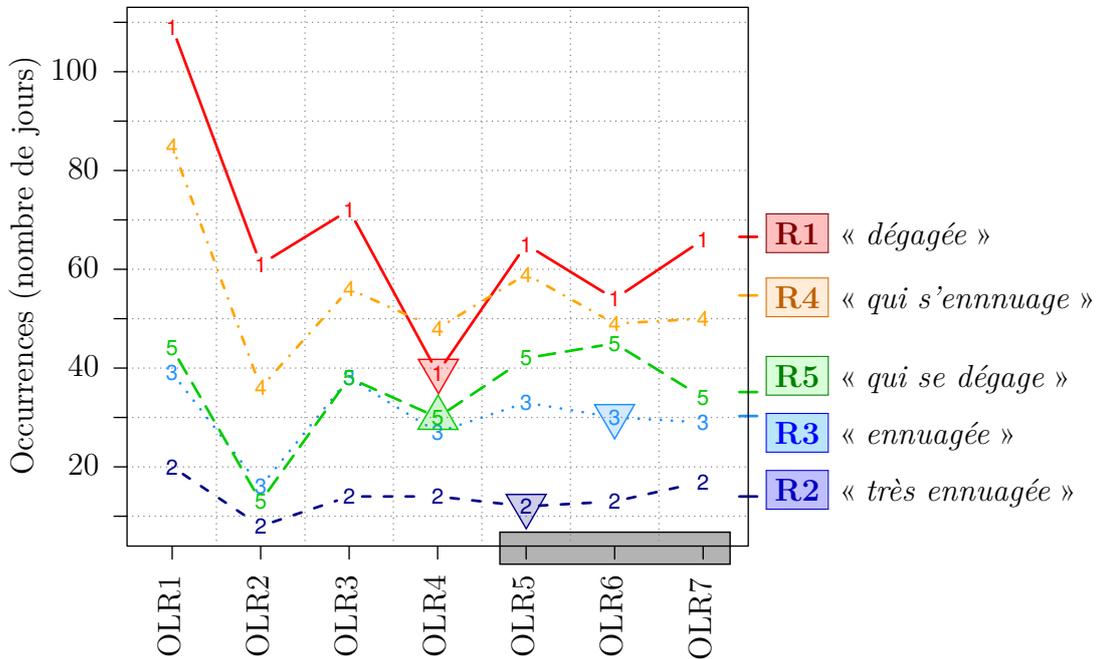


FIGURE F.5. – Occurrences des régimes de perturbations solaires selon les régimes d'Outgoing Longwave Radiation (OLR) par Fauchereau et al. (2009), version graphique de la table IV.4. Le rectangle gris rappelle les phases pendant lesquelles le maximum de convection est dans l'Océan Indien. Les cercles localisent les occurrences significatives, selon un test de significativité à 95 %, par des triangles montants (descendants) selon si la valeur est significativement supérieure (inférieure).

Annexe G.

Captures d'écran des applications html développées

Nous présentons ici deux des applications html développées avec R et les packages `shiny` et `shinyjs`. La première application permet d'accéder au calcul de corrélation entre les grandeurs physiques, avec pour base de données une climatologie des données Météo-France de rayonnement, précipitation, et température minimale et maximale (basée sur la période 1999-2008). La seconde application détaille des éléments de la comparaison entre chacune des stations du laboratoire et ses voisins Météo-France (le calcul d'un voisin équivalent est fait de la même façon qu'en équation [II.1](#) pour les données satellites).

Application n°1 : onglet n°1

Détails des sites Météo-France selon leur altitude (*alti*), leur latitude et longitude :

1) un tableau des valeurs

2) carte des sites coloré selon le dégradé de la valeur choisie (*Color by*), arrondie ou non (*Round it by*, 2 pour deux chiffres après la virgule)

Parameters Correlation

Color by : and round it by :
=> There is 23 levels.

sites **dygraph** **gppairs**

FIRST TAB : SITES

Under the table : Entries number are the site number where all params are available

Show entries Search:

