



Département Météorologie

*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur*

*Contribution à l'étude du changement climatique : « Etude
de la sécheresse dans le sud de Madagascar et l'utilisation
du modèle climatique régionale RegCM4 »*



Présenté par: NOMENJANAHARY Mamy Andriamirado

Date de soutenance : 20 Juillet 2012

Promotion 2011

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Département : METEOROLOGIE

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Météorologie

*Contribution à l'étude du changement
climatique : « Etude de la sécheresse dans le sud de
Madagascar et l'utilisation du modèle climatique
régionale RegCM4 »*

Soutenu le 20 Juillet à VONTOVORONA

Présenté par : NOMENJANAHARY Mamy Andriamirado

Président du Jury : Pr ANDRIANARY Philippe Directeur de l'ESPA

Examineurs : Mr. RAKOTOVAZAHA Olivier Chef du Département
Météorologie à l'ESPA

: Mr. RATOVOHARISON Joseph Marie Victor Directeur de la
Météorologie Appliquée à la Direction Générale de la
Météorologie

: Mr. RAZAFINDRAKOTO Benjamin Chef du Service de
l'Agrométéorologie à la Direction Générale de la Météorologie

Rapporteur : Mr. RANDRIANASOLO Léon Maître de Conférence à l'ESPA

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, qu'il me soit permis d'adresser mes plus vifs et sincères remerciements à tous ceux qui, à quel niveau qu'ils soient, ont participé à ce travail et contribué à son succès. Pourtant, sans l'amour de Dieu et de sa bonté, ce mémoire n'aurait jamais pu être achevé et soutenu.

◆ *Ainsi, je suis profondément reconnaissant à :*

- ☞ *Professeur ANDRIANARY Philippe, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A.) qui a bien voulu autoriser la soutenance de ce mémoire.*
- ☞ *Monsieur RAKOTOVAZAHA Olivier, Chef de Département Météorologie à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A.) pour avoir apporté des aides matérielles très importantes.*
- ☞ *Monsieur RANDRIANASOLO Léon, Maître de Conférence qui à proposé ce sujet et a bien voulu me guider tout le long de cette étude.*
- ☞ *Tous les enseignants du Département Météorologie de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A.) pour les cours et encadrement pédagogiques qu'ils m'ont dispensés pendant les trois années de scolarité.*

◆ *Mes vifs remerciements s'adressent, plus particulièrement, à :*

- ☞ *Monsieur RAZAFINDRAKOTO Benjamin, Ingénieur de la Météorologie, Chef du service de l'Agrométéorologie pour l'intérêt qu'il a porté à mes recherches et pour avoir accepté sans hésitation de m'aider pendant ce travail.*

◆ *Mes remerciements s'adressent également à :*

- ☞ *Mes camarades et ma famille qui m'ont aidé et m'encouragé, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*
- ☞ *Tous le personnel de la Direction Générale de la Météorologie à Ampandrianomby Antananarivo*

◆ *J'anticipe mes remerciements aux membres de Jury qui vont juger ce travail.*

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES	I
TABLES DES FIGURES	II
LISTE DES TABLEAUX	VI
VOCABULAIRES	VIII
INTRODUCTION	1
<u>PARTIE I. GENERALITE, LA SECHERESSE</u>	<u>3</u>
CHAPITRE I. GENERALITE	4
1. ZONE D'ETUDE	4
1.1. Situation géographique physique	4
1.2. Hydrographie	7
1.3. Population	7
2. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUE DU MILIEU	7
3. APERÇU CLIMATIQUE DE MADAGASCAR	8
CHAPITRE II. LA SECHERESSE	9
1. PREAMBULE	9
2. PRINCIPE ET DEFINITION	9
3. METHODES POUR CARACTERISER LA SECHERESSE	10
3.1 Classification de sévérité selon l'indice de précipitation standardisé (SPI)	10
3.1.1. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle interannuelle (SPI-12)	12
3.1.2. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle saisonnière (SPI-6)	12
3.1.3. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle intra saisonnière (SPI-3)	13
3.1.4. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle mensuelle (SPI-1)	13
3.2 Diagramme ombrothermique de Gausson	13
3.3 Classification de la sévérité selon l'indice d'écart type	15
3.4 Indice de l'écart à la moyenne (Em)	17
4. CAUSES	17

4.1	<i>Cause météorologique</i>	18
4.2	<i>Cause climatologique</i>	18
5.	L'INTERACTION SOL – ATMOSPHERE	19
5.1	Sensibilité du Sud au couplage sol – atmosphère.....	19
5.2	Quelques éléments sur le couplage sol – atmosphère	20
6.	L'IMPACT DE LA SECHERESSE	22
PARTIE II. LE MODELE CLIMATIQUE REGIONAL RegCM4		24
CHAPITRE III. DESCRIPTION DU MODELE		25
1.	INTRODUCTION	25
1.1.	Discrétisation verticale et horizontale	26
1.2.	Projection de carte	30
2.	PARAMETRISATION DU MODELE	30
2.1.	Formulations dynamiques	30
2.1.1	Equation horizontale du mouvement	30
2.1.2	Equations de continuité et de σ	31
2.1.3	Equation thermodynamique et équation pour ω	31
2.1.4	Equation hydrostatique	32
2.2.	Paramétrisations physiques.....	32
3.	Futurs Développements	52
CHAPITRE IV. MISE EN ŒUVRE DE REGCM4		54
4.	Pré-processing	54
4.1.	Terrain.....	54
4.2.	ICBC 55	
4.2.1.	SST 55	
4.2.2.	Conditions initiales et conditions aux limites	55
5.	RegCM	57
6.	Post – processing	60
7.	PostNc	61
PARTIE III. STRATEGIE DE L'ETUDE		64
CHAPITRE V. OBJECTIFS ET CHOIX DES PERIODES ETUDIEES		65
1.	CONTEXTE GENERAL	65
2.	PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES	66
3.	METHODE	66
4.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	66

4.1.	Quantification du déficit des précipitations pour des échelles de temps multiples	66
4.2.	Indice d'écart à la moyenne (Em)	70
4.3.	Diagramme-ombrothermique	71
5.	CONCLUSION	74
CHAPITRE VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DE LA SIMULATION AVEC RegCM4 ..		75
1.	STRATEGIE DE VALIDATION DES SORTIES DE REGCM4.....	75
2.	PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES PAR LA SIMULATION (ERA40).....	75
3.	TOPOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE	77
4.	RESULTATS POUR LES STATIONS ETUDIEES	77
4.1.	Mois sec (N, D, J, F, M)	78
4.2.	Cumul sur une période de trois mois (NDJ/FMA)	78
4.3.	Modèle de précipitation à moyen terme (NDJFMA)	79
4.4.	Caractérisation des années sèches (J-D).....	79
5.	COMPARAISON ET INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS AVEC L'OBSERVATION .	79
6.	CONCLUSIONS	84
CHAPITRE VII. MODIFICATION DE QUELQUES PARAMETRES		85
1.	NOUVELLE CONFIGURATION	85
2.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	86
3.	CONCLUSIONS.....	88
CONCLUSION GENERALE		89
BIBLIOGRAPHIE		90
ANNEXES		92

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES

NCO	Netcdf Operator
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model
AS94	Fermeture d'Arakawa et Schubert (Grell et al. 1994)
BATS1e	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
CCC	Centre de climat du Colorado
CCSM	Community Climate System Model
CDO	Climate Data Operator
CLM	Community Land Model
CNRS	Centre National De Recherche Scientifique
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
FC80	Fermeture de Fritsch et Chappel (Fritsch et Chappell 1980).
GLCC	Global Land Cover Characterization
ICTP	International Center for Theoretical Physics
JFMA	Janvier, Février, Mars, Avril
MCG	Modèle de la Circulation Générale
MRC	Modèles Régionaux du Climat
NCAR	Centre National de la Recherche Atmosphérique
NDJ/FMA	Novembre, Décembre, Janvier/ Février, Mars, Avril
NDJFMA	Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril
NOAA	National Ocean and Atmosphere Administration
OBS	Observation
PBL	Planetary Boundary Layers
PCW	Physic of Weather and Climate
SPI	Indice de precipitation standardisé
SPic	Indice de precipitation standardisé corrigé
TKE	Energie cinétique turbulente
WRCC	Centre de Climat Régional Occidental
sp/p	Point de saturation/paramètre de saturation
GLACE	Global Land-Atmosphere Coupling Experiment
HE	Humidité Extreme
HM	Humidité Modéré
HF	Humidité Forte
SF	Sècheresse Forte
SE	Sècheresse Extreme



TABLES DES FIGURES

Figure 1 : localisation de la zone d'étude et les stations météorologiques.....	5
Figure 2 : végétation de Madagascar et zones forestières sensibles. Source : reem, 2007 ...	6
Figure 3 : régionalisation climatique.....	7
Figure 4 : coordonnées sigma	28
Figure 5: repère horizontal utilisée par regcm	29
Figure 6 : synopsis de la 3ème version du modèle climatique régional	50
Figure 7 : organigramme de modélisation regcm4	51
Figure 8 : Diagramme ombrothermique de Toliara entre 1961 et 2005.....	72
Figure 9 : Diagramme ombrothermique de Taolagnaro entre 1961 et 2005	72
Figure 10 : Diagramme ombrothermique de Ranohira entre 1961 et 2005	73
Figure 11: Diagramme ombrothermique de Fianarantsoa entre 1961 et 2005	73
Figure 12 : Elévation de surface et type de couverture de la surface (BATS)	77
Figure 13 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Toliara : RegCM4/OBS	80
Figure 14 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Taolagnaro : RegCM4/OBS	80
Figure 15 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Ranohira : RegCM4/OBS	81
Figure 16 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Fianarantsoa : RegCM4/OBS	81



Figure 17 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Toliara :	
RegCM4/OBS	82
Figure 18: Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Taolagnaro :	
RegCM4/OBS	82
Figure 19: Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Ranohira :	
RegCM4/OBS	83
Figure 20 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Fianarantsoa :	
RegCM4/OBS	83
Figure 21: Confrontation graphique des résultats de précipitation (mm/j) simulée par RegCM4 du mois de janvier 2002 : à gauche configuration 2 ; à droite configuration 1	86
Fig. 22 - Changements simulés des précipitations : configuration 1, configuration 2 et données réelles du mois de Janvier 2002 (modèle RegCM4)	87
Figure 23 : L'organigramme de la stratégie de l'étude.....	A[1]
Figure 24 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-1) (Observé-RegCM4).....	A[2]
Figure 25 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-1) (Observé-RegCM4)	A[3]
Figure 26 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira (SPI-1) (Observé-RegCM4) ..	A[4]
Figure 27 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-1) (Observé-RegCM4)	A[5]
Figure 28 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-3) (Observé-RegCM4).....	A[6]
Figure 29 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-3) (Observé-RegCM4)	A[7]
Figure 30 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira (SPI-3) (Observé-RegCM4) .	A[8]
Figure 31 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-3) (Observé-RegCM4)	A[9]



Figure 32 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-6) (Observé-RegCM4).... A[10]

Figure 33 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-6)..... A[11]

Figure 34 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira (SPI-6) (Observé-RegCM4) A[12]

**Figure 35 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-6) (Observé-RegCM4)
..... A[13]**

Figure 36 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-12) (Observé-RegCM4)..A[14]

**Figure 37 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-12) (Observé-RegCM4) ...
A[15]**

**Figure 38 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira(SPI-12) (Observé-RegCM4)
..... A[16]**

**Figure 39 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-12) (Observé-RegCM4)
..... A[17]**

Figure 40 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara(SPI-1) A[18]

Figure 41 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-1)..A[18]

Figure 42 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira(SPI-1) A[19]

Figure 43 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-1)A[19]

Figure 44 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara (SPI-3)..... A[20]

Figure 45 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-3)...A[20]

Figure 46 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira (SPI-3) A[21]

Figure 47: Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-3). A[21]

Figure 48 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara (SPI-6) A[22]

Figure 49 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-6)... A[22]

Figure 50 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira (SPI-6)	A[23]
Figure 51: Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-6).	A[23]
Figure 52 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara (SPI-12).....	A[24]
Figure 53 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-12)	A[24]
Figure 54 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira (SPI-12) ...	A[25]
Figure 55 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-12)	A[25]
Figure 56: Histogramme d'écart à la moyenne de Tuléar (mm)	A[26]
Figure 57 : Histogramme d'écart à la moyenne de Taolagnaro (mm)	A[26]
Figure 58 : Histogramme d'écart à la moyenne de Ranohira (mm)	A[27]
Figure 59 : Histogramme d'écart à la moyenne de Fianarantsoa (mm)	A[27]
Figure 60: présentation du logiciel GrADS.....	A[29]



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification du SPI (McKee et al, 1993).	11
Tableau 2 : Classification du SPIc.....	11
Tableau 3: Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur du SPI	12
Tableau 4 : Classification des climats.....	15
Tableau 5: Classification selon la sévérité.....	16
Tableau 6 : tableau résumant les formules de calcul de ces trois indices :	17
Tableau 7: Proportion de ménages ayant été touchés par des problèmes liés au climat ou à l'environnement, par province, en milieu rural (Unité : %).....	23
Tableau 8 : Proportion de ménages ayant subi certaines conséquences des problèmes de climat (Unité : %)	23
Tableau 9 : Les épisodes de sécheresse qui ont frappé le pays de 1968 à 1999	65
Tableau 10 : identification des stations (sud).....	66
Tableau 11: Statistiques des mois secs pour chaque année d'étude	67
Tableau 12 : Classification suivant la SPI-3 de chaque année d'étude	68
Tableau 13: Classification suivant la SPI-6 de chaque année d'étude.....	68
Tableau 14: Classification suivant la SPI-12 de chaque année d'étude.....	69
Tableau 15 : Fréquence des années selon les classes de (SPI) [Figure 56, 57, 58, 59].....	69
Tableau 16 : les statistiques des années sèches et pluvieuses pour chaque décennie (SPI-12).....	70
Tableau 17 : Classification suivant l'indice d'écart à la moyenne	70

Tableau 18: Classification suivant les SPI de chaque année d'étude : 1981, 1988,1990 (RegCM4).....	77
Tableau 19: Classification suivant les SPI de chaque année d'étude : 1991, 1992,2002 (RegCM4).....	78
Tableau 20 : Valeur de la précipitation en mm/j : Données réelles du mois de Janvier 2002	86
Tableau 21: Valeur de la précipitation en mm/j (configuration 1) : Données simulées du mois de Janvier 2002.....	86
Tableau 22: Valeur de la précipitation en mm/j (configuration 2) : Données réelles du mois de Janvier 2002.....	87
Tableau 23: Configuration du domaine.....	A[30]
Tableau 24: Paramètre de redémarrage	A[32]
Tableau 25 : Configuration des pas de temps.....	A[32]
Tableau 26: Résolution pour des paramètres d'entrée de CLM	A[32]
Tableau 27: Classes de végétation et d'occupation des terrains utilisées par BATS	A[33]
Tableau 28 : Configuration des paramètres physiques du modèle.....	A[33]
Tableau 29 : Paramètre de SUBEX	A[34]
Tableau 30 : Configuration du domaine	A[34]
Tableau 31 : Configuration des paramètres de sortie.	A[35]
Tableau 32 : Pas de temps avec différentes résolutions	A[36]
Tableau 33 : Valeurs des paramètres des classes de végétations et d'occupations des terrains utilisées par BATS	A[37]

VOCABULAIRES

Accrétion : Agglomération d'éléments (accrétion de nuages)

Synopsis : Vue d'ensemble d'une science (Résumé du schéma d'un scénario)

Zone éponge : Zone qui a une aptitude à retenir l'eau

Mosaïque : Ouvrage décoratif composé de petites pièces (en pierre, en verre, en émail, etc.) de différentes couleurs, assemblées et jointoyées. Fig. Juxtaposition d'éléments nombreux et divers.

Paquetage : Distribution

Saltation : Déplacement par sauts successifs des particules transportées par un fluide en mouvement

Pérenne : Rivière pérenne, qui coule toute l'année. Agriculture, plante pérenne, qui reste à la même place pendant plusieurs années.

Amenuiser : Diminuer

INTRODUCTION

La sécheresse est l'une des catastrophes naturelles qui ont marqué profondément la vie des populations à travers les âges. Ce phénomène touche les différents secteurs de l'économie nationale, entrave le développement agricole et rural et ralentit la croissance économique du pays. Presque chaque agriculteur des régions frappées par la sécheresse au Sud de Madagascar a perdu des récoltes. Il a été constaté que des anomalies saisonnières et intra-saisonnières des précipitations étaient importantes dans des domaines tels que l'agriculture et la gestion de l'eau. Au cours des vingt dernières années, le niveau moyen annuel des précipitations est passé de 111 ml à seulement 27,5 ml. Alors que les sécheresses étaient une exception, se produisant peut-être une fois tous les dix ans, elles sont aujourd'hui la norme, de même la malnutrition de milliers d'enfants dans l'ensemble des régions touchées par la sécheresse. Sa gestion nécessite de mettre à la disposition des différents décideurs les informations nécessaires pour la suivre et la détecter au moment opportun et, par conséquent, déclencher les mesures d'atténuation et les programmes de réponses qui permettent de minimiser ses impacts agricole, économique, environnemental et social. D'où la nécessité d'élaborer et de mettre en place un système efficace d'alerte précoce à la sécheresse. A plus forte raison, ce système permet aux acteurs et décideurs impliqués dans l'adaptation aux changements climatiques dont la sécheresse est un exemple, afin de mieux cerner la variation spatiale des différentes composantes de la Vulnérabilité climatique, d'obtenir des informations, outils et compétences pour mieux décider des actions à mener et des régions où elles doivent être focalisées. L'utilisation d'un modèle régional serait meilleure pour faire une bonne prévision. Les Modèles de Circulation Générale (**MCG**) sont utilisés depuis plusieurs années pour effectuer des projections climatiques à une échelle temporelle et saisonnière à multi-décennale (projection de changements climatiques). La faible résolution spatiale des MCG, due aux contraintes en matière de calcul numérique, nécessite le paramétrage de nombreux phénomènes de sous-échelles et ne résout pas bien les phénomènes orographiques [1]. Les Modèles Régionaux du Climat (MRC), de par leur haute résolution spatiale, sont employés pour pallier à ces problèmes et fournir une projection plus détaillée et potentiellement plus réaliste au-dessus d'une région donnée. Pour pouvoir mesurer la performance d'un modèle régional, un travail de recherches intitulé « Etude de la sécheresse dans le Sud de Madagascar, Simulation par le modèle climatique RegCM4 : cas de Toliara, Taolagnaro, Fianarantsoa et Ranohira » a été mené.

Cet ouvrage se subdivise en quatre grandes parties :

- ✦ Dans la première partie, nous parlerons des généralités sur la zone d'étude et sa caractéristique climatique ainsi que le principe et la définition de la sécheresse avec les causes, et les impacts.
- ✦ En seconde partie, la méthode d'approche proposée pour répondre au mieux au besoin de cette étude dont le modèle climatique régional RegCM4.

- ✦ En troisième et dernière partie, la stratégie de l'étude qui fait figurer deux méthodes différentes pour caractériser la sécheresse dans le calcul de SPI dont l'une par la manipulation des données réelles (1961-2005) et l'autre par l'utilisation du modèle climatique RegCM4(étude des cas [six ans]) ainsi qu' une amélioration des résultats sortis par le modèle en modifiant quelques paramètres.

PARTIE I. GENERALITE, LA SECHERESSE

CHAPITRE I. GENERALITE

1. ZONE D'ETUDE

Le domaine d'étude s'étend de 21 à 26°S en latitude et de 43° à 48°E en longitude (fig.1). Il comprend principalement le Sud de Madagascar. Le choix de ce domaine résulte de la volonté de prendre en compte le caractère spécial de cette région qui fait généralement l'objet de plusieurs qualificatifs : Sud « sec », sud aride, désertique, vulnérable, etc.[2]

1.1. *Situation géographique physique*

Au point de vue physique, le sud est assez contrasté. Il représente une vaste zone de 161 904 km² et correspond dans le nouveau contexte de découpage du pays, aux régions du Sud-Ouest, du Menabe, de l'Androy, de l'Anosy avec comme capitales régionales respectivement Tuléar, Morondava, Ambovombe et Fort-Dauphin. Avec une population de 2 459 438 habitants, où les Athées, Chrétiens et Musulmans cohabitent, les activités sont constituées principalement par l'agriculture et l'élevage. [2]

Le climat détermine la végétation de Madagascar, en particulier dans le Sud la végétation primaire est constituée de forêts denses sèches, de fourrés xérophiiles à Euphorbe (plante des régions tempérées et chaudes, avec de nombreuses espèces herbacées souvent adaptées à la sécheresse) dans les stations particulièrement sèches, et les forêts des alluvions.

Dans un triangle Ihoay/Tuléar/Fort-Dauphin (hormis Fort-Dauphin même), c'est le règne du bush épineux, qui ne reçoit que 500 mm d'eau par an et développe une végétation originale et totalement caractéristique de la sécheresse.

A l'exception de Fort-Dauphin, où l'on note une forêt pluviale à feuillage persistant, le reste de la zone présente des caractères « africains » avec présence de baobab et de jujubiers.

La tendance xérophiile (principalement les cactus) joue un rôle prépondérant dans l'alimentation et l'abreuvement des troupeaux bovins de l'Androy. Les paysans malgaches du sud pratiquent depuis longtemps le Tavy. Cette pratique est devenue une tradition au point que certains paysans ignorent complètement les autres méthodes de cultures et en particulier dans l'Androy. Les caractéristiques désertiques deviennent aiguës à Ambovombe et Ampanihy. Des réserves animalières et aires protégées existent par endroits (Ranohira).

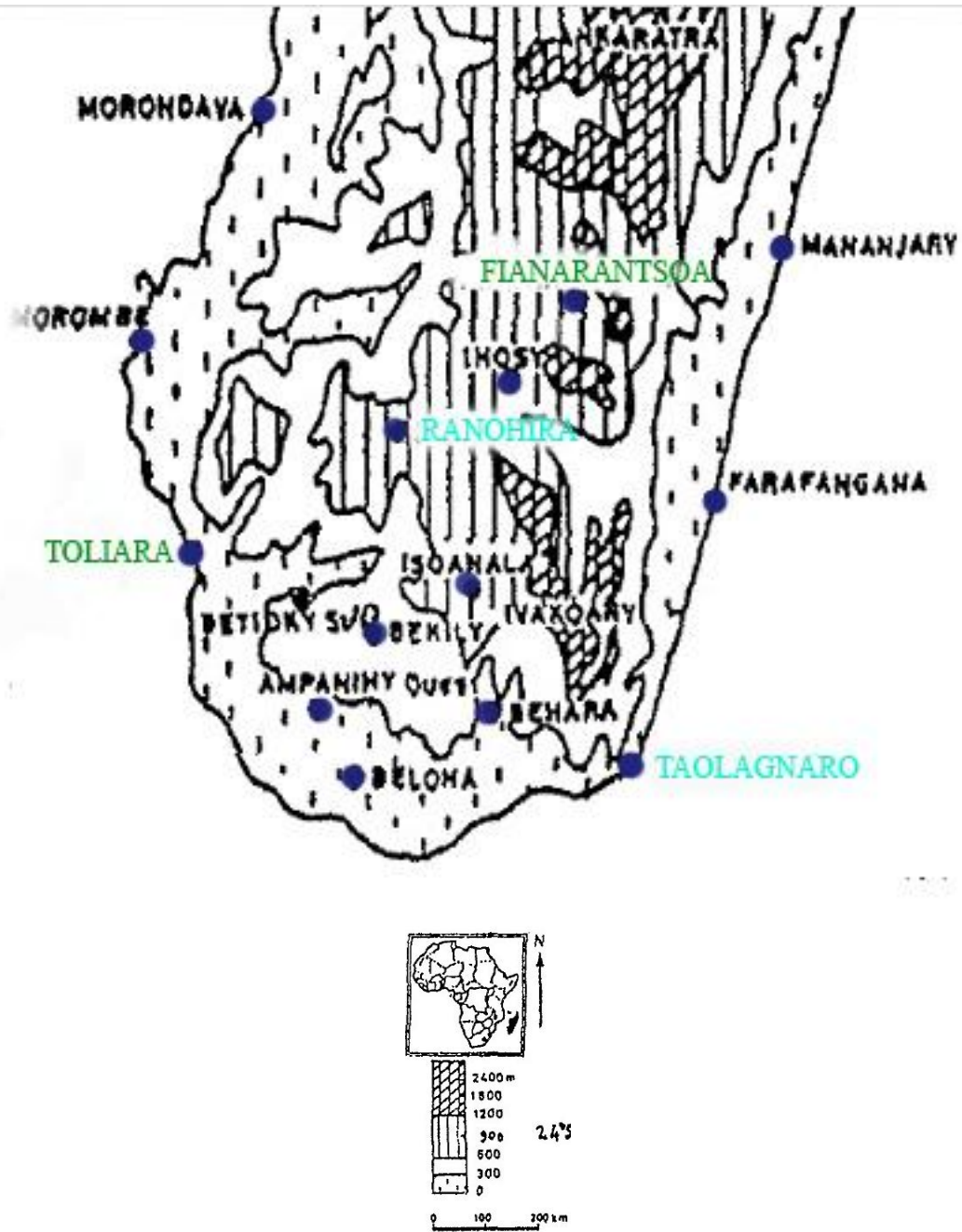


Figure 1 : localisation de la zone d'étude et les stations météorologiques

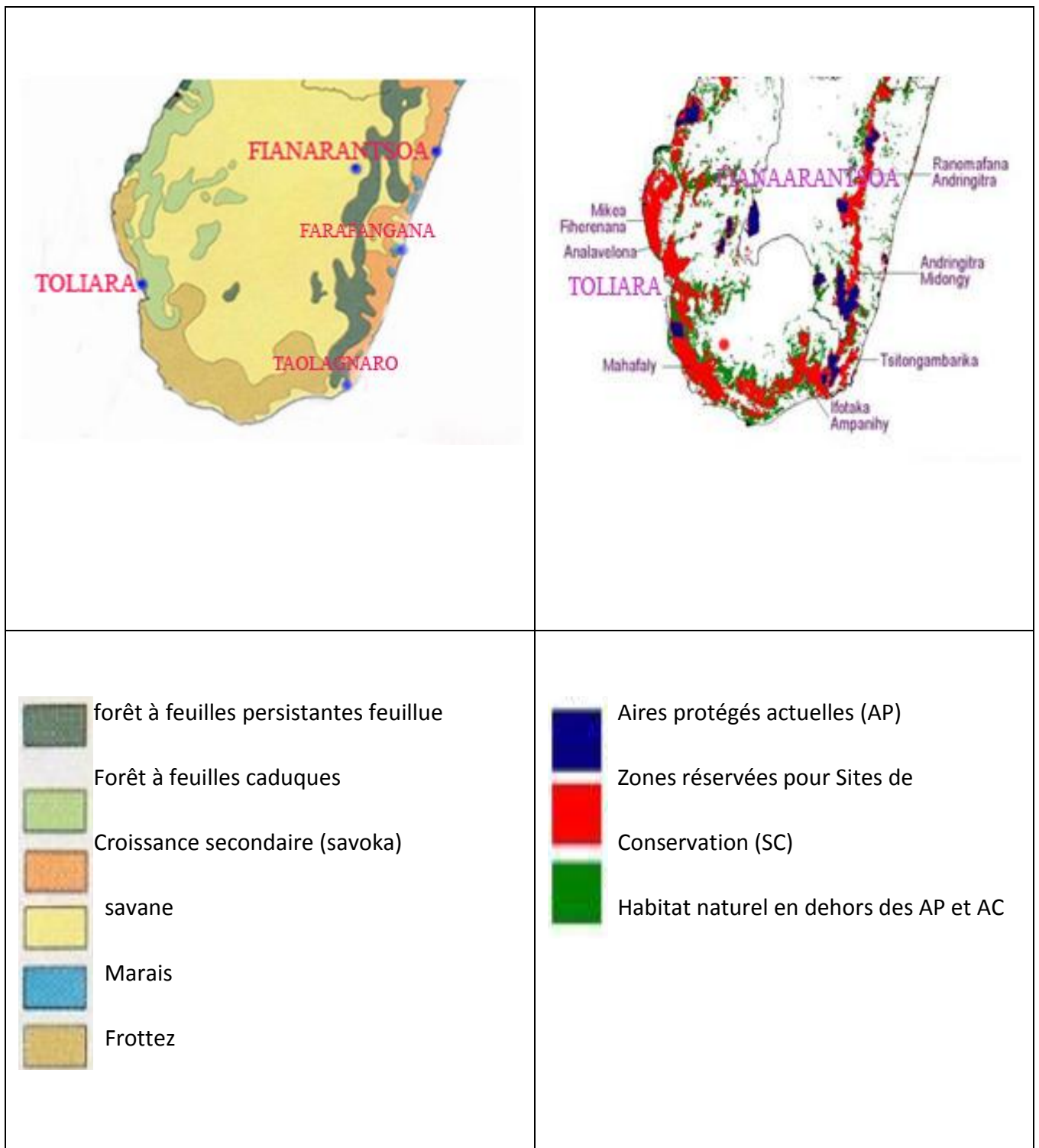


Figure 2 : végétation de Madagascar et zones forestières sensibles. Source : reem, 2007

1.2. Hydrographie

Le réseau hydrographique est assez lâche. Les principaux fleuves sont le Mandrare (à l'entrée d'Amboasary), le Menarandra [2], Onilah et le Fiherenana.

1.3. Population

Les populations du Sud sont très mobiles et les mouvements de migrations temporaires ou définitives se sont accélérés depuis les années 1930, avec une amplitude accrue lors des grandes crises climatiques. Le risque lié au déficit pluviométrique est le souci permanent des populations de cette région du Sud.

2. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUE DU MILIEU

La répartition inégale de la pluviométrie défavorise le Sud de Madagascar qui souffre d'un climat semi désertique rendu encore plus dur par la déforestation. Une grande partie de cette zone (soit environ 10% du territoire malgache) est soumise à un régime de pluies aléatoires et à des sécheresses récurrentes. Le sud est entièrement sous l'influence de vent d'alizé (vent de Sud-est) sauf de novembre à avril (vent de Nord-est). [3][4][5]

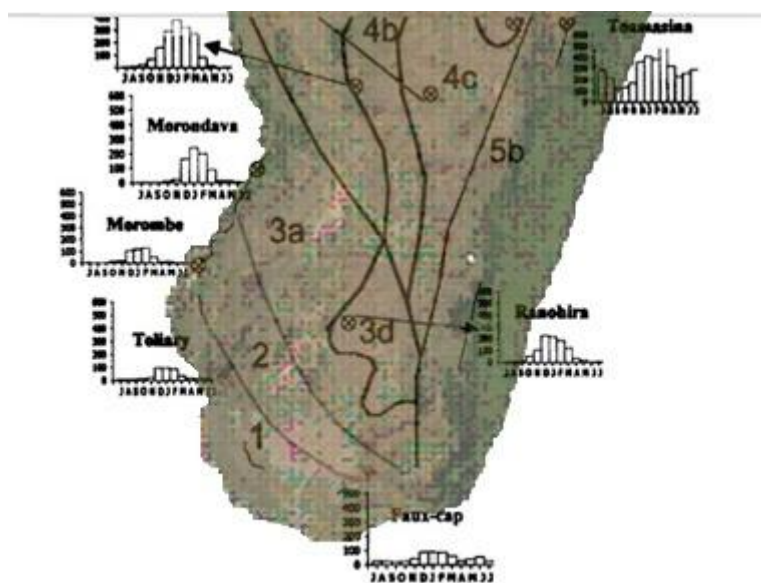


Figure 3 : régionalisation climatique

Les régions climatiques du Sud avec les régimes pluviométriques des stations représentatives

Région 1 : climat à tendance aride

Région 2 : climat à tendance semi-aride

Région 3 : climat subhumide (3a : chaud et 3d : adouci)

Région 4 : climat humide (4b : adouci - 4c : tempéré par l'altitude)

Région 5 : climat très humide

Par exemple, Toliara fait partie des stations représentatives des 12 régions climatiques de Madagascar et possède un climat à tendance aride chaud. La pluviométrie annuelle moyenne, inférieure à 400 mm est la plus faible de l'île. Les précipitations moyennes mensuelles ne dépassent pas 100 mm pendant les mois les plus pluvieux à savoir décembre janvier et février. Les mois d'aout, septembre et octobre sont les mois les moins pluvieux avec des précipitations mensuelles moyennes inférieures à 10 mm. Les températures moyennes annuelles des stations de la région sont comprises entre 23 et 24 °C. [3]

3. APERÇU CLIMATIQUE DE MADAGASCAR

On distingue généralement, à Madagascar, deux saisons :

- La saison chaude et pluvieuse (ou l'été) de Novembre à Avril
- La saison fraîche et sèche (ou l'hiver) de Mai à Octobre

Deux courtes intersaisons les séparent et durent chacune environ un mois

Pour étudier la dynamique (ou l'évolution à travers le temps) de la sècheresse au Sud de Madagascar, on doit tenir compte de ces quatre échelles de temps :

Echelle interannuelle (SPI 12)

Echelle intra saisonnière (SPI 3)

Echelle saisonnière (SPI 6)

Echelle mensuelle (SPI 1)

CHAPITRE II. LA SECHERESSE

1. PREAMBULE

La sècheresse est une conséquence de la variabilité normale de climat. Elle peut être définie comme étant un déficit de disponibilité en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée. La sècheresse, notion toute relative, se manifeste de plusieurs façons : sècheresse météorologique, sècheresse hydrologique, sècheresse agronomique et sècheresse édaphique, liée aux conditions pédologiques, classification adoptée par White et O'Meagher. « Il y a autant de définitions de sècheresse qu'il y a d'utilisations d'eau » La sècheresse, phénomène conjoncturel, ne doit pas être confondue avec l'aridité qui est un phénomène structurel climatique. La sècheresse se manifeste dans le temps tandis que l'aridité est un phénomène spatial.

2. PRINCIPE ET DEFINITION

On distingue généralement trois types de sècheresse avec leurs correspondances mathématiques [2]:

✚ la sècheresse météorologique quand il y a une période prolongée de précipitations en dessous de la moyenne $\Leftrightarrow 2TTT > RRR$ (précipitation inférieures à deux fois les températures)

✚ la sècheresse agricole quand il n'y a pas assez d'humidité pour les cultures. Cette condition peut avoir lieu même si les précipitations sont normales à cause des conditions du sol et des techniques agricoles, ou du choix de plantes inadaptées (ex : maïs ou riz, très consommateurs d'eau en zone sèche). $\Leftrightarrow ETP > RRR$ (précipitations inférieures à l'évapotranspiration)

✚ la sècheresse hydrologique quand les réserves d'eau disponibles dans les nappes aquifères, lacs et réservoirs descendent en dessous de la moyenne. Ceci peut arriver même avec des précipitations normales ou au-dessus de la moyenne lorsque l'eau est détournée pour une autre zone géographique ou qu'elle a été surexploitée, ou quand une consommation élevée d'eau dépasse les capacités de la nappe ou des réservoirs à se renouveler, ou quand les conditions d'alimentation des nappes (perméabilité du sol (Voir Loi

de Darcy) ne sont plus réunies. $\Leftrightarrow 0 > P_i - P_m$ (écart à la moyennes : précipitations annuelles moins précipitations moyennes annuelles).

En l'absence jusqu'à présent d'une définition unique de la sécheresse, nous ferons références aux différents indices et méthodes qui ont été développés pour caractériser les différents types de sécheresse.

Ces indices permettent de déterminer à différentes échelles de temps le seuil indiquant la sécheresse, sa durée, son étendu spatial et sa probabilité de récurrence. Ils assurent également la définition des classes d'appartenance de ce désastre selon sa sévérité, et sa position.

3. METHODES POUR CARACTERISER LA SECHERESSE

3.1 Classification de sévérité selon l'indice de précipitation standardisé (SPI)

McKee *et autres.* (1993) a développé l'indice standardisé de précipitation (SPI) afin de définir et de surveiller la sécheresse. En outre, le Centre de climat du Colorado (CCC), centre de climat régional occidental (WRCC) et le Centre National De Recherche Scientifique (CNRS) emploient le SPI pour surveiller les états actuels de la sécheresse aux Etats-Unis. La nature du SPI permet à un analyste de déterminer la rareté d'une période de sécheresse ou un événement irrégulièrement humide à une échelle de temps particulière pour n'importe quel endroit dans le monde possédant un enregistrement de précipitation. [5]

L'SPI est exprimé de la façon suivante :

$$SPI = (P_i - P_m) / \sigma$$

P_i : Pluviométrie de la période i

P_m : Pluviométrie moyenne

σ : Ecart type(ou déviation standard)

Cette classification proposée par McKee et al. (1993) répartit les périodes de temps selon les valeurs de l'SPI comme le montre ce tableau :

Tableau 1 : Classification du SPI (McKee et al, 1993).

Valeurs du SPI	Classes
Plus de 2.0	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Très humide
1.0 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à 0.99	Proche de la normale
-1.0 à -1.49	Modérément sèche
-1.5 à -1.99	Sévèrement sèche
Moins de - 2.0	Extrêmement sèche

En utilisant les seuils de sévérité établie par la méthode d'indice avec d'écart type, on a établi une nouvelle classification de l'SPI. On l'a nommé SPI corrigé ou SPIc. On constate que cette nouvelle classification est identique pour les deux zones et pour les différentes échelles de temps, ce qui donne la possibilité de comparaison entre les différentes régions et les différentes échelles de temps. Cette nouvelle classification est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Classification du SPIc

Valeurs du SPIc	Classes
Plus de 2	Extrêmement humide
1 à 1.99	Très humide
0.31 à 0.99	Modérément humide
-0.30 à 0.30	Proche de la normale
-0.31 à - 0.99	Modérément sèche
-1 à -1.99	Sévèrement sèche
Moins de -2	Extrêmement sèche

Nous allons utiliser le tableau suivant pour notre étude. Après avoir calculé les SPI il nous permet de déterminer la sévérité de la sécheresse selon différentes classes (Tableau 3).

Tableau 3: Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur du SPI

Classes du SPI	Degré de la sécheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1 < SPI < 2$	Humidité forte
$0 < SPI < 1$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 0$	Sécheresse modérée
$-2 < SPI < -1$	Sécheresse forte
$SPI < -2$	Sécheresse extrême

3.1.1. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle interannuelle (SPI-12)

Pour caractériser les années sèches, on doit utiliser le SPI12. Le SPI à cette échelle de temps reflète le modèle de précipitation à long terme. Le SPI12 n'est autre que la comparaison de cumul des précipitations des 12 mois consécutifs avec celle de la moyenne du même mois sur toutes les années de la série temporelle des données disponibles. Exemple : le SPI 12 de la fin d'octobre 1953 compare le total des précipitations de la période Novembre 1952 à Octobre 1953 avec la même période dans la série temporelle. Les SPI à cette échelle de temps sont probablement liés au débit d'écoulement, au niveau du lac, de même pour le niveau de l'eau souterraine à long terme.

Année météorologique : Novembre – Octobre, d'où l'utilisation du SPI 12 de la fin du mois d'octobre.

3.1.2. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle saisonnière (SPI-6)

Le SPI 6 mois compare la précipitation de cette période avec la même période de six mois sur toutes les années de la série temporelle. Par exemple le SPI 6 mois de la fin du mois d'octobre compare le total des précipitations de la période Mai à Octobre avec tout le total de la même période. Le SPI 6 mois reflète le modèle de précipitation à moyen terme. Les informations des SPI 6 mois sont probablement liées au débit d'écoulement, au niveau du lac, de même pour le niveau de l'eau souterraine à long terme. Pour la saison chaude et

pluvieuse (Novembre à Avril), on utilise le SPI 6 de la fin du mois d'Avril et celle de la saison fraîche et sèche (Mai à Octobres), et on tient compte du SPI 6 de la fin du mois d'Octobre.

3.1.3. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle intra saisonnière (SPI-3)

Le SPI 3 mois fournit des informations sur le cumul sur de trois mois avec le total de précipitations de la même période de trois mois sur toutes les années de la série temporelle. Le SPI 3 mois de la fin du mois de Février compare le total des précipitations de Décembre – Janvier – Février de cette saison avec le total des précipitations de Décembre à Février pour toute la saison dans la série temporelle étudiée. Le SPI 3 mois reflète le modèle de précipitation à court et moyen terme et fournit des informations sur les estimations saisonnières des précipitations.

La saison chaude est représentée par les deux trimestres mois Novembre - Janvier et Février - Avril tandis que la saison sèche celle de Mai - Juillet et Août - Octobre.

3.1.4. Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle mensuelle (SPI-1)

La carte de SPI1 est très similaire à la carte représentant le pourcentage par rapport à la normale de précipitation pour un mois.

SPI 1 reflète relativement les conditions à très court terme : ces applications peuvent être liées étroitement avec l'humidité à court terme du sol, au stress des cultures spécialement pendant la période de développement.

3.2 Diagramme ombrothermique de Gaussen

Il s'agit d'un climogramme qui fait figurer deux paramètres climatiques : la température mensuelle moyenne et la pluviométrie mensuelle moyenne sur la même représentation, tout en respectant l'échelle conventionnelle : un degré correspond à deux mm de précipitation. Ce diagramme permet de déterminer la durée de la période sèche et humide. Ainsi, un mois est qualifié sec lorsque le total des précipitations mensuelles moyennes en mm est inférieur au double de la température mensuelle moyenne en (°c). Il a été développé par Henri Gaussen et F. Bagnouls, botanistes célèbres, pour mettre en évidence les périodes de sécheresses. Les diagrammes permettent de comparer facilement les climats de différents endroits d'un coup d'œil du point de vue pluviosité. Les températures sont indiquées à gauche et les précipitations sont indiquées à droite.

Avant de tirer des conclusions, explicitons quelques notions importantes : définissons

- mois sec : Là où les histogrammes restent sous la courbe des températures.
- mois humide : Par contre, là où les histogrammes **dépassent** la courbe des températures.
- mois froid : Un mois froid, on le devine aisément, est un mois dont la température moyenne reste sous les 0° C.
- amplitude thermique : L'amplitude thermique est la différence entre la température maximale et la température minimale.

Le diagramme achevé va être exploité en vue de déterminer le climat de chaque station étudiée :

- Nous progresserons, de la première colonne de gauche, vers la dernière colonne, à droite, qui contient la réponse cherchée.

Tableau 4 : Classification des climats

Température moyenne annuelle	Amplitude thermique	Précipitations totales	Nombre de mois secs	CLIMAT
>20°C	< 5°C	>1500 mm	...	équatorial
>20°C	> 5°C	...	> 3	tropical
>20°C	> 5°C	...	> 10	désertique chaud
De 15 à 20°C	De 3 à 5 mois en été	méditerranéen
De 0 à 15°C	< 20°C	> 500 mm	...	tempéré
De 0 à 15°C	> 20°C	De 250 à 500 mm	...	continental
De 0 à 15°C	> 20°C	< 250 mm	...	désertique froid
< 0°C	polaire

3.3 Classification de la sévérité selon l'indice d'écart type

Cette classification permet de grouper les différentes périodes de temps qui suivent la loi normale en sept classes : extrêmement humide, très humide, modérément humide, normale, sécheresse modérée, sécheresse sévère et sécheresse extrême sur la base de l'écart des précipitations par rapport à la moyenne. Ensuite, on peut déterminer les probabilités d'occurrence de chaque classe de sévérité. Cette classification est illustrée par le tableau suivant :

Tableau 5: Classification selon la sévérité

Classes	Seuils des classes de sévérité
<i>Extrêmement humide</i>	$P_i > P_m + 2\sigma$
<i>Très humide</i>	$P_m + \sigma < P_i < P_m + 2\sigma$
<i>Humide</i>	$L_s < P_i < P_m + \sigma$
<i>Normale</i>	$L_i < P_i < L_s$
<i>Sècheresse modérée</i>	$P_m - \sigma < P_i < L_i$
<i>Sècheresse sévère</i>	$P_m - 2\sigma < P_i < P_m - \sigma$
<i>Sècheresse extrême</i>	$P_i < P_m - 2\sigma$

Avec :

P_i : Pluviométrie de la période i

P_m : Pluviométrie moyenne

σ : Ecart type

L_i : Limite inférieure de l'intervalle de confiance

L_s : Limite supérieure de l'intervalle de confiance

Sur la base des seuils pluviométriques indiquant les différentes classes de sévérité, on peut déterminer les seuils correspondants pour les trois indices suivants : le rapport à la normale des précipitations (R_n), l'indice d'écart en pourcentage de la normale (E_n) et l'indice de déficit climatique (IDC). [5]

Tableau 6 : tableau résumant les formules de calcul de ces trois indices :

Indice	Légende
<p><i>Le rapport à la normale des précipitations</i></p> $RN = (Pi/Pm) / 100$	<p><i>Pi : Précipitation actuelle</i></p> <p><i>Pm : Précipitation moyenne</i></p>
<p><i>L'indice d'écart de la normale</i></p> $En = (Pi - Pm) / Pm * 100$	<p><i>Pi : Précipitation actuelle</i></p> <p><i>Pm : Précipitation moyenne</i></p>
<p><i>L'indice de déficit climatique</i></p> $IDC = (Pi - ETPi) / ETPi * 100$	<p><i>Pi : Précipitation actuelle</i></p> <p><i>ETPi : ETP actuelle</i></p>

3.4 Indice de l'écart à la moyenne (Em)

C'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la médiane est le plus utilisé par les agro météorologues : quand l'échantillon de données est dissymétrique, la différence entre la moyenne et la médiane est grande. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (Pi) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (Pm).

$$Em = Pi - Pm$$

L'écart est positif pour les années humides et négatif pour les années sèches. On parle d'année déficitaire quand la pluie est inférieure à la moyenne et d'année excédentaire quand la moyenne est dépassée. Cet indice permet de visualiser et de déterminer le nombre d'années déficitaires et leur succession.

4. CAUSES

La cause sous-jacente de la sécheresse est le changement climatique. Les effets de la sécheresse sont exacerbés par les activités humaines telles que la déforestation, le surpâturage et les méthodes de culture rudimentaire, qui réduisent la rétention d'eau du

sol, et par les techniques inadéquates de conservation des sols, qui engendrent la dégradation de ces derniers.

➤ **Les principaux facteurs de risques sont**

- Climat aride
- Sol et végétation aride
- Fortes pluies

➤ **Les forces motrices sont :** Déforestation, Facteurs climatiques et météorologiques.

Seules les causes météorologiques et climatologiques sont traitées ci-dessous.

4.1 Cause météorologique

Frappant essentiellement le Sud du pays, où la sécheresse est récurrente, mais également d'autres régions du pays de façon périodique, La sécheresse à Madagascar relève de deux origines :

L'origine météorologique, par l'insuffisance de pluie et l'origine hydrologique par l'insuffisance des ressources en eau.

La pression atmosphérique et le vent sont pour une part non négligeable à la base du déficit pluviométrique dans le Sud de Madagascar. L'effet du premier paramètre se manifeste par ses valeurs élevées et ce, de façon quasi permanente toute l'année. Le second, quand à lui, est fonction du premier. L'analyse synoptique utilisant la pression atmosphérique comme paramètre essentiel conduit à l'élaboration de structures auxquelles correspondent des types de temps bien définis.

En bref, l'orographie qui détermine la pluviosité est très prononcée dans le Sud du pays à l'exception de Fort-Dauphin, ce qui permet de comprendre par ailleurs le déficit ou l'insuffisance de la pluviométrie.

4.2 Cause climatologique

La variabilité naturelle du climat liée au cycle solaire et l'activité humaine prédisposent la région à un déficit pluviométrique. L'insolation ne constitue pourtant pas un facteur limitant dans la zone. Sa durée moyenne journalière peut atteindre 9-13 heures

.L'importance de cette durée d'insolation réside dans le fait que sa connaissance est capitale dans l'étude du rayonnement global. On rappelle l'influence directe de cette dernière dans le développement des processus physiques se déroulant dans l'atmosphère. Un autre aspect expliquant ce déficit serait l'émission de gaz à effet de serre ayant pour conséquence un réchauffement planétaire. Les changements climatiques attribuables à l'activité humaine constituent un fait majeur qu'il importe de considérer également. La pratique de la méthode ancienne d'agriculture telle la pratique de la « Tavy » et la culture sur brulis prennent part dans le mécanisme de sécheresse. Ces raisons mettent en jeu l'élément radiatif d'une part et les couvertures végétales d'autre part. [2]

D'autres composantes climatologiques mises en jeu qui interviennent dans l'interaction Sol-atmosphère sont détaillées ci-après.

5. L'INTERACTION SOL – ATMOSPHERE

Le but du présent chapitre est de donner le rôle de certains paramètres simulés par le modèle climatique RegCM4 pour montrer à quel point ils sont importants pour l'étude de la sécheresse

5.1 Sensibilité du Sud au couplage sol – atmosphère

L'influence des océans sur les phénomènes météorologiques est depuis longtemps bien connue. Entre autres paramètres, on sait que la température de surface des océans (SST) joue un rôle clé dans la naissance de nombreuses anomalies climatiques, particulièrement dans certaines régions du globe (« hot-spots ») où l'atmosphère réagit plus fortement qu'ailleurs à un changement d'états de la surface de la mer : c'est le cas par exemple du Pacifique équatorial d'où El Nino prend sa source. En plus, la SST figure dans les résultats de la simulation avec RegCM4 [Fichier 4, 5,6]. Pour les phénomènes de couplage entre sol et atmosphère, il existe de la même façon de tels « hot-spots », que le programme GLACE a contribué à identifier [6].L'identification de ces « hot-spots », pourrait grandement faciliter l'élaboration de prévisions météorologique. L'état des sols est en effet une donnée prédictible relativement longtemps à l'avance, et si l'on parvient à déterminer de façon systématique son interaction avec les conditions atmosphériques, on améliorerait nettement la fiabilité des prévisions dans ces régions. [6]

Quelques éléments du raisonnement des équipes du programme GLACE :

Dans les climats humides, le sol contient de grandes quantités d'eau et l'évaporation n'est pas contrôlée par l'humidité du sol mais par l'énergie radiative nette. Le régime des précipitations ne dépend par conséquent pas de cette humidité.

Pour les climats trop secs, l'évaporation dépend largement de l'humidité des sols, mais elle est en outre limitée, et on peut intuitivement supposer que ses conséquences sur le régime local des précipitations sont minimales. Dans tous les cas, l'atmosphère dans de tels climats ne connaît que rarement de forts épisodes pluvieux. On conclut donc que là où le couplage sol-atmosphère, notamment au travers de l'influence de l'humidité des sols, est un phénomène prépondérant, on observe des régions de transition entre climats humides et secs. Il faut une évaporation suffisamment abondante pour agir sur les précipitations mais suffisamment faible pour être contrôlée par l'humidité du sol.

5.2 Quelques éléments sur le couplage sol – atmosphère

De nombreux éléments sont à prendre en compte lorsque l'on s'intéresse aux phénomènes de couplage entre le sol et l'atmosphère. On se limite ici à des généralités sur quelques uns d'entre eux. Par ailleurs, les résultats ci-dessous sont parfois issus de simulations numériques, et parfois d'observations.[6]

5.2.1 Couverture végétale et humidité du sol

Définition de l'albédo d'une surface : rapport entre l'énergie solaire renvoyée par la surface et l'énergie solaire qu'elle reçoit.

Si l'évapotranspiration est suffisante, une augmentation de l'albédo d'un sol revient à une diminution de l'absorption des radiations solaires par ce sol. Le transfert de chaleur latente à l'atmosphère par réémission est par suite moins important et la nébulosité réduite. La réduction de la couverture nuageuse tend alors à compenser l'augmentation d'albédo en augmentant l'exposition du sol aux radiations solaires mais elle réduit d'autant plus l'émission de radiation de grandes longueurs d'ondes, à tel point que l'absorption nette de radiations (solaires + grandes longueurs d'ondes) est finalement moins importante. La diminution de l'absorption de ces radiations par le sol conduit à une réduction du réchauffement radiatif de l'air et par suite à une diminution de la nébulosité et des précipitations. Si l'évapotranspiration est faible, la quantité de nuages est beaucoup plus faible, et la diminution de l'absorption des radiations solaires par le sol conduit directement à une réduction du réchauffement de l'atmosphère via réémission de chaleur contenue dans le sol. Dans des régions comme la plupart dans le Sud (Toliara, Taolagnaro) où le sol est

généralement sableux, sec et léger, une diminution de couverture végétale va conduire à une augmentation d'albédo, une réduction des précipitations et donc une aggravation de la diminution de la couverture végétale. Dans des climats à tendance aride chaud comme Tuléar par exemple [3], l'évapotranspiration est de façon presque permanente supérieure aux précipitations. Il y a donc un assèchement très rapide de la réserve en eau des sols entre deux évènements pluvieux. Toute baisse de la précipitation a donc un impact immédiat et prononcé sur le cycle hydrologique continental. Plusieurs études ont montré que l'humidité du sol agit comme un filtre passe-bas, en retardant et prolongeant les effets d'une sécheresse. En effet, plus un sol est humide, plus sa capacité à renvoyer de l'eau vers l'atmosphère est grande. La présence d'eau dans les sols augmente donc localement les précipitations. En période de sécheresse, les sols compensent dans un premier temps le défaut de précipitations. Une fois la réserve épuisée, ils n'ont plus aucune action sur ces dernières.

5.2.2 La poussière

Le Sud poussiéreux de Madagascar a toujours été une région aride, sans être parfaitement comprise, et où l'influence de la poussière sur les précipitations a été établie. Les données de l'aérosol faisaient parties des données simulées par RegCM4, y compris la poussière. Pourquoi ce paramètre n'est pas à négliger ? La poussière disperse et absorbe les radiations solaires et modifie la nature des nuages, rompant ainsi les équilibres énergétiques dans l'atmosphère et à la surface du sol. Des expériences conduites au Niger (ECLATS expriment) ont par ailleurs montré que la présence de poussière dans l'air joue un rôle sur les températures. Notons à nouveau que les phénomènes décrits ci-dessus ne sont pas à l'origine de la sécheresse mais qu'ils agissent en renforçant les conditions existantes, induites par des phénomènes de plus grande échelle.

6. L'IMPACT DE LA SECHERESSE

La sécheresse a de profonds retentissements. Elle affecte nos vies en exerçant des contraintes sur l'approvisionnement en eau, en dégradant l'environnement et la santé humaine par la mauvaise qualité de l'eau, en intensifiant l'érosion du sol et en portant préjudice à l'économie du fait de la réduction de la capacité de production agricole.

Madagascar est un pays en développement. De multiples activités nuisent à l'environnement et génèrent des effets sur l'économie, la santé, etc. Ce paragraphe nous montre l'importance de l'étude de la sécheresse et à plus forte raison de sa prévision.

☞ Changement climatique

Le changement climatique est un exemple plus concret, qui met en cause la sécheresse et des effets plus importants concernant la dégradation de l'environnement.

- ❖ Il a des effets sur l'environnement physique avec augmentation de la température ambiante, des cataclysmes naturels plus fréquents et plus violents, changement du faciès épidémiologique des maladies vectorielles, changement des calendriers culturels,
- ❖ Pour la santé : risque de recrudescence du paludisme, de la dengue, du chikungunya, de la grippe, malnutrition.
- ❖ Concernant l'économie : réduction des produits agricoles, élévation du taux de pauvreté,

Tableau 7 : Proportion de ménages ayant été touchés par des problèmes liés au climat ou à l'environnement, par province, en milieu rural (Unité : %)

	Anta/rivo	Fiana/tsoa	Toamasina	Mahajanga	Toliara	Antsi/na	
Sécheresse	4,6	22,3	2,6	4,0	35,8	0,0	12,6
Pluie tardive	4,2	12,5	0,0	8,3	18,8	13,2	8,1
Autres problèmes de climat	14,0	17,2	0,0	2,8	0,0	0,0	7,6

Source : INSTAT/EPM 2005

Tableau 8 : Proportion de ménages ayant subi certaines conséquences des problèmes de climat (Unité : %.)

	Anta/riv o	Fia/tso a	Toa/sin a	Mah/ng a	Toliar a	Ants/an a	Ensembl e
Perte de bien	13,7	14,9	14,4	20,2	28,3	31,7	19,5
Diminution de revenu	49,8	58	51,5	44	58,3	38,3	53,2
Réduction de la consommation	69,6	70,8	65,4	75,0	82,1	48,3	72,4
Consommation de produit moins nutritif	49,8	53,0	48,5	58,7	60,6	35,1	53,7

Source : INSTAT/EPM 2005. Institut National de la Statistique, Enquête périodique auprès des ménages, 2005

**PARTIE II. LE MODELE CLIMATIQUE
REGIONAL RegCM4**

CHAPITRE III. DESCRIPTION DU MODELE

1. INTRODUCTION

Notons qu'ici toutes les références bibliographiques qui sont mises entre parenthèse () sont listées dans le guide d'utilisateur ou dans le site web officiel de RegCM4 [7]: eforge.escience-lab.org/gf/.../6/.../UserGuide.pdf et les détails d'instruction sont disponibles sur <http://eforge.escience-lab.org/gf/project/regcm/wiki/>

Avant d'entrer en détail, nous allons donner un bref historique du modèle régional de climat RegCM4

La première génération NCAR a été conçue à partir du modèle à méso-échelle version MM4 du « National Center for Atmospheric Research-Pennsylvania State University »(NCAR - PSU). Cependant, pour adapter MM4 aux simulations du climat à long terme, plusieurs paramétrisations physiques sont remplacées, principalement dans les domaines du transfert radiatif et de processus physique de la surface terrestre qui ont conduit à la première génération du RegCM. Le « Biosphere-Atmosphère Transfer Scheme »(BATS)(Dickinson et al. 1986) pour la représentation des processus en surface, le schéma de transfert radiatif de NCAR « CommunityClimate Model » version CCM1, une résolution moyenne du schéma de couche limite planétaire locale, le schéma de convection du cumulus de type Kuo de (Anthes 1977) et de schéma de l'humidité explicite sont incorporés dans la première génération du RegCM.

Une première amélioration majeure des schémas du paramètre physique et des schémas numériques a abouti à la seconde génération du modèle RegCM3 (RegCM2). Les parties physiques de RegCM2 ont été basées sur celles du NCAR CCM2 et le noyau dynamique a été intégré dans la version hydrostatique du modèle méso-échelle MM5 ; on a aussi remplacé le schéma de traitement de processus en surface BATS1a par BATS1e. Une version intermédiaire, RegCM2.5 a été développée et qui inclut plusieurs améliorations telles que le schéma de transfert radiatif de CCM3, le schéma de convection de (Zhang et McFarlane 1995), une version simplifiée de nuage explicite de (Hsie et al.1984) et du schéma de précipitation (SIMEX) de (Giorgi and Shields 1999), et un simple modèle des aérosols interactifs (Qian and Giorgi 1999). RegCM3 est une intégration des améliorations principales apportées à RegCM2.5 depuis la description de (Giorgi and Mearns 1999). Ces améliorations

portent sur la représentation des physiques de précipitation, physique de surface, chimie de l'atmosphère et des aérosols, les champs d'entrées du modèle, d'exécution et des postes de traitement du modèle.

Depuis la sortie de RegCM3 décrite par Pal et al. [2007], le modèle a connu une évolution importante en termes de code du logiciel et des représentations de physiques, ce qui a conduit au développement d'une quatrième version du modèle, RegCM4, publiée par le CIPT en Juin 2010 comme une version prototype (RegCM4.0) et en Mai 2011 comme une première version complète (RegCM4.1). Le but de ce manuel est de fournir une référence de base pour RegCM4, en description du modèle, en accent spécial aux améliorations récemment présentées. Le modèle peut être interactivement couplé à un modèle du lac 1D, un schéma simplifié d'aérosol (CO y compris, BC, SO₄, poussière et particule d'eau de mer) et un modèle de chimie de phase gazeuse (CBM-z). De façon générale, le RegCM est disponible sur le World Wide Web dans le groupe de Democritos Italie CNR à :

<https://eforge.science-lab.org/gf/project/regcm>

La paramétrisation de type mosaïque de sous grille mesure l'utilisation de la terre [Giorgi et autres 2003], et permet une résolution extérieure plus fine dans la version 1e de BATS1e (schéma de transfert de Biosphère-Atmosphère).

