



HAL
open science

Évaluation de l'impact de l'occupation du sol sur la simulation climatique régionale (WRF) des ressources en énergie solaire et éolienne : cas de l'île de La Réunion et de Maurice

Mialiniaina Michèle Rasoloarimanana

► To cite this version:

Mialiniaina Michèle Rasoloarimanana. Évaluation de l'impact de l'occupation du sol sur la simulation climatique régionale (WRF) des ressources en énergie solaire et éolienne : cas de l'île de La Réunion et de Maurice. *Etudes de l'environnement*. 2022. dumas-03829912

HAL Id: dumas-03829912

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03829912>

Submitted on 26 Oct 2022

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.

Faculté des Lettres et des Sciences Humaines
Département de Géographie

Mémoire de Master II de Géographie
Année universitaire 2021 - 2022

Evaluation de l'impact de l'occupation du sol sur la simulation climatique régionale (WRF) des ressources en énergie solaire et éolienne

Cas de l'île de La Réunion et de Maurice

Par RASOLOARIMANANA Mialiniaina Michèle

Sous la direction de Monsieur Yao Telesphore BROU, Professeur des
universités, Université de La Réunion

Et la co-direction de Monsieur Chao TANG, IGR Modélisation Régionale
Climatique Sénior, Université de La Réunion

Soutenu le 10 Juin 2022 devant le jury composé de :

- Monsieur Yao Telesphore BROU, Professeur des Universités, Université de La Réunion
- Monsieur Chao TANG, IGR Modélisation Régionale Climatique Sénior, Université de La Réunion
- Madame Béatrice MOREL, Professeur des Universités, Université de La Réunion

Evaluation de l'impact de l'occupation du sol sur la simulation climatique régionale (WRF) des ressources en énergie solaire et éolienne

Cas de l'île de La Réunion et de Maurice

Par RASOLOARIMANANA Mialiniaina Michèle

Sous la direction de Monsieur Yao Telesphore BROU, Professeur des
universités, Université de La Réunion

Et la co-direction de Monsieur Chao TANG, IGR Modélisation Régionale
Climatique Sénior, Université de La Réunion

Soutenu le 10 Juin 2022 devant le jury composé de :

- Monsieur Yao Telesphore BROU, Professeur des Universités, Université de La Réunion
- Monsieur Chao TANG, IGR Modélisation Régionale Climatique Sénior, Université de La Réunion
- Madame Béatrice MOREL, Professeur des Universités, Université de La Réunion

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire n'aurait pu être achevé sans la grâce de Dieu qui nous a accompagné tout au long du travail. Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette étude.

- Monsieur François TAGLIONI, Directeur de la Mention Géographie au sein de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de m'avoir accepté au sein de cette mention afin d'effectuer ce Master II à l'Université de La Réunion.
- Monsieur Yao Telesphore BROU d'avoir accepté d'être mon Directeur de mémoire et aussi de m'avoir présenté le laboratoire de recherche Energy-Lab. La disponibilité et la souplesse qu'il a exprimées par ses recommandations et remarques ont été cruciales pour l'élaboration de ce mémoire. Le temps précieux qu'il ait accordé pour m'initier à la télédétection est inestimable.
- Madame Béatrice MOREL de m'avoir accueilli au sein du projet *SWIO-Energy* et de m'avoir intégré dans un organisme de recherche afin d'approfondir mes connaissances sur d'autres domaines de la géographie physique.
- Monsieur Chao TANG pour sa patience et sa gentillesse dans l'encadrement de ce travail. En effet, l'apprentissage des modèles et des différentes méthodologies de travail prenait assez de temps que sans l'aide de mon encadreur professionnel je n'aurais pas pu arriver à terme de cette étude.
- Monsieur Remy MUGENGA INEZA, Ingénieur de Recherche pour la modélisation climatique au sein de *SWIO-Energy* pour son dévouement et pour le temps qu'il a consacré à tout m'apprendre sur la simulation climatique et sur le modèle WRF. Sans son aide précieuse, mon modèle n'aurait même pas fonctionné.
- Monsieur Tina Herimino ANDRIANTSALAMA, Ingénieur base de données, pour m'avoir aidé à l'acquisition des données nécessaires pour ce travail et surtout pour m'avoir initié au logiciel python. Malgré toute sa charge de travail et son temps limité, il m'a encore aidé et voué son temps pour mon apprentissage.

Je voudrai aussi témoigner ma reconnaissance envers :

- Mes parents, mon frère et tous mes amis qui n'ont cessé de croire en moi et de me soutenir tout au long de mes études.

Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Que Dieu vous bénisse !



PREAMBULE

La forte tendance du changement climatique est déjà évidente et ma curiosité pour étudier le sujet de près m'a conduit à choisir ce thème de mémoire.

Être une nouvelle étudiante débarquant d'un pays en développement où le système éducatif n'est pas performant n'est pas toujours aussi simple. En effet, il a fallu une certaine capacité d'adaptation et une intégration avec les collègues étudiants pour pouvoir suivre le rythme et comprendre le fonctionnement de cette université qui m'était nouvelle. Le premier jour de mon arrivée à l'université, mes camarades de classe discutaient déjà de leurs mémoires de fin d'étude et m'ont demandé si j'avais déjà choisi un thème. N'ayant eu aucune idée de ce qu'ils parlaient, je me suis tout de suite renseignée et j'ai demandé quelques conseils auprès des autres étudiants. Après cela, je n'ai pas hésité à contacter mon directeur de mémoire et à lui exposer mon intérêt pour les études autour du changement climatique. En effet, antérieurement, j'avais déjà effectué une étude sur les stratégies d'adaptation des ménages ruraux face aux changements climatiques et je voulais élargir et approfondir mes connaissances sur la thématique.

Ainsi, effectuer un stage de recherche auprès du projet *SWIO-Energy* était pour moi une opportunité à saisir afin de pouvoir manipuler les données climatiques et même effectuer des simulations climatiques au niveau d'un territoire. Des compétences que jamais je n'aurai pu acquérir dans mon pays sans être professionnel dans le domaine climatique. De ce fait j'ai saisi l'occasion tout en ayant connaissance des défis qui m'attendent. Effectivement, ce sont des défis dans le sens où je n'ai pas eu de background en sciences de l'atmosphère ni en sciences de données ni en programmation. Et pourtant c'étaient des connaissances nécessaires pour l'accomplissement de l'étude. Toutefois, cela ne m'a pas empêché de cerner rapidement l'objectif et la méthodologie attendue pour le travail et d'ailleurs, une des valeurs importantes que j'ai apprise en travaillant dans *SWIO-Energy* est le sens du travail d'équipe. En effet, ce stage m'a appris l'importance de l'entraide entre les collègues et a renforcé mon sens de collaboration en équipe. Parce que, sans l'aide et la contribution de mes collègues, j'aurai eu d'énormes difficultés à assimiler rapidement le fonctionnement du modèle et l'analyse des variables climatiques. D'un autre côté, ce travail a aussi réveillé ma passion pour la télédétection et me donne même l'envie de percer encore le sujet plus tard si jamais l'occasion se présente.

RESUME

Les données de télédétection jouent un rôle considérable dans l'amélioration de la précision des prévisions du modèle numérique. Le modèle de recherche et de prévision météorologique (WRF) est utilisé dans le cadre de cette étude dont l'objectif est d'évaluer la performance du modèle et de déterminer l'impact de l'occupation du sol sur la simulation climatique régionale à La Réunion et Maurice. Différents types de classification de l'occupation du sol ont été cartographiés à partir des images provenant des satellites Landsat-8, Sentinel-2 et MODIS LST et une comparaison des données issues de MODIS LST a été réalisée avec les données MODIS déjà intégrées dans le modèle WRF. En travaillant dans le centre de calcul de Bourgogne (Ccub), le modèle a été lancé pour une simulation d'une semaine durant le mois de Décembre 2020. Ensuite, les performances des configurations WRF ont été évaluées en comparant les résultats des données simulées avec les données observées sur trois stations à La Réunion et deux stations à Maurice tout en considérant les variables climatiques. Les résultats ont montré que les données d'occupation du sol intégrées dans le modèle WRF ne donnent pas une représentation fiable de la réalité comparées aux données d'occupation du sol récemment produites. Par ailleurs, le modèle WRF peut prédire avec précision l'irradiance ($r=0,94$) et la température ($r=0,90$) dans les zones d'étude mais la précision du modèle sur la vitesse du vent est encore très limitée. Cette étude est ainsi une étape importante dans l'analyse de la sensibilité du modèle WRF sur une simulation à long terme dans la zone du Sud-Ouest de l'Océan Indien.

Mots clés : Modèle WRF, simulation climatique, télédétection, occupation du sol, variables climatiques, La Réunion, Maurice

ABSTRACT

Remote sensing data play a significant role in improving the accuracy of numerical model predictions. The Weather Research and Forecasting (WRF) model is used in this study to evaluate the performance of the model and to determine the impact of land use on the regional climate simulation in Reunion and Mauritius. Different types of land use classifications were mapped from Landsat-8, Sentinel-2, and MODIS LST images, and a comparison of the MODIS LST data with the MODIS data already integrated into the WRF model was performed. While working in the Bourgogne computing center, the model was run for a one-week simulation in December 2020. Then, the performance of the WRF configurations was evaluated by comparing the results of the simulated data with the observed data on three stations in Reunion and two stations in Mauritius while considering the climate variables. The results showed that the land use data integrated into the WRF model does not give a reliable representation of the reality compared to the recently produced land use data. Furthermore, the WRF model can accurately predict irradiance ($r=0.94$) and temperature ($r=0.90$) in the study areas but the accuracy of the model on wind speed is still very limited. This study is an important step in the analysis of the sensitivity of the WRF model on a long-term simulation in the southwestern Indian Ocean area.

Keywords: *WRF model, climate simulation, remote sensing, land use, climate variables, Reunion Island, Mauritius*

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

PREAMBULE

RESUME

ABSTRACT

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES CARTES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ACRONYMES

1 Introduction

2 Concepts et état de l'art

2.1 Définition des concepts

2.2 Etat de l'art

3 Matériels et méthodes

3.1 Cadrage de l'étude

3.2 Zones d'étude

3.3 Données utilisées

3.4 Outils

3.5 Méthodes de classification adoptées

3.6 Configuration du modèle WRF

3.7 Evaluation du modèle

4 Résultats

4.1 Classification et cartographie de l'occupation du sol

4.2 Analyse de l'impact des données d'occupation du sol dans le modèle

4.3 Evaluation de la performance du modèle climatique

5 Discussions

5.1 Cartographie de différents types de classification

5.2 Analyse des nouvelles données d'occupation du sol

5.3 Performance du modèle climatique régional

5.4 Limites et perspectives d'amélioration

6 Conclusion

7 Bibliographie

ANNEXES

TABLES DES MATIERES

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Organigramme de WRF	IV
Annexe 2: Bandes spectrales des images Landsat-8	V
Annexe 3: Bandes spectrales des images Sentinel-2	V
Annexe 4: Fichier namelist.wps	VI
Annexe 5: Fichier namelist.input.....	VII
Annexe 6: Classification supervisée des zones d'étude	IX
Annexe 7: Superficie de chaque classe pour La Réunion	XI
Annexe 8: Superficie de chaque classe pour Maurice	XII

LISTE DES CARTES

Carte 1: Localisation des zones d'étude	12
Carte 2: Domaines utilisées par le projet SWIO-Energy.....	20
Carte 3: Classification de l'occupation du sol de La Réunion sur Sentinel-2	23
Carte 4: Classification de l'occupation du sol de La Réunion sur Landsat-8.....	23
Carte 5: Mise en évidence des différentes classes de l'occupation du sol à La Réunion	24
Carte 6: Classification de l'occupation du sol de Maurice sur Landsat-8.....	25
Carte 7: Classification de l'occupation du sol de Maurice sur Sentinel-2.....	25
Carte 8: Mise en évidence des différentes classes de l'occupation du sol à Maurice	26
Carte 9: Classification de l'occupation du sol de Maurice sur MODIS	28
Carte 10: Classification de l'occupation du sol de La Réunion sur MODIS.....	28
Carte 11: Classification de l'occupation du sol de Maurice avec les données dans WRF	28
Carte 12: Classification de l'occupation du sol de La Réunion avec les données dans WRF..	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Flux de données entrant et sortant du WPS	6
Figure 2: Irradiance La Réunion.....	32
Figure 3: Irradiance Maurice	32
Figure 4: Température La Réunion	34
Figure 5: Température Maurice	34
Figure 6: Vitesse du vent La Réunion	36
Figure 7: Vitesse du vent Maurice.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Synthèse des différentes LU data	14
Tableau 2: Matrice de confusion	19
Tableau 3: Comparaison des différents types de classification.....	27
Tableau 4: Synthèse des paramètres statistiques utilisés pour l'irradiance.....	33
Tableau 5 : Synthèse des paramètres statistiques utilisés pour la température	35
Tableau 6: Synthèse des paramètres statistiques utilisés pour la vitesse du vent.....	36

LISTE DES ACRONYMES

BSRN :	<i>Baseline Surface Radiation Network</i>
CCUB :	Centre de Calcul de l'Université de Bourgogne
ECMWF:	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
GEE :	<i>Google Earth Engine</i>
IGE :	Ingénieur d'Etudes
IGPB :	<i>International Geosphere Biosphere Programme</i>
IGR :	Ingénieur de Recherche
ISODATA :	<i>Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique</i>
LE2P :	Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés
LSM :	<i>Land Surface Model</i>
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
MBE :	<i>Mean Bias Error</i>
MCG :	Modèle de Circulation Générale
MCR :	Modèle de Climat Régional
MODIS :	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NCEP :	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NDVI :	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NetCDF:	<i>Network Common Data Form</i>
PEMFC :	<i>Proton-Exchange Membrane Fuel Cells</i>
RGB :	<i>Red Green Blue</i>
RMSE :	<i>Root Mean Square Error</i>
RUC :	<i>Rapid Update Cycle</i>
SOOI :	Sud-Ouest de l'Océan Indien
SWIO- Energy:	<i>Solar and Wind Energy in the South West Indian Ocean</i>
UE:	Union Européenne
USGS :	<i>United States Geological Survey</i>
WPS	<i>WRF Processing System</i>
WRF :	<i>Weather Research Forecasting</i>
WSN :	<i>Wireless Sensors Network</i>

1 Introduction

La prédiction du climat futur est indispensable dans l'élaboration des politiques d'adaptation et d'atténuation du changement climatique (Gashaw et al., 2014). D'ailleurs, afin de construire et d'évaluer les scénarios climatiques, il existe différents types de modèles qui varient selon les frontières du système représenté et le niveau de finesse requis (Guivarch, 2017). Parmi les modèles climatiques se trouvent le Modèle de Circulation Générale (MCG) et le Modèle de Climat Régional (MCR). Si les MCG (utilisés par le GIEC (2007)) produisent une information globale à une résolution spatiale grossière, le MCR lui, travaille sur un domaine spatial plus restreint en procédant à une désagrégation dynamique des données du MCG (Cretat et al., 2012). Autrement dit, le modèle climatique régional permet de réduire l'échelle des variables climatiques à des résolutions spatiales et temporelles plus précises (Yhang et al., 2017). Le *Weather Research Forecasting* (WRF) ou encore le modèle de recherche et de prévision météorologique est l'un des MCR les plus largement utilisés grâce à sa large gamme de paramétrisations physiques et par la possibilité de pilotage à travers les champs météorologiques de divers modèles mondiaux (He et al., 2017). Ainsi, dans le cadre de cette recherche, le modèle WRF sera utilisé afin de simuler de manière réaliste les informations climatiques tout en incorporant les propriétés de la surface terrestre.

Le modèle (WRF) a déjà été appliqué en tant que MCR à des fins de recherche et d'exploitation dans de nombreuses régions du monde comme en Afrique (2015), Europe (2016), Amérique du Nord (2016) et en Asie (2017) (Teklay et al., 2019). A travers ces études, il a été montré que les performances du modèle WRF sont influencées par la sélection de schémas de paramètres physiques, notamment le modèle de surface terrestre (Jain et al., 2017) et les données sur l'occupation du sol (Cheng et al., 2013). A cet égard, (Sertel et al., 2010) ont montré qu'une représentation précise de la couverture terrestre est essentielle pour les simulations climatiques sachant que la surface terrestre contrôle la distribution de l'énergie et de l'eau. En outre, une étude dans le Nord de la Chine effectuée par (Qu et al., 2013) sur les impacts de l'urbanisation et la réduction de la superficie des terres agricoles sur la température de l'air a montré que l'urbanisation entraîne une augmentation de $0,03^{\circ}\text{C}$ dans la région. La température de l'air en surface variait ainsi en fonction des catégories d'occupation du sol. De ce fait, les données de télédétection peuvent être utilisées pour dériver des paramètres importants pour les modèles numériques afin d'améliorer la précision des prévisions du modèle.

Chaque catégorie d'occupation du sol a une propriété physique différente et cette spécificité peut modifier le bilan énergétique ainsi que les flux verticaux d'humidité et de chaleur qui déterminent le calcul des variables météorologiques (Jiménez-Estève et al., 2018). Autrement

dit, la distribution et la variation des types d'utilisation des terres jouent un rôle clé dans les changements de la circulation atmosphérique locale, des précipitations, de la température et de l'humidité (Wen et al., 2012). Etant donné que la précision des informations sur la surface terrestre affecte la performance des modèles dans la simulation du climat régional, les données sur les propriétés de la surface terrestre sont donc des données d'entrée considérables pour les modèles numériques (He et al., 2017). Cependant, jusqu'à maintenant, l'ensemble des données par défaut de l'occupation du sol utilisé dans le modèle de recherche et de prévision météorologique (WRF) est encore l'ensemble des données de l'*International Geosphere Biosphere Programme* (IGPB) générées à partir d'images satellites acquises entre 2001 et 2005. Et pourtant, cet ensemble de données contient un certain degré de fausses représentations sur l'utilisation des terres (Cheng et al., 2013). Ce qui requiert l'intégration de nouvelles données d'occupation du sol pour faire une simulation dans le modèle WRF. De plus, des simulations climatiques sur des terrains complexes tel que l'île de La Réunion nécessite une haute résolution et une représentation détaillée de la surface terrestre. D'où l'intérêt de cette étude qui consiste à utiliser différents types de données d'occupation du sol de deux îles de l'Océan Indien (La Réunion et Maurice) afin d'évaluer l'impact de ces dernières dans la simulation climatique régionale. Une problématique se pose alors : « De quelle manière évaluer l'impact des différentes catégories d'occupation du sol sur la simulation climatique régionale des ressources en énergie solaire et éolienne de l'île de La Réunion et de Maurice ? ». De cela découle les questions de recherche suivantes :

- Quelle méthode est plus pertinente pour produire les données d'occupation du sol de ces deux îles de l'Océan Indien ?
- Quelle différence y a-t-il entre les classifications intégrées dans WRF et les classifications récemment produites ?
- Quelles variables climatiques le modèle WRF peut-il prédire avec précision suite aux simulations à La Réunion et à Maurice?

Ainsi, l'objectif de la présente étude est de tester la sensibilité d'un modèle climatique régional, à savoir le modèle WRF, à différents ensembles de données d'occupation du sol afin d'évaluer les performances du modèle et d'identifier l'impact de l'occupation du sol. Pour cela, trois objectifs spécifiques sont visés :

- Classifier et cartographier les différentes données d'occupation du sol à partir de l'imagerie spatiale plus spécifiquement avec les capteurs Landsat-8, Sentinel-2 et MODIS
- Comparer la classification des données de l'occupation du sol du modèle WRF avec celles produites par imagerie

- Evaluer la performance et la sensibilité du modèle WRF en se basant sur les variables climatiques choisies

Les résultats attendus de l'étude couvriront trois grands aspects :

- Une classification et une cartographie de l'occupation du sol de La Réunion et de Maurice seront réalisées par télédétection
- Les impacts des données d'occupation du sol récemment produites seront étudiés
- La performance et la sensibilité du modèle climatique WRF seront évaluées

En outre, la télédétection spatiale permet d'observer de façon continue la surface de la terre afin de mieux comprendre les causes de la modification de chaque catégorie d'occupation du sol et ses conséquences sur l'environnement (Diédhiou et al., 2020). En effet, les cartes d'occupation du sol servent d'outils d'aide à la décision surtout en matière de gestion de l'écosystème et de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la surface terrestre. Cependant, plusieurs approches méthodologiques existent pour produire ces cartes à partir d'images satellites mais l'utilisation d'un outil *open source* et reproductible pour les autres dans le futur est primordial dans le cadre de cette étude. Ce qui amène à citer les trois hypothèses suivantes :

- La classification supervisée de l'occupation du sol de La Réunion et de Maurice à partir des images Sentinel-2 est une méthode pertinente pour produire les cartes d'occupation du sol de ces îles.
- Les données de l'occupation du sol récemment produites reflètent mieux la réalité par rapport aux anciennes données déjà intégrées dans WRF.
- L'analyse des paramètres climatiques tels que l'irradiance, la température et la vitesse du vent est plus précise sur toutes les sorties du modèle WRF.

La géographie, aussi appelée l'étude de l'espace, de son organisation et de son fonctionnement (Gumuchian & Marois, 2000) est également une science comportant plusieurs branches à savoir la géographie physique, biologique, humaine, astronomique et mathématique. Cette étude touchera particulièrement le domaine de la géographie physique (la climatologie) et la géographie mathématique (la cartographie et la topographie) dans le sens où les deux premiers résultats se basent sur une analyse spatiale des territoires réunionnais et mauriciens, et le troisième concerne la simulation climatique de ces deux territoires. Cette étude se subdivise en quatre parties bien distinctes dont : (i) les concepts et état de l'art déterminant les idées directrices de l'étude ; (ii) les matériels et méthodes qui décrivent tous les outils et démarches de raisonnement nécessaire pour la mise en œuvre de l'étude ; (iii) les résultats cartographiant les différentes occupation du sol produites et analysant les variables climatiques issus du modèle WRF ; et enfin (iv) les discussions confrontant les résultats obtenus par rapport à d'autres études, ainsi que les perspectives de l'étude.

2 Concepts et état de l'art

2.1 Définition des concepts

Nous nous limiterons ici aux concepts les plus importants utilisés dans ce travail.

2.1.1 Imagerie spatiale

Etant une technique d'observation à distance, l'imagerie spatiale consiste à la prise d'images depuis l'espace pour déterminer les propriétés des objets observés à partir du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi. La base de l'imagerie spatiale est la transformation du rayonnement lumineux en image numérique grâce à l'utilisation des satellites artificiels. Intégrée dans le domaine de la télédétection, l'imagerie spatiale est surtout appliquée pour la cartographie, la météorologie, la reconnaissance militaire, la gestion des productions agricoles, l'étude de la Terre et des catastrophes naturelles à des fins scientifiques¹. En outre, il est important de noter qu'en imagerie spatiale, nous avons la télédétection passive et d'images optiques et la télédétection active et d'images radar. Les images optiques proviennent des ondes émises par le soleil puis réfléchies par la surface de la Terre et enregistrées par un capteur placé sur un satellite. Tandis que les images radar sont obtenus à partir des ondes émises par un émetteur artificiel placé sur un satellite puis réfléchies par la surface de la Terre (Li et al., 2018).