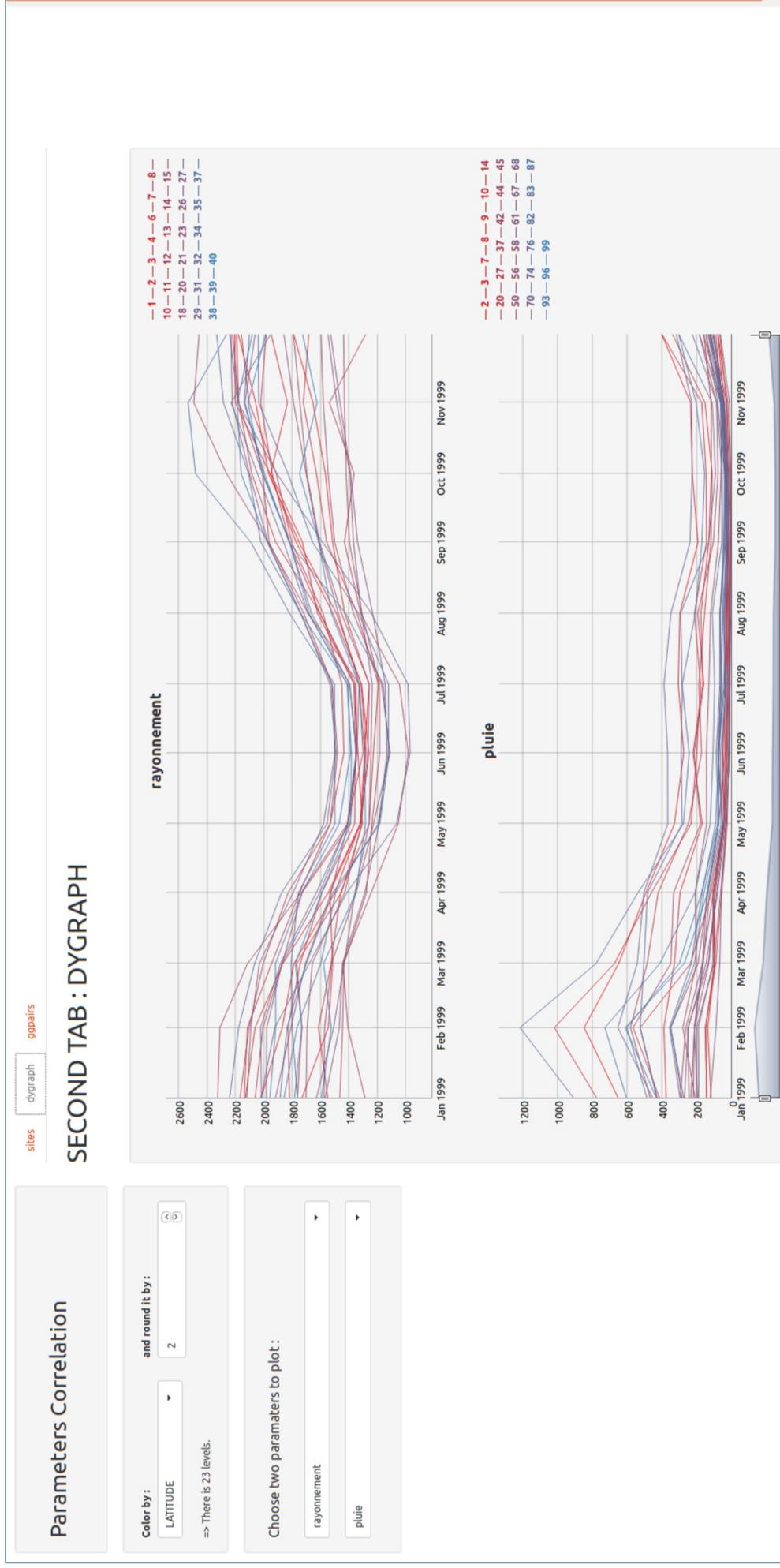
num_poste	alti	LATITUDE	LONGITUDE
97,401,540	170	-21.24	55.33
97,402,240	480	-21.00	55.62
97,404,540	20	-21.27	55.38
97,405,420	813	-21.32	55.57
97,406,220	1,032	-21.14	55.63
97,407,520	9	-20.95	55.28
97,408,580	1,415	-21.08	55.42
97,410,238	43	-21.06	55.72
97,411,111	36	-20.88	55.46
97,412,336	1,085	-21.30	55.63
97,412,384	17	-21.38	55.61
97,413,520	798	-21.13	55.30
97,413,524	520	-21.14	55.30
97,413,580	565	-21.21	55.33
97,415,511	186	-20.98	55.33

