



HAL
open science

Variabilité spatio-temporelles des précipitations à La Réunion et impact sur la végétation

Mathilde André

► **To cite this version:**

Mathilde André. Variabilité spatio-temporelles des précipitations à La Réunion et impact sur la végétation. Climatologie. 2014. dumas-01110445

HAL Id: dumas-01110445

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01110445>

Submitted on 28 Jan 2015

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.

MASTER 2

Domaine : Sciences Humaines et Sociales

Mention : Sciences du Territoire

**Spécialité Recherche :
Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement**

en réseau sur Rhône-Alpes

VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS A LA REUNION ET IMPACT SUR LA VEGETATION

réalisé la station Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite dans
l'Océan Indien (SEAS-OI) - IRD - Université de la Réunion - Région Réunion - État
français

Mémoire soutenu le : 8 septembre 2014

devant un jury composé de :

Responsable : M. Bigot Sylvain (Professeur, UJF, LTHE)
Maître de stage : M. Brou Yao Télésphore (Professeur, UR, ESPACE-DEV)
Examinatrice : Mme. Rome Sandra (Maître de conférences, UJF, LTHE)

ANDRE Mathilde
M2 STADE
ANNEE 2013-2014

Établissements partenaires :

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de mémoire, Sylvain Bigot, pour sa confiance, ses conseils et son aide tout au long du stage. Mes remerciements vont ensuite à Téléphore Brou, mon maître de stage, pour m'avoir accueillie au sein de la station SEAS-OI et même prêté son grand bureau et son ordinateur, pour son aide et sa confiance malgré tous les problèmes rencontrés au début du stage, et pour sa bonne humeur et sa gentillesse. Enfin, je remercie également Pierre Tessier, directeur du pôle SEAS-OI, et Aurélie Sand, directrice scientifique de SEAS-OI, pour leur accueil et leur disponibilité.

Merci aux autres membres de la station (je vais procéder par bureau pour n'oublier personne, et en commençant par les bureaux du bout du couloir, trop souvent délaissés) : Thibault, Nathalie, Vincent, Christophe, Erwann, Stéphanie (sosie de goûts vestimentaires), Guy (courage pour ta thèse, tu vaincras), Etienne, Hanitra, Evelyne (du courage à toi aussi), mention spéciale pour Mamy, toujours présent pour aider (même pour chasser les babouk des toilettes) malgré ses tee-shirts dissuasifs, Stéphane (à qui les lunettes géantes bleues vont très bien au teint), Didier, Nicolas et Julien (grand maître des images satellite).

Je remercie ensuite tous mes collègues de bureau stagiaires, alias « les copains » : Emmanuelle, j'espère pouvoir venir à Lyon afin de te soutenir en cette difficile année, quelle amie géniale je fais. Sabine, chère partenaire de bus, je t'attends pour que l'on traverse ensemble la France en transports en commun. Ophélia, merci pour ta crème solaire et l'auto-bronzant, et pour les sorties terrain au fin fond des montagnes, et toutes les autres petites virées. Annabelle, nous continuons de nous soutenir mutuellement face à la disparition soudaine des autres stagiaires et je suis heureuse que tu sois ici avec moi, Annabelle, ici à la fin de toutes choses. Artadji, merci d'avoir partagé avec nous ta culture et de nous avoir préparé à manger, j'espère que tu m'inviteras à ton grand mariage et que ce sera le plus grand des grands mariages. Issam, même si tu n'aimes pas manger des crêpes le midi, tu es un bon camarade. Julien, tu as battu les réunionnais dans une certaine émission que je ne citerai pas mais tu as partagé avec nous quelques gâteaux bretons, donc tu es un bon camarade aussi. Lucas, merci d'avoir partagé avec nous ta belle maison et aussi Roquette (comme la salade ?).

Pour finir, je remercie mes parents, qui m'ont logée mais aussi nourrie, et surtout, qui m'ont toujours accordé leur confiance et leur soutien. Merci à ma mère pour les très belles photos de la végétation réunionnaise. Merci à mon frère qui a toujours trouvé un moment pour jouer de la basse, guitare ou tambour pendant que j'essayais de travailler chez moi et merci à ma sœur qui a bien fait la fête pendant que j'étais obligée de me coucher avant 22h chaque soir. Et enfin, merci à Clément, pour m'avoir permis de recharger les batteries efficacement.

Préambule

Le stage de Master 2 s'est déroulé à l'Île de la Réunion, au sein de la station de Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite dans l'Océan Indien (SEAS-OI).

Ce travail a été rendu possible par Météo-France qui a fourni les données de précipitations, de température et d'humidité relative de l'air.

La station SEAS-OI constitue un pôle d'excellence en télédétection et est mis en place par l'Institut de Recherche pour Développement (IRD), la Région Réunion, l'Université de La Réunion et l'État Français. Le pilotage scientifique de la station est assuré par l'UMR 228 ESPACE-DEV (IRD, UM2, UAG, UR).

Basée à Saint-Pierre, au sud de l'île, SEAS-OI vise à acquérir, traiter et diffuser des images satellites pour aider à la connaissance, l'analyse et la gestion intégrée de l'environnement dans les territoires du sud-ouest de l'Océan Indien.



Figure : Cercle d'acquisition des images.

Source : www.seas-oi.org

La station reçoit ainsi des images de l'ensemble des îles du bassin ouest de l'Océan Indien, d'une partie de la façade est de l'Afrique australe dont le sud-ouest de la Tanzanie, une grande partie du Mozambique et du Swaziland (figure ci-contre).

SEAS-OI constitue un outil d'appui à la recherche scientifique et à la formation dans le domaine de l'environnement d'une part et un outil d'aide à la décision au service de l'aménagement du territoire d'autre part.

De plus, la station travaille en partenariat avec de nombreux laboratoires de recherche ou

établissements publics au niveau local et régional : le Parc National de la Réunion (PNR), le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), l'Office National des Forêts (ONF), l'université de Tananarive, l'IGN de Madagascar... Elle collabore avec les universités sud-africaines de Durban et de Stellenbosch.

Résumé

L'île de la Réunion, située dans le sud-ouest de l'Océan Indien, est soumise à un contexte climatologique varié, fragilisé par les conséquences du réchauffement climatique. Plusieurs microclimats existent à cause du relief accidenté et des différences d'exposition aux alizés orientés Est-ouest.

L'objectif premier de l'étude est de caractériser la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie à La Réunion. Les résultats des tests de détection de rupture appliqués aux séries pluviométriques et les indices de sécheresse calculés mettent en évidence deux situations géographiques contrastées. À l'ouest de l'île (côte sous le vent), la rupture dans les séries pluviométriques s'est produite entre 1980 et 1989 et est marquée par une baisse importante des hauteurs annuelles (entre 14 et 32%). En revanche, à l'est, les dates de rupture sont variables (1968-1972, principalement) avec de faibles baisses des hauteurs pluviométriques annuelles, certaines stations enregistrant même des hausses. Ce déséquilibre entre le climat de la côte au vent et celui de la côte sous le vent est exacerbé par l'observation de la durée de la saison des pluies. Dans l'ouest de l'île, elle est très courte, particulièrement depuis les années 2006. Au contraire, dans l'est de l'île, la saison des pluies est difficile à distinguer de la saison sèche tant les précipitations sont importantes tout au long de l'année.

Cette variabilité spatio-temporelle des pluies a un impact sur la végétation de l'île, dont les surfaces de forêt et de prairie sont en constante diminution. Le second objectif a donc été de mesurer la co-variation entre les variables « pluie » et « NDVI ». L'archivage et le suivi à l'échelle saisonnière du NDVI du capteur MODIS en relation avec les données de pluie sur la période 2000-2013 montrent que les ensembles végétatifs de l'ouest de l'île, régulièrement soumis au stress hydrique, réagissent bien aux variations de pluviométrie. Ceux de l'est de l'île en revanche sont moins sensibles à une diminution ou une augmentation du cumul des pluies. Toutefois, les coefficients de corrélation obtenus sont de moyenne intensité, leur valeur maximale variant entre 0,3 et 0,4. Néanmoins, les analyses multivariées ont montré que la valeur de ces coefficients est principalement due au paysage très hétérogène de La Réunion.

Mots clés : Variabilité climatique, pluviométrie, microclimats, NDVI, Île de la Réunion, MODIS.

Abstract

Reunion Island is located in the southwest Indian Ocean with a diverse climatological context weakened by the consequences of global warming. The rugged terrain and the exposure to the east-west trade winds explain the abundance of microclimates on the island.

The first objective of this study was to attempt to characterize the spatiotemporal variability of rainfall in La Reunion. The results of the identification of discontinuities in rainfall data series and drought indices highlight two different geographic situations. On the west, leeward coast, discontinuity in the rainfall series occurred between 1980 and 1989. It shows a significant decline in annual rainfall amounts (between 14 and 32%). On the east, windward coast, the discontinuities dates are variables (mainly between 1968 and 1972). There is only a small decrease or even an increase in the annual rainfall amounts. By observing the length of the rainy season, the imbalance between the windward coast's climate and the leeward coast's is extended. It is very short on the west coast since 2006 whereas the rainy season is difficult to separate from the dry season on the east coast because of the very important rainfall amounts throughout the year.

As the areas of forest and grassland are falling steadily, a study of the impact of the rainfall spatiotemporal variability has to be done. Consequently, the second objective of this study was to measure of the co-variation between "rain" and "NDVI". We used remote sensing methods using MODIS low-resolution images from 2000 to 2013. Results show that vegetative sets on the west of the island, which are often affected the water stress, respond well to rainfall changes. However, those on the east coast are less sensitive to a decrease or an increase in rainfall amounts. Nevertheless, the correlation coefficient have medium intensity with a maximum value ranging from 0,3 to 0,4. Yet, a multivariate analysis shows that the value of these coefficients is mainly due to the heterogeneous landscape of La Reunion.

Key words: Climate variability, rainfall, microclimates, NDVI, Reunion Island, MODIS.

Liste des acronymes, sigles et abréviations

ACP : Analyse en Composante Principale

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CLC : Corine Land Cover

CUSUM : Cumulative Sum

DGEC : Direction Générale de l'Energie et du Climat

GloVis : Global Visualization Viewer (GloVis)

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index ou indice de végétation par différence normalisé

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

ONERC : Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer

PMT : Penalized Maximal T-test

SEAS-OI : Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite dans l'Océan Indien

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

TSM : Température de Surface de la Mer

USGS : United States Geological Survey

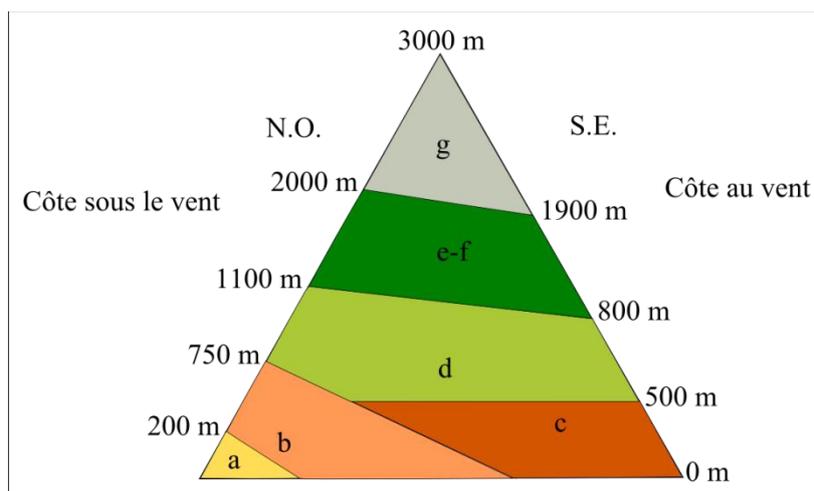
ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

Sommaire

Remerciements	1
Préambule.....	3
Résumé.....	4
Abstract	5
Liste des acronymes, sigles et abréviations.....	6
Introduction	8
1. Données et méthodes.....	13
1-1. Données.....	13
1-2. Méthode.....	17
2. Résultats	21
2-1. Variabilité spatio-temporelle des précipitations.....	21
2-2. Impact de la variabilité pluviométrique sur la végétation	29
2-3. Analyse en composante principale de la variabilité du NDVI.....	37
3. Discussion et conclusion	40
Bibliographie	45
Webographie :	46
Tables des figures.....	46
Tables des tableaux	48
Tables des équations.....	48
Tables des matières	49
Tables des annexes	50
Annexes.....	51

Introduction

L'île de La Réunion est composée de plusieurs régions climatiques sur un territoire d'une superficie de 2512 km² qui ont chacune une variabilité propre et des milieux naturels associés. En effet, l'étude du Parc National de la Réunion (Robert 2009) rend notamment compte de la diversité et de la fragilité de la végétation réunionnaise, à 46,3% endémique. Cette diversité est illustrée par le schéma ci-dessous (Figure 1) qui présente l'étagement de la végétation selon l'étude de Cadet (1977) en fonction de la situation géographique suivant un transept « Sud-est – Nord-ouest ».



Etagement de la végétation	
a	Série mégatherme xérophile (savane)
b	Série mégatherme semi-xérophile
c	Série mégatherme hygrophile de basse altitude
d	Série mégatherme hygrophile de moyenne altitude
e-f	Série mésotherme hygrophile
g	Végétation éricoïde oligotherme d'altitude

Figure 1 : Schéma de l'étagement de la végétation à La Réunion. Source : Cadet (1977)

L'étude que l'on réalise ici se situe dans la continuité des travaux menés par Météo France à La Réunion sur le contexte climatique et la variabilité des indicateurs climatiques tels que les précipitations, la température, l'humidité et les vents (Jumaux, Quetelard, and Roy 2011). La Réunion étant située dans la partie sud-ouest de l'océan Indien, elle bénéficie, tout comme ses voisines Madagascar, l'île Maurice et Rodrigues, d'un climat tropical océanique. Comme dans toutes les régions tropicales, la pluviométrie est la variable climatique la plus discriminante. L'étude se focalisera donc sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations, à l'origine d'évènements extrêmes qui ont marqué La Réunion. On note par exemple l'année 1993, laquelle, déjà marquée par de fortes précipitations lors du passage du cyclone Colina en janvier, présente une pluviométrie exceptionnelle en saison des pluies avec des records allant de 122 millimètres de pluie en une heure dans l'est (station de Saint-Benoît), jusqu'à 4834 millimètres de pluie en sept jours en passant par 3000 millimètres en deux jours (Barcelo, Robert, and Coudray 1997; Lorion 2006). A l'inverse, La Réunion a connu des situations de sécheresse sans précédent. C'est le cas de la récente sécheresse de

2011, marquée par un déficit de 13% du bilan hydrique par rapport à la normale 1981-2010, ce qui classe cette année comme étant la quatorzième plus sèche depuis 1970 (Badat et al. 2012).

Il existe toutefois une forte régionalisation des pluies avec des inégalités de précipitations marquées selon que l'on se situe sur la côte au vent ou sur la côte sous le vent (Jumaux, Quetelard, and Roy 2011). En effet, la principale conclusion de l'étude de Météo-France est que la côte sous le vent, plus particulièrement le littoral ouest, connaît un fort déficit pluviométrique par rapport à l'est de l'île exposé aux alizés (Figure 2).

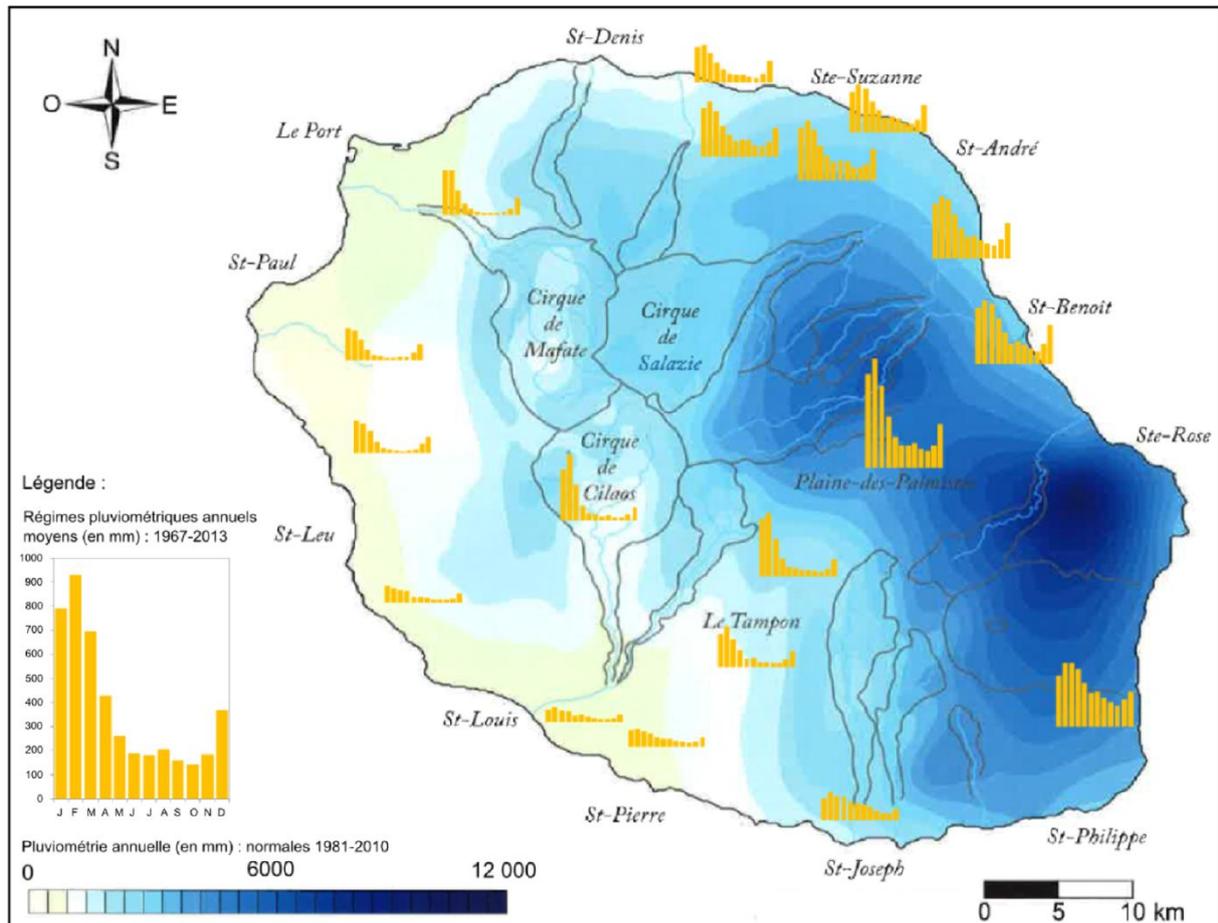


Figure 2 : Carte représentant les régimes pluviométriques annuels moyens (1967-2013) de 18 stations et la pluviométrie annuelle moyenne (en mm) à partir des normales de 1981-2010. Source : M. André, adapté de Jumaux, Quetelard et Roy (2011)

L'île de la Réunion est située dans une partie de l'océan Indien régie par trois grands processus climatologiques qui vont fortement influencer sur la variabilité globale des précipitations : l'anticyclone des Mascareignes, la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) et le passage des alizés (Figure 3). L'anticyclone des Mascareignes et la ZCIT représentent respectivement la branche descendante et la branche ascendante de la cellule de Hadley. La circulation atmosphérique est telle que durant l'hiver austral, l'anticyclone des Mascareignes se déplace à l'ouest, au plus près de l'archipel du même nom, et la ZCIT au nord. Durant l'été austral en revanche, la zone anticyclonique se déplace vers l'est et laisse donc la place aux basses pressions qui sont alors très proches du nord de la Réunion. La différence de pression entre l'anticyclone des Mascareignes et la ZCIT engendre la formation de vents réguliers des

hautes vers les basses pressions : les alizés. Sur La Réunion, leur intensité varie en fonction du positionnement de la branche ascendante et de la branche descendante de la cellule de Hadley. En effet, lorsque l'anticyclone des Mascareignes se renforce à l'ouest les alizés gagnent en intensité. Ils s'affaiblissent lorsque la zone de basses pressions est très proche de l'île.

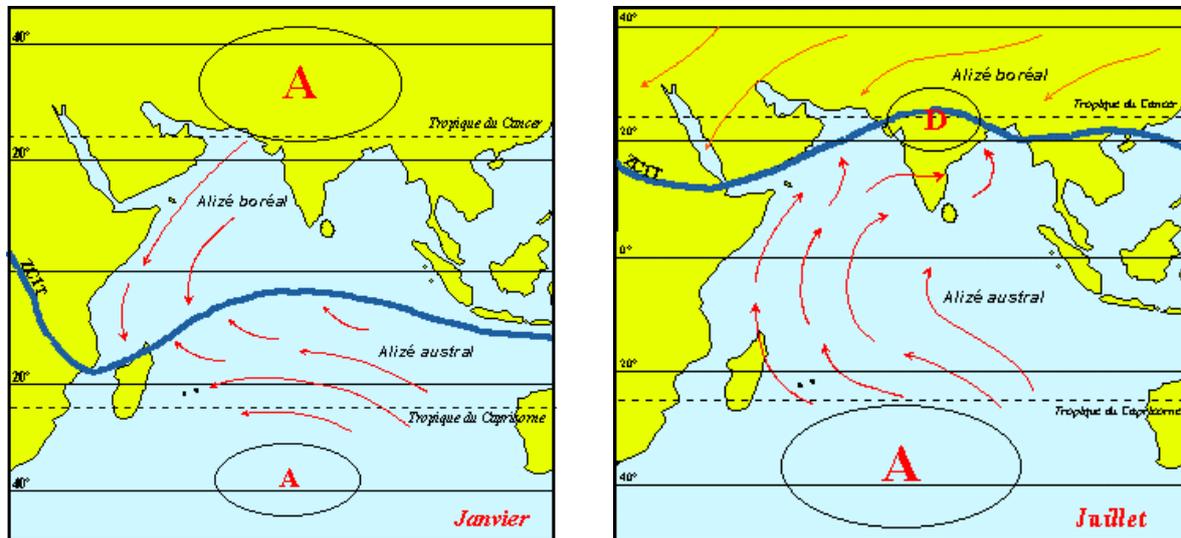


Figure 3 : A gauche : position de la ZCIT et de l'anticyclone des Mascareignes et délimitation du passage des alizés en été austral. À droite : situation en hiver austral. Source : www.cycloneextreme.com/cyclonereunionformation.htm

La particularité climatologique de La Réunion réside d'abord dans son insularité, ensuite dans son relief accidenté, et enfin dans sa situation géographique dans le sillage des alizés. De manière globale, l'île est donc composée d'une côte au vent et d'une côte protégée par le relief ou côte sous le vent (Figure 4). Le relief de l'île joue un rôle prédominant dans la circulation atmosphérique locale : brise de terre, soulèvement orographique, ennuagement des cirques, convection sur le relief et niveau d'inversion des alizés constituent les principales réponses au relief caractéristique de La Réunion et à son insularité. Concernant les alizés, dont l'intensité et donc l'impact est plus important lorsque l'anticyclone des Mascareignes est situé à proximité de l'île, il existe deux types de régimes : le régime d'alizés secs et le régime d'alizés humides. Le premier est à l'origine de longues périodes de sécheresses car l'inversion des alizés est trop basse pour permettre le développement des nuages et la condensation liquide. C'est ce qu'il s'est produit en 2011, lorsque les alizés sont restés secs depuis le mois d'octobre 2010 selon le rapport de l'Office de l'eau Réunion (2012). Dans le second cas, les nuages apportés par les alizés sont déjà chargés en eau, l'inversion des alizés étant plus élevée, ce qui engendre des averses d'abord sur la côte au vent, puis sur les hauts et enfin, avec la brise de terre, sur la côte sous le vent.