1.1. Discrétisation verticale et horizontale

Dans un premier temps il convient d'introduire la configuration de la grille du modèle. Le système modélisé obtient et analyse ses données généralement sur les surfaces isobariques (coordonnée pression), mais où doit interpoler à la coordonnée verticale du modèle avant d'entrer au modèle. Une coordonnée sigma(σ) sans dimension est utilisée pour définir les niveaux du modèle.

$$\sigma = (p - p_t) / (p_s - p_t) \quad (1)$$

Où p est la pression, p_s est une constante spécifiée de pression au sommet et p_t est la pression à la surface.

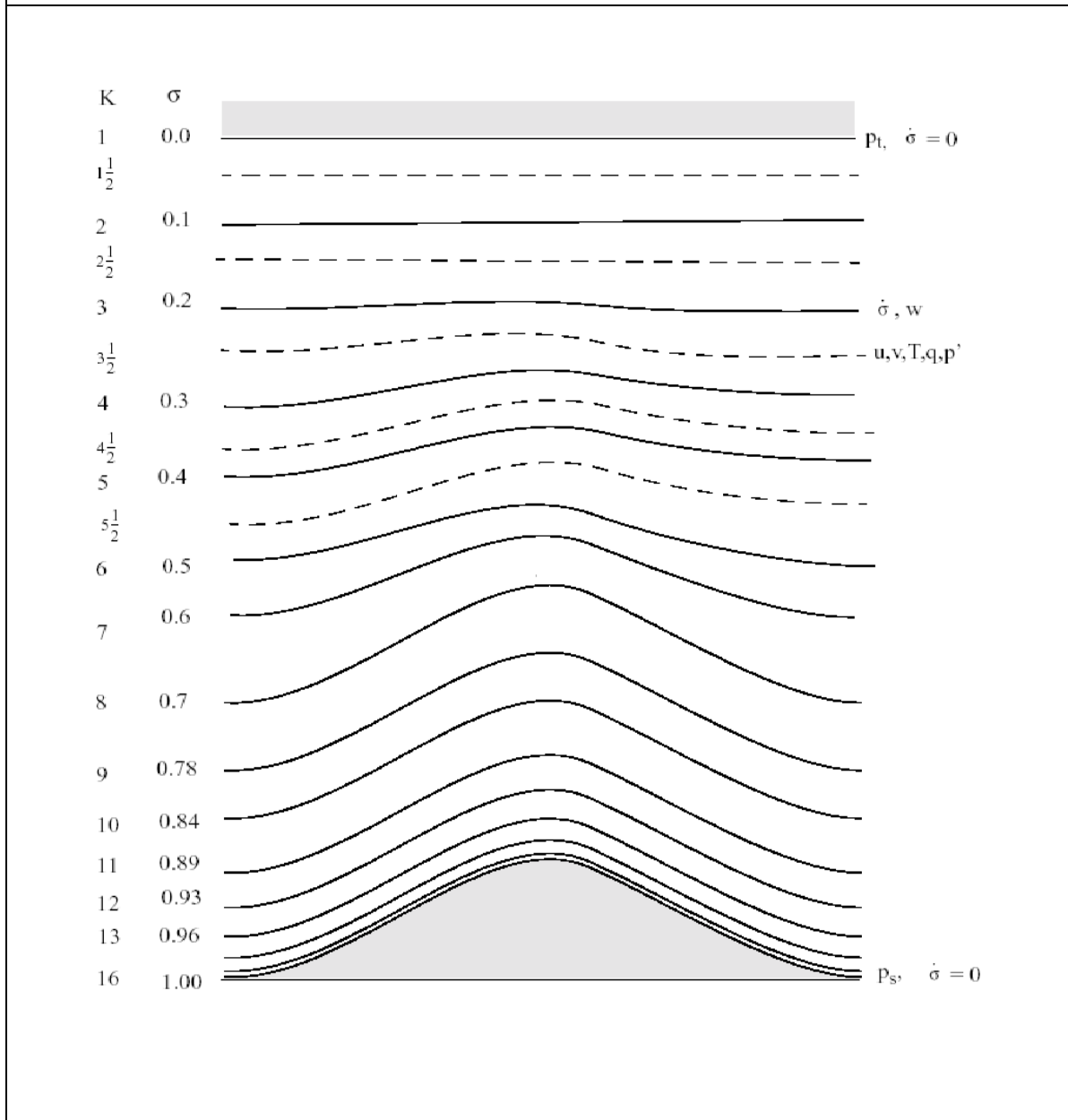
On peut trouver d'après l'équation (1) et la figure 4 que σ est 0 au sommet et 1 à la surface, et chaque niveau du modèle est défini par une liste de valeurs entre 0 et 1, et qui n'a pas besoin d'être espacée uniformément. Communément la résolution dans la couche

limite est plus fine que celle du dessus, et le nombre de niveau peut varier sur la demande de l'utilisateur.

La représentation horizontale des champs discrets se fait sur une grille décalée (« staggered ») de type B d' Arakawa-Lamb des variables de vitesse selon les variables scalaires, Présentées à la figure 5, on constate que les variables scalaires (T, q (humidités), p, etc.) sont définies au centre, tandis que les composantes u et v du vent sont situées aux frontières. La vitesse horizontale est définie aux points gras et les autres variables sont définies sur les croix(x). Les données sont entrées dans le modèle, et les processus de prétraitement font l'interpolation nécessaire pour assurer la consistance avec la grille.

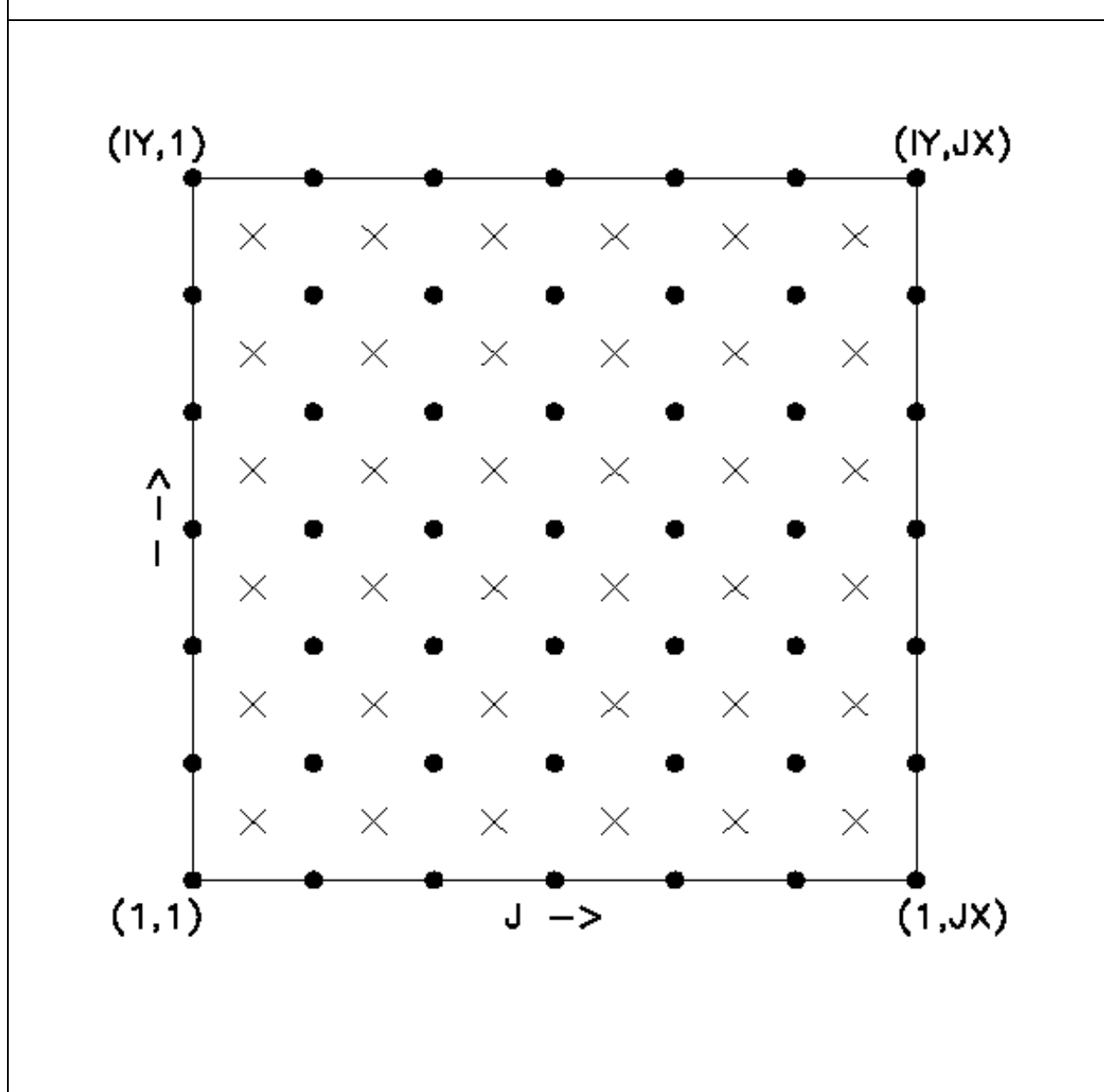
Toutes les variables citées ci-dessus sont définies dans le milieu de chaque couche verticale du modèle, connu sous le nom de « demi-niveau » et représentées par les lignes en tirets dans la figure 5 tandis que la vitesse verticale est portée aux niveaux pleins (lignes pleines). Dans la définition des niveaux sigma, ce sont les niveau pleins qui sont listés ; en incluant le niveau 1. Par conséquent, le nombre des couches du modèle est toujours moins un par rapport aux niveaux sigma.

Figure 4 : coordonnées sigma



Représentation schématique de la structure verticale du modèle. Les lignes en tirets représentent les niveaux sigma, les lignes pleines représentent les niveaux sigma pleins.

Figure 5: repère horizontal utilisée par reqcm



Représentation schématique de la grille décalée de type B d'Arakawa. Les vents horizontaux sont définis sur les points gras et les croix (x) représentent les variables scalaires (La température, l'humidité et les champs de pression)

1.2. Projection de carte

Le modèle utilise quatre choix de projection de carte :

- ✚ Projection conforme de Lambert, convenable pour les latitudes moyennes
- ✚ Projection stéréographique polaire pour les hautes latitudes
- ✚ Projection normale de Mercator pour les basses latitudes
- ✚ Projection rotative de Mercator pour un choix spécial

Les directions x et y dans le modèle ne correspondent pas aux directions Ouest-Est et Nord-Sud sauf pour la projection normale de Mercator. Le vent observé subit une rotation par rapport à la grille du modèle : les composantes u et v du modèle ont besoin d'être inversé avant la comparaison avec des observations. Ces transformations sont prises en compte dans les processus de prétraitement et dans les processus post-traitement qui fournissent les données sur la grille du modèle, et dans les processus post- traitement.

Le facteur d'échelle de la carte m est défini par

$$m = (\text{distance on grid}) / (\text{actual distance on earth})$$

Sa valeur est généralement voisine de l'unité, et variable avec la latitude. Les modèle conservent la formes des petites aires, de sorte que $dx=dy$ partout, mais la longueur de la grille varie à travers le domaine pour permettre en représentation d'une surface sphérique sur une surface plane. Les facteurs d'échelle de la carte ont besoin d'être pris en compte dans les équations du modèle où les gradients horizontaux sont utilisés.

2. PARAMETRISATION DU MODELE

2.1. Formulation dynamique

2.1.1 Equation horizontale du mouvement

Les équations dynamiques du modèle et la discrétisation numérique sont décrites par (Grel et al.1994).

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* uv/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* u \sigma}{\partial \sigma}$$

$$-mp^* \left[\frac{RT_v}{(p^*+p_t/\sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + fp^*v + F_Hu + F_vu \quad (2)$$

$$\frac{\partial p^*v}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^*uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^*vv/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^*v\dot{\sigma}}{\partial \sigma}$$

$$-mp^* \left[\frac{RT_v}{(p^*+p_t/\sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + fp^*u + F_Hv + F_vv \quad (3)$$

où u et v sont les composantes zonales et méridionales de la vitesse du vent, T_v est la température virtuelle, ϕ est la hauteur géopotentielle, f est le paramètre de Coriolis, R est la constante des gaz pour l'air sec, m est le facteur d'échelle de la carte pour les différentes projection stéréographique polaire, Lambert ou Mercator ;

$\dot{\sigma} = ds/dt$, F_H et F_v représentent les effets de la diffusion horizontale et verticale ;

et $p^* = p_s - p_t$.

2.1.2 Equations de continuité et de $\dot{\sigma}$

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^*u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^*v/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^*\dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (4)$$

L'intégrale verticale de l'équation (4) est utilisée pour calculer la variation temporelle de la pression en surface dans le modèle,

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \int_0^1 \left(\frac{\partial p^*u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^*v/m}{\partial y} \right) d\sigma \quad (5)$$

Après le calcul de la tendance de pression en surface, la vitesse verticale dans les coordonnées sigma est calculée à chaque niveau dans le modèle d'après l'intégrale verticale de l'équation (4)

$$\dot{\sigma} = -\frac{1}{p^*} \int_0^\sigma \left[\frac{\partial p^*}{\partial t} + m^2 \left(\frac{\partial p^*u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^*v/m}{\partial y} \right) \right] d\sigma' \quad (6)$$

où σ' est une variable auxiliaire d'intégration et $\sigma'(\sigma = 0) = 0$

2.1.3 Equation thermodynamique et equation pour ω

L'équation thermodynamique s'écrit comme suit

$$\frac{\partial p^*T}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^*uT/m}{\partial x} + \frac{\partial p^*vT/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^*T\dot{\sigma}}{\partial \sigma}$$

$$+ \frac{RT_v \omega}{C_{pm}(\sigma + p_t/p^*)} + \frac{p^* Q}{C_{pm}} + \frac{\partial \phi}{\partial x} + F_H T + F_v T \quad (7)$$

où C_p est la chaleur spécifique pour l'air humide à pression constante, V est le chauffage adiabatique, F_H représente l'effet de la diffusion horizontale, F_v représente l'effet de mélange vertical et l'ajustement convectif sec, et ω s'écrit

$$\omega = p^* \dot{\sigma} + \sigma \frac{dp^*}{dt} \quad (8)$$

où

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial p^*}{\partial t} + m \left(u \frac{\partial p^*}{\partial x} + v \frac{\partial p^*}{\partial y} \right) \quad (9)$$

L'expression pour, où $C_{pm} = C_p(1 + 0.8q_v)$, avec C_p est la chaleur spécifique à pression constante pour l'air sec et q_v est le rapport de mélange pour le vapeur d'eau.

2.1.4 Equation hydrostatique

L'équation hydrostatique est utilisée pour calculer les hauteurs géopotentielles à partir de la température virtuelle,

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln(\sigma + p_t/p^*)} = -RT_v \left[1 + \frac{q_c + q_r}{1 + q_v} \right]^{-1} \quad (10)$$

$T_v = T(1 + 0.608q_v)$, q_v , q_c et q_r sont le rapport de mélange de vapeur d'eau, le contenu en eau de nuage : liquide ou glace et le contenu en eau précipitée : eau de pluie ou neige.

2.2. Paramétrisations physiques

2.2.1 Schéma radiatif

RegCM4 incorpore le schéma de transfert radiatif du modèle CCM3 du NCAR, qui est décrit dans (Kiel et al.1996). La composante solaire qui prend en compte les effets des O₃ de H₂O, de Co₂ et de O₂ suit brièvement l'approximation Eddington de (Kiehl et al ; 1996). Elle incorpore 18 intervalles spectraux de 0.2 à 5µm. La dispersion et la paramétrisation d'absorption et de diffusion de nuages suivent celle de (Slingo 1989), par laquelle les propriétés optiques des gouttelettes de nuages (atténuation de l'épaisseur optique, simple dispersion de l'albédo, et paramètre asymétrique) sont exprimées en termes de contenu en eau liquide de nuage et en rayon des gouttelettes effectives. Quand les nuages cumuliformes se sont formés, la fraction de couverture nuageuse du point de grille,

telle que la couverture totale pour la colonne s'étendant du niveau de la base au niveau du sommet de nuages calculé par le modèle (calculé en supposant le chevauchement aléatoire), est une fonction de l'espacement du point de grille horizontale. L'épaisseur de couche de nuages est supposée égale à celle de la couche du modèle, et un contenu en eau de nuages différent est spécifié pour les nuages bas et moyens.

2.2.2 *Modèle de surface terrestre*

Les processus physiques de surface sont performés en utilisant BATS1e (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) qui est un paquetage des processus de surface désigné pour décrire le rôle interactif de la végétation et de l'humidité du sol par modification des échanges de mouvement, surface-atmosphère, d'énergie et de vapeur d'eau. Le modèle est constitué par une couche de végétation, une couche de neige, une couche de sol en surface : 10cm d'épaisseur ou une couche de zone de racine : 1 à 2m d'épaisseur, et une troisième couche de sol profond de 3m d'épaisseur. Les équations pronostiques sont résolues pour les températures des couches de sol en utilisant une généralisation de la méthode de type relaxation ou « force restore » proposée par (Deardoff 1978). Les calculs de l'hydrologie du sol incluent les équations de prévision pour le contenu en eau des couches du sol. Ces équations prennent en compte les précipitations, la fonte de neige, le ruissèlement au niveau du feuillage, l'évapotranspiration, le ruissèlement en surface, l'infiltration sous la zone des racines et l'échange diffus de l'eau entre les couches du sol. La formulation du mouvement de l'eau du sol est obtenue à partir d'un ajustement aux résultats d'un modèle de sol à haute résolution, les taux de ruissèlement en surface sont exprimés comme fonctions des taux de précipitations et du degré de la saturation en eau du sol. L'épaisseur de la neige est pronostiquement estimée à partir de la chute de neige, de la fonte de neige et de la sublimation de la neige. On suppose que la précipitation tombe sous forme de neige et la température du plus bas niveau du modèle est en dessous de 271°K.

Les flux de chaleur sensible, de vapeur d'eau et de mouvement à la surface sont calculés en utilisant une formulation standard du coefficient de frottement à la surface basée sur la théorie de la similitude pour la couche de surface. Le coefficient de frottement dépend de la longueur de rugosité et de la stabilité atmosphérique dans la couche de surface. Les taux d'évapotranspiration en surface dépendent de la disponibilité en eau du sol. BATS contient 20 types de végétation (voir tableau 27 en annexe) ; les textures du sol sont rangées du

grossier jusqu'au sol fin, et différentes couleurs du sol (du clair jusqu'au sombre) sont adoptées pour les calculs de l'albédo du sol. Pour la description détaillée de BATS, on se réfère aux travaux de (Dickinson et al.1986)

Dans la dernière version de sortie, des modifications additionnelles ont été faites aux BATS afin d'expliquer la variabilité « sous grille » de la topographie et la couverture du sol employant une approximation de type mosaïque [Giorgi et autres 2000].

Cette modification adopte une régulière surface d'échelle fine « sous grille » pour chaque cellule de grille du modèle brute. Des variables météorologiques sont désagrégées de la grille brute à la grille fine basée sur les différences d'altitude. Les calculs de BATS sont alors exécutés séparément pour chaque cellule de sous grille, et les flux de surface sont ré-agrégés sur la cellule brute de grille pour l'entrée du modèle atmosphérique. Cette paramétrisation a montré une amélioration marquée dans la représentation du cycle hydrologique en surface dans des régions montagneuses [Giorgi et autres 2000]. Dans la version 4 (RegCM4) de modèle de climat de Régional deux nouveaux types d'utilisation de la terre ont été ajoutés aux BATS pour représenter les environnements urbains et suburbains. Le développement urbain modifie non seulement l'albédo extérieur et change le bilan énergétique extérieur, mais crée également les surfaces imperméables avec de grands effets sur l'écoulement et l'évapotranspiration. Ces effets peuvent être décrits en modifiant les propriétés appropriées de la surface de terre saisies aux paquets de BATS, tels que la couverture de végétation, la longueur de rugosité, l'albédo, et les caractéristiques maximum de sol.

À cette fin, nous avons mis en application les paramètres proposés dans le tableau 1 de Kueppers et autres. [2008]. CLM (facultatif) : Community Land Model (CLM; Oleson et autres. [2008]) est le modèle de surface de terre développé par le Centre National de la Recherche Atmosphérique (NCAR) en tant qu'élément du modèle de système de climat de la Communauté (CCSM) : Community Climate System Model, décrit en détail dans Collins et autres. [2006]. La version 3,5 de CLM a été couplée à RegCM pour une option plus détaillée de description de surface de terre. Le CLM contient cinq couches possibles de neige avec une représentation additionnelle de neige de trace et dix couches inégalement espacées de sol avec les solutions explicites de la température, de l'eau liquide et de la glace arrosent dans chaque couche. Pour expliquer la complexité extérieure de la terre dans une cellule de grille

de modèle de climat, CLM ou l'approche mosaïque pour capturer l'hétérogénéité de la surface ont été utilisées. Chaque cellule de grille de CLM contient jusqu'à quatre types différents de couverture de terre (le glacier, terre humide, lac, et végétation), où la fraction de végétation peut être encore divisée en 17 types fonctionnels d'usine différente. Des équations hydrologiques et de bilan énergétique sont résolus pour chaque type de couverture de terre et agrégées de nouveau au niveau de cellules de grille. Une discussion détaillée de la version 3 de CLM mise en application dans RegCM3 et l'analyse comparative des options de paramétrisation de surface de terre est présentée par Steiner et autres. [2009]. Puisque le CLM a été développé pour l'échelle globale, plusieurs dossiers et processus d'entrée ont été modifiés pour le rendre plus approprié pour des simulations régionales, y compris (1) l'utilisation des données d'entrée de haute résolution, (2) l'initialisation d'humidité de sol, et (3) un traitement amélioré des cellules de grille le long des littoraux. Pour les données d'entrée du modèle, le CLM exige plusieurs paramètres extérieurs d'entrée : la couleur du sol, la texture de sol, le pourcentage de couverture de chaque type de surface de la terre, les indices de feuille et de secteur de tige, la fraction maximale de saturation, et la fraction de terre [Laurent et Chasse 2007]. Le tableau 33 montre la résolution pour chaque paramètre d'entrée utilisé à la balance régionale dans RegCM-CLM comparée aux résolutions typiquement utilisées pour des simulations globales. La résolution des paramètres d'entrée extérieurs a été augmentée par l'hétérogénéité de surface en interpolant la grille régionale de climat. Semblable à Laurent et à Chasse [2007], le nombre de couleurs de sol était prolongé de 8 à 20 classes pour résoudre des variations régionales. La deuxième modification devait mettre à jour l'initialisation d'humidité de sol basée sur une moyenne climatologique d'humidité de sol [Giorgi et Confits 1989] au-dessus de l'utilisation du contenu d'humidité constant de sol dans toute la grille généralement utilisée pour le CLM global. La troisième modification au CLM est l'inclusion d'une approche mosaïque pour les cellules de grille qui contiennent les types extérieurs de terre et d'océan.

Avec cette approche, une moyenne des variables extérieures a été calculée pour des cellules de grille de land/ocean en utilisant l'ensemble de données d'entrée de fraction de terre. Cette méthode fournit une meilleure représentation des littoraux en utilisant les données à haute résolution de fraction de terre décrites dans le tableau 33 pour une description plus détaillée de la physique de CLM (Oleson [2004]).

2.2.3 Schéma de la couche limite planétaire

Le schéma de la couche limite planétaire (Planetary Boundary Layer : PBL) développé par (Holtslag et al. 1990), est basé sur un concept de diffusion non local qui prend en considération les flux de transport résultant des turbulences de grande échelle dans une atmosphère instable bien mélangée. Le flux turbulent vertical à l'intérieur de PBL est donné par

$$F_c = -K_c \left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) \quad (11)$$

où γ_c est un terme décrivant le transport non local dû à la convection profonde sèche. La diffusivité turbulente est donnée par les formulations non locales

$$K_c = k w_t z \left(1 - \frac{z^2}{h} \right) \quad (12)$$

où k est la constante de Von Karman ; w_t est le vent convective turbulente qui dépend de la vitesse du frottement, de la hauteur et de la longueur d'échelle de Monin-Obhukov ; et h est la hauteur de PBL. Le terme de transport pour la température et la vapeur d'eau est donné par

$$\gamma_c = C \frac{\vartheta_c^0}{w_t h} \quad (13)$$

où C est une constante égale à 8.5 et ϑ_c^0 est la température en surface ou le flux de vapeur d'eau. L'équation (13) est appliquée entre le sommet de PBL (couche limite planétaire) et le sommet de la couche de surface, qui est supposée être égale à $0.1h$. En dehors de cette région et pour le mouvement, il est supposé être égal à 0.

Pour le calcul de la diffusivité turbulente et les termes de transport, la hauteur de PBL est calculée par

$$h = \frac{Ri_c r [u(h)^2 + v(h)^2]}{(g/\theta_v) [\theta_v(h) - \theta_s]} \quad (14)$$

où $u(h)$, $v(h)$ et θ_v sont les composantes du vent et θ_v la température potentielle virtuelle à la hauteur de PBL, g est la gravité, $Ri_c r$ est le nombre de Richardson, et θ_s une température appropriée de la région près de la surface. Pour une description plus détaillée, se référer aux travaux de « Holtslag et al. 1990 » et « Holtslag et Boville 1993 ». Comparé à d'autre, cette

formulation tend à produire le transfert vertical relativement fort, et souvent excessif, turbulent. Par exemple, après l'essai, il a été trouvé que l'excès de transfert vertical excessif de l'humidité dans le modèle aura pour résultat des montants de faible humidité près de la surface et de l'humidité excessive près du dessus de PBL. Par conséquent afin d'améliorer le résultat, la limite de transport pour la vapeur d'eau a été enlevée dans RegCM4. Un autre problème du schéma de Holtslag (au moins dans notre exécution) est un transport vertical excessif de la chaleur, de l'humidité en conditions très stables, comme pendant l'hiver dans des régions élevées de latitude d'hémisphère nordique. Par exemple nous avons constaté qu'à de telles conditions le schéma ne simule pas des inversions de température de surface. Pour redresser ce problème, dans RegCM4 la modification suivante a été mis en application au schéma :

Nous définissons d'abord des conditions très stables dans la paramétrisation de Holtslag telles que le rapport de la taille de la surface au-dessus de la longueur de Monin-Obhukov est inférieur à 0,1.

Dans ces conditions, nous initialisons à zéro les limites de diffusivité et de compteur-gradient de remous pour toutes les variables.

Les essais préliminaires ont prouvé que cette modification réduit la polarisation chaude en hiver de latitude élevé et permet au modèle d'améliorer les inversions extérieures de capture. Ces modifications ont été ainsi incorporées comme défaut dans le code **RegCM4**.

Schémas de la précipitation convective :

La précipitation convective est calculée en utilisant l'un de trois schémas :

- ❖ Schéma de Grell (Grell 1993)
- ❖ Schéma de Kuo modifié (Anthes 1977)
- ❖ Schéma de Betts-Miller.

En plus, la paramétrisation de Grell est exécutée en utilisant l'une de deux conditions de fermeture :

- Fermeture d'Arakawa et Schubert (Grell et al. 1994)
- Fermeture de Fritsch et Chappell (Fritsch et Chappell 1980).

On les note respectivement dans tout ce qui suit par AS94 et FC80.

Schéma de Grell :

Le schéma de Grell (Grell 1993), similaire à la paramétrisation AS94 considère les nuages comme deux circulations d'état stable : un courant ascendant (ascendance) et un courant descendant (subsidence). Aucun mélange direct ne se produit entre l'air nuageux et l'air environnant sauf au sommet et au fond des circulations. Le flux de masse est constant avec la hauteur, et aucun entrainement ne se produit aux rebords des nuages. Les niveaux provenant de l'ascendance et de la subsidence sont donnés respectivement par les niveaux de l'énergie hydrostatique humide maximale et minimale. Le schéma de Grell est activé quand une parcelle soulevée atteint la convection humide. La condensation dans l'ascendance est calculée en soulevant une parcelle saturée. Le flux de masse de la subsidence (m_0) dépend du flux de masse de l'ascendance (m_b) d'après la relation suivante :

$$m_0 = \frac{\beta I_1}{I_2} m_b \quad (15)$$

où I_1 est la condensation de l'ascendance normalisée, I_2 l'évaporation de la subsidence normalisée et β la fraction de la condensation qui s'évapore dans la subsidence. β dépend du cisaillement du vent et varie typiquement entre 0.3 et 0.5. La chute de pluie est donnée par

$$P^{CU} = I_1 m_b (1 - \beta) \quad (16)$$

Le chauffage et l'humidification dans le schéma de Grell sont à la fois déterminés par les flux de masse. En outre, l'effet du refroidissement par baisse d'humidité est incorporé.

Grace à la nature simpliste du schéma de Grell, plusieurs fermetures peuvent être adoptées. La version par défaut de RegCM4 met en œuvre directement l'hypothèse quasi-équilibre d'AS94. On suppose que les nuages convectifs stabilisent l'environnement aussi vite que les processus non convectifs le déstabilisent comme suit :

$$m_b = \frac{ABE'' - ABE}{NA \Delta t} \quad (17)$$

Où ABE est l'énergie hydrostatique disponible pour la convection, ABE'' est la quantité d'énergie hydrostatique disponible pour la convection en plus de l'énergie hydrostatique produite par certains des processus non convectifs durant l'intervalle de temps Δt , et NA est

le taux de changement d'ABE par unité de m_b . La différence $ABE - ABE$ peut être prise comme le taux de déstabilisation sur le temps Δt . ABE'' est calculé à partir des champs de courants ; des tendances futures qui résultent de l'advection de chaleur et d'humidité ainsi que de l'adiabatique sèche.

Par défaut, une autre hypothèse de fermeture basée par stabilité du type FC80, qui est généralement mise en application dans MCG et MCR a été utilisée. Dans cette hypothèse, on suppose que la convection supprime l'ABE sur une échelle de temps donnée comme suit :

$$m_b = \frac{ABE}{NA\tau} \quad (18)$$

où τ est l'échelle de temps où l'ABE est supprimée.

