



UFR : Sciences et Technologies

Département : Physique

**Mémoire de Master**

Mention : PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Caractérisation à l'échelle locale sur Tahiti des situations météorologiques de grande échelle et ses implications dans la qualification de la ressource d'énergie renouvelable.

Présenté par **Serigne Mbacké Coly**

Sous la direction de **Dr Marania Hopuare** et de **Dr Moctar Camara**

Soutenu publiquement le 29/05/2019 devant le jury composé de:

<u>Prénoms et Nom</u>	<u>Grade</u>	<u>Qualité</u>	<u>Établissement</u>
M. Diouma Kobor	Professeur titulaire	Président du Jury	(UASZ)
M. Moustapha Thiame	Maitre-Assistant	Rapporteur	(UASZ)
M. Bamol Ali Sow	Maitre de conférences	Examineur	(UASZ)
M. Samo Diatta	Maitre-Assistant	Examineur	(UASZ)
Mme Marania Hopuare	Maitre de conférences	Encadrant	(UPF)
M. Moctar Camara	Maitre de conférences	Co-Encadrant	(UASZ)

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents,

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et une longue vie.

À ceux que j'aime et qui m'ont soutenu tout au long de ce projet : oncles, tantes, petites sœurs, grands-parents et surtout à ma famille tahitienne, sans oublier mon papy James Mariassouce (Jacky) que j'aime.

À toute la famille Diop, Coly, Mariassouce, Hopuare et Aritai.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

## **Remerciements**

Au nom d'Allah, le tout miséricordieux, le très miséricordieux. Mes remerciements vont en premier lieu à mon encadrant et Directrice de stage Madame Marania Hopuare (Université de Polynésie française) mais aussi à Monsieur Pascal Ortega pour tous les conseils et encouragements que vous m'aviez apporté. J'aimerais exprimer ma gratitude au Docteur Marania Hopuare pour sa disponibilité, encouragements et conseils à mon égard.

Je remercie également Monsieur Jean Pierre Bariot, Directeur du laboratoire Geopôle du Pacifique Sud (GePaSud / Université de Polynésie française) pour l'accueil au sein du laboratoire. Cette étude a bénéficié de financements du Fonds Pacifique par le biais du programme VARAPP.

Je remercie aussi M. Moctar Camara (Co Directeur du LOSEC) d'avoir accepté d'être le répondant local de mon mémoire de master.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des membres du jury avec à sa tête le président, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Je ne saurais continuer sans remercier les enseignants du département de physique : Messieurs Moctar Camara, Bamol Ali Sow, Samo Diatta, Ababacar Ndiaye, Mamadou Lamine Mbaye, Lat Grand Ndiaye, Diouma Kobor, Joseph Sambassene Diatta mais aussi l'ensemble des chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC).

Je ne saurais terminer sans remercier tous mes camarades de promotion : Sambalaye Diop, Youssouph Badji, Lamine Konté, Mamadou Ndour, Pierre Malang Sadio, Youssoupha Cissé, Malick Mbengue, Khadidiatou Sy, Arame Dieye et Marie André Faye.

Je remercie encore une fois toutes les personnes sans qui ce mémoire n'aurait pas vu le jour

## Résumé

Ce mémoire est le fruit d'un stage mené au laboratoire Geopôle du Pacifique Sud (GePaSud) de l'Université de Polynésie française qui avait pour but de caractériser les différents régimes météorologiques qui règnent sur Tahiti (la principale île de la Polynésie française située au Sud de l'océan Pacifique) afin de qualifier la ressource en énergie renouvelable.

Une classification en régime de temps des situations météorologiques observés sur Tahiti a été effectuée à l'aide de la méthode des k-moyennes appliquée sur les données de données de vent à 500 hPa et de géopotential à 850 hPa provenant de ERA Intérim. Grâce à cette méthode 6 régimes, représentatifs de la climatologie de Tahiti, ont été identifiés. Chacun d'entre ces régimes a été ensuite caractérisé en fonction des structures de grandes échelles ayant lieu dans le Pacifique Sud (Anticyclones, Zone de Convergence du Pacifique Sud ZCPS).

Les résultats obtenus avec les données de grande échelle sont comparés avec les données de station météorologiques à l'échelle locale. Une saisonnalité des régimes a été observée avec des régimes qui apparaissent généralement pendant l'été austral tel quel le régime 1 et d'autres en hiver austral tel que le régime 5. Certains régimes (régime 3) sont plus favorables à l'exploitation d'énergie éolienne tandis que d'autres (régime 1) sont plus favorables à l'exploitation de l'énergie solaire.

**Mots-clés** : Tahiti ; Polynésie française ; énergie renouvelable ; ERA Interim ; régime de temps ; ZCPS ; grande échelle, vent, géopotential, k-moyenne.

## **Abstract**

This master's thesis is the result of an internship conducted in the GePaSud laboratory of the French Polynesia University, which aimed at characterizing the different weather patterns that reign on Tahiti (the main island of French Polynesia located on the south Pacific Ocean) to qualify the renewable energy resources.

A time classification of the meteorological situations observed on Tahiti was carried out using the k-means method applied on wind data at 500 hPa and the geopotential height at 850 hPa from ERA Interim reanalysis. The analysis highlights the occurrence of six (6) weather regimes, representative of Tahiti climatology. Each of these regimes was thus characterized according to the large scale structures taking place in the South Pacific (Anticyclones, South Pacific Convergence Zone SPCZ).

The results obtained with the large scale data are compared with the weather station data at the local scale. A seasonality of weather regimes has been observed with weather regimes that generally appear during the austral summer as it is weather regime 1 and others in the austral winter such as weather regime 5. Some weather regimes (weather regime 3) are more favourable to the exploitation of wind energy while others (weather regime 1) are more favourable to the exploitation of solar energy.

**Keywords:** Tahiti; French Polynesia; renewable energy; ERA Interim; weather regime; SPCZ; large scale; wind; geopotential; k-means .

## Liste des acronymes

ACP : Analyse de Composantes Principales

CEPMMT : Centre Européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

ENSO: El Niño Southern Oscillation

MJO: Madden-Julian Oscillation

NOAA: National Oceanic and Atmosphere Administration

OLR: Outgoing Longwave Radiation

PSA: Pacific South American

SAM: Southern Annular Mode

SOI: Southern Oscillation Index

SST: Sea Surface Temperature

ZCIT: Zone de convergence intertropicale

ZCPS: Zone de Convergence du Pacifique Sud

## Table des figures

Figure 1: Principaux champs de pression et des zones de convergence dans l'océan Pacifique	4
Figure 2: Position moyenne des zones de convergence dans l'océan Pacifique .....	6
Figure 3: Précipitations en été australe (mm/jour) réalisés à partir de GPCP (DJF). .....	7
Figure 4: Description du système océan-atmosphère pendant (a) une phase d'El Niño et (b) une phase de la Niña.....	8
Figure 5: L'île de Tahiti et l'emplacement des stations météorologiques.....	10
Figure 6: Position climatologique (DJF) de la SPCZ estimée par différents champs : précipitations, convergence à 850hPa, couverture nuageuse totale et OLR. ....	12
Figure 7: Projection du système solaire (3D) dans le plan (2D) et sur un axe (1D) .....	15
Figure 8: Fonctionnement de la méthode des k-moyenne.....	16
Figure 9: Exemple d'une distribution de Weibull .....	17
Figure 10: Exemple d'une rose de vent.....	17
Figure 11: Occurrence interannuelle des six régimes sur la climatologie (1979-2008).....	19
Figure 12: Evolution intra-annuelle de l'occurrence des six régimes sur la climatologie (1979-2008).....	20
Figure 13: Evolution intra-annuelle pour les six régimes météorologiques du Pacifique Sud, le nombre entre parenthèses indique l'occurrence pour chaque régime (jours) tiré de la réanalyse.....	21
Figure 14 : Occurrence journalière des régimes sur la période (1979-2008).....	22
Figure 15: Régimes de vent obtenu avec la classification du géopotentiel 850 hPa (en m) pour les jours attribués à chacun des six régimes. ....	23
Figure 16: Régimes de vent obtenu avec la classification du vent à 1000 hPa (en m/s) pour les jours attribués à chacun des six régimes. ....	24
Figure 17: Variation du rayonnement sortant des longues ondes (OLR) selon les régimes sur la zone du Pacifique Sud sur la base du clustering avec le vent à 1000hPa. ....	25
Figure 18: Indice océanique du phénomène ENSO de 1950 à 2012.....	28
Figure 19: Rose des vents station Faa'a selon les régimes .....	29
Figure 20: Rose des vents station Tautira selon les régimes.....	31
Figure 21 : Superposition des roses de vent sur la carte de Tahiti et représentation du sens du vent synoptique donné par la classification.....	32
Figure 22: Représentation du rayonnement global diurne selon les régimes.....	34
Figure 23: Distribution de Weibull selon les différents régimes .....	35

Figure 24: Esquisse de la production d'énergie éolienne à partir des caractéristiques de données de vent ..... 36



## Liste des tableaux

Tableau 1: L'algorithme des centres mobiles .....	13
Tableau 2 : Récapitulatif des vents à l'échelle synoptique et locale .....	33

## **Table des matières**

<b>Résumé</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>Liste des acronymes</b> .....	v
<b>Table des figures</b> .....	vi
<b>Liste des tableaux</b> .....	viii
<b>Table des matières</b> .....	ix
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités</b> .....	3
<b>I.1. Le climat de la Polynésie française</b> .....	3
<b>I.1.1 Définitions</b> .....	3
<b>I.1.2 Les anticyclones subtropicaux</b> .....	3
<b>I.1.3 Les régimes généraux de vent</b> .....	4
<b>I.2 Les zones de convergence</b> .....	5
<b>I.2.1 La Zone de convergence intertropicale (ZCIT)</b> .....	5
<b>I.2.2 La Zone de convergence du Pacifique Sud (ZCPS)</b> .....	6
<b>I.3 Le phénomène E.N.S.O</b> .....	7
<b>I.4 Définition du régime météorologique ou régime de temps</b> .....	9
<b>Chapitre II : Données et méthodes</b> .....	10
<b>II.1 Localisation de la zone d'étude</b> .....	10
<b>II.2 Description des données</b> .....	10
<b>II.2.1 Données de réanalyse</b> .....	10
<b>II.2.2 Données des stations météorologiques de Faa'a et Tautira</b> .....	11
<b>II.2.3 Données d'OLR</b> .....	11
<b>II.3 Méthodes</b> .....	12
<b>II.3.1 Classifications des régimes par la méthode des k-moyenne</b> .....	12
<b>II.3.2 Distribution de Weibull</b> .....	16

<b>II.3.3 Rose des vents</b> .....	17
<b>Chapitre III : Résultats et discussions</b> .....	18
<b>III.1 Occurrence des régimes obtenus</b> .....	18
<b>III.1.1 Evolution interannuelle de l'occurrence des régimes</b> .....	19
<b>III.1.2 Evolution intra-annuelle de l'occurrence des régimes</b> .....	20
<b>III.1.3 Répartition sur la base journalière</b> .....	22
<b>III.2 Caractérisation des régimes à l'échelle synoptique</b> .....	23
<b>III.3 Caractérisation des régimes à l'échelle locale</b> .....	29
<b>III.4 Qualification de la ressource en énergie renouvelable (Solaire et Eolien)</b> .....	34
<b>Conclusion et perspectives</b> .....	37
<b>Bibliographie</b> .....	38

## Introduction générale

Ces dernières décennies, les modifications de la composition physico-chimique de l'atmosphère ont été clairement identifiées comme étant la cause d'un changement climatique. L'un des arguments les plus probants mis en avant pour appuyer la thèse du changement climatique est l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre. De nombreuses observations, effectuées de façon indépendante, confirment une élévation de 0.6°C de la température moyenne globale durant le XXe siècle (Rapport annuel 2012 [Météo France], 2013). Ces changements récents sont attribués, en grande partie, aux activités anthropiques. Ces changements ayant un impact néfaste sur la vie de l'homme, des mesures ont été prises (Accord de Paris 2015). Parmi celles-ci la promotion et l'utilisation des énergies renouvelables afin d'assurer un mix énergétique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Tahiti, qui en 2012 abritait 69% des habitants de la Polynésie française, a une assez forte demande en énergie électrique qu'elle se doit de satisfaire. Ainsi, l'administration polynésienne s'est fixée comme objectif d'atteindre une part de 50% en énergie renouvelable dans la production d'électricité.

De par sa position géographique, la Polynésie française est sous l'influence des alizés et d'un certain nombre de modes de variabilité intra saisonniers et interannuels à grande échelle. Comme la prévision précise des vents à l'échelle des îles nécessite la connaissance des réponses locales à un scénario synoptique donné (Davidson et al, 1992), une étude des conditions synoptiques est nécessaire pour aborder avec précision le problème de la détermination des situations météorologiques en ces lieux. A l'échelle interannuelle, la Polynésie française est touchée par le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO). En règle générale, on sait que l'état de base du Pacifique Sud varie selon les échelles de temps interannuelles, en particulier en ce qui concerne ENSO car influant sur la position (déplacement Nord-Est) de la ZCPS favorisant la présence de celle-ci à proximité de la Polynésie française (Hopuare et al, 2015).

Bien que l'application du régime météorologique soit limitée dans le Sud du Pacifique ou dans les tropiques (Kidson, 2000; Lefèvre et al, 2010; Ackerley et al, 2011; Renwick, 2011; Jiang et al, 2013; Moron et al, 2016), les études qui existent, démontrent qu'ils peuvent améliorer de manière critique la compréhension des impacts des facteurs climatiques, y compris ceux d'ENSO. Ainsi, ces études permettent une meilleure compréhension du climat des îles du Pacifique dans l'optique d'en tirer un maximum d'informations et faciliter la prévision des périodes propices au déploiement de technologies d'énergie renouvelable.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail. Notre document est constitué de trois chapitres. Le premier chapitre porte principalement sur les généralités du climat dans le Pacifique, en général, mais surtout celui polynésien en particulier. Dans le second chapitre nous abordons les données traitées et les méthodes utilisées dans le cadre de ce mémoire. Les résultats et discussion sont présentés dans le chapitre 3. Dans la dernière partie, nous présenterons la conclusion avant d'ouvrir quelques perspectives.

# **Chapitre I : Généralités**

## **I.1. Le climat de la Polynésie française**

Situé au milieu de l’océan Pacifique, la Polynésie française est constituée de 118 îles et atolls dont Tahiti est la plus grande (1042 km<sup>2</sup>).

Les données de température, de hauteurs de pluie, et à un moindre degré, la durée d’insolation permettent la classification du climat.

### **I.1.1 Définitions**

De par sa position géographique (entre 5° et 30° de latitude Sud et entre 130° et 155° de longitude Ouest), le climat polynésien est tropical de type maritime humide.

En météorologie, on considère comme « zone tropicale » la ceinture du globe comprise entre les axes des anticyclones subtropicaux de surface des deux hémisphères (situés en moyenne annuelle vers 30°N et 30°S),

Deux saisons ont été identifiées dans la littérature (Atlas de la Polynésie française, 2004):

- ✓ De Novembre à Avril, la saison dite « chaude » ou été australe qui coïncide avec une humidité plus importante et une température légèrement plus élevée.
- ✓ De mai à Octobre une saison dit « fraîche » ou hiver austral qui coïncide avec une humidité moindre et une température légèrement plus fraîche.

### **I.1.2 Les anticyclones subtropicaux**

Les anticyclones subtropicaux sont situés en moyenne annuelle vers 30° de latitude au niveau des branches subsidentes des cellules de Hadley (Beucher, 2010). Chaque anticyclone porte le nom d’un archipel d’îles situées à proximité de la position moyenne annuelle du centre de l’anticyclone. Ainsi, dans l’hémisphère Sud, on distingue l’anticyclone de Sainte Hélène sur l’océan Atlantique (centré vers 10°W), l’anticyclone des Mascareignes qui se situe sur l’océan Indien (centré vers 80°E), et l’anticyclone de l’île de Pâques sur le Pacifique (centré vers 90°W) mais aussi l’anticyclone de Kermadec qui est d’une plus petite envergure (Figure 1).