Showing 1 to 15 of 28 entries Previous Next

Sites used for gppairs are plotted, ie only when the site has a value for each of all params

Application n°1 : onglet n°2

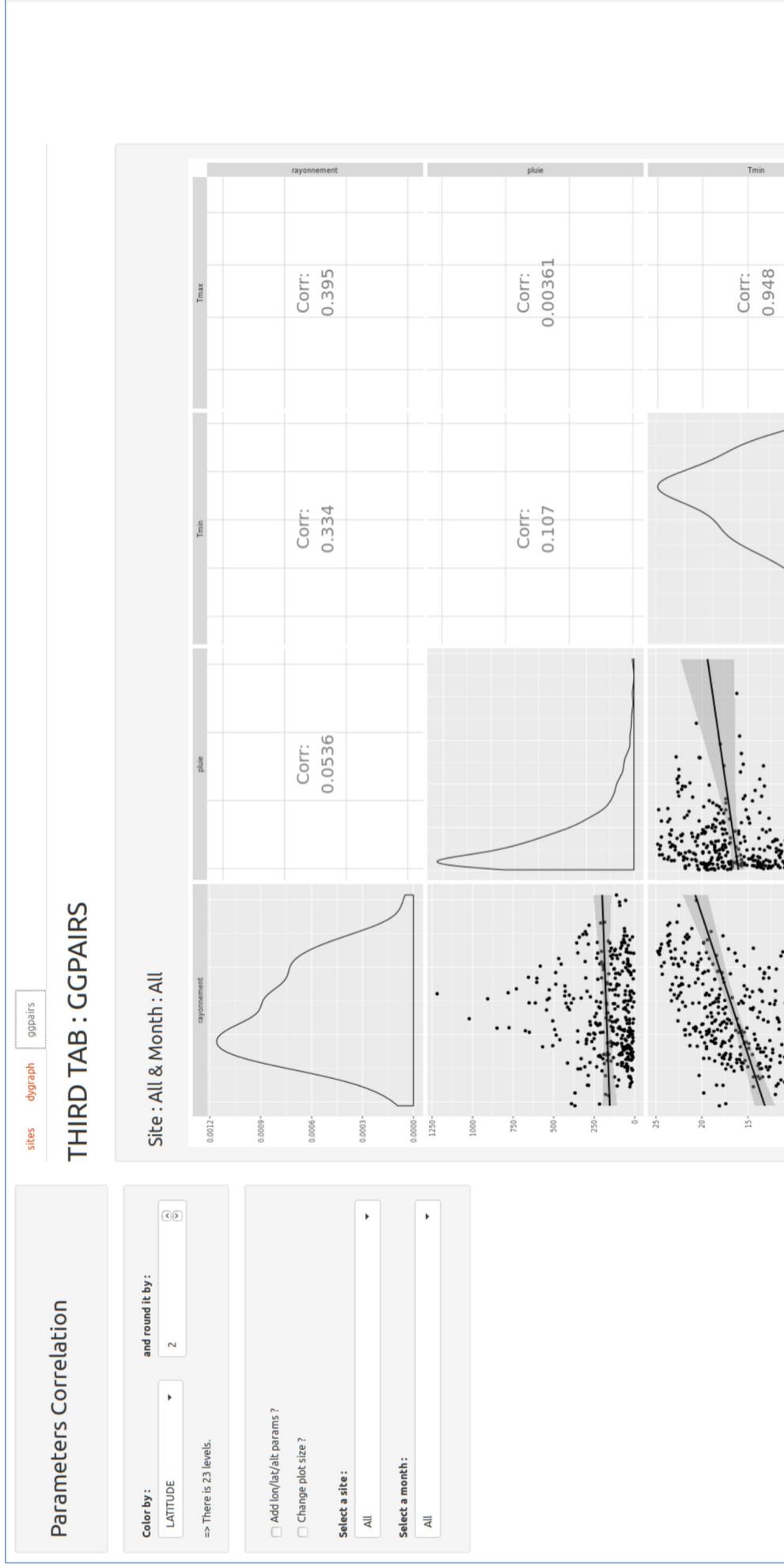
Représentation graphique de deux grandeurs physiques choisies (*Choose two parameters to plot*) et selon les mêmes couleurs que sur la carte de l'onglet d'avant (donc selon l'altitude ou la latitude ou la longitude)
(On peut zoomer, en même temps sur les deux graphes, en abscisse sur un ou plusieurs mois, et en ordonnée sur une gamme de valeurs)