La différence fondamentale entre les deux hypothèses est que la fermeture AS94 lie les flux convectifs et la chute de pluie aux tendances dans l'état de l'atmosphère, tandis que la fermeture FC80 lie les flux convectifs au degré d'instabilité dans l'atmosphère. Ces deux schémas accomplissent un équilibre statique entre la convection et les processus à grande échelle.

Schéma de Kuo :

L'activité convective dans le schéma de Kuo est initialisée quand la convergence d'humidité M dans une colonne dépasse un seuil donné et le sondage vertical convectivement instable. Une fraction de la convergence d'humidité β humidifie la colonne et le reste est converti en pluie P^{CU} d'après la relation suivante :

$$P^{CU} = M(1 - \beta) \quad (19)$$

β est une fonction de l'humidité relative moyenne \overline{RH} du sondage et s'écrit comme suit :

$$\beta = \begin{cases} 2(1 - \overline{RH}) & \overline{RH} \geq 0.5 \\ 1.0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (20)$$

Remarquons que le terme de convergence d'humidité incorpore seulement les tendances advectives pour la vapeur d'eau. Cependant, l'évapotranspiration au pas de temps précédent est indirectement incluse dans M puisqu'elle tend à humidifier la basse atmosphère. D'où, plus l'évapotranspiration augmente, plus elle est convertie en pluie en supposant que la colonne est instable. Le chauffage latent résultant de la condensation est

distribué entre le sommet et la base de nuage par une fonction qui alloue le chauffage maximal à la portion supérieure de la couche du nuage.

Schéma de MIT-Emanuel :

Des descriptions plus détaillées peuvent être trouvées dans Emanuel [1991], Emanuel et Zivkovic-Rothman [1999]. Le schéma suppose que le nuage de mélange est fortement épisodique et non homogène. La convection est déclenchée quand le niveau de la flottabilité neutre est plus grand que le niveau de base de nuage. Entre ces deux niveaux, l'air est soulevé et une fraction de l'humidité condensée forme la précipitation tandis que la fraction restante forme le nuage. On suppose que le nuage se mélange à l'air de l'environnement. Les taux de mélange d'entraînement du niveau de la flottabilité en nuages sont fonction des gradients verticaux. La fraction de tout le flux de la masse de la base de nuage qui se mélange à son environnement à chaque niveau est proportionnelle au taux de flottabilité qui change avec l'altitude. Le flux de masse ascendant du base de nuage est détendu vers le quasi équilibre de couche de nuage moyen. En plus d'une représentation plus physique de la convection, le schéma de MIT-Emanuel offre plusieurs avantages comparés aux options de convection du RegCM4. Par exemple, il inclut une formulation de l'autoconversion de l'eau de nuage en précipitation à l'intérieur des nuages de cumulus. Pour finir, le schéma de MIT-Emanuel considère le transport des traceurs passifs. Le schéma de MIT est le plus complexe des trois et inclut également un certain nombre de paramètres qui peuvent être employés pour optimiser l'exécution du modèle dans différents régimes de climat. Au contraire de schéma de Grell, les expériences d'essai n'ont pas identifié un paramètre simple auquel le modèle est le plus sensible. Un gain important dans RegCM4 comparé aux versions précédentes du modèle est la possibilité de couvrir différents schéma de convection au-dessus de terre et d'océan, une configuration à laquelle nous nous référons en tant que convection mélangée. Les expériences étendues d'essai ont prouvé que les différents schémas d'exécution de différentes régions est en particulier l'excédent de la terre contre des secteurs d'océan. Par exemple, le schéma de MIT tend à produire la précipitation excessive au-dessus des terres, particulièrement par l'occurrence de différents événements très intenses de précipitation. En d'autres termes, une fois que le schéma est activé, il lui devient difficile de ralentir. Réciproquement, nous avons constaté que le schéma de Grell tend à produire sur les océans tropicaux un excédent "excessivement faible" de précipitation. Ces essais préliminaires ont suggéré qu'une approche mélangée de

convection par laquelle, par exemple, le schéma de MIT employé au-dessus des océans et du schéma de Grell de la terre, pourrait être l'option la plus appropriée.

Schéma de Betts-Miller :

Dans le schéma, les effets sous-maillages des nuages convectifs sont représentés en ajustant les profils de température et d'humidités aux structures quasi-équilibre observés pour la convection profonde et à la structure de la ligne de mélange pour la convection peu profonde. Le quasi-équilibre entre le champ de nuages et le forçage à grande échelle forme la base de représentation de la convection profonde dans le schéma de BM. Le quasi-équilibre signifie que le champ de nuages convectifs contraint la structure thermique et de l'humidité de l'atmosphère contre l'influence de la déstabilisation du flux à grande échelle. Le concept a été justifié à des échelles spatiales et temporelles assez grandes. Les effets de la convection peu profonde sont envisagés comme un processus de mélange entre l'air de la couche de surface et l'atmosphère libre.

Comme base d'observation de la convection profonde, les parties thermodynamiques du schéma de BM sont basées sur la formulation du point de saturation comme dans (Betts 1982). Le point de saturation (sp) est défini comme étant la température et la pression (T^* , P^*) au niveau de condensation par ascendance (LCL : lifting condensation level). Le paramètre subsaturé P est la différence entre le niveau de pression de saturation de la parcelle d'air et le niveau de pression actuel c'est à dire $P = P^* - P$. (Betts 1986) a observé que les profils de température au dessous du niveau de congélation dans la convection profonde sont parallèles à l'isoplethe θ_{ESV} , ou θ_{ESV} est définie comme une constante virtuelle de la température potentielle équivalente. On arrive à la proposition telle que le gradient de référence dans la basse troposphère est l'adiabatique virtuelle de l'air humide plutôt que l'adiabatique largement humide. Puisque l'inclinaison de l'isoplethe θ_{ESV} est 0.9 fois que celle de l'adiabatique humide, la réduction de la poussée hydrostatique de la parcelle d'air due au contenu en eau de nuages est prise en compte. Cette structure de référence dans la présence de convection profonde est universelle comme dans le rapport de (Betts 1986) pour les cas des ouragans, des lignes de grains mouvantes et des épisodes convectifs de Venezuela, donc, de la structure de référence au dessous de 600Hpa. Au dessus de 600Hpa, le profil thermique observé augmente à une valeur de θ_{ESV} au sommet de nuages. Une variabilité considérable est associée avec la structure d'humidité observée. En dépit de cela, un profil d'humidité de référence est spécifié dans le schéma.

Comme base d'observation pour la convection peu profonde, un champ de cumulus peu profond est considéré comme un processus de mélange entre l'air de la couche de surface et l'atmosphère libre caractérisée par une ligne de mélange. Donc, quand deux parcelles d'air se mélangent selon la verticale, les p (paramètre saturé) de chaque mélange possible appartient à la ligne de mélange joignant les s_p (point de saturation) des deux parcelles. Cette structure de la ligne de mélange pour la convection de cumulus peu profonde a été souligné par (Betts 1982) en traçant les s_p entre 900-700Hpa. Cette évidence a été présentée dans la région d'alizé non perturbé et les stations terrestres tropicales.

Comme profils de référence pour la convection profonde, le schéma implique un ajustement décalé de l'échelle de résolution du profil de T et q_v vers une structure quasi-équilibre de référence en présence de processus radiatif et advectif sous maille. Les profils de référence de T , q_v pour la convection profonde sont basés sur l'observation telle que θ_{ESV} (à la base de nuage) décroît avec la hauteur jusqu'au niveau de congélation (en étant parallèle à l'isoplethe θ_{ESV}) et une augmentation de θ_{ESV} de l'environnement près du sommet de nuage. Les estimations initiales des profils de températures sont construites en utilisant :

$$\theta_{ES}(p) = \theta_{ES}(B) + \alpha V(p - p_B) \text{ Pour } p_B > p > p_M \quad (21)$$

où V est le taux d'écart vertical de θ_{ESV} , α est le facteur de poids pris égal à 1.5 basé sur les données de GATE (Garp Atlantic Tropical Experiment) et

$$\theta_{ES}(p) = \theta_{ES}(M) + (\theta_{ES}(T) - \theta_{ES}(M)) \left(\frac{p - p_T}{p_M - p_T} \right); \text{ Pour } p_T > p > p_M \quad (22)$$

où $\theta_{ES}(T)$ est la température potentielle équivalente saturée de l'environnement au sommet de nuage et $\theta_{ES}(M)$ est la température potentielle équivalente saturée minimale au niveau de congélation.

Le profil d'humidité est trouvé en précisant le paramètre $P = P^* - P$ à trois niveaux (c'est-à-dire à la base

$p_B = -3875\text{Pa}$, au niveau de congélation $p_M = -5875\text{Pa}$ et au niveau du sommet de nuage $p_T = -1875\text{Pa}$) avec des gradients linéaire) entre les niveaux. Pendant que les profils de température montrent une universalité plus grande, les profils d'humidité observés

montrent une variabilité considérable. Le profil pré-spécifié ci-dessus défini par p_B , p_F et p_T correspond au profil moyen observé dans les tropiques.

Les premières estimations des profils de température et d'humidités sont corrigées pour satisfaire la contrainte de l'enthalpie totale

$$\int_{p_0}^{p_T} (k_r - \bar{k}) dp = 0 \quad (23)$$

Où $k_r = C_p T_R + Lq_R$ et T_R , q_R sont respectivement la première estimation de référence de température et de l'humidité spécifique. $\bar{k} = C_p \bar{T} + L\bar{q}$, avec \bar{T} , \bar{q} sont la température moyenne et l'humidité spécifique moyenne de grille, avant le début de convection profonde.

Comme profil des référence pour la convection peu profonde, les profils d'estimation pour la température et l'humidité spécifique sont construits à partir des propriétés de l'air à la base de nuage (pression P_B) et de l'air au dessus du sommet de nuage (P_T^+). Des quantités égales d'air provenant de P_B et de P_T^+ sont mélangées et les sp correspondants (c'est-à-dire niveau 1) sont déterminés. La pente de la ligne de mélange est calculée comme suit

$$M = \frac{\theta_E(1) - \theta_E(B)}{P_{SL}(1) - P_{SL}(B)} \quad (24)$$

où B correspond à la base de nuage et P_{SL} est la pression aux niveaux de saturation (c'est-à-dire, pour les parcelles de la base de nuage B et le mélange d'air entre P_B et P_T^+). Le profil de température (référence) est parallèle à la ligne de mélange et est donné par

$$\theta_{ES}(p) = \theta_{ES}(B) + M(p - p_B) \quad (25)$$

$\theta_{ES}(p)$ est inversé pour produire p et T, qui donne les sp et q_v avec le paramètre de subsaturation (au niveau 1).

Les premières estimations des profils de référence de T et q_v sont corrigées pour satisfaire les contraintes d'énergie suivantes :

$$\int_{P_B}^{P_T+1} C_p (T_R - \bar{T}) dp = \int_{P_B}^{P_T+1} L (q_R - \bar{q}) dp = 0 \quad (26)$$

τ : le temps d'ajustement (τ) dans le schéma est établi de sorte que l'atmosphère sature sur la maille en présence d'une perturbation convective. D'après (Betts et Miller 1993), dans le modèle dont la résolution est T106 ($\approx 1.125^\circ$), τ pour la convection profonde et la

convection peu profonde est égale à 2h. (Betts 1997) a exprimé τ comme une fonction des échelles horizontales et a trouvé que τ appartient à 40-80 min pour le modèle à résolution T106. Pour $\Delta x = 60$ km, τ se situe entre 20-40 min. Dans la présente simulation, $\tau = 55$ sera utilisé pour la convection profonde et peu profonde à une résolution de $\Delta x = 60$ km.

Pour les subsidences dans le schéma de BM, le schéma de BM (Betts 1986) a été conçu comme à l'origine de la convection tropicale. Une des faiblesses du schéma de la convection profonde originale est l'absence de la subsidence. L'interaction de convection profonde avec le processus de PBL ne peut pas être capturée par le schéma de convection profonde original. De plus, le refroidissement et l'assèchement du courant descendant convectif aux bas niveaux peuvent avoir un impact sur le développement convectif en aval à travers les effets advectifs de l'air plus sec et froid sur une période de plusieurs heures même sous des régimes de vent de surface faibles (tel que dans WPR ou les maximum de vent de PBL sont ≤ 7 m/s). En fait la motivation d'incorporer les subsidences dans le schéma original était d'atténuer le problème d'instabilité de la maille surgissant dans la simulation. L'instabilité est due à l'absence de l'advection de l'air froid et sec de base émanant de la convection profonde.

Le schéma original est modifié avec l'inclusion des subsidences suggérées par (Betts et Miller 1993). Les subsidences sont paramétrées en définissant une simple course thermodynamique de subsidence non saturée (constante θ_e et constante de subsaturation) provenant au niveau 850Hpa. Un temps d'ajustement différent pour ce processus est employé et est fonction de l'évaporation dans les subsidences et de la précipitation de la convection profonde (PR). Le temps d'ajustement (τ_{PBL}) est donné par

$$\frac{1}{\tau_{PBL}} = \frac{\alpha PR}{\int_{P_0}^{P_{PBL}} \Delta q_c \frac{dp}{g}} \quad (27)$$

et mesure l'efficacité de la précipitation des cumulus, dp est l'intervalle de pression verticale, g est l'accélération gravitationnelle, P_0 et P_{PBL} sont les pressions respectives au niveau le plus bas du modèle et au sommet du PBL, et Δq_c est le changement de q_v suivant la subsidence. Il faut associer simplement les profils de température et d'humidité à la subsidence parallèle à l'adiabatique humide pour une sursaturation constante. L'air subsidient est injecté dans les trois niveaux le plus bas du modèle (dans PBL).

Schéma de précipitation à grande échelle

Le schéma explicite de l'humidité sous maille (SUBEX : Subgrid Explicit Moisture Scheme) utilisé par le modèle pour manipuler la résolution des nuages et la précipitation non convective, constitue l'une des nouvelles composantes du modèle. SUBEX prend en compte la variabilité sous maille dans les nuages en liant la moyenne de l'humidité relative de la maille à la fraction de nuage et l'eau de nuage suivant le travail de Sundavist et al. 1989.

La fraction FC de la maille couverte des nuages est déterminée par,

$$FC = \sqrt{\frac{RH - RH_{\min}}{RH_{\max} - RH_{\min}}} \quad (28)$$

où RH_{\min} est le seuil de l'humidité relative à partir duquel les nuages commencent à se former, et RH_{\max} est l'humidité relative où FC atteint l'unité. FC est supposée égale à zéro quand RH est plus petite que RH_{\min} et égale à l'unité quand RH est plus grand que RH_{\max} .

La précipitation P se forme quand le contenu en eau de nuage dépasse le seuil d'auto conversion Q_c^{th} selon la relation suivante :

$$P = C_{\text{ppt}} \left(\frac{Q_c}{FC} - Q_c^{\text{th}} \right) FC \quad (29)$$

où $1/C_{\text{ppt}}$ peut être considéré comme le temps caractéristique pour lequel les gouttelettes de nuages sont converties en gouttelettes de pluies. Le seuil est obtenu par graduation de l'équation du contenu en eau liquide de nuages médians selon la relation suivante :

$$Q_c^{\text{th}} = C_{\text{acs}} 10^{-0.49 + 0.0137} \quad (30)$$

SUBEX incorpore aussi des simples formulations pour l'évaporation et l'accrétion de goutte de pluie. La formulation pour l'accrétion des gouttelettes de nuages par chute des gouttelettes de pluies est basée sur le travail de (Beheng 1994) comme suit :

$$P_{\text{acc}} = C_{\text{acc}} Q P_{\text{sum}} \quad (31)$$

où P_{acc} est la quantité d'eau du nuage accrue par accrétion (agglomération d'élément), C_{acc} est le coefficient de taux d'accrétion et P_{sum} est la précipitation accumulée tombant d'en haut à travers le nuage.

L'évaporation de la précipitation est basée sur le travail de Sundqvist et al. 1989 tel que :

$$P_{\text{evap}} = C_{\text{evap}}(1 - \text{RH})P_{\text{sum}}^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

où P_{evap} est la quantité de précipitation évaporée, C_{evap} est le coefficient de taux d'évaporation. Une description plus détaillée de SUBEX et une liste des valeurs des paramètres est donnée dans Pal et al. 2000.

Paramétrisation du flux océanique

On a deux choix pour la paramétrisation du flux océanique :

- BATS
- Zeng : Les flux de chaleur sensible (SH), de chaleur latente (LH) et de mouvement (τ) entre la surface de la mer et la basse atmosphère sont calculés en utilisant les algorithmes aérodynamiques suivants,

$$\tau = \rho_a u_*^2 (u_x^2 + u_y^2)^{1/2} / u \quad (33)$$

$$\text{SH} = -\rho_a C_{\text{pa}} u_* \theta_* \quad (34)$$

$$\text{LH} = -\rho_a L_e u_* q_* \quad (35)$$

Où u_x et u_y sont les composantes moyennes du vent, u_* est la vitesse de frottement du vent, θ_* est le paramètre d'échelle de la température, q_* le paramètre d'échelle de l'humidité spécifique, ρ_a est la densité de l'air, C_{pa} est la chaleur spécifique de l'air et L_e est la chaleur latente de vaporisation. Des détails supplémentaires sur le calcul de ces paramètres sont donnés dans Zeng et al. 1998.

Schéma de gradient de pression

Deux options sont disponibles pour calculer la force de gradient de pression. La voie normale emploie les champs pleins et l'autre voie est le schéma de déduction hydrostatique qui fait usage d'une température de perturbation. Dans ce schéma, un lissage supplémentaire sur le sommet est effectué pour réduire les erreurs liées au calcul de PGF. (Force de gradient de pression)

2.2.4 Modèle de lac

Le modèle de lac développé par (Hostetler et al. 1993) peut être couplé au modèle atmosphérique. Dans le modèle de lac les calculs des flux de chaleur, d'humidité et de mouvement sont basés sur les données météorologiques, la température de surface du lac et l'albédo. La chaleur est transférée verticalement entre les couches du modèle de lac par mélange convectif et turbulent. La glace et la neige peuvent couvrir une partie ou toute la surface du lac. Dans le modèle de lac, l'équation pronostique pour la température est

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (k_e - k_m) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (36)$$

Où T est la température de la couche de lac, k_e et k_m sont respectivement les diffusivités moléculaires et turbulents. La paramétrisation de (Henderson-Sellers 1986) est utilisée pour calculer k_m et k_e est fixé à une valeur constante de $39 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ sauf sous la glace et au point le plus profond dans le lac.

Le flux de chaleur sensible et latente du lac est calculé en utilisant les paramétrisations de BATS (Dickinson et al. 1993). Les formulations aérodynamiques de charges pour le flux de chaleur latente (F_q) et pour le flux de chaleur sensible (F_s) sont données par,

$$F_q = \rho_a C_D V_a (q_s - q_a) \quad (37)$$

$$F_s = \rho_a C_p C_D V_a (T_s - T_a) \quad (38)$$

où les indices s et a désignent respectivement la surface et l'air ; ρ_a est la densité de l'air, V_a est la vitesse horizontale du vent, C_p est la chaleur spécifique de l'air à pression constante, q est l'humidité spécifique et T est la température. Le coefficient de trainée du mouvement C_D dépend de la longueur de rugosité et du nombre de Richardson de masse en surface (C_D dépend de la stabilité thermique de l'air). Sous les conditions sans glace, l'albédo de la surface du lac est calculé comme une fonction de l'angle du soleil au zénith (Henderson-Sellers 1986). Le rayonnement de grande longueur d'onde émis par le lac est calculé selon la loi de Stefan-Boltzmann. Le modèle de lac utilise le schéma de couverture partielle de glace de (Patterson et Hamblin 1988) pour représenter les différents échanges de chaleur et d'humidité entre la surface d'eau libre et des glaces et l'atmosphère, et pour calculer l'énergie de surface de la glace du lac et le recouvrement de neige. Une bonne référence

pour des détails supplémentaires se trouve dans (Hosteler et al. 1999) et (small et Sloan 1999).

2.2.5 Modèle de chimie : Aérosols et poussière

La représentation des processus d'émission de la poussière est un élément principal dans un modèle de la poussière et dépend des conditions de vent, des caractéristiques de sol et de la dimension particulaire. Selon Lauren et al. [2008] et Alfaro et Gomes [2001], le calcul d'émission de la poussière est basé sur les paramétrisations des processus de saltation et de sablage d'agrégat de sol. Les étapes principales dans ce calcul sont les suivantes : spécifications de la distribution de grandeurs d'agrégat de sol pour chaque cellule de grille du modèle, calcul d'une vitesse de frottement de seuil menant aux procédés d'érosion et de saltation, calcul du flux de masse global horizontal de sol, et finalement calcul du flux transportable vertical de la masse de particules de poussière produit par les agrégats saltation. Par rapport à l'interface de BATS, ces paramétrisations deviennent efficaces dans le modèle pour des cellules dominées par la couverture de désert.

Le synopsis (bref constituant du schéma du scénario) de la figure n°6 représente les composantes du système climatique intégré dans RegCM4.

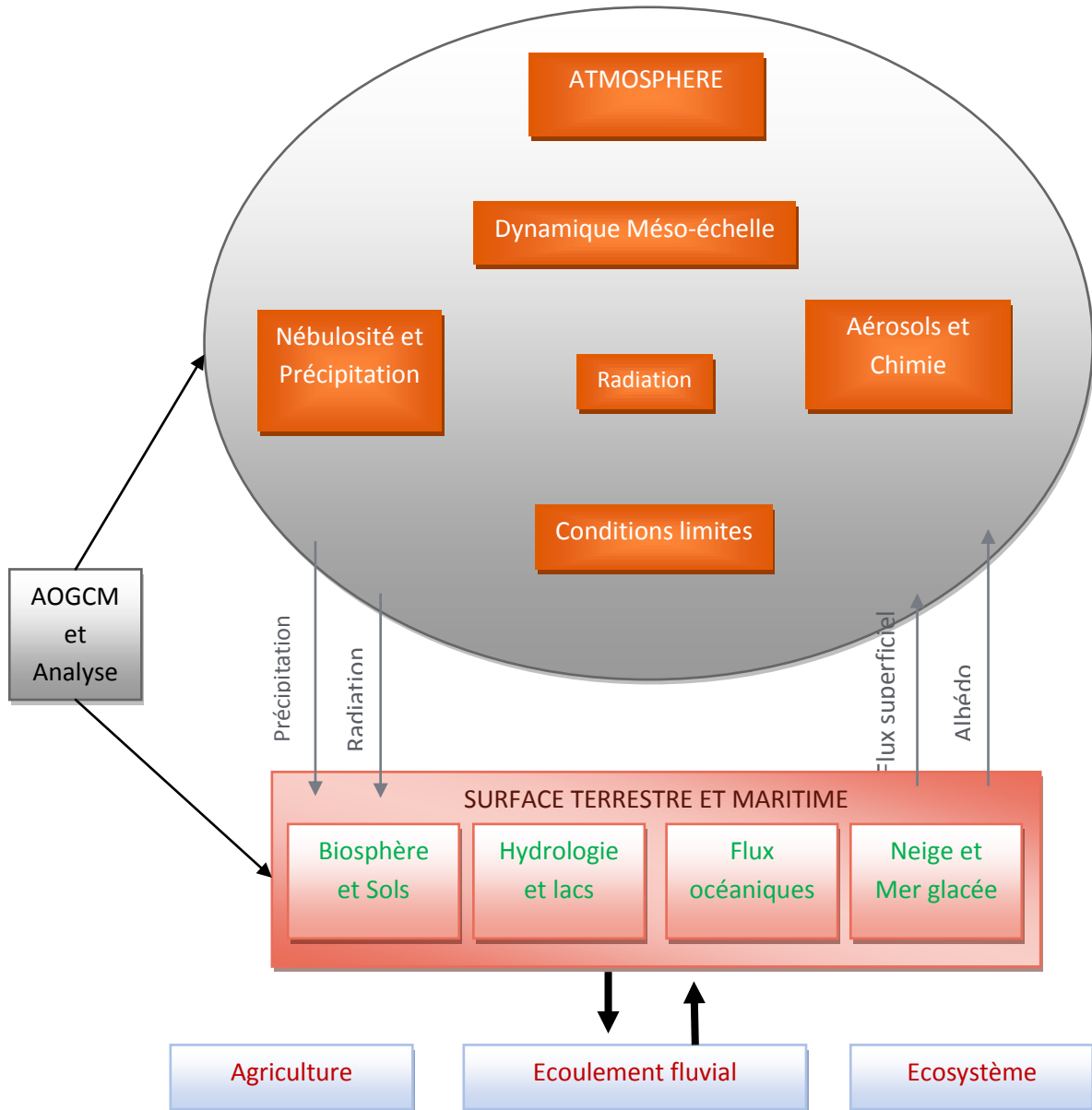


Figure 6 : synopsis de la 3ème version du modèle climatique régional

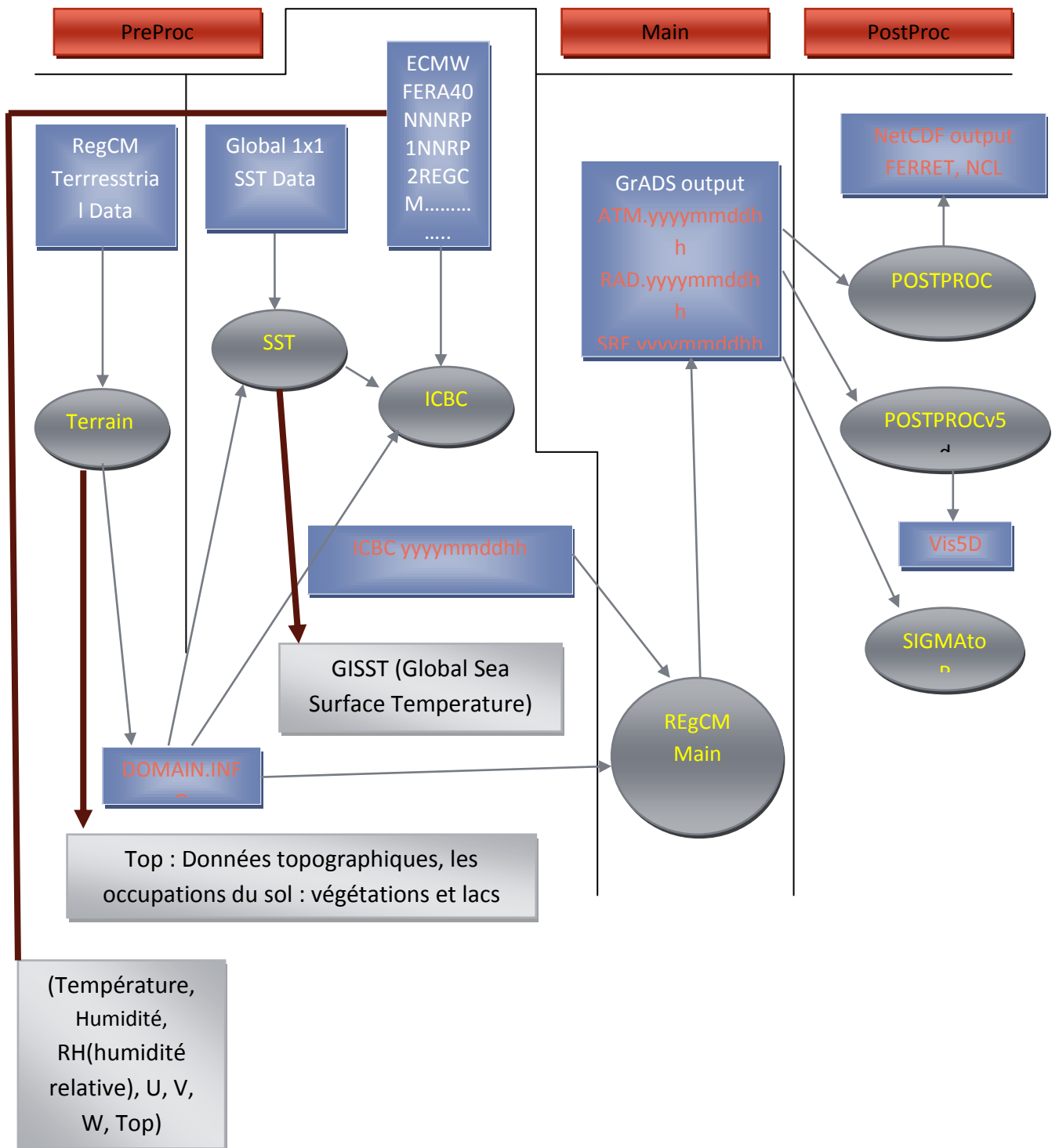


Figure 7 : organigramme de modélisation reqcm4

*AOGCM, « Atmosphere-Ocean General Circulation Model »

Soit « Modèle de Circulation Générale Océan-Atmosphère»

Ce synopsis nous indique tous les critères (nébulosité, précipitation, aérosols, agriculture, lacs, mers, fleuves, etc.) pris en compte dans la simulation numérique du modèle, ainsi que les interactions qui existent entre les différents milieux (atmosphère, terre et mer...).

Finalement, en ne rentrant pas davantage dans plus de détails, le modèle possède une structure résumée par l'organigramme de la figure n°7.

« Preproc » est le répertoire où la frontière latérale et les conditions initiales, les données SST (« Sea Surface Temperature », soit température de la surface de la mer) et topographique sont stockés. Ce répertoire contient donc les données d'entrées pour RegCM4.

« Main » est la partie principale de RegCM4 (contient les sources) où il va travailler en fonction des paramètres entrés en amont et ensuite fournir les différentes sorties du modèle (fichiers « ATM » contenant les paramètres atmosphériques, fichiers « RAD » des paramètres radiatifs, fichiers « SRF » des champs à la surface et fichiers « CHE » des variables chimiques). Les données récupérées sont « **ATM** » et « **RAD** », « SRF » respectivement données atmosphériques, radiatives et des champs à la surface.

Ces fichiers sont au nombre de 24 pour une année de simulation :

- Un fichier binaire par mois, comprenant les valeurs des paramètres ;
- Un fichier texte par mois associé au fichier binaire, décrivant le domaine utilisé, les paramètres simulés, etc.