Dans l’hémisphère nord, l’anticyclone d’Hawaï se positionne sur l’océan Pacifique Est (centré vers 140°W), et l’anticyclone des Açores sur l’océan Atlantique Est (centré vers 40°W).

Sur les océans Pacifique et Atlantique, les centres des anticyclones subtropicaux se positionnent en moyenne annuelle sur les flancs est des bassins. (Beucher, 2010)

Il est important de rappeler que, pour un jour donné, les anticyclones subtropicaux peuvent se situer à une longitude très différente de leur position moyenne.

Les anticyclones subtropicaux présentent une variation saisonnière marquée en termes de localisation méridienne et d'intensité.

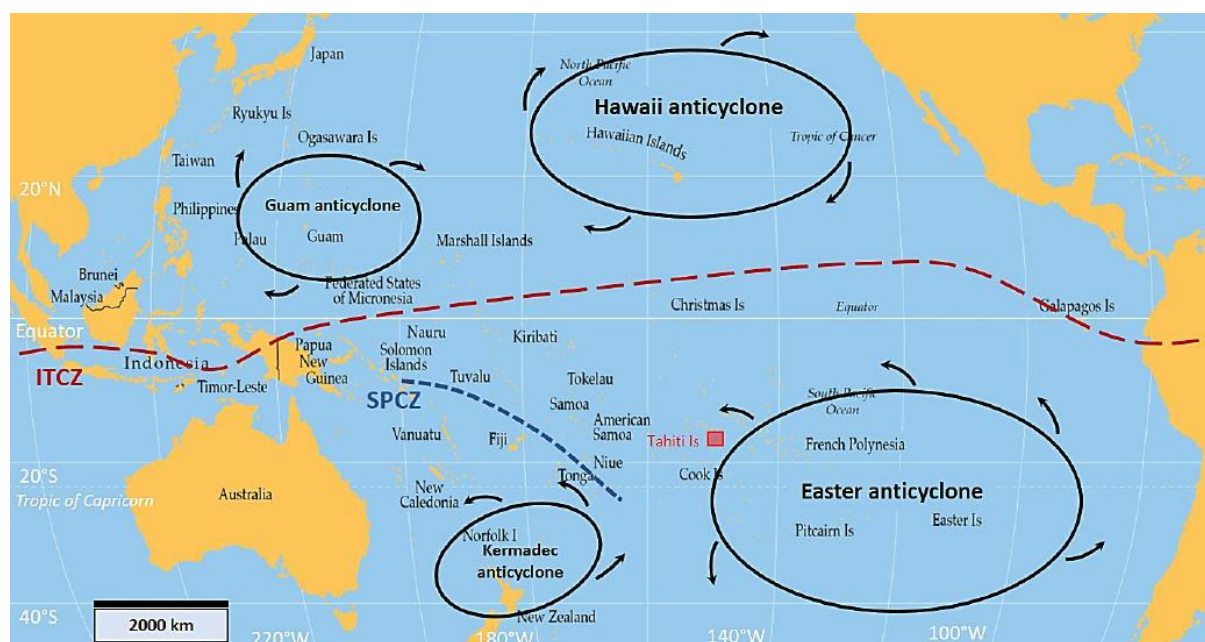


Figure 1: Principaux champs de pression et des zones de convergence dans l'océan Pacifique

Source: Laurent et al, 2004

Les flèches noires illustrent le flux dans la basse atmosphère. Les lignes pointillées représentent la position moyenne de la zone de convergence intertropicale (rouge) et de la zone de convergence du Pacifique Sud (Bleu).

### I.1.3 Les régimes généraux de vent

#### I.1.3.1 Les alizés

Les alizés soufflent toute l'année avec une grande régularité sur la Polynésie française ; leur vitesse moyenne est de 25 km/h, un peu plus sur la bordure Est des anticyclones subtropicaux. Durant plus de la moitié de l'année, la Polynésie française est soumise aux alizés de nord-est durant la saison chaude (novembre à mai) et aux alizés de Sud-Est pendant la saison fraîche (juin-octobre) (Atlas de la Polynésie française, 2004). Leur variation de fréquence et de direction durant l'année est liée aux fluctuations du champ de pression : anticyclones subtropicaux et zones de convergence. Les vents de secteur est sont classés dans le régime d'alizés avec des directions comprises entre 60° et 120°

### **I.1.3.2 Le régime de Sud-Est : le Mara'amu**

Le régime de Sud-Est ou Mara'amu est un vent assez fort relativement régulier et qui dans la plupart des cas se situe dans le quadrant nord-est de l'anticyclone mobile de Kermadec (Atlas de la Polynésie française, 2004). Le Mara'amu a une plus forte occurrence pendant la saison fraîche surtout au Sud de la Polynésie française et il remonte parfois vers de plus hautes latitudes.

### **I.1.3.3 Le régime des brises**

Il s'établit lorsque la Polynésie française n'est pas sous l'influence d'une perturbation de grande échelle. L'orientation des brises dépend de celle des îles. Aucune variation annuelle n'a été établie. Dans la journée, la convergence des brises favorise le développement de formations nuageuses sur les hauts reliefs ; l'air humide provenant de la mer pris dans l'ascendance est à l'origine de beaux cumulus.

## **I.2 Les zones de convergence**

### **I.2.1 La Zone de convergence intertropicale (ZCIT)**

La distribution de l'énergie solaire à l'échelle du globe via l'atmosphère est assurée par trois cellules de convections dans chaque hémisphère i.e. les cellules de Hadley, de Ferrel et les cellules polaires. (Lutgens et Tarbuck, 2000).

L'intensité des rayonnements au niveau de la zone équatoriale entraîne une forte évaporation. La condensation, en altitude, de cette vapeur d'eau entraîne la formation d'une bande d'amas nuageux connue sous le nom de Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT ou ITCZ en anglais) (Figure 2). C'est la zone de convection profonde, ou équateur météorologique : convergence des alizés, d'humidité et de chaleur sensible, elle varie en fonction de la position apparente du soleil (modulation saisonnière). Sa position varie entre l'équateur et 10°N selon les saisons et les positions géographiques



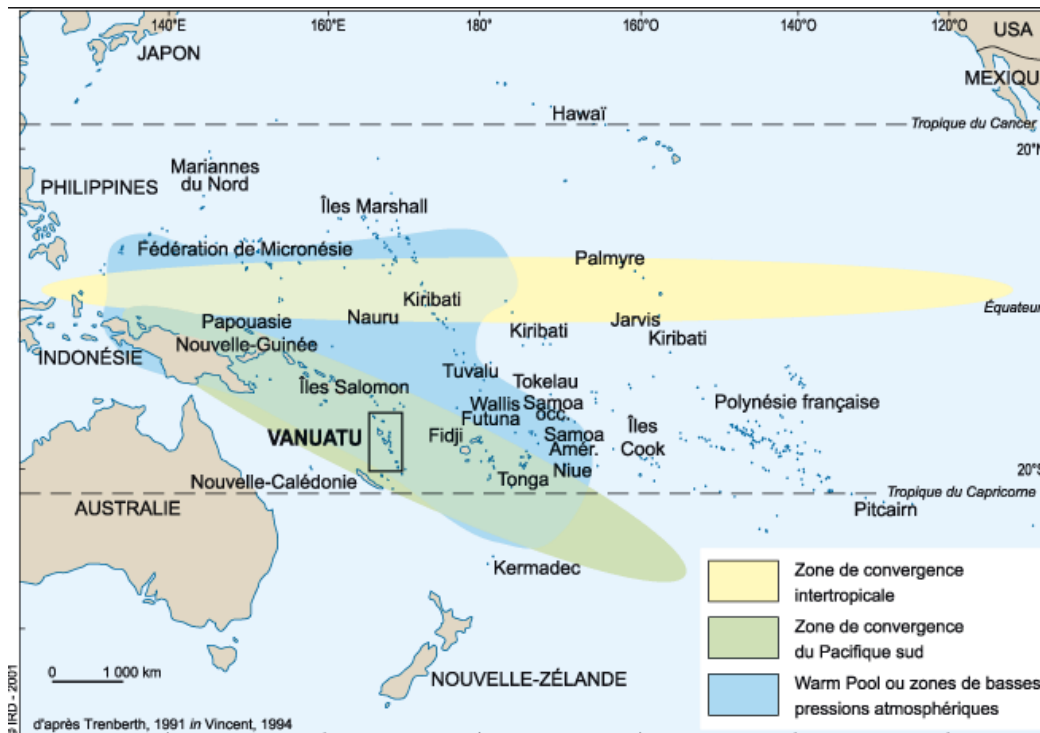


Figure 2: Position moyenne des zones de convergence dans l'océan Pacifique

Source: Laurent et al, 2004

### I.2.2 La Zone de convergence du Pacifique Sud (ZCPS)

La zone de convergence du Pacifique du Sud est le siège de la convection profonde. Dans l'hémisphère Sud, ce sont les premiers clichés satellite qui confirment la présence d'une zone de convergence dans le Pacifique. Son nom, la Zone de Convergence du Pacifique Sud (South Pacific Convergence Zone en anglais), est généralement attribué à Trenberth (1976). A ce jour les scientifiques tentent toujours d'expliquer la position, l'orientation et l'intensité de la SPCZ (Vincent et al, 2011).

La ZCPS est classiquement définie comme une région de maximum de précipitation (Figure 3), de couverture nuageuse totale et de convergence en basses couches et de minimum de rayonnement d'onde longue sortante au sommet de l'atmosphère (Outgoing Longwave Radiation en anglais OLR) (Kiladis et al, 1989). Elle présente des similitudes avec la ZCIT même si elle a une organisation spatiale différente. Elle est située à l'équateur dans l'ouest du bassin (côtes de la Papouasie), vers 10°S à la ligne de changement de date et jusqu'à près de 30°S vers 120°W dans le centre-est du Pacifique. (Vincent, 2008) (Figure 3).

Cette position lui confère des caractéristiques tropicales et une influence des moyennes latitudes dans sa partie la plus méridionale. Sa localisation est toujours mal comprise et plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer sa configuration particulière (Kiladis, 1899 ; Vincent, 1994) ; (Takashi et Bastiti, 2007)

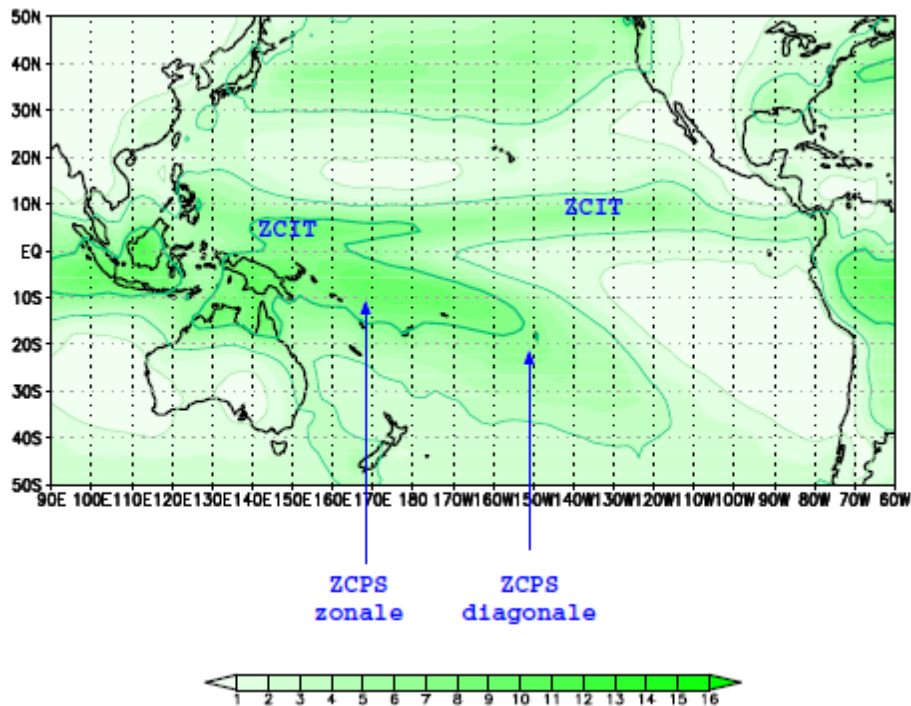


Figure 3: Précipitations en été australe (mm/jour) réalisés à partir de GPCP (DJF).

Source (Becher, 2010)

### I.3 Le phénomène E.N.S.O

Le phénomène E.N.S.O (El Niño Southern Oscillation en anglais) est un réchauffement du climat tropical qui affecte non seulement les régions côtières de l'Équateur et du Pérou, mais l'ensemble de l'océan Pacifique tropical. C'est une anomalie interannuelle (2 à 7 ans) à l'échelle planétaire dont le foyer est l'Océan Pacifique. Il est fortement lié à des modifications de la circulation atmosphérique le long de l'équateur connues sous le nom d'Oscillation australe (Philander, 1990). Il comprend deux phases : Une phase chaude (El Niño) qui coïncide avec un indice négatif de l'oscillation australe (ou réchauffement de l'océan) et une phase froide (La Niña) qui coïncide avec un indice positif de l'oscillation australe (ou refroidissement de l'océan).

Les climatologues ont établi un Indice d'Oscillation Australe (SOI) qui permet de caractériser la phase de l'oscillation. Cet indice exprime la différence de pression entre Tahiti (Centre du Pacifique) et Darwin (au nord de l'Australie) (Atlas de la Polynésie française, 2004).

Ce phénomène a aussi un impact sur les cyclones tropicaux qui peuvent avoir des effets dévastateurs sur les îles et les atolls du Pacifique, comme ce fut le cas dans la région de la Polynésie qui fût frappée par plusieurs cyclones lors de l'épisode chaud de 1982-83. Bien que relativement faible, cette liaison statistique entre la phase de l'Oscillation australe et le point d'origine des cyclones du Pacifique Sud-Ouest est significative, et cohérente avec les déplacements de la ZCPS.

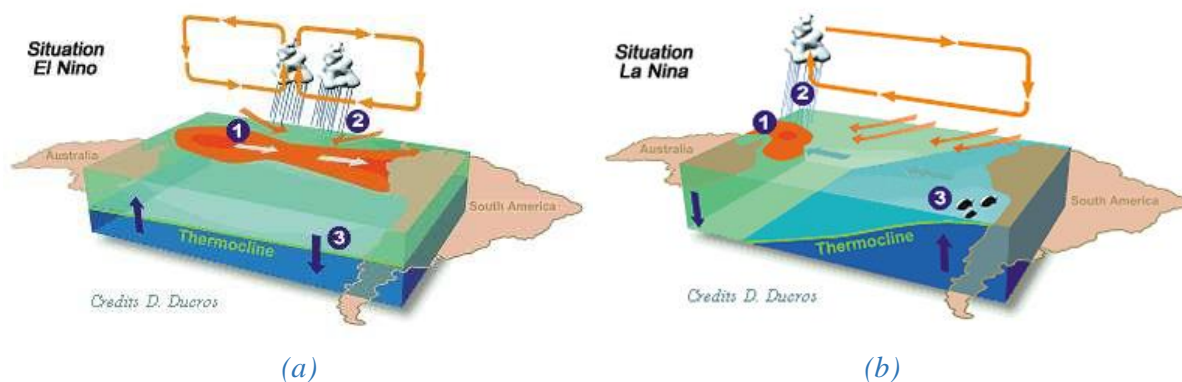


Figure 4: Description du système océan-atmosphère pendant (a) une phase d'El Niño et (b) une phase de la Niña.