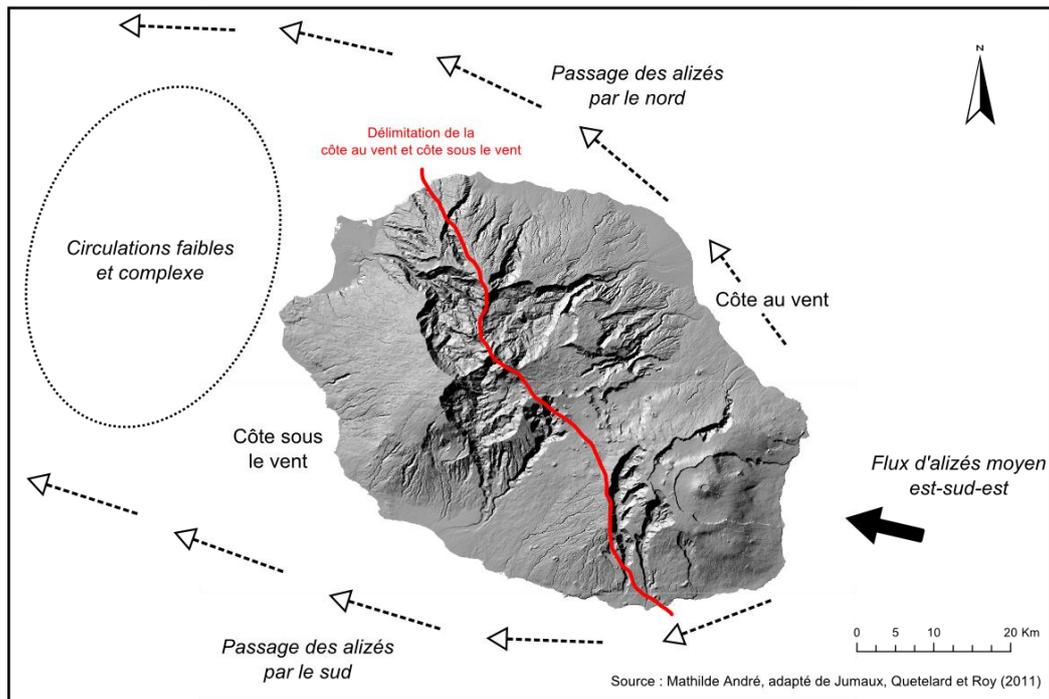


Figure 4 : Schéma synthétique représentant la délimitation entre côte au vent et côte sous le vent ainsi que le flux d'alizés moyen est-sud-est. Source : Adapté de Jumaux, Quetelard et Roy (2011)

Cette circulation atmosphérique à l'échelle de l'océan Indien et à l'échelle de La Réunion est donc à l'origine de l'occurrence et de la durée des périodes de sécheresse et de la saison humide. L'hiver austral ou saison sèche se déroule globalement de mai à novembre (Jumaux, Quetelard, and Roy 2011) et est marqué par une inversion faible des alizés et donc un risque de sécheresse. La période de janvier à mars (Jumaux, Quetelard, and Roy 2011) constitue quant à elle l'été austral. Durant cette période, l'anticyclone des Mascareignes n'a plus d'incidence sur le climat et les alizés sont donc faibles. Il n'y a plus d'inversion des alizés et c'est alors la convection sur le relief qui s'opère, pouvant engendrer la formation de cumulonimbus et d'orages. C'est sur cette période que s'étend la saison des pluies.

Le travail de Météo-France en 2011 permet donc de rendre compte du profil climatologique de l'île de La Réunion dans le contexte de sa situation géographique dans le sud-ouest de l'océan Indien. Toutefois, certains paramètres complémentaires dans l'étude de la variabilité spatio-temporelle des pluies à La Réunion n'ont pas été traités, tels que la détection de rupture éventuelle dans les séries pluviométriques ou de la variabilité des dates de début et de fin de saison des pluies sur la période 1950 à 2013. **Le premier objectif de cette étude est de contribuer à l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations à La Réunion par la détection des changements dans les séries pluviométriques aux échelles annuelles et saisonnières.**

Dans un second temps, on cherche à mesurer l'impact de cette variabilité climatique sur la végétation, notamment pour observer y les conséquences du réchauffement climatique et des phases de sécheresses. Pour cela, on utilise l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI en anglais) comme indicateur pour tester la sensibilité de la végétation (Meneses-Tovar 2011) à l'échelle des grands ensembles de végétation. Un certain nombre d'études ont été menées sur le sujet dans des régions tropicales à subtropicales (Brou, Moppert, and Brial

2013; Djoufack-Manetsa 2011; Meneses-Tovar 2011). Elles permettent de conclure que la variabilité des précipitations a bien des conséquences sur les variations du NDVI, avec des valeurs de NDVI élevées lors des saisons humides, et plus faibles lors de saisons sèches. Selon le travail de Jacquin (2010) sur les savanes de Madagascar, l'utilisation d'une image à basse résolution spectrale, telle que celles fournies par le capteur MODIS, permet de mieux utiliser les indices de végétation. En effet, ce type d'image a une haute répétitivité temporelle (1 à 2 jours) ce qui s'équilibre avec la taille du pixel de 250 x 250 mètres.

Toutefois, très peu d'études sur la corrélation entre NDVI et précipitations ont été faites sur l'île de La Réunion, et notamment en utilisant les images basse résolution de type MODIS. Puisqu'il y existe une forte différenciation des milieux naturels en fonction de la situation géographique du milieu concerné (Cadet 1977; Rivals 1950), **l'étude permettrait, dans un second objectif, de déterminer l'intensité du lien existant entre la variabilité spatio-temporelle des précipitations et les variations du NDVI.**

Cela amène à se poser la question suivante : *quels sont les modes de variabilité des précipitations à La Réunion et quelles en sont les répercussions sur la végétation ?* Les hypothèses de recherche convenues sont les suivantes :

Première hypothèse : Le régime des précipitations a été modifié : cette modification est marquée par un raccourcissement de la durée des saisons et un décalage des dates de début et de fin de saison.

Deuxième hypothèse : Une rupture (changement de moyenne) est intervenue dans les séries pluviométriques au cours des années 1980 accompagnée d'une diminution importante des précipitations après cette date.

Troisième hypothèse : La végétation est fortement vulnérable aux variations des précipitations.

Quatrième hypothèse : Les observations du NDVI des grands ensembles végétatifs rendent compte d'une modification de la dynamique de la végétation.

Dans une première partie, les données et méthodes utilisées seront explicitées, puis on s'attachera à exposer les résultats obtenus avant de discuter les différentes conclusions apportées et conclure l'étude.

1. Données et méthodes

1-1. Données

1-1-1. Données climatologiques

1-1-1-1. Données de pluviométrie

Les données de pluviométrie ont été fournies par Météo France. Il s'agit de séries de pluie journalière observée entre 1952 et 2013. 25 stations ont été sélectionnées (Figure 5). Ces données de pluviométrie proviennent des stations gérées par Météo France mais aussi par le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Les différentes séries de données ayant précédemment été utilisées par Météo France pour l'étude publiée en 2011 (Jumaux, Quetelard, and Roy), elles ont donc déjà été testées et peuvent donc être jugées comme étant crédibles.



Figure 5 : Carte de la répartition des stations météorologiques de Météo-France et du CIRAD utilisées pour l'étude. Source : Image Bing 2010

Les données brutes ont été traitées de manière à ne conserver que de longues séries de données avec peu de valeurs manquantes. On note que les données manquantes n'ont pas été remplacées par des valeurs calculées pour garantir la justesse des résultats obtenus ensuite. En effet, la variabilité des précipitations est telle qu'il peut pleuvoir avec une grande intensité durant un jour et ne pas pleuvoir le jour suivant, ce qui rend difficile l'estimation de la donnée.

On ne conserve pas, d'abord, les stations pour lesquelles des valeurs manquent pendant la période d'été austral, car la variabilité pluviométrique est très forte à cette période de l'année.

En observant le tableau ci-dessous (Tableau 1), on peut voir que certaines stations, comme celle du Tampon, présentent un grand nombre de valeurs manquantes ont toutefois été retenues. Il s'agit dans la majorité des cas de valeurs manquantes en période d'hiver austral. Les stations retenues pour les analyses statistiques qui suivent sont notées en gras.

STATION	DATE DE DEBUT	DATE DE FIN	DUREE (en nombre d'années)	NOMBRE DE DONNEES MANQUANTES
BAGATELLE	1956	2013	57	0
BEUFOND SAINTE MARIE	1958	2013	55	30
BEUVALLON	1952	2013	61	0
BELLEVUE LES HAUTS	1962	2011	49	62
BOIS DE NEFLES SAINT PAUL	1952	2013	61	175
BOIS ROUGE	1952	2013	61	4
CILAOS	1952	2013	61	0
COLIMACONS	1964	2013	49	0
DOS D'ANE	1967	2013	46	0
GILLOT AEROPORT	1953	2013	60	0
HELL-BOURG	1952	2013	61	295
LE COLOSSE	1958	2013	55	243
LE TAMPON	1960	2013	53	177
LE TREMBLET	1953	2013	60	0
LES AVIRONS	1952	2013	61	0
LIGNE-PARADIS	1966	2013	47	0
PIERREFONDS	1953	2013	60	0
PLAINE DES CAFRES	1950	2013	63	0
PLAINE DES PALMISTES	1952	2013	61	0
PONT-MATHURIN	1963	2013	50	252
RIVIERE DE L'EST	1953	2013	60	180
SAINT BENOIT	1954	2013	59	0
SAINT JOSEPH	1961	2013	52	1
SAINT LEU	1952	2013	61	124
TAN-ROUGE	1960	2013	53	0

Tableau 1 : Caractéristiques des séries de données en fonction du poste de mesures : date de début, date de fin et durée de la série de données ainsi que le nombre de données manquantes.

1-1-1-2. Données de température et humidité relative de l'air

Les données de température et d'humidité relative de l'air sont également fournies par Météo-France. Il s'agit d'une série mensuelle qui s'étend de 1952 à 2014 mais varie fortement en fonction du poste climatologique. En effet, la base de données contient un très grand nombre de données manquantes, de plusieurs mois à plusieurs années. De ce fait, ces paramètres ne peuvent être utilisés que sur une courte durée, ce qui restreint grandement leur utilisation pour l'étude.

1-1-1-3. Données de température de surface de la mer (TSM)

Les données de température de surface de la mer sont fournies par l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer (ONERC). On note que l'ONERC est rattaché à la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) sous la tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Les données ont été calculées par télédétection spatiale par l'ancienne unité ESPACE (aujourd'hui UMR ESPACE-DEV) de l'IRD, à laquelle appartiennent SEAS-OI et d'autres stations de surveillance de l'environnement assistée par satellites.

La série temporelle disponible à partir du lien <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Temperature-de-la-surface-de-la.html> s'étend du 28/09/1992 au 18/06/2010. Beaucoup de valeurs sont néanmoins manquantes dans la série, et les données de janvier 2000 à juin 2003 ne sont pas encore traitées (Figure 6).

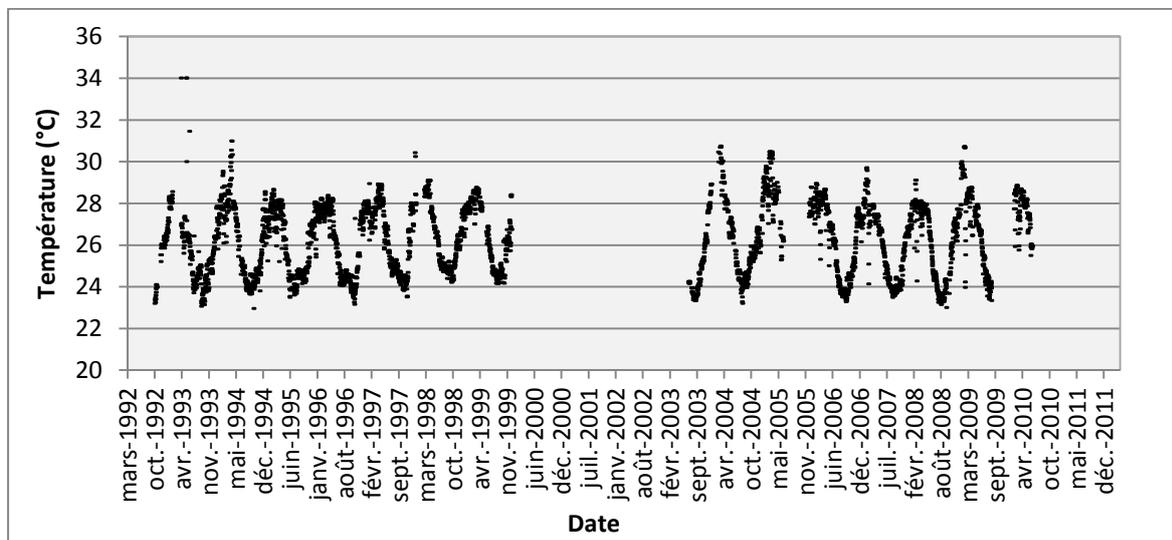


Figure 6 : Graphique représentant la répartition des données de température de surface de la mer des données et leurs variations sur une période située entre septembre 1992 et juin 2010. Source :

www.seasnet.org

1-1-2. Données de végétation

Les données relatives à la végétation sont issues de la télédétection et d'une base de données d'occupation du sol.

On utilise pour notre étude les images basse résolution *MOderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). L'avantage principal de MODIS est la fréquence de capture des

images variant de un à deux jours, malgré leur résolution de 250 x 250 mètres (Jacquin 2010). Ces images ont pu être téléchargées à partir de l'United States Geological Survey (USGS) Global Visualization Viewer (GloVis) de 2000 à 2013. MODIS utilise la méthode du « *Maximum value composite* » pour le calcul du NDVI, ce qui signifie que la valeur de NDVI qui apparaît dans l'image est la valeur de pixel maximale obtenue sur une période de seize jours. Cela permet d'éviter les valeurs erronées dues au passage d'un nuage par exemple. On bénéficie donc pour cette étude d'une image MODIS tous les seize jours.

L'indice de végétation normalisé se calcule selon la formule suivante (Équation 1):

$$\frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Avec : *PIR* = Bande du proche infrarouge ; *R* = bande du rouge.

Équation 1 : Calcul de l'indice de végétation par différence normalisé.

Il varie entre -1 et 1 et les valeurs correspondant à une végétation dense et en bonne santé avoisinent 0,8 (Tra Bi Z 2014).

L'archivage puis la constitution d'une série temporelle a permis d'extraire le profil saisonnier pluriannuel (2001 à 2013) de groupes de pixels pour différents types de végétation (Figure 7).

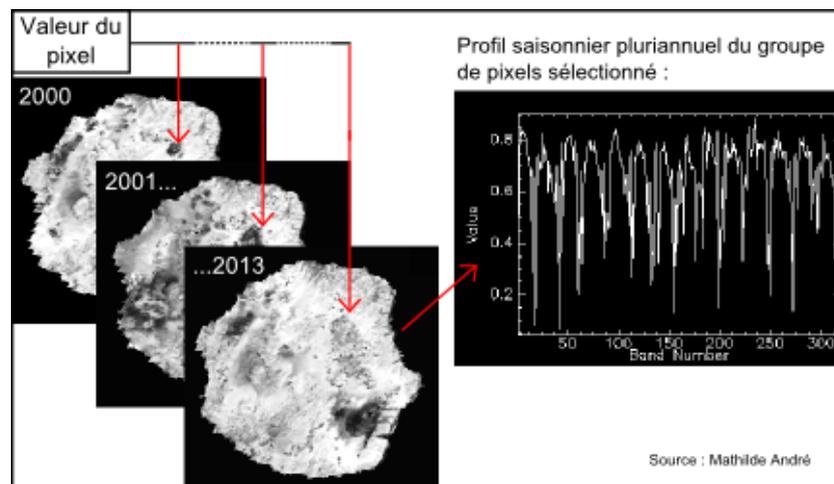


Figure 7 : Création d'une série temporelle d'images MODIS pour la période de 2000 à 2013.

Les données d'occupation du sol utilisées pour la suite de l'étude sont fournies par la base de données géographique Corine Land Cover (CLC), produite par le « service de l'observation et des statistiques du ministère chargé de l'environnement » (European union and SOeS 2006). L'utilisation de CLC permet de repérer les grands ensembles de végétation à la Réunion et de les utiliser pour observer les variations du NDVI de ces différentes entités paysagères.

La taille d'un pixel MODIS étant élevée (250x250 mètres), il est nécessaire d'utiliser des polygones qui s'étendent sur une grande surface (de 1 à 17 hectares environ). De plus, on vérifie régulièrement que le groupement de pixels MODIS sélectionnés soit homogène.

1-2. Méthode

1-2-1. Traitement des données pluviométriques

Plusieurs tests statistiques et analyses sont appliqués sur les données pluviométriques afin d'en faire ressortir la variabilité annuelle, saisonnière ou mensuelle.

Le repérage des années déficitaires ou excédentaires est établi à l'aide du calcul, chaque année, de l'**indice de Nicholson** (Hoopingarner et al. 1988), variable centrée réduite dont la formule est la suivante (Équation 2) :

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}$$

Avec : X_i = hauteur de pluie en mm (ou débit en m^3/s) de l'année i ; \bar{X} = hauteur de pluie en mm (ou débit en m^3/s) moyenne sur la période d'étude ; σ = écart type de la hauteur de pluie (ou débit) sur la période d'étude.

Équation 2 : Calcul de l'indice de Nicholson. Source : Hoopingarner et al. (1988)

Afin de conforter les résultats fournis par le calcul de l'indice de Nicholson, on effectue des tests de détection de l'année de rupture. Les analyses statistiques nécessaires à la détection de l'année de rupture dans une série de données sont effectuées sur le logiciel AnClim. Selon Lubès (1994), « [...] une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. » Il existe plusieurs tests qui permettent de repérer cette rupture, quatre ont été retenus, parmi ceux proposés par AnClim et réputés les plus robustes : le test de Mann-Whitney-Pettitt (Pettitt 1979), le test T maximal pénalisé (Wang, Wen, and Wu 2007), le test de déviation cumulative (Buishand 1982) et éventuellement le test T.

Le **test de Mann-Whitney-Pettitt** (Figure 8) découle du test de Mann-Whitney, modifié par Pettitt (Pettitt 1979). Ce test se base sur le fait que l'absence de rupture dans une série constitue l'hypothèse nulle. Il permet ainsi de repérer un changement dans le comportement de la série de données en y comparant deux moyennes.

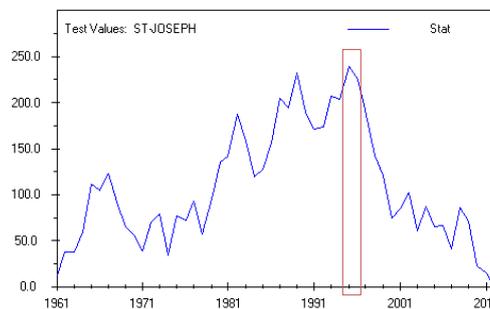


Figure 8 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le test de Mann-Whitney-Pettitt pour la station de Saint Joseph : 1996.

Le **test T maximal pénalisé** (PMT) (Figure 9) est utilisé pour détecter les changements de moyenne non documentés dans des séries de données climatologiques (Wang, Wen, and Wu 2007). Il permet de repérer les faux changements dans une série homogène et donc de déterminer l'année de rupture effective.

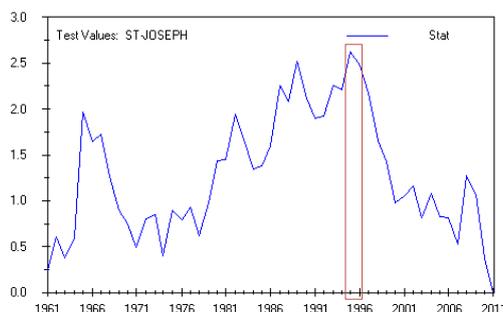


Figure 9 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le PMT pour la station de Saint Joseph : 1996.

Le **test de déviation cumulative** (Buishand 1982) (Figure 10) est quant à lui basé sur les écarts de la moyenne, qu'il repère et affiche. Il est dérivé du test Buishand et est aussi appelé « cumulative sum » (CUSUM).

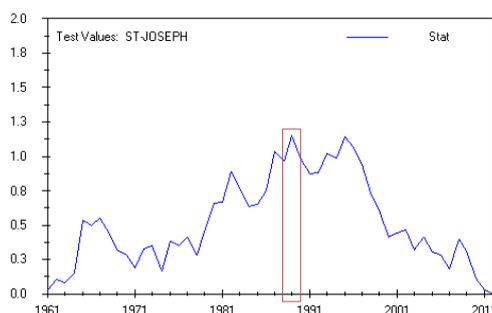


Figure 10 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le test de déviation cumulative pour la station de Saint Joseph : 1990.

Enfin, le **test T** (Figure 11), aussi appelé test de Student (Student 1908), est utilisé pour comparer des moyennes.

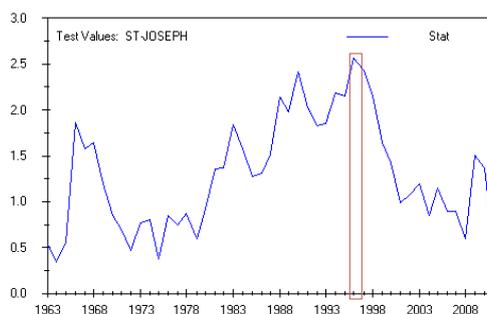


Figure 11 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le test T pour la station de Saint Joseph : 1996.

On réalise ensuite une **analyse en composante principale** (ACP) afin de régionaliser les stations pluviométriques utilisées, de regrouper celles qui possèdent un régime pluviométrique semblable. Pour une plus grande finesse des résultats, ce sont les données mensuelles qui sont utilisées. S'agissant de variables ordinales, on utilise de préférence une ACP de type Spearman (Spearman 1904).