3. Futurs Développements

Le plan pour les futures améliorations du modèles existe déjà, dont certaines sont à une étape déjà mûre et à l'essai, avec quelques résultats édités, tandis que d'autres sont faits seulement sur le papier dans un « wishlist » (liste des résultats souhaités) pendant des années à venir.

Les développements prévus sont énumérés ci-dessous :

Schéma d'UFW PBL

Une des insuffisances identifiées dans RegCM3 est le manque de simulation des nuages stratus, un problème clairement attaché au transport vertical excessif dans le schéma de

Holtslag PBL (O'Brien [2011]). Pour résoudre le problème Travis O'Brien a couplé au RegCM4 la paramétrisation générale de fermeture de turbulence de [Grenier et Bretherton 2001; Bretherton et autres 2004], aux quels nous nous référons comme UW-pbl. C'est une, paramétrisation de diffusion dans laquelle la vitesse est basée sur l'énergie cinétique turbulente (TKE). Le TKE est calculé pronostiquement à partir de l'équilibre de production de cisaillement, de la dissipation en transport vertical, de la diffusion et de l'advection horizontale. Le schéma paramétrise également le processus d'entraînement et son perfectionnement par évaporation d'air nuageux dans l'air est entraîné. Une propriété du schéma est l'utilisation de la formulation de mélange de longueur basée sur un article de Grisogono, nous permettant une description plus réaliste des inversions pointues dans des conditions fortement stables. L'UW-pbl a été jusqu'ici examiné dans le cadre RegCM4 la plupart du temps dans des domaines de moyenne latitude, tels que les USA continentaux (où il a considérablement amélioré la simulation des nuages de stratus) et l'Europe. Ce schéma figure actuellement dans une partie du code et sera fusionné dans le tronc principal de développement dès que l'article d'accompagnement sera édité, et sera disponible dans la prochaine version du modèle.

- **Schéma de convection de Tiedtke**

Adrian Tompkins développe une adaptation [schéma de convection de cumulus d'ECHAM5.4 Tiedtke 1989] pour le modèle de RegCM. Le code d'ECHAM a été mis en communication dans RegCM, et l'essai étendu est effectuée dans la deuxième moitié de 2011. Cette option devrait être disponible pour la prochaine version du modèle.

- **Chimie**

Fabien Solmon a couplé le modèle de RegCM avec le modèle chimique.

- **2D parallélisation**

Cette limitation de longue date du modèle dans des exécutions parallèles sera résolu : nous projetons de laisser tomber la version du modèle périodique (il existe désormais un processeur simple de noyau?), d'effacer le code du modèle parallèle et d'exécuter une 2d de la décomposition dynamique du domaine du modèle.

- **Mettre en parallèle I/o**

C'est une autre limite de l'exécution du modèle courant, où toutes les données doivent être recueillies par le processeur principal avant d'être écrites sur disque. Encore, tous les processeurs ont habituellement accès aux ressources de disque, et une forme d'I/o parallèle permettra une grande poussée d'exécution comme une réduction de certaines des données de communication de MPI aux dépenses d'augmentation des conditions pour le canal du faisceau I/o.

- **Noyau dynamique de Semi-Lagrangien**

Un schéma d'advection de semi-Lagrangien pour la vapeur d'eau et les traceurs d'advection permettra une étape de temps différente pour les schémas de transport.

CHAPITRE IV. MISE EN ŒUVRE DE REGCM4

La simulation a été faite en suivant trois grandes étapes : La première étape « Pre-Processing » consiste à effectuer la mise en place des domaines de calcul, des données topographiques et de végétation correspondante et à interpoler les données de température de surface de la mer (SST) ainsi que les données météorologiques de réanalyses à la grille du modèle. Ensuite intervient l'exécution proprement dite de RegCM, les paramètres physiques du modèle tels que le choix de schéma de convection, de schéma de flux océanique sont configurés. La dernière étape « Post-Processing » consiste au traitement des données sorties de l'étape précédente. La représentation synoptique du modèle est résumée sur la fig.6.

4. Pré-processing

Avant d'exécuter une simulation climatique régionale, il y a deux étapes de prétraitement qu'on doit effectuer. La première étape consiste à définir le domaine de simulation et la grille de calcul, et interpoler les domaines topographiques et des occupations du sol à cette grille. Cette tâche est exécutée dans le répertoire RegCM-4.0/PreProc/Terrain. La seconde étape est de générer les fichiers utilisés pour les conditions initiales et aux limites durant la simulation. Cette étape est exécutée dans le répertoire RegCM-4.0/PreProc/ICBC. Les données d'entrées nécessaires à l'exécution du modèle sont disponibles sur le site web de Physique of Weather and Climate (PCW) Group à l'Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (ICTP) en Trieste, Italie :

<http://www.ictp.trieste.it/-pubregcm/RegM4/globaldat.htm>

Les données d'entrées utilisées par le programme Terrain et ICBC sont stockées dans le répertoire RegCM-4.0/PreProc/DATA. Un script nommé datalinker.py est fourni dans ce répertoire au cas où les données sont stockées ailleurs. Fig.7.

4.1. Terrain

Ce paragraphe consiste à définir les caractéristiques du domaine sur lequel les simulations seront effectuées. Pour définir le domaine, il faut fournir au programme la latitude et longitude du point central de celui-ci ainsi que le nombre de points du maillage en X et en Y et enfin la résolution voulue en kilomètres de la grille sur ce domaine (Tableau 23). Le programme Terrain interpole horizontalement les données topographiques et les occupations du sol, telles que les végétations et lacs, à partir d'une grille latitude-longitude vers la grille cartésienne du domaine choisi.

RegCM utilise les données globales de l'**USGS** (US Geological Survey) GTOPO30 qui est un modèle numérique des différentes altitudes de la Terre. Toutes ces données sont disponibles à différentes résolutions, à savoir 60 min, 30min, 10min, 5min, 3min, et 2min, et sont téléchargeables sur le site web de l'ICTP PWC : <http://www.ictp.trieste.it/-pubregcm/RegCM4/DATA/SURFACE>

Les données de végétations et d'utilisation des terres sont celles du GLCC (Global Land Cover Characterization). La base de données de GLCC est dérivée de données 1 Km AVHRR

(Advanced Very High Resolution Radiometer) couvrant la période d'avril 1992 au mars 1993, et basée sur les types de couverture végétale et d'utilisation des terrains définis par BATS. BATS est caractérisé par 20 classes de végétation ainsi que de couverture telle que l'océan et les lacs (Tableau 33), les paramètres correspondants sont présentes au (tableau 30).

Les paramètres tels que les dimensions du domaine, les données d'entrées (SST, réanalyses), et la durée de simulation sont définis dans le fichier **regcm.in** du répertoire.../RegCM-4.0/Bin/terrain. Après la configuration de regcm.in (Tableau 23), vient ensuite l'exécution du programme Terrain par l'intermédiaire d'un fichier exécutable nommé **run**. Il génère un fichier de sortie Madagascar_sud.INFO dans le répertoire .../Simulation/Input qui contient l'élévation de surface, le type d'occupation du sol et d'autres variables. Un fichier de contrôle nommé Madagascar_sud.CTL est aussi créé pour la manipulation avec GrADS.

En donnant la valeur "true" au paramètre 'FUDGE' dans regcm.in, on peut modifier les valeurs de l'occupation de terre pour chaque point de grille (Tableau 31).

4.2. ICBC

Le programme ICBC a pour fonction d'interpoler la température de surface de la mer et les données globales de réanalyses sur la grille du modèle. Ces fichiers sont utilisés par les conditions initiales et les conditions aux limites durant la simulation.

4.2.1. SST

On a deux choix pour les données de SST. Ou on utilise les données mensuelles GISST (Global Sea Surface Temperature) à 1°x1° de résolution (1871-2002), disponibles sur le site web du Hadley Centre Met office : <http://badc.nerc.ac.uk/data/gisst/>

Ou on prend les données d'analyses hebdomadaires OI_WK/OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) à 1°x1° de résolution (1981-2002), accessibles sur le site de NOAA (National Ocean and Atmosphere Administration) : <http://www.cdc.noaa.gov/>

4.2.2. Conditions initiales et conditions aux limites

Il y a plusieurs options pour les données météorologiques utilisées pour piloter le modèle. Les données de réanalyses sont des données obtenues à partir de modèles ayant été lancés sur plusieurs années en mode assimilation de données. Des données d'observations sont donc introduites au modèle. Ces options sont choisies dans le fichier regcm.in section 'boundaryparam'.

- **ECMWF** : Données de réanalyses de European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (résolution T42 ; L15), couvrant la période 1993 à 1997.
- **ERA 40** : La réanalyses appelée ERA-40 a été effectuée par le ECMWF et couvre les années 1957 à 2001, résolution 2.5x2.5 degrés, L23.

- **NNRP1** : « NCEP/NCAR Reanalysis Project », données globales qui ont une résolution de 2.5x2.5 degrés, L17 ; couvrant 1948-2001.
- **NNRP2** : « NCEP/NCAR Reanalysis Project », données globales qui ont une résolution de 2.5x2.5 degrés, L17 ; couvrant 1979-2001.
- **fvGCM** : Pour les expériences du changement climatique, les données de sortie par le MCG à volume fini du NASA-NCAR pour piloter RegCM ont été utilisées, disponible à l'ICTP et ont une résolution de 1X1.25 degré, L18 couvrant 30 années de simulation (1961-1990).
- **FNEST** : Un pilotage unidirectionnel est disponible pour des simulations à haute résolution de RegCM auxquelles les données de sortie d'une simulation à résolution grossière de RegCM sont utilisées pour piloter le modèle à très haute résolution sur une sous région.

Le MCR à aire limitée nécessite des informations à leurs conditions aux limites latérales pour toutes les variables météorologiques qui dérivent des données de réanalyses citées ci-dessus. Ces informations sont incorporées via un emboîtement unidirectionnel, conjointement avec une zone de relaxation aux limites du modèle.

Le traitement numérique de ces conditions aux limites latérales est difficile, mais constitue un aspect très important du MCR. Il ya cinq types de traitement des conditions aux limites latérales dans RegCM.

- **Fixed** : ceci ne permettra pas la variation de temps aux conditions aux limites latérales. Cette méthode ne peut être utilisée pour les applications aux données réelles.
- **Time-depend** : les deux points de grille externes ont les valeurs spécifiées de tous les champs de la projection. Recommandé pour les emboîtements où les valeurs dépendantes de temps fournies par le domaine parent. Non recommandé pour une maille grossière où un point de grille externe seulement est spécifié.
- **Linear relaxation** : Un point de grille externe est spécifié par la valeur dépendante de temps, ensuite quatre points de grille sont relaxés vers les valeurs aux limites avec une constante de relaxation qui décroît linéairement loin de la limite.
- **Sponge** : Une méthode de relaxation de Perkey et Kreizberg (1976), qui considère une zone éponge aux limites latérales.
- **Exponential relaxation** : une méthode de relaxation de Davies et Tumer (1977).

L'interpolation à la grille du modèle de la température de surface de la mer et des données de réanalyses utilisées pour les conditions initiales et aux limites est effectuée dans le répertoire **RegCM4/PreProc/ICBC** en exécutant toujours

`../RegCM-4.0/Bin/icbc regcm.in`. L'exécution génère deux fichiers dans le répertoire `../simulation/Input` dont `ICBCYYYYMMJJHH.INFO` et `ICBCYYYYMMHH.CTL`. Ces fichiers sont utilisés pour conditions initiales et aux limites durant la simulation.

5. RegCM

Cette section vise à décrire la partie numérique du modèle, les paramètres du programme ainsi que les variables calculées. Les codes sources du modèle sont écrits sous langage FORTRAN et se trouvent dans le répertoire **RegCM4.0/Main**.

Le répertoire `../meteo/simulation` a été créé avant la simulation pour stocker les fichiers exécutables (Input) et les fichiers de sortie (output). Des variables plus « basiques » comme le temps de simulation, la possibilité de redémarrer à partir des résultats d'une précédente simulation, la fréquence de sortie des variables calculées et les options physiques utilisées dans le modèle étaient initialisées. Ces paramètres figurent dans le fichier **regcm.in**.

Toutes les configurations nécessaires à la simulation sont présentées aux tableaux : 23 à 31. La section ci-après a pour but de décrire les détails de certains paramètres de cette configuration.

CONFIGURATION DU MODELE

La configuration des pas de temps nécessaires à la simulation se trouve dans le tableau 25.

Sélection du pas de temps

&timeparam

/

dt! Pas de temps pour le modèle atmosphérique en secondes

abatm! Pas de temps pour le modèle de surface terrestre (BATS) (sec)

radfrq! Pas de temps pour le modèle de rayonnement (des minutes)

abemh! Pas de temps pour l'absorption et l'émission d'onde longue (heures)

ibdyfrq! Pas de temps pour l'état de frontière (heures)

/

Le pas de temps pour le modèle atmosphérique dt devrait être approximativement trois fois de la résolution horizontale en Km ds. Par exemple, si la résolution est de ds=50 Km alors dt devrait être dt=150 secondes. Les pas de temps devraient être divisible par dt, c'est-à-dire radfrq=30 minutes, abemh=18 heures et abatm=540 secondes. Tableau 25

Modèle De Lac

&lakemodparam

lkpts = 10, ! Nombre de points de lac pour le modèle de lac

Génération de données de LSM

&lsmparam

lsmtyp = ' BATS'! Type extérieur de légende de terre

soit : BATS, USGS

Notez que dans le modèle seulement des BATS sont soutenu, vous devriez vérifier toute rangée de données avec la dimension de nveg pour permettre USGS.

&aerosolparam

aertyp = ' AER00D0 '! Ensemble de données d'aérosol utilisé

AER00D0 - > ni aérosol, ni poussière utilisée

AER01D0 - > biomasse, SO2 + BC + OC, aucune poussière

AER10D0 - > anthropogène, SO2 +BC + OC, aucune poussière

AER11D0 - > Anthropogenic+Biomass, SO2 +BC + OC, aucune poussière

AER00D1 - > aucun aérosol, avec la poussière

AER01D1 - > biomasse, SO2 + BC + OC, avec la poussière

AER10D1 - > anthropogène, SO2 + BC + OC, avec la poussière

AER11D1 - > Anthropogenic+Biomass, SO2 +BC + OC, avec la poussière

ntr = 4,! Paramètres de traceur: nombre de traceurs

nbin = 2,! Paramètres de traceur: nombre de casiers pour la poussière

/

Modèle Physique

&physicsparam

iboudy , ! Schéma d'états de frontière latéral

0 = > a fixé

1 = > relaxation, technique linéaire.

2 = > dépendant du temps

3 = > Inflow/outflow.

4 = > Éponge (Perkey Et Kreitzberg, Mwr 1976)

5 = > relaxation, technique exponentielle.

ibltyp = 1, ! Schéma de couche de frontière

0 = > sans friction

1 = > Holtslag Pbl (Holtslag, 1990)

icup = 4,! schéma de convection de cumulus

1 = > Kuo

2 = > Grell

3 = > Betts-Miller (1986)

4 = > Emanuel (1991)

igcc = 1,! schéma de fermeture de cumulus, schéma de Grell

1 = > Arakawa et Schubert (1974)

2 = > Fritsch Et Chappell (1980)

ipptls = 1,! schéma d'humidité

1 = > humidité explicite (SUBEX; Pal et autres 2000)

iocnflx = 2,! schéma de flux d'océan

1 = > Utilisation BATS1e Monin-Obukhov

2 = > Zeng et autres (1998)

ipgf = 0,! schéma de force de gradient de pression (PGF)

0 = > pleins champs d'utilisation

1 = > déduction hydrostatique avec la température de PERT

iemiss = 0,! Calculer l'émission

lakemod = 0,! Employer le modèle de lac

ichem = 1,! Employer le modèle chimique

/

&subexparam

nclد = 1,! # des niveaux du modèles inférieurs sans aucun nuage

fcmax = 0,80,! Couverture maximum de la fraction de nuage
 qck1land = 250E-03,! Taux d'Autoconversion pour la terre
 qck1oce = 250E-03,! Taux d'Autoconversion pour l'océan
 rh0oce = 0,90,! Seuil d'humidité relative pour l'océan
 rh0land = 0,80,! Seuil d'humidité relative pour la terre
 tc0 = 238,0,! Au-dessous de cette température, rh0 commence à approcher l'unité
 cevap = 100E-02,! Coef de taux d'evap de goutte de pluie [[(kilogramme m2 s-1)-1/2]/s]
 caccr = 3,000,! Taux d'augmentation de goutte de pluie [m3/kg/s]
 cllwcv = 0.é-3,! Teneur en eau liquide de nuage pour la précipitation conective.
 clfrcvmax = 0,25,! Couverture partielle de nuage ; maximum pour la précipitation convective.
 Schéma de cumulus de Grell (param.F90 dans)

&grellparam

/ Scéma de Cumuls d'Emanuel (param.F90)

Paramètre du modèle chimique

&chemparam

Un certain exemple de liste des noms de paramètre de défauts sont donnés dans les exemples annuaire. Ici nous considérons deux poussières et deux types d'aérosol
 idirect = 1,! Permet ou pas des rétroactions d'aérosol sur le rayonnement et le dynamique (effcts directs et semi directs d'aérosol):

0 = aucun couple. L'aérosol est seulement transporté et n'agit pas l'un sur l'autre avec le schéma de rayonnement.

1 = aucun couple à dynamique et à thermodynamique. Cependant la surface du ciel et le dessus clairs de l'atmosphère des forcings radiatifs d'aérosol sont diagnostiqués.

2 = permet des rétroactions d'aérosol sur les champs radiatif, thermodynamiques et dynamiques.

ichremlsc = 1,! 1 = permet le déplacement de traceur (dépôt humide)

ichremcvc = 1,! 1 = permet le déplacement de traceur par les nuages convecteurs

ichdrdepo = 1,! 1 = permettent le dépôt sec extérieur de traceur. Pour la poussière, il est calculé par une taille arrangeante et sèche, schéma de dépôt. Pour l'autre aérosol, un sec, la vitesse de dépôt est simplement prescrite plus loin.

ichcumtra = 1,! 1 = permettent le transport et le mélange convectif de traceur.

inpchtrname = ' DUST', 'dust', 'bc_hb', 'bc_hl',

Marque de traceur. Le nombre d'entrée devrait être égal au ntr. Vous avez le choix pour la POUSSIÈRE

BC_hb = aérosol noir hydrophobe de carbone

BC_hl = carbone noir hydrophile ou âgé

OC_hb = aérosol organique hydrophobe de carbone

OC_hl = carbone organique hydrophile ou âgé

SO2 = anhydride sulfureux

SO4 = aérosol de sulfate

inpchtrsol = 0,1, 0,1, 0,05, 0,8, Solubilité de traceur (fraction). Si le nombre d'entrée est égal à ntr, il est détermine si le traceur est efficacement enlevé par le dépôt humide ou pas

inpchtrdpv = 0., 0., 0,00025, 0,00025, 0., 0., 0,00025, 0,00250,

vitesse de dépôt sec de la terre (m/s) (premier valeur de ntr) et océan (deuxièmes valeurs de ntr), un total de valeurs ntr*2 doit être conforme à la marque de traceur. Pour la POUSSIÈRE cette valeur n'est pas effectivement considérée puisqu'un schéma de dépôt sec est explicité inclus dans RegCM.

inpustbsiz = 0,1, 1., 1., 2,5, la limite inférieure de la taille (premier valeur de nbin) et la limite supérieure de la taille (Deuxièmes valeurs de nbin) pour la poussière (en micromètre). Si jamais excèdent le nbin * 2 valeurs est retenu.

Ainsi dans cet exemple il y a deux bins de

* 0,1 - 1,0 micromètre

* 1,0 - 2,5 micromètre

NOTONS

Il faut prendre compte que des propriétés optiques de la poussière ont été calculées pour 4 défauts, classez les bins(rep dans RegCM4) dans RegCM (ceci existe dans l'annuaire d'exemples pour des classes de grandeur). La taille de bin pour la poussière / des interactions rétroaction de climat, peut être modifié mais avec prudence

Paramètres de CLM

&clmparam

dirclm = './Input ',! Le chemin de CLM (Input) produit par clm2rcm. Il devrait être savoir comment atteindre le rep Input de la rep Run.

clmfrq = 12,! La fréquence pour le CLM que possède la sortie (output)

imask = 1,! Pour le CLM, type de paramétrisation de surface de terre

1 = > utile DOMAIN.info pour le landmask (mêmes que BATS)

2 = >utilise le fichier mksrf_navyoro de landmask et exécutent une moyenne pesée plus de « gridcells ocean/land »; par exemple:

tgb = tgb_ocean*(1-landfraction)+tgb_land*landfraction

Chemin de CLM aux données d'entrée

6. Post – processing

C'est un répertoire dans RegCM4.0 qui possède des scripts sous fortran pour traiter des fichiers de sortie du modèle. Les fichiers de sortie sont convertis à des nouveaux fichiers dans des formats utilisables par GrAds ou NetCDF. Cette étape décrit aussi la manière d'interpoler les données d'observations à la grille du domaine et de fournir un script pour visualiser les données.

Il y a 4 étapes pour la sortie du post-traitement de RegCM :

- ☐ L'information de domaine et 3 méthodes pour la projection de carte
- ☐ Les variables d'ATM, SRF, RAD
- ☐ Moyen mensuel, moyen journalier
- ☐ Conversion « sigma-pression »

Le fichier postproc.in contient toutes les commandes requises de namelists (liste des paramètres) pour chaque action de postproc:

&shareparam

&dateparam

&sigma2p_param

&averageparam

®ridparam

Pour faire la moyenne mensuelle et la moyenne journalière pour toute l'entrée-sortie (I/O) de RegCM, les champs des modèles de niveau de sigma et les champs de niveaux des pressions : dans &averageparam

Pour l'entrée-sortie RegCM4, la date de 10 chiffres est exigée :

&dateparam

idate0 = 2002010100, 'date de début'

idate1 = 2002030100, 'date de début pour faire la moyenne '

```
idate2 = 2002030100, 'date de fin pour faire la moyenne '  
S'il s'agit d'une moyenne journalière  
&dateparam  
idate0 = 20020101,  
idate1 = 20020301,  
idate2 = 20020301,  
S'il s'agit d'une moyenne mensuelle  
&dateparam  
idate0 = 200201,  
idate1 = 200203,  
idate2 = 200203,  
/  
&averageparam  
day_ICBC = .true.,  
day_ATM = .true.,  
day_RAD = .true.,  
day_SRF = .true.,  
day_SUB = .false.,  
day_CHE = .false.,  
day_ICBC_P = .true.,  
day_ATM_P = .true.,  
mon_ICBC = .true.,  
mon_ATM = .true.,  
mon_RAD = .true.,  
mon_SRF = .true.,  
mon_SUB = .false.,  
mon_CHE = .false.,  
mon_ICBC_P = .true.,  
mon_ATM_P = .true.,  
/  
Pour exécuter le fichier exécutable « average » on utilise la commande :  
./average < postproc.in
```

7. PostNc

Ce petit programme effectue une partie du traitement fait par l'ancien programme de postproc dans V3.

Ce qu'il fait :

- * Transforme la sortie aux dossiers conformes de convention de NetCDF CF-1.4 (excepté CHEM).
- * Garde les informations intérieures des dossiers de sortie sur des paramètres et des schémas cours
- * Laisse tracer en utilisant la convention de CF les outils avertis
- * Permette les opérations en utilisant des opérateurs comme CDO (Climate Data Operator) ou NCO (Netcdf Operator)

Exemple:

```
./rcm2netcdf [options] /home/regcm/Run/regcm.in
```

Il a été supposé dans ce cas-ci que le dossier de regcm.in contient les paramètres corrects utilisés pour la course de modèle.

Quelques options utiles sont fournies:

- séquentiel: Séquentiel réglé (défaut d'accès direct)
- grads: Produisez un dossier de CTL pour GrADS
- list/-l: Produisez la liste de noms pour - l'option de v
- var/-v[all|name[,name]]: Inclue seulement quelques vars (tout par défaut)
- tstart/-t YYYY[mm[dd[hh]]]: Commencez à traiter à cette date
- tend/-e YYYY[mm[dd[hh]]]: Cessez de traiter à cette date
- onlyatm/-a: Dossier de processus d'atmosphère (tout par défaut)
- onlysrf/-s: Dossier de processus de SRF (tout par défaut)
- onlyrad/-r: Dossier de processus de rad (tout par défaut)
- onlyche/-c: Dossier de processus de CHE (tout par défaut)
- help/-h: Imprimez cette aide
- version/-V: information de la version

Quelques exemples:

1) Sortie du modèle de PostProcess pour que le dossier d'atmosphère seulement obtienne la teneur en eau de sol et la température justes de la terre pour la période 1 janvier 1989 au 31 mars 1989

```
rcm2netcdf - a - swt de v, tgb - t 198901 - e 1989033100 myregcm.in
```

2) Sortie du modèle de PostProcess pour que SRF et rad obtienne la température de 2m de SRF et le flux solaire absorbé provenant de rad pour janvier juste 1989.

```
rcm2netcdf - s - r - T2 de v, frs - t 198901 - e 1989013118 myregcm.in
```

Les deux autres programmes, icbc2netcdf et dom2netcdf, traiteront des données justes de DOMAINE et d'ICBC, et ont seulement un sous-ensemble des options de rcm2netcdf.

1) obtiennent les données de DOMAINE dans le netcdf

```
dom2netcdf myregcm.in
```

2) obtiennent des données utilisées d'ICBC dans NetCDF pour mi janvier - mi période de février avec un dossier de CTL pour GrADS

```
icbc2netcdf - t 19890115 - e 19890215 -- grads myregcm.in
```

Les liens aux outils utiles sont les suivants:

- * Opérateurs De NetCDF: <http://nco.sourceforge.net>
- * Opérateurs De Données De Climat: <https://code.zmaw.de/projects/cdo>
- * Panoplie De la NASA: <http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply>
- * Unidata Idv: <http://www.unidata.ucar.edu/software/idv>

Notez que le programme de GrADS, quoiqu'étant largement répandu, manque d'une analyse de données plus complète de dispositifs et outils de visualisation. La plupart du temps:

-) il soutient seulement des données régulières de lat/lon ou des projections simples (non toutes les projections de la terre de RegCM sont soutenues)

-) il permet seulement une dimension simple comme " Z ", et un ensemble de données avec les niveaux atmosphériques verticaux, ainsi que des niveaux de sol n'est pas représenté.

PARTIE III. STRATEGIE DE L'ETUDE

CHAPITRE V. OBJECTIFS ET CHOIX DES PERIODES ETUDIEES

Ce chapitre a pour but de décrire la sécheresse qui a affecté la région du Sud de Madagascar lors des années 1981 ; 1988 ; 1990 ; 1991 ; 1992 et 2002 (épisodes de sécheresse grave qui ont frappé le Sud) et d'évaluer la performance du modèle RegCM4 pour pouvoir l'utiliser après une simulation avec des séries longue afin d'obtenir une prévision et contribuer à l'étude du changement climatique.

Pour cela, l'étude sera faite de deux manières : l'une qui utilise les données d'observations de chaque station synoptique (Données disponibles de la partie Sud : Toliara ; Taolagnaro ; Ranohira ; Fianarantsoa) et l'autre la simulation avec le modèle climatique RegCM4.

L'analyse des caractéristiques de la sécheresse sera faite à travers l'indice de précipitation standardisé (Standardized Précipitation Index, SPI). Les données pluviométriques pour la période comprise entre 1961 et 2005 ont été obtenues auprès de chaque station étudiée (Banque de donnée météo). Les précipitations et les températures pour les années 1981, 1988, 1990-1992 et 2002 seront simulées à partir d'un modèle climatique régional (RegCM4) et on les utilise pour des calculs des indices de sécheresse ainsi qu'à construire le diagramme ombrothermique. Pour évaluer la performance du modèle, les précipitations simulées vont être comparées avec celles des précipitations observées dans les calculs du SPI.

Pour mieux comprendre la stratégie de l'étude, les démarches sont présentées sous formes d'organigramme en annexe [fig.23.]

1. CONTEXTE GENERAL

En 33 ans, de 1968 à 1999, la sécheresse a sévi cinq fois dans le Sud du pays, affectant au total près de 2.316.500 personnes, avec comme conséquence de graves pénuries alimentaires (tableau 8,9). Le plus grave épisode de sécheresse est celui de 1992. Durant trois années, elle a provoqué une grave situation de famine dénommée "KERE", aggravée par les effets de l'invasion acridienne sur le peu de récoltes existant. Près d'un million de personnes étaient ainsi en situation de détresse alimentaire et 200 décès ont été dénombrés.

Tableau 9 : Les épisodes de sécheresse qui ont frappé le pays de 1968 à 1999

Année	Mois	Décès	Populations affectées	Zones touchées
1981		0	1000000	Sud : Toliara / Tolagnaro
1988	4	0	116500	Sud
1990	12		250000	Sud
1992	3-5	200	950000	Sud

Source : EM – DAT : The OFDA / CRED International Disaster Database -

www.md.ucl.ac.be/cred – University Catholique de Lovain-Brussels-Belgium/juillet 2000

2. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES

Les données mensuelles de précipitations, de températures moyennes, maximales et minimales pour une période de 45 ans (1961-2005) de chaque station synoptiques sont obtenues auprès de la DGM. Pour les études, nous nous intéresserons uniquement aux mesures de précipitation et de température obtenues par les observations. Les stations retenues sont représentées dans le (tableau 10), et sur la carte de la (figure 1). Les données recueillies sont en format xls (fichier excel).

3. METHODE

Aucune définition unique ne correspond à la sécheresse. Différents indices et méthodes ont été développés pour la caractériser et l'identifier. L'Indice Standardisé de Précipitation (SPI) sera utilisé à différents échelle de temps : mensuelle (SPI-1), intrasaisonnière (SPI-3), saisonnière (SPI-6) et interannuelle (SPI-12). Il permet de déterminer le seuil de la sécheresse (météorologique), d'établir une classification selon la sévérité de l'évènement, (tableau 5). Pour identifier les différents types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique) utilisons les définitions au chapitre II de la partie I. Pour l'étude, quatre stations du Sud ont été prise : Toliara, Taolagnaro, Fianarantsoa, Ranohira.