Crédits : D. Ducros Cnes

Figure (4a) 1- Des anomalies de vent d'ouest apparaissent à l'extrémité ouest du bassin et repoussent le réservoir d'eau chaude vers le centre du Pacifique. Les alizés s'affaiblissent ou même disparaissent. 2- La zone de convergence profonde de cyclone se déplace aussi vers l'est provoquant des pluies abondantes sur les îles de la Polynésie. 3- La thermocline se redresse et les eaux froides ne remontent plus le long de la côte chilienne. Les eaux restent donc chaudes.

Figure (4b) 1- Le renforcement des alizés confine encore plus la zone d'eau chaude à l'ouest. 2- La zone de convection profonde et de cyclone présente au-dessus de cette masse d'eau s'intensifie, avec des pluies abondantes sur l'Indonésie. 3- La pente de la thermocline est nettement plus marquée. Les eaux froides remontant le long des côtes du Chili (upwelling) gagnent ainsi le centre du bassin.

## **I.4 Définition du régime météorologique ou régime de temps**

Plusieurs travaux antérieurs ont montré que les conditions météorologiques quotidiennes à l'échelle régionale qui caractérisent la circulation atmosphérique proche de la surface (c'est-à-dire la circulation synoptique) peuvent être décomposées en archétypes récurrents appelés «régimes de circulation atmosphérique» ou «régimes météorologiques». (Lorrey et Fauchereau, 2017).

Les régimes météorologiques constituent un paradigme important pour les conditions météorologiques extratropicaux et pour la recherche climatique car ils peuvent être interprétés comme des bassins attracteurs dynamiques dans un espace de phase où règne une circulation atmosphérique (Mo et Ghil, 1988; Vautard et Legras, 1988). Le typage météorologique synoptique a été couronné de succès dans l'hémisphère Nord (NH), où de nombreuses études ont appliqué une gamme d'algorithmes de regroupement (clustering) à des ensembles de données de la circulation atmosphérique quotidienne afin de dériver des régimes de temps d'importance régionale (Mo et Ghil, 1988; Vautard, 1990; Michelangeli et al, 1995).

Lorsqu'ils sont agrégés sur des échelles mensuelles et plus longues (Ghil et Roberstson, 2002), les régimes météorologiques semblent capables de reproduire les impacts climatiques saisonniers significatifs pour les petites îles du Pacifique (sécheresses, pluviales, etc.), d'où l'intérêt porté à ce type de classification pour la suite de notre travail.

## Chapitre II : Données et méthodes

### II.1 Localisation de la zone d'étude

Située dans le Sud de l'océan Pacifique, par 17°35' de latitude Sud et 149°30' de longitude Ouest, Tahiti est une île appartenant au groupe des îles du Vent de l'archipel de la Société. Cette île haute, au relief verdoyant, montagneux et très accidenté est la plus grande des îles de la Polynésie française. Elle résulte, géologiquement, d'une activité quaternaire et présente une forme caractéristique due à la juxtaposition de deux cônes volcaniques soudés par l'isthme de Taravao (Figure 5)



Figure 5: L'île de Tahiti et l'emplacement des stations météorologiques

Source : Google earth

### II.2 Description des données

#### II.2.1 Données de réanalyse

Lors de la classification des régimes de temps, des paramètres de base sont nécessaires, notamment la vitesse du vent (unité: m / s) et direction du vent (unité: °). Dans ce document, toutes les données relatives aux champs de vents proviennent de données de réanalyse d'ERA Intérim fournies par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Le CEPMMT est un centre mondial de réanalyse de premier plan. La réanalyse est une méthode utilisée pour obtenir un portrait exhaustif de l'état du système terrestre. Cette méthode consiste à combiner un modèle de prévision météorologique et des observations pour produire, généralement pour l'ensemble du globe, des archives d'un grand nombre de variables

atmosphériques et océaniques. Pour ce travail de mémoire, les données ERA-Intérim haute résolution de vents du 1er janvier 1979 au 31 décembre 2008 à 00h UTC pour chaque jour de la période, avec une portée spatiale (Polynésie française) comprise entre 0° et 30 ° S et entre 160° et 130 ° W et une résolution spatiale de 0,75 ° x 0,75 ° ont été utilisées. Une seconde classification a été faite avec des données de géopotential à 850 hPa du 1<sup>er</sup> janvier 1979 au 31 décembre 2017 à 00h pour chaque jour de la période. D'autres données telles que la température de surface de la mer (Sea Surface Temperature SST en anglais), le vent zonal et méridional, le niveau de pression de la mer pour réaliser les figures des différents types de régimes sur un domaine très large (0°- 45° S et 140° E – 60° W) ; Ces données ont été choisies pour les 10 jours les plus proches des centroïdes de chaque régime.

### **II.2.2 Données des stations météorologiques de Faa'a et Tautira**

Les données recueillies dans ces stations proviennent de météo France. La station de Faa'a jouit de bonnes conditions d'observations car étant située à l'intérieur d'un lagon; il s'agit de la station de l'aéroport international de Faa'a ; celle de Tautira est quant à elle située en bordure de lagon sur la face Est de la pointe de Tautira. Les données traitées sont des données d'ensoleillement (Faa'a Seulement) et de vents (Faa'a et Tautira). En ce qui concerne les données de vent, ce sont des vitesses moyennes avec un pas de temps d'une heure mesurés par des anémomètres de mats 10m, elles couvrent une période de 10 ans (Janvier 2008 - décembre 2017). Le mat ou pylône anémométrique où est situé l'anémomètre dispose aussi d'une girouette qui indique la direction géographique d'où souffle le vent. Les données de rayonnement global, obtenues à l'aide du pyranomètre de la station de Faa'a, sont à pas de temps horaire et couvrent aussi la même période.

### **II.2.3 Données d'OLR**

Pour repérer la convection tropicale à ces échelles spatio-temporelles, le flux infrarouge émis vers l'espace par le sommet des nuages (Outgoing Longwave Radiation) ou OLR, s'avère être un bon indicateur. Ce paramètre est fort utile notamment sur les zones océaniques dépourvues d'observations terrestres.

Les données d'OLR proviennent d'observations satellites interpolées spatialement et temporellement sur une base journalière (Liebmann and Smith, 1996). Les données sont disponibles pour la période de 1979 à nos jours et sont distribuées par la NOAA (National Oceanic and Atmosphere Administration) .Dans notre étude, nous avons juste utilisé les données correspondant aux jours de nos différents régimes c'est à dire les dix premiers jours les plus proches de chaque centre de clusters. Ces données ont pour portée spatiale le domaine

allant de 140°Est à 70°Ouest en longitude et de 0° à 45° Sud en latitude, une résolution spatiale de 0,75° x 0,75° et une résolution temporelle journalière.

L'étude de ces données permet de déterminer les zones à forte convection (respectivement à faible convection) qui correspond à des valeurs d'OLR minimales (respectivement à des valeurs d'OLR maximales)

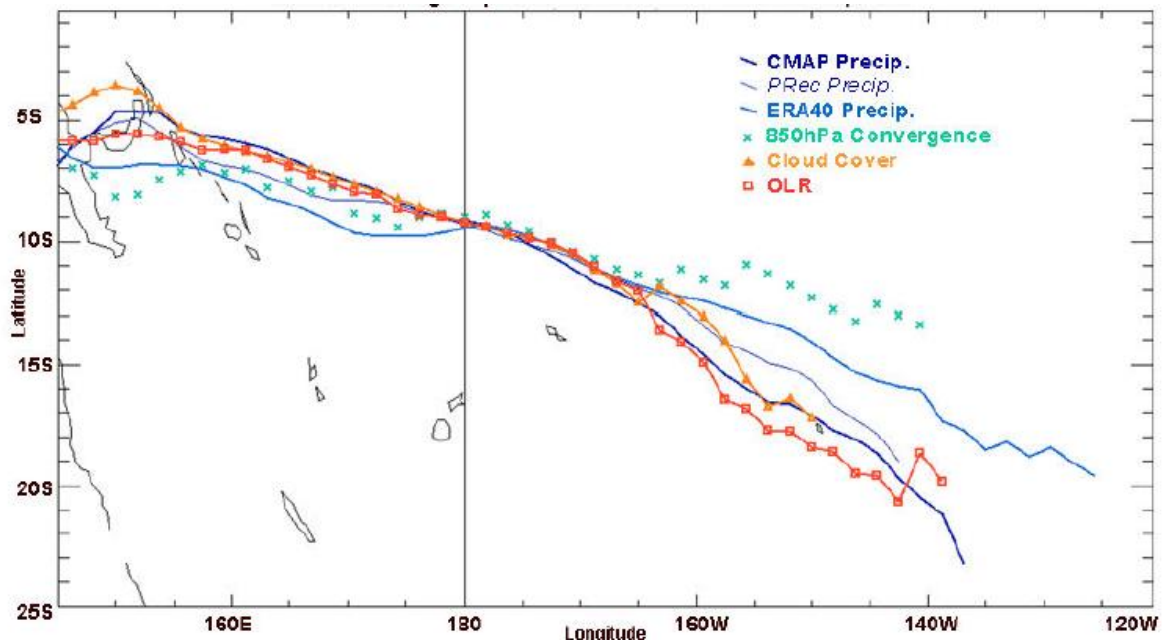


Figure 6: Position climatologique (DJF) de la SPCZ estimée par différents champs : précipitations, convergence à 850hPa, couverture nuageuse totale et OLR.

Source (Vincent, 2008)

La figure 6 montre les positions de la ZCPS donnée par différents champs utilisés.

Comparées aux précipitations, on constate que les données d'OLR suivent assez bien la position repérée de la ZCPS entre les longitudes 150°E à 155°W mais on observe quelques écarts par rapport aux positions plus méridionales car les systèmes nuageux des moyennes latitudes peuvent introduire des biais dans la définition de la ZCPS.

## II.3 Méthodes

### II.3.1 Classifications des régimes par la méthode des k-moyenne

Dans notre travail, nous avons utilisé la méthode du « clustering » ou classification non hiérarchique plus précisément la méthode des k-moyennes. Cette méthode est basée sur la méthode des centres mobiles.

Pour k classes définies au préalable, l'algorithme procède itérativement comme le montre le tableau 1. (Lebart et al, 2006)

Tableau 1: L'algorithme des centres mobiles

Etape 0	On détermine $k$ centres provisoires de <i>clusters</i> (par exemple, par tirage aléatoire de $k$ individus). Ces $k$ centres $\{C_1^0, \dots, C_k^0\}$ induisent un premier <i>clustering</i> $P^0$ de l'ensemble des individus en $k$ groupes $\{I_1^0, \dots, I_k^0\}$ . Ainsi, l'individu $i$ appartient par exemple au groupe $I_k^0$ s'il est plus proche de $C_1^0$ que de tous les autres centres.
Etape 1	On détermine $k$ nouveaux centres en prenant les centres de gravité des <i>clusters</i> qui viennent d'être obtenus ( $\{C_1^1, \dots, C_k^1\}$ ). Ces nouveaux centres induisent un nouveau <i>clustering</i> $P^1$ , construit selon la même règle que pour $P^0$ . La partition $P^1$ est formée de classes notées $\{I_1^1, \dots, I_k^1\}$ .
Etape e	On détermine $k$ nouveaux centres ( $\{C_1^e, \dots, C_k^e\}$ ) en prenant les centres de gravité des <i>clusters</i> qui viennent d'être obtenus $\{I_1^e, \dots, I_k^e\}$ . Ces nouveaux centres induisent un nouveau regroupement $P^e$ , formé des <i>clusters</i> $\{I_1^e, \dots, I_k^e\}$ .

Lorsque les centres sont sélectionnés à partir de points de données réels, ils sont appelés «exemples». La technique de clustering à centres  $k$  (1) commence par un ensemble initial d'exemples choisis au hasard et affine cet ensemble de manière itérative afin de réduire la somme des erreurs au carré. La mise en cluster des  $k$ -centres est assez sensible à la sélection initiale d'exemples, aussi elle est réexécutée plusieurs fois avec différentes initialisations pour tenter de trouver la bonne solution. Le processus devient stable assez rapidement. Au bout de quelques itérations, l'algorithme aboutit à un optimum global : le résultat dépend des centres initiaux. C'est ainsi que dans la pratique, l'algorithme est exécuté plusieurs fois pour avoir différents centres initiaux. La meilleure solution est celle ayant des regroupements stables pour identifier les individus qui appartiennent aux mêmes partitions. Ces ensembles d'individus systématiquement rattachés à une même classe sont appelés « forme forte » ou « groupements stables » ou dans notre cas « clusters ».

La méthode des  $k$ -moyennes est une variante de celle des centres mobiles (Figure 8). Elle fonctionne exactement de la même manière, à une différence près, qui est le calcul des centres. Un recentrage est réalisé à chaque fois qu'un individu change de *cluster*. On n'attend plus que tous les individus soient affectés à un *cluster* pour en calculer les centres de gravité, ces derniers sont modifiés au fur et à mesure des réaffectations. On constate bien le nombre  $k$  de clusters initiaux est le principal problème pour l'utilisation de cette méthode. Dans le cadre de notre étude le nombre  $k$  a été fixé dès le départ à 6 à cause de précédentes études effectuées sur le



domaine d'étude sur le Pacifique Sud telles que celles de Lefèvre et al, 2010 et Lorrey et al, 2017.

En plus de la méthode de classifications des k-moyennes, nous avons préalablement utilisé une méthode numérique pour effectuer une réduction de la dimension des données. Il s'agit pour ce travail de l'Analyse des Composantes Principales (ACP) dont la base a été posée dès 1901 par *Karl Pearson*. Cette méthode permet à la fois d'identifier les individus qui se ressemblent (notion de proximité) et de résumer les relations entre les variables. (Biernat et Lutz, 2015).

L'ACP s'applique à une matrice connue, dans le cadre de notre travail il s'agit ici de données vent à 1000 hPa et de données de géopotential à 850 hPa des réanalyses de ERA interim, constituée de valeurs numériques continues. Husson *et al.* (2009) donne une illustration intuitive de cette approche, synthétisée à la figure 7.

L'ACP est un outil très utilisé dans l'une des branches de la statistique classique appelée « statistique exploratoire multidimensionnelle ». Le clustering fait aussi partie de cette branche. Notre travail a donc consisté à utiliser ces deux analyses conjointement afin de limiter le temps de calcul mais aussi à réduire le bruit lié aux composantes à faible inertie, comme il est expliqué dans le livre de Biernat et Lutz. En plus, L'analyse des composantes principales (ACP) et les différentes techniques de classifications sont largement utilisées pour procéder à la classification synoptique des régimes climatologiques identifiés dans les observations et les résultats du modèle. (Conil et Hall, 2006).

Il faut aussi noter que cette méthode est celle utilisée par Michaelangeli (1995).

Premièrement, les données sont soumises à un filtrage spatial linéaire (l'Analyse en composantes principales (ACP)) qui réduit les dimensions du jeu de données à sa meilleure approximation linéaire à basse dimension, tout en préservant la variance initiale des données (Lucs-Svay, 2018). Le filtrage spatial induit un filtrage temporel, qui élimine les fluctuations de fréquence élevées. Cependant, le cycle annuel ne doit pas être supprimé par cette procédure. Nous avons considéré une série chronologique de 10 959 jours (30 ans), chacun étant représenté par  $42 \times 41 = 1722$  points de la grille. Le vent étant représenté par ses composantes zonale et méridionale, deux matrices sont concaténées, donnant une matrice de  $10\ 959 \times 3\ 444$ , sur laquelle l'algorithme PCA est exécuté. Les 30 premières composantes principales expliquent 95% de la variance et sont choisies comme nouvelle base pour l'ensemble de données. (Jolliffe, 1986).