2.1.2 Occupation du sol

L'occupation des sols est un paramètre très important dans les modèles numériques atmosphériques (Li et al., 2018). Elle se définit comme une occupation biophysique observée de la surface terrestre (Di Gregorio, Jansen, 2000). Elle est dite observée dans le sens où elle est scrutée par différentes sources d'observation situées à une distance de la surface de la terre. Pouvant être modifiée par des processus naturels ou anthropiques, l'occupation du sol permet la connaissance scientifique des différents états dynamiques des écosystèmes, de la gestion des ressources naturelles et l'aménagement du territoire. Elle comprend plusieurs catégories biophysiques : les zones de végétation, les sols nus, les surfaces dures, les surfaces humides et les plans d'eau (Eurostat, 2001). Cependant, il ne faut pas confondre occupation et utilisation du sol. Les données d'occupation du sol documentent la proportion d'une région couverte par les catégories biophysiques citées ci-dessus. L'utilisation du sol montre comment les gens utilisent le paysage - que ce soit pour le développement, la conservation ou des utilisations mixtes. De plus, l'occupation du sol peut être déterminée en analysant les images satellites et aériennes tandis que l'utilisation du sol ne peut être déterminée à partir d'images satellites.

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie_spatiale consulté le 14 Mai 2022

2.1.3 Modèle Climatique Régional

Les modèles climatiques sont des outils de recherche pour l'étude et la simulation du climat, ainsi qu'à des fins opérationnelles, notamment pour les prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles (GIEC, 2013). L'objectif d'un modèle climatique est de représenter la réalité le plus fidèlement possible. Il tente de traduire les forces qui induisent les mouvements atmosphériques, océaniques ou terrestres. Pour ce faire, le modèle utilise différentes variables climatiques telles que le vent, la température, le rayonnement et l'humidité et les fait évoluer en résolvant des équations mathématiques. Cependant, il est important de différencier le Modèle de Circulation Globale (MCG) avec le Modèle Climatique Régionale (MCR). Grâce au MCG, nous pouvons obtenir les températures de surface océaniques, l'humidité ainsi que la température du sol. Le MCR, lui, permet d'avoir les états de surface continentale (type de sol, occupation du sol, topographie) (Cretat et al., 2012). Sachant que le MCR ne couvre qu'un domaine limité, les valeurs à leurs limites doivent être spécifiées explicitement par les résultats d'un MCG plus grossier. Autrement dit, le MCR régionalise les simulations MCG pour modéliser la variabilité climatique avec des raffinements régionaux.

2.1.4 Weather Research Forecasting

Le modèle de recherche et de prévision météorologiques (WRF) est l'un des modèles climatiques régionaux utilisé pour la réduction dynamique des variables climatiques à des échelles spatiales et temporelles plus fines (Teklay et al., 2019). Il est utilisé dans 82 pays, notamment dans la prévision des cyclones, de la qualité de l'air ou encore dans la prévision climatique régionale (Bonney et al., 2010). L'objectif du modèle est de résoudre les équations de la dynamique assurant la conservation et d'implémenter les principaux processus physiques en lien avec le climat comme : l'interaction eau, sol, végétation et pôle urbain avec les basses couches de l'atmosphère (Skamarock et al., 2008).

Le modèle WRF comprend le système de prétraitement (WPS), le modèle WRF et les systèmes d'assimilation de données (WRFDA) et de post-traitement (Annexe1). Le WPS contient les données initiales utilisées pour définir le domaine de simulation, interpoler les données terrestres (y compris la végétation au sol, le terrain, le type de sol, l'utilisation des terres, etc.) et interpoler horizontalement les données initiales dans les domaines de simulation (Li et al., 2018). La fonction du système de prétraitement du WRF (WPS) est de définir la grille du WRF, de générer des informations sur les cartes, les élévations et les terrains pour le WRF, de prendre des analyses/prévisions en données réelles d'un autre modèle et d'interpoler les données sur la grille du WRF. La sortie standard de WPS, réel, et le modèle WRF est en format NetCDF. Le

fonctionnement du programme lors d'une exécution typique du modèle est décrit par la figure ci-dessous (Skamarock et al., 2021).

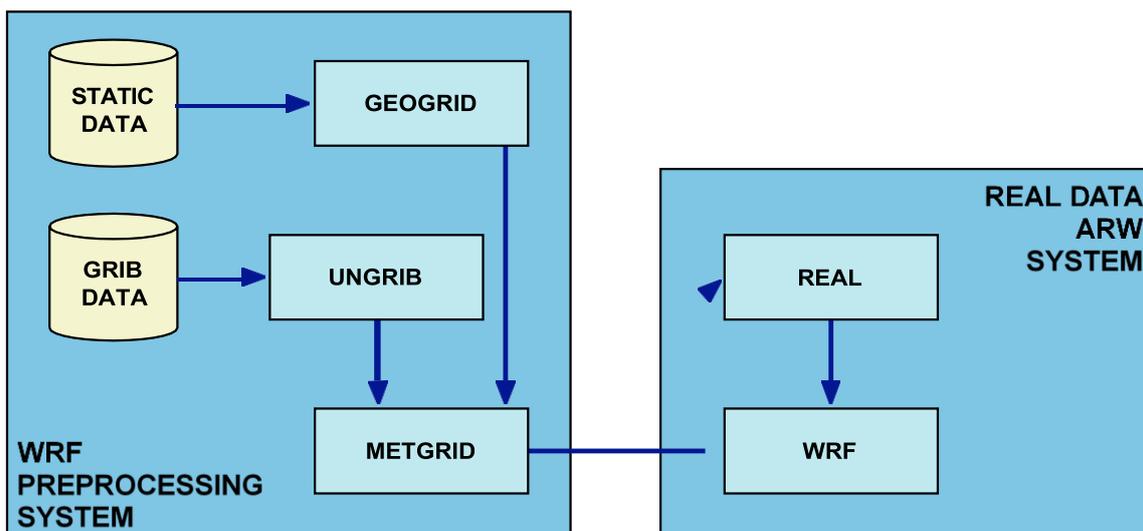


Figure 1: Flux de données entrant et sortant du WPS

Ainsi, il est montré que la première étape de WPS est la définition de la grille physique et l'interpolation des champs statiques dans le domaine. Ensuite une analyse externe est traitée par le décodeur GRIB pour diagnostiquer les champs requis et reformater les données GRIB dans un format interne.

2.1.5 Irradiance Horizontale Globale (GHI)

L'une des variables utilisées pour évaluer la performance du modèle climatique dans cette étude est le GHI ou encore l'irradiance horizontale globale (GHI). Le rayonnement atteignant la surface de la terre peut être représenté de plusieurs manières différentes. C'est la quantité totale de rayonnement de courte longueur d'onde reçue du ciel tombant sur une surface horizontale par rapport à la surface de la terre². Le GHI peut être mesuré avec une variété d'instruments. L'instrument le plus communément utilisé pour mesurer le GHI est le pyranomètre, dont l'angle de vue est hémisphérique (180°). La caractéristique d'un pyranomètre est une véritable réponse en cosinus à l'angle incident, c'est-à-dire que la réponse du pyranomètre à un faisceau de lumière est proportionnelle au cosinus de l'angle incident du faisceau. La plupart des pyranomètres utilisent un capteur thermopile pour détecter la lumière incidente. Les pyranomètres à thermopile ont une réponse spectrale plate à la lumière entrante, tandis que les pyranomètres à base de PV ont une sensibilité spectrale en fonction des matériaux PV utilisés dans le capteur. Les pyranomètres utilisant un capteur PV répondent presque instantanément aux changements

²<https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/irradiance-and-insolation-2/global-horizontal-irradiance/> consulté le 23 Mai 2022

d'irradiation, contrairement à leurs homologues à thermopile qui prennent entre 1 seconde et 15 secondes pour atteindre une réponse complète à un changement d'irradiation. Le GHI peut également être mesuré à l'aide d'une cellule de référence photovoltaïque, qui aura une sensibilité spectrale et ne présentera généralement pas une véritable réponse en cosinus. Cette valeur présente un intérêt particulier pour les installations photovoltaïques et comprend à la fois l'irradiance normale directe (DNI) et l'irradiance horizontale diffuse (DHI). Si le GHI ne peut pas être mesuré directement, il peut être calculé à partir de l'éclairement énergétique normal direct (DNI) et de l'éclairement énergétique horizontal diffus (DHI) en utilisant l'équation suivante :

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos(\theta_z)$$

où θ_z est l'angle de zénith solaire (Vignola, 2012).

2.1.6 Vitesse du vent

La vitesse du vent est également une variable utilisée pour l'évaluation du modèle WRF dans cette étude. C'est une quantité atmosphérique générée par le déplacement de l'air à cause des changements de température. Elle se mesure avec un anémomètre. Le flux d'air dans l'atmosphère a à la fois une vitesse et une direction. Ceci est représenté mathématiquement par un vecteur. Pour les composants du vent, U est le vecteur unitaire parallèle à l'axe x et le vecteur V est celui parallèle à l'axe y. Ainsi, si un vent U négatif vient de l'Est et un vent U positif vient de l'Ouest ; un vent V positif vient du Sud et un vent V négatif vient du Nord. Il est à savoir que les données sur le vent provenant des modèles numériques sont toujours présentées sous la forme de la magnitude des vecteurs composants U et V. Tel est le cas pour cette étude car les données fournies dans WRF sont les vecteurs U10 et V10 sous forme de champs scalaires. Pour obtenir la valeur de la vitesse du vent, le théorème de Pythagore est utilisé :

$$WS = \sqrt{(U^2 + V^2)}$$

2.1.7 Température à 2 m

Cette variable, comme son nom l'indique, présente la prévision de la température dans le modèle WRF à 2 m de la surface du sol. C'est un paramètre qui varie selon les conditions atmosphériques (vent, pluie, ensoleillement) et dont l'instrument de mesure est le thermomètre. Dans le modèle WRF, l'unité de mesure de la température est le Kelvin. Ainsi afin de comparer ces données avec celles des stations, une transformation des données en degré Celsius est nécessaire en utilisant la formule suivante :

$$^{\circ}C = K - 273,15$$

Où $^{\circ}C$ est l'unité de la température en Celsius et K celui en Kelvin.

2.2 Etat de l'art

2.2.1 Application des modèles de surface terrestre sur WRF

De nombreuses études se sont concentrées sur la sélection de modèles de surface terrestre (LSM) appropriés pour la simulation climatique au niveau méso-échelle (Teklay et al., 2019). D'une part (Zu-Heng et al., 2014) ont évalué les LSM Noah, Pleim-Xiu et Noah-MP pour simuler un événement de sécheresse grave dans le sud-ouest de la Chine. En général, toutes les simulations ont reproduit de manière raisonnable les variations spatiales et temporelles des précipitations, mais un biais significatif a été constaté pour la configuration spatiale des précipitations simulées. Les simulations WRF avec les schémas de surface terrestre de la série Noah-MP ont donné des résultats légèrement meilleurs que les simulations WRF avec les autres schémas de surface terrestre dans la reproduction des événements de sécheresse sévère. Il a été également constaté que les simulations WRF avec Noah-MP reproduisaient bien les variations spatiales et temporelles des précipitations.

D'autre part, (Lee et al., 2016) ont rapporté que Noah LSM a permis de meilleures simulations des variables climatiques observées par rapport à la diffusion thermique (TD), au cycle de mise à jour rapide (RUC) et aux LSM Pleim-Xiu dans une étude de cas en Corée du Sud. Pour une meilleure représentation de la zone d'étude, les chercheurs ont utilisé des données topographiques à haute résolution avec une résolution spatiale de 30m. La simulation de leur modèle couvrait une période de quatre (4) jours en automne, ce qui a déjà généré le résultat de l'impact du LSM sur la simulation météorologique. Ainsi, un meilleur accord entre l'observation et la simulation a été trouvé dans le cas du WRF avec le LSM Noah. Tandis que les modèles WRF avec LSM Pleim-Xiu (WRFPX) et WRF avec LSM TD (WRFTD) n'ont pas donné de résultats suffisants pour la simulation de flux de chaleur. Les deux ont surestimé le flux de chaleur sensible et sous-estimé les flux de chaleur latente pendant la journée.

En outre, le Pleim-Xiu LSM a simulé une meilleure température et vitesse du vent sur la région du corridor industriel Delhi-Mumbai en Inde (Jain et al., 2017), tandis que RUC LSM était meilleur pour la simulation des précipitations dans les perturbations occidentales de l'Inde (Thomas et al., 2014). De plus, les modèles d'humidité relative et de pression moyenne au niveau de la mer sont relativement bien rendus dans les simulations de modèles lorsque le schéma RUC est utilisé. Cette divergence de recommandation LSM dans les études ci-dessus indique que la performance de LSM dépend fortement de la région de simulation, de la variable climatique étudiée, de la saisonnalité et des considérations de divers paramètres physiques.

2.2.2 Evaluation de la performance d'un modèle climatique

La modification ou la mise à jour des données d'occupation du sol à l'intérieur d'un modèle climatique a déjà été initié dans diverses études. Tel est le cas de l'étude de (Schicker et al., 2016) qui s'est concentrée sur l'influence de l'ensemble des données d'occupation du sol mises à jour sur la simulation WRF dans des régions Autrichiennes. Les auteurs ont trouvé que les moyennes de température à 2 m (temporelle et spatiale) ne diffèrent que de 0,4 K entre le modèle de la simulation de référence et le modèle utilisant les données dont la superficie de la zone urbaine est modifiée. Cependant, des écarts ont été constatés lorsque la modification passe de « zone cultivée » à « zone urbaine » et la différence de température moyenne temporelle à 2 m par rapport au modèle simulé est passée de l'ordre de 1K. Les auteurs ont aussi considéré un autre paramètre qui est le flux de surface. Ils ont conclu que la moyenne spatiale et temporelle du flux de chaleur sensible est plus grande en modèle simulé à l'ordre de 6 W/m² par rapport au modèle de référence. Cela se reflète dans le biais de température montrant la pertinence de données précises sur l'occupation du sol. L'autre paramètre étudié a aussi été la température du sol. Les températures nocturnes du sol sont en moyenne de 3,5K trop basses par rapport aux données d'observations alors que les températures diurnes diffèrent de 6K.

En outre, d'autres auteurs ont aussi étudié l'impact de la qualité des données d'occupation du sol sur la simulation climatique régionale en Turquie (Sertel et al., 2010) afin d'évaluer le modèle WRF. Ils ont utilisé des images Landsat (ETM+) à partir d'images collectées entre 2001 et 2005 en essayant de comparer les données d'occupation du sol issues de ces images avec celles déjà intégrées par défaut dans WRF. Les résultats ont montré que les données de WRF ne représentent pas dans les classes de la zone urbaine de trois grandes villes de la zone étudiée et qu'il y avait aussi un problème de mélange spectral entre les différentes classes comme les terres cultivées ; les zones urbaines et les forêts. Suite à leur simulation numérique, les valeurs RMSE pour les nouvelles données d'occupation du sol sont comprises entre 2,1 et 3,6°C alors que celles du modèle WRF est compris entre 2,7 et 5,7°C. Par ailleurs, les valeurs de température minimale obtenues à partir des données de WRF et les nouvelles données de couverture du sol sont similaires les unes aux autres, mais de meilleures températures maximales et moyennes ont été obtenues avec les données de couverture du sol améliorées. Ils ont ainsi conclu que les nouvelles données de couverture terrestre ont amélioré les résultats des simulations numériques, en particulier pour les températures minimales, maximales et moyennes, et ont souligné l'importance d'une couverture terrestre précise pour la modélisation du climat régional.

3 Matériels et méthodes

3.1 Cadrage de l'étude



Cette étude a été menée au sein du laboratoire Energy-Lab dans le cadre d'un stage de mémoire de Master II. Le laboratoire aussi nommé Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés (LE2P) a été créé en 2006 au sein de la Faculté des Sciences et Technologie de l'Université de La Réunion. Cet organisme est axé principalement sur l'optimisation de systèmes énergétiques solaires ou intermittents intelligents qui s'articule autour de trois Opérations Scientifiques (OS). Il est à noter que ces dernières sont en relation avec des projets menés par la Région Réunion, les collectivités et l'Etat au sein de la Stratégie Régionale de l'Innovation.

- L'OS1 concerne le gisement solaire, plus particulièrement sur la variabilité à La Réunion et en zone tropicale, métrologie et modélisation.
- Quant à l'OS2, il consiste au stockage et la conversion de l'énergie (hydrogène énergie).
- Pour l'OS3, il est axé sur l'optimisation énergétique des réseaux de capteurs WSN.

Il est à savoir que l'étude effectuée dans le cadre de ce stage se situe dans l'Opération Scientifique 1, plus précisément dans le projet *SWIO-Energy*. C'est un projet de coopération régionale s'inscrivant dans l'effort actuel en matière d'adaptation au changement climatique et d'intégration de ses effets dans le secteur de l'énergie. Le laboratoire ENERGY-lab. / LE2P, Université de La Réunion avec le Département de Physique, Université de Maurice ainsi que le laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique, Université des Mascareignes, Maurice sont les trois (3) principales structures impliquées dans le projet SWIO.

Ce projet dure trois (3) ans et il se veut de mettre en place une approche analytique innovante pour mener des analyses climatiques sur la variabilité du gisement solaire et éolien dans la zone du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) à différentes échelles de temps. Le principal objectif de *SWIO* est d'estimer l'impact du changement climatique sur les ressources énergétiques solaire et éolienne dans la zone SOOI (particulièrement à La Réunion et Maurice), par des simulations climatiques régionales à très haute résolution spatiale issues du modèle régional de climat WRF (*Weather Research and Forecasting*). Les résultats issus des recherches du projet sont indispensables pour les différents décideurs et acteurs des filières solaire et éolienne sachant qu'elles servent pour l'élaboration d'outils pour la gestion de risques des énergies renouvelables et ainsi que pour l'indépendance énergétique de La Réunion et de Maurice.

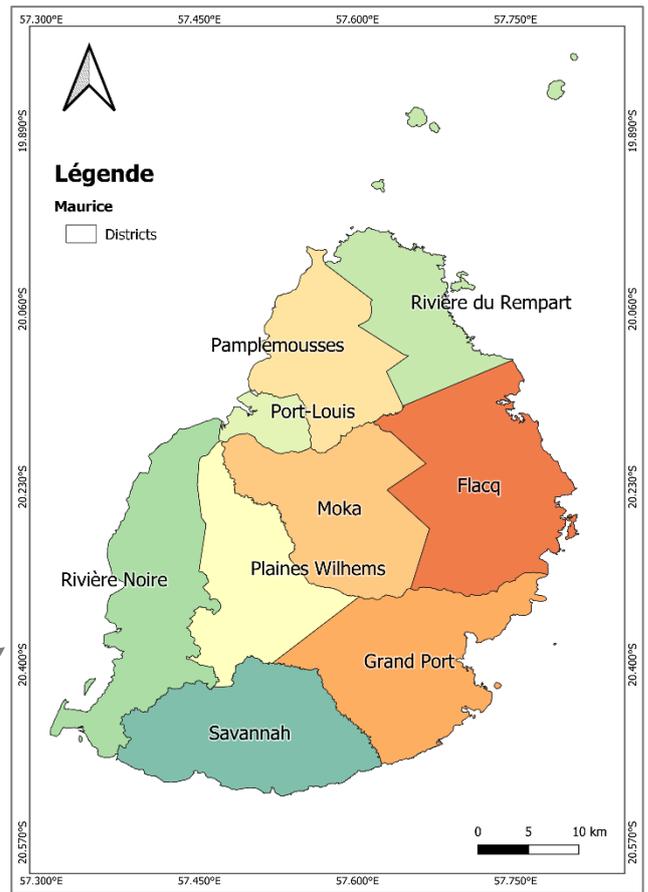
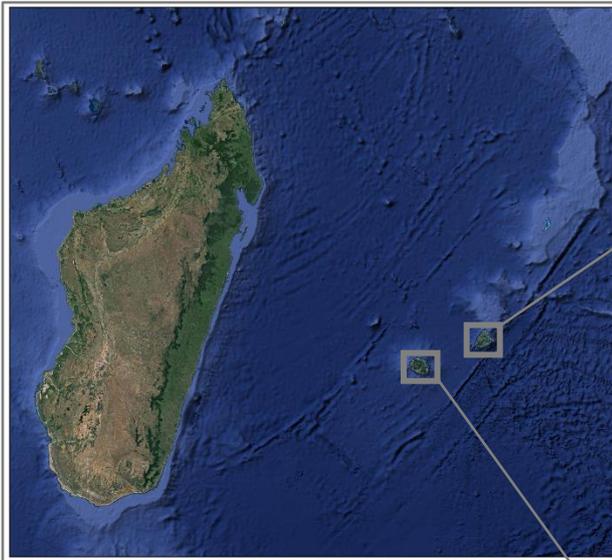
3.2 Zones d'étude

Localisées dans la partie Sud-Ouest de l'Océan Indien, l'île de La Réunion et de Maurice constituent les principales zones d'intérêt de l'étude.