Tableau 10 : identification des stations (sud)

Tableau 10 : Identification des stations (Sud)			
Station	Latitude	Longitude	Altitude
Fianarantsoa	21°26	47°07	1106
Ranohira	22°33	45°24	823
Taolagnaro	25°02	46°57	8
Toliara	23°23	43°44	8

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Afin de faire une analyse ponctuelle au niveau des postes pluviométriques retenus dans cette étude, et pour mieux évaluer les variations de la pluviométrie annuelle, les indices standardisés de précipitation « SPI » sur différentes échelles de temps et l'indice de l'écart à la moyenne « Em » ont été calculés. Les graphes des différents types de résultats obtenus comme : les SPI-1, SPI-3, SPI-6 et SPI-12 ainsi calculés (RegCM4-OBS), Em et les digramme-ombrithermique de chaque station étudiée se trouvent en annexe.

4.1. *Quantification du déficit des précipitations pour des échelles de temps multiples*

Une classification de la sécheresse suivant les valeurs de L'indice standardisé de précipitation « SPI » (standardised precipitation index) est effectuée. Il reflète l'impact de sécheresse sur la disponibilité des différentes ressources en eau. Cet indice est calculé

surtout lorsque la précipitation n'est pas normalement distribuée, notamment pour des périodes inférieures à 12 mois.

4.1.1. Indice standardisé de précipitation (SPI-1)

Le tableau ci-après indique le(s) mois sec(s) pendant la saison de pluie (NDJFMA) de chaque année étudiée (Figure 24, 25, 26, 27 OBS).

- 1981 : Mois d'Avril et mois de Janvier
- 1988 : Mois de Mars et mois d'Avril
- 1990 : Mois de Novembre, Mars et Avril
- 1991 : Mois de Novembre, Décembre, Avril, Mars et Janvier
- 1992 : Mois d'Avril, Février, Mars et Décembre
- 2002 : Mois de Novembre, Mars et Décembre

Ces résultats répondent tous aux résultats observés dans le contexte. (Tableau 9).

Tableau 11: Statistiques des mois secs pour chaque année d'étude

Stations/Années	1981	1988	1990	1991	1992	2002
Toliara	4-3-12	11-3	2-3-11	11-12	1-2-3	3-11-12
Taolagnaro	1-11-4	2-3	11-12	1-2-3-11-12	2-3-4-12	12
Fianarantsoa	1-4	4	3-4-11	4	4-12	3-4-11
Ranohira	1-4	3-4	3-4	3-4-11-1	2-4	4-11-3

4.1.2. Indice standardisé de précipitation (SPI-3)

Pour classer les six années d'études suivant le degré de sévérité, les deux trimestres mois Novembre-Décembre - Janvier de l'année étudiées et Février – Mars-Avril de l'année qui la suit ont été choisis. Ces deux cumuls de trois mois représentent la saison chaude, plus précisément la saison de pluie à Madagascar. (Figure 28, 29, 30, 31 OBS)

D'après les résultats du tableau 12 ci-après, Seules trois années consécutives donnent directement les résultats attendus, c'est-à-dire des années de sécheresse mais on ne peut pas affirmer pour les autres. Mais en s'appuyant sur les résultats précédents (SPI-1), les années satisfont les conditions de sécheresse. Les mois secs entre JFMA pour chaque année sont les suivants :

- 1981 : Avril-Janvier
- 1988, 1990, 1991 : Mars-Avril
- 1992 : Février-Mars-Avril
- 2002 : Mars

En combinant ces résultats avec les résultats de la SPI-1 et celle de la SPI-3, les six années d'études remplissent bien chacun les conditions d'année sèche.

Tableau 12 : Classification suivant la SPI-3 de chaque année d'étude

Stations/Années FMA/NDJ	1981	1988	1990	1991	1992	2002
Toliara	HM/HF	HM/HM	SM/SM	HM/SM	SM/HM	HM/HM
Taolagnaro	SM/HM	SM/HM	HM/SM	SM/HM	SM/SM	HM/HM
Fianarantsoa	HM/HM	HM/HM	SM/HM	HM/HM	HM /HM	SM/HM
Ranohira	HM/HF	SM/HM	SM/HM	HM/SM	SM/HM	HM/HM

HE : humidité extrême, **HF** : humidité forte, **HM** : humidité modérée, **SE** : sécheresse extrême, **SF** : sécheresse forte, **SM** : sécheresse modérée

4.1.3. Indice standardisé de précipitation (SPI-6)

Grâce à des pluies qui surviennent tous les six mois, les agriculteurs du Sud peuvent planter et récolter leurs cultures — habituellement des pommes de terre et du maïs — deux fois par an. Cela était suffisant pour leur permettre, à eux et à leurs familles, de tenir pendant les « saisons de la faim » d'où l'importance de l'étude de la sécheresse à l'échelle saisonnière. Le SPI-6 (sur six mois) pour le mois d'avril (NDJFMA) a été choisi pour voir si les années étudiées présentent bien de la sécheresse au Sud. C'est dans cette période que la majeure partie de la quantité de pluie tombée se concentre. Le tableau 13 suivant caractérise seulement le mois de Novembre et Décembre de chaque année étudiée, donc avant de tirer de la conclusion pour la sévérité de la sécheresse de chaque année étudiée et pour pouvoir prouver que ce sont des années sèches, des résultats de FMA de la SPI-3 et J(Janvier) de la SPI-1 seront utilisés. Presque toutes les années présentent « humidité modérée » sauf 1990, 1991 et 1992. Par analogie avec le raisonnement de la SPI-3, on voit que la sécheresse n'apparaît que pour les trois années consécutives.

Tableau 13: Classification suivant la SPI-6 de chaque année d'étude

Stations/Années	1981	1988	1990	1991	1992	2002
Toliara	HF	HM	HM	SF	HM	HM
Taolagnaro	HF	HM	SM	HM	SF	HM
Fianarantsoa	HF	HF	HM	HM	HF	HF
Ranohira	HF	HM	HM	HM	HM	HM

4.1.4. Indice standardisé de précipitation (SPI-12)

La SPI 12 de la fin du mois de Décembre (Janvier à Décembre) sera utilisée, cumul qui caractérise directement la sécheresse pour chaque année étudiée. Le tableau 14 permet d'affirmer les résultats suivants :

- 1981 : Chaque station indiquent une année humide sauf Fianarantsoa
- 1988,1991 et 1992 : Tous les stations affirment directement l'existence d'une sécheresse
- 1990 : Chaque station indique une année sèche sauf Fianarantsoa

- 2002 : Chaque station indique une année sèche sauf Taolagnaro

Presque tous les résultats mentionnent des années sèches sauf pour l'année 1981. Seule la station de Fianarantsoa marque l'existence d'une « sécheresse modérée ».

Tableau 14: Classification suivant la SPI-12 de chaque année d'étude

Stations/Années	1981	1988	1990	1991	1992	2002
Toliara	HM	SM	SM	SM	SF	SM
Taolagnaro	HM	SM	SM	SM	SM	HM
Fianarantsoa	SM	SM	HM	SM	SM	SF
Ranohira	HM	SF	SM	SF	SM	SM

Tableau 15 : Fréquence des années selon les classes de (SPI) [Figure 56, 57, 58, 59]

Stations	Nombre d'années	HE	HF	HM	SM	SF	SE	Année HE ou HF*	Année SE ou SF*
Toliara	45	2	3	15	21	2	0	1966/1968	1992*
Taolagnaro		2	3	19	17	3	1	1972	1993
Fianarantsoa		1	4	18	16	5	1	1969	2005
Ranohira		1	3	18	19	4	0	1982	1988*

Les données pluviométriques enregistrées au niveau des quatre stations de travail, à travers l'indice standardisé de précipitations, caractérisent une situation majoritairement dominée par une sécheresse modérée et dans une moindre mesure une sécheresse forte (tableau 15). Tous les postes de mesure ont globalement 40,5 % environ d'années de sécheresse modérée, et le plus fort taux est à 46,6% à Toliara. Les sécheresses extrêmes sont presque rares contre un nombre d'années relativement important pour la classe d'humidité extrême. Il apparaît néanmoins dans notre zone d'étude plus d'années d'humidité extrême que de sécheresse extrême (tableau 15)

A l'échelle temporelle, l'indice standardisé de précipitations, indiquant le caractère toujours irrégulier de la pluviométrie, met néanmoins en exergue des épisodes humides et des épisodes secs (figure 52-55). Pour l'ensemble des stations, les séquences sèches sont significativement plus longues que les séquences humides (figure 52-55). Globalement, on constate beaucoup de décennies sèches interceptées par une ou deux années humides. (Tableau 16).

Tableau 16 : les statistiques des années sèches et pluvieuses pour chaque décennie (SPI-12)

Les stations	période	Années sèches		Années normales		Années humides	
		Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
Toliara	1961-1970	3	30	4	40	3	30
	1971-1980	2	20	6	60	2	20
	1981-1990	4	40	4	40	2	20
	1991-2000	3	30	6	60	1	10
Taolagnaro	1961-1970	1	10	8	80	1	10
	1971-1980	0	0	8	80	2	20
	1981-1990	1	10	9	90	0	0
	1991-2000	1	10	7	70	2	20
Fianarantsoa	1961-1970	1	10	7	70	3	30
	1971-1980	2	20	8	80	0	0
	1981-1990	4	40	2	20	4	40
	1991-2000	3	30	7	70	1	10
Ranohira	1961-1970	1	10	3	30	6	60
	1971-1980	2	20	4	40	4	40
	1981-1990	5	50	1	10	4	40
	1991-2000	4	40	5	50	1	10

Le tableau16, confirme la persistance et l'abondance des années normales durant les quatre décennies pour chaque station d'étude dans le calcul de la SPI-12. Néanmoins, les décennies qui contiennent chaque année étudiée (1981, 1988, 1990, 1991,1992) présentent des pourcentages des années sèches supérieures à celle des pourcentages des années humides.

4.2. Indice d'écart à la moyenne (Em)

Comme l'indice d'écart à la moyenne c'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année, il a été utilisé pour caractériser les six années d'études. Le résultat suivant (tableau 17) mentionne : année sèche (**x**) et année humide (**o**). C'est une interprétation de la figure 60-63, chaque année étudiée présente une année sèche pour chaque station sauf pour l'année 1981 qui marque humide pour la station de Taolagnaro (221mm) et de Ranohira (236mm).

Tableau 17 : Classification suivant l'indice d'écart à la moyenne

STATION	1981	1988	1990	1991	1992	2002
Toliara	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
Taolagnaro	(o)	(x)	(x)	(x)	(x)	(o)
Ranohira	(o)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
Fianarantsoa	(x)	(x)	(o)	(x)	(x)	(x)

4.3. *Diagramme-ombrothermique*

Pour montrer des études plus poussées, les diagrammes ombrothermique des quatre stations étudiées pour la période entre 1961 et 2005 seront exploités. Certains résultats sont interprétés en se référant aux définitions et le tableau 4 du chapitre II.

Toliara

Le climat de cette région est proche d'un climat tropical si on se réfère au tableau 4. La période sèche se trouve entre le mois de Mars et le mois de Novembre. Les mois humides sont le mois de Janvier, Février et de Décembre. Cette période sèche correspond bien à la sécheresse météorologique d'après la définition de la chapitre deux de la partie un.

Taolagnaro

Le climat de cette région est un climat équatorial si on se réfère au tableau 4. Seule la période humide de Janvier jusqu'à Décembre est mentionné.

Ranohira

Le climat de cette région est proche d'un climat tropical en faisant référence au tableau 4. La période sèche se trouve entre le mois d'Avril et le mois d'Octobre, et deux périodes humide dont l'une entre Janvier jusqu'à Mars et l'autre de Novembre à Décembre sont aperçus.

Fianarantsoa

Le climat de cette région est proche d'un climat tropical tableau. La période sèche va du mois de Janvier jusqu'au mois d'octobre et la période humide de Novembre à Décembre.

Toliara

Amplitude thermique : 10,6

Température moyenne annuelle : 23 °C

Précipitation moyenne annuelle : 398 mm

Nombre de mois sec : 9

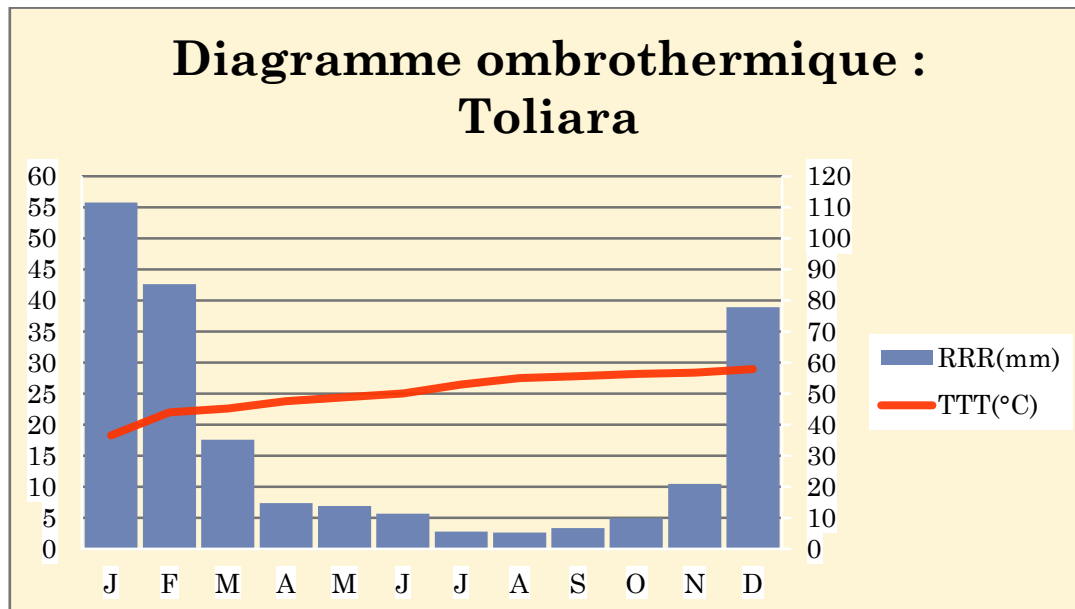


Figure 8 : Diagramme ombrothermique de Toliara entre 1961 et 2005

Taolagnaro

Amplitude thermique : 22,5

Température moyenne annuelle : 21 °C

Précipitation moyenne annuelle : 1591 mm/

Nombre de mois sec : 0

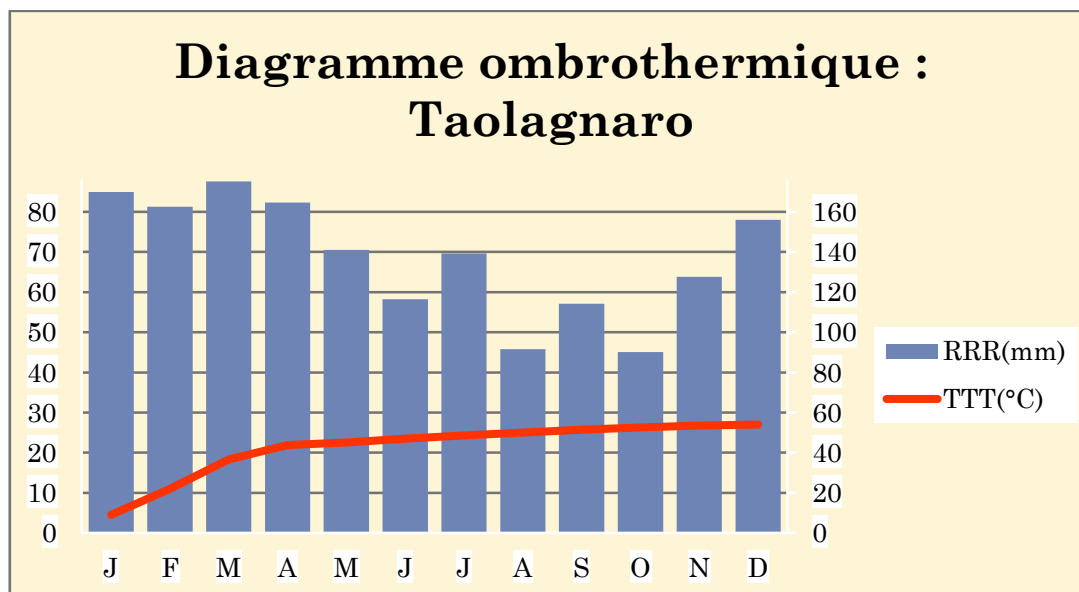


Figure 9 : Diagramme ombrothermique de Taolagnaro entre 1961 et 2005

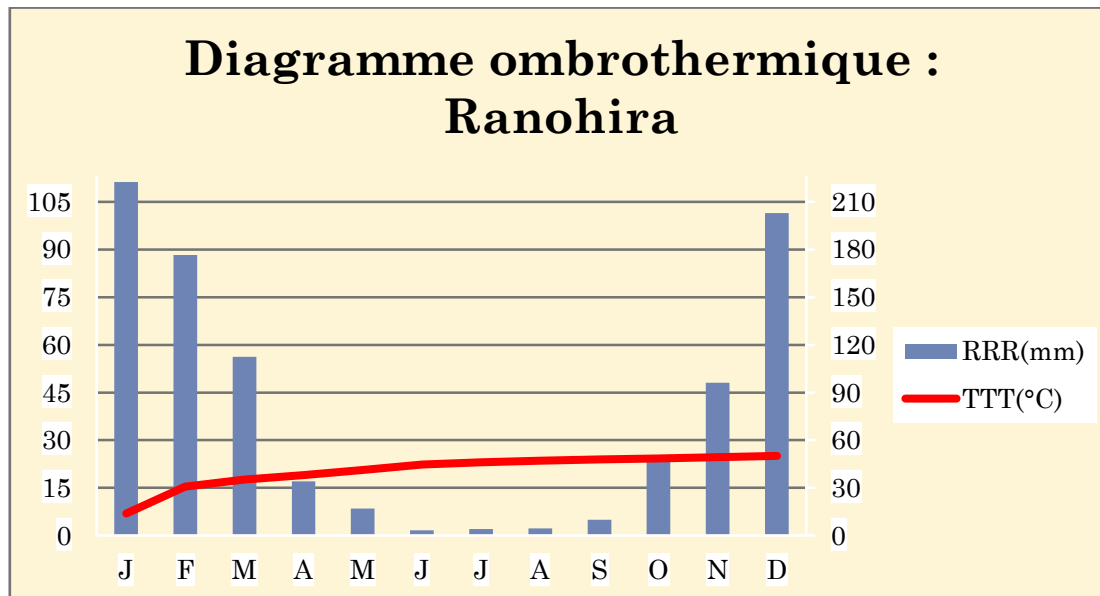
Ranohira

Amplitude thermique : 18

Température moyenne annuelle : 20,1 °C

Précipitation moyenne annuelle : 930,6 mm

Nombre de mois sec : 7

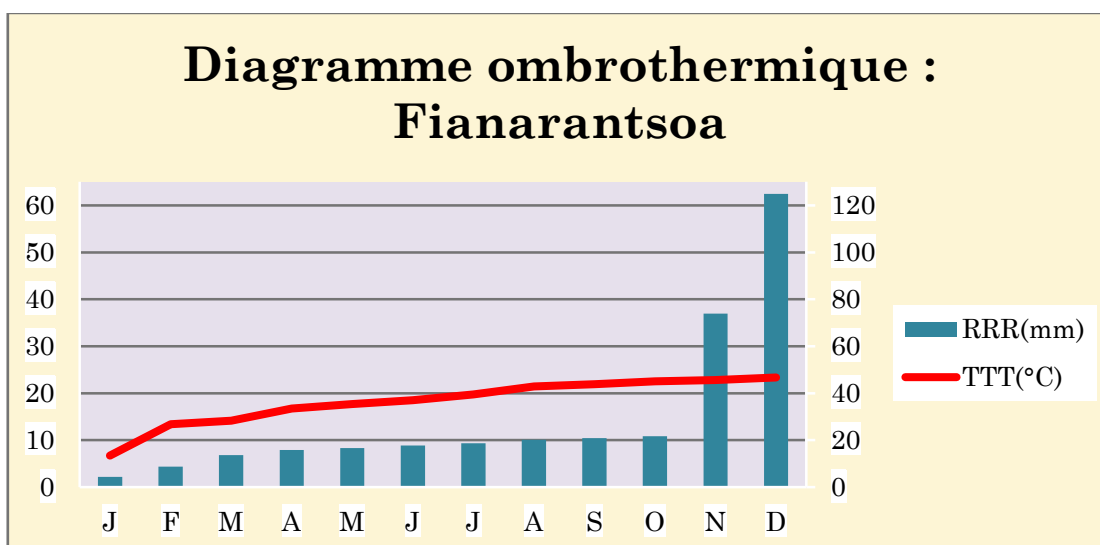
*Figure 10 : Diagramme ombrothermique de Ranohira entre 1961 et 2005***Fianarantsoa**

Amplitude thermique : 16,6

Température moyenne annuelle : 24,3 °C

Précipitation moyenne annuelle : 1115,7 mm

Nombre de mois sec : 10

*Figure 11: Diagramme ombrothermique de Fianarantsoa entre 1961 et 2005*

5. CONCLUSION

L'étude de la pluviométrie utilisant la combinaison des méthodes de calculs d'indice de précipitation standardisée à différentes échelles de temps des quatre stations, permet d'affirmer que presque toutes les années d'études connaîtraient bien de la sécheresse. C'est l'SPI-12 et l'indice d'écart à la moyenne qui caractérisent directement les années étudiées. Pour l'ensemble des stations, les mois de Janvier et de Décembre marquent une période humide et le mois d'Avril jusqu'à octobre une période sèche. Globalement, il a été démontré que ces années étudiées sont des années sèches même s'il existe quelques disparités au niveau des données stationnaires. Apparemment, ils répondent bien aux résultats de l'étude bibliographiques du contexte.

CHAPITRE VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DE LA SIMULATION AVEC RegCM4

Le premier objectif de ce chapitre vise à montrer la performance du modèle climatique RegCM4. L'utilisation de ce dernier est importante pour l'agriculture malgache qui reste encore étroitement tributaire du climat, en particulier le Sud. L'objectif final vise une meilleure gestion du milieu étudié face aux problèmes du changement climatique actuel en étudiant comme exemple la sécheresse.

1. STRATEGIE DE VALIDATION DES SORTIES DE REGCM4

Les tests effectués portent sur les sorties du modèle climatique avec RegCM4. Elles font sortir la simulation numérique du climat du sud de Madagascar et dans les conditions suivantes :

- Simulation de six années d'études : 1981 ; 1988 ; 1990 ; 1991 ; 1992 et 2002
- Résolution du modèle : 50km ;
- 15 points de repères en longitude et en latitude (soit 15*15) ;
- Domaine centré sur la partie sud de Madagascar (45.50°E ; 23.50°S).

A la fin de cette simulation, les données du modèle de la surface terrestre (SRF), plus précisément les précipitations mensuelles simulées en mm/j de chaque année d'étude créées par le modèle ont été récupérées. Il est bon de noter que le format binaire original des lignes de codes du modèle ne permet pas la récupération des données et qu'il a été nécessaire de modifier le programme source pour pouvoir le faire. Pour cela, la démarche utilisée est la suivante : Les données numériques du modèle et les données de références seront traitées à l'aide des logiciels GrADS (cf. § « d) Logiciels utilisés »). La manipulation de ce logiciel permet de représenter graphiquement les isohyètes de chaque mois des années étudiées. Cette dernière étape de représentations sera essentielle pour confronter les valeurs numériques et réelles. Ainsi, nous statuerons sur la précision du modèle climatique RegCM4 que nous voulons utiliser. GrADS possède une commande permettant de tirer les valeurs de précipitation simulée pour chaque station et chaque mois de l'année étudiée en utilisant les latitudes/ longitudes correspondant au tableau 10.

Le but est ensuite de comparer ce paramètre dans le calcul des indices de précipitation standardisée (SPI) à différentes échelles à des références (données d'observations).

2. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES PAR LA SIMULATION (ERA40)

L'étude s'est appuyée sur des données simulées : ERA40 (les données ré-analysées 1957-2002) qui sont des données disponibles : 4 h/jour (T, H, RH, U, V, W, Top)

☞ Caractéristiques générales :

ERA40 possède des caractéristiques générales des données disponibles en analyse et prévision aux 4 heures synoptiques (4 h/jour).

les caractéristiques générales des données de surface et 3D ERA40 rapatriées par l'IPSL

(Institut Pierre Simon Laplace) sont résumées ci-dessous :

-Grille régulière lat. /long 1.125 degré :

- Latitude : 90N, 90S / 1.125 degré soit 161 points de grille

- Longitude : 0E, 358.875E / 1.125 degré soit 320 points de grille

-Les paramètres 3D sont disponibles sur différentes résolutions verticales :

- 60 niveaux du modèle (1-60)

- 23 niveaux de pression : (1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 775, 850, 925 and 1000hPa).

- 15 niveaux isentropiques : (265, 275, 285, 300, 315, 330, 350, 370, 395, 430, 475, 530, 600, 700 and 850K).

- la surface PV=+/-2

-Fréquence temporelle pour les analyses : heure= 0, 6, 12, 18h

-Fréquence temporelle pour les prévisions : heure = 0, 6, 12, 18h et pas = 6 h

-Format : GRIB et Netcdf

☞ Les périodes de production

Les réanalyses sont produites selon trois périodes, définies par la disponibilité des données d'observation pour chaque période de temps :

- période 1 (1987-2001) : assimilation des observations les plus récentes (TOVS, SSM/I, ERS, ATOVS et CMW)
- période 2 (1957-1972) : observations anciennes seulement, période "pré-satellite"
- période 3 (1972-1988) : assimilation de quelques données satellite (VPTR, TOVS et CMW).

Des données d'ERA40 disponible de 1957090100 à 2002083118, de résolution 2.5°x2.5° (de T159L60), avec 23 niveaux de pression, en format netCDF seront utilisées pour avoir les données de la simulation de chaque année d'étude

3. TOPOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE

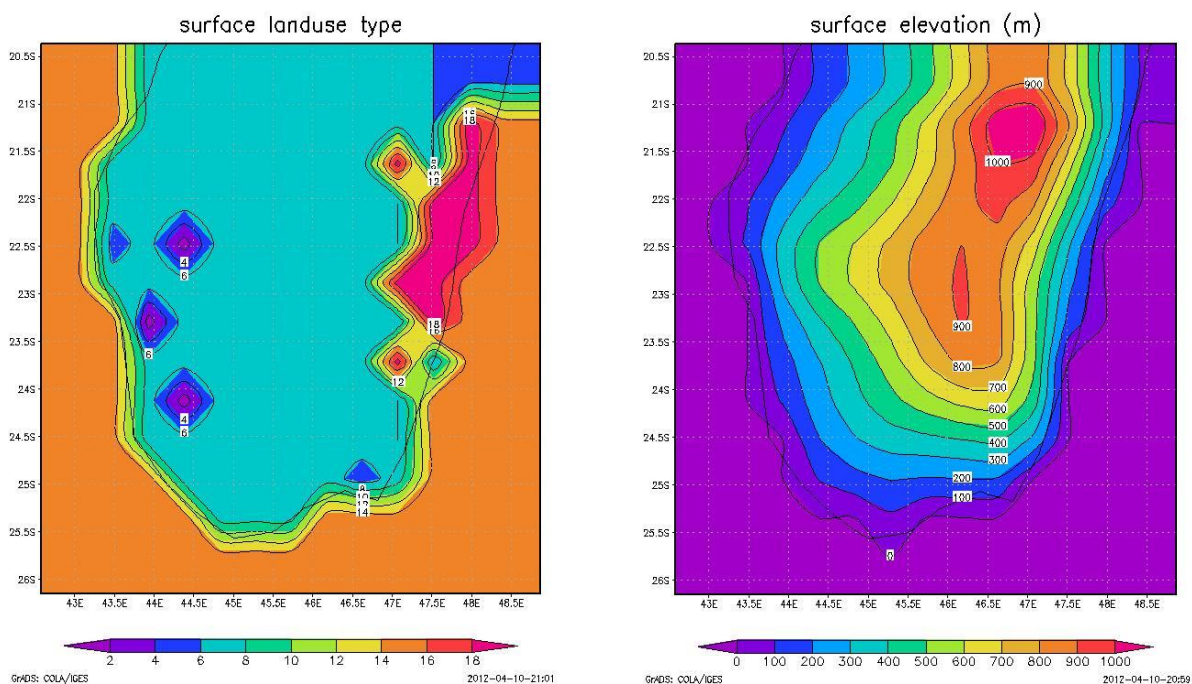


Figure 12 : Elévation de surface et type de couverture de la surface (BATS)

4. RESULTATS POUR LES STATIONS ETUDIEES

Tableau 18: Classification suivant les SPI de chaque année d'études : 1981, 1988, 1990 (RegCM4)

	SPI-1					SPI-3		SPI-6	SPI-12
	N	D	J	F	M	NDJ	FMA	NDJFMA	J-D
1981									
Toliara	SM	SM	SM	HM	HM	SM	HM	SF	SM
Tao/gnaro	SF	SF	SF	SM	SM	SF	SF	SF	SF
Ranohira	SF	SF	SM	HM	HM	SM	HM	SF	SF
Fia/tsoa	SM	SM	SM	HM	HM	SF	HM	SF	SF
1988									
Toliara	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SF	SF
Tao/gnaro	SF	SF	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SF
Ranohira	SF	SF	SM	SM	SM	SM	SF	SF	SE
Fia/tsoa	SM	SM	SM	SM	SF	SF	SF	SF	SE
1990									
Toliara	SM	SM	SM	HM	HM	SM	SM	SM	SM
Tao/gnaro	SM	SM	HM	SM	SM	SF	SF	SF	SF
Ranohira	SM	SM	SM	SM	SM	SF	SF	SF	SF
Fia/tsoa	SM	SM	SM	SM	SM	SF	SF	SF	SE

Tableau 19: Classification suivant les SPI de chaque année d'études : 1991, 1992, 2002
(RegCM4)

	SPI-1					SPI-3		SPI-6	SPI-12
	N	D	J	F	M	NDJ	FMA	NDJFMA	J-D
1991									
Toliara	SM	SM	SM	HM	SM	SM	SM	SF	SF
Tao/gnaro	SM	SM	SM	SM	SM	SF	SF	SF	SF
Ranohira	HM	SM	SM	SM	SM	HM	SM	SF	SE
Fia/tsoa	SM	SM	SM	SM	HM	SF	SM	SM	SF
1992									
Toliara	SM	SM	SM	SM	SM	HM	SM	HM	SF
Tao/gnaro	HM	SM	SM	SM	SM	HM	SM	HM	SE
Ranohira	SM	SM	HM	SM	SM	SM	SM	HM	SE
Fia/tsoa	SM	SM	SM	SM	HM	SM	SM	SF	SF
2002									
Toliara	SM	SM	SM	HF	SM	SM	SF	SF	SF
Tao/gnaro	SM	SM	HF	SM	SM	SF	SF	SE	SF
Ranohira	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SE	SE
Fia/tsoa	SM	SM	SM	SM	SM	SF	SF	SF	SF

4.1. Mois sec (N, D, J, F, M)

Les mois secs correspondant à chaque station étudiée se trouvent dans la colonne de SPI-1. Tableau 18, 19. (SM : sécheresse modérée, SF : sécheresse forte, HM : humidité modérée, HF : humidité forte, SE : sécheresse extrême) Figure 24 à 27

- 1981 : Globalement, les mois secs se résument aux mois de Novembre, Décembre et Janvier. Le mois de février présente un mois modérément humide pour chaque station sauf pour Taolagnaro.
- 1988 : Tous les mois marquent 'mois sec' pour toutes les stations.
- 1990 : Chaque mois présente 'mois sec' sauf le mois de Février et Mars (Toliara) et Janvier (Taolagnaro).
- 1991 : Il n'y a que trois mois humides : Février (Toliara), Novembre (Ranohira) et Mars (Fianarantsoa). Les restes sont des mois secs.
- 1992 : Trois mois modérément humides pour les quatre stations : Novembre (Taolagnaro), Janvier (Ranohira) et Mars (Fianarantsoa).
- 2002 : Deux mois sévèrement humides : Février (Toliara) et Janvier (Taolagnaro)

4.2. Cumul sur une période de trois mois (NDJ/FMA)

Ce cumul se trouve sur la deuxième colonne (SPI-3) du tableau 18, 19. Pour le cumul de mois de Janvier (NDJ), toutes les stations mentionnent sécheresse sévère et sécheresse modérée sauf Ranohira 1991 et Toliara et Taolagnaro 1992 qui présentent un mois modérément humide. De même, parmi tous les mois des six années d'études, seulement trois mois présentent un mois modérément humide pour le cumul de mois d'Avril (FMA): Toliara, Ranohira, Fianarantsoa (1981), mais en combinant les résultats marqués par NDJ et FMA, la sécheresse a été aperçue à l'échelle intra saisonnière. (Figure 28-31)

4.3. Modèle de précipitation à moyen terme (NDJFMA)

Nous nous référons à la colonne des SPI-6 du Tableau 18, 19. Chaque station présente des cumuls de la fin de mois d'Avril sévèrement sèche pour chaque année étudiée sauf pour Toliara, Ranohira et Taolagnaro 1992. (Figure 32-35)

4.4. Caractérisation des années sèches (J-D)

Il s'agit de l'indice de précipitation standardisé en fonction de l'échelle interannuelle (SPI-12), le cumul de la fin de mois de Décembre a été choisi et le résultat était satisfaisant. Toutes les années étudiées marquent sécheresse forte (SF) ou sécheresse extrême (SE) pour chaque station étudiée. (Figure 36-39)

5. COMPARAISON ET INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS AVEC

L'OBSERVATION

La comparaison des résultats obtenus dans les calculs de la SPI-12 et SPI-6 à différentes échelles dans les deux cas (OBS et RegCM4) permet d'évaluer l'efficacité du modèle testé (figure 32-39). Les confrontations des résultats de SPI-6 et SPI-12 pour les deux méthodes utilisées, (c'est-à-dire l'un qui manipule les données réelles de précipitation et l'autre des données simulées par le modèle climatique RegCM4) de chaque station étudiée sont présentées dans un même graphique pour mieux voir les différences [fig.13-20]. Seul l'indice standardisé de précipitation à l'échelle interannuelle et à l'échelle saisonnière a été utilisé pour cette comparaison en vue de la caractérisation des années de sécheresse.