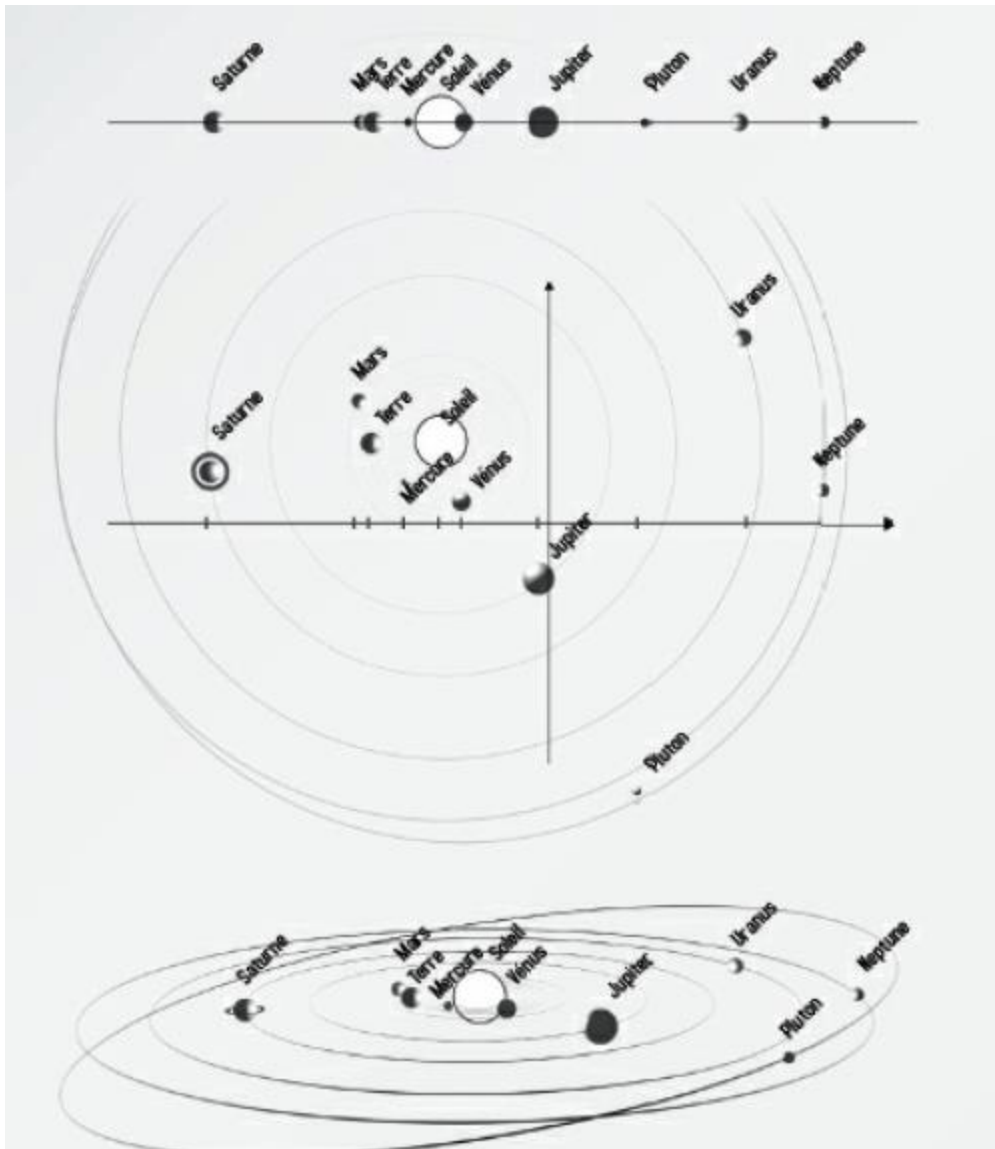


Figure 7:Projection du système solaire (3D) dans le plan (2D) et sur un axe (1D)  
 Source : Husson et al. (2009)

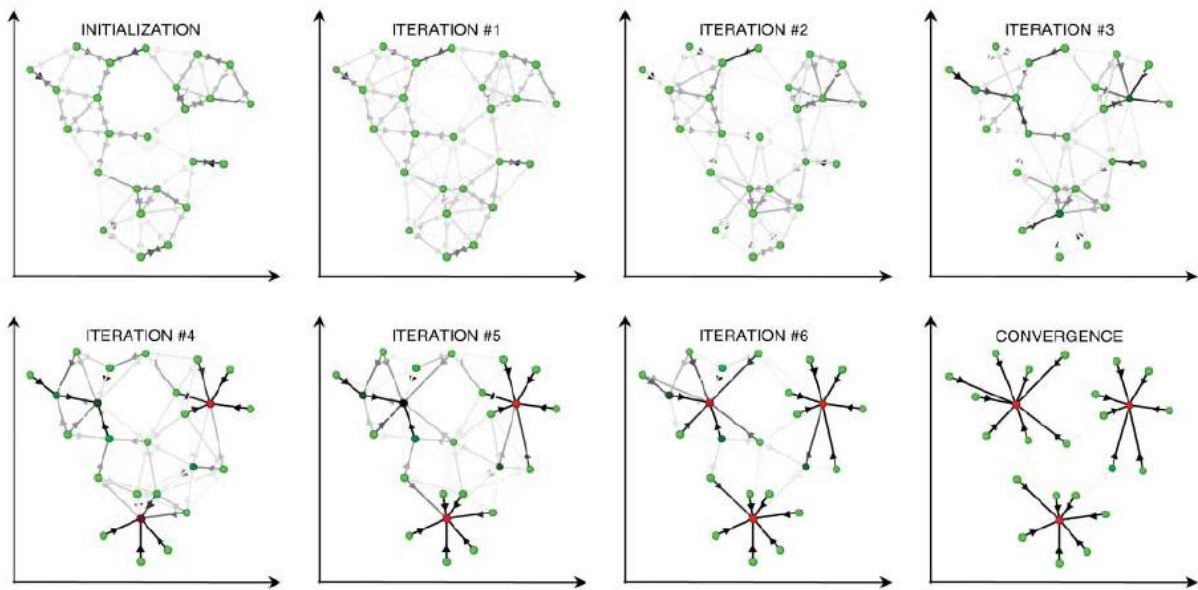


Figure 8: Fonctionnement de la méthode des k-moyenne

### II.3.2 Distribution de Weibull

La fonction de densité de probabilité (PDF) de la vitesse du vent est importante dans de nombreuses applications de l'énergie éolienne. Un grand nombre d'études publiées dans la littérature scientifique sur les énergies renouvelables proposent l'utilisation d'une variété de PDF pour décrire les distributions fréquentielles de la vitesse du vent. (Carta et al, 2009 ; Bilal et al, 2010). La distribution des fréquences des vitesses moyennes du vent est modélisée en utilisant la distribution de Weibull (Figure 9). La fonction de distribution de Weibull est une fonction exponentielle à deux paramètres : un paramètre d'échelle A (m/s) et un paramètre de forme k (sans unité) caractéristique des données du vent (Madougou, 2010). Le paramètre k renseigne sur la dissymétrie de la distribution tandis que le paramètre A donne la moyenne du vent du site.

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right]$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right]$$

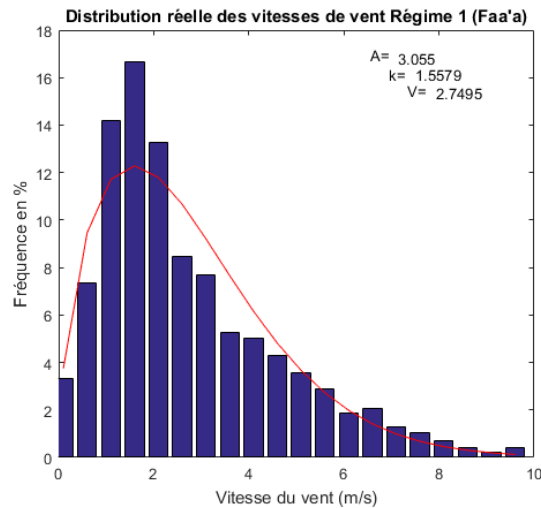


Figure 9: Exemple d'une distribution de Weibull

### II.3.3 Rose des vents

Une rose des vents est une représentation des fréquences des directions d'où vient le vent (Figure 10), soufflant sur un site de mesure donné et pendant une période d'observation déterminée. Elle est généralement composée de  $p$  secteurs de  $q$  degrés chacun (avec  $pq=360^\circ$ ). Les éventuelles directions dominantes ainsi que l'intensité du vent dans le régime climatique régnant sur le site étudié apparaissent ainsi nettement. Elle renseigne aussi sur la fréquence d'occurrence des vitesses de vent. La rose des vents est représentative des conditions de vent dans l'environnement immédiat (quelques kilomètres) ; à une plus grande échelle les conditions de vent peuvent être très différentes.

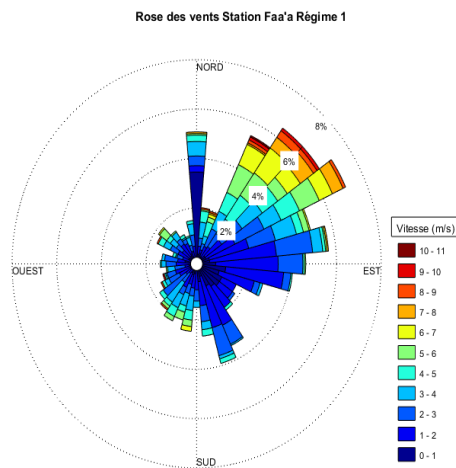


Figure 10: Exemple d'une rose de vent

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

Ce présent chapitre présente les résultats obtenus au cours de notre étude.

Le domaine pour l'établissement des régimes météorologique a été considéré pour une zone spatiale distincte qui capturerait de manière adéquate les variations à la fois de la position et de l'intensité de la ZCPS. Il existe des liens étroits entre la ZCPS et ENSO (Vincent et al, 2011), qui ont des répercussions directes sur les températures régionales de la surface de la mer et les propriétés de la circulation atmosphérique sus-jacentes. Notre domaine s'étend de 12,5°S à 22,5° S et de 154°W à 145°W. Il a été élargi à tout le bassin du Pacifique Sud pour réaliser les cartes des figures (16) et (17).

Essentiellement, le choix d'un tel domaine est quelque peu arbitraire. Cependant, il 'inclut les grandes structures (Anticyclone de l'île de Pâques, Anticyclone de Kermadec, ZCPS...) impactant le climat de notre zone d'étude.

Un algorithme efficace de classification k-moyennes a ensuite été appliqué en spécifiant  $K = 6$ , pour le domaine spatial indiqué précédemment.

### **III.1 Occurrence des régimes obtenus**

Pour la climatologie (1979-2008) des occurrences des régimes météorologiques plusieurs tendances sont décelées selon la base périodique observée. La distribution de certains régimes de temps présente un certain degré de saisonnalité.

Sur l'ensemble des données couvrant la période d'étude (1979 - 2008), les régimes sont répartis comme suit :

Régime 1 → 23 % avec 2552 jours

Régime 2 → 12 % avec 1367 jours

Régime 3 → 18 % avec 1994 jours

Régime 4 → 13 % avec 1446 jours

Régime 5 → 14 % avec 1482 jours

Régime 6 → 19 % avec 2117 jours

Présenté ainsi, on ne pouvait pas en tirer de véritables informations concernant l'occurrence des régimes d'où l'importance d'étudier les variabilités interannuelle et intra-annuelle (Figures11, 12 et 13).

### III.1.1 Evolution interannuelle de l'occurrence des régimes

La figure 11 représentant l'évolution interannuelle montre qu'il n'existe pas vraiment une variabilité interannuelle des régimes tantôt le regime1 domine (1988), tantôt le regime3 (1998) ou bien un autre régime (régime5 en 1982). Par contre on peut déceler quelques similitudes entre les années de fort El niño (Figure 18) et la dominance du régime 3 pendant ces évènements (1983 et 1993). Les travaux de A.M. Lorrey et de N.C Fauchereau (2017), en Nouvelle Zélande, ont montré qu'une part importante des régimes météorologiques est liée à l'ENSO, aux propriétés fondamentales de la circulation atmosphérique globale (circulation de Hadley – Ferrell) et aux modes climatiques comportant des éléments essentiels en dehors de la région du Pacifique Sud-Ouest (MJO, PSA, SAM). Il n'y a pas toujours des occurrences diamétralement opposées de changements de régimes climatiques pour différentes phases d'ENSO et il n'y a pas toujours un seul phénomène climatique responsable d'un régime de temps.

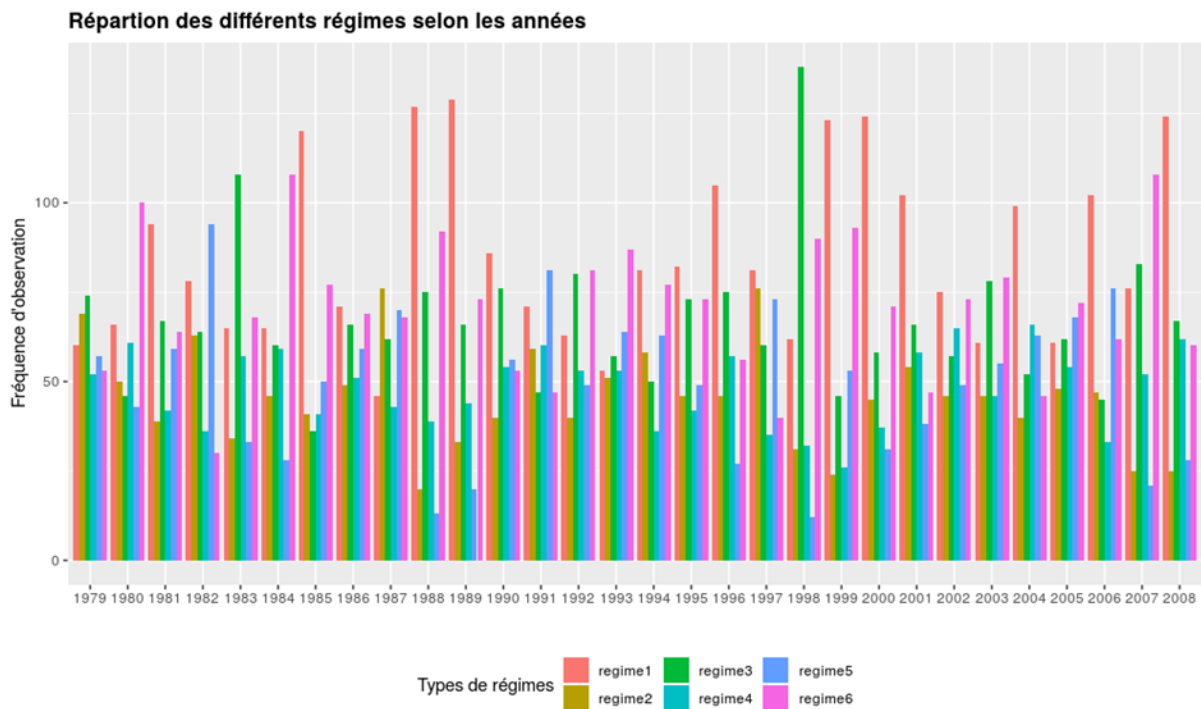


Figure 11: Occurrence interannuelle des six régimes sur la climatologie (1979-2008)

### III.1.2 Evolution intra-annuelle de l'occurrence des régimes

En plus de la figure de répartition interannuelle (Figure 11), le cycle annuel (Figure 12) nous permet de voir une variabilité des régimes selon le mois observé. C'est le cas, par exemple, du régime 5 qui évolue telle une courbe gaussienne avec des fréquences nulles aux mois de Janvier et Février puis la fréquence augmente au cours de l'année pour atteindre un maximum en juillet puis décroît jusqu'à s'annuler en Décembre.

Le régime 1 lui évolue en sens inverse du régime 5 même s'il est présent tous les mois avec un maximum en janvier et un minimum en Juin-Juillet. Ceci est mieux visible avec les graphiques ci-dessous (Figure 13).