Enfin, on cherche à détecter la **date de début et de fin de saison des pluies** et d'en déduire la durée, ce qui permet de comparer la variabilité de la saison des pluies dans chaque région pluviométrique repérée par ACP (Tableau 2). On utilise pour cela une adaptation de la méthode de Sivakumar et Awesso expérimentée au Togo (Essotalani, Badameli, and Dubreuil 2010; Sivakumar and Awesso 1996). Cette méthode consiste à déterminer des conditions qui vont permettre de repérer une période de saison pluvieuse en fixant des seuils. La première condition est que la hauteur de pluies cumulée sur trois jours consécutifs ne doit pas être inférieure à 25 millimètres. La seconde et dernière condition est que cette période ne doit pas être suivie de plus de sept ou huit jours consécutifs durant lesquels le cumul des pluies est inférieur à 25 millimètres en trois jours. Cela permet notamment de repérer les faux départs de saison des pluies qui sont de courte durée et sont suivis par une longue période faiblement pluvieuse. On utilise le calcul des cumuls glissés afin d'obtenir la série de données à traiter.

Région	Pluie journalière (en mm)	Date	Cumul (en mm)	Saison des pluies estivale (seuil ≥ 25 mm)
Hauts ouest	13,3	26/03/1965	27,6	1
	1,7	27/03/1965	22,1	
	12,6	28/03/1965	20,8	
	7,8	29/03/1965	31,2	1
	0,4	30/03/1965	43,4	1
	23	31/03/1965	49,7	1

Tableau 2 : Exemple du contenu de la feuille de calcul réalisée pour la détection de la saison des pluies estivale pour la région « Hauts ouest » (station des Colimaçons).

1-2-2. Traitement des données de NDVI

Le traitement des données de NDVI est réalisé avec le logiciel TIMESAT (Jönsson and Eklundh 2004). Ce logiciel, développé par Jönsson et Eklundh en 2004, permet, à partir d'une série de données de NDVI, de caractériser la saison végétative. D'abord, la courbe fortement bruitée du NDVI obtenue peut être lissée à l'aide d'un calcul de la moyenne gaussienne, de la loi logistique ou de l'algorithme de Savitzky-Golay (Jacquin 2010). Dans cette étude, c'est la méthode de la moyenne gaussienne qui fournit les meilleurs résultats et qu'on retiendra donc pour visualiser les variations du cycle phénologique. Ensuite, TIMESAT permet d'observer l'évolution des différents paramètres de la saison végétative en mettant à disposition la date de début et de fin de saison végétative ainsi que l'amplitude et la durée de la saison végétative (Figure 12).

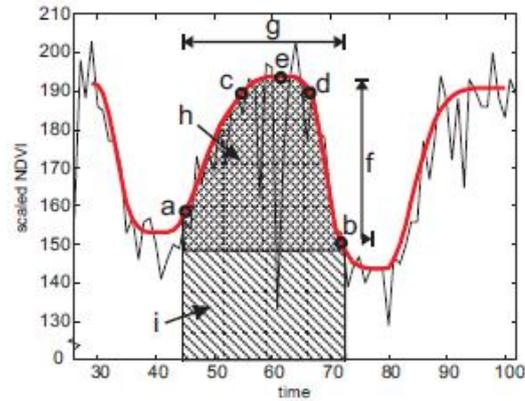


Figure 12 : Paramètres évalués sur le logiciel TIMESAT avec en (a) et (b) le début et la fin de saison végétative, en (c) et (d) le niveau 80% de la saison, en (e) la valeur maximale, en (f) l'amplitude de la saison, en (g) sa longueur et en (h) et (i) la surface représentant l'intégrale de la saison végétative sur la courbe. Source : Jönsson et Eklundh (2004)

1-2-3. Recherche de corrélation entre le NDVI et la variabilité des précipitations

Afin de coupler les données de NDVI et de pluviométrie, on utilise la méthode statistique bivariée de la régression linéaire. La hauteur de pluie sur seize jours a au préalable été calculée afin de pouvoir permettre la comparaison avec les données de NDVI de MODIS.

Pour calculer le coefficient de corrélation de Pearson, la formule mise en application est la suivante (Équation 3) :

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Avec : \bar{x} = moyenne des échantillons de la première matrice ; \bar{y} = moyenne des échantillons de la seconde matrice.

Équation 3 : Calcul du coefficient de corrélation de Pearson.

On note qu'avant 0,33, le coefficient de corrélation est dit « faible », de 0,33 à 0,67, il est moyen, et de 0,67 à 1, il est fort.

La significativité du coefficient obtenu est ensuite testée en calculant la valeur critique de la variable aléatoire F. Pour cela, on utilise l'outil de régression linéaire du logiciel Excel. Le seuil de confiance est fixé à 0,05 soit 5%. Si la valeur critique de F dépasse ce seuil, alors la relation observée n'est pas significative.

1-2-4. Étude de l'influence de différentes variables climatologiques sur les variations du NDVI

En fonction de la valeur du coefficient de corrélation, il peut y avoir une influence d'autres variables sur les variations du cycle phénologique végétal. Si le coefficient de corrélation entre la pluviométrie et le NDVI est faible, il se peut que des variables climatiques autres que la pluie aient une meilleure corrélation avec le NDVI.

Une analyse multivariée à partir d'une ACP permet de confirmer ces observations. On utilise pour cela des variables complémentaires du climat dont la base de données est disponible : la température, l'humidité relative de l'air et la température de surface de la mer (TSM).

2. Résultats

L'étude met en relief une variabilité spatio-temporelle des précipitations en fonction de la situation géographique des points de mesures sur l'île. On observe en effet d'abord une diminution des précipitations après les années 1980 principalement dans la partie ouest de l'île. L'étude révèle également une variabilité des dates de début et de fin de saison des pluies ainsi que de sa durée.

2-1. Variabilité spatio-temporelle des précipitations

2-1-1. Des modifications observées du régime des précipitations

2-1-1-1. Indices de sécheresse

La distribution des années excédentaires et déficitaires en pluies est représentée graphiquement pour chaque station (Annexe 1). Dans la région ouest de l'île considérée comme sèche (Jumaux, Quetelard, and Roy 2011), on peut aisément repérer deux périodes fortement contrastées. En effet, l'exemple pris sur la station des Avirons (Figure 13), située au sud-ouest, montre qu'avant les années 1980, les années sont globalement excédentaires, alors qu'après cette date, elles sont plutôt déficitaires.

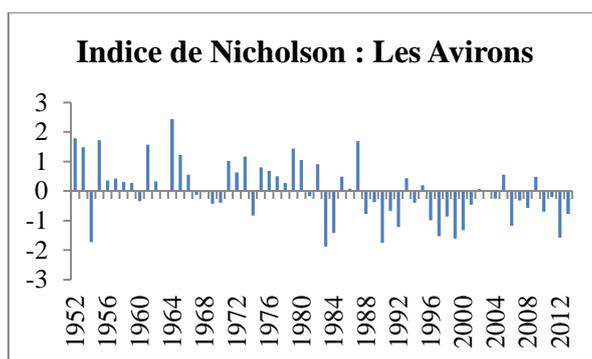


Figure 13 : Représentation graphique de l'indice de Nicholson annuel calculé pour la station des Avirons sur la série temporelle.

La station du Tremblet, à l'est, représentative de la côte au vent, montre une situation différente que celle de la station des Avirons. On observe une alternance d'années excédentaires et d'années déficitaires. Aucune tendance à la baisse n'est détectable sur la série pluviométrique (Figure 14).

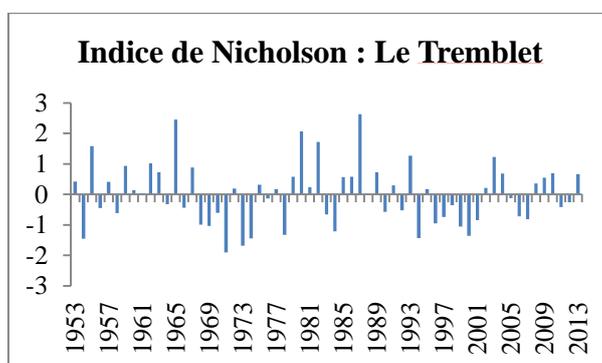


Figure 14 : Représentation graphique de l'indice de Nicholson annuel calculé pour la station du Tremblet sur la série temporelle.

2-1-1-2. Date de rupture dans les séries

Les résultats des tests de rupture effectués ensuite sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 3).

Station	Mann-Whitney-Pettit	PMT	Cumulative deviations	Test T	Année de rupture	Cumul des pluies moyen (mm)		Variation (%)
						Avant rupture	Après rupture	
PLAINE DES PALMISTES	1966	1953	1988	1961	Pas de rupture	Pas de rupture	Pas de rupture	Pas de rupture
SAINT BENOIT	1972	1972	1972		1972	2999,6	3526,0	18%
BEAUFOND SAINTE MARIE	1971	1971	1971		1971	2461,7	2746,0	12%
GILLOT AEROPORT	2002	1972	1972		1972	1521,6	1682,4	11%
BOIS ROUGE	1985	1953	1985		1985	2488,4	2448,7	-2%
BEAUVALLON	1988	1988	1988		1988	3390,8	3221,1	-5%
SAINT JOSEPH	1996	1996	1990		1996	1768,5	1677,5	-5%
BAGATELLE	1988	1988	1988		1988	3107,0	2891,2	-7%
LE TREMBLET	1968	1968	1968		1968	4569,8	4184,6	-8%
DOS D'ANE	1983	1968	1988	1988	1988	1573,8	1355,0	-14%
PIERREFONDS	1983	1983	1983		1983	793,9	653,4	-18%
TAN-ROUGE	1983	1988	1988		1988	1239,5	1015,4	-18%
LIGNE-PARADIS	1983	1983	1983		1983	1177,2	913,9	-22%
LE TAMPON	1981	1981	1981		1981	1711,9	1319,3	-23%
PLAINE DES CAFRES	1989	1952	1989		1989	2379,4	1826,3	-23%
CILAOS	1988	1953	1988		1988	2274,7	1744,4	-23%
LES AVIRONS	1983	1983	1983		1983	1032,1	769,2	-25%
COLIMAÇONS	1988	1988	1988		1988	1505,8	1025,9	-32%

Tableau 3 : Résultats des tests de rupture effectués sur les séries de données annuelles de chacune des stations : année de rupture détectée et variation du cumul des pluies moyen après rupture.

À l'exception de la station de la Plaine des Palmistes, toutes les stations ont connu une rupture dans les séries de précipitations. Mais la date de rupture et l'intensité du changement est variable suivant la région.

Dans l'ouest et le sud réunionnais la rupture est intervenue au cours de la décennie 1980-1989. Dans cette région, des baisses importantes des hauteurs de précipitation sont notées. Ces baisses sont en moyenne de 20% et peuvent atteindre 33% dans certains cas (exemple : Colimaçons) (Figure 15).

On note la particularité de la région sud à Saint-Joseph et au Tremblet, pour laquelle la baisse des précipitations n'est que faiblement prononcée après une rupture datée respectivement à 1990 et 1968.

Dans le nord et l'est de l'île, trois stations ont connu une variation positive des pluies après rupture entre 1971 et 1972 : Beaufond Sainte-Marie, Gillot-aéroport et Saint Benoit. Enfin, dans le nord de l'île, à Bagatelle, Beauvallon et Bois-Rouge, la rupture est intervenue entre 1985 et 1988. De très faibles baisses de précipitations (moins de 8%) sont associées à cette rupture.

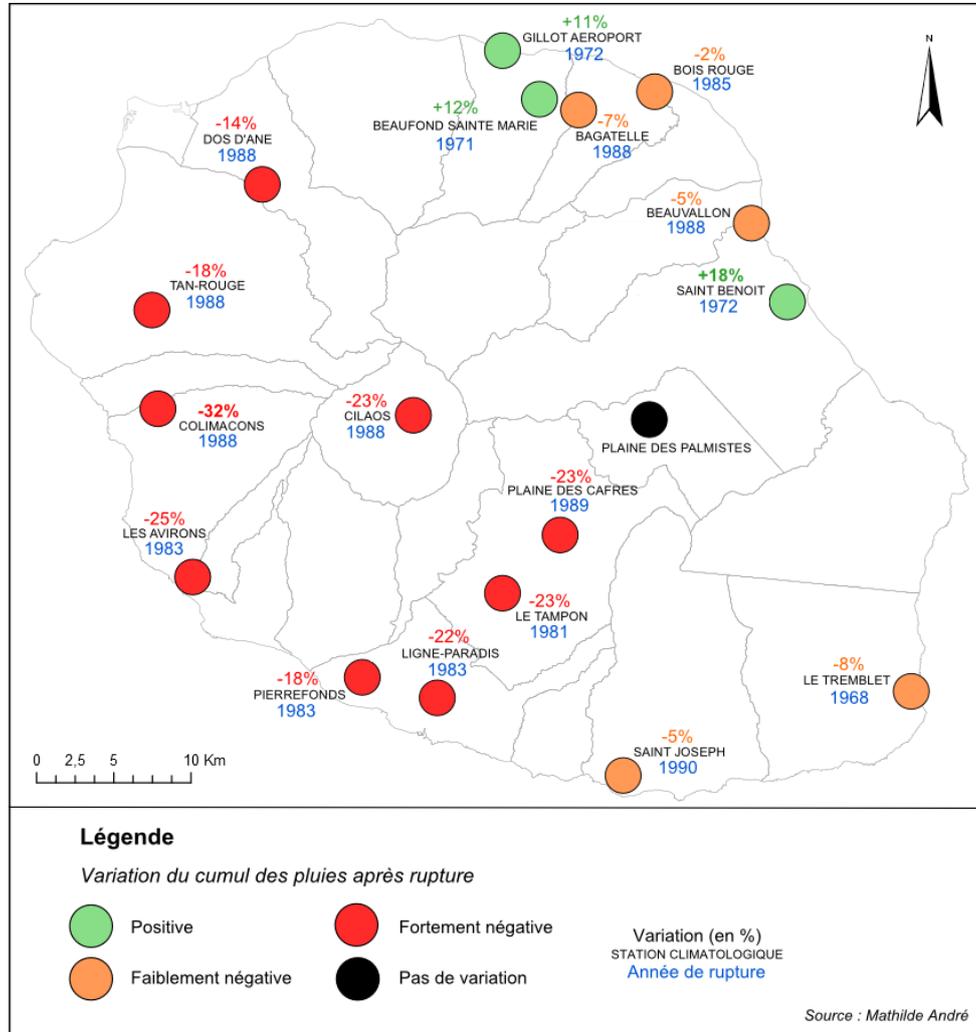


Figure 15 : Carte représentant la variation du cumul des pluies moyen après rupture dans la série temporelle.

2-1-2. Régionalisation des stations

2-1-2-1. Date de rupture dans les séries

On cherche ici à mettre en évidence les régions pluviométriques de La Réunion en fonction des similitudes observées dans les régimes pluviométriques des stations étudiées. Pour cela, on effectue une ACP sur les données mensuelles de précipitations, afin de prendre en compte l'évolution saisonnière. On ne retient que les trois premiers axes de cette ACP car ceux-ci expriment déjà près de 89% de la variance (Tableau 4).

	F1	F2	F3
Valeur propre	12,505	2,247	1,195
Variabilité (%)	69,472	12,482	6,641
% cumulé	69,472	81,954	88,595

Tableau 4 : Composantes sélectionnées et paramètres à prendre en compte dans l'ACP.

Le tableau des vecteurs propres (Annexe 3) et celui des corrélations entre les variables et les facteurs (Tableau 5) montrent la même chose car l'ACP est normée : une opposition géographique marquée entre les quatre zones qui présentent la variabilité pluviométrique la plus marquée. Cela s'observe sur les axes 2 et 3. Dans l'axe 2, le quart nord-est est représenté avec une contribution négative à l'axe, en opposition avec les valeurs positives les plus fortes qui représentent le sud-ouest de l'île. L'axe 3 quant à lui marque l'opposition, moins représentative que celle de l'axe 2, entre le nord-ouest et sa contribution négative à l'axe, et le sud-est, qui a une forte contribution positive.

	F1	F2	F3
Bagatelle	0,869	-0,403	0,123
Beaufond Sainte Marie	0,878	-0,385	0,095
Beauvallon	0,872	-0,381	0,162
Bois-Rouge	0,884	-0,361	0,104
Cilaos	0,909	0,210	-0,118
Colimaçons	0,800	0,103	-0,489
Dos d'Âne	0,868	-0,044	-0,330
Gillot-Aéroport	0,896	-0,319	-0,011
Le Tampon	0,836	0,362	-0,196
Le Tremblet	0,768	-0,044	0,386
Les Avirons	0,756	0,518	-0,037
Ligne-Paradis	0,729	0,585	0,222
Pierrefonds	0,750	0,569	0,158
Plaine des Cafres	0,899	0,169	-0,111
Plaine des Palmistes	0,879	-0,281	0,013
Saint-Benoit	0,869	-0,379	0,147
Saint-Joseph	0,661	0,429	0,507
Tan-Rouge	0,829	0,020	-0,467

Tableau 5 : Corrélations entre les variables et les facteurs.

Si l'on s'attache à observer plus précisément les valeurs de ces contributions, on peut diviser La Réunion en plusieurs régions pluviométriques. La carte ci-dessous (Figure 16) permet de représenter spatialement les résultats obtenus à l'aide d'un code couleur correspondant à chaque région pluviométrique.

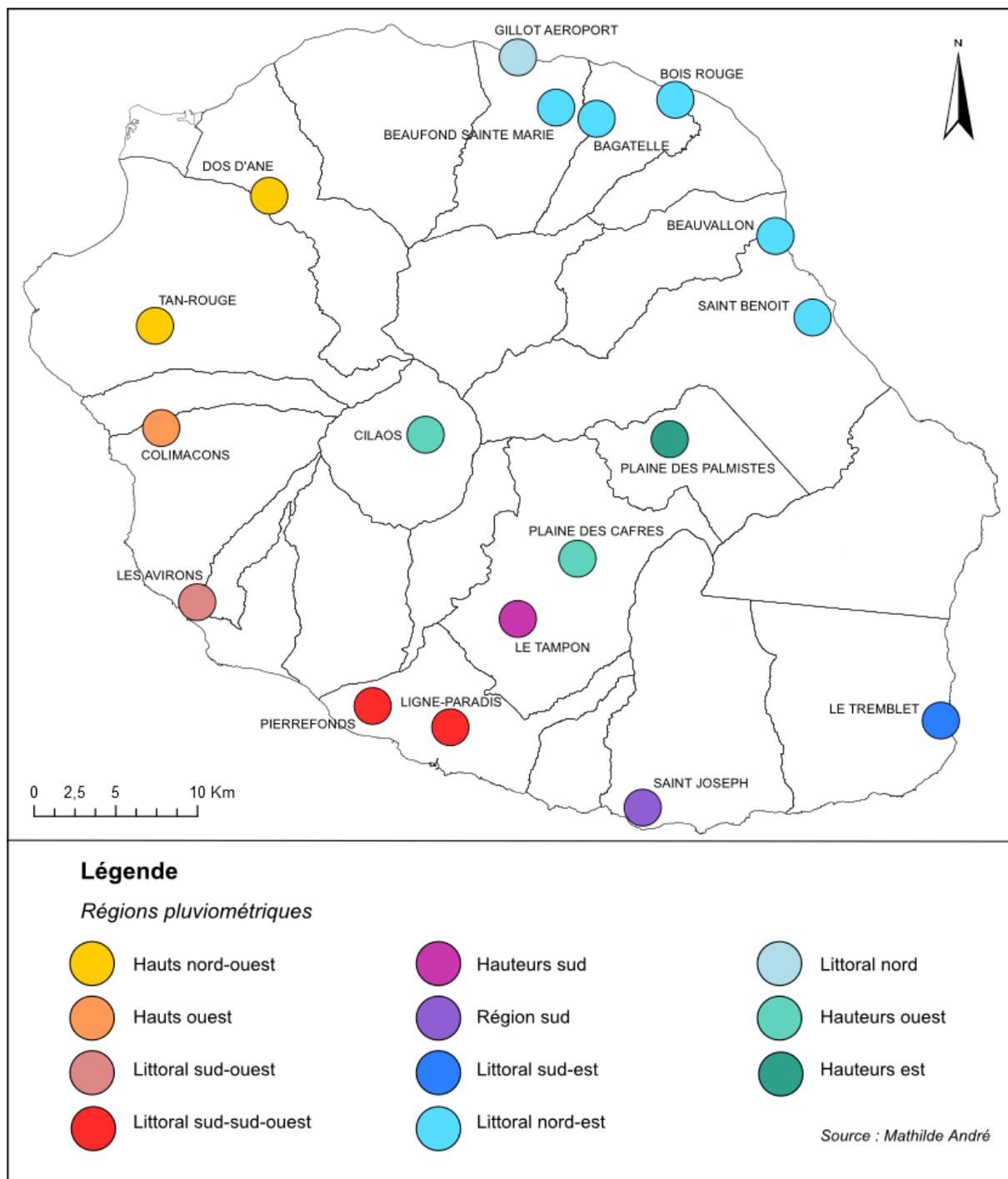


Figure 16 : Carte représentant la spatialisation des régions pluviométriques en fonction de l’implantation géographique du point de mesures.

Afin d’illustrer le régime pluviométrique propre à chaque région définie, la variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers a été représentée graphiquement. On compare ici un régime représentatif du littoral sud-ouest (Figure 17) et un autre représentatif du littoral sud-est (Figure 18). Ces deux régimes sont catégoriquement opposés, la première région étant l’une de celles qui cumule le moins de précipitations et la seconde, celle qui en cumule le plus. Et pourtant, ces deux régions sont situées à une quarantaine de kilomètres seulement l’une de l’autre.

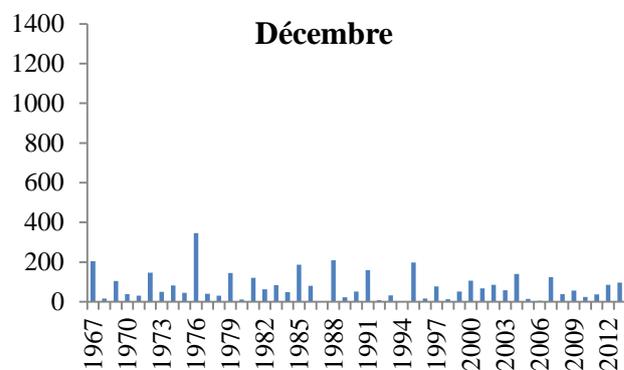
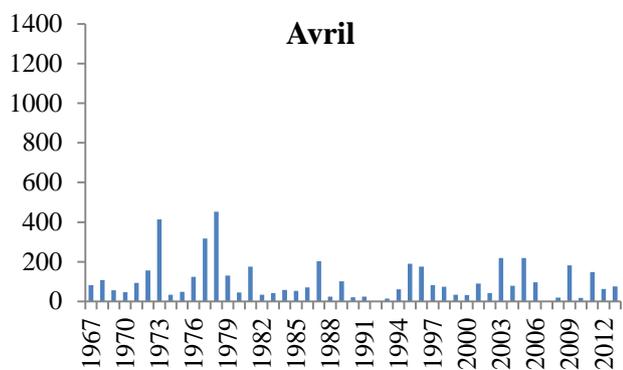
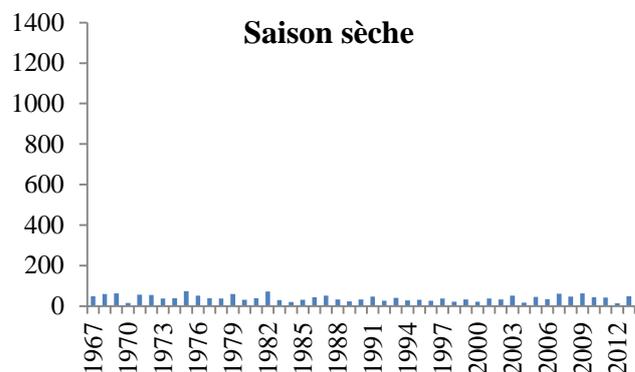
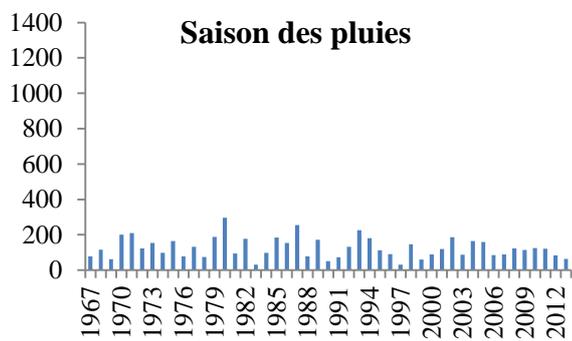


Figure 17 : Variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers pour la région « Littoral sud-ouest » (station des Avirons).