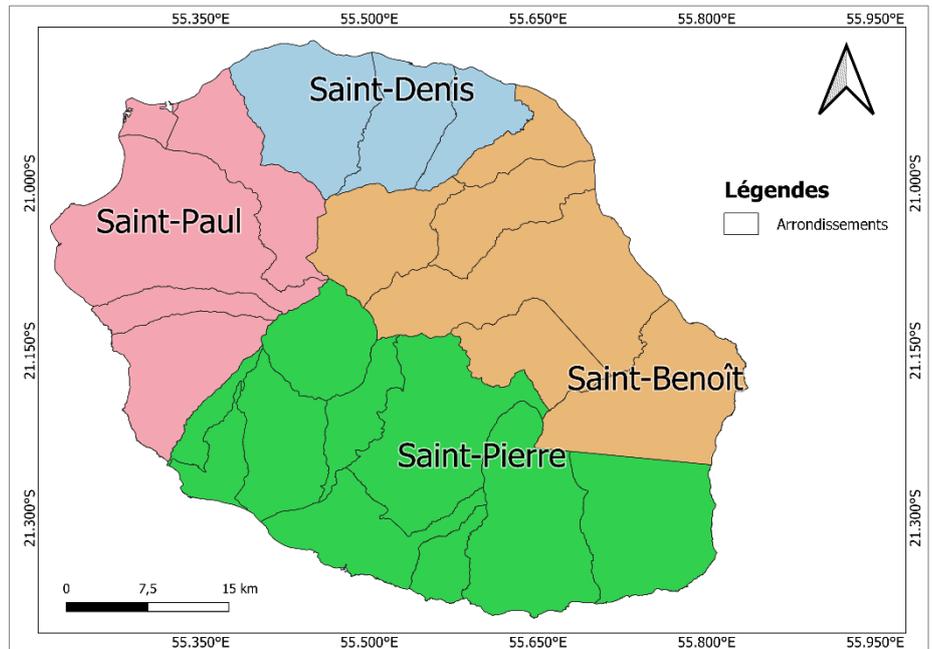
D'une part, faisant partie de l'archipel des Mascareignes, La Réunion est située à 172 km au Sud-Ouest de l'île Maurice, plus précisément à 55° 32' de longitude Est et 21° 08' de latitude Sud. Elle ne couvre que 2512 km² dont 40% de la superficie de l'île se trouve au-dessus de 1000 mètres d'altitude. Il faut souligner que le point culminant de l'île, le Piton des Neiges, est le plus haut sommet de l'Océan Indien (3069m). L'île se caractérise par un climat tropical humide où les vents d'alizés soufflent d'Est en Ouest. Il existe deux saisons bien marquées à La Réunion : la saison des pluies entre Janvier et Mars (température en dessous de 1000 m entre 21 et 31°C) durant laquelle les précipitations sont importantes et la saison sèche, entre le mois de Mai et Novembre (température en dessous de 1000 m entre 17 et 28°C). Dans la partie Est de l'île, surtout sur les flancs du volcan, les précipitations restent importantes durant la saison sèche. Le territoire a ainsi une variation climatique relativement intense et des interactions terre-atmosphère.

D'autre part, l'île Maurice se trouve au cœur de l'archipel des Mascareignes avec des coordonnées de 20°30' de latitude Sud et 57°55' de longitude Est. Il est à noter que le territoire mauricien comprend l'île principale (« l'île Maurice »), l'île Rodrigues et deux autres petites îles très éloignées qui sont Agaléga et Saint-Brandon. Le territoire s'étend sur une superficie totale de 2040 km² (dont la superficie de l'île principale est de 1865 km², l'île Rodrigues est de 104 km² et les autres petites îles lointaines composant le territoire s'étendent sur 71 km²). Par ailleurs, l'île Maurice est également à caractère volcanique, entourée par des chaînes de montagnes allant jusqu'à 800 m d'altitude. Le piton de la Petite Rivière Noire, s'élevant à 828m, est le point culminant de l'île. Maurice est caractérisé par un récif corallien entourant l'île et protégeant les lagons et les plages du territoire. Il est à savoir que 49 îles et îlots inhabités se situent sur les côtes de l'île et dont quelques-uns d'entre eux servent de réserves naturelles pour la protection des espèces menacées. Se trouvant à proximité du tropique du Capricorne, le territoire présente un climat tropical avec deux (2) saisons bien distinctes : un été chaud et humide de Novembre à Avril (température moyenne : 24,7°C) et un hiver frais et sec de Juin à Septembre (température moyenne de 20,4°C). Du fait de la divergence du relief au niveau de l'île, les précipitations varient de 900 mm dans les zones côtières à 1500 mm au niveau du plateau central.

Source : BD TOPO 2021
Projection : ESPG :4326-WGS 84
Réalisation : Michèle M RASOLOARIMANANA,2022



Ile Maurice



Ile de La Réunion

Carte 1: Localisation des zones d'étude

3.3 Données utilisées

3.3.1 Données pour la classification de l'occupation du sol

3.3.1.1 *Sentinel-2*

Les satellites Sentinel-2 ont été développés dans le cadre du programme *Copernicus* par l'Agence spatiale européenne en 2015. Ces satellites fournissent une imagerie optique haute résolution permettant l'observation des sols et la prévention à des catastrophes naturelles. L'objectif de Sentinel-2 étant de suivre à haute résolution l'occupation des sols, l'évolution de la végétation ainsi que l'impact du réchauffement climatique avec une haute fréquence d'observations. Dans le cadre de cette étude, les images provenant du satellite Sentinel-2 MSI : instrument multispectral, niveau 1C ont été utilisées pour procéder à la classification de l'occupation du sol. Le produit Niveau-1C résulte de l'utilisation d'un modèle numérique d'élévation (MNE) pour projeter l'image dans une géométrie cartographique. Avec une fréquence de revisite globale de 5 jours, le satellite Sentinel-2 comporte 13 bandes spectrales dont les bandes RGB et NIR sont à 10m de résolution. Les différentes bandes spectrales composantes les images du satellite sont présentées dans l'Annexe2.

3.3.1.2 *Landsat-8*

Les autres images utilisées proviennent du programme Landsat qui est une série de missions satellites d'observation de la Terre gérées conjointement par la NASA et l'US Geological Survey (USGS). Les satellites Landsat ont la résolution au sol et les bandes spectrales optimales pour suivre efficacement l'occupation du sol et documenter les changements terrestres dus au changement climatique, à l'urbanisation, à la sécheresse, aux incendies de forêt ainsi qu'aux changements de la biomasse (évaluations du carbone). Landsat représente la plus longue collection au monde acquise en continu de données de télédétection terrestre à résolution moyenne basées dans l'espace³.

Sachant que les données à manipuler doivent être les plus récentes possibles, le choix des images téléchargées sur le site de l'USGS s'est reposé sur les images provenant du satellite Landsat-8 (disponible à partir de l'année 2013). Avec une revisite systématique de 16 jours, les images Landsat 8 ont des résolutions spatiales de 30 mètres composées de onze (11) bandes spectrales dont 9 visibles et 2 thermiques (Annexe3). Afin de réduire au maximum la présence des nuages, les images provenant de Landsat 8 Collection 2 Tier 1 calibré *Top of Atmosphere* (TOA) ont été choisies pour une période de trois ans entre 2018 et 2021.

³ <https://www.usgs.gov/faqs/what-landsat-satellite-program-and-why-it-important>

3.3.1.3 MODIS

Les données MODIS proviennent également du programme de la NASA spécifiquement de deux satellites Terra et Aqua. Elles sont destinées à l'observation des sols, biosphère, atmosphère et océans. Les satellites de MODIS acquièrent des données dans 36 bandes spectrales tout en observant la surface de la terre tous les 1 à 2 jours. Les images provenant de MODIS sont de type raster téléchargées mensuellement (tous les mois de l'année 2020) sur le site de *Climate Engine*. Les données sont MODIS Terra/ Aqua 16-Day (NDVI 500m), MODIS Terra 16-Day (NDVI 250m) et MODIS Terra 8-Day (LST 1km).

Tableau 1: Synthèse des différentes LU data

Satellite	Sentinel-2	Landsat-8	MODIS
Source	Copernicus	USGS	Climate Engine
Résolution spatiale (m)	10	30	250 à 1000
Nombre de bandes spectrales	13	11	36
Date de disponibilité des images	2015	2013	2020
Fréquence de prise des images (jour)	5	16	16
Type de classification utilisé	Supervisée	Supervisée	Non-supervisée
Nombre de classes obtenues	6	6	4

3.3.2 Données utilisées pour la simulation climatique

3.3.2.1 Données ERA5

Pour effectuer la simulation du modèle climatique régional, les premières données input à utiliser sont les données issues d'ERA5. Cette dernière est la cinquième génération de réanalyse produite par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF), dans le cadre du service du *Copernicus Climate Change*. Publié progressivement depuis 2017, ERA5 est déjà utilisée pour des applications énergétiques et présente de grandes améliorations par rapport aux réanalyses précédentes (Olauson, 2018). La réanalyse combine les données du modèle avec les observations du monde entier en un ensemble de données globalement complet et cohérent, en utilisant les lois de la physique (C3S, 2017). ERA5 fournit des estimations horaires pour un grand nombre de quantités atmosphériques, d'ondes océaniques et de surfaces terrestres. ERA5 est mis à jour quotidiennement avec une latence d'environ 5 jours.

Les données téléchargées sont les données sur les niveaux de pression sachant que le téléchargement de ces dernières est plus rapide sur ERA5. WRF requiert un certain nombre de champ d'entrée comme les données 3D (température, composantes U et V du vent, hauteur géo potentielle, humidité relative et 2D (pression de surface, pression au niveau moyen de la mer,

température en surface (SST), température à 2 mètres, humidité relative ou spécifique à 2 mètres, composantes U et V du vent à 10 mètres et données sur le sol (température et humidité et hauteur du sol)).

3.3.2.2 Données MODIS dans WRF

Par défaut, le programme Geogrid dans WPS interpole les catégories d'occupation du sol à partir des données « *Noah-modified 21-category IGBP-MODIS landuse* ». MODIS IGBP est une donnée d'utilisation des sols en 20 catégories basée sur les données satellitaires MODIS recueillies entre 2001 et 2005. Dérivé des observations des données Terra et Aqua, les données MODIS de base comportent 20 classes de couverture terrestre définies par le Programme International Géosphère Biosphère (IGBP). Les données MODIS IGBP 21-catégories de sol proviennent de l'Université de Boston, avec quelques modifications apportées par NCEP. Ce dernier a ajouté de nouvelles catégories basées sur d'autres ensembles de données, et a réaffecté certaines catégories à d'autres indices. Les occupations du sol intégrées dans WRF-4.2 sont les suivantes : forêt d'aiguilles à feuilles persistantes, forêt de feuillus à feuilles persistantes, forêt d'aiguilles à feuilles caduques, Forêt de feuillus à feuilles caduques, forêts mixtes, arbustes fermés, arbustes ouverts, savanes boisées, savanes, prairies, zones humides permanentes, terres cultivées, zones urbaines et bâties, mosaïque de terres cultivées et de végétation naturelle, neige et glace, stériles ou à végétation clairsemée, eau, toundra boisée, toundra mixte et toundra stérile.

3.3.2.3 Données d'observation sur les stations

Les données d'observation pour évaluer la performance du modèle WRF sont les données de stations contenues dans la base de données du laboratoire qui est le Falcon. Les stations ont été choisies en fonction de la disponibilité des variables à étudier suivantes : le rayonnement descendant à ondes courtes global (GHI), la vitesse du vent de surface (WS) et la température de l'air à proximité de la surface (T). Les dates de prises des données correspondent à la date de simulation de WRF qui est le mois de Décembre 2020. Ainsi, les stations choisies pour les données d'observation à La Réunion sont la station de Moufia Université, la station *Baseline Surface Radiation Network* ou encore BSRN et la station EDF-Saint Pierre La Valle ; et pour Maurice c'est la station de Maurice avec la station de Vacoas.

3.4 Outils

3.4.1 Outils pour la cartographie

Afin d'effectuer la classification d'occupation du sol de La Réunion et de Maurice, un outil facilement d'accès, exploitable et dont les résultats peuvent être reproduits a été utilisé. Il s'agit du *Google Earth Engine* (GEE). Cet outil combine un catalogue de plusieurs images satellite et de données géospatiales avec des capacités d'analyse à l'échelle planétaire. Il sert à détecter les changements, cartographier les tendances et quantifier les différences à la surface de la Terre. L'ensemble de données contenu dans GEE sont déjà prêts à l'emploi et sont instantanément disponibles pour l'analyse. Les données multispectrales issues de Landsat-8 et de Sentinel-2 ont été téléchargées directement à partir de GEE en utilisant des scripts du langage Java. Cet outil a ainsi permis de traiter rapidement et avec précision de grande quantité d'images satellites en identifiant la région d'intérêt (roi), les périodes de simulations souhaitées et les modes de classifications voulues.

En outre, les données utilisées pour la classification de l'occupation du sol avec MODIS ont été téléchargées dans *Climate Engine*. Cet outil a permis de générer des informations exploitables à partir des données d'observation de la Terre et d'intégrer ces informations dans des outils de prise de décision. Ensuite, les données MODIS obtenues sont traitées dans le logiciel *Multispec* afin d'effectuer une classification non supervisée des images raster de MODIS. Une fois la classification d'occupation du sol effectuée, les cartes sont traitées sur **QGIS** pour la mise en forme et la transformation des données en input WPS.

3.4.2 Outils pour la simulation climatique

Afin d'effectuer la simulation sur le modèle climatique, l'accès au centre de calcul de Bourgogne ou **Ccub** a été nécessaire. Le Ccub est une plateforme de calcul numérique intensif permettant de réaliser des simulations ou modélisations numériques. Il permet également d'analyser et de stocker un grand volume de données grâce à son stockage de 1,5 Pétaoctets (1536 To), 20 To de ram et 5600coeurs. En effet, la simulation du modèle WRF nécessite une grande capacité de stockage ainsi que des processeurs performants et rapide. Ainsi, le modèle WRF a été installé et compilé à l'intérieur de ce centre de calcul en utilisant le langage Linux sur le terminal. En outre, la transformation des données d'occupation du sol de format GeoTIFF en format wps.binary accepté par WRF a été effectuée grâce à **GIS4WRF** dans QGIS. En effet, le modèle WRF n'accepte pas les formats .tiff de base d'où la raison de la conversion des données en fichier binaire accepté par le modèle.

Par ailleurs, l'analyse et le traitement de données climatiques résultant du modèle sont réalisés à partir du langage Python. La version utilisée dans le cadre de cette étude est le **Python 3.9.7**. De ce fait, la requête employée pour le téléchargement des données des stations d'observation a été codée sur Python ainsi que l'extraction des variables nécessaires sur le fichier NetCDF et l'analyse statistique des fichiers CSV issus des données observées.

3.5 Méthodes de classification adoptées

Une classification consiste à une analyse exploratoire de données afin de pouvoir synthétiser, prédire, visualiser et interpréter un ensemble d'objet (Sublemontier, 2012). En télédétection, la classification c'est le rapprochement de l'ensemble des pixels d'une image en un nombre défini de classes qui regroupe les grands éléments structuraux de cette image. Dans cette étude, deux types de classification ont été utilisés pour les données d'occupation du sol : la classification non supervisée et la classification supervisée.

3.5.1 Classification non supervisée

La classification de l'occupation du sol provenant des données MODIS a été effectuée avec la méthode non supervisée. Il est à rappeler que les images MODIS utilisées sont MODIS Terra 8-Day LST avec une résolution de 1 km, ce qui ne permet pas de sélectionner soi-même les classes prédites de chaque pixel. D'où le choix du type de classification. En effet, dans cette approche, le logiciel étudie lui-même les signatures spectrales de l'image et regroupe les pixels en fonction des signatures spectrales similaires. Avec Multispec, le nombre de classe nécessaire a pu être choisi en utilisant l'algorithme de classification ISODATA.

L'algorithme ISODATA est une méthode itérative utilisant la distance euclidienne comme mesure de similarité afin de regrouper les éléments de données en différentes classes (Dhodhi et al., 1999). Il divise et fusionne les classes et ensuite le logiciel exécute l'algorithme à travers de nombreuses itérations jusqu'à ce que le seuil défini soit atteint. Ainsi, la réalisation de cette classification a suivi les étapes suivantes :

- i. Fusion et reformatage des images raster téléchargées dans *Climate Engine* afin de ne travailler que sur une seule image couvrant la période de simulation voulue. Ce reformatage s'effectue dans la partie processeur du logiciel Multispec
- ii. Définition des paramètres de classification à adopter ainsi que du format de sortie de l'image dans la partie catégorisation du logiciel en choisissant comme algorithme ISODATA et comme sortie le format GeoTIFF.
- iii. A l'intérieur de l'algorithme, la précision du nombre de classe nécessaire a été effectuée en choisissant quatre (4) classes sachant que la résolution des images est de 1km.

L'avantage de l'algorithme utilisé est sa rapidité et son efficacité pour identifier les groupes spectraux dans l'image étudiée. Après la classification non supervisée sur Multispec, les images sont traitées sur QGIS pour mise en forme.

3.5.2 Classification supervisée

Grâce à Google Earth Engine, une classification supervisée de l'occupation du sol à grande échelle a pu être réalisée avec les images Sentinel-2 et Landsat-8. Ce type de classification est une technique classique importante de Machine Learning en télédétection. Contrairement à l'approche non supervisée qui n'a pas de connaissance à priori des classes, la classification supervisée crée les classes et saisie les échantillons à partir de l'image à étudier tout en connaissant à priori la zone à classifier. Ces échantillons choisis sont, en effet, les zones d'entraînement. La méthode consiste ensuite à recueillir les données des zones d'entraînement et à assembler les entités qui stockent l'étiquette et la propriété de chaque classe connue.

L'algorithme classificateur utilisé pour cette approche est le *smileRandomForest*. Le modèle d'arbre de décision comme *RandomForest* fait partie des modèles les plus puissants et les plus simples à comprendre de l'apprentissage automatique. Il contient des hyperparamètres qui font que chaque arbre de décision donne une sortie pour les données transmises et en fonction de la décision de chaque arbre, l'algorithme produit une prédiction pour les classes voulues. Plus concrètement, la démarche adoptée se décrit comme suit :

- i. Après délimitation de la région d'intérêt (roi), l'image satellite à traiter est filtrée selon la période voulue et le mode de masque des nuages. Il est à savoir que la période choisie pour cette classification s'étale entre le mois de Mai 2018 et le mois d'Octobre 2021 car c'est la période optimale où l'image de la zone d'étude (particulièrement La Réunion) est nette (autrement dit, moindre nuage).
- ii. Les zones d'entraînement sont ensuite échantillonnées sur la carte et assemblées selon leurs propriétés qui stockent l'étiquette des classes connues. La variable d'entraînement est par la suite définie en utilisant 70% de jeu de données d'apprentissage (training) et 30% de jeu de données de validation.
- iii. Grâce à la fiabilité de ses résultats, l'algorithme RandomForest a été utilisé par le classificateur d'entraînement d'image pour assigner une valeur unique aux pixels. La classification est ensuite effectuée après avoir spécifié la couleur de chaque classe.
- iv. La pertinence de la classification est enfin vérifiée par l'établissement d'une matrice de confusion et le calcul de l'indice de Kappa.

3.5.3 Validation de la précision de la classification

3.5.3.1 Matrice de confusion

Cette matrice résume les résultats de la classification en mettant en évidence les erreurs de prédiction de celle-ci. Elle compare les valeurs réelles avec celles prédites et permet de comprendre de quelle manière le modèle obtenu est confus lorsqu'il estime les différentes classes. C'est ainsi un outil d'évaluation de la qualité de la classification de l'occupation du sol produite. La matrice se présente sous forme d'un tableau 2 composé de quatre (4) grandes catégories : les vrais positifs (la valeur prédite et réelle sont positives), les vrais négatifs (la valeur prédite et réelle sont négatives), les faux positifs (la valeur prédite est positive, celle réelle est négative) et les faux négatifs (la valeur prédite est négative et la réelle est positive). En principe, la base d'une matrice de confusion se présente comme suit :

Tableau 2: Matrice de confusion

		Classes réelles	
		Positif	Négatif
Classes prédites	Positif	Vrai Positif	Faux positif
	Négatif	Faux négatif	Vrai Négatif

3.5.3.2 Coefficient de kappa

La considération du coefficient de kappa a été également une des méthodes de vérification de la pertinence de la classification produite. En effet, ce coefficient est approprié pour valider la précision de la classification étant donné qu'il considère tous les éléments de la matrice de confusion (Ratté, 1999). Il mesure l'accord entre les catégorisations prédites et observées de l'ensemble des données. Les valeurs de cet indice peuvent être comprises entre -1 et +1. Plus elle est élevée, plus forte est la concordance. Le coefficient se calcule comme suit (Alkaradaghi et al., 2018) :

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r (x_{ii}) - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Où

r : nombre de catégories (Classes) ;

N : nombre total de points (pixels d'observation) ;

x_{ii} : Nombre de points sur la ligne i et la colonne i ;

x_{i+} : total marginal de la ligne i (de la matrice de confusion) ;

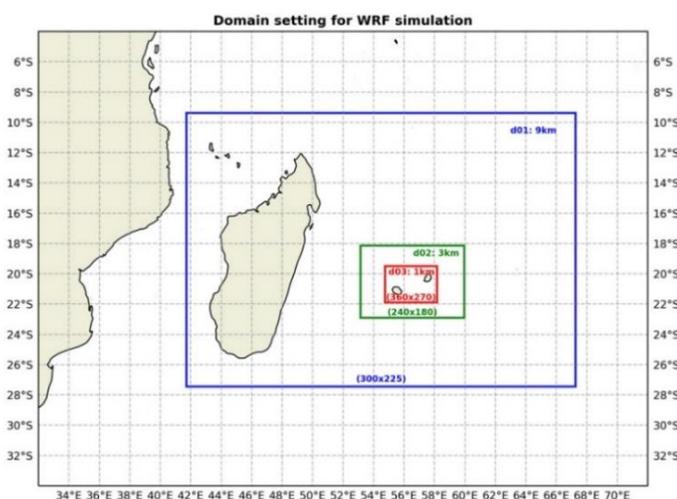
x_{+i} : total marginal de la colonne (de la matrice confusion).

La précision de la classification signifie la probabilité qu'un pixel classé dans une catégorie donnée représente réellement cette catégorie sur le terrain

3.6 Configuration du modèle WRF

La partie qui a consommé le plus de temps sur la prise en main du modèle climatique est la compilation et la configuration du modèle WRF. En effet, même si l'environnement système de Ccub a déjà été testé et la bibliothèque déjà construite, il fallait toutefois installer le modèle et définir tous les paramètres de compilation et les chemins pour les bibliothèques. Et toute la manipulation s'effectue avec le langage Linux. Après de nombreuses erreurs rencontrées pour l'installation du modèle, WRF a enfin été compilé trois (3) semaines après sa prise en main.

La version du modèle de recherche et de prévision météorologique (WRF) 4.2 a été utilisée pour la simulation climatique dans cette étude. Il est à rappeler que le modèle est une simulation numérique atmosphérique implémentable sur des plateformes de calcul parallèles (Skamarock et al., 2008) afin de prédire le temps à une échelle méso. Le modèle a été configuré pour une résolution spatiale fine avec trois (3) domaines. La zone d'intérêt du projet étant le Sud-Ouest de l'Océan Indien, le domaine 1 inclut l'île de Madagascar. Les domaines 2 et 3 par contre encadrent l'île de La Réunion et de Maurice. Les dimensions Ouest-Est et Sud-Nord suivent les paramètres déjà utilisés par le projet SWIO comme l'indique la carte ci-dessous⁴.



Carte 2: Domaines utilisées par le projet SWIO-Energy

Pour ce modèle, ARW est le noyau dynamique sur lequel les données d'entrées sont préparées. En outre, la simulation a été paramétrée pour un intervalle temporel de 6 heures. Il est aussi à noter que le namelist.wps et namelist.input du projet du projet ont été adoptés pour réaliser cette étude (Annexe 4 et 5).