A noter que le régime 6 est présent tous les mois.

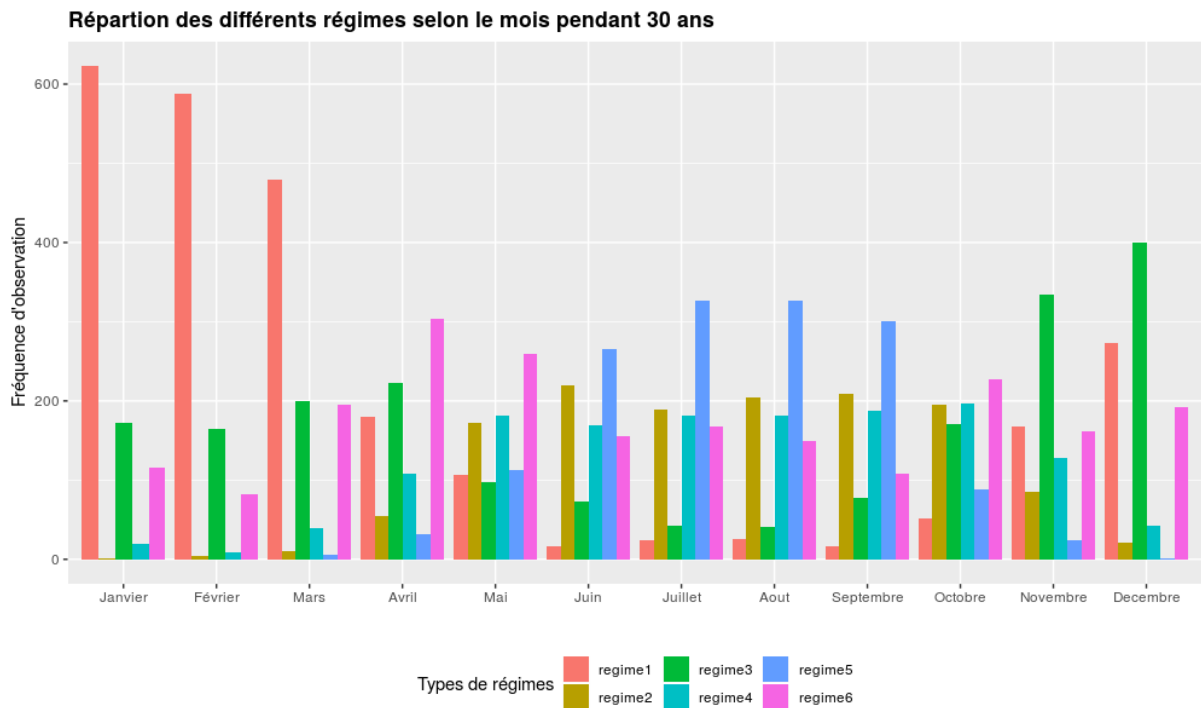
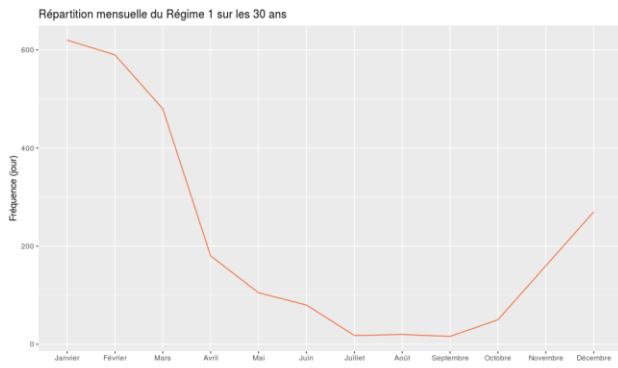
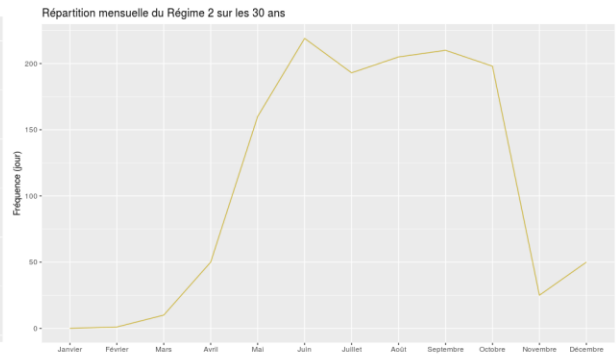


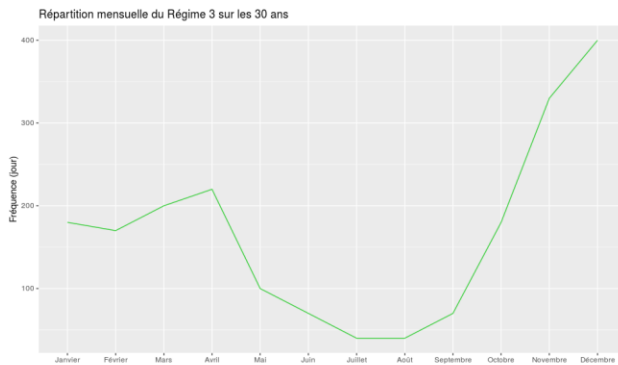
Figure 12: Evolution intra-annuelle de l'occurrence des six régimes sur la climatologie (1979-2008)



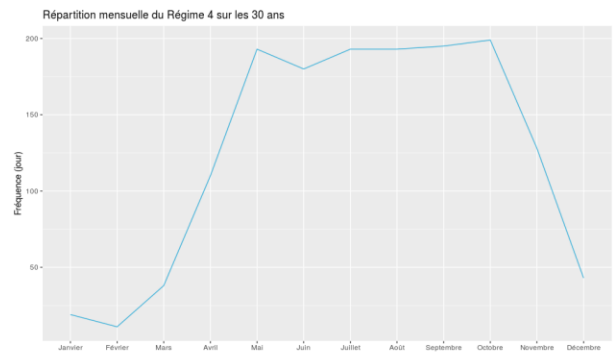
a- Régime 1 (2552 jours)



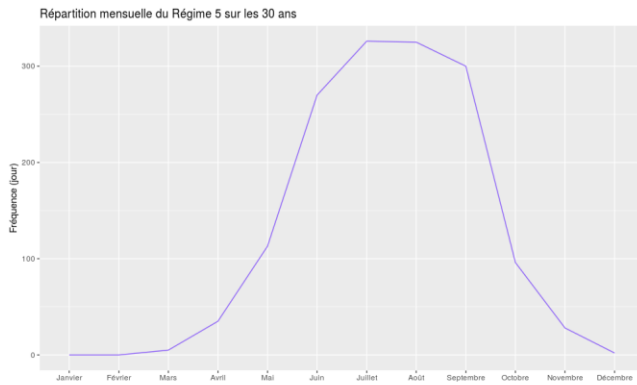
b- Régime 2 (1367 jours)



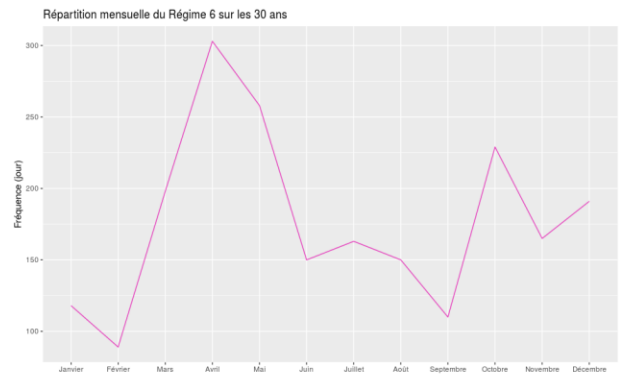
c- Régime 3 (1994 jours)



d- Régime 4 (1446 jours)



e- Régime 5 (1482 jours)



f- Régime 6 (2117 jours)

Figure 13: Evolution intra-annuelle pour les six régimes météorologiques du Pacifique Sud, le nombre entre parenthèses indique l'occurrence pour chaque régime (jours) tiré de la réanalyse.



On voit nettement mieux la saisonnalité des différents régimes à travers les graphes de la figure 13. Le régime 5 par exemple est observé principalement en hiver alors que le régime 1 est observé pendant l'été austral.

### III.1.3 Répartition sur la base journalière

Sur le graphique de la répartition journalière de l'occurrence des régimes (Figure 14), l'ensemble des jours de l'année est recensé sur les 30 ans de données. Ceci pour observer lequel régime revient le plus d'où la fréquence fixée à 30 au niveau de l'axe des ordonnées. A noter que le 29 Février est la petite barre en fin de figure. Les résultats trouvés sont cohérents avec ceux de l'évolution intra-annuelle (répartition par mois). On constate que le régime 5 est essentiellement concentré en milieu d'année et domine les autres régimes en termes de fréquence.



Figure 14 : Occurrence journalière des régimes sur la période (1979-2008)

### III.2 Caractérisation des régimes à l'échelle synoptique

L'analyse des figures 15 et 16 montre qu'il n'y a pas de grande différence concernant les directions du vecteur vent pour les six régimes. Toutefois il y a quand même des changements quant aux structures cycloniques selon la classification, ceci s'explique par le fait que les dates choisies pour la production des cartes ne sont pas les mêmes. L'homogénéité de la SST sur le domaine d'étude diffère elle aussi pour certains régimes.

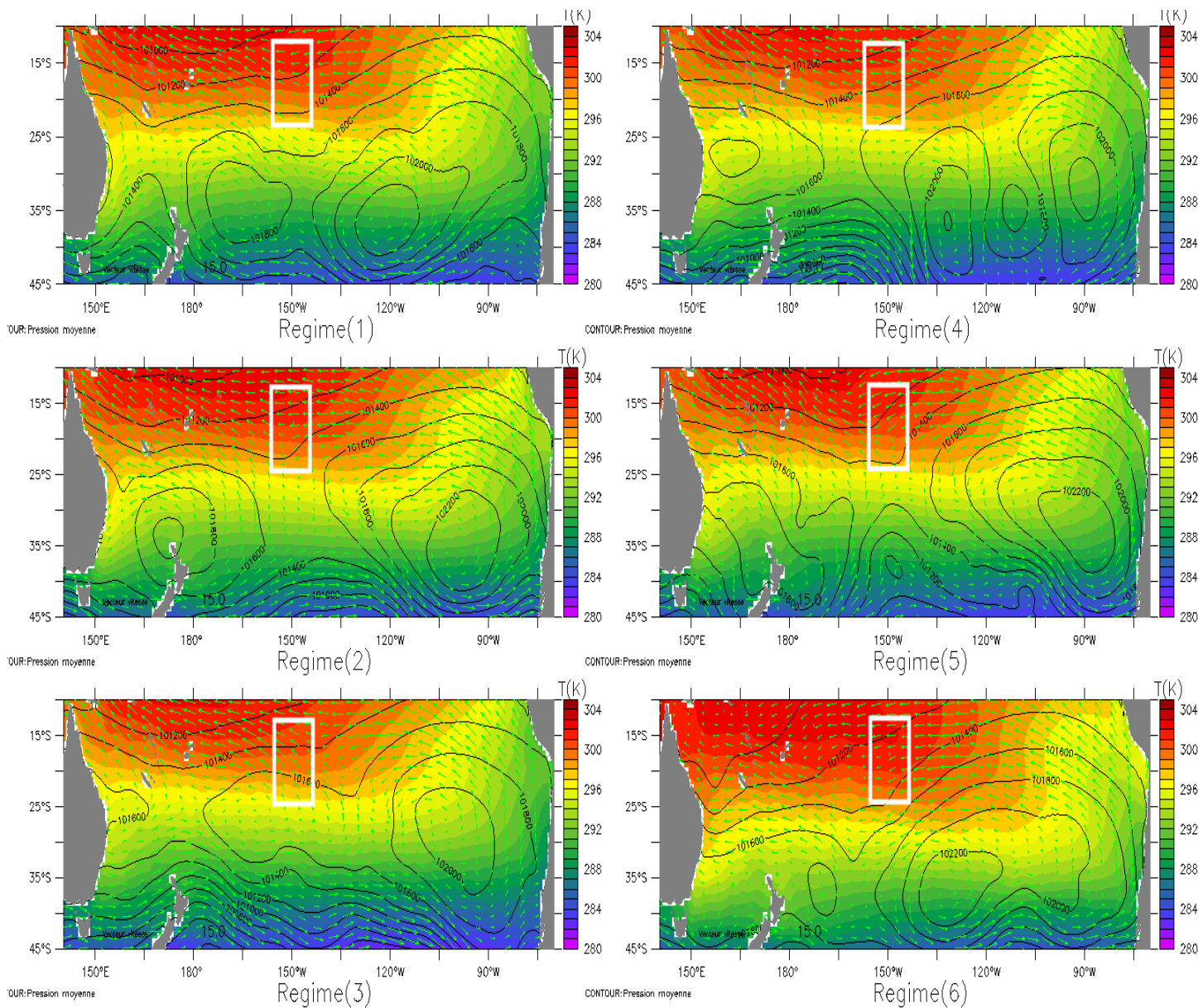


Figure 15: Régimes de vent obtenu avec la classification du géopotential 850 hPa (en m) pour les jours attribués à chacun des six régimes. Les lignes en noir représentant la pression de surface, les flèches en vert représentant le vecteur vent (Composantes u et v combinées) et la plage de couleurs de SST (Zone d'étude rectangle en blanc).

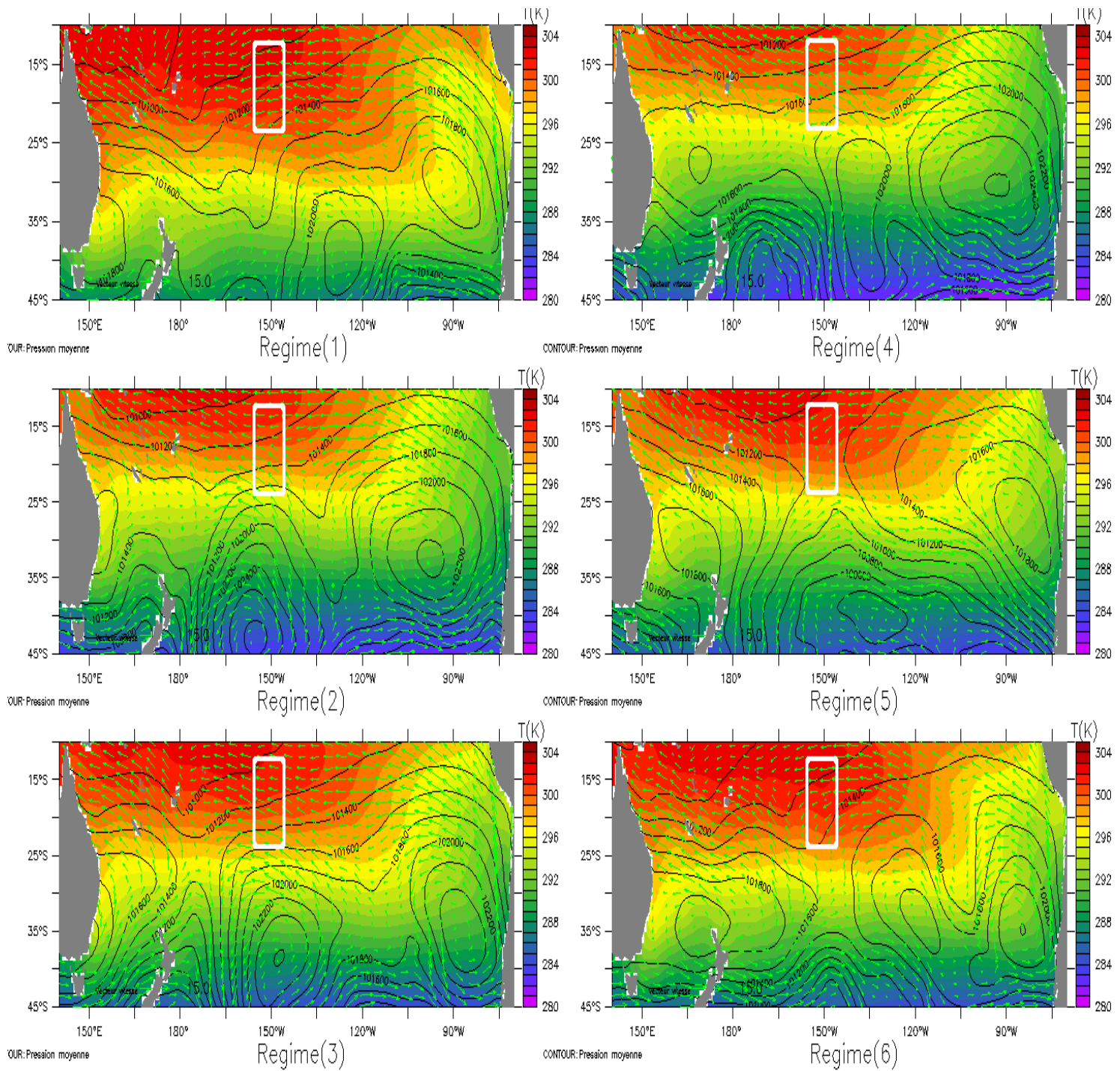


Figure 16: Régimes de vent obtenu avec la classification du vent à 1000 hPa (en m/s) pour les jours attribués à chacun des six régimes. Les lignes en noir représentant la pression de surface, les flèches en vert représentant le vecteur vent (Composantes  $u$  et  $v$ ) et la plage de couleur de SST

Le rayonnement sortant des ondes longues (OLR) est l'énergie émise par le sommet des nuages sous forme de rayonnement infrarouge à basse énergie dans l'Espace. La figure 17 permet de voir comment est la couverture nuageuse sur notre zone d'étude.