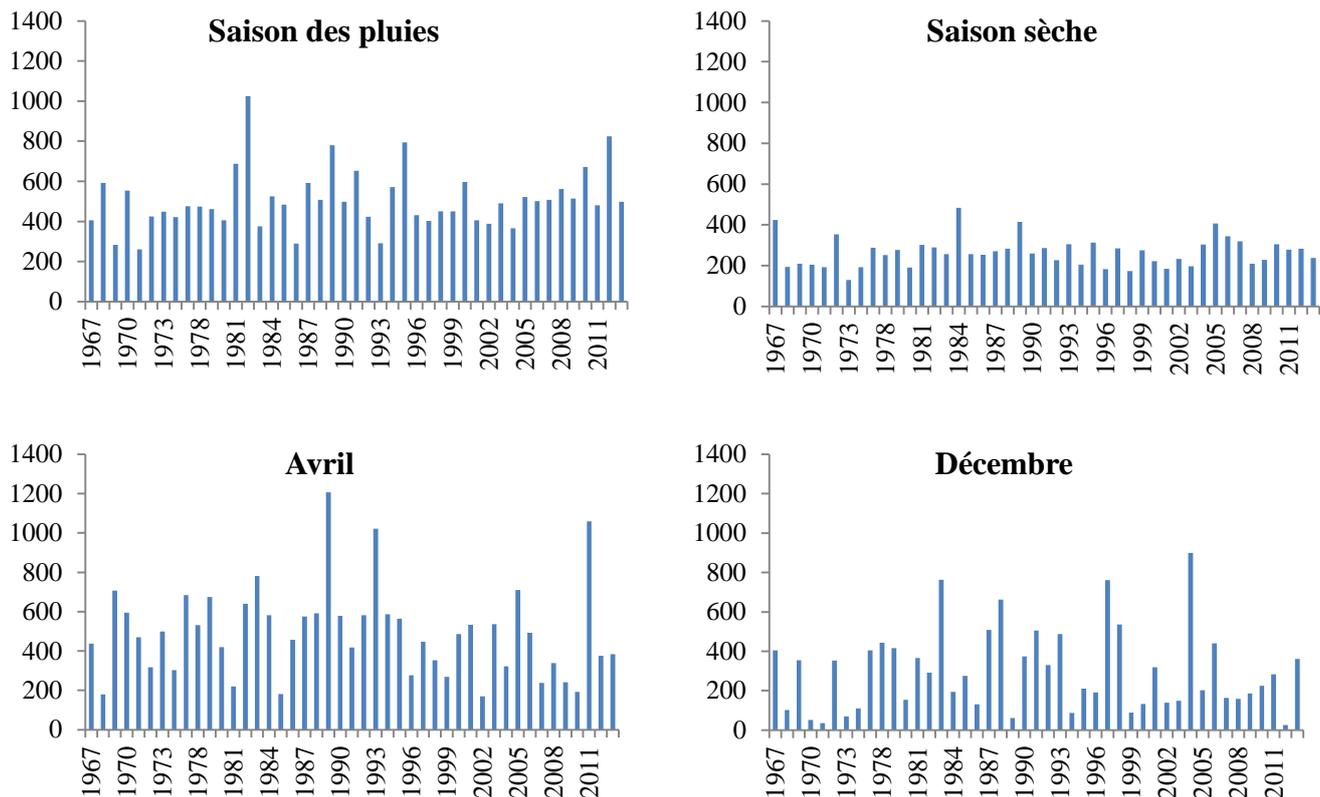


Figure 18 : Variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers pour la région « Littoral sud-est » (station du Tremblet).

Les variations saisonnières diffèrent donc fortement en fonction de la situation géographique sur l'île.

2-1-2-2. Variabilité de la durée et des dates de début et fin de saison des pluies

Une étude complémentaire a été faite sur le sujet : la détection de la date de début et de fin de la saison pluvieuse. Cela permet de repérer la durée et la variabilité de la saison des pluies estivale chaque année selon que l'on se trouve dans une situation « littoral sud-ouest » (Figure 19) ou « littoral sud-est » (Figure 20). Puisque l'on se focalise sur la saison des pluies en été, la période débute au mois le plus précoce selon les premières observations soit au mois d'octobre.

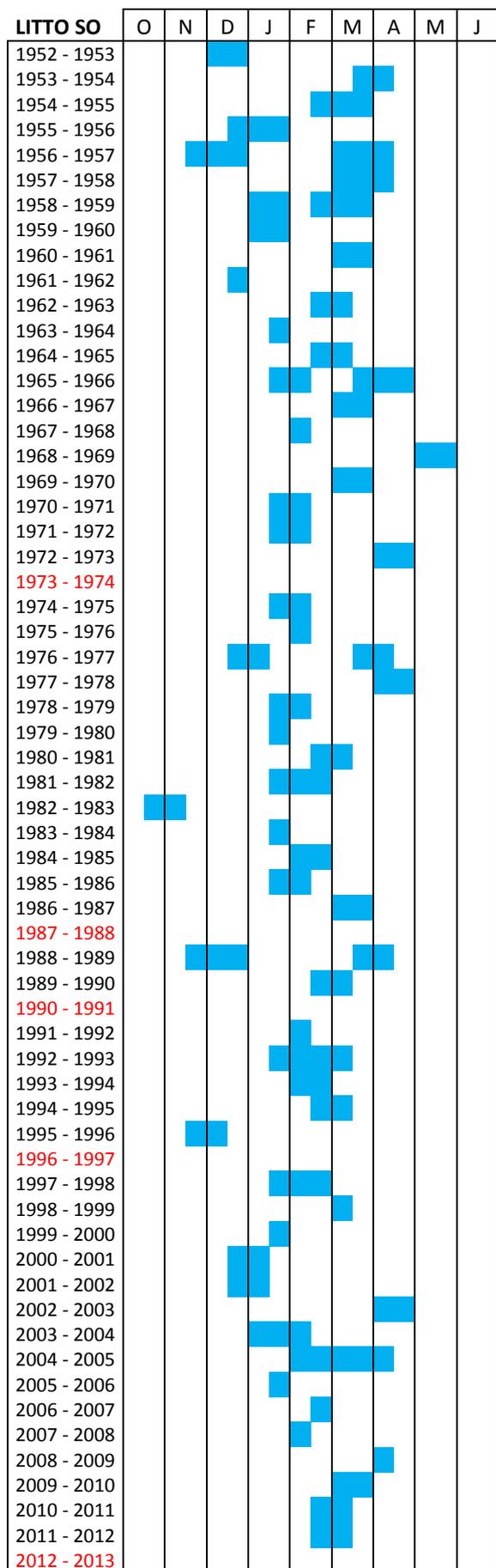


Figure 19 : Durée de la saison des pluies estivale dans la région « Littoral sud-ouest » (station des Avirons).

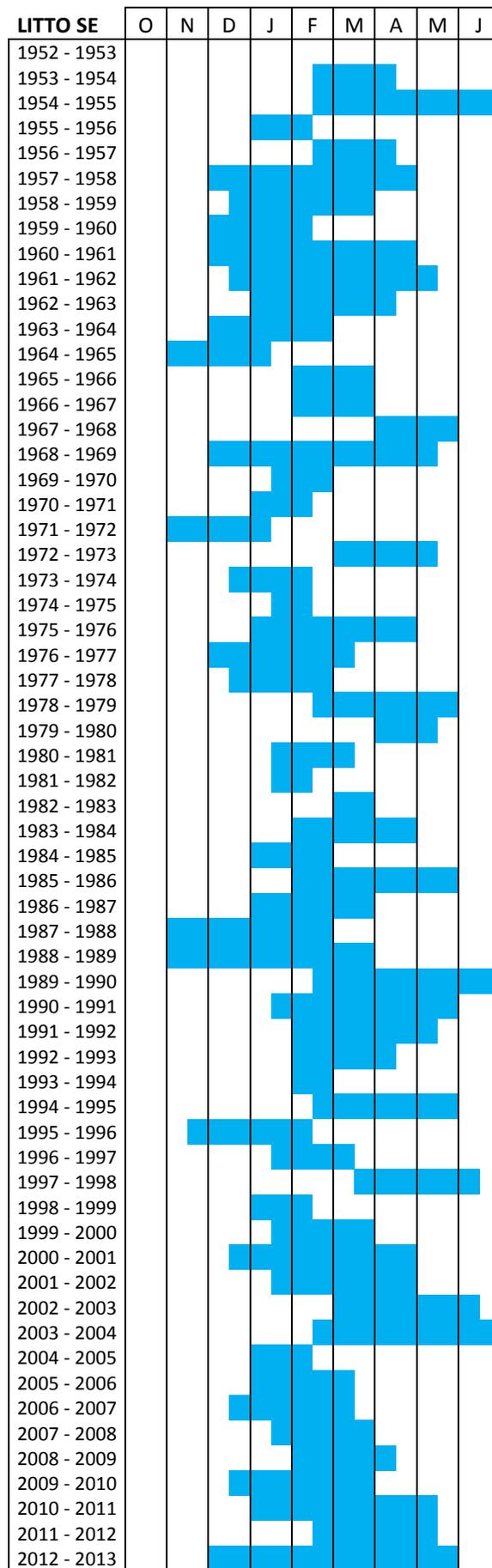


Figure 20 : Durée de la saison des pluies estivale dans la région « Littoral sud-est » (station du Tremblet).

La saison pluvieuse estivale du littoral sud-ouest est de courte durée. En effet, elle ne s'étend que rarement sur plus d'un mois et demi et peut parfois être inexistante, difficilement repérable ou trop courte pour être représentée sur la figure. C'est le cas de l'été austral de 1973 – 1974, de 1987 – 1988, de 1990 – 1991, de 1996 – 1997 ou de 2012 – 2013. On note également qu'à partir de l'année 2006, la période pluvieuse est très courte et ce pendant plusieurs années consécutives.

À l'inverse, sur le littoral sud-est, la saison pluvieuse s'étend parfois sans interruption jusqu'à l'hiver austral (ex. : année 2004). Certaines années, il est difficile de repérer la saison des pluies tant l'année est pluvieuse.

Parallèlement à cette variabilité climatique, on observe que des modifications importantes de la végétation sont en cours. On cherche donc à voir si cela pourrait être expliqué par la variabilité des précipitations.

2-2. Impact de la variabilité pluviométrique sur la végétation

L'analyse est faite par grands ensemble de végétation, c'est-à-dire des populations de type forêt hygrophile, prairie ou végétation arbustive ou herbacées avec arbres épars. Les polygones utilisés sont étendus (entre 1 et 17ha environ) et donc adaptés à l'utilisation d'images MODIS.

Les polygones correspondant aux grands ensembles de végétation sont sélectionnés sur la base de données CLC. Les valeurs de NDVI correspondantes sont ensuite extraites et exportées à partir de la série temporelle d'images MODIS. Les ensembles végétatifs ont été retenus par région pluviométrique, selon qu'ils présentent ou non une surface relativement étendue en pixels homogènes. Ils sont représentés sur les figures 21 et 22, la figure 21 caractérisant les milieux de la côte sous le vent et la figure 22 les milieux de la côte au vent. On note toutefois qu'il est difficile d'analyser les variations du cycle phénologique d'entités végétatives modifiées par l'homme. En effet, les surfaces de canne à sucre sont très étendues à La Réunion et donc faciles à exploiter sur une image MODIS, mais elles sont systématiquement arrosées et sont également coupées à partir du mois d'août jusqu'au mois de novembre. On ne retient donc pas l'étude de la surface de canne à sucre dans la région « Littoral sud-sud-ouest », « Littoral nord-est » et « Hauteurs sud ».

On peut remarquer aisément la différence de paysage entre les régions de l'ouest et de l'est mais aussi entre une situation en haute ou en basse altitude. Les forêts de l'ouest sont moins denses et humides que celles de l'est et la teinte claire que prennent les paysages de prairies est remarquable. Il est difficile d'y repérer de grands espaces naturels très homogènes, les surfaces de forêt y étant très morcelées. Dans l'est, en revanche, les forêts sont particulièrement humides, peuplées de fougères en moyenne altitude et de branles verts en strate arborée tant l'apport en pluies y est important.

Végétation des régions pluviométriques de la côte sous le vent	
<p>Hauts ouest – Prairie <i>Vue sur le nord de Saint-Leu, depuis les Colimaçons</i></p>  <p style="text-align: right;">Source : Sylviane André</p>	<p>Hauts nord-ouest – Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars <i>Végétation semi-sèche du cirque de Mafate</i></p>  <p style="text-align: right;">Source : Sylviane André</p>
<p>Hauts nord-ouest – Prairie <i>Vue sur Saint-Paul et notamment l'étang Saint-Paul</i></p>  <p style="text-align: right;">Source : www.randopitons.re</p>	<p>Littoral sud-ouest – Forêt hygrophile <i>Forêt de tamarins du Tévelave</i></p>  <p style="text-align: right;">Source : www.chat-reunion.org</p>
<p>Hauteurs ouest – Prairie <i>Plaine des Cafres, vue sur le Piton des Neiges (à droite) et le Grand Bénard (à gauche)</i></p>  <p style="text-align: right;">Source : Sylviane André</p>	<p>Hauteurs sud – Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars <i>Paysage du Dimitile, vue sur les remparts du cirque de Cilaos</i></p>  <p style="text-align: right;">Source : Alizés Montagnes</p>

Figure 21 : Entités végétales retenues par région pluviométrique de la côte sous le vent et photographies associées.

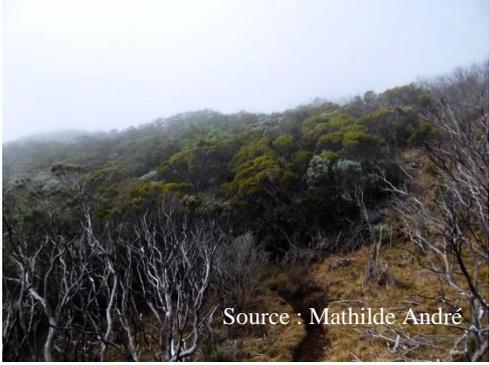
Végétation des régions pluviométriques de la côte au vent	
<p>Littoral nord-est – Forêt hygrophile <i>Paysage des hauts de Sainte-Rose avec fougères arborescentes</i></p>	<p>Littoral nord-est – Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars <i>Située à l'ouest de Saint-Benoit</i></p>
 <p>Source : www.ile-de-la-reunion.info</p>	 <p>Source : www.ile-de-la-reunion.info</p>
<p>Littoral sud-est – Forêt hygrophile <i>Coloraie du Volcan sur le massif du Piton de la Fournaise.</i></p>	<p>Région sud – Forêt hygrophile <i>Paysage de la forêt de la Crête, prolongée au nord par Foc-Foc, plateau titulaire du record de pluies en 24h</i></p>
 <p>Source : Julien Triolo / ONF</p>	 <p>Source : www.randopitons.re</p>
<p>Hauteurs est – Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars <i>Branles verts et blancs au-dessus de la Plaine des Palmistes</i></p>	
 <p>Source : Mathilde André</p>	

Figure 22 : Entités végétaives retenues par région pluviométrique de la côte au vent et photographies associées.

La carte suivante (Figure 23) permet de localiser les polygones relatifs aux différents paysages extraits de la base de données CLC et utilisés ensuite pour l'extraction de la valeur de NDVI du pixel sur le logiciel ENVI. On remarque bien la différence entre des surfaces de forêt très étendues dans l'est tandis qu'à l'ouest, elles sont plutôt parcellisées.

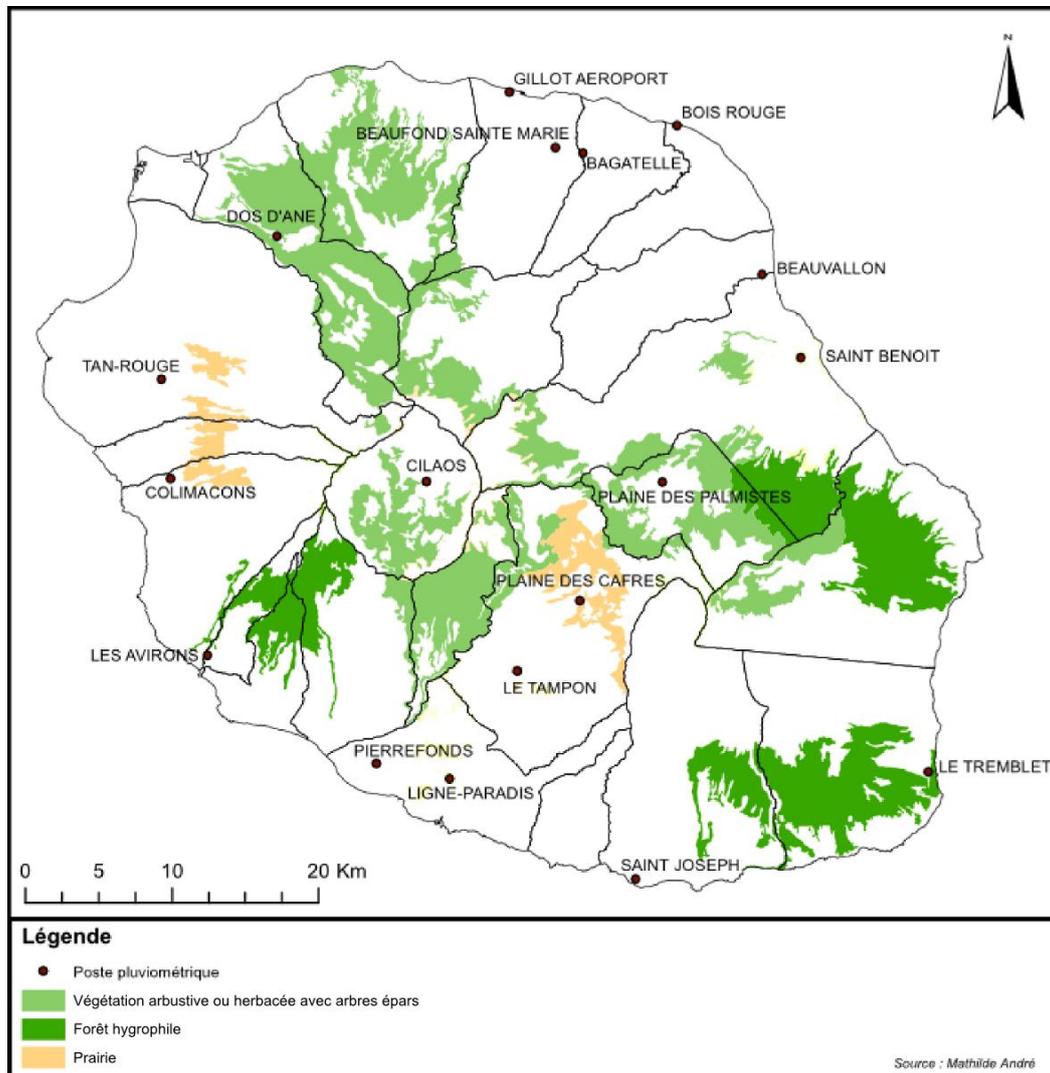


Figure 23 : Carte de localisation des polygones extraits de la base de données CLC et utilisés pour l'étude.

Les valeurs de NDVI extraites à partir des polygones présentés ci-dessus sont ensuite traitées à partir du logiciel TIMESAT qui permet de mieux observer les tendances dans les variations du cycle phénologique, de 2001 à 2013. On utilise la méthode de la moyenne gaussienne pour lisser les courbes de NDVI pour chaque grand ensemble de végétation retenu.

Le logiciel TIMESAT permet également d'observer les paramètres de saisonnalité (date de début et de fin de la saison végétative, amplitude...) et donc de mieux caractériser le comportement de la saison végétative. On compare alors les variations du cycle phénologique végétatif des régions pluviométriques « Littoral sud-est » (station du Tremblet) et « Hauts ouest » (station des Colimaçons). La première région est caractérisée par une surface de forêt dans un espace humide (côte au vent) et la seconde région par une surface de prairie dans un espace plus sec (côte sous le vent). On étudie donc la date de démarrage et de fin de saison végétative selon qu'elle soit tardive ou précoce.

On observe d’abord que la saison végétative est mieux marquée dans la région de l’ouest que dans la région de l’est. Cela concorde avec les observations faites de la durée de la saison des pluies : la date de fin de la saison des pluies est difficile à discerner dans l’est de l’île car l’apport en pluie est très élevé. De même ici, la saison végétative peut être très longue (11 mois sur 12 en 2004-2005 et en 2011-2012) et donc mal se distinguer de la période de faible activité chlorophyllienne qui a lieu chaque année. De plus, la reprise de l’activité chlorophyllienne débute plus tôt dans l’ouest que dans l’est de l’île. Elle peut être en avance de un à deux mois. En revanche elle se termine également plus tôt. Cela rend compte d’une première différence majeure dans le fonctionnement de la saison végétative sur la côte sous le vent par rapport à celle de la côte au vent.

HO	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	SE	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
2000/1																									
2001/2																									
2002/3																									
2003/4																									
2004/5																									
2005/6																									
2006/7																									
2007/8																									
2008/9																									
2009/10																									
2010/11																									
2011/12																									
2012/13																									

Tableau 6 : Comparaison des dates de début et de fin de saison végétative entre les régions pluviométriques « Hauts ouest » (station des Colimaçons) et « Littoral sud-est » (station du Tremblet).

Afin d’observer plus précisément les variations du NDVI et notamment leur lien avec les variations de pluviométrie, on représente graphiquement les deux variables pour différentes entités végétales. Toutefois, les graphiques représentant le cycle phénologique par rapport aux précipitations s’étendent sur une trop grande échelle de temps pour pouvoir être interprétés (Annexe 4). De ce fait, on se focalise sur une année sèche, l’année 2010 (Figure 24), et une année humide, l’année 2002 (Figure 25), dans les deux régions au régime pluviométrique et à la situation géographique opposés : les « Hauts ouest » et le « Littoral sud-est ». On a donc dans les hauts de l’ouest une surface de prairie et sur le littoral sud-est, une surface de forêt hygrophile.