⁴ <https://www.energylab.re/projets/projets-en-cours/swio/>

3.7 Evaluation du modèle

La performance du modèle WRF a été évaluée en examinant les variables climatiques (irradiance, température et vitesse du vent) avec les valeurs simulées dans WRF et les valeurs observées sur les stations. Les mesures courantes pour évaluer la précision des prévisions comprennent le coefficient de corrélation (r), l'erreur de moyen biais (MBE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Teklay et al., 2019).

Le coefficient de corrélation est largement utilisé pour quantifier la relation linéaire entre les valeurs simulées et observées. Les valeurs (r) proches de 1 indiquent une forte corrélation positive tandis que les valeurs proches de zéro n'indiquent aucune corrélation.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$$

L'erreur de biais moyen (MBE) mesure la différence entre la moyenne des données climatiques simulées et la moyenne des données observées sur les stations. Une valeur positive de MBE indique ainsi une surestimation et une valeur négative indique une sous-estimation.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)$$

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) mesure le degré d'erreur entre deux ensembles de données. En d'autres termes, elle compare une valeur prédite et une valeur observée ou connue. Plus la valeur RMSE est petite, plus les valeurs prédites et observées sont proches.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - O_i)^2}$$

S_i est la variable climatique simulé,

O_i est la variable climatique observée,

\bar{s} la moyenne de la variable climatique simulée,

\bar{O} la moyenne de la variable climatique observée et

n est le nombre total de données climatiques utilisées.

4 Résultats

4.1 Classification et cartographie de l'occupation du sol

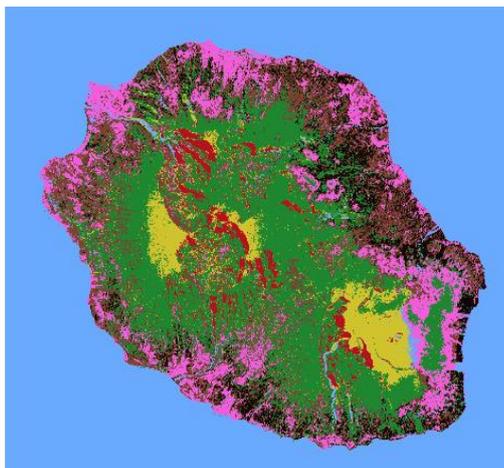
4.1.1 Classification de l'occupation du sol de l'île de La Réunion

Afin de préparer les données de l'occupation du sol de La Réunion pour la simulation climatique, deux (2) classifications supervisées ont été réalisées. L'une avec les images Landsat-8 et l'autre avec les images Sentinel-2. Les classifications présentées ci-dessous s'étalent entre le 01-05-2018 et le 01-10-2021. Malgré le fait que l'image issue de la satellite Sentinel-2 a une résolution élevée de 10m et celle de Landsat de 30m, les classifications ne sont pas détaillées (pas plus de 7 classes) sachant que l'objectif du travail est d'adapter ces données à l'intérieur du modèle WRF pour une évaluation tout en la comparant avec la classification déjà intégrée dans le modèle (qui a une résolution de 1km). Ainsi, après la classification supervisée de l'occupation du sol de l'île de La Réunion, sept (7) classes ont été générées. Ce sont principalement : la zone urbaine, la zone forestière, l'eau, la zone cultivée, la zone non cultivée, le sol nu et la zone d'ombre.

D'une part, la classification supervisée de La Réunion sur Sentinel-2 a été faite en utilisant la collection d'image COPERNICUS/S2 avec un filtre sur les nuages « *cloudy_pixel_percentage, less_than, 1* ». Ensuite, après sélection des échantillons qui ont comporté en tout 114 éléments, les bandes sélectionnées sont les bandes B4, B3, B2 et B8. Ce sont respectivement les bandes rouge, vert, bleu et proche infrarouge de Sentinel. Cette classification a donné un indice de Kappa de 96,02 % et une précision de 96,67% ce qui montre une bonne représentation des classes obtenues par rapport à la réalité.

D'autre part, la collection d'image LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA avec un filtre sur les nuages « *cloud_cover_land, less_than, 20* » a été utilisée pour la classification supervisée de Maurice sur Landsat-8. Après sélection des échantillons qui ont comporté en tout 106 éléments, les bandes sélectionnées sont les bandes B4, B3, B2 et B5. Ce sont respectivement les bandes rouge, vert, bleu et proche infrarouge de Landsat. Après évaluation de la pertinence de la classification, l'indice de Kappa a montré un taux de 94,06 % et la précision est de 95 %.

La différence majeure des images issues de la classification Sentinel-2 (S2) et Landsat-8 (L8) réside dans la présence des nuages. En effet, les nuages au niveau du piton de la fournaise sont conséquents sur les images L8 malgré le fait que l'intervalle de temps choisi s'est déjà étalé sur trois (3) ans. Ainsi, au lieu de montrer totalement la présence de sol nu, l'image L8 de la classification de l'occupation du sol de La Réunion présente encore une zone forestière et même une partie de la zone urbaine (qui reflète d'ailleurs la même couleur que les nuages).

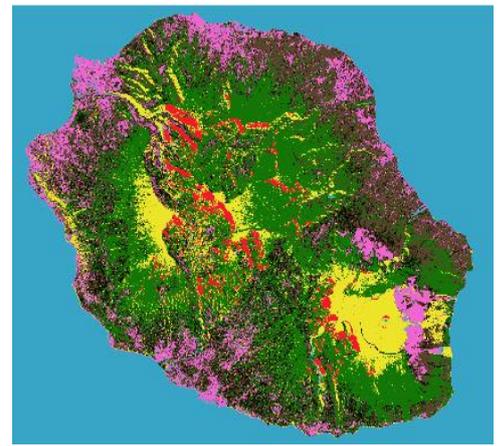


Légendes

Classification La Reunion Landsat8

- zone urbaine
- zone forestière
- eau
- zone_non_cultivée
- zone_cultivée
- sol_nu
- zone_d_ombre

0 7,5 15 km

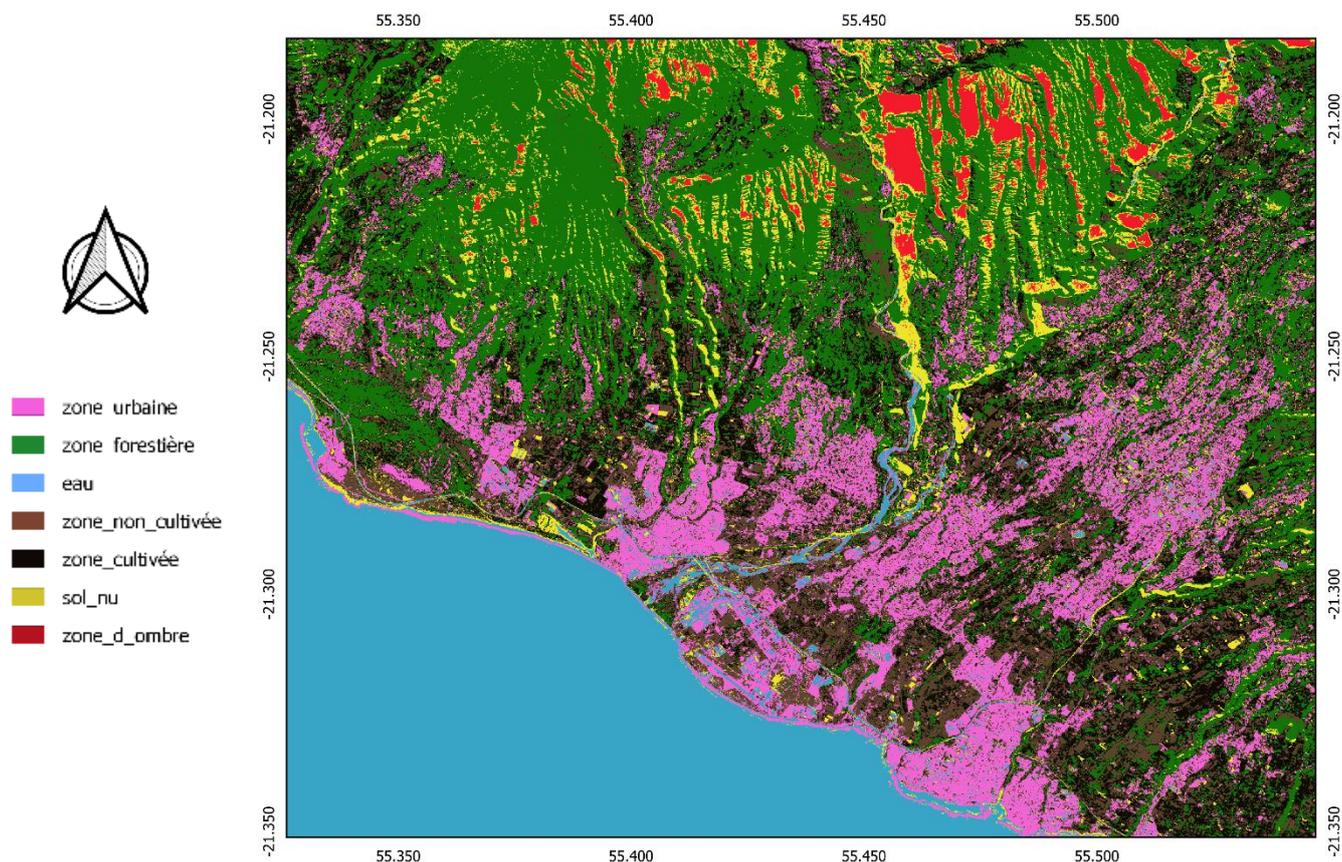


Carte 4: Classification de l'occupation du sol de La Réunion sur Landsat-8

Carte 3: Classification de l'occupation du sol de La Réunion sur Sentinel-2

La zone urbaine est caractérisée par les lieux d'habitation de la population, les routes, les villes et toutes les constructions aménagées par les Hommes. A la Réunion, les zones urbanisées sont situées majoritairement sur le littoral. Les principales agglomérations comportant plus de 50 000 habitants (en 2007)⁵ sont Saint-Denis, Saint-Paul, Saint-Pierre, Le Tampon, Saint-André et Saint-Louis. Les zones forestières occupent une grande partie du territoire réunionnais. En effet, selon l'ONF, les forêts et les espaces naturels représentent presque le quart de la superficie de l'île. Cette zone se situe essentiellement dans l'espace montagneux centrale de l'île. D'ailleurs, c'est le relief accidenté de l'île qui entraîne la présence de la zone d'ombre, une classe assez significative dans l'occupation du sol de La Réunion sachant que l'ignorer entraînerait un biais au niveau de la classification. Concernant la classe de l'eau, même si la nappe phréatique (ressource souterraine) occupe une proportion importante dans la répartition de l'eau à La Réunion, seules les ressources de surfaces comme les rivières, les cours d'eau, les bassins et les étangs sont considérés dans cette classification. Cette classe ne représente que 6% de la surface terrestre de l'île. Les zones non agricoles, elles, sont caractérisées par des parcelles agricoles non cultivées. En effet, à cause de certains systèmes de cultures comme la jachère, des superficies agricoles restent non exploitées pendant une certaine période avant de recultiver. La zone agricole à La Réunion se situe en général entre les zones urbaines et les zones forestières et espaces naturels. Cette zone comporte les grandes exploitations agricoles dont l'exploitation cannière qui occupe encore une place importante pour l'agriculture de l'île, les zones de pâturages ainsi que les parcelles agricoles des exploitations familiales.

⁵ <http://splaf.free.fr/domurb.php?depnum=974> consulté le 25 Mai 2022



Carte 5: Mise en évidence des différentes classes de l'occupation du sol à La Réunion

4.1.2 Classification de l'occupation du sol de l'île Maurice

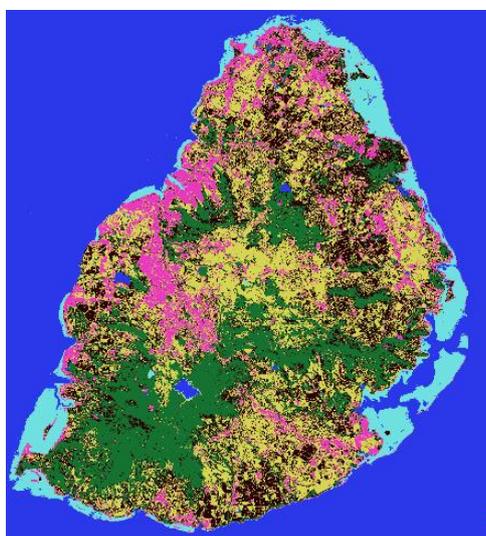
La classification de l'occupation du sol de l'île Maurice sur Landsat-8 et Sentinel-2 a donné 6 classes distinctes dont la zone urbaine, la zone forestière, l'eau, la zone cultivée, la zone non cultivée et le lagon. Il est à mentionner que cette dernière classe est particulière à l'île. Les classifications présentées ci-dessous ont été établies avec les mêmes intervalles de temps que les classifications de La Réunion c'est-à-dire entre Mai 2018 et Octobre 2021.

La classification supervisée de Maurice sur Sentinel-2 a utilisé la collection d'image COPERNICUS/S2 avec un filtre sur les nuages « *cloudy_pixel_percentage, less_than,5* ». Après sélection des échantillons qui ont comporté en tout 87 éléments, les bandes sélectionnées sont les bandes B4, B3, B2 et B8. Ce sont respectivement les bandes rouge, vert, bleu et proche infrarouge de Sentinel. Cette classification a donné un indice de Kappa de 96,20 % et une précision de 96,87 % ce qui montre une bonne représentation des classes obtenues par rapport à la réalité.

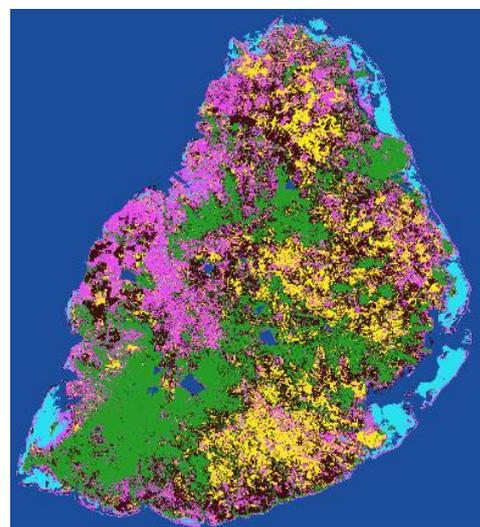
Concernant la classification supervisée de Maurice sur Landsat-8, la collection d'image LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA avec un filtre sur les nuages « *cloud_cover_land* » a été utilisée. Après sélection des échantillons qui ont comporté en tout 88 éléments, les bandes

sélectionnées sont les bandes B4, B3, B2 et B5. Ce sont respectivement les bandes rouge, vert, bleu et proche infrarouge de Landsat. Après évaluation de la pertinence de la classification, l'indice de Kappa a montré un taux de 95,22 % et la précision est de 96,29 %.

Par comparaison, l'image classifiée issue du Sentinel-2 (S2) est plus précise non seulement selon les statistiques mais également par analyse à vue d'œil. En effet, l'image du Sentinel-2 est plus détaillée par rapport à l'image issue de Landsat-8 (L8) qui est plus ou moins homogène. Cela se distingue au niveau du lagon dans la partie Nord de l'île où la classification issue du S2 reflète bien la vraie répartition du lagon. D'une part, au niveau de la partie Centre-Est de Maurice, à Moka, l'image Landsat confond le barrage de Bagatelle avec une zone d'espace naturel et ne distingue même pas le réservoir d'eau Piton de Milieu et Midlands dam. D'autre part, si les zones agricoles sont bien définies pour l'image S2, l'image L8 n'arrive pas à différencier exactement ces zones avec les zones non agricoles. Tel est le cas pour les surfaces d'occupation du sol aux alentours du barrage de Bagatelle. Par ailleurs, les zones urbaines dans la Plaine de Wilhems ne sont pas confondues avec les zones non agricoles et sont mieux représentées dans l'image issue de la classification supervisée de Sentinel-2. Et enfin, sur la partie Nord-Est de l'île, à Flacq, la zone urbaine est mélangée avec la zone non agricole par l'image Landsat-8.



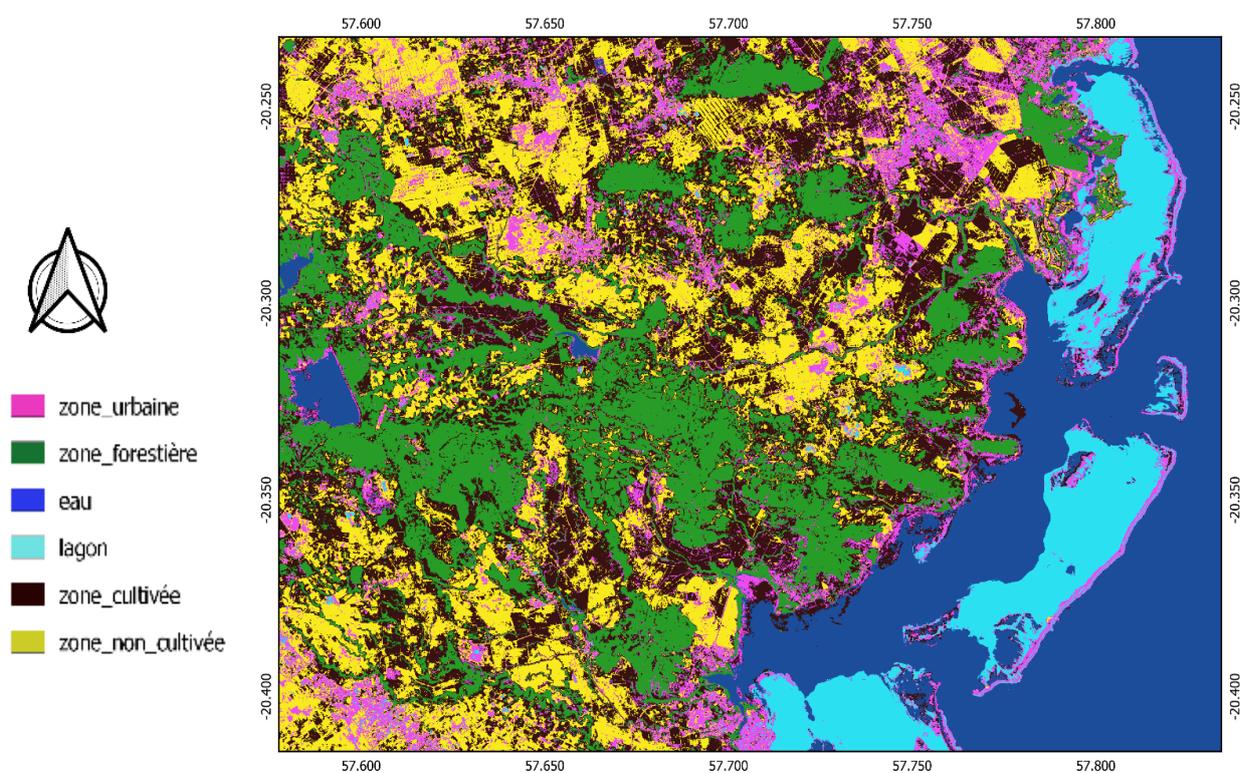
Carte 6: Classification de l'occupation du sol de Maurice sur Landsat-8



Carte 7: Classification de l'occupation du sol de Maurice sur Sentinel-2

Les zones urbaines à Maurice se trouvent majoritairement dans le district de Port Louis et des Plaines Wilhems (partie Ouest et Centre-Ouest de l'île). Les villes comportant plus de 80 000 habitants dans le territoire sont Port-Louis, Beau-Bassin Rose-Hill, Vacoas-Phoenix, Curepipe et Quatre Bornes. Ces zones sont caractérisées par des infrastructures d'habitation, de transport

et toute sorte d'aménagement pour la vie sociétale. Concernant la classe des zones forestières, une grande partie se situe dans les districts de Rivière Noire et Savannah (Sud-Ouest) dans lequel se trouve le plus grand parc national de l'île qui est Le Parc National des Gorges de la Rivière Noire. Cette classe couvre environ 25% du territoire⁶. D'une part, la classe des zones cultivée est surtout caractérisée par l'agriculture cannière qui occupe 78% de la superficie agricole totale. Etant une île volcanique, l'île est très favorable à la pratique de l'agriculture surtout dans la partie Nord et Est. Par ailleurs, la surface en eau de l'île est composée essentiellement de ses principaux lacs qui sont le Grand Bassin, la Mare aux Vacoas et la Nicolière. Une des caractéristiques de la classification de l'occupation de Maurice est surtout la présence du lagon qui est d'ailleurs un de ses atouts touristiques.



Carte 8: Mise en évidence des différentes classes de l'occupation du sol à Maurice

Les principaux critères différenciant les méthodes et les résultats obtenus pour la réalisation des classifications supervisées de l'occupation du sol des deux îles sur les satellites Sentinel-2 et Landsat-8 sont synthétisés dans le tableau 3 suivant.

⁶ https://govmu.org/FR/infoservices/agri/Pages/agri_forestry.aspx

Tableau 3: Comparaison des différents types de classification

	Sentinel-2		Landsat-8	
Programme source	Copernicus		USGS and NASA	
Résolution spatiale (m)	10		30	
Fréquence de capture	Tous les 5 jours		Tous les 15 jours	
Disponibilité des données	Depuis 2014		Depuis 2013	
Zones	Maurice	La Réunion	Maurice	La Réunion
Type de classification	Supervisée			
Collection d'images	COPERNICUS/S2	COPERNICUS/S2	LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA	LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA
Date de simulation choisie	2020-12-01, 2020-12-08	2020-12-01, 2020-12-08	2020-12-01, 2020-12-08	2020-12-01, 2020-12-08
Mode de réduction des nuages	<i>Cloudy_pixel_percentage</i> , 'less_than', 5	<i>Cloudy_pixel_percentage</i> , 'less_than', 1	<i>Cloud_cover_land</i>	<i>Cloud_cover_land</i> , 'less_than', 20
Nombre de classes	6	7	6	7
Liste des classes	Zone urbaine, Zone forestière Eau Lagon Zone cultivée Zone non cultivée	Zone urbaine, Zone forestière Eau Zone cultivée Zone non cultivée Sol nu Zone d'ombre	Zone urbaine, Zone forestière Eau Lagon Zone cultivée Zone non cultivée Zone non cultivée	Zone urbaine, Zone forestière Eau Zone cultivée Zone non cultivée Sol nu Zone d'ombre
Indice de Kappa	0.9620	0,9602	0,9522	0.9406
Indice de précision	0.9687	0,9667	0,9629	0,9500

4.2 Analyse de l'impact des données d'occupation du sol dans le modèle

4.2.1 Classification de l'occupation du sol avec MODIS

La classification de l'occupation du sol avec MODIS est de type non supervisé étant donnée la résolution de l'image qui est de 1 km. Les classifications présentées ci-dessous proviennent des données recueillies pour le mois de Décembre 2020 sachant que la simulation WRF effectué pour cette étude correspond à la même période. Parmi les différentes sortes d'images MODIS présentes dans Climate Engine, l'image provenant de MODIS_terra_8day_LST_1000m a été choisie même si des images NDVI à 250 et 500 m étaient disponibles. En effet, après avoir effectué plusieurs simulations, c'est cette image qui arrivait le mieux à distinguer les différentes occupations du sol de nos zones d'étude. Même avec une résolution grossière qu'offre MODIS par rapport au Sentinel et Landsat, les 4 grandes classes catégorisant chaque territoire sont quand même bien distinguées. Ce sont la zone urbaine et/ou sol nu, la zone agricole, la végétation et l'eau. Ainsi, la zone agricole regroupe les zones cultivées et non cultivées et l'eau rassemble le lagon et les eaux de surface pour le cas de Maurice.