Application n°1 : onglet n°3

Affichages des valeurs et visualisations graphiques des corrélations croisées entre toutes les grandeurs disponibles (soit, rayonnement, pluie, températures journalières minimale et maximale)

Avec possibilité de rajouter au calcul des corrélations les altitudes, latitudes et longitudes (dans la colonne de gauche : *add lon/lat/alti params ?*)



Application n°2 : onglet n°1 (haut de page)

Selon le choix d'une année d'étude, d'un mois et d'une plage d'heure à sélectionner (dans la colonne à gauche), les autres éléments de la page se modifient automatiquement avec :

À gauche, il y a un détail des caractéristiques de la station du laboratoire (à choisir par : *For the RCIGS site*) et de ses plus proches voisins Météo-France (sur la carte, en rond rouge plein : la station du laboratoire et en ronds colorés mais creux : les voisins Météo-France).

Simple sites comparison

Between one site from RCIGS DB (a point by minute) and its n neighbors from METFR DB (a point-by-hour)

Choose a year: 2013

Choose a month: January

Filter data ?

Select hours: 0 6 12 18 24 24

Neighbors nb: 5

threshold (m): 4000

Any grey color concerned the "Neighbor0" which is the weighted mean data from the neighbors concerned (na.rm = T)

All Data Error

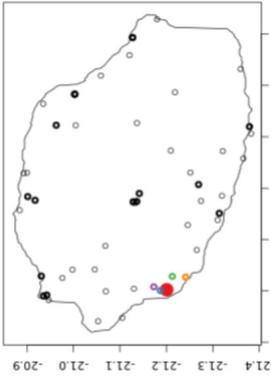
	SAINT ANDRE	SAINT PIERRE LA VALLEE	MOUFIA BOIS DE NEFLES	LA POSSESSION	LA SAINT LEU	LE PORT	BRAS PANON	MOUFIA UR	TAMPON UR	CILAOS THERMES	CILAOS BRAS SEC	CILAOS PISCINE	SAINTE ROSE	SAINT JOSEPH	LE PORT MAIRIE	MJ
Neighbor1	4662.11636461892	1,398.66	4,199.12	5,040.37	1,508.80	1,118.42	6,331.48	3,363.92	3,124.09	875.27	2,144.80	307.91	3,644.64	1,448.94	1,509.85	19
Neighbor2	5343.17009137102	3,609.03	5,897.28	5,166.47	3,034.37	5,080.22	7,263.39	4,818.14	3,370.22	11,227.35	11,503.78	11,719.71	6,884.18	6,559.97	5,798.66	19
Neighbor3	11864.3323774626	5,027.23	6,105.57	7,573.63	3,123.53	8,016.98	7,768.91	4,830.38	6,048.40	13,703.59	12,873.12	13,098.82	10,810.84	8,105.34	8,751.53	19
Neighbor4	12420.0103989278	7,876.07	16,637.85	12,865.60	5,208.63	12,604.59	15,256.24	18,243.49	8,487.45	13,796.86	13,203.71	13,104.14	15,134.27	11,811.91	13,404.71	19
Neighbor5	14618.898015021	9,128.26	17,012.64	14,276.78	7,820.07	13,348.73	15,983.15	18,407.71	8,572.93	14,812.06	13,433.78	14,048.43	17,341.71	15,407.50	14,009.59	20