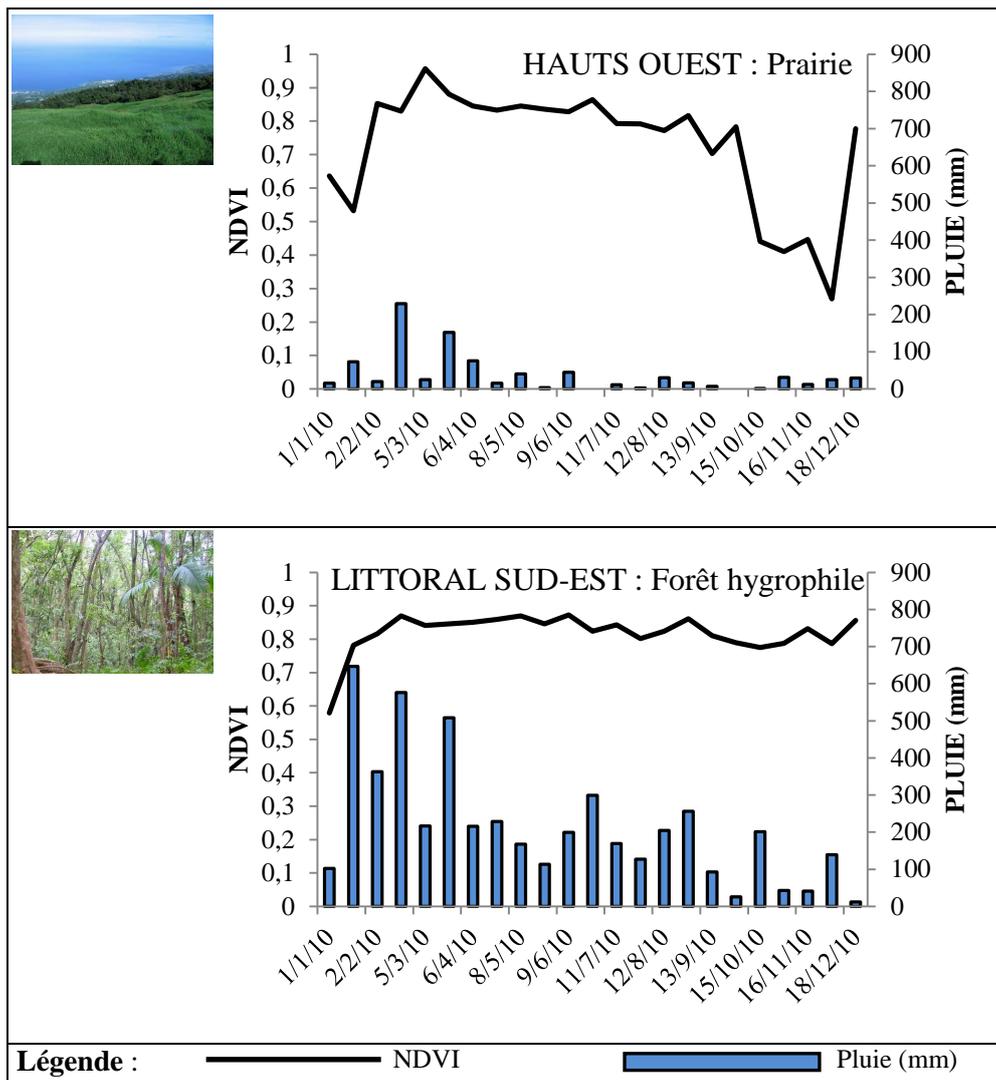


Figure 24 : Comparaison entre les variations de NDVI et de pluviométrie des régions pluviométriques « Hauts ouest » (station des Colimaçons) et « Littoral sud-est » (station du Tremblet) pour une année sèche : l'année 2010.

La première situation de la figure 24 présente une pluviométrie relativement faible dans les « Hauts ouest » avec un cumul maximum à 229,5mm en 2010. Dans le cas du « Littoral sud-est », les pluies cumulent au maximum à 646,5mm. Dans les deux situations, on remarque néanmoins aisément le régime d'été austral en début d'année puis le régime d'hiver austral par la suite, avec une constante diminution du niveau des pluies. Concernant la courbe représentant le cycle phénologique de la végétation, on observe là aussi une importante disparité.

Dans le cas de la région « Hauts ouest », l'augmentation du cumul des pluies du mois de février et du mois de mars semble générer l'augmentation des valeurs de NDVI, malgré une diminution faible mais rapide. Une forte diminution des valeurs de NDVI est constatée à partir du mois de septembre. En revanche, dans le cas de la région « Littoral sud-est », la courbe représentant les variations du NDVI reste stable tout au long de l'année, et ce malgré la diminution continue du cumul des pluies. On peut donc d'ores et déjà constater que l'ouest de l'île semble dépendre plus fortement de la pluviométrie que la côte au vent.

Quant à la figure 25, elle permet de voir que dans le cas d'une végétation située dans les hauts de l'ouest, la diminution du NDVI qui survient en hiver austral est de plus courte durée. En effet, lors d'une année sèche, la durée de faible production chlorophyllienne est d'environ deux mois. Lors d'une année humide, elle est d'environ un mois. Concernant la végétation du littoral sud-est de l'île, les valeurs de NDVI oscillent entre 0,6 et 0,9, sans connaître de forte baisse en période sèche. Dans cette région pluviométrique, l'année 2002 n'a pas connu de très fort apport en pluies pendant la saison humide, mais elle est restée particulièrement arrosée tout du long. En effet, la période d'hiver austral, censée être la période sèche, a été plus humide que la période d'été austral.

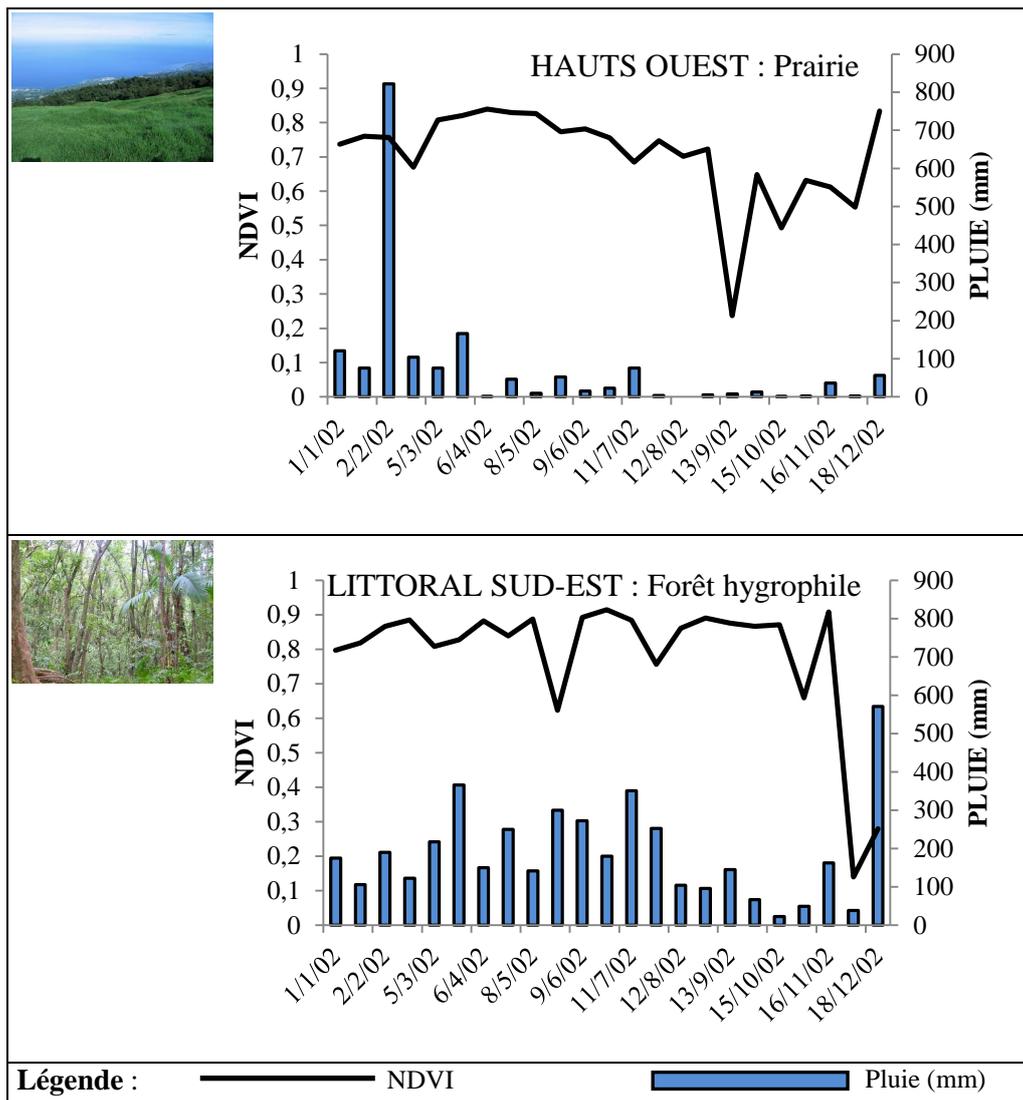


Figure 25 : Comparaison entre les variations de NDVI et de pluviométrie des régions pluviométriques « Hauts ouest » (station des Colimaçons) et « Littoral sud-est » (station du Tremblet) pour une année humide : l'année 2002.

Afin de conforter ces observations, le coefficient de corrélation est calculé et validé en relevant la valeur critique de la variable aléatoire F. Pour cela, on utilise l'utilitaire d'analyse sous Excel qui permet donc de vérifier si le lien observé est significatif ou dû au hasard. La valeur critique doit donc être inférieure au seuil critique que l'on fixe à 0,05 (5%). Si elle est

supérieure à ce seuil, le coefficient de corrélation obtenu sera considéré comme étant non représentatif. Le tableau 7 répertorie les résultats obtenus par région pluviométrique.

Région pluviométrique	Type de végétation	Coefficient de corrélation (R)	Valeur critique de F	Déphasage
<i>Région sud</i>	<i>Forêt hygrophile</i>	0,32	0%	1 mois
Littoral sud-sud-ouest	/	/	/	/
Littoral sud-ouest	Forêt hygrophile	0,28	0%	1 mois
Littoral sud-est	Forêt hygrophile	0,26	0%	1 mois
Littoral nord	/	/	/	/
Littoral nord-est	Forêt hygrophile	0,19	1,91%	1 mois
	Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars	0,26	0,09%	1 mois
<i>Hauts nord-ouest</i>	Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars	0,22	0,66%	1 mois
	<i>Prairie</i>	0,36	0%	1 mois
<i>Hauts ouest</i>	<i>Prairie</i>	0,40	0%	1 mois
Hauteurs sud	Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars	0,18	3,44%	1 mois
Hauteurs ouest	Prairie	0,12	15,3%	1 mois
Hauteurs est	Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars	-0,15	6,57%	/

Tableau 7 : Résultats obtenus par région pluviométrique en termes de coefficient de corrélation, valeur critique de F et durée du déphasage.

On remarque d'abord que toutes les entités végétales testées, exceptée celle présente dans la région « Hauteurs est », ont une réponse déphasée par rapport à l'occurrence des pluies. Ce décalage est d'un mois maximum et se repère en calculant le coefficient de corrélation sans déphasage, avec un déphasage d'un mois et avec un déphasage de deux mois. Dans la grande majorité des cas, le coefficient calculé est beaucoup plus élevé avec un déphasage d'un mois. Dans le tableau, on a donc conservé le niveau de déphasage donnant les meilleurs résultats.

Pour chaque coefficient de corrélation calculé, on obtient la valeur critique de F. Celle-ci est supérieure à 5% uniquement dans les régions pluviométriques en altitude, qui sont très arrosées : les « Hauteurs ouest » et les « Hauteurs est ». Dans ces deux zones, l'impact de la variabilité des pluies semble donc moindre, particulièrement aux alentours de Cilaos et de la Plaine des Cafres.

Enfin, si le coefficient de corrélation obtenu n'est jamais considéré comme fort, il est d'intensité moyenne, c'est-à-dire supérieur à 0,33, dans deux situations, avec un risque d'erreur de 0%. En effet, sa valeur est de 0,36 dans les « Hauts nord-ouest » et de 0,40 dans

les « Hauts ouest », pour une végétation de prairie. La « Région sud » présente également un coefficient de corrélation relativement élevé, calculé à 0,32 pour une population de forêt hygrophile. On obtient des résultats légèrement inférieurs dans la région « Littoral sud-ouest » avec un coefficient de corrélation de 0,28 dans le cas d'une végétation de forêt hygrophile. Concernant les régions situées sur le littoral de la côte au vent, la corrélation demeure proche du seuil d'intensité moyenne, avec une valeur de 0,26 sur le Littoral nord-est pour une végétation de type « Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars » et sur le Littoral sud-est également pour une végétation de forêt hygrophile. Deux graphiques en nuage de points sont représentés sur la figure 26 pour deux régions que l'on a pris pour exemple : les « Hauts ouest » et le « Littoral sud-est ». Il s'agit dans le premier cas d'une végétation de prairie avec un coefficient de corrélation raisonnablement élevé et dans le second cas d'une forêt hygrophile avec un coefficient de corrélation faible.

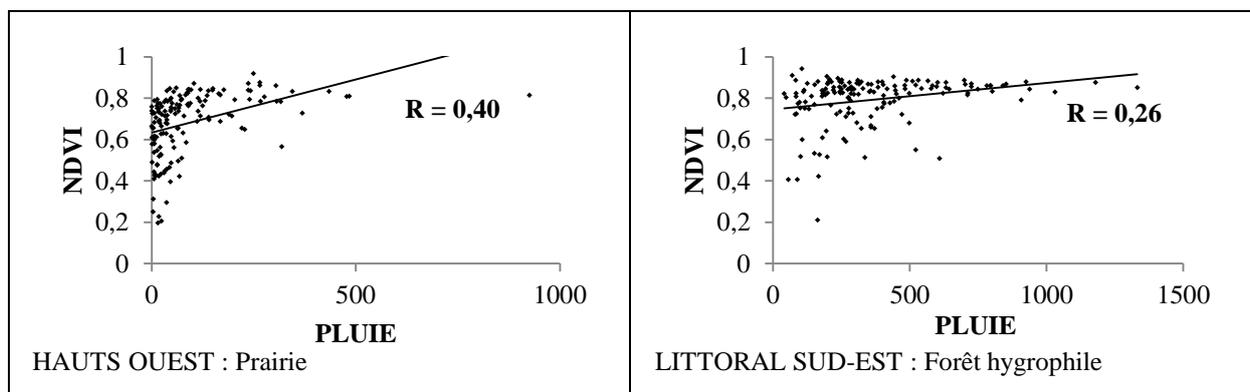


Figure 26 : Graphiques de corrélation entre les variables pluie et NDVI pour les régions pluviométriques « Hauts ouest » et « Littoral sud-est ».

L'ensemble des graphiques en nuage de points correspondant aux corrélations entre les deux variables sont disponibles en annexe (Annexe 5).

Au vu des coefficients de corrélation moyennement élevés entre les deux variables par rapport aux études réalisées ailleurs, on peut supposer qu'il existe d'autres facteurs explicatifs de la variabilité du NDVI.

2-3. Analyse en composante principale de la variabilité du NDVI

On choisit donc d'étudier la relation entre pluie et NDVI par rapport à d'autres variables majeures du climat en fonction de leur disponibilité : la température, l'humidité et la température de surface de la mer. L'étude est réalisée pour la surface de prairie des « Hauts nord-ouest » et « Hauteurs ouest », de végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars dans les « Hauteurs sud » et de forêt hygrophile du « Littoral sud-ouest ». Ces quatre situations sont les seules qui permettent d'utiliser les variables « température » et « humidité », les autres régions présentant trop de données manquantes.

On réalise une ACP de type Spearman à partir d'une base de données mensuelle qui s'étend de juillet 2003 à juin 2010, selon la disponibilité des données de TSM. Le tableau des valeurs propres, celui des vecteurs propres et le cercle des corrélations qui leur sont associé (Figures 27 a, b, c et d) permet d'étudier la manière dont les différentes variables s'articulent entre elles par rapport aux axes principaux.

Hauts nord-ouest – Prairie

Coefficient de corrélation : 0,36

Risque d'erreur : 0%

VALEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	2,345	1,385	0,820	0,358	0,093
Variabilité (%)	46,898	27,691	16,393	7,160	1,858
% cumulé	46,898	74,589	90,982	98,142	100,000

VECTEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
TSM	0,598	-0,235	-0,208	0,014	0,738
NDVI	0,301	0,660	-0,190	-0,658	-0,074
PLUIE	0,363	0,580	0,278	0,673	-0,043
TEMPERATURE	0,537	-0,321	-0,409	0,115	-0,655
HUMIDITE	0,365	-0,262	0,823	-0,319	-0,141

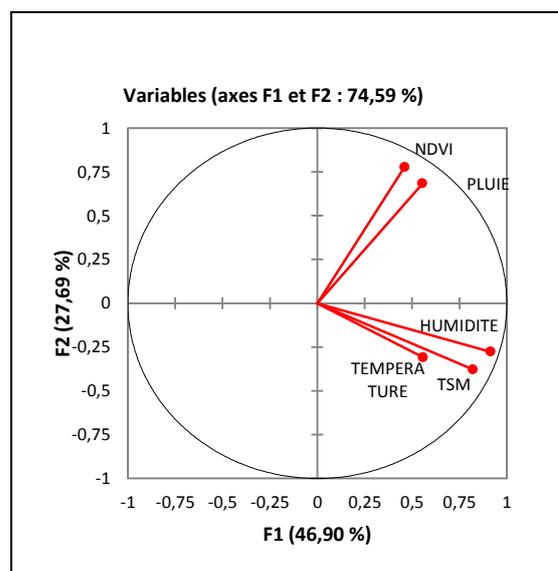


Figure 27 a : Résultats de l'ACP pour une végétation de prairie dans les « Hauts nord-ouest » (stations de Tan-Rouge et Dos d'âne) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation.

Littoral sud-ouest – Forêt hygrophile

Coefficient de corrélation : 0,28

Risque d'erreur : 0%

VALEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	2,241	1,428	0,741	0,478	0,112
Variabilité (%)	44,813	28,566	14,814	9,558	2,249
% cumulé	44,813	73,379	88,193	97,751	100,000

VECTEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
TSM	0,612	-0,142	0,282	-0,203	-0,697
NDVI	-0,037	0,630	0,743	0,210	0,079
PLUIE	0,239	0,641	-0,368	-0,620	0,111
TEMPERATURE	0,583	-0,305	0,244	-0,108	0,704
HUMIDITE	0,477	0,282	-0,418	0,720	-0,017

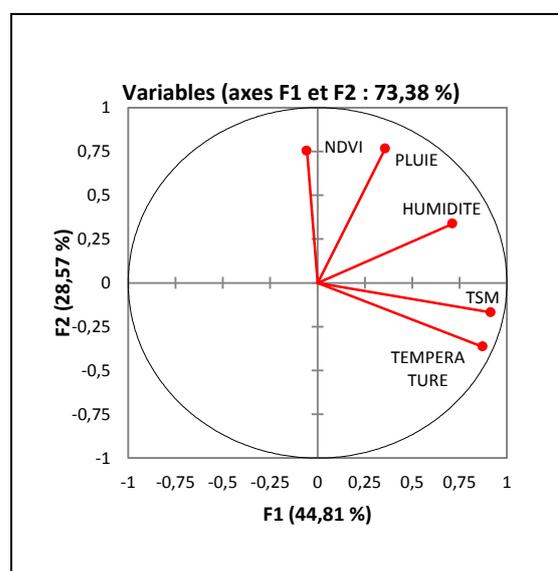


Figure 27 b : Résultats de l'ACP pour une végétation de forêt hygrophile sur le « Littoral sud-ouest » (station des Avirons) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation.

Hauteurs sud – Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars

Coefficient de corrélation : 0,18

Risque d'erreur : 3,44%

VALEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	2,481	1,386	0,613	0,369	0,151
Variabilité (%)	49,623	27,712	12,260	7,377	3,027
% cumulé	49,623	77,335	89,595	96,973	100,000

VECTEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
TSM	0,574	-0,116	-0,354	-0,166	0,710
NDVI	-0,048	0,781	-0,175	-0,595	-0,061
PLUIE	0,362	0,589	0,086	0,717	0,015
TEMPERATURE	0,563	-0,171	-0,396	-0,082	-0,700
HUMIDITE	0,469	-0,027	0,825	-0,312	-0,046

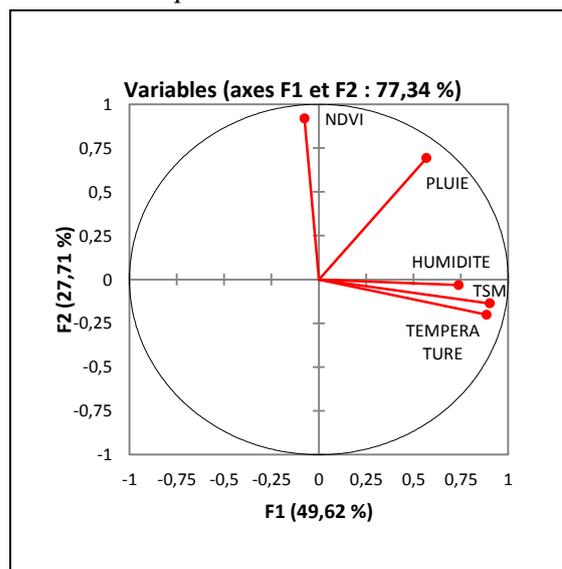


Figure 27 c : Résultats de l'ACP pour une végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars dans les « Hauteurs sud » (station du Tampon) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation.

Hauteurs ouest – Prairie

Coefficient de corrélation : 0,12

Risque d'erreur : 15,3%

VALEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	2,349	1,091	0,840	0,601	0,120
Variabilité (%)	46,972	21,812	16,795	12,021	2,400
% cumulé	46,972	68,785	85,579	97,600	100,000

VECTEURS PROPRES

	F1	F2	F3	F4	F5
TSM	0,592	-0,278	-0,124	-0,166	0,728
NDVI	0,228	0,681	-0,602	-0,334	-0,104
PLUIE	0,458	0,266	0,018	0,845	-0,075
TEMPERATURE	0,545	-0,447	-0,064	-0,213	-0,674
HUMIDITE	0,302	0,434	0,786	-0,319	-0,019

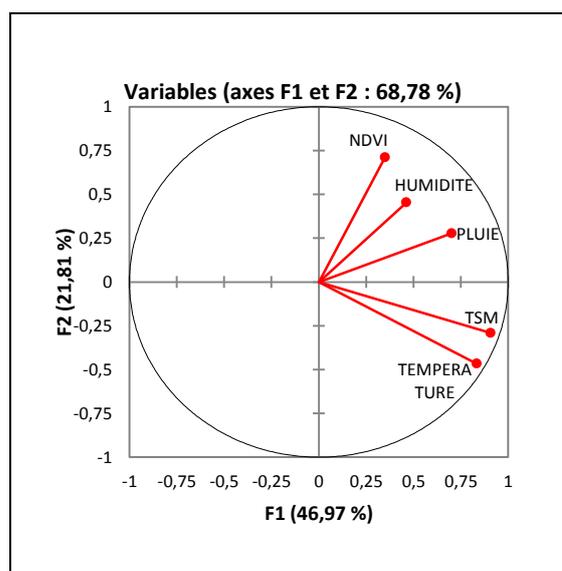


Figure 27 d : Résultats de l'ACP pour une végétation de prairie dans les « Hauteurs ouest » (stations de Cilaos et de la Plaine des Cafres) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation.