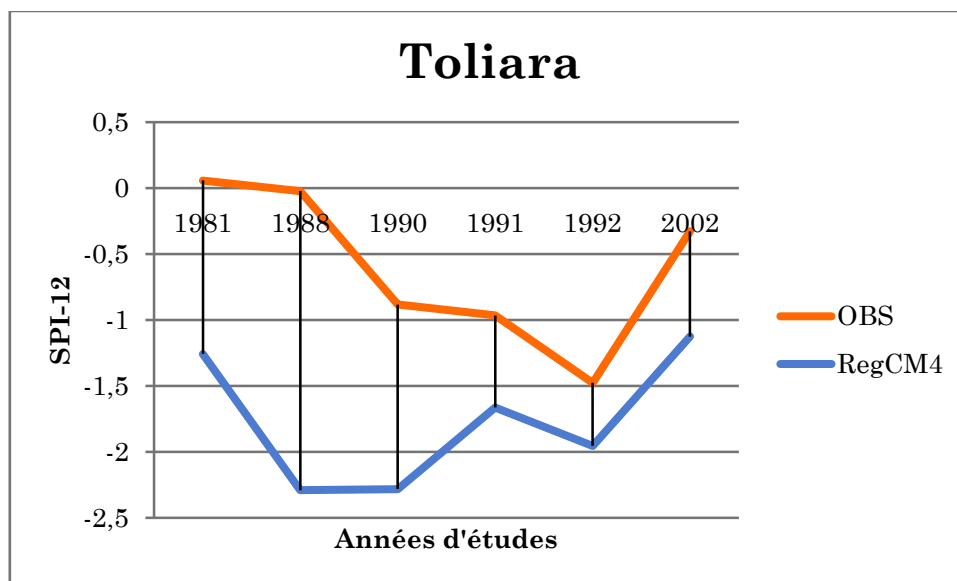
➤ Observations

Globalement, pour chaque année étudiée, en ce qui concerne les quatre stations (Toliara, Ranohira, Fianarantsoa et Taolagnaro), tous les résultats simulés par le modèle de la surface de la terre (SRF) dans le calcul des SPI (6-12) mentionnent des sécheresses graves (SF ou SE). Contrairement au modèle, les SPI calculés à partir des données réelles indiquent des saisons modérément humides (SPI-6) parfois (SPI-12) pour certaines années. Visiblement, l'allure des deux courbes (Bleu : OBS ; Rouge : RegCM4) de SPI comparée [fig. 13-20] sont presque les mêmes. Leurs différences se trouvent au niveau du degré de la sécheresse.

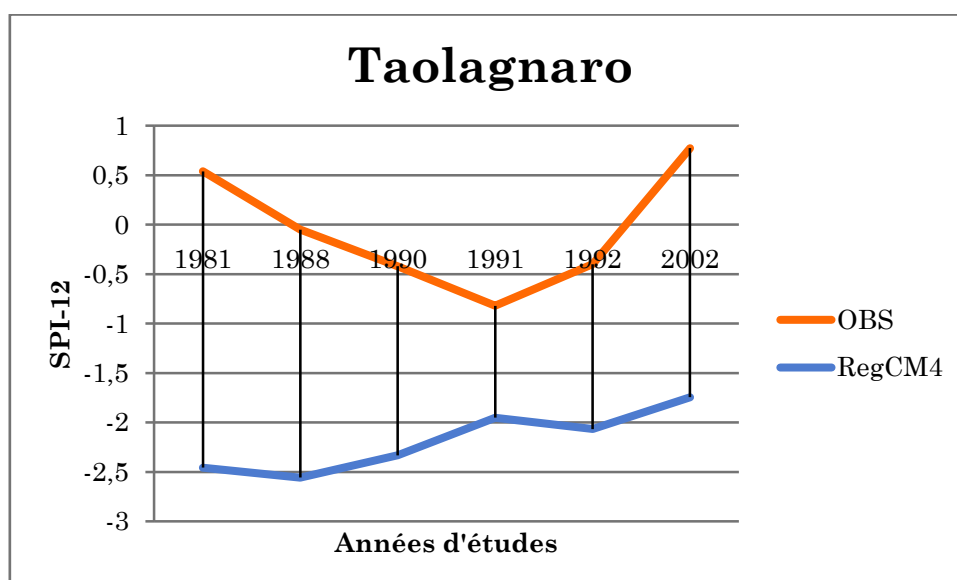
➤ Interprétations

Les résultats montrent des comportements pluviométriques différents entre les deux méthodes en se référant aux calculs des SPI-12 et SPI-6. L'erreur peut être due à deux causes différentes : L'une la configuration du modèle et l'autre l'absence de données de précipitations réelles pour certaines années de la période 1961-2005. La précision du modèle dépend de sa résolution, le nombre de points de grille utilisés par la simulation, la configuration du paramètre physique et aussi la résolution des données (ERA40). [Table.30].

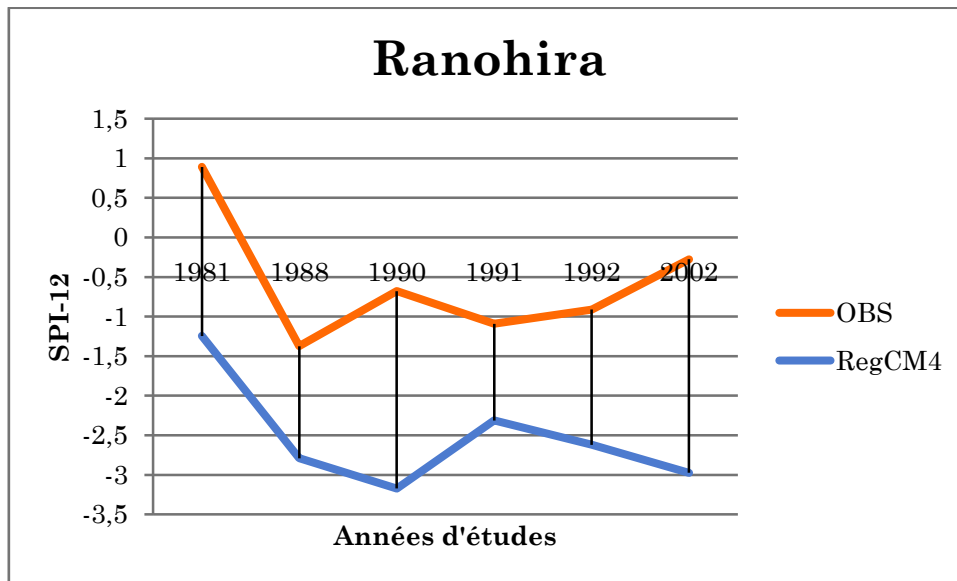
Les figures suivantes illustrent bien les différences entre les résultats des SPI (6/12) sortis par le modèle climatique RegCM4 et calculé en utilisant des données d'observation :



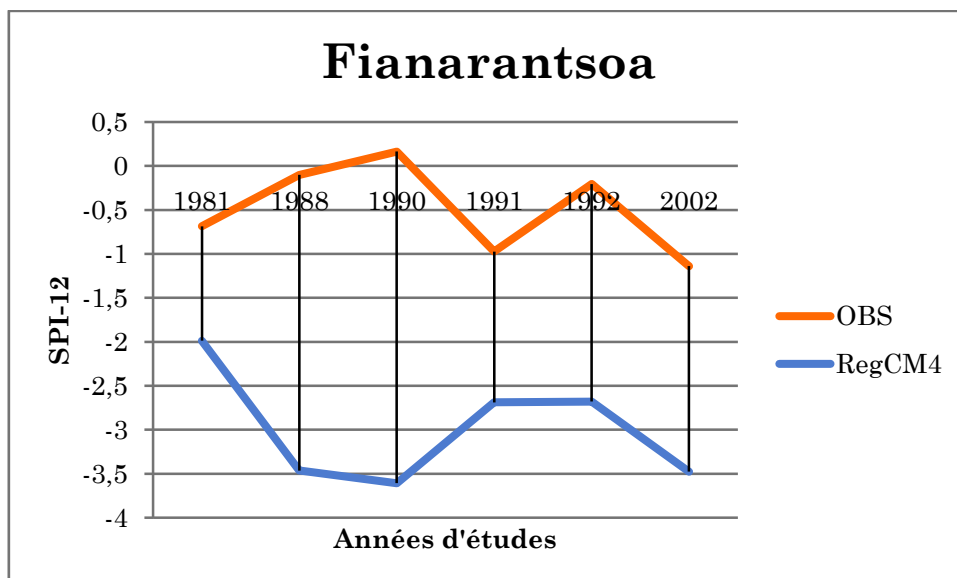
*Figure 13 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Toliara :
RegCM4/OBS*



*Figure 14 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Taolagnaro :
RegCM4/OBS*



*Figure 15 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Ranohira :
ReqCM4/OBS*



*Figure 16 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-12) Fianarantsoa :
ReqCM4/OBS*

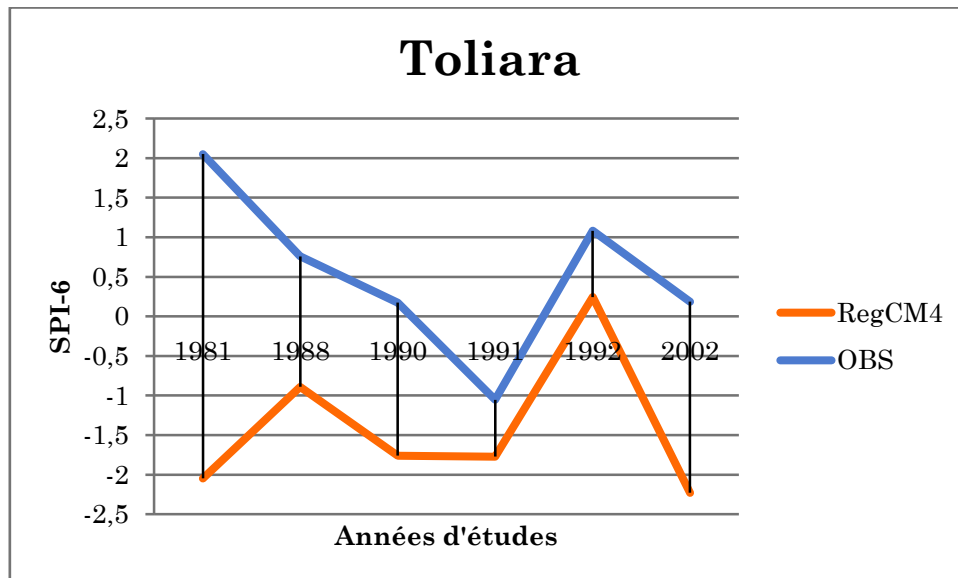


Figure 17 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Toliara : RegCM4/OBS

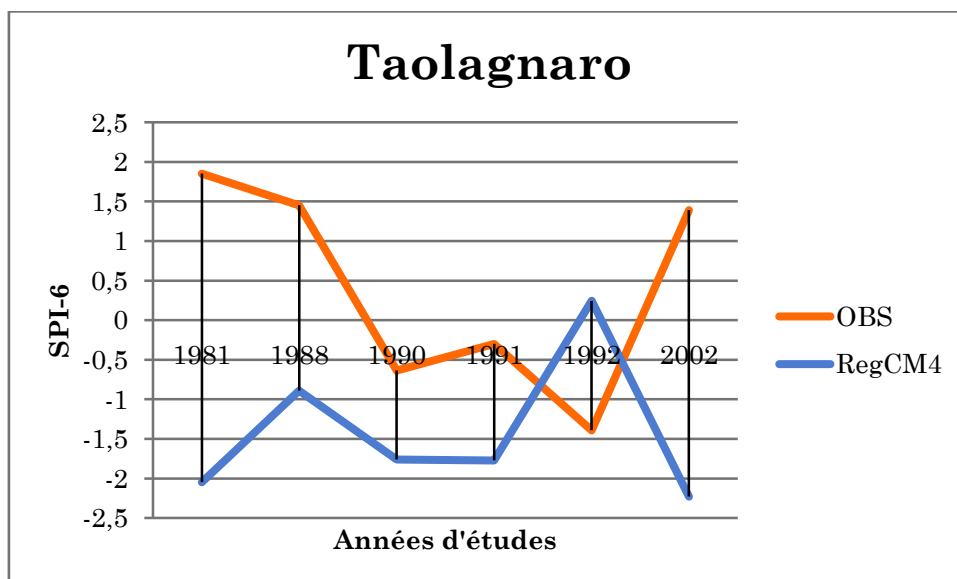
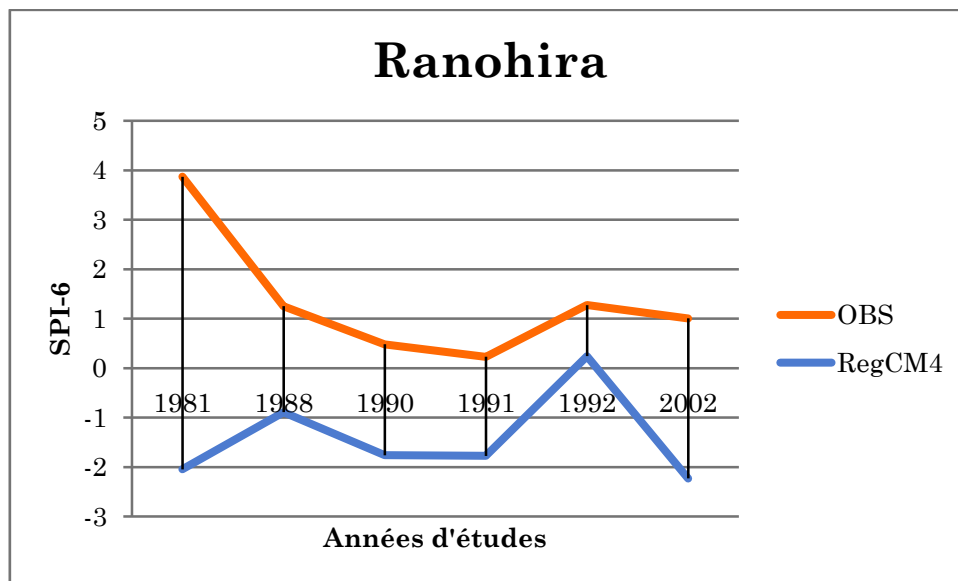
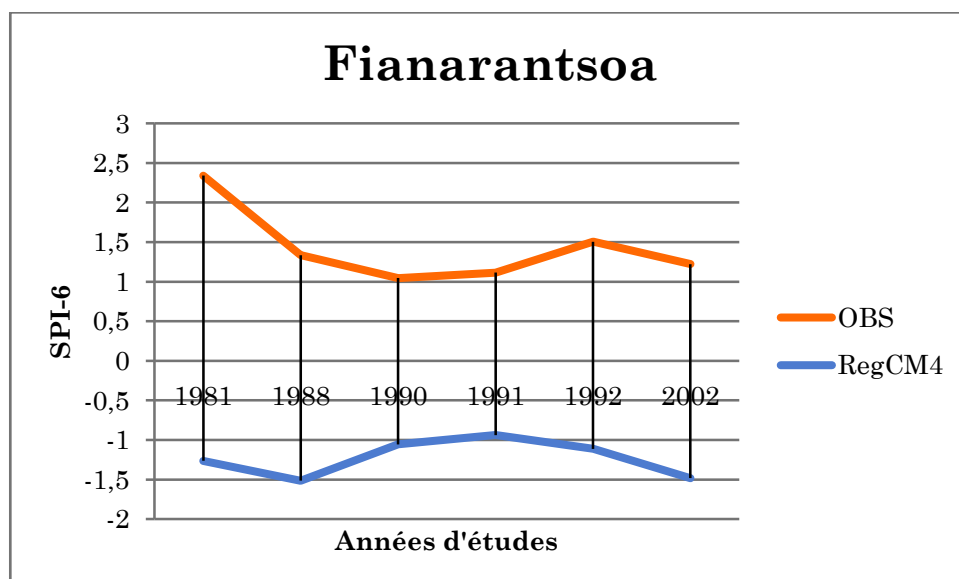


Figure 18: Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Taolagnaro : RegCM4/OBS



*Figure 19: Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Ranohira :
RegCM4/OBS*



*Figure 20 : Comparaison de l'indice de précipitation standardisé (SPI-6) Fianarantsoa :
RegCM4/OBS*

6. CONCLUSION

Dans un premiers temps, la simulation était faite pour six années d'études différentes avec une résolution de cinquante kilomètres et quinze points de repères en longitude et en latitudes. Le domaine est centré sur la partie sud de Madagascar. Les données utilisées par le modèle sont de : ERA40 (les données ré-analysées 1957-2002) qui sont des données disponibles : 4 h/jour. Les résultats de SPI (1/3/6/12) sont obtenus en utilisant les données de précipitation simulées par RegCM4 et récupérées par manipulation du logiciel GrAds. En comparant les SPI (6/12) du modèle climatique RegCM4 et l'observation des quatre stations étudiées, on a constaté que la différence se trouve au niveau de la sévérité de la sécheresse. On la doit à l'erreur de précision du modèle, sa configuration, mais aussi à la résolution des données utilisées (ERA40) et des données manquantes pour quelques années en ce qui concerne l'observation. Pour cela, est-ce que la modification de la configuration du modèle serait une solution ? C'est le but du chapitre suivant

CHAPITRE VII. MODIFICATION DE QUELQUES PARAMETRES

Cette partie consiste à déterminer l'influence de la réduction de la résolution de la grille du modèle et la modification de la couverture végétale sur la précision des résultats simulés par le modèle climatique RegCM4.

1. NOUVELLE CONFIGURATION

Cette nouvelle configuration sera appelée « configuration 2 » et l'ancienne configuration (annexe : table 30) : « configuration 1 ». On va modifier la configuration du domaine et nous nous limiterons aux schémas ci-dessous :

➤ La date de début de la simulation (année, mois, jour, heure, UTC) est de `globidate1 = 2002010100` et la date de fin de la simulation : `globidate2=2002013000`

➤ Pour la résolution de la grille du modèle, prenons `ds = 45 km`. Celle-ci va entraîner la configuration des pas de temps suivants [tableau 25]:

Pas de temps pour le modèle atmosphérique en seconde `dt =150 secondes`

Pas de temps pour le modèle de surface terrestre en seconde `abatm=300 secondes`

Pas de temps pour l'observation/émissivité en heure `abemh = 18 h`

Pas de temps pour le modèle de rayonnement en minute `radfrq = 30 mn`

➤ La résolution des données en entrée (terrain et occupation de terre) en minute est de `nstypec=11(semi-désert)`, le modèle de processus terrestre dans RegCM4 (SRF) est assuré par le modèle BATS1e qui contient 20 types des occupations de terrains représentés dans le tableau 27 et la résolution des données en entrée (subgrid) n'est pas modifiée. La valeur « true » a été affectée aux paramètres suivants : `smthbdy` (extra-lissage aux frontières) ; `lakadj` (ajuste les niveaux de lacs à l'observation) ; `fudge_Ind` (Ajustements d'UTILISATION de la TERRE) ; `fudge_tex` (Ajustements de TEXTURE).

2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

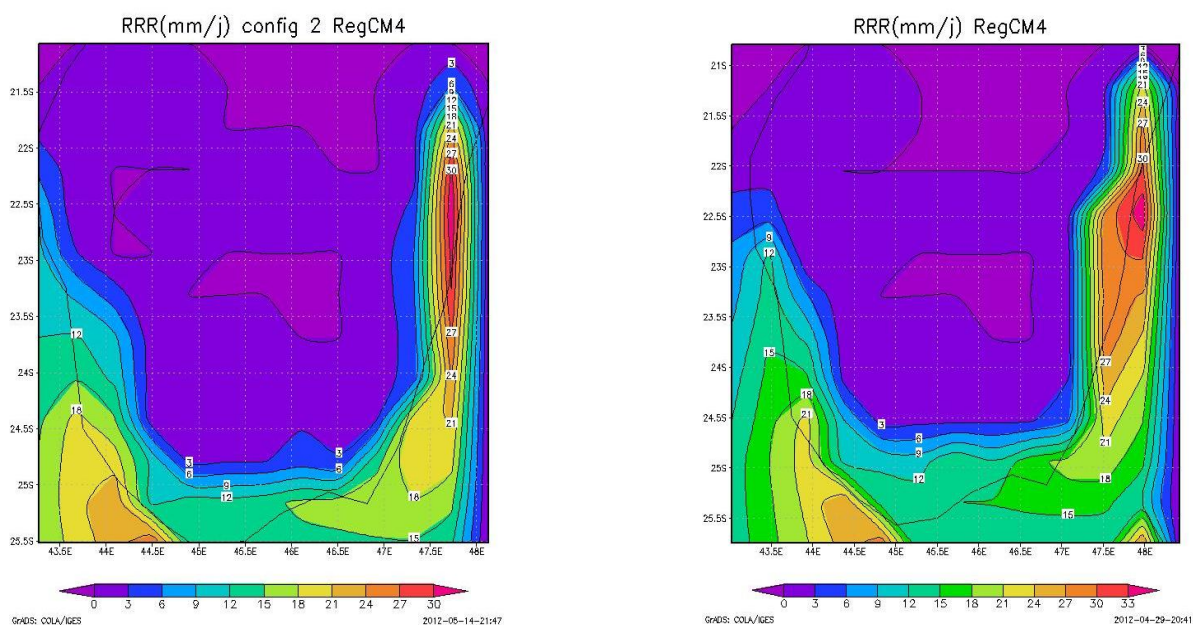


Figure 21: Confrontation graphique des résultats de précipitation (mm/j) simulée par RegCM4 du mois de janvier 2002 : à gauche configuration 2 ; à droite configuration 1

Tableau 20 : Valeur de la précipitation en mm/j : [Données réelles](#) du mois de Janvier 2002

STATIONS	Précipitation en mm/j
Toliara	5,76
Taolagnaro	7,94
Ranohira	6,17
Fianarantsoa	6,52

Tableau 21: Valeur de la précipitation en mm/j ([configuration 1](#)) : Données simulées du mois de Janvier 2002

STATIONS	Précipitation en mm/j
Toliara	6,3
Taolagnaro	19,3
Ranohira	2,5
Fianarantsoa	0

Tableau 22: Valeur de la précipitation en mm/j ([configuration 2](#)) : Données réelles du mois de Janvier 2002

STATIONS	Précipitation en mm/j
Toliara	8,4
Taolagnaro	17,3
Ranohira	2
Fianarantsoa	0

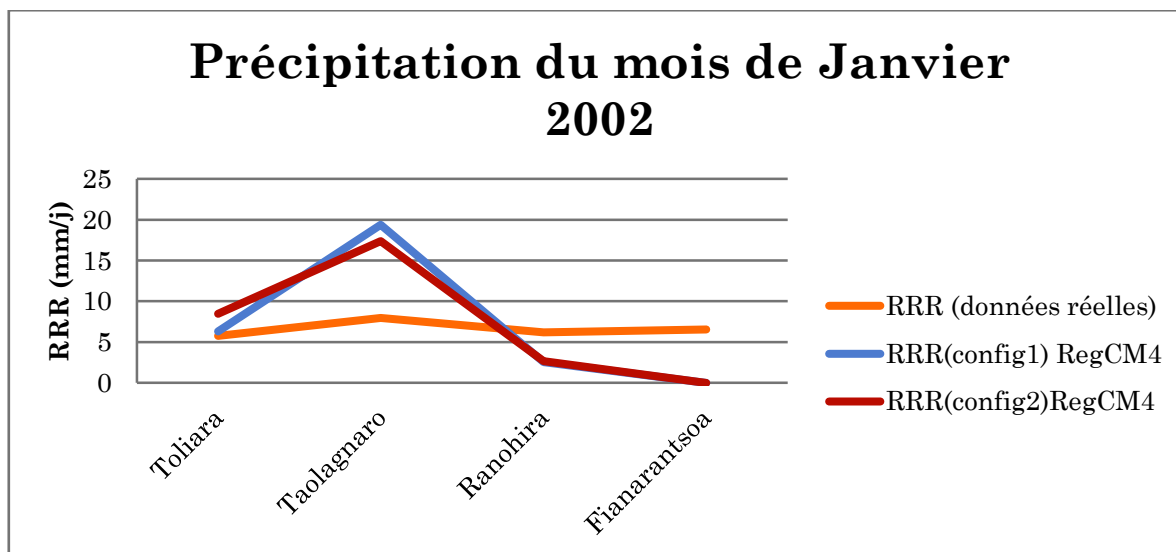


Fig. 22 - Changements simulés des précipitations : configuration 1, configuration 2 et données réelles du mois de Janvier 2002 (modèle RegCM4)

La figure 21 représente la différence entre la précipitation en mm/j simulée par le modèle climatique RegCM4 du mois de Janvier 2002 (configuration1, configuration2) après avoir modifié la résolution des données en entrée et la résolution de la grille du modèle. On constate qu'il n'y a pas de grand changement, mais par rapport à la configuration1 le résultat de la configuration 2 est plus proche du réel. La réduction de la résolution de la grille du modèle réduit donc l'écart entre la courbe représentative de la configuration1 et celle de la donnée réelle, à cause du changement de type de couverture et d'utilisation de terrain définis par BATS (chapitre III 2.2.2) (tableau 27). En ce qui concerne la précipitation simulée, on peut affirmer donc que le modèle RegCM4 tient compte des effets du relief, mais comme la zone d'étude n'est pas très étendue, l'effet de la circulation générale est moins perçu.

3. CONCLUSION

Les observations présentées ci – dessus permettent de dire que :

Choix de domaine

Le domaine du modèle devrait être assez grand pour inclure des circulations et des forçages appropriés pour permettre au modèle de développer entièrement sa propre dynamique interne.

Choix de résolution

La résolution du modèle devrait être suffisante pour capturer des forçages appropriés et pour fournir des informations utiles pour des applications données.

Un compromis doit être généralement atteint entre la taille du domaine et la résolution du modèle.