Showing 1 to 5 of 5 entries

Previous 1 Next

For the RCIGS site: MySQL 5-SAINT LEU

RCIGS 5 : SAINT LEU

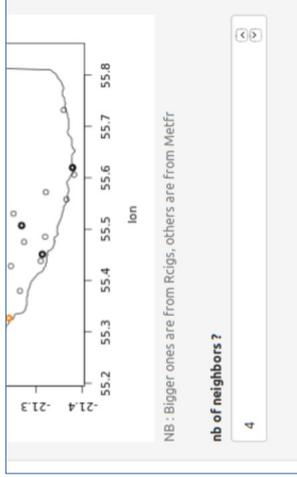


Application n°2 : onglet n°1 (bas de page)

Le choix du nombre de voisins est modifiable (*nb of neighbors?*)

Le premier tableau calcule les distances entre le site du laboratoire et les voisins les plus proches (si la distance est supérieur à 4km, elle se colore en rouge)

Le deuxième tableau présente l'altitude, longitude et latitude.



Distance to the RCIGS site selected :

neighbor	names	dist
Neighbor1	Metfr - 97413545	1508.79598217893
Neighbor2	Metfr - 97413580	3034.36550767157
Neighbor3	Metfr - 97413550	3123.5331862091
Neighbor4	Metfr - 97401540	5208.63199093451

Colored in red : METFR neighbors too far from the RCIGS site (dist > 4km). You must not select them.

Details about the selected sites :

neighbor	altitude	longitude	latitude
Neighbor0	220	55.302332	-21.200642
Neighbor1	180	55.327096	-21.241555
Neighbor2	205	55.300743	-21.187097
Neighbor3	429	55.308	-21.173
Neighbor4	565	55.328385	-21.212664

Application n°2 : onglet n°2 (haut de page)

Selon le choix du site du laboratoire et des voisins à conserver, on a ici les séries temporelles de chacun d'eux qui sont tracées (couleur par site, selon la légende de la figure)
Au dessus du graphe, *For the RCIGS site n°* : permet de sélectionner un voisin et décaler les heures par la valeur de *+Hour(s)*. Par exemple, ici, on voit que le voisin 1 semble avancer d'une heure (c'est d'ailleurs le seul cas constaté). L'option *Plot Rcigs and Metfr data separated?* fait apparaître les éléments en dessous, voir page suivante)

simple sites comparison

Between one site from RCIGS DB (a point by minute) and its n neighbors from METFR DB (a point by hour)

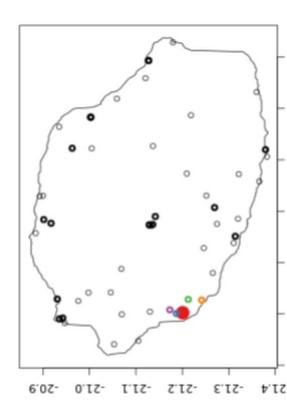
Choose a year: 2013

Choose a month: January

Filter data ?

Select hours: 0 6 20 24

For the RCIGS site: MySQL 5-SAINT LEU



RCIGS 5 : SAINT LEU

lat

55.2 55.3 55.4 55.5 55.6 55.7 55.8

20.9 21.0 21.1 21.2 21.3 21.4

All data for the month selected :



RCIGS — Neighbor1 — Neighbor2 — Neighbor3 — Neighbor4 — Neighbor0

Any grey color concerned the "Neighbor0" which is the weighted mean data from the neighbors concerned (na.rm = T)

All Data Error

Shifted data ?

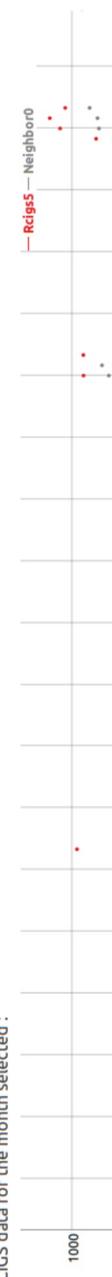
For the RCIGS site n°: Neighbor1

+Hour(s): 0

Neighbor0 est la valeur reconstruite au coordonnées du site du laboratoire selon la moyenne pondérée des voisins Météo-France.

Plot Rcigs and Metfr data separated ?