Des valeurs négatives d'OLR indiquent la présence d'amas nuageux.

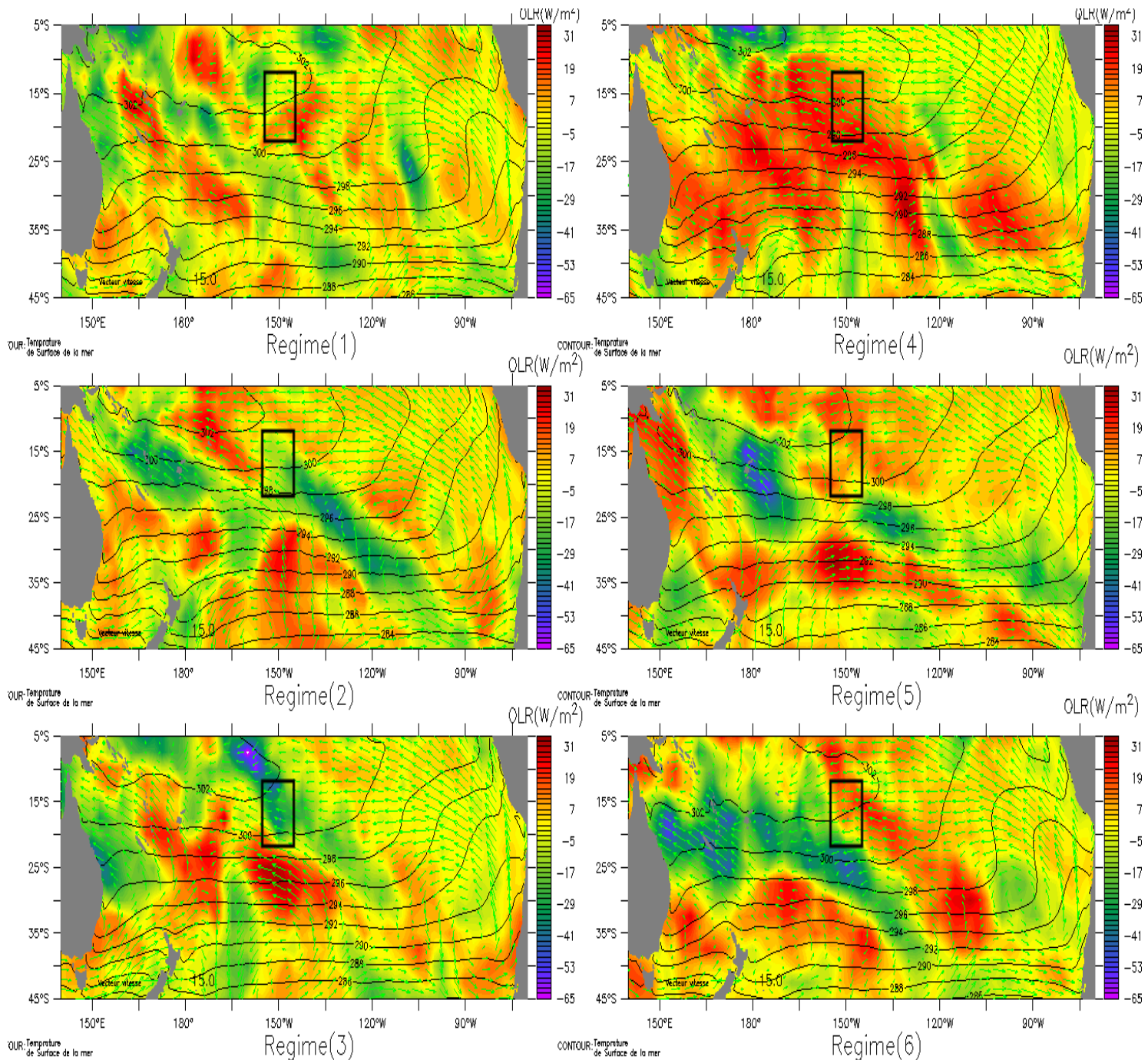


Figure 17: Variation du rayonnement sortant des longues ondes (OLR) selon les régimes sur la zone du Pacifique Sud sur la base du clustering avec le vent à 1000hPa.

Ainsi, au vu des 3 figures précédentes (Figures 15,16 et 17) nous avons essayé de caractériser les régimes et de voir l'influence des grandes structures sur eux.

**Régime 1 :** Ce régime est caractérisé par des vents d'Est sur la moitié nord de notre boîte et des vents de Sud-Est sur l'autre moitié. La structure anticyclonique est proche du domaine d'étude ce qui peut expliquer les vents de Sud Est au Sud de notre boîte. La SST n'est pas homogène sur l'ensemble de la zone mais aussi on observe des isobares assez éloignées. On a bien une distribution de SST d'été. L'isotherme 297° descend à 31°Sud et s'étend jusqu'au Pérou.

**Régime 2 :** D'un point de vue synoptique ce régime est défini par des positions d'anticyclones bien éloignées l'une de l'autre avec un régime d'alizé sur presque toute la zone d'étude (carré blanc) (Figure 15). L'amas de nuage (ZCPS) pour ce régime se situe au Sud et semble couvrir la partie Sud de la boîte, on peut le remarquer grâce aux données d'OLR. L'iso 297° de la SST « remonte » à 25°Sud et glisse vers l'ouest à 10°Sud (Figure 17).

**Régime 3 :** Les valeurs de l'OLR sont les plus basses pour ce régime ce qui renseigne sur la présence sur de la ZCPS sur la zone d'étude et il est le régime avec principalement que des vents de Sud-Est sur notre domaine d'étude. Les isobares sont plus proches entre elles dans la boîte donc on peut en déduire une intensité plus élevée. On observe une circulation anticyclonique aux environs des latitudes 35°S-40°S qui semblerait être l'anticyclone de Kermadec apportant des alizés de Sud Est sur le domaine de Polynésie française (Figure 16).

**Régime 4 :** C'est le régime où on constate que des vents d'Est avec des structures anticyclones pas bien définies (Figure 15 et 16), rendant ainsi, difficile l'interprétation de l'impact de ces structures de grandes échelles sur ce régime. C'est également le régime où l'on observe que des valeurs positives d'OLR sur l'ensemble du domaine et même aux alentours donc il semblerait que ce soit un régime où la ZCPS soit bien éloignée de la Polynésie française (Figure 17).

**Régime 5 :** C'est le seul régime avec des vents de Nord-Est selon le point de la boîte. Il est aussi caractérisé par la position du centre de l'anticyclone de l'île de Pâques qui est la plus éloignée de notre zone d'étude (Figure 15 et 16). Les alizés provenant de l'anticyclone de Pâques sont déviés vers la gauche par la force de Coriolis et comme la position moyenne de l'anticyclone de Pâques pour ce régime est observée un peu plus au nord, on obtient des

directions de vent Nord Nord-Est. On constate que c'est un régime avec moins de couverture nuageuse au regard des données d'OLR (Figure 17)

**Régime 6 :** C'est un régime de vent d'Est avec des isobares très éloignées les unes des autres dans la boîte donc ceci induirait une intensité pas très forte (Figure 15). La SST est assez homogène sur toute la boîte (Figure 16) et des valeurs d'OLR négatives au Sud du domaine où l'on peut noter des vents de Nord-Est et des valeurs positives au Nord. Il semblerait être le régime où le centre de l'anticyclone de l'île de Pâques soit le plus proche de notre domaine d'étude.

### **Corrélation des années El Niño/La Niña avec les régimes de temps obtenu**

L'analyse de la répartition des régimes obtenu du clustering montre une assez bonne corrélation de certains régimes pendant les phases El Niño ou La Niña du phénomène ENSO. Une comparaison des années a été effectuée, deux régimes semblent corrélés à l'ENSO :

- Phase El Niño : Le régime 3, en termes de fréquence d'occurrence, semble nettement plus important durant les phases d'El Niño. La figure 11 montre que pendant les années 1983 et 1998 qui sont des années de fort El Niño (Figure 18), le régime 3 surpasse les autres régimes.
- Phase La Niña : Le régime 1 bien qu'étant le plus présent des régimes semble particulièrement ressortir du lot pendant les années 88, 99 et 2000 correspondant à des années La Niña (Figure 18)

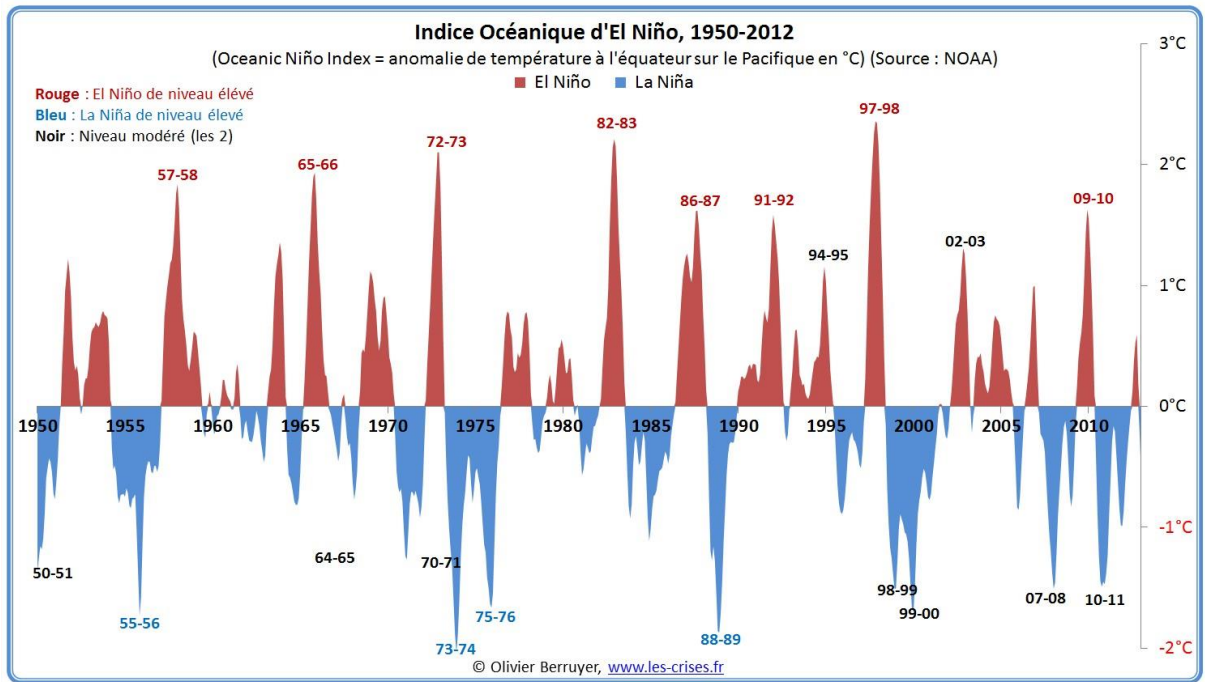


Figure 18: Indice océanique du phénomène ENSO de 1950 à 2012

### III.3 Caractérisation des régimes à l'échelle locale

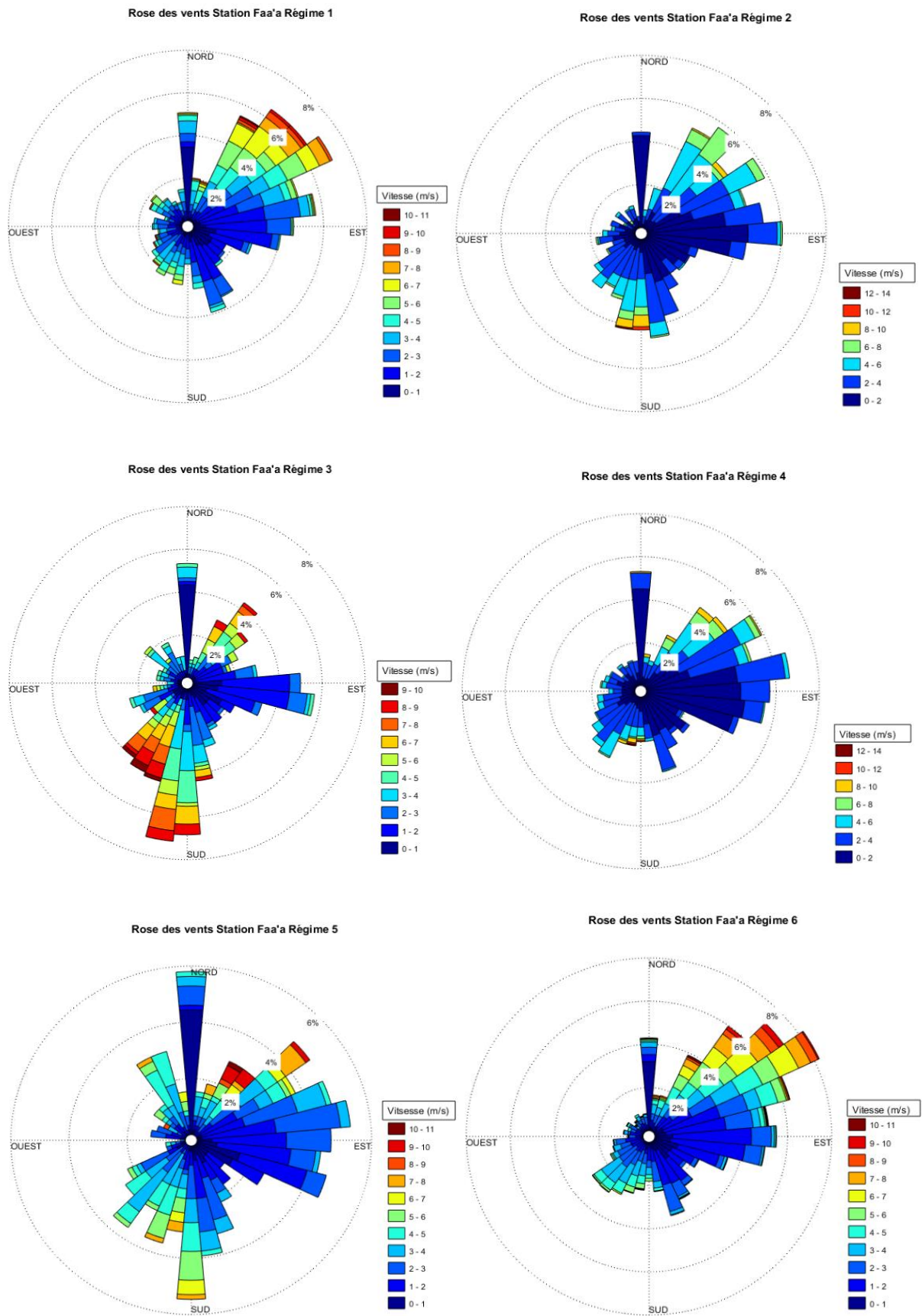


Figure 19: Rose des vents station Faa'a selon les régimes



En termes de directions les roses des vents (Figure 19) ne confirment pas toujours les directions obtenues avec l'échelle synoptique quoique pour le régime 3 on observe bien des vents de Sud mais pas vraiment des vents de Sud-Est ça pourrait être dû à la position géographique de la station de Faa'a. En termes d'intensité le régime 3 est celui avec les vents plus forts pouvant atteindre 10 m/s. On note que le régime 5 aussi correspond à peu près aux caractéristiques synoptiques avec les maximums obtenus pour des régimes de Nord-Est mais aussi un vent de Nord assez fréquent tout au long de l'apparition de ce régime. Quant aux autres ils sont principalement d'Est mais d'intensité relativement faible dans la globalité avec des fréquences d'apparition plus importante pour les vents de faibles intensités.