Carte 10: Classification de l'occupation du sol de La Réunion sur MODIS



Légendes

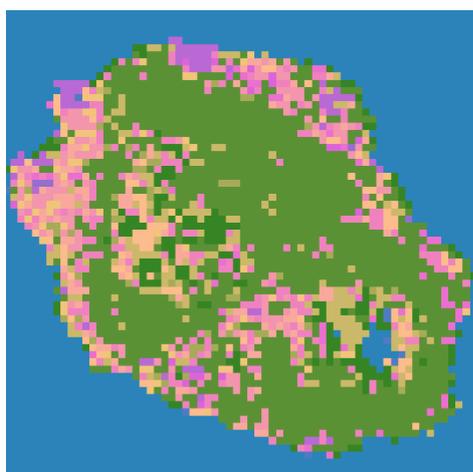
- zone urbaine et/ou sol nu
- zone_agricole
- végétation
- eau



Carte 9: Classification de l'occupation du sol de Maurice sur MODIS

4.2.2 Comparaison des classifications de l'occupation du sol

Pour évaluer l'impact de l'occupation du sol dans le modèle WRF, une comparaison des classifications avec les données déjà intégrées à l'intérieur du modèle (c'est-à-dire avec les données MODIS_landuse_20class_30s_with_lakes) sera effectuée avec la classification récemment produite ci-dessus. En effet, les données de classification du sol déjà intégrées dans WRF sont des données statiques et anciennes qui ne sont pas à jour. Et une comparaison de ces données permettrait d'observer la différence qu'engendrent les nouvelles données d'occupation du sol dans la simulation climatique. Ainsi, les deux (2) cartes suivantes présentent les données d'occupation du sol de MODIS dans WRF à l'île de La Réunion et Maurice.

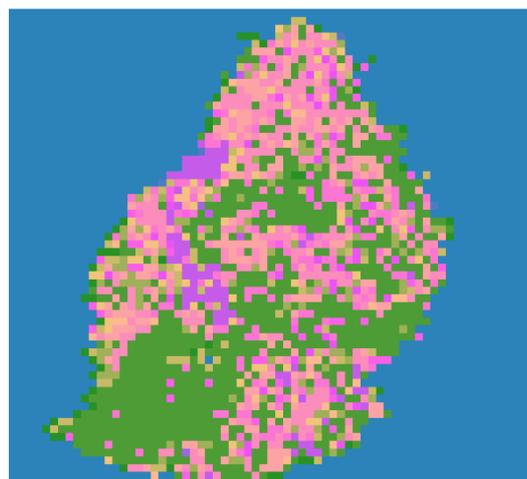


Carte 12: Classification de l'occupation du sol de La Réunion avec les données dans WRF



Légendes

- zone urbaine et/ou sol nu
- zone_agricole
- végétation
- eau



Carte 11: Classification de l'occupation du sol de Maurice avec les données dans WRF

Après analyse des cartes issues de WRF et des cartes récemment produites, la différence que présentent les classes d'occupation du sol est évidente. En effet, les cartes issues de MODIS LST 1km distinguent mieux les grandes catégories de classe par rapport à la classification de l'occupation du sol déjà intégrée dans WRF.

D'une part, avec la classification récemment produite, toutes les grandes villes de La Réunion se trouvant sur le littoral sont bien représentées par le symbole de la zone urbaine. Cependant, avec l'image provenant de WRF, seule une partie de la ville de Saint-Denis et le Port (partie Nord-Ouest) sont bien visibles. Sinon, les autres parties des zones urbaines sont mélangées avec celle des zones agricoles. De plus, une des différences flagrantes entre les deux classifications se trouve au niveau du volcan qui est le Piton de la Fournaise. Ce dernier se localise vers la partie Sud-Est de l'île. En effet, avec une résolution fine, le piton de la fournaise s'identifie comme un sol nu mais avec la résolution grossière de MODIS, il est confondu entre le symbole de la zone urbaine et la zone agricole. Pourtant, la classification issue de WRF confond le volcan avec l'eau (une représentation bleue à la place du volcan). Cela s'explique également par une forte présence de nuage au niveau de cette zone qui est souvent l'origine des biais des classifications. Par ailleurs, même si la zone agricole est plus ou moins confondue avec la zone urbaine dans la classification issue de WRF, sur les images MODIS récemment produites, elle se situe entre la zone urbaine et la végétation. Toutefois, la seule classe qui est facilement distinguée au premier coup d'œil pour les deux cartes est la végétation, qui occupe d'ailleurs une part importante au niveau de la superficie du territoire.

D'autre part, la classification de l'île Maurice avec les images MODIS LST met aussi en évidence la présence de la zone urbaine sur les grandes villes du territoire. En effet, les villes se situant sur la partie Ouest de Maurice allant de la Grande Baie (Nord-Ouest), Pamplemousse et passant par la ville de Port Louis, Beau Basse Rose Hill jusqu'au Tamarin (Sud-Ouest) sont bien définies en tant que zone urbaine sur la carte. Quelques villes de la partie Sud-Est sont aussi distinguées comme la localisation de la ville de Mahébourg et de Souillac. Par contre, la classification issue de WRF ne montre que la ville de Port Louis, de Beau Basse Rose Hill et de Vacoas-Phoenix (Centre-Ouest) comme classe de la zone urbaine. Idem que pour la classification de La Réunion, l'image issue de WRF confond les zones urbaines avec les zones agricoles. Cependant, ces dernières sont mieux distinguées sur l'autre classification récemment produite. Par ailleurs, la zone de végétation reste la classe la mieux représentée pour les deux cartes que ce soit pour la classification issue de WRF que pour la nouvelle classification. Ainsi, il est montré que les données d'occupation du sol récemment produites reflètent mieux la réalité par rapport aux données d'occupation du sol dans le modèle climatique.

4.3 Evaluation de la performance du modèle climatique

4.3.1 Pré-traitement des données d'entrées dans le modèle

Une fois les classifications d'occupation du sol de La Réunion et de Maurice obtenues, celles-ci seront préparées à être insérées dans le modèle. En effet, ces données seront copiées dans le dossier WPS_GEOG de WRF, plus précisément dans le sous-dossier MODIS_landuse_20class_30s_with_lakes. Et c'est dans ce chemin de dossier que toutes les données d'occupation du sol produites seront placées avant de lancer le programme de pré-traitement de WRF qui est le WPS.

Ainsi, une transformation des données en binaire dans GIS4WRF est primordiale afin d'adapter le format de celles-ci aux normes acceptées par le modèle. Le nom des fichiers générés est une suite de chiffres comportant un point « . » pour séparer la plage de coordonnées x de la plage de coordonnées y (image 2). Après conversion des fichiers GeoTIFF en wps.binary, un fichier index décrivant les propriétés des données est également généré (image2).

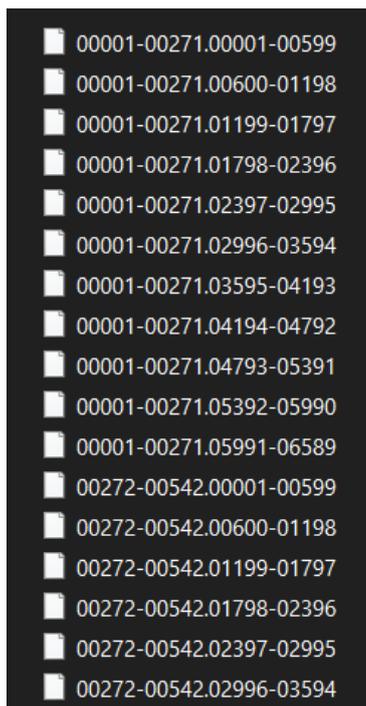


Image 2 : Format binaire accepté par le modèle

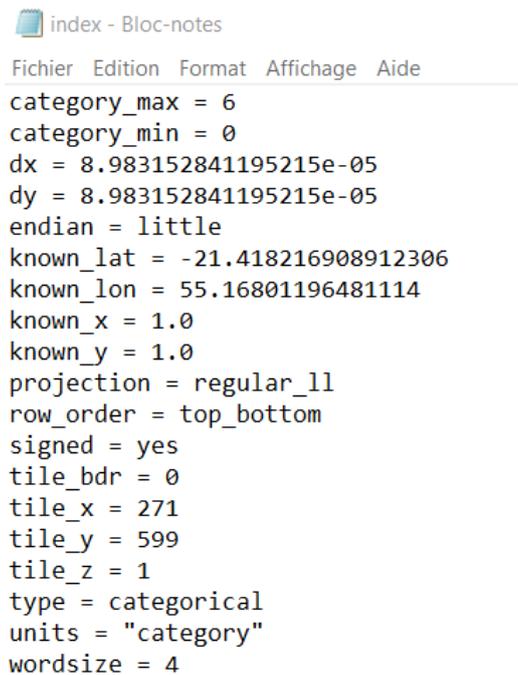


Image 1: Fichier index des données input

Après la préparation de ces données input, les données ERA5 sont téléchargées en fonction de la date de simulation. Ensuite, les namelist.wps et namelist.input sont adaptés selon les paramètres requis avant de lancer la première partie de WRF qui est le WPS. Une fois le WPS réussi, le modèle WRF proprement dit est lancé dans le dossier « run » en exécutant ./real.exe et ensuite ./wrf.exe et en choisissant au préalable le nombre de processeurs à utiliser.

4.3.2 Analyse des sorties du modèle WRF avec les données d'observation

A la fin de la simulation du modèle climatique WRF, si cette dernière est un succès, des fichiers de types wrfout_d01_2020-12-01_00:00:00 en format NetCDF devront être obtenus. Exécuté sur Python (avec Google Colab et Jupiterlab), les variables nécessaires à l'étude sont extraites à partir de ces fichiers de sortie WRF pour pouvoir être analysés. Les fichiers de sortie WRF étudiés pour le cas de La Réunion ont été extraites à partir de la localisation de la station Moufia (-20.901; 55.483) et celle de Maurice à partir de la localisation de la station mobile de Maurice même (-20.139; 57.726). Comme l'étude se concentre sur les ressources en énergie solaire et éolienne, les principales variables étudiés sont ainsi l'irradiance, la température et le vent. A partir de ces stations, les variables observées sont l'irradiance (GHI) qui est nommé SWDOWN pour WRF, la température (T) (T2 pour WRF) et la vitesse du vent (WS).

4.3.2.1 Analyse de l'irradiance

En évaluant les sorties de la variable irradiance du modèle climatique à La Réunion, il est observé que sur une donnée d'une semaine allant du 1^{er} au 8 Décembre 2020, les valeurs de l'irradiance ont une même tendance sauf pour le jour du 05 Décembre où on remarque une baisse des radiations vers les 300 W/m². Concernant les données observées, les données de la station Moufia et BSRN sont celles qui ont les plus de similarités avec les données WRF avec un minimum de 1,695 W/m² pour Moufia et 0,176 W/m² pour BSRN, si pour le WRF c'est une valeur nulle à partir de 18h jusqu'à minuit. La donnée de GHI maximum de WRF (955 W/m²) par contre, se rapproche plus avec celle de Saint Pierre qui est de 960 W/m². L'observation du graphe montre que les données de stations Moufia et BSRN sont confondues pour la variable GHI étant donné leur proximité. Par ailleurs, les données de Saint Pierre présentent une différence par rapport aux données recueillies à Saint-Denis de Moufia (Figure 1).

D'ailleurs, en utilisant les paramètres statistiques, les calculs des MBE pour les données WRF et les données des stations ont tous montré des valeurs positives. Ce qui signifie que le modèle WRF surestime l'irradiance à La Réunion. En outre, l'analyse du paramètre statistique RMSE a montré une valeur minimale pour la station BSRN. Autrement dit, c'est avec cette station que le modèle WRF présente plus de similarité qu'avec les autres stations. Par ailleurs, le coefficient de corrélation r indique une valeur de 0,926 pour les données statistiques de Moufia et 0,925 pour celles de BSRN. Cela signifie qu'il y a une forte corrélation entre les données observées et les données simulées sur l'irradiance.

Concernant Maurice, les données de l'irradiance ont également la même tendance pour les autres stations que pour les données du modèle climatique. D'une part, la valeur minimale du

modèle simulé (0 W/m^2) est plus proche de celle de la station de Maurice qui est de $0,68 \text{ W/m}^2$ et également pour la valeur maximale qui est de 972 W/m^2 pour WRF et 957 W/m^2 pour Maurice. Si en moyenne, les données des stations ont une valeur de 281 W/m^2 (station Maurice) et $269,38 \text{ W/m}^2$ (station Vacoas), la moyenne des données issues de WRF est de 377 W/m^2 . Cela montre déjà la surestimation que font les données simulées par rapport à celles observées. De plus, la valeur positive de MBE confirme cela.

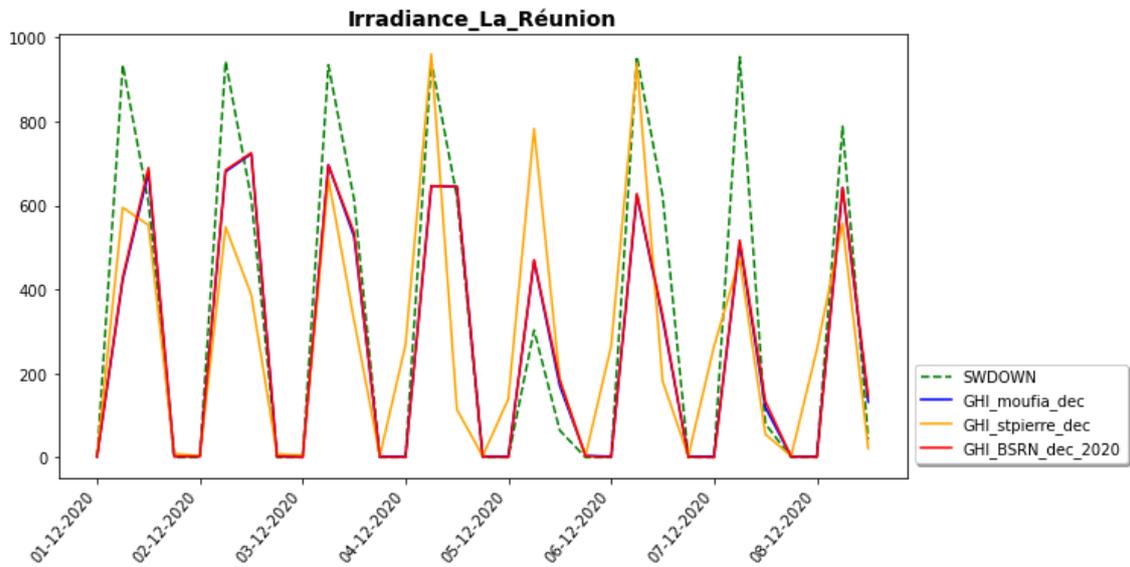


Figure 2: Irradiance La Réunion

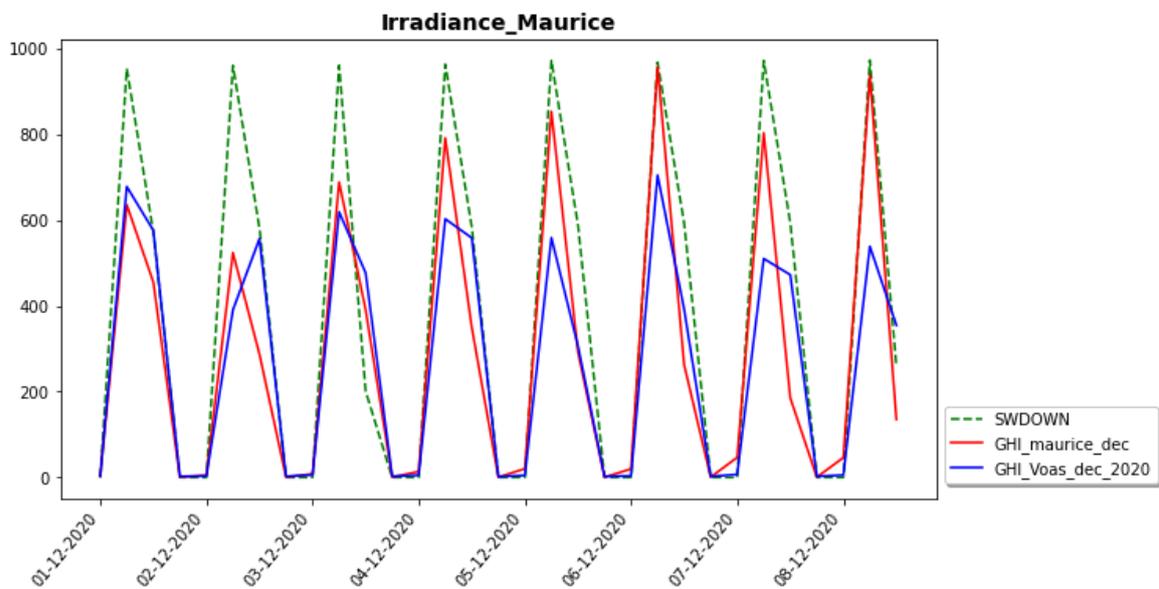


Figure 3: Irradiance Maurice

Le tableau 4 suivant résume les calculs statistiques de l'irradiance effectués entre les données simulées sur le modèle climatique WRF et les données observées sur les stations à La Réunion et également à Maurice.

Tableau 4: Synthèse des paramètres statistiques utilisés pour l'irradiance

GHI_La_Reunion	RMSE	Corrélation r	MBE	Moyenne	Max	Min
Data_station_Moufia	176,25	0,93	63,64	259,79	723,11	1,7
Data_station_StPierre	238,56	0,8	46,43	277	960,79	3,26
Data_station_BSRN	175,02	0,93	61,18	262,24	725,42	0,18
WRF_La_Réunion				323,43	955,19	0
GHI_Maurice	RMSE	Corrélation r	MBE	Moyenne	Max	Min
Data_station_Maurice	180,74	0,94	95,87	281,19	957,29	0,68
Data_station_Vacoas	220,55	0,92	107,7	269,38	704,51	2,13
WRF_Maurice				377,06	972,43	0

4.3.2.2 Analyse de la température

La température maximum à La Réunion pour la première semaine du mois de Décembre 2020 est de 28°C pour les stations de Moufia et de Saint-Pierre si elle est de 30,64°C pour la station BSRN. Le modèle climatique WRF, lui se rapproche plus des données de la station de BSRN avec une température maximale de 30,54°C. Cependant, le modèle sous-estime la température minimum par rapport aux autres stations. En effet, pour WRF, la température minimale va jusqu'à 20,82°C pour le mois de Décembre si les autres stations enregistrent des températures entre 22 et 23°C. L'observation du graphe montre globalement une même tendance même si le modèle WRF surestime la température maximale au premier jour et la sous-estime tous les jours sauf pour le jour 2. D'ailleurs, même au niveau des stations de référence, les valeurs sont plus ou moins divergentes ; surtout pour la station BSRN.

L'analyse statistique RMSE montre une valeur plus petite pour la station BSRN par rapport aux deux autres stations. Ce qui signifie donc que les valeurs simulées sur WRF sont plus proches des valeurs observées sur la station BSRN. Quant à l'erreur de biais moyen, celle-ci indique une valeur négative au niveau de toutes les stations. Ce qui montre alors que modèle WRF sous-estime la température à La Réunion. Par ailleurs, en étudiant le coefficient de corrélation, il est montré que les valeurs simulées sont corrélées avec les valeurs observées. En effet, la valeur de r est égale à 0,84 pour la station de Saint Pierre, 0,89 pour Moufia et 0,90 pour la station BSRN.

Pour l'analyse des données sur la température à Maurice, les courbes issues du modèle simulé ont les mêmes tendances que les courbes des données observées. Cependant, une différence est constatée entre les données observées. En effet, les données de Maurice ont des valeurs inférieures par rapport aux autres, ce qui fait que le modèle surestime les données de la température pour la station de Maurice. Cela est aussi justifié par la valeur positive de MBE (2,43). Par ailleurs, les données de WRF sous-estiment les données provenant de la station

Vacoas avec un MBE négative (-1,25). En outre, en faisant référence à la moyenne des valeurs issues des stations, la moyenne du modèle WRF (27,09°C) est plus proche de la moyenne des données de la station Vacoas (25,83°C) que celle de la station de Maurice (23,40°C). L'erreur quadratique moyenne (RMSE) montre également que les données simulées de WRF sont plus proches des données simulées de la station Vacoas. De plus, les calculs montrent une forte corrélation entre ces données ($r=0,84$).