Dans les trois premiers cas (Figures 27 a, b et c), les axes 1 et 2 représentent entre 73,379 et 77,335% et pour le dernier cas (Figure 27 d), près de 70% de la variabilité. De ce fait, on ne choisit de représenter que ces deux axes sur le cercle des corrélations. Cela permet d'observer l'intensité de la relation entre les variables et les axes. Ainsi, dans ces trois situations, le NDVI et la pluie sont bien représentés sur le second axe. En observant le tableau des vecteurs propres, on remarque que ces deux variables sont aussi celles qui sont le mieux représentées

dans l'axe 2. On peut donc en conclure que le NDVI et la pluie sont, dans ces situations, bien corrélées entre elles.

La relation entre le NDVI et la pluie est forte dans le cas d'une surface de prairie des « Hauts nord-ouest », ce qui est conforté par la valeur du coefficient de corrélation rapportée dans le tableau 7 (0,36). Vient ensuite le cas de la forêt hygrophile du « Littoral sud-ouest », avec un coefficient de corrélation de 0,28 puis le cas de la végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars des « Hauteurs sud » avec une valeur de 0,18. Enfin, pour une surface de prairie dans la région pluviométrique « Hauteurs ouest », on remarque que seule la variable NDVI est bien représentée dans l'axe 2, ainsi que les variables d'humidité et, en corrélation négative, la température. Ces observations correspondent bien avec les résultats reportés dans le tableau 7 selon lesquels le risque d'erreur est relativement important. La relation entre le NDVI et la pluie est donc nuancée dans ce cas précis.

Cette étude permet donc de conclure que la pluie reste la variable explicative la plus importante du NDVI en comparaison des autres variables climatiques malgré un coefficient de corrélation moyennement élevé.

3. Discussion et conclusion

On a d'abord cherché, dans cette étude, à caractériser la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie à La Réunion. Cela a permis de déterminer les différentes régions pluviométriques de l'île et donc de repérer les différents microclimats qui la constituent.

Cette variabilité des pluies a d'abord été observée à l'échelle annuelle pour les différentes stations. Pour cela, on a d'abord calculé l'indice de Nicholson pour une station de l'ouest et une station de l'est. L'exemple de la station des Avirons permet de se rendre compte d'une diminution du cumul des pluies annuel après l'année 1982. Le test de rupture réalisé ensuite montre une généralisation du phénomène à l'ouest de La Réunion, avec une variation négative des pluies après rupture au cours des années 1980-1989. Cela est valable aussi bien pour les stations situées sur le littoral que pour les stations situées dans les hauteurs et dans les cirques. La détection de l'année de rupture permet également de faire un premier repérage des stations qui semblent connaître le même type de régime pluviométrique. En effet, toutes les stations du littoral sud et sud-ouest connaissent une diminution du cumul des pluies annuel à partir de l'année 1983. Le même phénomène peut être observé pour les stations situées dans l'ouest et dans le nord-ouest mais à partir de 1988.

Ces deux études préliminaires ont donc montré l'existence de régimes pluviométriques différents en fonction de la situation géographique sur l'île. De manière à confirmer cette observation, on a réalisé une ACP sur les données pluviométriques mensuelles. La variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers dans chacune des onze régions pluviométriques (Annexe 2) détectées permet d'observer l'influence réelle de la situation géographique : un climat très sec est observé dans l'ouest de l'île tandis que le climat est presque équatorial dans certaines régions de l'est. Cela confirme pleinement l'influence des alizés et du relief sur le climat de La Réunion. En effet, la côte au vent reçoit les alizés qui apportent de l'air chargé en humidité et donc, par advection, des formations nuageuses. À l'abri des alizés et de leur apport en humidité, la côte sous le vent ne connaît d'épisodes pluvieux qu'en été austral

principalement, et en hiver lorsque l'humidité relative de l'air augmente suffisamment pour engendrer des précipitations. Mais la baisse brutale de la pluviométrie dans l'ouest peut également être expliquée par l'hypothèse d'une relation entre variabilité pluviométrique et les modifications de l'occupation du sol (Brou 1997, 2005). Il est probable que les grandes modifications de l'occupation du sol qui se sont opérées à partir des années 1980 environ (Lagabrielle et al. 2007) dans l'ouest aient eu un impact sur les convections locales. Cela serait dû aux variations de l'évapotranspiration : selon Brou (1997, 2005), lorsque l'évapotranspiration diminue, on observe une diminution de la pluviométrie. Or, les milieux naturels de l'ouest de l'île ont été particulièrement dégradés lors des phases d'aménagement, remplacés par de grandes étendues de champs de canne à sucre, de cultures ou de constructions urbaines. L'étude menée par Montiny (1985), cité par Brou (1997), en Côte d'Ivoire montre par exemple que les évapotranspirations des couverts végétaux cultivés restituent 30 à 55% des précipitations annuelles dans l'atmosphère contre 55 à 70% dans le cas d'une surface de forêt.

Il est également intéressant de constater que les extrêmes pluviométriques dans l'ouest et dans l'est ne sont pas observés à la même période. Et pourtant, certaines dates correspondant à des cumuls pluviométriques particulièrement élevés correspondent au passage de cyclones au plus près des côtes de La Réunion. En effet, la côte sous le vent connaît de fortes précipitations durant la saison des pluies dues aux cyclones : Hyacinthe en 1980, célèbre pour son intensité, et qui est passé à 60 kilomètres de l'île, et Clotilda en 1987, qui est passé directement sur l'île, de même pour Colina en 1993. Concernant la côte au vent, les épisodes de très fortes pluies sont plus nombreux, de même que ceux dus au passage de cyclones ou fortes tempêtes. Comme sur la côte sous le vent, les fortes précipitations connues durant la saison des pluies estivale sont presque toutes dues au passage d'un cyclone ou d'une tempête : Gabrielle en 1982 à 50 kilomètres des côtes, Firinga en 1989 et Kylie en 1995 directement sur l'île. Mais malgré le passage de cyclones et tempêtes au plus près de l'île, les répercussions en terme de pluviométrie sont loin d'être les mêmes dans l'ouest et l'est de l'île. La côte au vent connaissant d'ores et déjà de très fortes précipitations, un événement pluvieux plus intense peut rapidement augmenter le cumul pluviométrique observé. De plus, la trajectoire des cyclones proches de La Réunion ne passent que rarement à l'ouest de l'île (Met Office, 2014). Leur impact se ressent donc plus souvent sur l'est de l'île, avec un important apport en pluies à chaque saison cyclonique. Le fort relief de La Réunion représente donc un véritable obstacle, isolant le climat de la côte ouest de celui de la côte est.

Toutefois, si ces conclusions peuvent être tirées suite à l'observation des variations du cumul pluviométrique, l'observation de la variabilité des dates de début et de fin de saison des pluies ainsi que sa durée apporte également des éléments de compréhension.

Il est difficile de repérer une tendance dans la variabilité du début et de la fin de la saison des pluies au fil du temps ou commune aux deux régions pluviométriques, l'une étant la plus sèche et l'autre la plus arrosée. Elles fonctionnent de manière très différente, ce qui peut être illustré par la saison des pluies de l'année 2012-2013 qui est difficilement repérable dans la région « Littoral sud-ouest » tout en étant la deuxième saison des pluies la plus longue dans la région « Littoral sud-est ». On a pu voir que dans les deux cas, la durée de la saison des pluies ne peut être mise en relation avec les observations correspondantes de l'indice de Nicholson.

Si la pluviométrie correspondant à la saison des pluies estivale uniquement n'explique pas l'occurrence d'une année très humide ou très sèche, alors on peut supposer que le rôle des précipitations hors saison n'est pas négligeable. En effet, l'humidité relative augmente avec le refroidissement de l'air, ce qui engendre des précipitations durant l'hiver austral. L'étude de Météo-France (Jumaux, Quetelard, and Roy 2011) montre d'ailleurs que l'apport en pluies est plus important durant la saison sèche que pendant les saisons des pluies au niveau de la région pluviométrique du « Littoral sud-est ».

Les répercussions de cette variabilité spatio-temporelle des pluies se ressentent sur la végétation, notamment dans les régions pluviométriques sensibles à de très faibles précipitations. Les types de paysages diffèrent entre la côte au vent et la côte sous le vent : la première est surtout constituée d'une végétation de types forêt hygrophile ou canne à sucre, tandis que la seconde est également marquée par de grands espaces de prairies, landes ou savanes (Boullet 2008). On a donc réalisé une étude de la corrélation entre la variable pluie et la variable NDVI à l'échelle des grands ensembles de végétation. L'étude montre que la dépendance de la végétation à l'apport en pluie est plus forte dans les régions de l'ouest et du sud. Il existe toutefois un déphasage : en effet, le coefficient de corrélation est maximal, dans la quasi-totalité des cas, lorsque l'on prend en compte un décalage du NDVI d'un mois par rapport aux pluies. Par exemple, le cumul des pluies du mois de février explique la valeur de NDVI du mois de mars. De plus, une étude à l'échelle d'une année sèche peut faire ressortir des différences de comportement entre les variations de NDVI des entités végétatives. On constate ainsi qu'une végétation de l'ouest, peu arrosé, réagit plus promptement à une augmentation de l'apport en pluie. Au contraire, une végétation de l'est réagit peu aux variations de l'apport en pluie, ce qui peut être expliqué par le fait que l'est de l'île est très arrosé, donc les sols y sont régulièrement saturés en eau.

Par rapport aux autres études réalisées en Afrique de l'ouest (Diello et al. 2005; Nicholson S, Davenport M, and Malo A 1990), le coefficient de corrélation est moyennement élevé. De l'ordre de 0,7 en Afrique de l'ouest, il est au maximum de 0,4 à La Réunion alors que l'on s'attendrait à une forte corrélation dans les régions sèches de l'île. En effet, pour une étude réalisée avec des images AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de 8 km de résolution (Diello et al. 2005), le coefficient de détermination linéaire calculé est alors de 0,6 à 0,8 pour une zone sahélienne ou soudano-sahélienne. Or, le coefficient de détermination correspond au carré du coefficient de corrélation, compris entre 1 et -1. Sa valeur est donc plus faible que celle du coefficient de corrélation. On peut également citer l'étude de S.E. Nicholson (1990) faite sur le Sahel, soit sur des zones d'études en commun avec l'étude de A.Z. Tra Bi (2014). Les images utilisées sont également des images AVHRR de NOAA de 3 x 5 km de résolution. L'auteur obtient un coefficient de corrélation relativement élevés en réalisant plusieurs manipulations qui n'ont pas été faites ici. Par exemple, les mois de saison sèche dans la région du Sahel sont supprimés de la base de données ce qui permettrait d'augmenter la valeur du coefficient de corrélation. Le coefficient a également été calculé en utilisant les données de pluviométrie du mois (0) par rapport à la série de NDVI auquel on ajoute les valeurs d'un mois plus tôt (1) et celles de deux mois plus tôt (2).

Les fortes valeurs de coefficient de corrélation obtenues s'expliquent par le fait que les études soient réalisées dans une zone semi-désertique et qui plus est une zone sensiblement plus grande, de faible modelé comparativement au milieu montagneux de La Réunion, et plus homogène que l'île. On peut supposer qu'à La Réunion, les paramètres de type insolation ou température peuvent influencer sur la valeur du coefficient de corrélation, du fait du relief accidenté de l'île.

De plus, ce qui est particulièrement remarquable sur une île telle que La Réunion, c'est la modification rapide du paysage. Les milieux naturels y sont de plus en plus parcellisés, ce qui rend difficile une interprétation à l'échelle de MODIS. Cela est dû à l'hétérogénéité des pixels. En effet, il est probable qu'un certain nombre de pixels doivent leur valeur à des surfaces relativement importantes de sols nus ou de végétation dégradée.

Hypothèse 1 : *Le régime des précipitations a été modifié : cette modification est marquée par un raccourcissement de la durée des saisons et un décalage des dates de début et de fin de saison.*

La première hypothèse est donc validée : on remarque bien que le régime des précipitations a subi des modifications. On constate que la durée de la saison des pluies diminue à partir de l'année 2006 dans l'ouest de l'île. Les dates de début et de fin de saison des pluies sont également très variables. Il est néanmoins difficile de repérer une réelle tendance dans l'évolution que le régime des précipitations semble prendre dans chacune des différentes régions pluviométriques. D'autres facteurs climatologiques devraient certainement être pris en compte pour mieux comprendre cette variabilité.

Hypothèse 2 : *Une rupture (changement de moyenne) est intervenue dans les séries pluviométriques au cours des années 1980 accompagnée d'une diminution importante des précipitations après cette date.*

La seconde hypothèse est validée partiellement : en effet, sur les dix-huit stations traitées, trois stations situées dans le nord-est de l'île connaissent une rupture dans les années 1970 et non pas 1980 comme dans les stations de l'ouest, suivie d'une augmentation des précipitations au lieu d'une diminution. Le poste de la Plaine des Palmistes, dans les hauteurs de l'est de l'île, ne présente quant à lui aucune rupture dans sa série pluviométrique. Néanmoins, les quatorze autres stations traitées valident l'hypothèse.

Hypothèse 3 : *La végétation est fortement vulnérable aux variations de précipitations.*

La troisième hypothèse est validée partiellement également : la réponse de la végétation aux variations des précipitations dépend fortement de sa localisation. En effet, dans une région très arrosée, la relation entre le NDVI et la pluviométrie est généralement très faible, tandis que dans une région soumise à des épisodes de sécheresse prolongés, cette relation est élevée.

Hypothèse 4 : *Les observations du NDVI des grands ensembles végétatifs rendent compte d'une modification de la dynamique de la végétation.*

Enfin, **la quatrième hypothèse est validée** : la date de début et de fin de saison végétative n'est pas stable au fil des ans. Elle peut varier fortement, de telle sorte qu'une période

d'augmentation ou de diminution de production de la chlorophylle peut ne pas s'effectuer et ainsi supprimer une saison de végétative. Une analyse plus fine permettrait de mieux expliquer ces variations, notamment dans le cas d'entités végétatives présentes sur la côte sous le vent. En effet, les variations des dates de début et de fin de saison végétative y sont très chaotiques et suivent peu les variations des dates de début et de fin de saison des pluies.

Limites et perspectives de l'étude :

Plusieurs contraintes et limites ont été rencontrées dans le cadre de cette étude. Elles sont d'abord d'ordre technique : en effet, les stations météorologiques n'ont parfois pas reçu les données de hauteur de pluie journalière sur une longue période, ce qui est problématique lors de la phase de traitements statistiques. Pour cela, seules 18 des 25 stations ont pu être exploitées. De plus, les différentes bases de données utilisées concernant les variables « température », « humidité » et « température de la surface de la mer » contiennent trop de valeurs manquantes pour être correctement exploitées. Cela limite grandement l'étude, puisque pour beaucoup de communes, ces données étaient tout simplement inexistantes. Enfin, l'hétérogénéité du paysage réunionnais observée particulièrement dans l'ouest explique le fait que les coefficients de corrélation obtenus soient moyennement élevés.

Les résultats obtenus pourraient donc certainement être améliorés de différentes manières : en utilisant la méthode mise en place par S.E. Nicholson (1990) explicitée plus haut, ou en augmentant la résolution spatiale de l'image. Une utilisation d'images SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) pourrait pallier à certaines contraintes. Les travaux de Morel (2014) montrent d'ailleurs que l'utilisation d'images SPOT4 et SPOT5 a permis d'obtenir des coefficients de corrélation plus élevés. Son étude appliquée aux surfaces de canne à sucre à La Réunion a été réalisée avec une résolution d'image de 10 mètres. La station SEAS-OI est alors un atout pour l'utilisation des images SPOT car elle dispose d'images mensuelles. Toutefois, le problème des perturbations atmosphériques demeure, car la répétitivité de ces images est plus faible que celle de MODIS. De plus, les satellites Sentinel 2 seront lancés prochainement dans le cadre du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne. Ils présentent de nombreux avantages : une résolution à 10 mètres avec une répétitivité à 10 jours avec le premier satellite, ramenée ensuite à 5 jours dès le lancement du second satellite et une gratuité des données.

Bibliographie

- Badat, F., J. Bonnier, Y. Cimbaro, A. Maillol, and L. Maillot. 2012. Chroniques de l'eau Réunion, ed. G. Sam Yin Yang : Office de l'eau Réunion. 45p.
- Barcelo, A., R. Robert, and J. Coudray. 1997. A Major Rainfall Event: The 27 February--5 March 1993 Rains on the Southeastern Slope of Piton de la Fournaise Massif (Reunion Island, Southwest Indian Ocean). *Monthly weather review* 125 (12). 6p.
- Boulet, V. 2008. *Les milieux naturels*. Museum d'histoire naturelle de La Réunion ed. Saint Denis (Réunion). 96p.
- Brou, Y. T. 1997. Analyse et dynamique de la pluviométrie dans le sud forestier ivoirien : recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques, Thèse de l'Université de Cocody. 220p.
- Brou, Y. T. 2005. Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire, HDR, Université des Sciences et Technologies de Lille. 212p.
- Brou, Y. T., B. Moppert, and F. Brial. 2013. Rainfall variability, wildfires and biodiversity conservation in La Réunion National Park : what prospects for climate resilient tourism development ? In *International Conference on Green India : strategic knowledge for combating climate change : prospects and challenges*, Pondicherry University. 15p.
- Buishand, T. A. 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology* 58 (1-2):11-27.
- Cadet, T. 1977. La végétation de l'île de La Réunion, étude phyto-écologique et phytosociologique. Thèse de l'Université Aix-Marseille 3. 312p.
- Diello, P., G. Mahe, J.-E. Paturel, A. Dezetter, F. Delclaux, E. Servat, and F. Ouattara. 2005. Relations indices de Végétation-Pluie au Burkina Faso: Cas du Bassin Versant du Nakambé. *Hydrological Sciences Journal* 50 (2). 17p.
- Djoufack-Manetsa, V. 2011. Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI, Thèse de l'Université de Yaoundé I et de l'Université de Bourgogne. 321p.
- Essotalani, A., K. Badameli, and V. Dubreuil. 2010. Evolution des saisons des pluies potentiellement utiles au Togo de 1950 a 2000. *Climatologie* 7:89-108.
- European Union and SOeS. 2006. CORINE Land Cover.
- Hoopingarner, J., S. E. Nicholson and J. Kim. 1988. Atlas of African rainfall and its interannual variability. Tallahassee, Florida: Dept. of Meteorology, the Florida State University. 237p.
- Jacquín, A. 2010. Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar, analyse par série temporelle d'images de télédétection, Thèse de l'Université de Toulouse. 146p.
- Jönsson, P., and L. Eklundh. 2004. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences* 30 (8):833-845.
- Jumaux, G., H. Quetelard, and D. Roy. 2011. *Atlas climatique de La Réunion*. Météo-France ed. 131p.
- Lagabrielle, E., P. Metzger, C. Martignac, B. Lortic, and L. Durieux. 2007. Les dynamiques de l'occupation du sol à La Réunion (1989-2002). *Mappemonde* 86. 23p.
- Lorion, D. 2006. Endiguements et risques d'inondation en milieu tropical. L'exemple de l'île de la Réunion. *Noréis. Environnement, aménagement, société* (201):45-66.
- Lubès, H., J. Masson, E. Servat, J. Paturel, B. Kouamé, and J. Boyer. 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. *Etude bibliographique. Programme ICCARE, Rapport 3*.

- Meneses-Tovar, C. L. 2011. NDVI as indicator of degradation. *Unasylva*, 8p.
- Monteny, B. 1987. Contribution à l'étude des interactions végétation-atmosphère en milieu tropical humide. Thèse d'état de l'Université de Paris-Sud. 170 p.
- Morel, J. 2014. Estimation de la biomasse de canne par modélisation et télédétection. Application à La Réunion. Thèse de l'Université de La Réunion. 150p.
- Nicholson S, E., L. Davenport M, and R. Malo A. 1990. A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of arid environments* 19 (1):1-24.
- Pettitt, A. N. 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28 (2):126-135.
- Rivals, P. 1950. Histoire géologique de l'île de La Réunion, Thèse de l'Université de Toulouse.
- Robert, R. 2009. *Ile de La Réunion, un patrimoine naturel d'exceptions : Une présentation simplifiée des travaux réalisés pour la candidature de La Réunion au Patrimoine Mondial de l'Unesco*. Saint-Denis. 176p.
- Sivakumar, K., and T. Awesso. 1996. L'analyse pluviométrique du Togo pour une planification à long terme. *Centre sahélien de l'ICRISAT*. 158p.
- Spearman, C. 1904. The proof and measurement of association between two things. *American journal of Psychology* 15 (1):72-101.
- Student, B. 1908. The probable error of a mean. *Biometrika* 6 (1):1-25.
- Tra Bi Z, A. 2014. Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). , Thèse de l'Université d'Artois et de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan. 189p.
- Wang, X. L. L., Q. H. Wen, and Y. H. Wu. 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46 (6):916-931.