Les pourcentages pour les régimes sont (sur la période des données observées) :

Régime 1 :20%

Régime 2 :13%

Régime 3 :8%

Régime 4 : 15%

Régime 5 :10%

Régime 6 : 34%

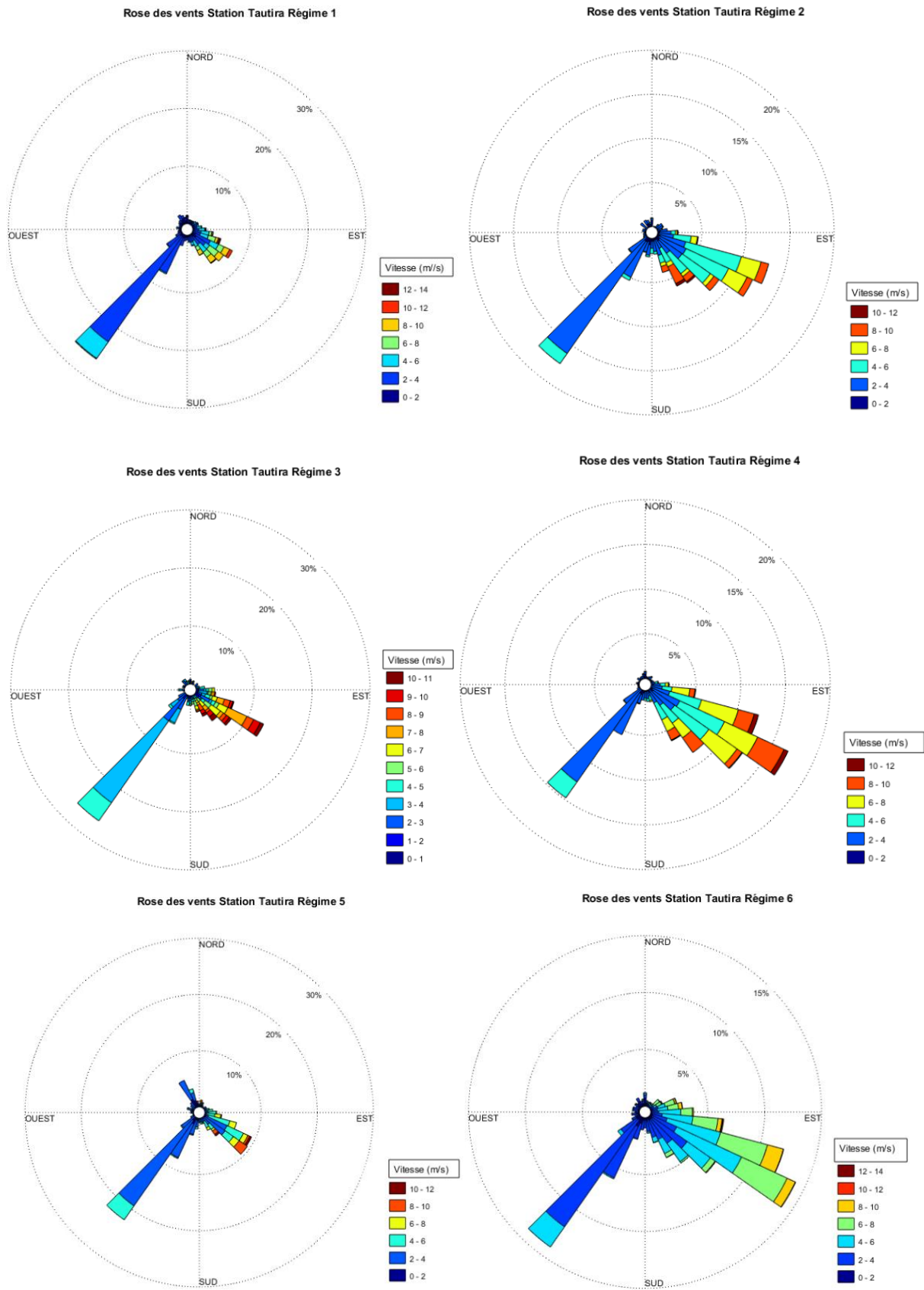


Figure 20: Rose des vents station Tautira selon les régimes

Concernant Tautira, on note la présence d'une même direction de vent (direction Sud-Ouest) avec une fréquence d'apparition assez importante peu importe le régime dans lequel l'on se trouve (Figure 20). C'est sûrement dû à la brise de mer du fait que la station est située dans une zone sujette à ce phénomène. On constate aussi que les maximums d'intensité de vents sont observés au régime 3 (que l'on assimilerait au Mara'amu) mais n'ont pas une grande fréquence d'apparition. Il y aussi ce petit pic de vent de Nord que l'on observe que sur le Régime 5 ce qui correspond un peu avec la caractéristique de ce régime à l'échelle synoptique.

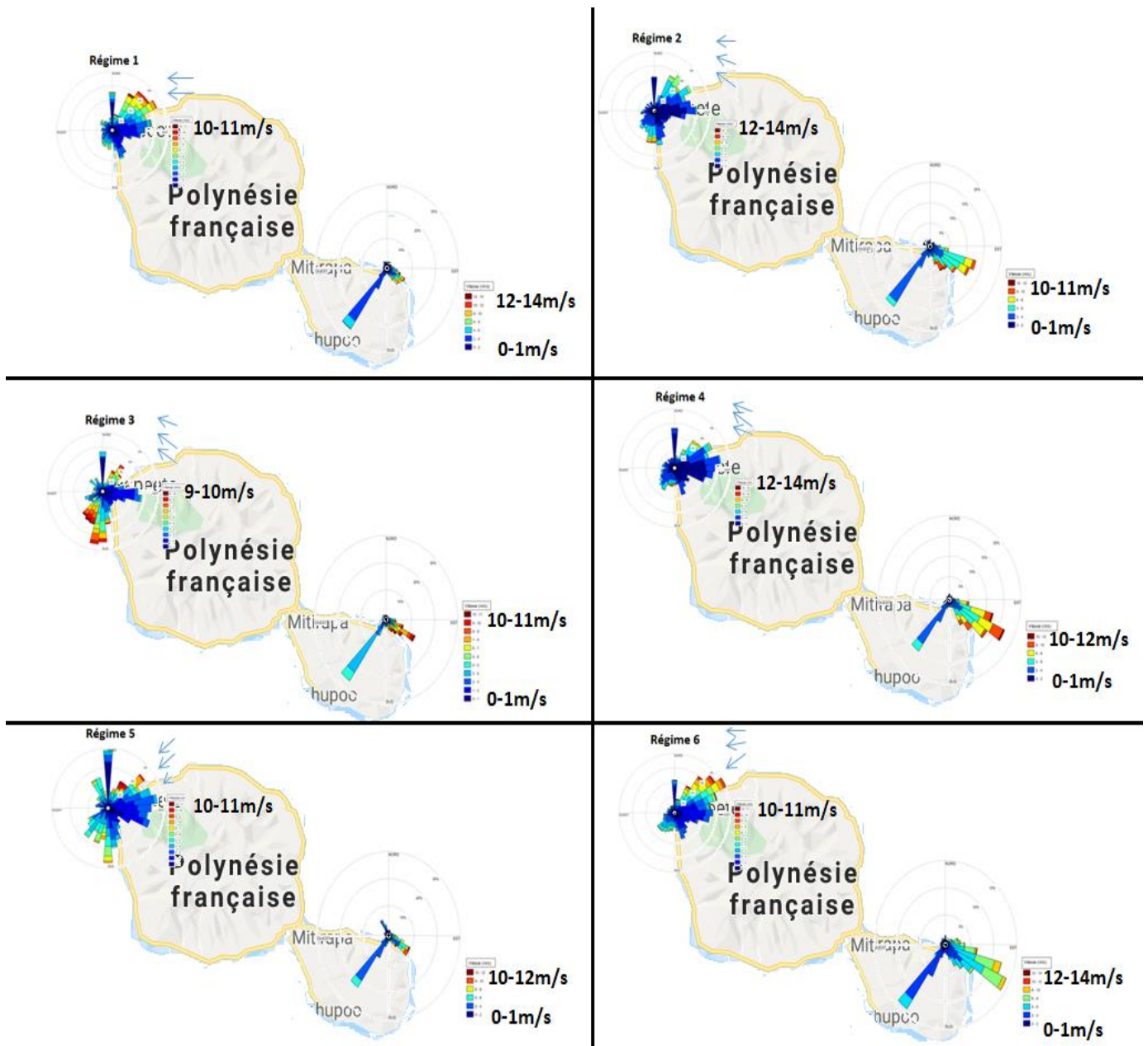


Figure 21 : Superposition des roses de vent sur la carte de Tahiti et représentation du sens du vent synoptique donné par la classification.

Cette figure permet mettre en exergue la corrélation entre les vents synoptiques et ceux locaux suivant chacun des régimes mais aussi avec les roses des vents nous pouvons mieux apprécier l'intensité des vitesses de vent.

*Tableau 2 : Récapitulatif des vents à l'échelle synoptique et locale*

<b>Régime</b>	<b>Synoptique</b>	<b>Faaa</b>	<b>Tautira</b>
1	Est	Vents dominants de Nord-Est accélération côtière	Vent dominant de Sud-Est Effet de côte
2	Est / Sud-Est	Faaa semble à l'abri du vent un peu de vent de Sud	Vent de Sud-Est assez fort (max 10-11m /s)
3	Sud-Est	vent de Sud dominant (max 9-10m/s)	Vent de Sud-Est assez fort (max 10-11m /s)
4	Sud-Est	Faaa semble aussi à l'abri du vent sans vent de Sud	Fort vent de Sud-Est (max 10-12m /s)
5	Nord-Est	Fort vent de Nord-Est (max 10-12m/s) Parfois des vents de Sud	Vent de Sud-Est ?? Effet de côté ou défaut de mesure ?
6	Est / Nord-Est	vents dominants de Nord-Est Légère accélération côtière comme pour R1	

### III.4 Qualification de la ressource en énergie renouvelable (Solaire et Eolien)

Toujours dans le cadre de la qualification de la ressource en énergie renouvelable, les données de rayonnement global de la station de l'aéroport international de Faa'a ont été traitées dans le but d'étudier en moyenne le niveau d'ensoleillement selon les régimes.

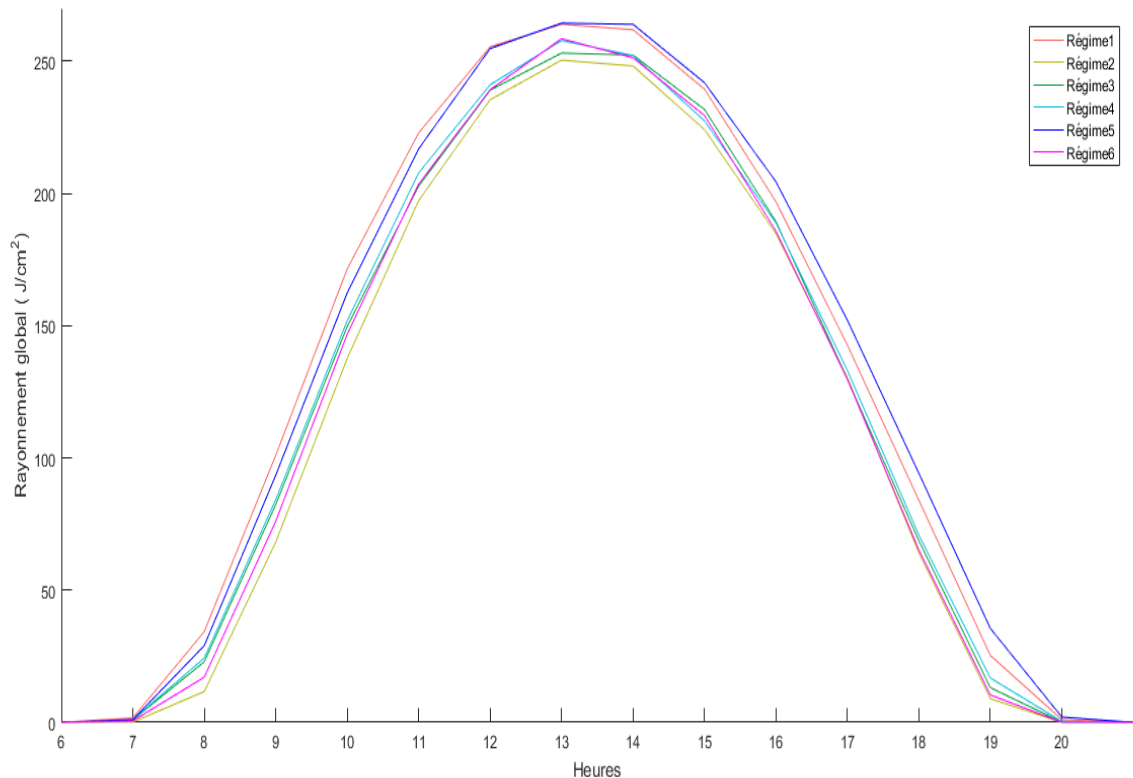


Figure 22: Représentation du rayonnement global diurne selon les régimes

La figure 22 renseigne sur le rayonnement solaire moyen sur une journée en fonction des régimes. Elle a été obtenue à partir de 10 ans (2008-2017) de données fournies, généreusement, par les services de Météo France. Ces données, après avoir été réparties en six (6) régimes sur la base du clustering réalisé, ont été traitées sur Matlab.