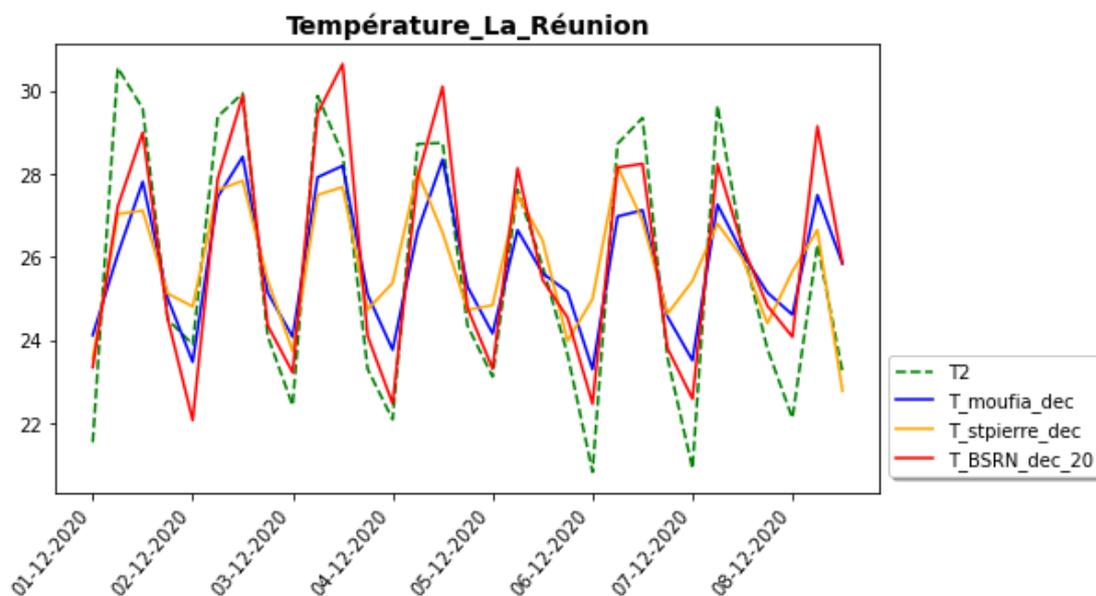


Figure 4: Température La Réunion

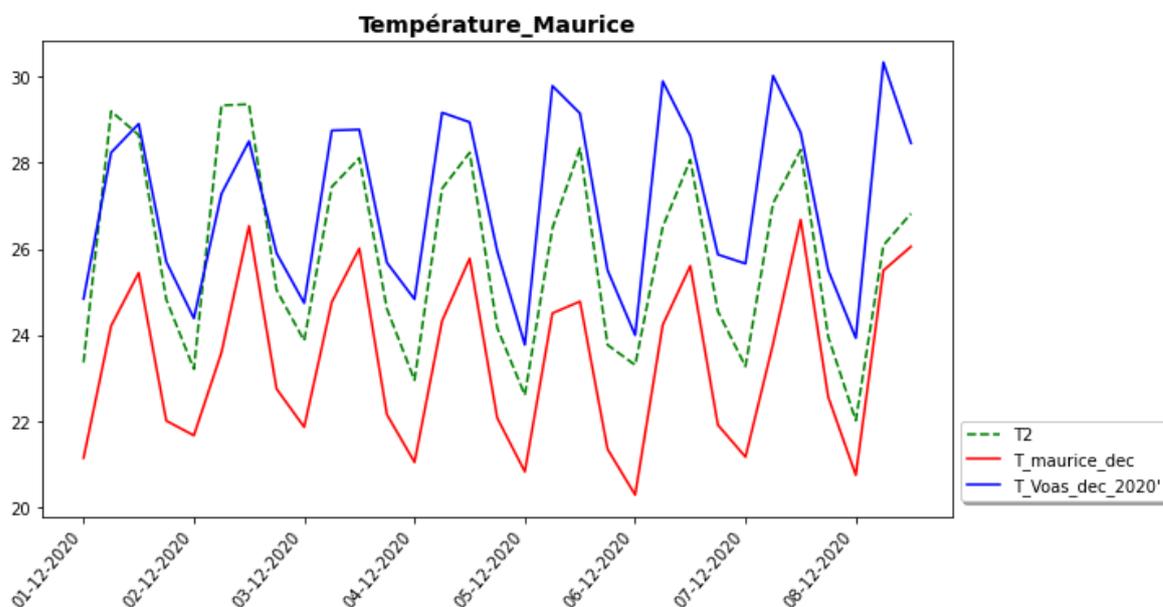


Figure 5: Température Maurice

Le tableau 5 ci-dessous illustre les calculs statistiques de la température effectués entre les données simulées sur le modèle climatique WRF et les données observées sur les stations à La Réunion et à Maurice.

Tableau 5 : Synthèse des paramètres statistiques utilisés pour la température

T_La_Réunion	RMSE	Corrélation	MBE	Moyenne	Max	Min
Data_station_Moufia	1,83	0,89	-0,12	25,82	28,41	23,3
Data_station_StPierre	2,04	0,84	-0,18	25,87	28,18	22,8
Data_station_BSRN	1,38	0,9	-0,31	25,69	30,64	22,1
WRF_La_Réunion				26	30,54	20,8
T_Maurice	RMSE	Corrélation	MBE	Moyenne	Max	Min
Data_station_Maurice	2,64	0,89	2,43	23,4	26,67	20,3
Data_station_Vacoas	1,76	0,84	-1,25	25,83	29,35	22,02
WRF_Maurice				27,09	30,32	23,78

4.3.2.3 Analyse de la vitesse du vent

Le paramètre vitesse du vent sera présenté sous forme d'histogramme dans cette étude car ce dernier permet de détecter rapidement les données aberrantes sachant que les données sur la vitesse du vent que ce soit sur La Réunion ou sur Maurice sont très hétérogènes.

Aux premières observations, il est constaté que les données issues de WRF sont différentes par rapport aux données issues des stations. En effet, si la moyenne des données de Moufia est de 1,87 ; celle de Saint-Pierre est de 2,68 et pour WRF c'est 3,80. Cela est également constaté au niveau des valeurs maximums. La vitesse du vent maximum pour la simulation va jusqu'à 7,74 m/s alors que pour la station Moufia, elle est de 4,47m/s. Les statistiques vont également démontrées cette incohérence au niveau des données surtout pour la corrélation du modèle WRF avec la station Saint Pierre qui est de 0,26 même si son RMSE indique 2,26 ; une valeur qui est inférieure par rapport à celle du Moufia. Cependant, la corrélation entre le modèle et l'observation au niveau de la station Moufia est de 0,76. Par ailleurs, cette non représentativité du modèle par rapport à la vitesse du vent des stations d'observation s'explique aussi par le fait que le modèle fournit des valeurs du vent à 10 m d'altitude alors que les stations enregistrent les données à moins de 1 m.

L'analyse de la vitesse de vent à Maurice avec les données observées et simulées sont similaires aux constats rencontrés pour les observations à La Réunion. En effet, les données du modèle WRF surestime les données de la station de Vacoas avec un minimum de 0,80 pour la station Vacoas et 1,80 pour le modèle WRF. D'ailleurs, la valeur positive du MBE (1,75) justifie cette surestimation du modèle. Cependant, le modèle sous-estime les données de la station de Maurice avec un maximum de 3,91 si celui de Maurice est de 5,30. De plus, avec une valeur de MBE négative (-1,38), cette sous-estimation du modèle est confirmée.

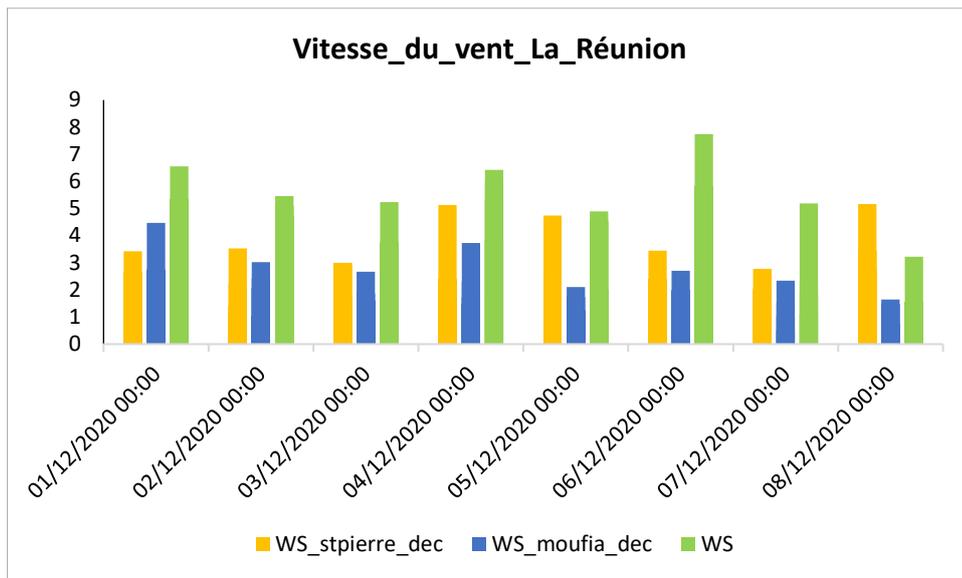


Figure 6: Vitesse du vent La Réunion

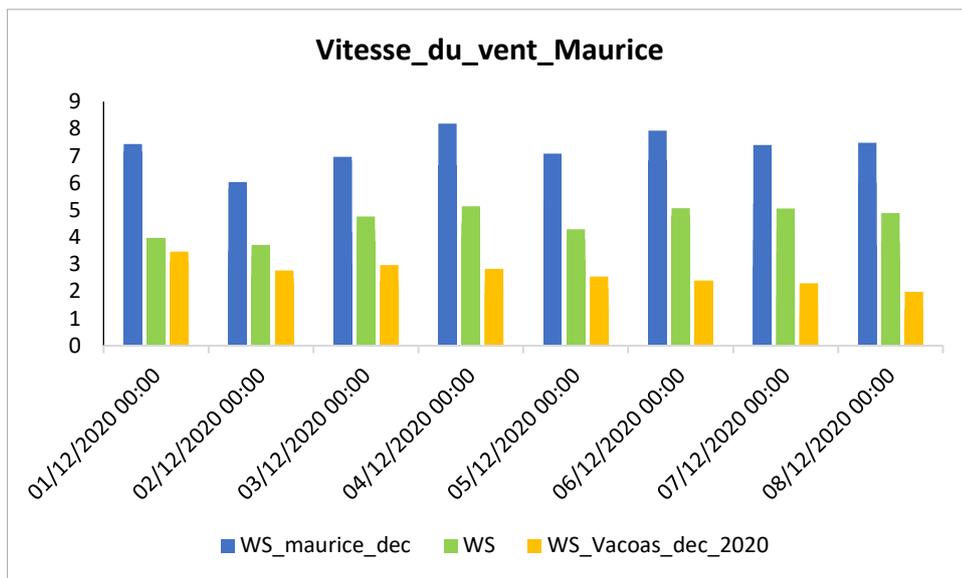


Figure 7: Vitesse du vent Maurice

Tableau 6: Synthèse des paramètres statistiques utilisés pour la vitesse du vent

WS_La_Réunion	RMSE	Corrélation	MBE	Moyenne	Max	Min
Data_station_Moufia	2,4	0,76	1,93	1,87	4,47	0,5
Data_station_StPierre	2,26	0,26	1,13	2,68	5,17	1,13
WRF La Réunion				3,8	7,74	0,6
WS_Maurice	RMSE	Corrélation	MBE	Moyenne	Max	Min
Data_station_Maurice	1,96	0,57	-1,38	5,30	8,19	2,85
Data_station_Vacoas	1,98	0,21	1,75	2,16	3,47	0,8
WRF Maurice				3,91	5,13	1,8

5 Discussions

5.1 Cartographie de différents types de classification

La réalisation des différentes classifications de l'occupation du sol est une étape incontournable pour pouvoir évaluer la différence entre les données d'occupation du sol du modèle climatique avec les données récemment produites. Après différentes manipulations des outils cartographiques, six (6) types de cartes ont pu être produites : 3 cartes de La Réunion et 3 cartes de Maurice à partir des satellites Landsat, Sentinel et MODIS. Afin de déterminer la méthode la plus pertinente pour produire les données d'occupation du sol de ces deux îles, des paramètres statistiques comme l'indice de Kappa et l'indice de précision ont été utilisés à partir de la matrice de confusion. Ainsi, en comparant les images issues de Landsat-8 et de Sentinel-2 sur les zones d'études, il a été constaté que les données d'occupation du sol issues du capteur Sentinel-2 sont plus pertinentes pour refléter la réalité. A part le fait que l'image issue de ce capteur donne une résolution fine de 10 m, l'image permet aussi de mieux distinguer les sols nus des zones forestières et urbaines. Tandis que l'image du Landsat-8 a failli biaisée la classification de La Réunion à cause de la forte présence de nuage au-dessus du volcan. En effet, malgré le fait que des techniques de masque de nuage ont été appliquées, la présence de nuage sur l'image du Landsat-8 a interprété une partie du piton de la Fournaise comme une zone forestière et urbaine. La représentation de la zone urbaine au lieu du volcan s'explique par le fait que la couleur reflétée par les zones urbaines au niveau spatiale est très claire, voir même blanche, ce qui a fait confondre le capteur avec les nuages qui, sont eux aussi de couleur blanche. Concernant Maurice, l'image du Sentinel-2 définit bien la présence du lagon sur les côtes si l'image du Landsat-8 le rend plus ou moins homogène. Tel est aussi le cas entre les zones urbaines et les zones non agricoles qui sont plus ou moins confondues avec l'image du Landsat-8.

Cependant, certains auteurs (Sparfel et al., 2011) dénoncent les limites des méthodes de classification spectrale en soulignant le cas des méthodes d'extraction des informations à partir des images à haute résolution. De plus, d'autres auteurs (Blaschke & Strobl, 2001) stipulent que plus fine est la résolution de l'image, plus grand est l'hétérogénéité des objets à extraire. Ce qui rend les méthodes spectrales de moins en moins performantes (Townshend et al., 2000). Ainsi, l'information spectrale à elle seule ne peut donner une typologie de classification fiable. Ce qui nécessite la prise en compte d'autres paramètres statistiques comme l'indice de Kappa et l'indice de précision. En se référant aux résultats obtenus à partir de l'évaluation de la pertinence de la classification, l'indice de Kappa des images Sentinel-2 est supérieur à 0,96 si pour les images Landsat-8, la valeur maximale est de 0,95. Pour l'indice de précision, la valeur

minimale pour les images Landsat-8 est de 0,950 alors que celle du Sentinel-2 est de 0,966. Les cartes provenant de la classification supervisée de l'occupation du sol sur Sentinel-2 de La Réunion et Maurice reflètent donc plus la réalité par rapport aux autres cartes. Ainsi, nous pouvons dire que la première hypothèse stipulant que la classification supervisée de l'occupation du sol de La Réunion et de Maurice à partir des images Sentinel-2 est une méthode pertinente pour produire les cartes d'occupation du sol de ces îles est vérifiée.

5.2 Analyse des nouvelles données d'occupation du sol

Après la cartographie des différents types de classification d'occupation du sol nouvellement produits, les classifications du sol issues du modèle climatique WRF ont été par la suite générées. En effet, ces dernières sont issues des données IGPB qui datent de 17 ans (2005) tandis que les classifications produites proviennent des données de 2018 à 2021. Suite à l'analyse comparative de l'impact des données d'occupation du sol du modèle WRF avec les données mises à jour, il est montré que les données récemment produites reflètent mieux la réalité que les données déjà intégrées dans le modèle. D'une part, dans le modèle WRF, les zones urbaines sont confondues globalement avec les zones agricoles dans les deux cartes que ce soit pour La Réunion ou pour Maurice. Cela s'explique par le fait que quinze ans auparavant, les territoires n'étaient pas aussi urbanisés et ce sont les zones agricoles qui prédominaient. Par exemple, dans la carte de l'île Maurice (carte 12), seules les grandes villes comme la capitale et les anciennes villes se situant au Centre Ouest de l'île sont reconnues comme zone urbaines par WRF. Alors qu'actuellement, tout le littoral Ouest de l'île est urbanisé. Ce qui montre que les données d'occupation du sol de WRF sous-estiment des catégories importantes dans la classification de l'occupation du sol.

Des résultats similaires ont aussi été relevés par d'autres auteurs dans la région de l'Autriche en 2016. En effet, en travaillant sur de nouvelles données d'occupation du sol dans le modèle WRF, les auteurs ont étudié les changements significatifs dans l'ensemble des données d'occupation du sol utilisées (Schicker et al., 2016). Dans leurs études, ils ont constaté qu'au lieu de classer des régions forestières en " forêt mixte ", les données d'occupation du sol dans WRF les ont classés en " forêt feuillu ". De plus, les zones avec des glaciers, de la roche et une végétation clairsemée sont classées à tort dans la catégorie " toundra boisée " par l'USGS de WRF. Au lieu de cela, la classe "stérile ou à végétation éparse" aurait été plus appropriée. Les zones urbaines sont sous-représentées dans les données de WRF, et seules deux villes, situées dans l'avant pays alpin, sont classées comme urbaines. Ainsi, des changements rapides entre les données d'utilisation des terres et la réalité, comme la diminution des surfaces de glace et de glaciers, rendent l'utilisation des données les plus récentes recommandée (Schicker et al., 2016).

Par ailleurs, (Cheng et al., 2013) à travers leurs recherches, sur les différents modèles d'utilisation et de couverture des sols sur WRF à Taïwan, ont aussi conclu les mêmes analyses que notre étude. Tout d'abord, ils stipulent que les données sur l'utilisation des sols de l'U.S. Geological Survey (USGS) utilisées dans le modèle WRF classent la plupart des types d'utilisation des sols à Taiwan comme des mélanges de cultures irriguées et de forêts, ce qui n'est pas une représentation exacte des conditions réelles. En effet, les principales différences dans la répartition des classes d'occupation du sol entre les ensembles de données étudiées se reflètent dans les catégories des zones urbaines, des terres cultivées et des zones forestières. Pour les données de l'USGS, la couverture des zones urbaines était très faible (0,2%) ; 56% de la zone a été classée en terres cultivées irriguées et 25 % en terres forestières. Inversement, pour les données MODIS de 2001, 17% étaient zone urbaine, 14 % de terres cultivées et 66 % de forêts. Le modèle WRF qui utilise les produits satellitaires MODIS a identifié correctement la plupart des distributions de chaque classe, sauf qu'il représente l'Ouest de Taiwan comme étant extrêmement urbanisé. Par contre, les nouvelles données d'occupation du sol introduites ont donné les résultats suivants : 5 % ont été classés comme zone urbaine, 22 % comme terres cultivées et 65 % comme terres forestières. Ce qui est d'ailleurs le résultat le plus proche de la réalité parmi les données simulées. De ce fait, l'hypothèse 2 selon laquelle les données de l'occupation du sol récemment produites reflètent mieux la réalité par rapport aux anciennes données déjà intégrées dans WRF est vérifiée.

5.3 Performance du modèle climatique régional

Les performances du modèle de prévision météorologique WRF sont évaluées en comparant les données simulées avec les données observées sur différentes stations et en considérant comme variables étudiées l'irradiance, la température et la vitesse du vent. Tout d'abord, l'étude de l'irradiance sur la simulation à La Réunion a montré que les données simulées dans WRF sont fortement corrélées avec les données observées sur les différentes stations. Malgré le fait que WRF surestime en général les valeurs maximales de l'irradiance à La Réunion, une tendance similaire des données est quand même observée. Cette surestimation que fait le modèle WRF par rapport aux stations d'observation est également constatée pour le cas de Maurice. D'ailleurs, les valeurs positives de l'erreur de biais moyen (MBE) justifient cette surestimation du modèle simulé dans chacune des zones d'étude. Toutefois, compte tenu des observations et des résultats statistiques, nous pouvons dire que le modèle WRF peut prédire avec précision l'irradiance à La Réunion et à Maurice.

D'une part, la prédiction de la température sur La Réunion a montré que le modèle sous-estime la température minimale du territoire durant la première semaine du mois de Décembre. La

MBE confirme également cela avec une valeur négative pour toutes les données d'observations. Cette sous-estimation de la température par le modèle peut s'expliquer par le fait que la valeur de la température donnée par le modèle est à 2m. Par ailleurs, cela n'empêche pas une forte corrélation du modèle avec celle des stations, surtout pour la station BSRN. Ainsi, le modèle climatique est fiable pour une prédiction de la température à La Réunion. Pour le cas de Maurice, une grande différence est observée entre la température moyenne du modèle simulé avec celle des stations d'observation mais une forte corrélation entre les modèles est toutefois constatée. En étudiant les résultats obtenus, nous pouvons en conclure que le modèle WRF arrive plus à prédire avec précision la température de la station Vacoas que celle de Maurice.

L'interprétation de la simulation climatique de la vitesse du vent pour La Réunion et pour Maurice est la même. En effet, les données de la vitesse du vent du modèle WRF sont celles collectées à 10m. Cependant, au niveau des stations d'observation les données sont enregistrées bien au-dessous de cette distance. Ce qui explique le fait qu'aucune estimation précise peut être obtenue de la simulation de la vitesse du vent pour ce modèle. D'ailleurs, compte tenu de ce fait, les résultats de cette simulation de la vitesse du vent étaient déjà plus ou moins attendus. Ainsi, même si une faible corrélation des données est obtenue pour les données de WRF avec la station Moufia (pour le cas de La Réunion), nous ne pouvons pas dire que le modèle arrive à prédire avec précision la vitesse du vent dans les deux territoires. De surcroît, la littérature affirme que dans la majorité des simulations WRF observées, le modèle a généralement tendance à surestimer la vitesse du vent (Mohan & Bhati, 2011). Ces auteurs expliquent que la vitesse du vent est considérablement affectée par des fluctuations locales, en particulier dans des conditions très instables comme en été. Ce qui est également la période de la simulation de l'étude ci-présente (mois de Décembre qui est la saison de l'été dans les deux îles étudiées).

D'autre part, une étude similaire à la nôtre a également eu les mêmes résultats sur l'analyse de la température dans un modèle climatique. En effet, (Jiménez-Esteve et al., 2018) ont évalué l'influence de l'occupation du sol et de la topographie dans une zone de terrain complexe en utilisant le modèle WRF. Ainsi, en analysant les températures maximales et minimales, ils ont conclu qu'en général, les températures maximales sont sous-estimées dans toutes les simulations du modèle, d'un ordre de 2 à 3°C. En outre, dans une étude sur les performances de différents modèles de méso-échelle sur la région indienne pendant la mousson en 2008, les chercheurs ont aussi trouvé que le modèle WRF faisait une sous-estimation de la température sur la plupart des régions de l'Inde (Das et al., 2008). Par ailleurs, l'analyse de la performance du modèle WRF à Delhi a observé que le modèle surestimait la température surtout durant la période hivernale (Mohan & Bhati, 2011). De plus, les résultats d'une étude sur WRF à Taiwan

confirme cette observation en stipulant que la comparaison des ensembles de données de surface indique une surestimation de la température par le modèle WRF MODIS (Cheng et al., 2013). Ainsi, après évaluation du modèle par les paramètres climatiques choisis, nous pouvons dire que le modèle WRF peut prédire avec précision l'irradiance et la température à La Réunion et à Maurice mais pas la vitesse du vent. Ainsi, la troisième hypothèse est partiellement vérifiée.