Webographie :

Met Office, www.metoffice.gov.uk/data/tropicalcyclone/tctracks/composites/swi, consulté le 30 juin 2014

ONERC, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Temperature-de-la-surface-de-la.html>, consulté le 9 juillet 2014

Tables des figures

Figure 1 : Schéma de l'étagement de la végétation à La Réunion. <i>Source : Cadet (1977)</i>	8
Figure 2 : Carte représentant les régimes pluviométriques annuels moyens (1967-2013) de 18 stations et la pluviométrie annuelle moyenne (en mm) à partir des normales de 1981-2010. <i>Source : M. André, adapté de Jumaux, Quetelard et Roy (2011)</i>	9
Figure 3 : A gauche : position de la ZCIT et de l'anticyclone des Mascareignes et délimitation du passage des alizés en été austral. À droite : situation en hiver austral. <i>Source : www.cycloneextreme.com/cyclonereunionformation.htm</i>	10
Figure 4 : Schéma synthétique représentant la délimitation entre côte au vent et côte sous le vent ainsi que le flux d'alizés moyen est-sud-est. <i>Source : adapté de Jumaux, Quetelard et Roy (2011)</i>	11

Figure 5 : Carte de la répartition des stations météorologiques de Météo-France et du CIRAD utilisées pour l'étude. <i>Source : Image Bing 2010.</i>	13
Figure 6 : Graphique représentant la répartition des données de température de surface de la mer des données et leurs variations sur une période située entre septembre 1992 et juin 2010. <i>Source : www.seasnet.org</i>	15
Figure 7 : Création d'une série temporelle d'images MODIS pour la période de 2000 à 2013.	16
Figure 8 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le test de Mann-Whitney-Pettitt pour la station de Saint Joseph : 1996	17
Figure 9 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le PMT pour la station de Saint Joseph : 1996.....	18
Figure 10 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le test de déviation cumulative pour la station de Saint Joseph : 1990.....	18
Figure 11 : Graphique représentant la détection de l'année de rupture (encadrée en rouge) selon le test T pour la station de Saint Joseph : 1996.....	18
Figure 12 : Paramètres évalués sur le logiciel TIMESAT avec en (a) et (b) le début et la fin de saison végétative, en (c) et (d) le niveau 80% de la saison, en (e) la valeur maximale, en (f) l'amplitude de la saison, en (g) sa longueur et en (h) et (i) la surface représentant l'intégrale de la saison végétative sur la courbe. <i>Source : Jönsson et Eklundh (2004)</i>	20
Figure 13 : Représentation graphique de l'indice de Nicholson annuel calculé pour la station des Avirons sur la série temporelle	21
Figure 14 : Représentation graphique de l'indice de Nicholson annuel calculé pour la station du Tremblet sur la série temporelle.....	21
Figure 15 : Carte représentant la variation du cumul des pluies moyen après rupture dans la série temporelle	23
Figure 16 : Carte représentant la spatialisation des régions pluviométriques en fonction de l'implantation géographique du point de mesures	25
Figure 17 : Variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers pour la région « Littoral sud-ouest » (station des Avirons).....	26
Figure 18 : Variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers pour la région « Littoral sud-est » (station du Tremblet)	27
Figure 19 : Durée de la saison des pluies estivale dans la région « Littoral sud-ouest » (station des Avirons).....	28
Figure 20 : Durée de la saison des pluies estivale dans la région « Littoral sud-est » (station du Tremblet).....	28
Figure 21 : Entités végétaives retenues par région pluviométrique de la côte sous le vent et photographies associées	30
Figure 22 : Entités végétaives retenues par région pluviométrique de la côte au vent et photographies associées	31
Figure 23 : Carte de localisation des polygones extraits de la base de données CLC et utilisés pour l'étude	32
Figure 24 : Comparaison entre les variations de NDVI et de pluviométrie des régions pluviométriques « Hauts ouest » (station des Colimaçons) et « Littoral sud-est » (station du Tremblet) pour une année sèche : l'année 2010.....	34

Figure 25 : Comparaison entre les variations de NDVI et de pluviométrie des régions pluviométriques « Hauts ouest » (station des Colimaçons) et « Littoral sud-est » (station du Tremblet) pour une année humide : l'année 2002.....	35
Figure 26 : Graphiques de corrélation entre les variables pluie et NDVI pour les régions pluviométriques « Hauts ouest » et « Littoral sud-est »	37
Figure 27 a : Résultats de l'ACP pour une végétation de prairie dans les « Hauts nord-ouest » (stations de Tan-Rouge et Dos d'âne) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation	38
Figure 27 b : Résultats de l'ACP pour une végétation de forêt hygrophile sur le « Littoral sud-ouest » (station des Avirons) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation.....	38
Figure 27 c : Résultats de l'ACP pour une végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars dans les « Hauteurs sud » (station du Tampon) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation	39
Figure 27 d : Résultats de l'ACP pour une végétation de prairie dans les « Hauteurs ouest » (stations de Cilaos et de la Plaine des Cafres) avec tableau des valeurs propres, vecteurs propres et cercle de corrélation	39

Tables des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des séries de données en fonction du poste de mesures : date de début, date de fin et durée de la série de données ainsi que le nombre de données manquantes. <i>Source : Mathilde André</i>	14
Tableau 2 : Exemple du contenu de la feuille de calcul réalisée pour la détection de la saison des pluies estivale pour la région « Hauts ouest ». <i>Source : Mathilde André</i>	19
Tableau 3 : Résultats des tests de rupture effectués sur les séries de données annuelles de chacune des stations : année de rupture détectée et variation du cumul des pluies moyen après rupture. <i>Source : Mathilde André</i>	22
Tableau 4 : Composantes sélectionnées et paramètres à prendre en compte dans l'ACP. <i>Source : Mathilde André</i>	24
Tableau 5 : Corrélations entre les variables et les facteurs. <i>Source : Mathilde André</i>	24
Tableau 6 : Comparaison des paramètres début et fin de saison végétative et de saison des pluies entre les régions pluviométriques « Hauts ouest » et « Littoral sud-est ». <i>Source : Mathilde André</i>	33
Tableau 7 : Résultats obtenus par région pluviométrique en termes de coefficient de corrélation, valeur critique de F et durée du déphasage. <i>Source : Mathilde André</i>	36

Tables des équations

Équation 1 : Calcul de l'indice de végétation par différence normalisé.	16
Équation 2 : Calcul de l'indice de Nicholson. <i>Source : Hoopingarner et al. (1988)</i>	17
Équation 3 : Calcul du coefficient de corrélation de Pearson.	20

Tables des matières

Remerciements	2
Préambule.....	3
Résumé.....	4
Abstract	5
Liste des acronymes, sigles et abréviations.....	6
Introduction	8
1. Données et méthodes.....	13
1-1. Données.....	13
1-1-1. Données climatologiques	13
1-1-1-1. Données de pluviométrie.....	13
1-1-1-2. Données de température et humidité relative de l'air	15
1-1-1-3. Données de température de surface de la mer (TSM).....	15
1-1-2. Données de végétation	15
1-2. Méthode.....	17
1-2-1. Traitement des données pluviométriques	17
1-2-2. Traitement des données de NDVI	19
1-2-3. Recherche de corrélation entre le NDVI et la variabilité des précipitations	20
1-2-4. Étude de l'influence de différentes variables climatologiques sur les variations du NDVI.....	20
2. Résultats	21
2-1. Variabilité spatio-temporelle des précipitations.....	21
2-1-1. Des modifications observées du régime des précipitations.....	21
2-1-1-1. Indices de sécheresse.....	21
2-1-1-2. Date de rupture dans les séries	22
2-1-2. Régionalisation des stations	23
2-1-2-1. Date de rupture dans les séries	23
2-1-2-2. Variabilité de la durée et des dates de début et fin de saison des pluies	27
2-2. Impact de la variabilité pluviométrique sur la végétation	29
2-3. Analyse en composante principale de la variabilité du NDVI	37
3. Discussion et conclusion	40
Bibliographie.....	45
Webographie :	46

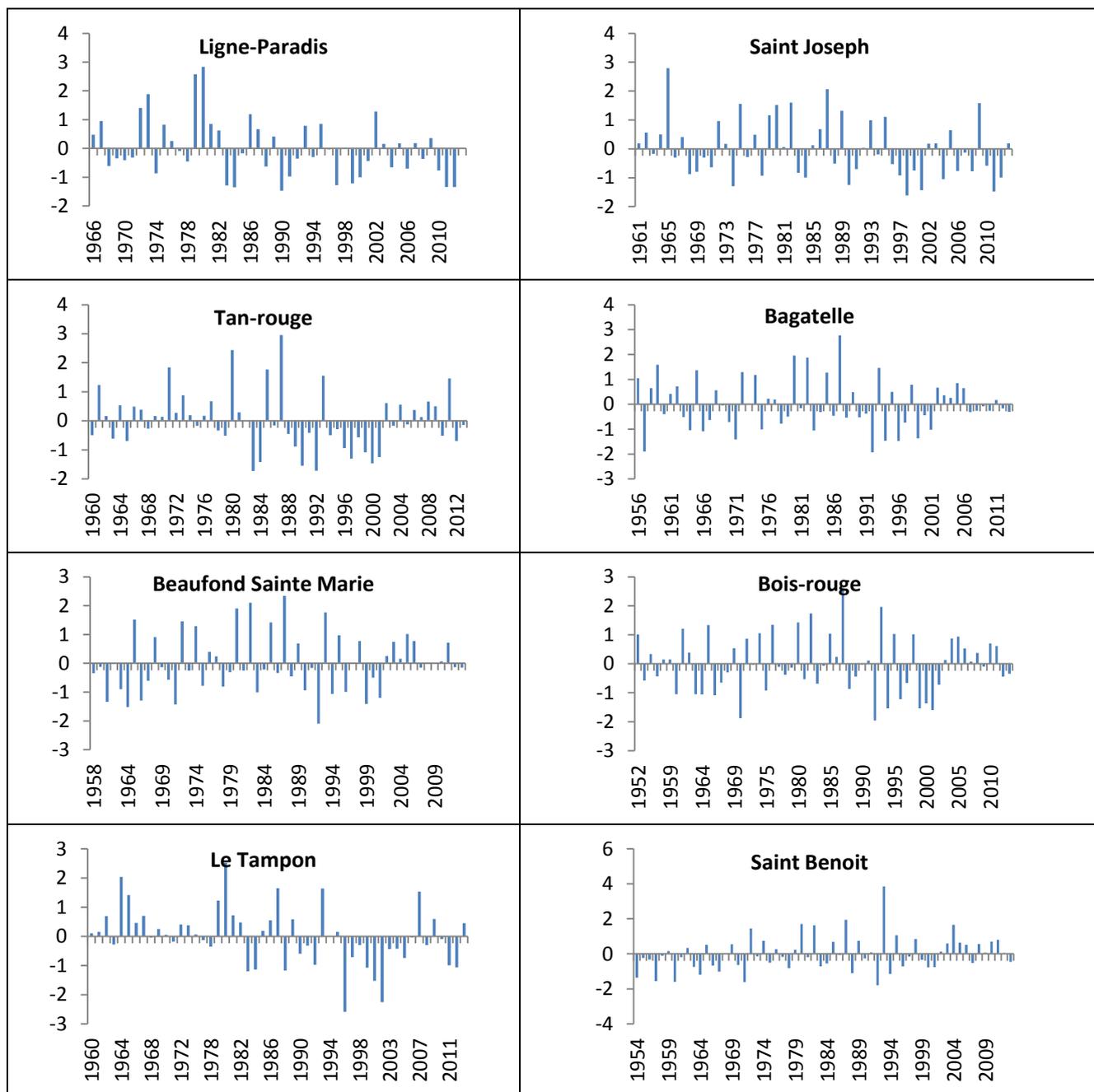
Tables des figures.....	46
Tables des tableaux	48
Tables des équations.....	48
Tables des matières	49
Tables des annexes	50
Annexes.....	51

Tables des annexes

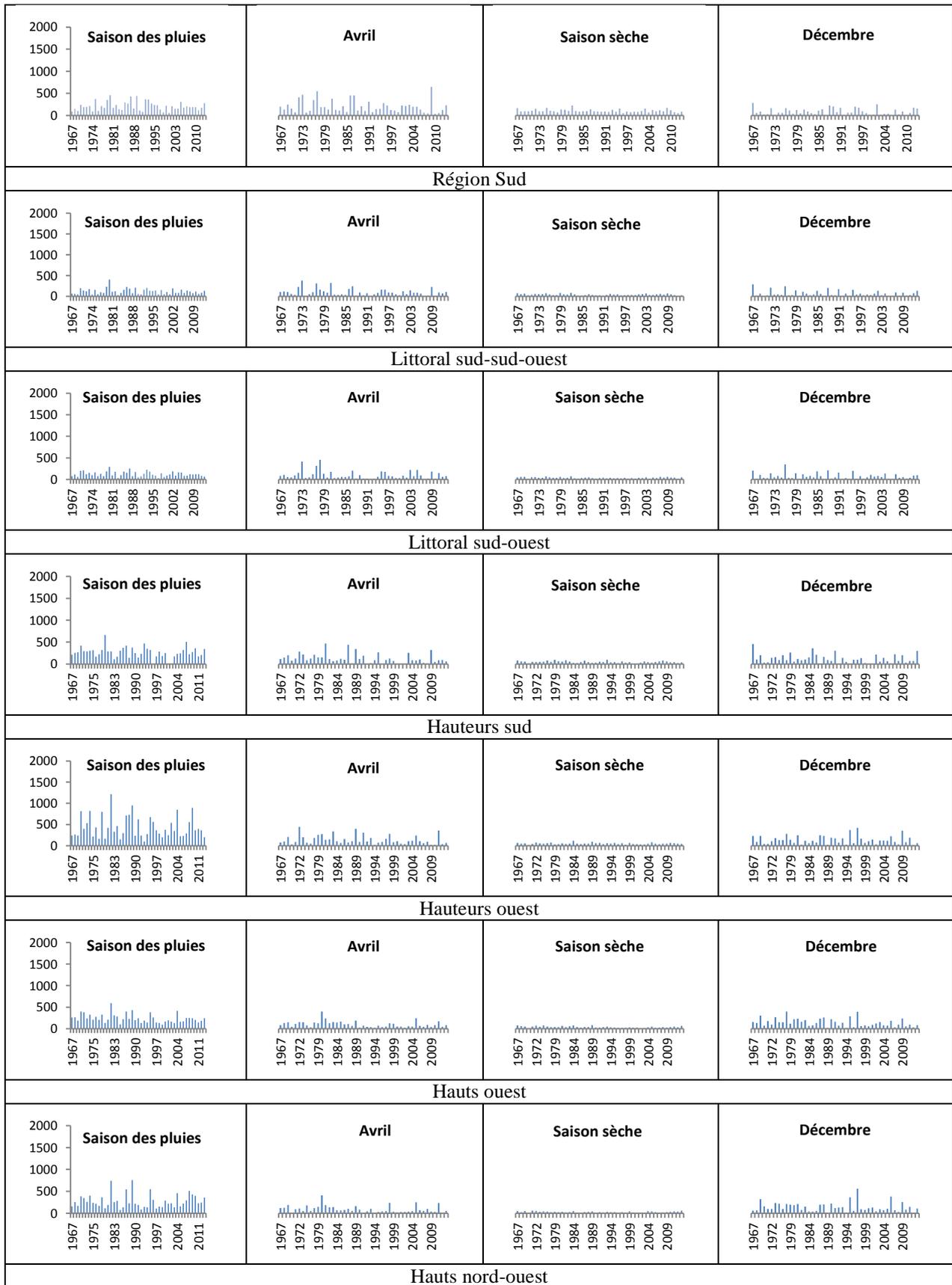
Annexe 1 : Graphique représentant les variations de l'indice de sécheresse pour chaque station. Source : Mathilde André.....	51
Annexe 2 : Variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers pour chacune des 11 régions pluviométriques. Source : Mathilde André.....	53
Annexe 3 : Tableau des vecteurs propres. Source : Mathilde André.....	55
Annexe 4 : Représentations graphiques des variations du cycle phénologique et des variations du cumul des pluies tous les 16 jours classées par type de végétation. Source : Mathilde André.....	56
Annexe 5 : Représentations graphiques en nuage de points correspondant à la relation entre la pluie en abscisse et le NDVI en ordonnée. Le tout est classé par type de végétation, dans le même ordre que dans l'annexe 4. Source : Mathilde André.....	59

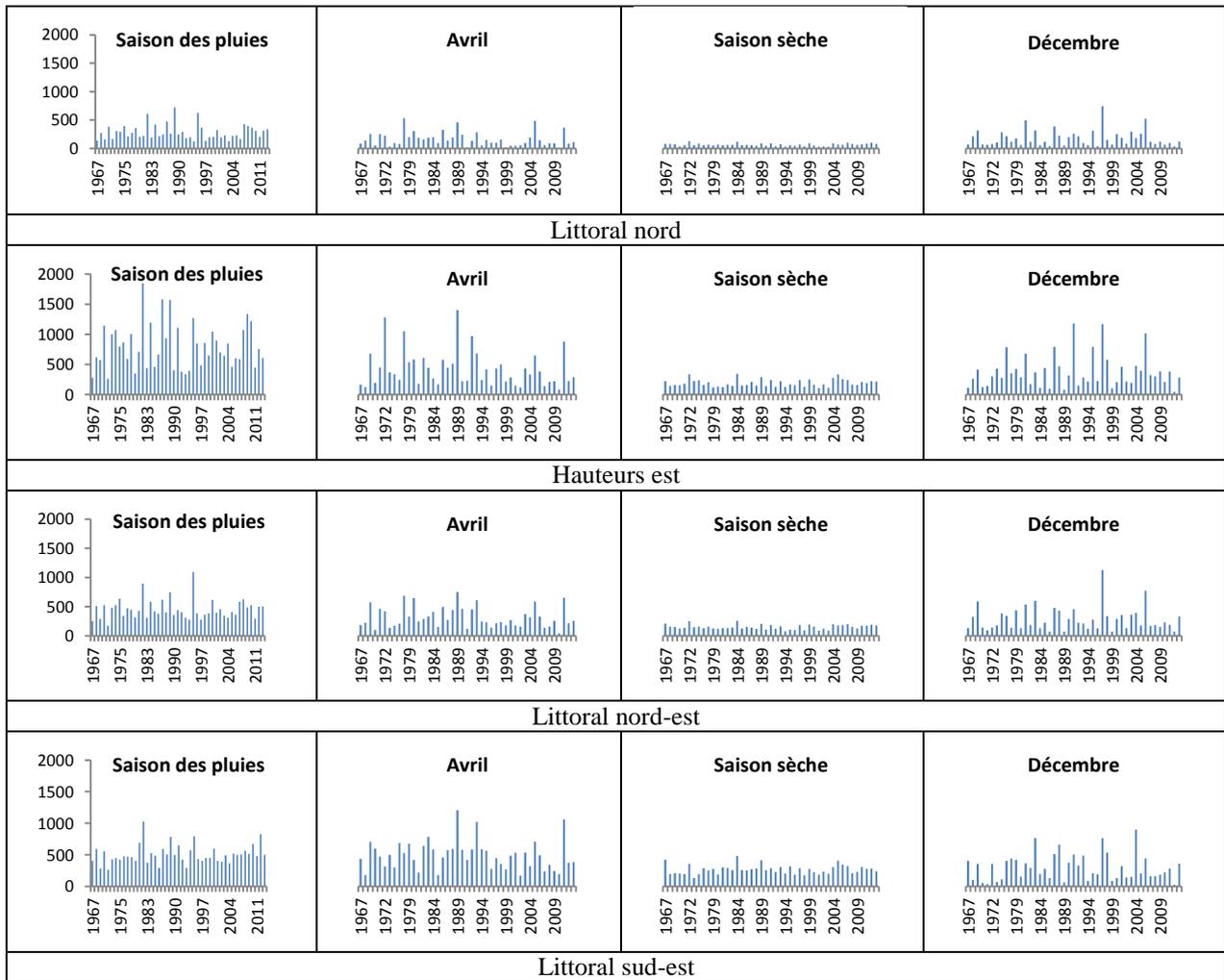
Annexes





Annexe 1 : Graphique représentant les variations de l'indice de sécheresse pour chaque station. Source : Mathilde André





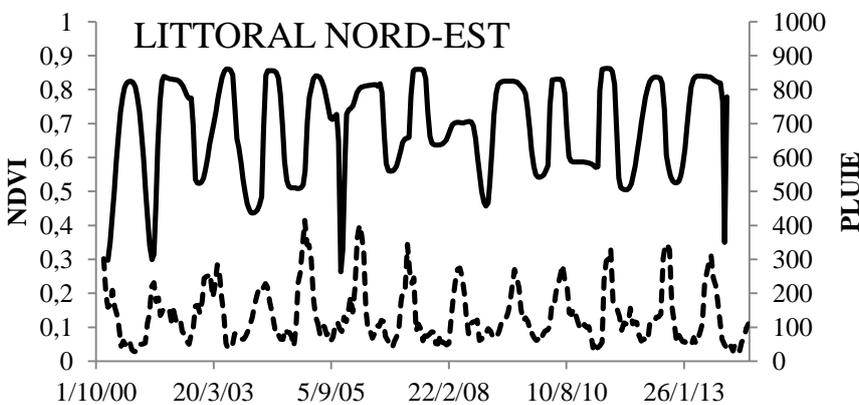
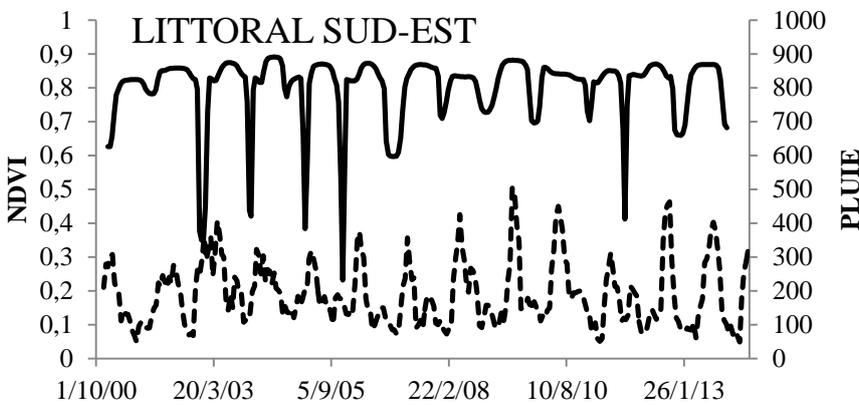
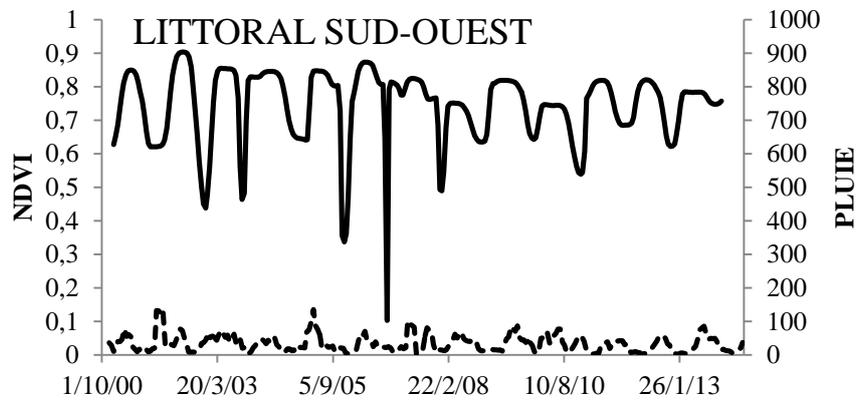
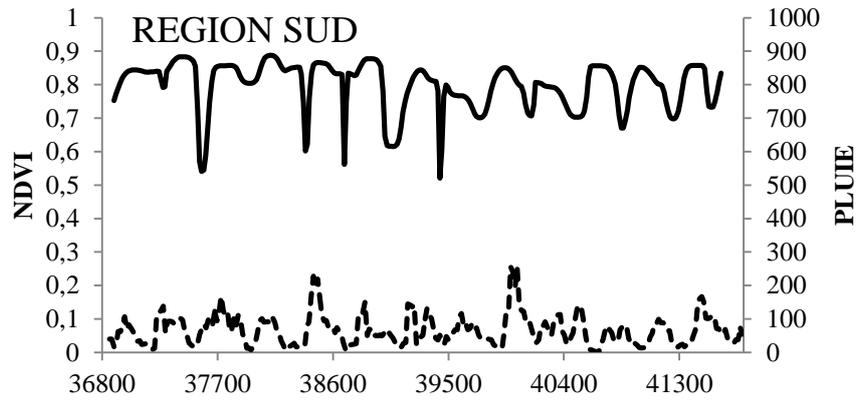
Annexe 2 : Variabilité pluviométrique des cumuls saisonniers pour chacune des 11 régions pluviométriques. Source : Mathilde André