L'analyse de la figure 22 montre que deux régimes (régime 1 et 5) ont un rayonnement global par jour supérieure à  $2000 J/cm^2$  tandis que les 4 autres régimes (régime 2, 3, 4 et 6) ont un rayonnement global inférieure à  $2000 J/cm^2$  voire même plus (régime 2). Ceci donnerait un indice sur la saisonnalité des régimes. Les régimes 1 et 5 seraient observés plus pendant l'été austral alors que les autres régimes s'observeraient en hiver austral, chose que l'on peut remarquer au niveau de la figure 22, pour le régime 2 par exemple, que l'heure d'apparition du soleil est décalé d'une heure par rapport aux autres courbes de même qu'en fin de journée pour le coucher de soleil. Pour corroborer ces résultats, nous pouvons nous appuyer sur l'étude de

Météo France (Atlas de la Polynésie française, 2004) réalisée sur 4 stations (dont la station de Faa'a de 1978 à 2002) qui montre que le rayonnement est maximal d'octobre à janvier (été austral), de 2200 à 2500 J/cm<sup>2</sup> par jour suivant les stations. Il est minimal en juin (hiver), de 1100 à 1500 J/cm<sup>2</sup>

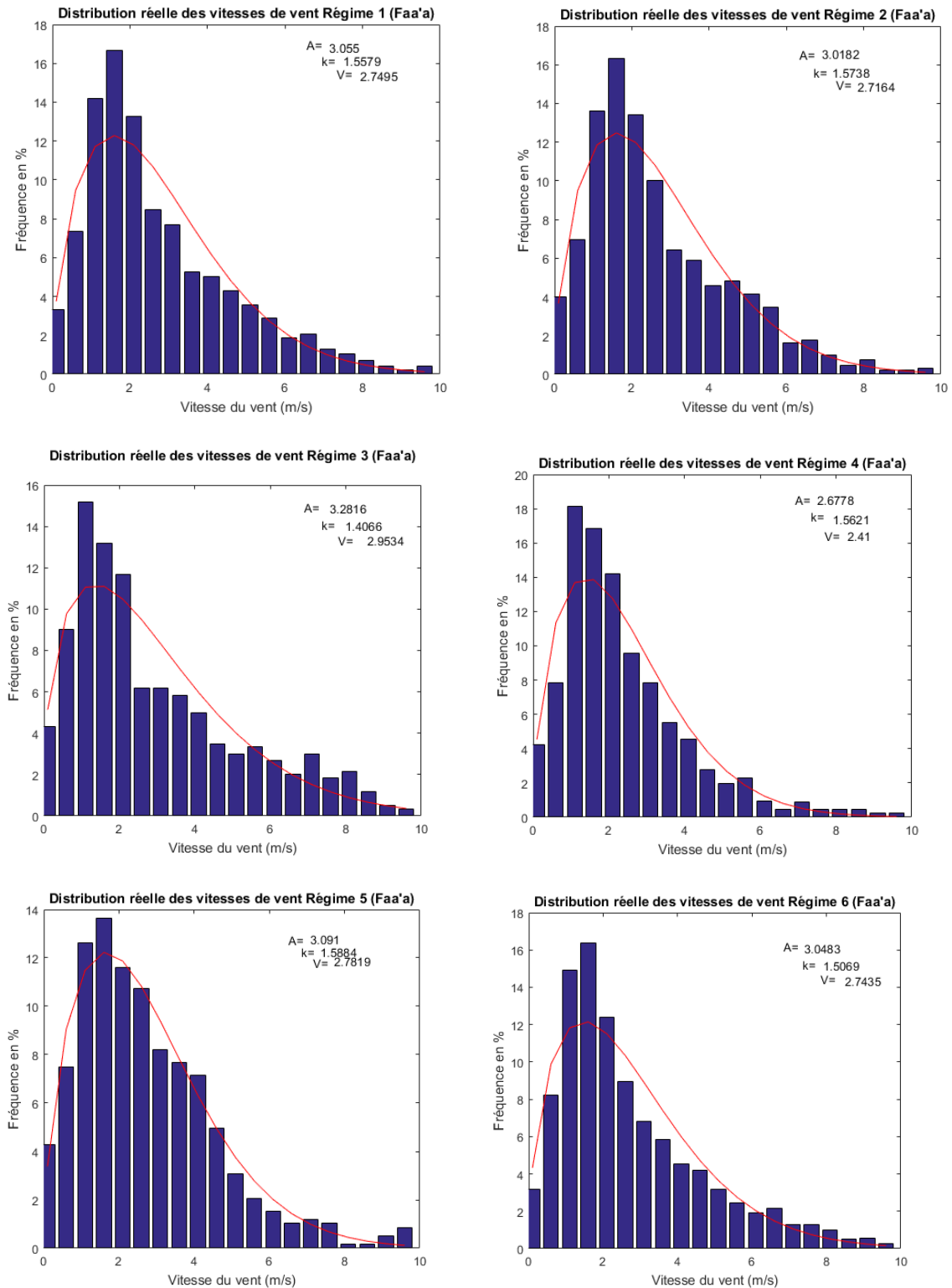


Figure 23: Distribution de Weibull selon les différents régimes

En plus du solaire, nous avons jugé intéressant de voir le comportement du vent selon les régimes (Figure 23). La distribution de Weibull est l'outil qui nous a permis d'étudier ce comportement. Elle renseigne sur la turbulence du vent avec le paramètre  $k$ .  $k$  est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de la distribution et accepte une valeur de 1 à 3. Une valeur plus faible impliquerait un vent très variable alors qu'un vent constant impliquerait une valeur  $k$  plus élevée. Dans notre étude, on constate la valeur de  $k$  peu près égale à 1.5 peu importe le régime. Cette valeur montre que le vent dans zone n'est pas très turbulent.

On peut aussi noter que la vitesse moyenne obtenue selon les régimes est assez similaire d'un régime à un autre. Le régime 3 est celui qui a la plus grande valeur de la vitesse, il faut tout de même prendre en compte l'effet de la moyenne car il subsiste pendant ce régime des vitesses de vent pouvant atteindre 10m/s (Figure 17 et 18).

Ainsi, nous avons essayé de voir en termes de production quelle serait la production annuelle d'électricité via l'outil « suisse éole » pour le site de Faa'a avec les valeurs obtenues pour la distribution de Weibull ( $A$  et  $k$ ). L'outil « suisse éole » est disponible sur le net à l'adresse (<https://www.suisse-eole.ch/fr/>). Les résultats obtenus (Figure 24) montrent qu'avec une petite éolienne de type Aventa AV-7 (6.5 kW) qu'on peut obtenir une production de 10.83 kWh/an avec un facteur de capacité de 19%.

#### Résultat

Fabricant	Aventa
Type	AV-7
Puissance installée	7 kW
Diamètre du rotor	12.9 m
Production d'énergie	10'830 kWh/an
Facteur de capacité <sup>1</sup>	19.0%
Nombre d'heures de plein rendement <sup>2</sup>	1'665 h/an
Nombre d'heures d'opération <sup>3</sup>	6'355 h/an

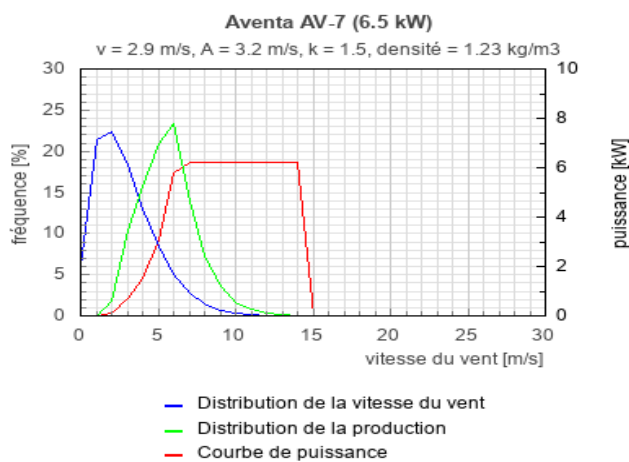


Figure 24: Esquisse de la production d'énergie éolienne à partir des caractéristiques de données de vent

## Conclusion et perspectives

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une meilleure prévision des régimes de temps observés sur Tahiti dans l'optique de qualifier la ressource d'énergies renouvelables en particulier le solaire et l'éolien.

Dans cette logique, une classification des régimes de temps a été faite sur le domaine de la Polynésie française en utilisant d'abord le vent à 500 hPa, en un premier lieu, sur une période allant du 1 janvier 1979 au 31 décembre 2008. Nous avons ensuite utilisé le géopotentiel à 850 hPa sur la période du 1<sup>er</sup> Janvier 1979 eu 31 décembre 2017. La méthode de classification utilisée est celle de l'algorithme des k-moyennes implémentée sous Matlab.

Les données de vent et de géopotentiel utilisées dans ce travail sont des données de ré-analyses ERA Intérim du centre européen pour les prévisions à moyen terme (CEPMMT). Ainsi six (6) régimes de temps ont été obtenus avec les deux classifications. Ces six régimes sont scindés en trois, selon la direction des vents. Les régimes 1, 2, 4 et 6 sont principalement des régimes de vent d'Est à l'échelle synoptique, le régime 3 est quant à lui, un régime de Sud-Est tandis que le régime 5 est un régime de Nord-Est. Une saisonnalité des régimes a été observée avec des régimes qui apparaissent généralement pendant l'été austral tel quel le régime 1 et d'autres en hiver austral tel que le régime 5. Le régime 3 serait plus favorable pour l'exploitation de l'énergie éolienne tandis que le régime 1'est le régime le plus propice pour une bonne exploitation de l'énergie solaire au vu des résultats obtenus à l'échelle locale. En définitive, on constate que certains des régimes ont des caractéristiques qui tant à l'échelle synoptique et à l'échelle locale sont corrélées.

En somme, ce travail de caractérisation à l'échelle locale sur Tahiti des situations météorologiques de grande échelle et ses implications peut contribuer au développement des énergies renouvelables dans ladite zone.

En perspective, une étude plus poussée sur la transition entre les différents régimes et leur persistance serait intéressante; de même qu'une exploitation des images satellites pour des jours précis de chaque régime.



## Bibliographie

- Ackerley, D., Lorrey, A., Renwick, J.A., Phipps, S.J., Wagner, S., Dean, S., Singarayer, J., Valdes, P., Abe-Ouchi, A., Ohgaito, R., Jones, J.M. (2011).** Using synoptic type analysis to understand New Zealand climate during the mid-Holocene. *Climate of the Past*, 7(4), 1189–1207.
- Beucher, F. (2010).** Météorologie tropicale: des alizés au cyclone tropical. *Météo France*. ISBN 9782110993915
- Biernat, E., Lutz, M. (2015).** Data science : fondamentaux et études de cas. *Groupe Eyrolles*, 358 pages. ISBN: 978-2-212-14243-3
- Bilal, B.O., Ndiaye, P. A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, A. (2010).** Evaluation du potentiel éolien des sites de Kayar et de Potou Application au choix d'une éolienne adaptée au site. *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur*, 12 (1).
- Carta, J. A., Ramirez, P., & Velazquez, S. (2009).** A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 933-955.
- Conil, S., Hall, A., (2006).** Local regimes of atmospheric variability: a case study of Southern California. *Journal of Climate*, 19, 4308–4325.
- Davidson, K.L., Boyle, P.J., Guest+, P.S., (1992).** Atmospheric boundary-layer properties affecting wind forecasting in coastal regions. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 983–994.
- Ghil M, Robertson AW. (2002).** “Waves” vs. “particles” in the atmosphere’s phase space: a pathway to long-range forecasting? *Proceedings of National Academy of Sciences U.S.A*, 99, 2493–2500.
- Hopuare, M., Pontaud, M., Céron, J.-P., Ortega, P., Laurent, V. (2015).** Climate change, Pacific climate drivers and observed precipitation variability in Tahiti, French Polynesia. *Climate research* 63(2), 157-170
- Jiang, N., Griffiths, G., Lorrey, A. (2013).** Influence of large-scale climate modes on daily synoptic weather types over New Zealand. *International Journal of Climatology* 33(2): 499–519.
- Jolliffe, I. T. (1986).** Principal Component Analysis and Factor Analysis. In *Principal component analysis*. Springer New York, 115-128.

- Kiladis, G. N., H. V. Storch, H. V. Loon, (1989).** Origin of the South Pacific Convergence Zone. *Journal of Climate*, 2, 1185–1195.
- Laurent V, Maamaatuaiahutapu K, Maiau J, Varney P (2004).** Atlas Climatologique de la Polynésie Française. *Météo France – Direction Interrégionale de Polynésie Française – ISBN:2952294607*
- Lebart L., Piron M., Morineau A. (2006).** Statistique exploratoire et multidimensionnelle – Visualisation et inférence en fouilles de données. 4e édition, *Dunod*.
- Lefèvre, J., Marchesiello, P., Jourdain NC, Menkes C, Leroy A. (2010).** Weather regimes and orographic circulation around New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin*, 61 (7), 413–431.
- Liebmann, C. and Smith, C. A. (1996).** Description of a complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 77 (6), 1275-1277.
- Lorrey, A.M. and Fauchereau, N.C. (2017).** Southwest Pacific atmospheric weather regimes: linkages to ENSO and extra-tropical teleconnections. *International Journal of Climatology*, 38 (4), 1893-1909.
- Lucas-Svay, L. (2018).** Wind and solar resource assessment for French Polynesia. Memoire de Master, Ecole Centrale de Lyon, 52pp.
- Lutgens, F.K., Tarbuck, E.J. (2000).** The Atmosphere: an introduction to meteorology (8<sup>th</sup> Edition). Prentice Hall (Eds), 512pp.
- Madougou, S., (2010).** Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent. *Thèse de doctorat. Université Toulouse 3 Paul Sabatier*, France, 188 p.
- Michelangeli, P. A., Vautard, R., & Legras, B. (1995).** Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(8), 1237-1256.
- Mo, K., Ghil, M. (1988).** Cluster analysis of multiple planetary flow regimes. *Journal. Geophys. Res.* 93(9): 10927–10952.
- Moron, V., Gouirand, I., Taylor M. (2016).** Weather types across the Carribean basin and their relationshipwith rainfall and sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 47(1–2), 601–621.

**Philander, S. G. H. (1990).** El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. *Academic Press, San Diego*. 169, 179, 185, 205.

**Rapport annuel 2012 [Météo-France] (2013) Rapport annuel / Météo-France.**86 p.

**Renwick, J.A. (2011).** Kidson's synoptic weather types and surface climate variability over New Zealand. *Weather Climate*, 31, 3–23.

**Takahashi, K., and S. B. Battisti, (2007):** Processes controlling the mean tropical Pacific precipitation pattern. Part II: The SPCZ and the Southeast Pacific dry zone. *Journal of Climate*, 20, 5696–5706.

**Trenberth, K. E. (1976).** Fluctuations and trends in indices of the southern hemispheric circulation. *Quarter Journal of Royal Meteorological Society*, 102, 65-75.

**Vautard R. (1990).** Multiple weather regimes over the North Atlantic: analysis of precursors and successors. *Monthly Weather Review*, 118(10), 2056–2081.

**Vautard R, Legras B. (1988).** On the source of midlatitude low-frequency variability. Part II: nonlinear equilibration of weather regimes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(20), 2845–2867.

**Vincent, D. G., (1994).** The South Pacific Convergence Zone (SPCZ): a review. *Monthly Weather Review*, 122, 1949–1970.

**Vincent, E.M. (2008).** Variabilité de la position de la Zone de Convergence du Pacifique Sud (SPCZ) à l'échelle interannuelle et influence sur la géographie de la cyclogenèse. *Mémoire de Master*. Paris, Ecole Normale Supérieure, 38 pp.

**Vincent, E.M., Lengaigne, M., Menkes, C.E., Jourdain, N.C., Marchesiello, P., Madec, G. (2011).** Interannual variability of the South Pacific convergence zone and implications for tropical cyclone genesis. *Climate Dynamics*. 36: 1881–1896.

<https://www.les-crises.fr/climat-16-el-nino-la-nina/>

Ziguinchor, Mars 2019 (Indexe océanique du phénomène El Niño de 1950 à 2012)

<https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-ocean-plus-chaud-affaiblit-circulation-atmospherique-42703/>

Ziguinchor, Mars 2019 (Phase El Nino du phénomène ENSO)

[https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Weather\\_FR/SEMKA0WO1FG\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Weather_FR/SEMKA0WO1FG_0.html)

Ziguinchor, Mars 2019 (Phase La Nina du phénomène ENSO)