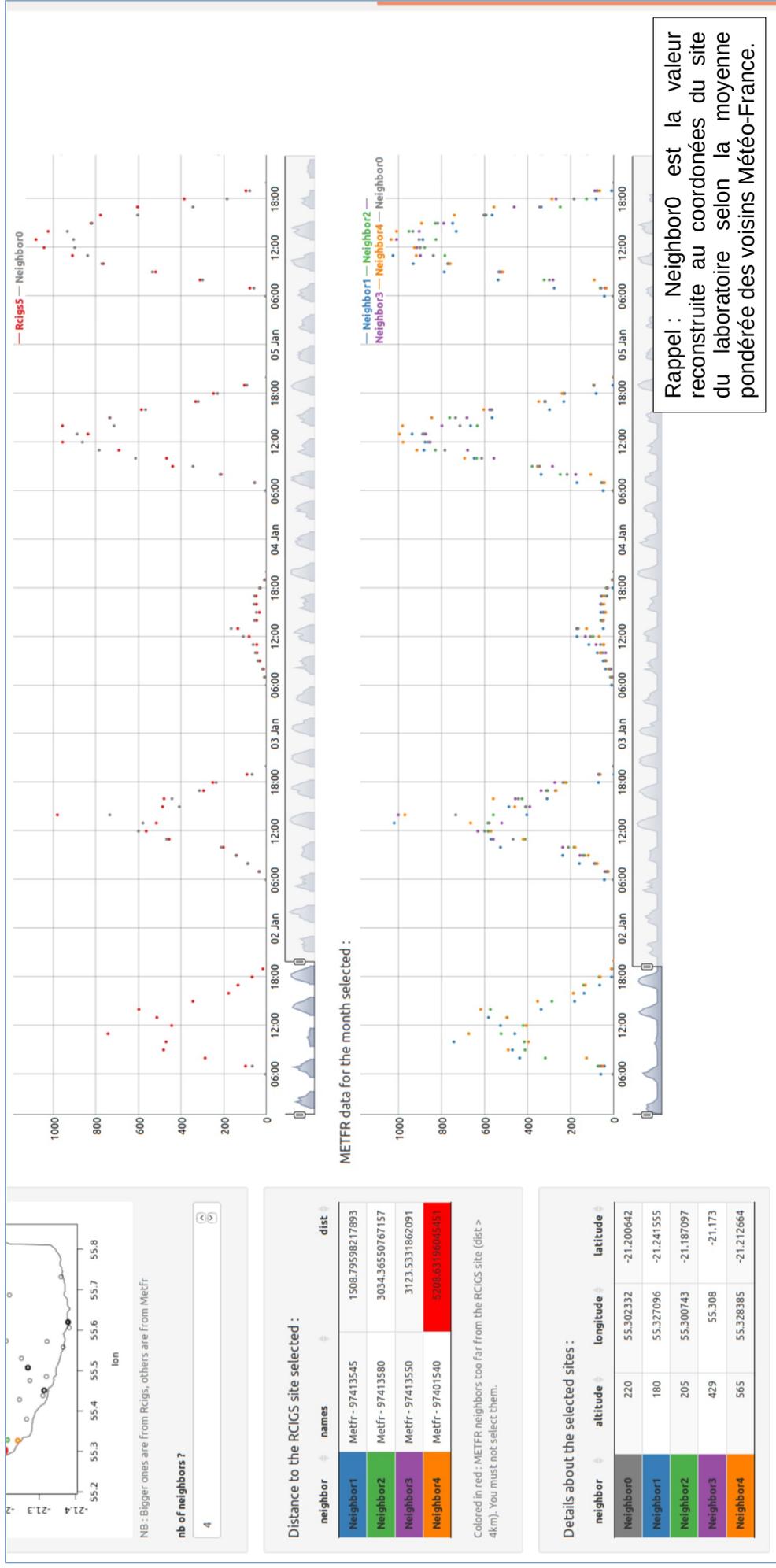
RCIGS data for the month selected :