	F1	F2	F3
Bagatelle	0,246	-0,269	0,112
Beaufond Sainte Marie	0,248	-0,257	0,087
Beauvallon	0,247	-0,254	0,149
Bois-Rouge	0,250	-0,241	0,095
Cilaos	0,257	0,140	-0,108
Colimaçons	0,226	0,068	-0,447
Dos d'Âne	0,246	-0,029	-0,302
Gillot-Aéroport	0,253	-0,213	-0,010
Le Tampon	0,236	0,242	-0,180
Le Tremblet	0,217	-0,029	0,353
Les Avirons	0,214	0,345	-0,034
Ligne-Paradis	0,206	0,390	0,203
Pierrefonds	0,212	0,380	0,145
Plaine des Cafres	0,254	0,113	-0,102
Plaine des Palmistes	0,248	-0,187	0,012
Saint-Benoit	0,246	-0,253	0,135
Saint-Joseph	0,187	0,286	0,464
Tan-Rouge	0,235	0,014	-0,427

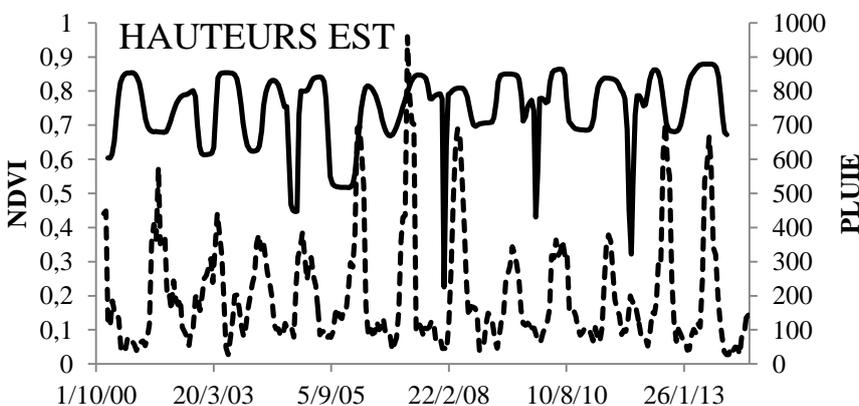
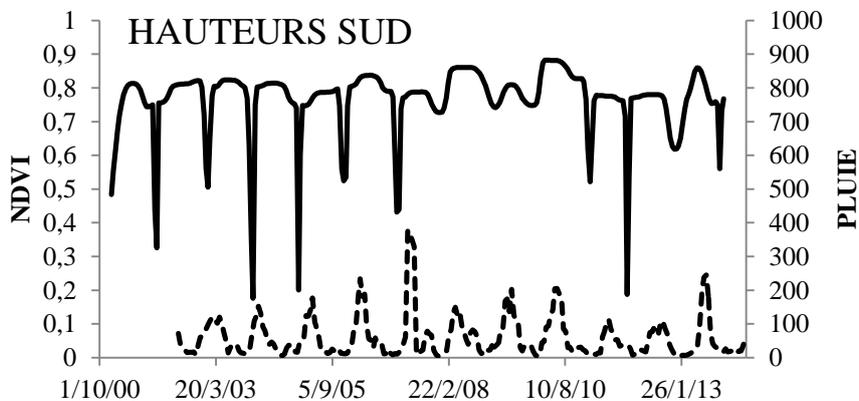
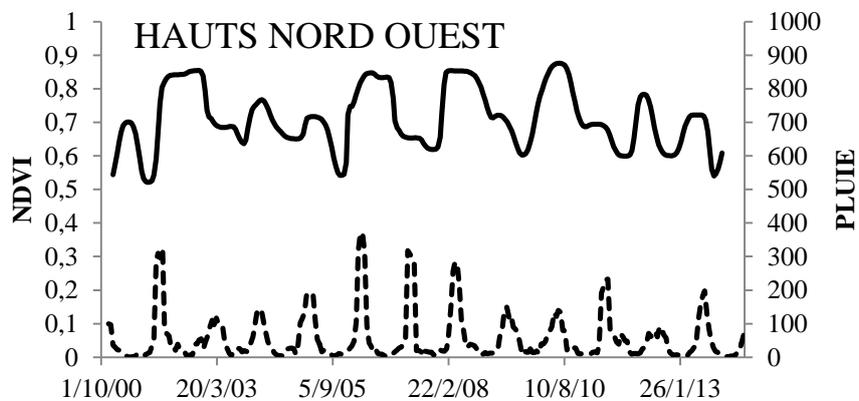
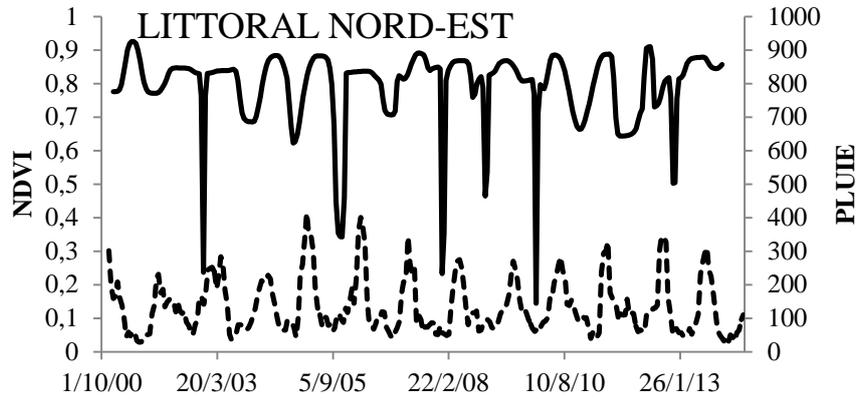
Annexe 3 : Tableau des vecteurs propres. *Source : Mathilde André*

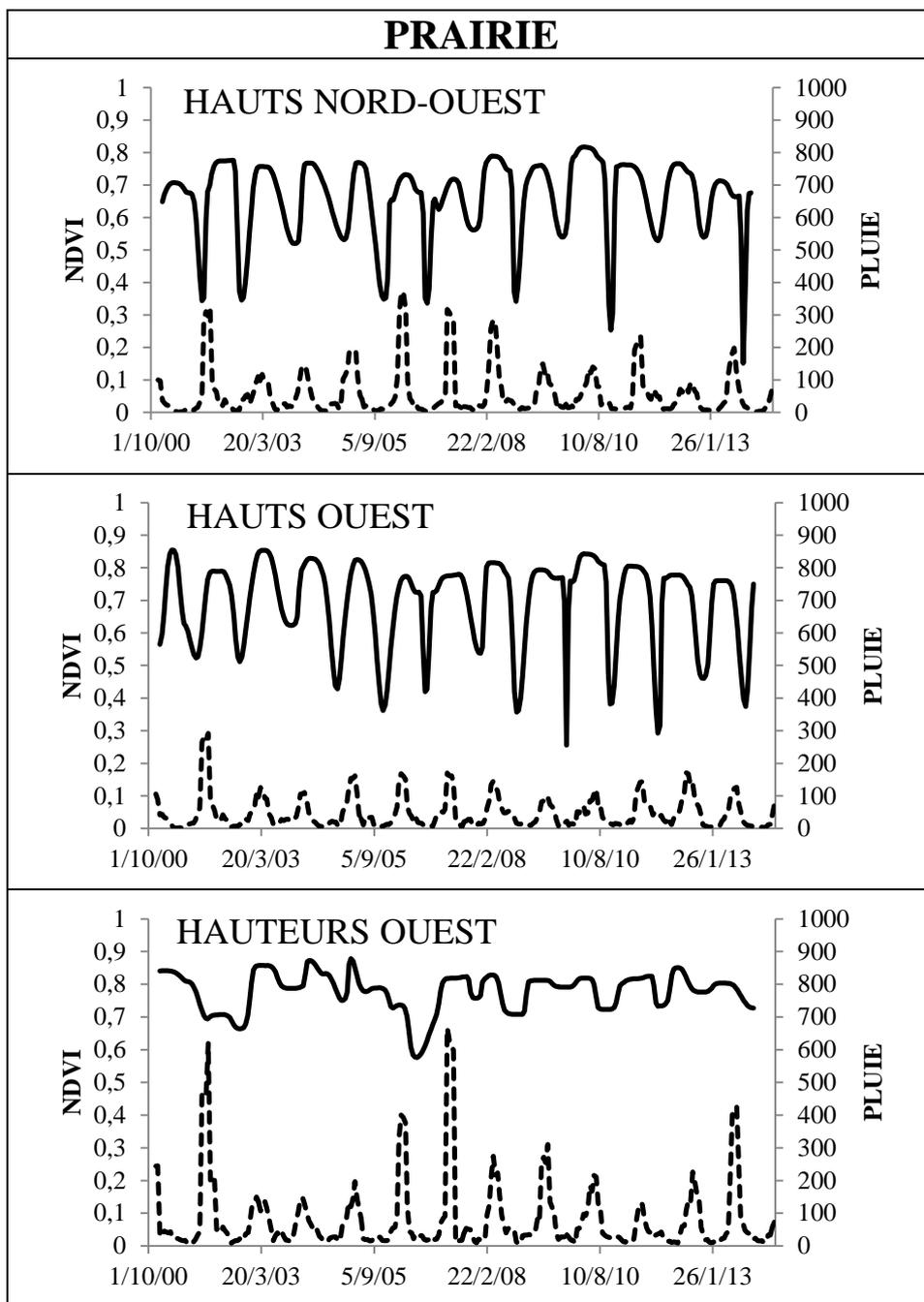
FORÊT HYGROPHILE

Légende : — NDVI - - - - - Pluie (mm)



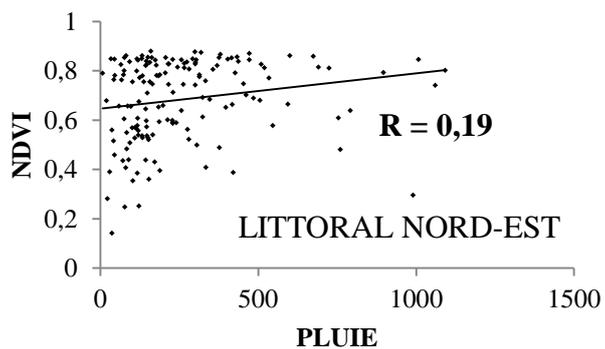
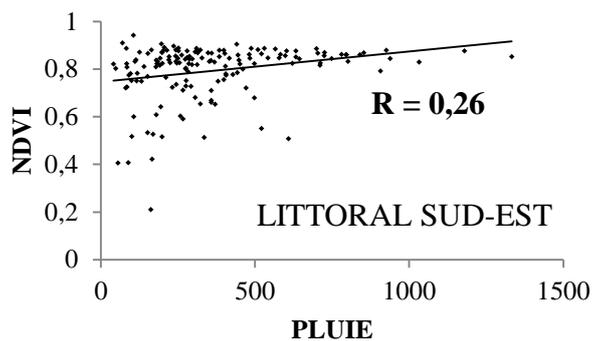
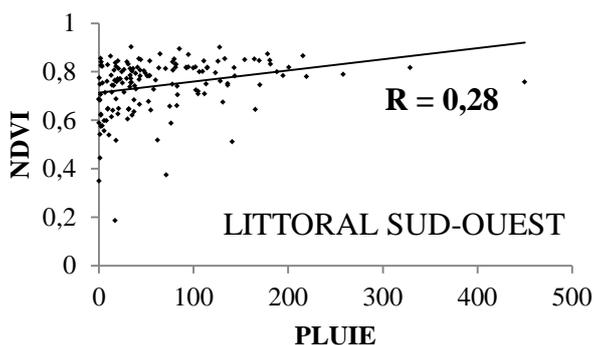
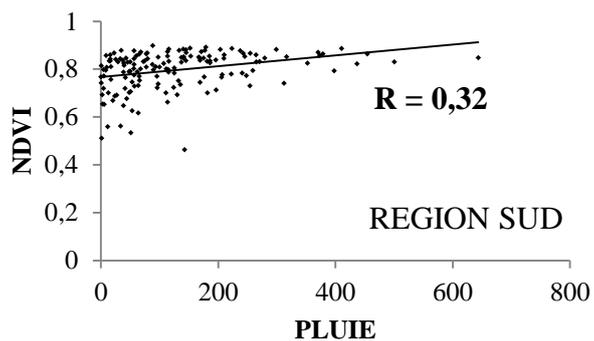
VEGETATION ARBUSTIVE OU HERBACEE AVEC ARBRES EPARS



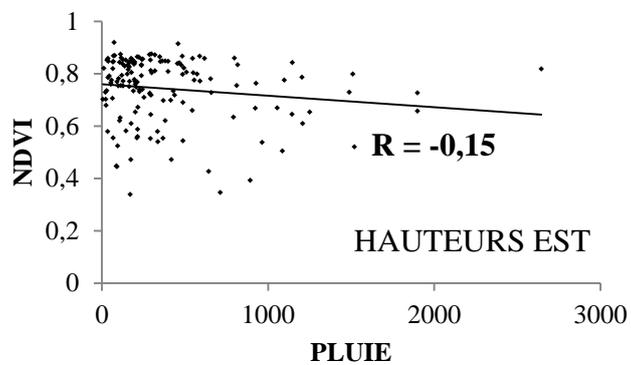
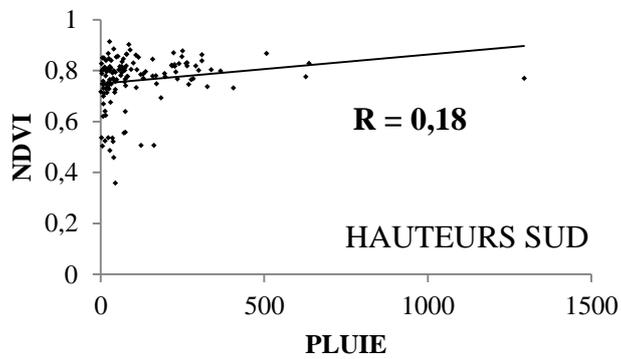
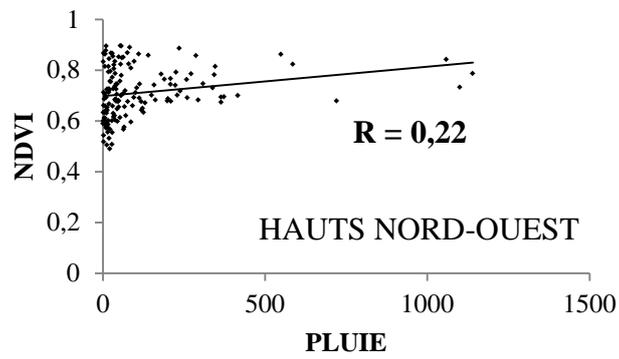
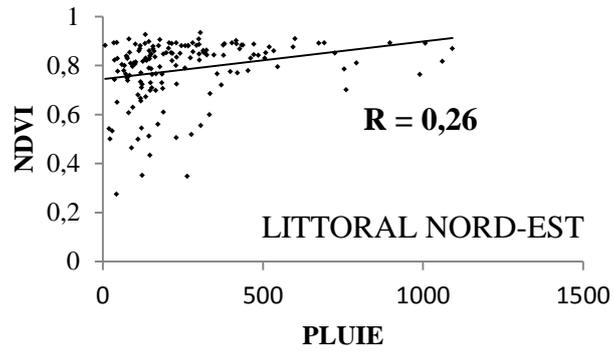


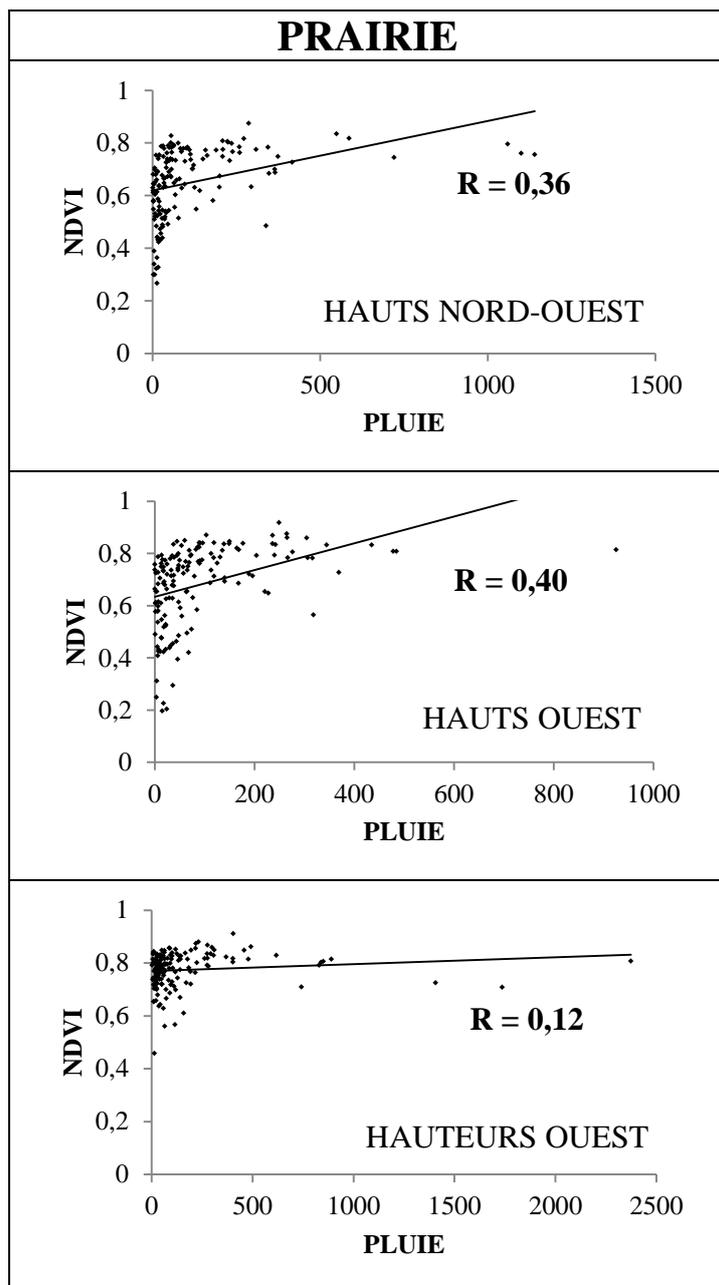
Annexe 4 : Représentations graphiques des variations du cycle phénologique et des variations du cumul des pluies tous les 16 jours classées par type de végétation. *Source : Mathilde André*

FORÊT HYGROPHILE



VEGETATION ARBUSTIVE ET HERBACEE AVEC ARBRES EPARS





Annexe 5 : Représentations graphiques en nuage de points correspondant à la relation entre la pluie en abscisse et le NDVI en ordonnée. Le tout est classé par type de végétation, dans le même ordre que dans l'annexe 4. *Source : Mathilde André*

Résumé

L'île de la Réunion, située dans le sud-ouest de l'Océan Indien, est soumise à un contexte climatologique varié, fragilisé par les conséquences du réchauffement climatique. Plusieurs microclimats existent à cause du relief accidenté et des différences d'exposition aux alizés orientés Est-ouest.

L'objectif premier de l'étude est de caractériser la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie à La Réunion. Les résultats des tests de détection de rupture appliqués aux séries pluviométriques et les indices de sécheresse calculés mettent en évidence deux situations géographiques contrastées. À l'ouest de l'île (côte sous le vent), la rupture dans les séries pluviométriques s'est produite entre 1980 et 1989 et est marquée par une baisse importante des hauteurs annuelles (entre 14 et 32%). En revanche, à l'est, les dates de rupture sont variables (1968-1972, principalement) avec de faibles baisses des hauteurs pluviométriques annuelles, certaines stations enregistrant même des hausses. Ce déséquilibre entre le climat de la côte au vent et celui de la côte sous le vent est exacerbé par l'observation de la durée de la saison des pluies. Dans l'ouest de l'île, elle est très courte, particulièrement depuis les années 2006. Au contraire, dans l'est de l'île, la saison des pluies est difficile à distinguer de la saison sèche tant les précipitations sont importantes tout au long de l'année.

Cette variabilité spatio-temporelle des pluies a un impact sur la végétation de l'île, dont les surfaces de forêt et de prairie sont en constante diminution. Le second objectif a donc été de mesurer la co-variation entre les variables « pluie » et « NDVI ». L'archivage et le suivi à l'échelle saisonnière du NDVI du capteur MODIS en relation avec les données de pluie sur la période 2000-2013 montrent que les ensembles végétatifs de l'ouest de l'île, régulièrement soumis au stress hydrique, réagissent bien aux variations de pluviométrie. Ceux de l'est de l'île en revanche sont moins sensibles à une diminution ou une augmentation du cumul des pluies. Toutefois, les coefficients de corrélation obtenus sont de moyenne intensité, leur valeur maximale variant entre 0,3 et 0,4. Néanmoins, les analyses multivariées ont montré que la valeur de ces coefficients est principalement due au paysage très hétérogène de La Réunion.

Mots clés : Variabilité climatique, pluviométrie, microclimats, NDVI, Île de la Réunion, MODIS.

Abstract

Reunion Island is located in the southwest Indian Ocean with a diverse climatological context weakened by the consequences of global warming. The rugged terrain and the exposure to the east-west trade winds explain the abundance of microclimates on the island.

The first objective of this study was to attempt to characterize the spatiotemporal variability of rainfall in La Reunion. The results of the identification of discontinuities in rainfall data series and drought indices highlight two different geographic situations. On the west, leeward coast, discontinuity in the rainfall series occurred between 1980 and 1989. It shows a significant decline in annual rainfall amounts (between 14 and 32%). On the east, windward coast, the discontinuities dates are variables (mainly between 1968 and 1972). There is only a small decrease or even an increase in the annual rainfall amounts. By observing the length of the rainy season, the imbalance between the windward coast's climate and the leeward coast's is extended. It is very short on the west coast since 2006 whereas the rainy season is difficult to separate from the dry season on the east coast because of the very important rainfall amounts throughout the year.

As the areas of forest and grassland are falling steadily, a study of the impact of the rainfall spatiotemporal variability has to be done. Consequently, the second objective of this study was to measure of the co-variation between "rain" and "NDVI". We used remote sensing methods using MODIS low-resolution images from 2000 to 2013. Results show that vegetative sets on the west of the island, which are often affected the water stress, respond well to rainfall changes. However, those on the east coast are less sensitive to a decrease or an increase in rainfall amounts. Nevertheless, the correlation coefficient have medium intensity with a maximum value ranging from 0,3 to 0,4. Yet, a multivariate analysis shows that the value of these coefficients is mainly due to the heterogeneous landscape of La Reunion.

Key words: Climate variability, rainfall, microclimates, NDVI, Reunion Island, MODIS.