5.4 Limites et perspectives d'amélioration

La simulation du modèle climatique nécessite un espace de stockage énorme, de nombreux processeurs et un RAM puissant. En somme, une machine très performante. C'est pour cela que le modèle a été installé et compilé à l'intérieur du centre de calcul de Bourgogne (C cub). Cependant, l'accès à ce centre est très réglementé et il y a quelques parties dont seulement peu de gens peuvent avoir recours. Au tout début de la prise en main du modèle, l'accès au part026 (AMD Cluster) a toujours été accordé et la simulation fonctionnait très bien. Cependant, depuis le début du mois de Mai 2022, l'accès à cette partie du centre était prohibé ce qui nous a obligé à travailler dans la partie @krenek02 CentOS_Intel64_7.7. Or, cette partie n'a pas accès aux bibliothèques partagées dans le centre (libucp.so.0) et ne pouvait donc pas ouvrir les fichiers d'objets partagés qui sont nécessaires pour le lancement de la simulation. Ainsi, une des limites de l'étude est que les données d'occupation du sol récemment produites n'ont pas encore pu être simulées. Tout cela explique également pourquoi l'analyse de l'impact de l'occupation du sol sur le modèle est restée descriptive. Cependant, quelques résultats ont quand même pu être extraits du modèle même si ceux-ci ne comprenaient que des données d'une semaine. D'ailleurs, à travers la littérature, plusieurs études ont pu évaluer leur modèle en ne s'étalant que sur quelques jours de simulation (Lee et al., 2016).

Toutefois, quelques perspectives d'améliorations sont à envisager. D'une part, une simulation sur une autre saison devrait être lancée afin de mieux différencier la performance du modèle à prédire précisément les paramètres climatiques nécessaires à l'étude, surtout pour la vitesse du vent. En effet, la simulation effectuée dans le cadre de ce mémoire est pour le mois de Décembre 2020 (saison estivale), ainsi une autre simulation pour le mois de Juin (saison hivernal) est à planifier pour les deux zones d'étude. D'autre part, l'intégration de nouvelles variables climatiques est aussi importante pour une évaluation pertinente de notre modèle climatique. De ce fait, la variable direction du vent (WD) pourrait aussi être ajoutée à notre future évaluation. En outre, si l'accès à la bibliothèque partagée au niveau du C cub est accordé, l'introduction d'autres nouvelles données d'occupation du sol dans le modèle serait à envisager pour approfondir l'étude et affiner les résultats obtenus.

6 Conclusion

L'évaluation de l'impact de l'occupation du sol sur la simulation climatique régionale des ressources en énergie solaire et éolienne à La Réunion et à l'île Maurice a requis la cartographie de différents types de classification de l'occupation du sol, une analyse de l'impact de ces données d'occupation du sol et ainsi que l'évaluation de la performance du modèle WRF. Six cartes d'occupation du sol de La Réunion et de Maurice ont été produites en tout avec les images Landsat-8, Sentinel-2 et MODIS LST 1km. Après une observation et une analyse statistique basée sur l'indice de kappa et l'indice de précision, il est montré que les images provenant de la satellite Sentinel-2 sont plus pertinentes pour étudier la classification de l'occupation du sol des deux zones d'études. D'une part, l'analyse comparative des données d'occupation du sol de MODIS dans WRF avec les données d'occupation du sol de MODIS récemment produites a montré que ces dernières reflètent plus la réalité que les données dans le modèle WRF. Les catégories importantes comme la zone urbaine dans la classification de l'occupation sol sont en effet omises par la classification issue du modèle WRF. Cette sous-estimation du modèle pour les classes présentes dans les zones étudiées ne permet pas de refléter la réalité. D'autre part, une comparaison des sorties du modèle WRF avec les données d'observation sur les stations a permis d'évaluer la performance du modèle climatique. Les paramètres statistiques utilisés comme la corrélation r , MBE et RMSE ont permis de confirmer les observations et analyses effectuées au cours de l'étude. Ainsi, après l'évaluation, il est montré que les variables irradiance et température sont celles que le modèle arrive à prédire avec le plus de précision.

Plusieurs défis ont été relevés pour l'accomplissement de ce travail et parmi eux se trouve l'accès au centre de calcul de Bourgogne. Ce dernier est en effet crucial pour le lancement de chaque simulation mais la difficulté d'accès aux bibliothèques partagées a été un obstacle pour pouvoir simuler toutes les données d'occupation du sol déjà produites et transformées pour input dans le modèle. Cependant, l'obtention des résultats antérieurs ont quand même pu permettre de réaliser ce travail selon la méthodologie concertée avec les équipes du projet. En effet, cette étude contribue à la recherche effectuée par le laboratoire Energy-lab (LE2P) dans le cadre du projet *SWIO-Energy*, plus précisément dans l'opération scientifique 1 (OS1) sur la variabilité du gisement solaire et éolien dans la zone du Sud-Ouest de l'Océan Indien. Certes, ce mémoire est encore une étape préliminaire pour l'évaluation de la sensibilité du modèle climatique WRF et des analyses plus approfondies et détaillées sont encore attendues à la fin du travail. Parmi cela figure la considération d'autres paramètres climatiques pour les analyses et les observations et ainsi que la prolongation de la période de simulation tout en considérant deux saisons bien distinctes dans l'année.

7 Références bibliographiques

- Alkaradaghi, K., Ali, S. S., Al-Ansari, N., & Laue, J. (2018). Evaluation of Land Use & Land Cover Change Using Multi-Temporal Landsat Imagery: A Case Study Sulaimaniyah Governorate, Iraq. *Journal of Geographic Information System*, 10(03), 247–260. <https://doi.org/10.4236/jgis.2018.103013>
- Blaschke, T., & Strobl, J. (2001). What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *Geo-Information-Systeme*, 14(6), 12–17.
- Bonnefoy, C., Castel, T., & Madelin, M. (2010). *Evaluation du modèle climatique régional WRF appliqué à la Bourgogne viticole*. 4–6.
- C3S. (2017). *Copernicus Climate Change Service: ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Cheng, F. Y., Hsu, Y. C., Lin, P. L., & Lin, T. H. (2013). Investigation of the effects of different land use and land cover patterns on mesoscale meteorological simulations in the Taiwan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3), 570–587. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0109.1>
- Cretat, J., Pohl, B., & Richard, Y. (2012). Les modèles climatiques régionaux : outils de décomposition des échelles spatio-temporelles. *Dixièmes Rencontres de Théo Quant*, 1–11.
- Das, S., Ashrit, R., Iyengar, G. R., Mohandas, S., Gupta, M. Das, George, J. P., Rajagopal, E. N., & Dutta, S. K. (2008). Skills of different mesoscale models over Indian region during monsoon season: Forecast errors. *Journal of Earth System Science*, 117(5), 603–620. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0056-4>
- Dhodhi, M. K., Saghri, J. A., Ahmad, I., & Ul-Mustafa, R. (1999). D-ISODATA: A Distributed Algorithm for Unsupervised Classification of Remotely Sensed Data on Network of Workstations. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 59(2), 280–301. <https://doi.org/10.1006/jpdc.1999.1573>
- Di Gregorio, Jansen, L. J. M. (2000). Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. *Fao*, 53(January), 179.
- Diédhiou, I., Mering, C., Sy, O., & Sané, T. (2020). Cartographier par télédétection l'occupation du sol et ses changements. *EchoGéo*, 54, 0–41. <https://doi.org/10.4000/echogeo.20510>
- Eurostat. (2001). *Manuel des concepts relatifs aux systèmes d'information sur l'occupation et l'utilisation des sols* (2000th ed.). Européennes, Office des publications officielles des Communautés.
- Gashaw, T., Mebrat, W., Hagos, D., & Nigussie. (2014). Climate Change Adaptation and Mitigation Measures in Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 4(15), 148–152. <http://iiste.org/Journals/index.php/JBAH/article/view/14219>
- Guivarch, C. (2017). *Incertitudes et inerties au coeur de la question climatique : Explorations numériques en économie du changement climatique Céline Guivarch To cite this version : HAL Id : tel-01654151*.
- Gumuchian, H., & Marois, C. (2000). Initiation à la recherche en géographie. In Presses de l'Université de Montréal (Ed.), *Initiation à la recherche en géographie*. <https://doi.org/10.4000/books.pum.14790>

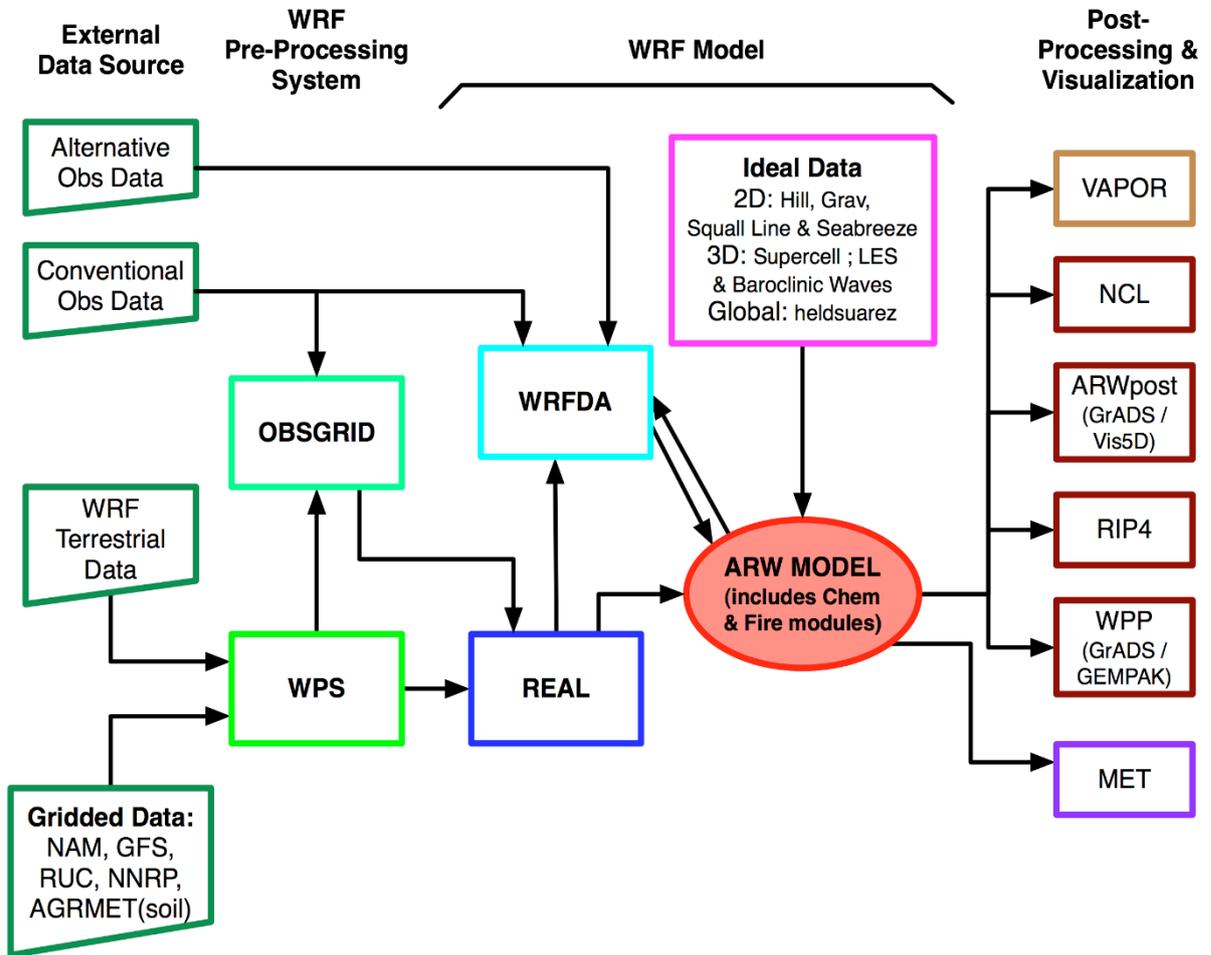
- He, J. J., Yu, Y., Yu, L. J., Liu, N., & Zhao, S. P. (2017). Impacts of uncertainty in land surface information on simulated surface temperature and precipitation over China. *International Journal of Climatology*, 37(March), 829–847. <https://doi.org/10.1002/joc.5041>
- Jain, S., Panda, J., Rath, S. S., & Devara, P. C. S. (2017). Evaluating Land Surface Models in WRF Simulations over DMIC Region. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(18), 1–24. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i18/103522>
- Jiménez-Esteve, B., Udina, M., Soler, M. R., Pepin, N., & Miró, J. R. (2018). Land use and topography influence in a complex terrain area: A high resolution mesoscale modelling study over the Eastern Pyrenees using the WRF model. *Atmospheric Research*, 202(October 2017), 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.012>
- Lee, C. B., Kim, J. C., Belorid, M., & Zhao, P. (2016). Performance evaluation of four different land surface models in WRF. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 10(1), 42–50. <https://doi.org/10.5572/ajae.2016.10.1.042>
- Li, Y., Zhao, C., Zhang, T., Wang, W., Duan, H., Liu, Y., Ren, Y., & Pu, Z. (2018). Impacts of Land-Use Data on the Simulation of Surface Air Temperature in Northwest China. *Journal of Meteorological Research*, 32(6), 896–908. <https://doi.org/10.1007/s13351-018-7151-5>
- Mohan, M., & Bhati, S. (2011). Analysis of WRF Model Performance over Subtropical Region of Delhi, India. *Advances in Meteorology*, 2011, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2011/621235>
- Olauson, J. (2018). ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renewable Energy*, 126, 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056>
- Qu, R., Cui, X., Yan, H., Ma, E., & Zhan, J. (2013). Impacts of land cover change on the near-surface temperature in the North China Plain. *Advances in Meteorology*, 2013, 12. <https://doi.org/10.1155/2013/409302>
- Ratté, K. (1999). Identification de la composante “formations meubles” avec des images RSO de RADARSAT pour la cartographie des districts écologiques de l’île d’Anticosti. *Université de Sherbrooke*.
- Schicker, I., Arnold Arias, D., & Seibert, P. (2016). Influences of updated land-use datasets on WRF simulations for two Austrian regions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128(3), 279–301. <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0416-y>
- Sertel, E., Robock, A., & Ormeci, C. (2010). Impacts of land cover data quality on regional climate simulations. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1942–1953. <https://doi.org/10.1002/joc.2036>
- Skamarock, W. C. ., Klemp, J. B., Dudhia, J. B., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y. ., Wang, W., & Powers, J. G. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. *NCAR Technical Note*, July, 1–165.
- Skamarock, W. C. ., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., & W. (2008). *A description of the Advanced Research WRF Version 3*.
- Sparfel, L., Gourmelon, F., Le, I., Approche, B., Sparfel, L., Gourmelon, F., & Berre, I. Le. (2011). *DES SOLS EN ZONE CÔTIÈRE To cite this version : HAL Id : hal-00559730 APPROCHE ORIENTÉE-OBJET DE L ’ OCCUPATION DES SOLS EN ZONE*.
- Sublemontier, J.-H. (2012). Classification non supervisée : de la multiplicité des données à la multiplicité des analyses. *Université d’Orléans*.
- Teklay, A., Dile, Y. T., Asfaw, D. H., Bayabil, H. K., & Sisay, K. (2019). Impacts of land surface model and land use data on WRF model simulations of rainfall and temperature

- over Lake Tana Basin, Ethiopia. *Heliyon*, 5(9), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02469>
- Thomas, L., Dash, S. K., & Mohanty, U. C. (2014). Influence of various land surface parameterization schemes on the simulation of western disturbances. *Meteorological Applications*, 21(3), 635–643. <https://doi.org/10.1002/met.1386>
- Townshend, J. R. G., Huang, C., Kalluri, S. N. V., Defries, R. S., Liang, S., & Yang, K. (2000). Beware of per-pixel characterization of land cover. *International Journal of Remote Sensing*, 21(4), 839–843. <https://doi.org/10.1080/014311600210641>
- Vignola, F. (2012). GHI correlations with DHI and DNI and the effects of cloudiness on one-minute data. *World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen*, 1(June 2012), 621–626.
- Yhang, Y. Bin, Sohn, S. J., & Jung, I. W. (2017). Application of Dynamical and Statistical Downscaling to East Asian Summer Precipitation for Finely Resolved Datasets. *Advances in Meteorology*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2956373>
- Zu-Heng, H., Zhong-Feng, X., Ning-Fang, Z., Ma, Z. G., & Guo-Ping, L. (2014). Evaluation of the WRF Model with Different Land Surface Schemes: A Drought Event Simulation in Southwest China during 2009–10. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(2), 168–173. <https://doi.org/10.3878/j.issn.1674-2834.13.0079>

ANNEXES

Annexe 1: Organigramme de WRF

WRF Modeling System Flow Chart



Annexe 2: Bandes spectrales des images Landsat-8

Bandes spectrales Landsat-8	Longueur d'onde	Résolution
Bande 1 - Côtier/aérosol	0,433 – 0,453 μm	30 m
Bande 2 - Bleu	0,450 – 0,515 μm	30 m
Bande 3 - Vert	0,525 – 0,600 μm	30 m
Bande 4 - Rouge	0,630 – 0,680 μm	30 m
Bande 5 - Infrarouge proche	0,845 – 0,885 μm	30 m
Bande 6 - Infrarouge à ondes courtes	1,560 – 1,660 μm	30 m
Bande 7 - Infrarouge à ondes courtes	2,100 – 2,300 μm	30 m
Bande 8 - Panchromatique	0,500 – 0,680 μm	15 m
Bande 9 - Cirrus	1,360 – 1,390 μm	30 m
Bande 10 - Infrarouge à grande longueur d'onde	10,30 – 11,30 μm	100 m
Bande 11 - Infrarouge à grande longueur d'onde	11,50 – 12,50 μm	100 m

Annexe 3: Bandes spectrales des images Sentinel-2

Bandes spectrales Sentinel-2	Longueur d'ondes	Résolution
Bande 1 – Aérosol côtier	443.9nm (S2A) / 442.3nm (S2B)	60 m
Bande 2 – Bleu	496.6nm (S2A) / 492.1nm (S2B)	10 m
Bande 3 – Vert	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	10 m
Bande 4 – Rouge	664.5nm (S2A) / 665nm (S2B)	10 m
Bande 5 – Végétation "red edge"	703.9nm (S2A) / 703.8nm (S2B)	20 m
Bande 6 – Végétation "red edge"	740.2nm (S2A) / 739.1nm (S2B)	20 m
Bande 7 – Végétation "red edge"	782.5nm (S2A) / 779.7nm (S2B)	20 m
Bande 8 – PIR	835.1nm (S2A) / 833nm (S2B)	10 m
Bande 8A – PIR "étroit"	864.8nm (S2A) / 864nm (S2B)	20 m
Bande 9 – Vapeur d'eau	945nm (S2A) / 943.2nm (S2B)	60 m
Bande 10 – SWIR – Cirrus	1373.5nm (S2A) / 1376.9nm (S2B)	60 m
Bande 11 – SWIR	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	20 m
Bande 12 – SWIR	2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)	20 m

Annexe 4: Fichier namelist.wps

```
OpenSSH SSH client
GNU nano 2.3.1 Fichier: namelist.wps
##### namelist.wps for SWIO-Energy #####
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 3,
start_date = '2020-12-01_00:00:00','2020-12-01_00:00:00','2020-12-01_00:00:00','2020-12-01_00:00:00'
end_date = '2020-12-21_18:00:00','2020-12-21_18:00:00','2020-12-21_18:00:00','2020-12-21_18:00:00'
interval_seconds = 21600, ! in second
active_grid = .true., .true., .true., .true., ! optional namelist option:
io_form_geogrid = 2, ! 2 = NetCDF
debug_level = 0
/

&geogrid
parent_id = 1, 1, 2, 3,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3, 3,
i_parent_start = 1, 135, 58, 100, ! lon
j_parent_start = 1, 60, 40, 100, ! lat
e_we = 301, 241, 361, 31, !
e_sn = 226, 181, 271, 31, !
!

geog_data_res = 'default','default','default','default',
dx = 9000,
dy = 9000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat = -18.65,
ref_lon = 54.50,
truelat1 = -18.65,
truelat2 = -54.50, ! only for Lambert conformal projection
stand_lon = 54.50,
geog_data_path = '/work/crct/bmo12135/dossiermi/wrf/WPS_GEOG',
opt_geogrid_tbl_path = '/work/crct/bmo12135/dossiermi/wrf/WPS-4.2/geogrid/'
/

&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/

&metgrid
fg_name = 'FILE'
io_form_metgrid = 2, ! 2 = NetCDF
! opt_output_from_metgrid_path = './output',
! opt_metgrid_tbl_path = '/work/crct/imi21184/wrf/WPS/metgrid/',
/

&mod_levs
press_pa = 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20,
30, 50, 70, 100, 125, 150, 175,
200, 225, 250, 300, 350, 400, 450,
500, 550, 600, 650, 700, 750, 775,
800, 825, 850, 875, 900, 925, 950,
975, 1000
/
```