RCIGS — Neighbor0

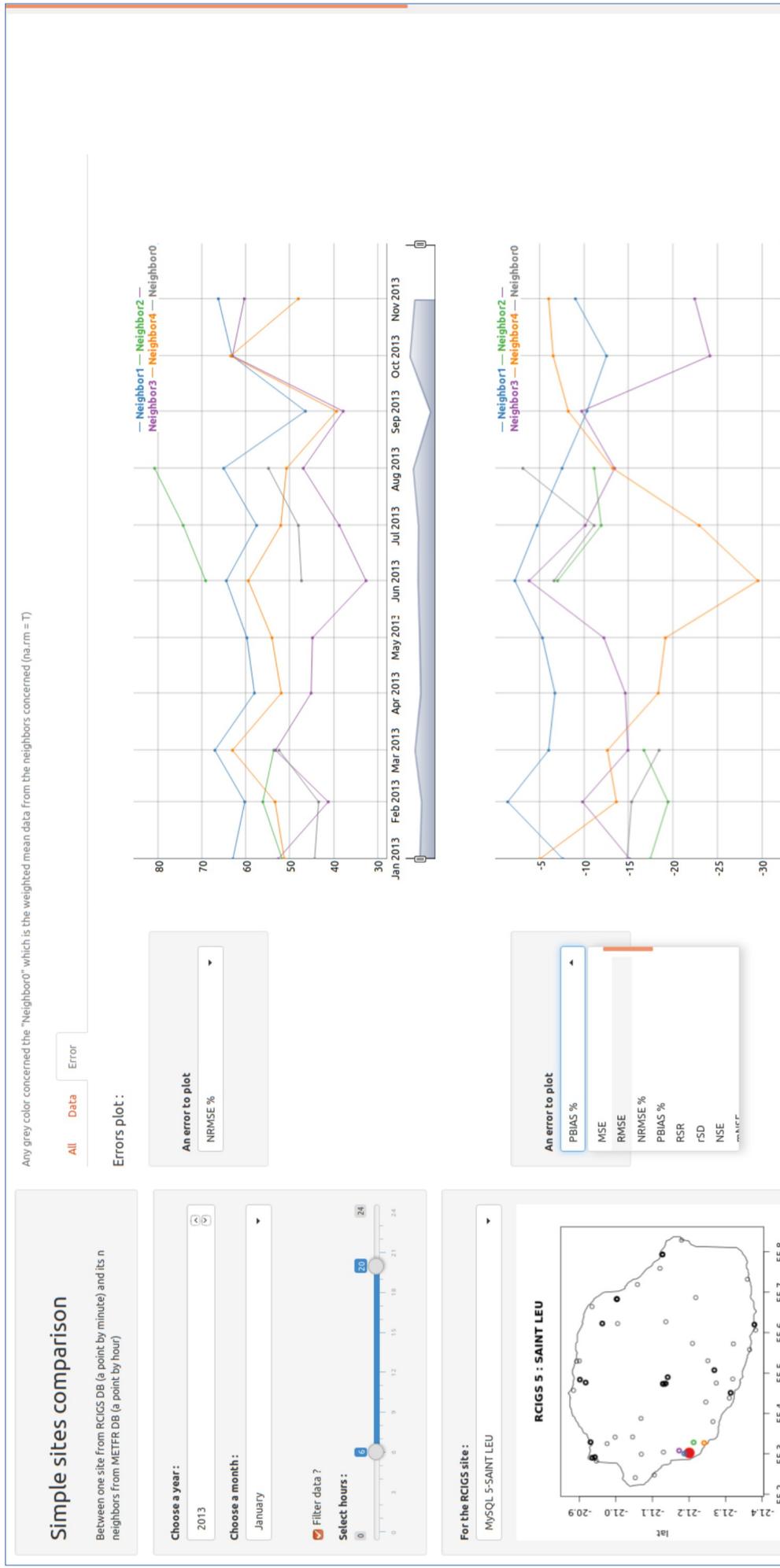
Application n°2 : onglet n°2 (bas de page)

En complément du premier graphe de l'onglet, l'option *Plot Rcigs and Metfr data separated* ? activée affiche les deux graphes visibles ici : le premier est le site du laboratoire et sont équivalent Météo-France (moyenne pondérée inversement proportionnelle à la distance).



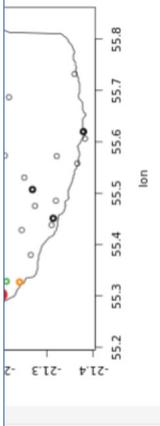
Application n°2 : onglet n°3 (haut de page)

On sélectionne deux valeurs que l'on veut afficher (An error to plot, deux fois) et les deux graphes s'actualisent selon ces choix (zoom en abscisse et ordonnée possible).



Application n°2 : onglet n°3 (milieu de page)

L'option *Compute mean only when all site data are available* permet de supprimer les mois pendant lesquels le calcul de la métrique possible pour un des voisins.
 Les valeurs des deux graphes sont accessibles dans les tableaux. Leurs colonnes sont ajustables selon le choix dans *Select errors to tab*.
 En dessous, l'option *For all months and the selected year* permet d'afficher le tableau en dessous (voir la page suivante)



NB: Bigger ones are from RCIgs, others are from Metfr

nb of neighbors ?
4



Compute mean only when all site data are available ?

Select errors to tab
 MAE RMSE NRMSE % r

For the month and for the year ?

For the selected month :

	MAE	RMSE	NRMSE %	r
Neighbor1	150.58	193.98	63	0.81
Neighbor2	98	158.21	51.8	0.89
Neighbor3	97.77	159.69	52.7	0.88
Neighbor4	95.63	156.74	51.3	0.88
Neighbor0	84.76	136.12	44.4	0.92

For the selected year :

	MAE	RMSE	NRMSE %	r
Neighbor1	134.49	175.74	60.2	0.83
Neighbor2	125.84	177.55	61.9	0.81
Neighbor3	80.04	137.02	47.1	0.9
Neighbor4	97.85	154.83	53.1	0.87
Neighbor0	90.61	129.96	45.4	0.91

For all months in the selected year ?

For all the months into the selected year :

For the RCIgs site n°:

Distance to the RCIgs site selected :

neighbor	names	dist
Neighbor1	Metfr- 97413545	1508.79598217893
Neighbor2	Metfr- 97413580	3034.36550767157
Neighbor3	Metfr- 97413550	3123.5331862091
Neighbor4	Metfr- 97401540	5208.63196045051

Colored in red : METFR neighbors too far from the RCIgs site (dist > 4km). You must not select them.

Details about the selected sites :

neighbor	altitude	longitude	latitude
Neighbor0	220	55.302332	-21.200642
Neighbor1	180	55.327096	-21.241555
Neighbor2	205	55.300743	-21.187097
Neighbor3	429	55.308	-21.173
Neighbor4	565	55.328385	-21.212664

Application n°2 : onglet n°3 (milieu de page)

Pour chaque mois, les valeurs sont ici détaillées dans le premier tableau et les statistiques des distributions sont dans le second tableau (minimum, premier quantile, etc). Le nom de chaque ligne renseigne sur le mois et le voisin que concernent la ligne (01-Neighbor0 pour le premier mois de l'année et le voisin Neighbor0). On peut changer le voisin à afficher par le champ *For the RCIGS site n°*.
(correction : RCIGS doit être remplacé par Metfr)

For the RCIGS site n°:
Neighbor0

	month	MAE	RMSE	NRMSE %	r
01-Neighbor0	1	84.76	136.12	44.4	0.92
02-Neighbor0	2	82.87	133.92	43.5	0.93
03-Neighbor0	3	96.6	142.48	52.5	0.9
04-Neighbor0	4				
05-Neighbor0	5				
06-Neighbor0	6	92.38	118.47	47.4	0.88
07-Neighbor0	7	98.38	126.2	48.1	0.89
08-Neighbor0	8	113.75	140.38	54.9	0.84
09-Neighbor0	9				
10-Neighbor0	10				
11-Neighbor0	11				
12-Neighbor0	12				

summary for all months in the selected year ?

For the RCIGS site n°:
Neighbor0

	MAE	RMSE	NRMSE %	r
Min.	82.87	118.47	43.5	0.84
1st Qu.	86.665	128.13	45.15	0.8825
Median	94.49	135.02	47.75	0.895
Mean	94.79	132.9283333333333	48.4666666666667	0.8933333333333333
3rd Qu.	97.935	139.315	51.4	0.915
Max.	113.75	142.48	54.9	0.93
NAs	6	6	6	6

Rappel : Neighbor0 est la valeur reconstruite au coordonnées du site du laboratoire selon la moyenne pondérée des voisins Météo-France.

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) **Pauline Mialhe** en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint-Denis le : **12 juillet 2018**

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de tes droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à cause un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.