Annexe 5: Fichier namelist.input

```

GNU nano 2.3.1 Fichier: namelist.input

&time_control
run_days = 0, ! not domain-dependent. ignored by real.exe
run_hours = 0, !
run_minutes = 0, !
run_seconds = 0, !
start_year = 2020, 2020, 2020, 2020, ! okay for a nest start time to be later than its parent domain.
start_month = 12, 12, 12, 12, !
start_day = 01, 01, 01, 01, !
start_hour = 00, 00, 00, 00, !
start_minute = 00, 00, 00, 00, !
start_second = 00, 00, 00, 00, !
end_year = 2020, 2020, 2020, 2020, !
end_month = 12, 12, 12, 12, !
end_day = 21, 21, 21, 21, !
end_hour = 18, 18, 18, 18, !
end_minute = 00, 00, 00, 00, !
end_second = 00, 00, 00, 00, !
interval_seconds = 21600, ! be the interval between the lateral boundary condition file (in seconds)
input_from_file = T, T, T, T, ! for real.exe program to create wrfinput_d0
history_interval = 360, 360, 360, 360, ! history output interval in minutes, can be different for different domains
frames_per_output = 120, 120, 120, 120, ! 120 ~ monthly output file
restart = F, !
restart_interval = 1440, ! in minutes, 1440 ~ 1 day,
io_form_history = 2, ! 2=netCDF
io_form_restart = 2, !
io_form_input = 2, !
io_form_boundary = 2, !
io_form_auxinput4 = 2, !
iofields_filename = "myout_d01.txt", "myout_d02.txt", "myout_d03.txt", "myout_d03.txt",
auxhist2_outname = "addout_d<domain><date>.nc", ! file name for extra output to write variables in output other than
! the history file requires ! Registry.EM file change
auxhist2_interval = 60, 60, 60, 60, ! interval in minutes
frames_per_auxhist2 = 720, 720, 720, 720, ! number of output times in this file
io_form_auxhist2 = 2, ! 2 = netCDF
auxinput4_inname = "wrfowinp_d<domain>" ! For SST updating (only with sst_update=1)
auxinput4_interval = 360, 360, 360, 360, ! every 6 hour
output_diagnostics = 0, ! set to = 1 to add 36 surface diagnostic arrays (max,min,mean,std)
!B
auxhist3_outname = "wrfxtrm_d<domain><date>.nc", ! file name for added diagnostics
io_form_auxhist3 = 2, !
auxhist3_interval = 1440, 1440, 1440, 1440, ! minutes between outputs (1440 gives daily max,min)
frames_per_auxhist3 = 18600, 18600, 18600, 18600, !
debug_level = 0, !
/

&domains
time_step = 54, ! see parent_time_step_ratio, 6*dx in km, evenly divides into history_interval
max_dom = 3, ! number of domains - set it to > 1 if it is a nested run
e_we = 301, 241, 361, 31, !
e_sn = 226, 181, 271, 31, !
e_vert = 37, 37, 37, 37, !
num_metgrid_levels = 38, !
num_metgrid_soil_levels = 4, ! number of vertical soil levels or layers input
dx = 9000., 3000., 1000., 1000., ! resolution in meter
dy = 9000., 3000., 1000., 1000., !
grid_id = 1, 2, 3, 4, !
parent_id = 1, 1, 2, 3, !
i_parent_start = 1, 135, 58, 100, !
j_parent_start = 1, 60, 40, 100, !
parent_grid_ratio = 1, 3, 3, 3, !
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3, 3, !
feedback = 0, !
smooth_option = 0, ! if feedback is on (feedback = 1), typically recommended to keep 0.
smooth_cg_topo = .true.
nproc_x = 4, ! number of processors in x for decomposition
nproc_y = 4, ! number of processors in y for decomposition
! -1: code will do automatic decomposition
! >1: for both: will be used for decomposition
/

&physics
physics_suite = 'CONUS',
mp_physics = 10, 10, 10, 10, ! MDM
ra_lw_physics = 4, 4, 4, 4, ! rrtmg scheme
ra_sw_physics = 4, 4, 4, 4, ! rrtmg scheme
radt = 9, 3, 1, 1, ! minutes between ra calls
sf_sfclay_physics = 1, 1, 1, 1, ! Monin-Obukhov Similarity scheme
sf_surface_physics = 5, 5, 5, 5, ! CLM
bl_pbl_physics = 1, 1, 1, 1, ! YSU
bldt = 0, 0, 0, 0, !
cu_physics = 1, 0, 0, 0, ! KF, turn off CU when reso < 5km
cudt = 0, 0, 0, 0, !
cugd_avedx = 1, ! number of grid boxes over which subsidence is spread:
! 1, default, for large grid distances;
! 3, for small grid distances (DX < 5 km)
kfeta_trigger = 2, ! KF trigger option (cu_physics=1 only)
isfflx = 1, ! heat and moisture fluxes from the surface
icloud = 1, ! cloud effect to the optical depth in radiation
! (only works for ra_sw_physics = 1,4 and ra_lw_physics = 1,4)

```

```

surface_input_source = 1, ! 1 = with cloud effect, and use cloud fraction option 1 (Xu-Randall method)
! where landuse and soil category data come from:
! 1 = WPS/geogrid but with dominant categories recomputed
! 2 = GRIB data from another model (only possible
! (VEGCAT/SOILCAT are in met_em files from WPS)
! 3 = use dominant land and soil categories from WPS/geogrid (default since 3.8))

num_soil_layers = 3,
sf_urban_physics = 0, 0, 0, 0, ! activate urban canopy model (in Noah and Noah-MP LSMs only)
maxiens = 1,
maxens = 3,
maxens2 = 3,
maxens3 = 16,
ensdim = 144,
num_land_cat = 21,
mp_zero_out = 0, ! no action taken, no adjustment to any moist field
usemonalb = F, ! use monthly albedo map instead of table value
sst_update = 0, ! (must be set to true for MMM, and recommended for sst_update=1)
! time-varying sea-surface temp (0=no, 1=yes). If selected real
! puts SST, XICE, ALBEDO and VEGFRA in wrflowinp_d01 file, and wrf updates
! these from it at same interval as boundary file. Also requires
! namelists in &time_control: auxinput4_interval, auxinput4_end_h,
! auxinput4_inname = "wrflowinp_d<domain>",
! and in V3.2 io_form_auxinput4

/

&dynamics
w_damping = 1, ! vertical velocity damping flag (for operational use)
diff_opt = 1, 0, 0, 0, ! turbulence and mixing option:
km_opt = 4, 4, 4, 4, ! eddy coefficient option
diff_6th_opt = 2, 0, 0, 0,
diff_6th_factor = .12, .12, .12, .12,
epssm = .2, .2, .2, .2, ! time off-centering for vertical sound waves
base_temp = 290.,
damp_opt = 0,
zdamp = 5000., 5000., 5000., 5000.,
dampcoef = 0.01, 0.01, 0.01, 0.01,
khdif = 0, 0, 0, 0,
kvdif = 0, 0, 0, 0,
non_hydrostatic = T, T, T, T,
moist_adv_opt = 1, 1, 1, 1,
scalar_adv_opt = 1, 1, 1, 1,

/

&bdy_control
spec_bdy_width = 5,
spec_zone = 1,
relax_zone = 4,
specified = T, F, F, F,
nested = F, T, T, T,

/

&grib2

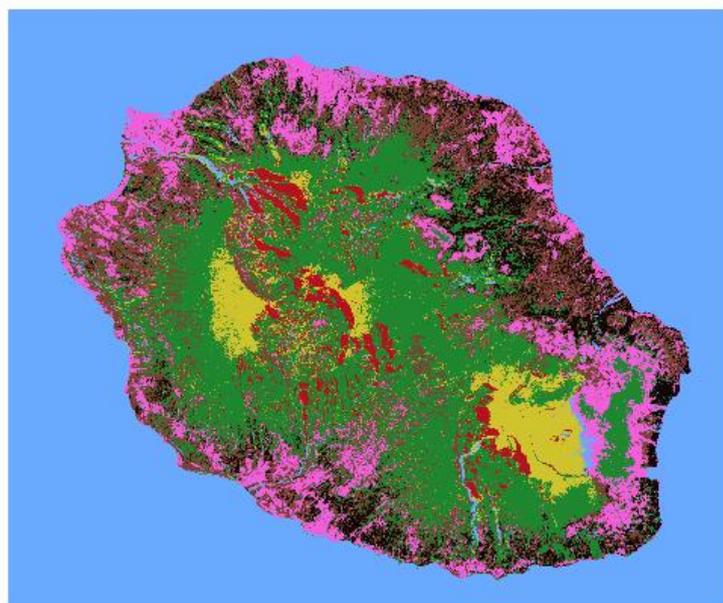
/

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,

/

```

Classification supervisée de La Réunion sur Landsat 8



Légendes

Classification La Reunion Landsat8

- zone urbaine
- zone forestière
- eau
- zone_non_cultivée
- zone_cultivée
- sol_nu
- zone_d_ombre

0 7,5 15 km



Classification supervisée de La Réunion sur Sentinel-2



Légendes

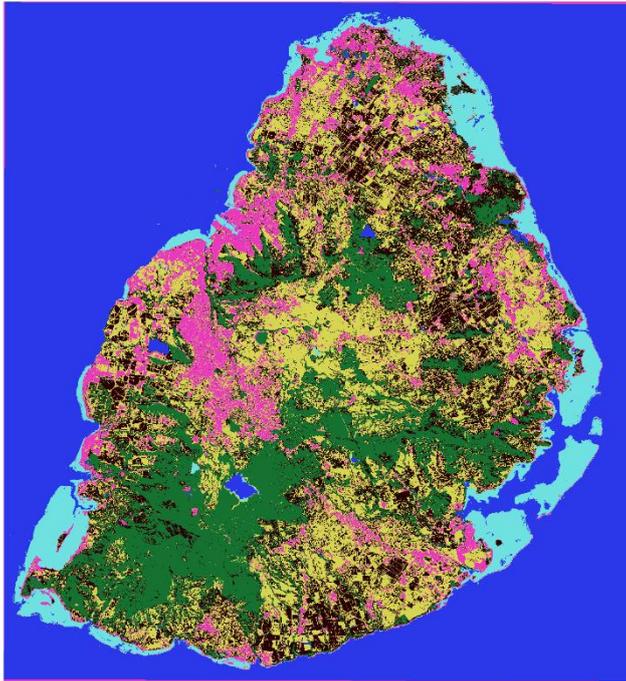
Classification La Reunion Sentinel2

- zone_urbaine
- zone_forestière
- eau
- zone_non_cultivée
- zone_cultivée
- sol_nu
- ambre

0 5 10 km



Classification supervisée de Maurice sur Landsat 8



LEGENDS

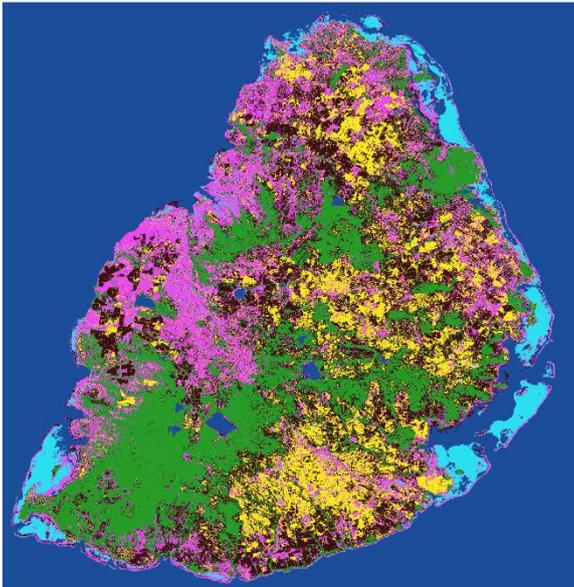
Maurice Classification supervisée L8

- zone_urbaine
- zone_forestière
- eau
- lagon
- zone_cultivée
- zone_non_cultivée

0 250 500 km



Classification supervisée de Maurice sur Sentinel-2



Légendes

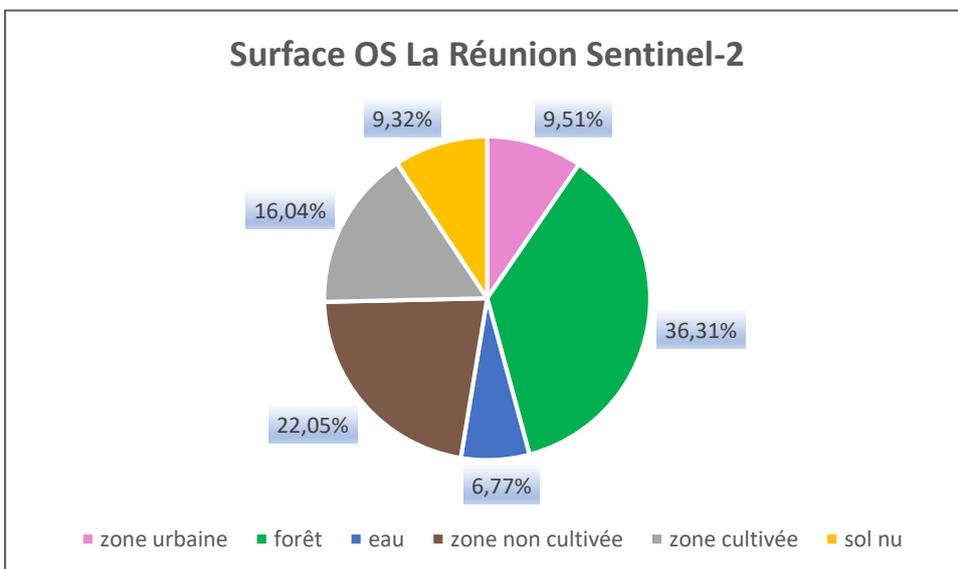
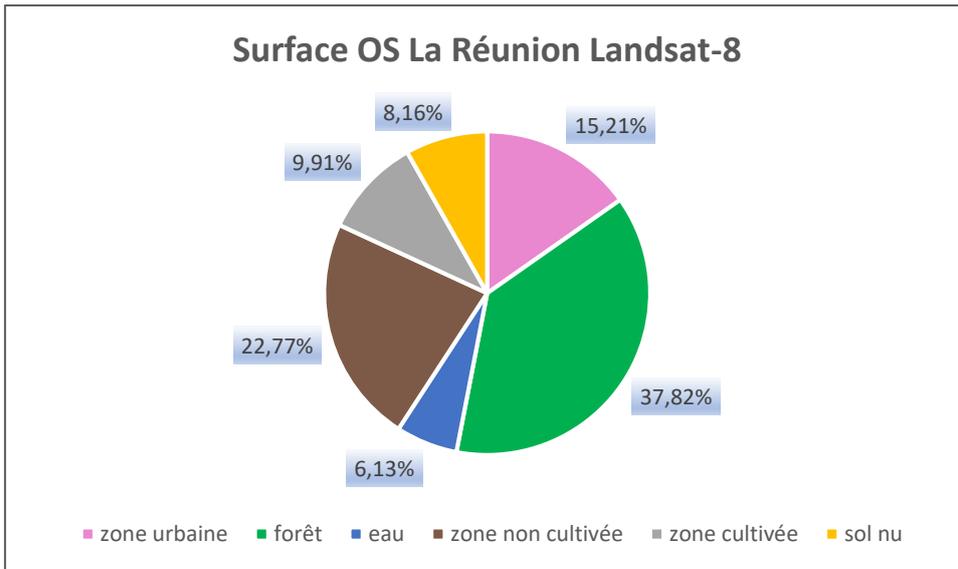
classification Maurice S2 nouv 2018 - 2021

- zone_urbaine
- zone_forestière
- eau
- lagon
- zone_cultivée
- zone_non_cultivée

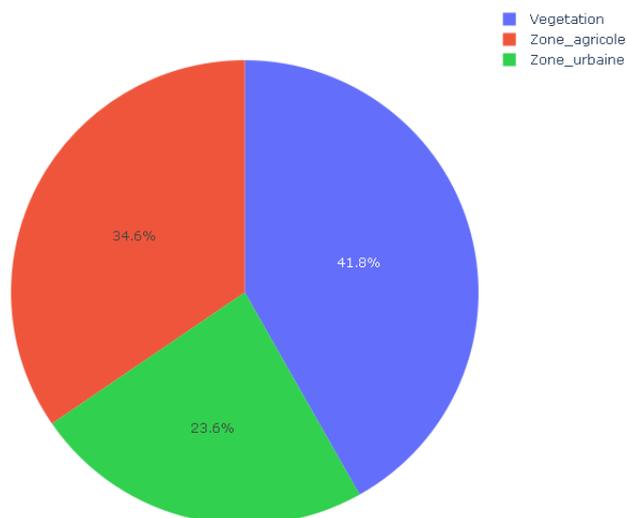
0 7,5 15 km



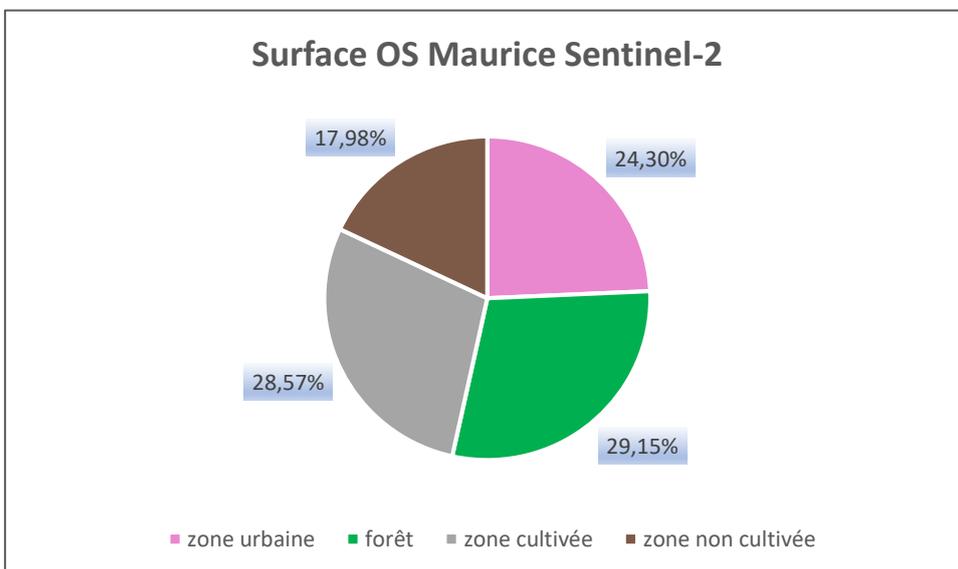
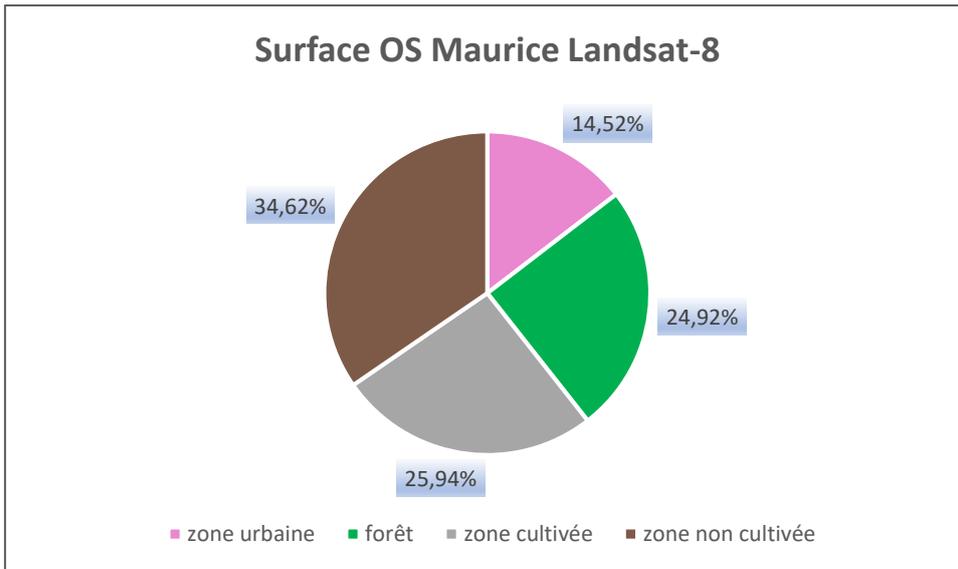
Annexe 7: Superficie de chaque classe pour La Réunion



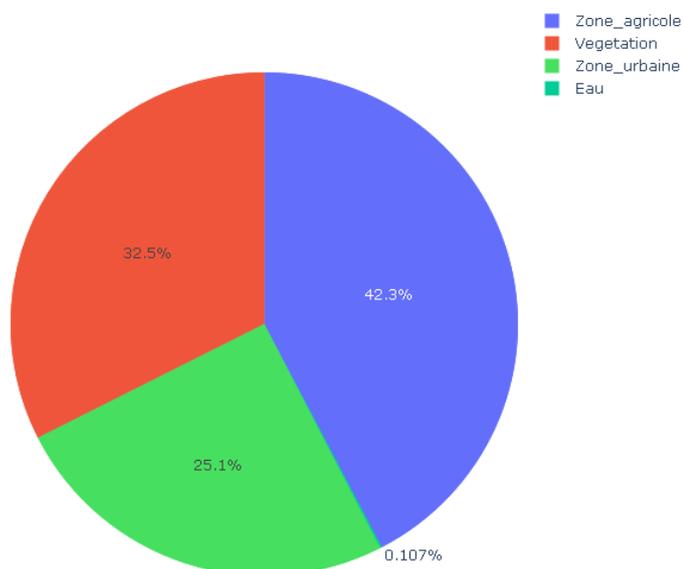
Surface d'occupation sol La Réunion (avec Modis)



Annexe 8: Superficie de chaque classe pour Maurice



Surface d'occupation du sol Maurice (avec Modis)



TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
PREAMBULE	ii
RESUME	iii
<i>ABSTRACT</i>	iii
SOMMAIRE	iv
LISTE DES ANNEXES	v
LISTE DES CARTES	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ACRONYMES	vii
1 Introduction	1
2 Concepts et état de l'art	4
2.1 Définition des concepts	4
2.1.1 Imagerie spatiale	4
2.1.2 Occupation du sol	4
2.1.3 Modèle Climatique Régional	5
2.1.4 Weather Research Forecasting	5
2.1.5 Irradiance Horizontale Globale (GHI)	6
2.1.6 Vitesse du vent	7
2.1.7 Température à 2 m	7
2.2 Etat de l'art	8
2.2.1 Application des modèles de surface terrestre sur WRF	8
2.2.2 Evaluation de la performance d'un modèle climatique	9
3 Matériels et méthodes	10
3.1 Cadrage de l'étude	10
3.2 Zones d'étude	11
3.3 Données utilisées	13
3.3.1 Données pour la classification de l'occupation du sol	13
3.3.1.1 Sentinel-2	13
3.3.1.2 Landsat-8	13
3.3.1.3 MODIS	14
3.3.2 Données utilisées pour la simulation climatique	14
3.3.2.1 Données ERA5	14

3.3.2.2	Données MODIS dans WRF	15
3.3.2.3	Données d'observation sur les stations	15
3.4	Outils.....	16
3.4.1	Outils pour la cartographie	16
3.4.2	Outils pour la simulation climatique	16
3.5	Méthodes de classification adoptées	17
3.5.1	Classification non supervisée	17
3.5.2	Classification supervisée	18
3.5.3	Validation de la précision de la classification	19
3.5.3.1	Matrice de confusion.....	19
3.5.3.2	Coefficient de kappa.....	19
3.6	Configuration du modèle WRF.....	20
3.7	Evaluation du modèle	21
4	Résultats	22
4.1	Classification et cartographie de l'occupation du sol	22
4.1.1	Classification de l'occupation du sol de l'île de La Réunion.....	22
4.1.2	Classification de l'occupation du sol de l'île Maurice	24
4.2	Analyse de l'impact des données d'occupation du sol dans le modèle	27
4.2.1	Classification de l'occupation du sol avec MODIS.....	27
4.2.2	Comparaison des classifications de l'occupation du sol	28
4.3	Evaluation de la performance du modèle climatique.....	30
4.3.1	Pré-traitement des données d'entrées dans le modèle	30
4.3.2	Analyse des sorties du modèle WRF avec les données d'observation	31
4.3.2.1	Analyse de l'irradiance.....	31
4.3.2.2	Analyse de la température	33
4.3.2.3	Analyse de la vitesse du vent	35
5	Discussions	37
5.1	Cartographie de différents types de classification	37
5.2	Analyse des nouvelles données d'occupation du sol	38
5.3	Performance du modèle climatique régional	39
5.4	Limites et perspectives d'amélioration	41
6	Conclusion.....	42
7	Références bibliographiques.....	I
	ANNEXES	IV
	TABLES DES MATIERES	XIII