Il a été démontré que les résultats du modèle dépendent généralement de la configuration. Bien que cette dépendance doive être rendue minimale, il n'y a aucune règle précise pour le choix de la configuration du modèle. RegCM4 est caractérisé par un certain niveau de la variabilité interne dû à la non-linéarité du modèle.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude de sensibilité du modèle régional du climat RegCM4 a démontré que ce modèle reproduit la majorité des caractéristiques climatiques de la précipitation dans les stations étudiées à l'échelle saisonnière, intrasaisonnière, interannuelle et mensuelle dans les calculs de l'indice de précipitation standardisé (SPI). Nous avons étudié la performance du modèle à simuler les précipitations des années 1981,1988,1990,1991,1992 et 2002 des quatre stations synoptiques du Sud dont Tuléar, Taolagnaro, Ranohira et Fianarantsoa. Quatre méthodes suivant ces quatre échelles ont été utilisées pour caractériser la sécheresse selon la sévérité. La manipulation des données réelles (1961-2005) a été bien réussie, les résultats montrent que l'étude des cas précédents répond très bien au contexte général. La combinaison des calculs des indices de sécheresse comme l'indice standardisé de précipitation et l'indice d'écart la moyenne, ainsi que la construction du diagramme ombrothermique ont permis de montrer que ces six années d'études sont bien des années sèches. Des données de réanalyses, qui sont des données disponibles 4 h/jour ont été utilisées pour faire une simulation avec le modèle climatique régional RegCM4 de ces six années d'études. Une configuration nommée «configuration 1» était utilisée pour la première expérience ; dans ce cas, la confrontation des résultats simulés dans le calcul de la SPI avec celle de données réelles a montré qu'ils concordent très bien, mais une petite différence a néanmoins été aperçue au niveau de la précision dont les causes ne sont que la résolution des données utilisées par RegCM4 (occupation du sol, végétation) ainsi que la résolution de la grille du modèle. On a utilisé une configuration appelée «configuration 2» et de façon générale la simulation du modèle est plus réaliste en termes de précipitation que celle fournie par la « configuration 1 ». On a pu démontrer que les résultats du modèle dépendent généralement de la configuration. En tant qu'apport théorique, on pourrait affirmer que le domaine du modèle devrait être assez grand pour inclure des circulations et des forçages appropriés et pour permettre au modèle de développer entièrement sa propre dynamique interne et sa résolution devrait être suffisante pour capturer des forçages appropriés et pour fournir des informations utiles pour des applications données. Le modèle climatique RegCM4 est efficacement employé par une grande communauté des scientifiques car il est facilement portatif de différentes plateformes d'ordinateur. La recherche de niveau avancé peut être effectuée en utilisant le matériel informatique relativement peu coûteux. Disponible : <http://www.ictp.it/~pubregcm>. Le RegCM4 est employé pour une grande variété d'études : simulations, impacts régionaux de changement de climat, étude de processus, effets des aérosols, changement d'utilisation du territoire et simulations de Paléoclimat. Des questions liées aux modèles régionaux de climat se posent : Peut-on mesurer les différentes et collectives erreurs dans des simulations de modèles régionaux?

Peut-on mesurer l'erreur liée aux états de frontière latéraux?

Peut-on redresser la valeur supplémentaire liée aux modèles régionaux de climat?

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet

- [1] ETIENNE TOURIGNY, maîtrise en sciences de l'atmosphère « analyse de performance d'un modèle régional du climat a simuler la variabilité de la précipitation associée au forçage enso dans les tropiques americaines ».Octobre 2008
<http://www.meeft.gov.mg>
- [2] Mémoire de fin d'étude, Avril 2006 « contribution a l'étude de la sécheresse et de l'aridité dans le Sud de Madagascar », RAZAFIMAHATRATRA Nirina Harisoa
- [3] Notice climatologique de Madagascar 1970 : publication de la Météorologie Nationale. nouvelle régionalisation climatique de Madagascar
- [4] Williams J.B., 1990: Some temporal and regional variations of climate in Madagascar. Fmal report ONDRI
- [5] Mohamed BERGAOUI, Aws ALOUINI, IRESA, 30, rue Alain-Savary, 1002 Tunis, Tunisie.. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie
- [6] Martin chourrout et al. « La sécheresse au Sahel, un exemple de changement climatique » Année universitaire 2004-2004 5 Atelier Changement Climatique ENPC-Département VET
- [7] Nellie Elguindi, et al. International Centre for Theoretical Physics Strada Costiera, 11 I - 34151 Trieste, Italy Trieste, May 2011 Earth System Physics Section – ESP “Regional Climatic Model RegCM User Manual Version 4”
eforge.science-lab.org/.../docmanfileversion/.../R...
- [8] OMM, 1990: Guide des pratiques climatologique. OMM. n° 100
- [9] Stage réalisé à l'Université de La Réunion, Faculté des Sciences et Technologiques Encadrés par : M. Bessafi, Professeur et responsable du M1 B. Morel, Maitre de conférences
- [10] Géographie, climat et météo Madagascar (pdf)
- [11] MISE EN OEUVRE DE LA DECLARATION DE LIBREVILLE A MADAGASCAR (analyse situationnelle estimation des besoins en sante et environnement)(pdf)
www.afro.who.int/index.php?option=com_docman&task..
- [12] « une méthodologie pour caractériser la sécheresse » WWW.manuscrit.com
- [13] « Stratégie Nationale de Gestion des Risques et des Catastrophes Antananarivo, Madagascar » www.primature.gov.mg/cpgu/webfiles/SNGRC.pdf

- [14] Abdallah Aghrab « Etude de la sécheresse au Maroc »
(Types, impacts, gestion, caractérisation et alerte précoce), 2006 : 119 p.
www.manuscrit.com/book.aspx?id=4821 – France
- [15] Yevjevich V. An objective approach to definitions and investigation of continental hydrologic drought. Hydrology paper n° 23, Colorado State University, 1976. www.waset.org/journals/waset/v70/v70-48.pdf
- [16] Serveur du centre de données de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) Science de l'environnement/ IPSL-Centre de Données
- [17] www.ipsl.fr/Organisation/A-propos-de-l-IPSL
- [18] Des " données d'ECMWF ERA-40 utilisées dans ce study/project ont été fournies par ECMWF/have obtenu à partir du serveur de données d'ECMWF."
- [19] dataipsl.ipsl.jussieu.fr/data-ipsl/les-donnees-ecmwf-era40.html

ANNEXES

ANNEXE I : FIGURES N° 23 A 64	A[1]
ANNEXE II : LOGICIEL UTILISE	A[28]
ANNEXE III : TABLEAUX N° 23 A 33.....	A[30]
ANNEXE IV: FICHIERS DE CONTROLE	A[38]

ANNEXE I : FIGURES N° 23 A 64

Figure 23 : L'organigramme de la stratégie de l'étude

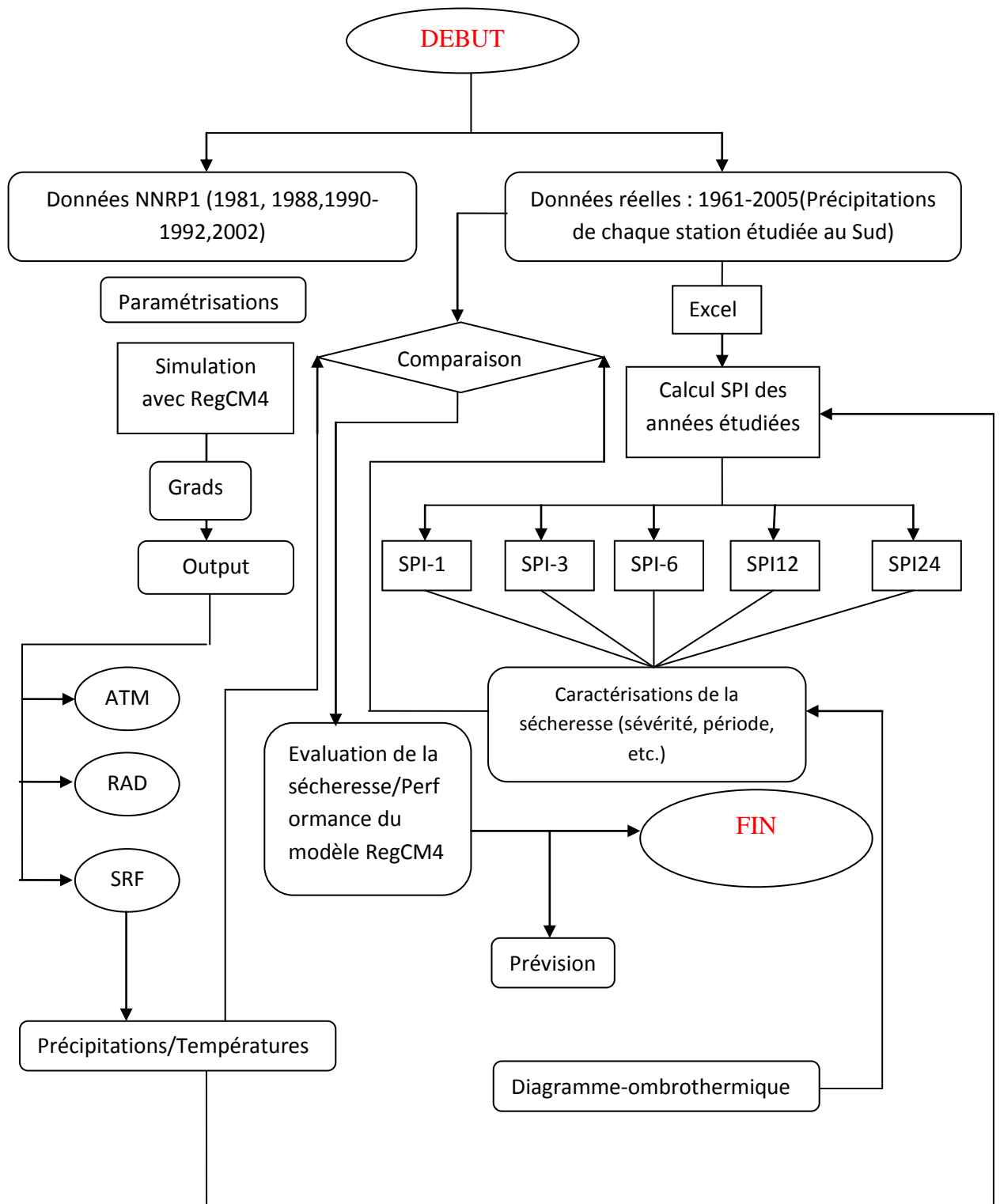


Figure 24 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-1) (Observé-RegCM4)

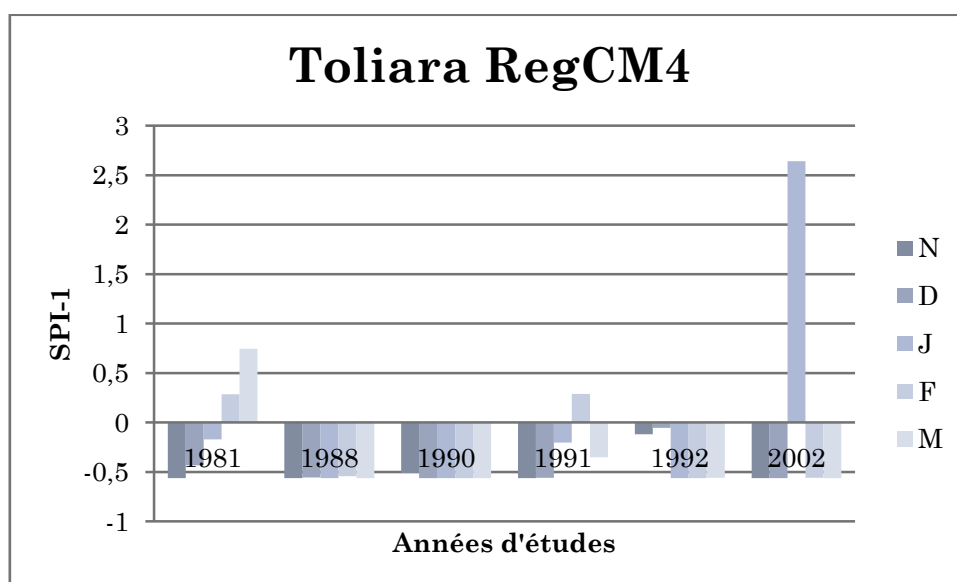
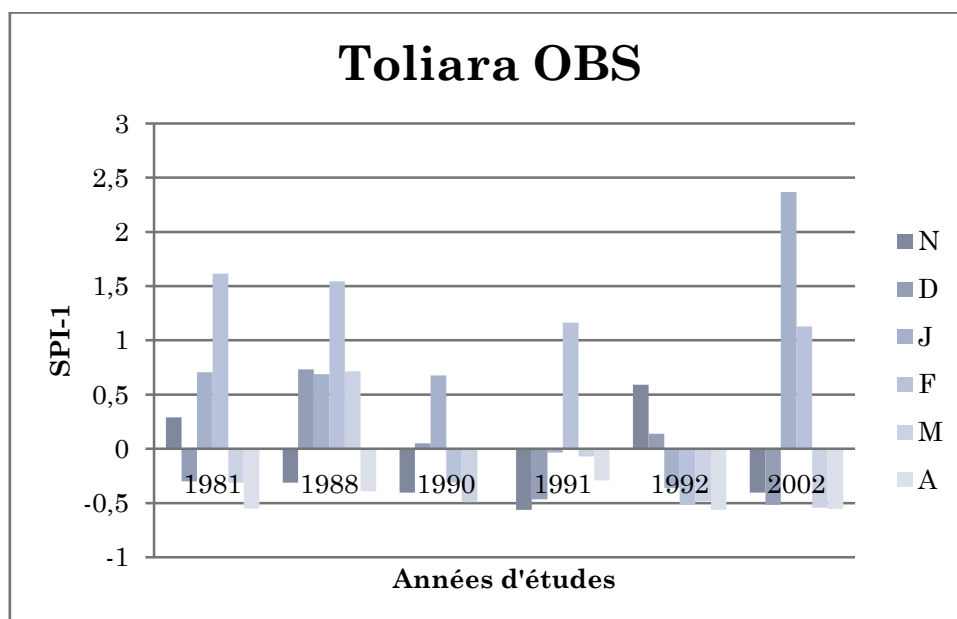


Figure 25 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-1) (Observé-ReqCM4)

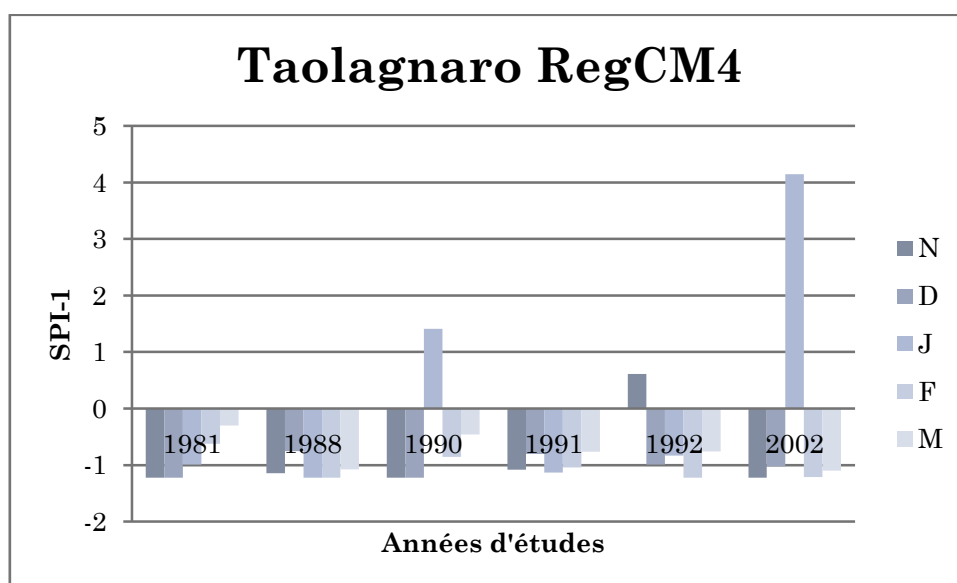
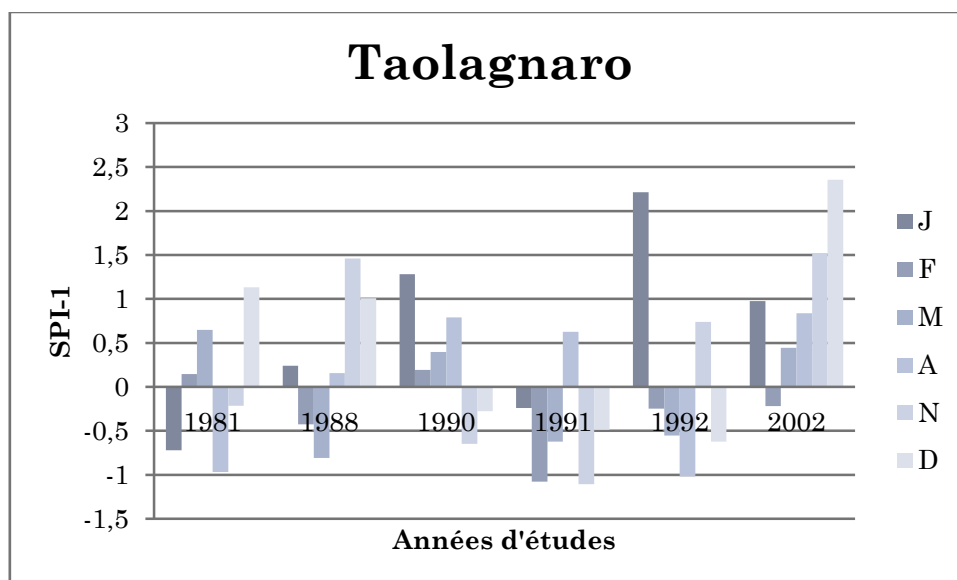


Figure 26 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira (SPI-1) (Observé-RegCM4)

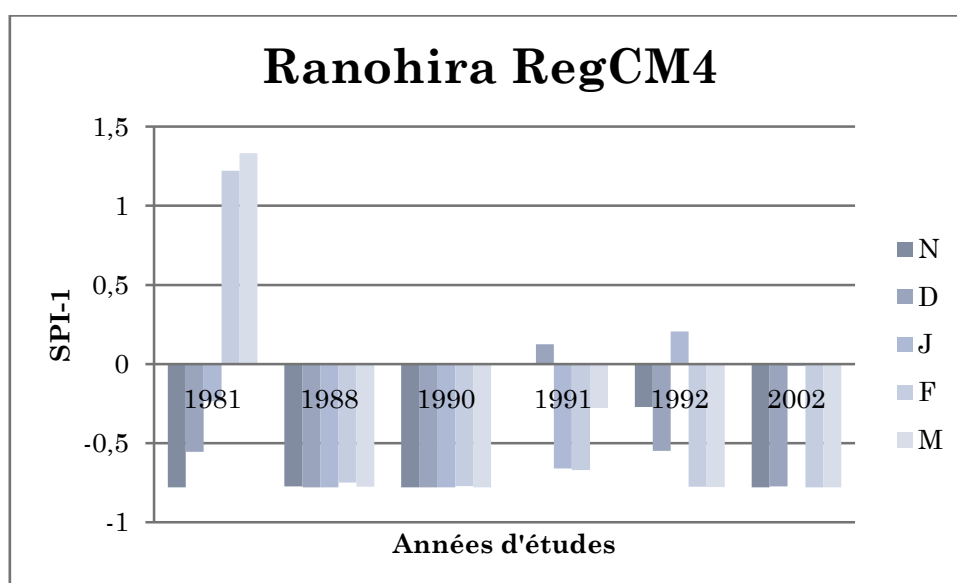
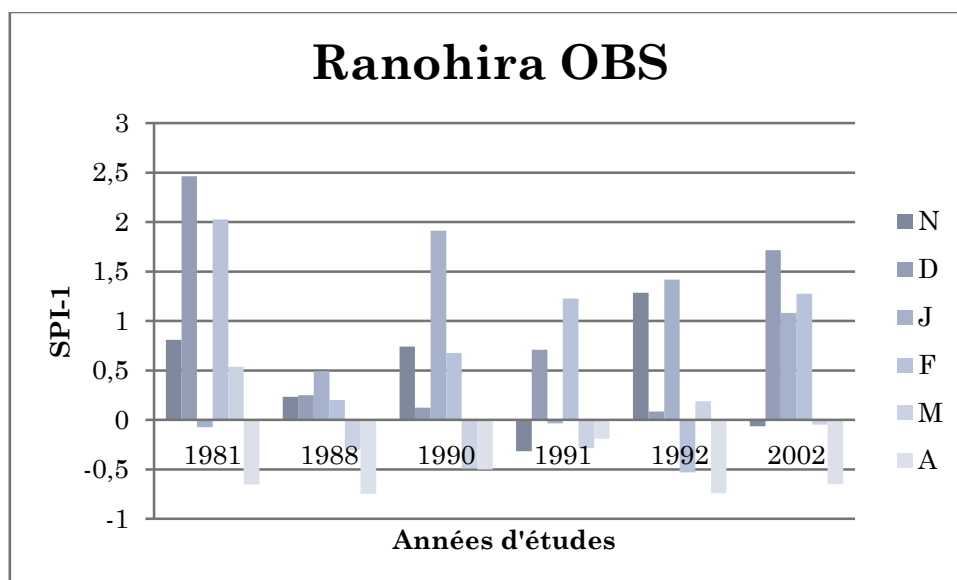


Figure 27 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-1) (Observé-RegCM4)

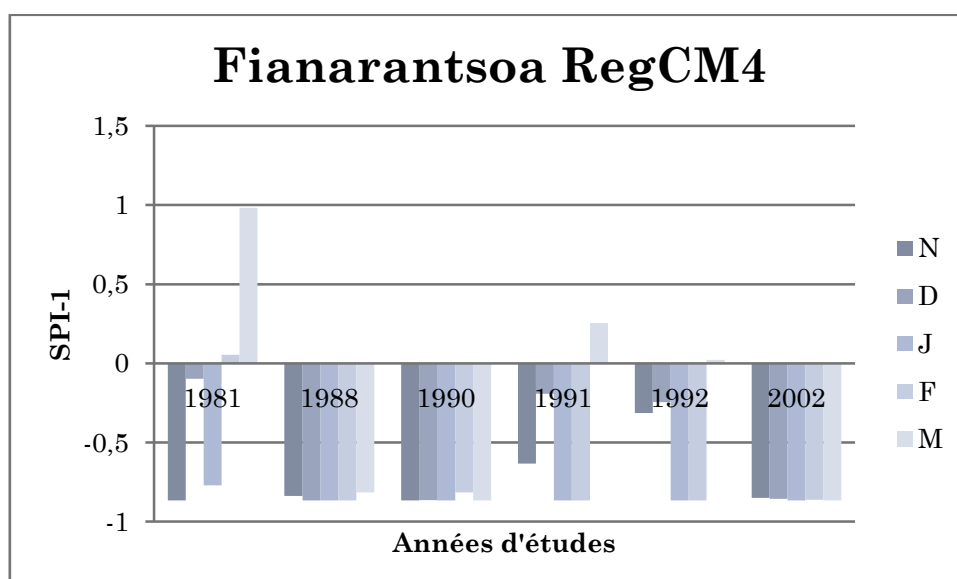
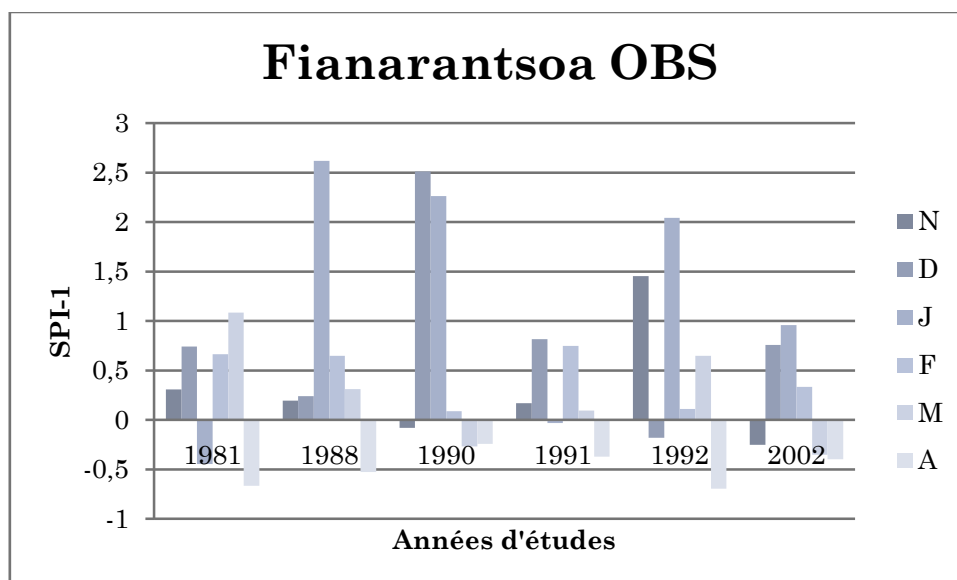


Figure 28 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-3) (Observé-RegCM4)

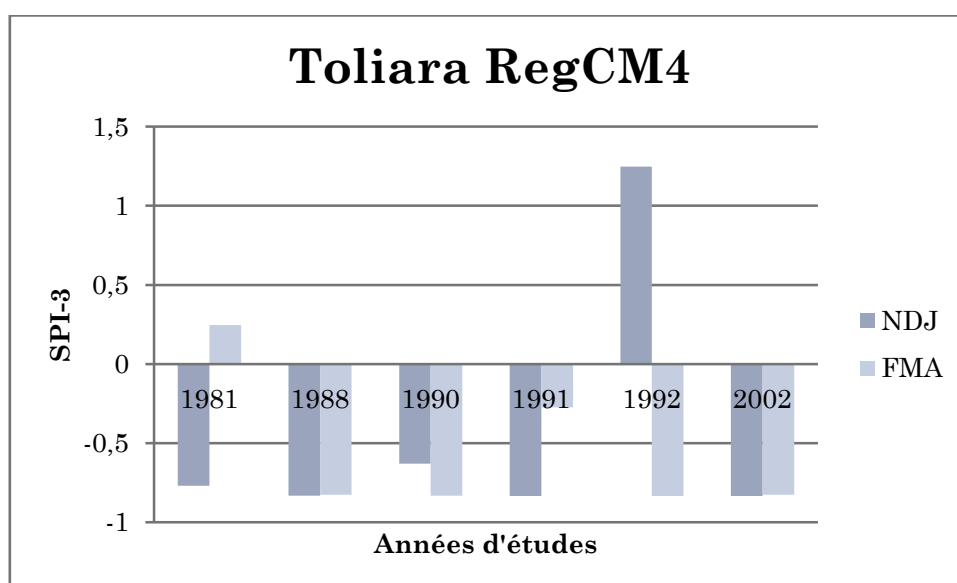
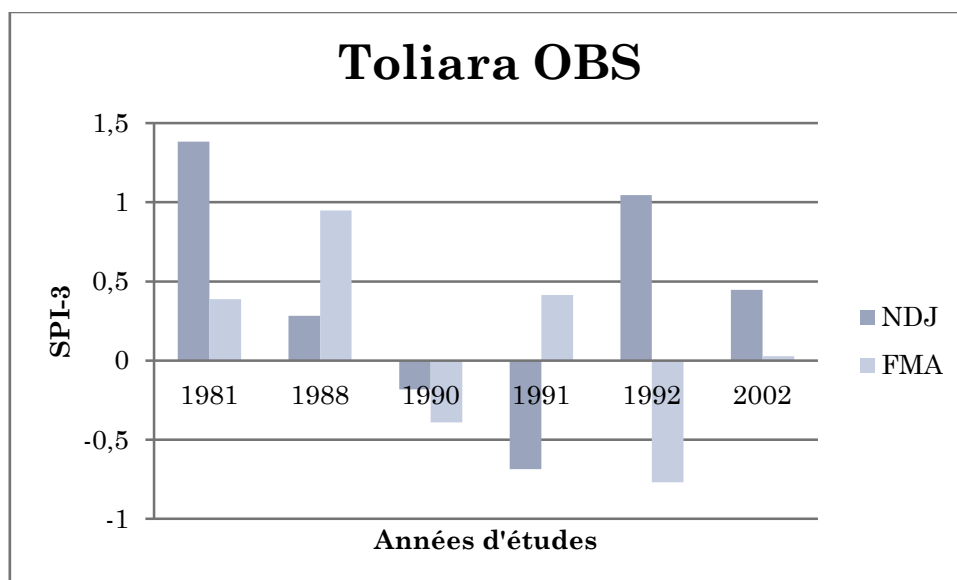


Figure 29 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-3) (Observé-RegCM4)

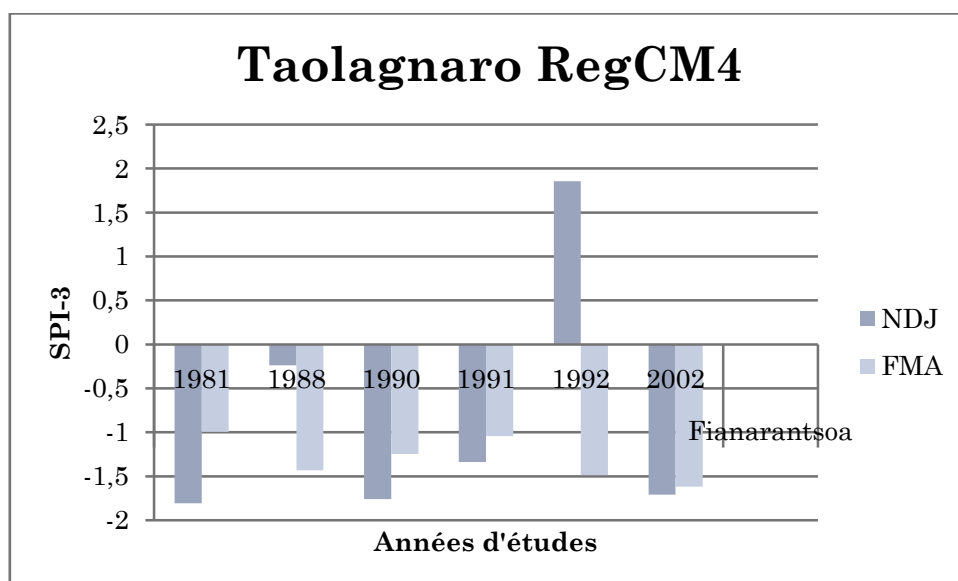
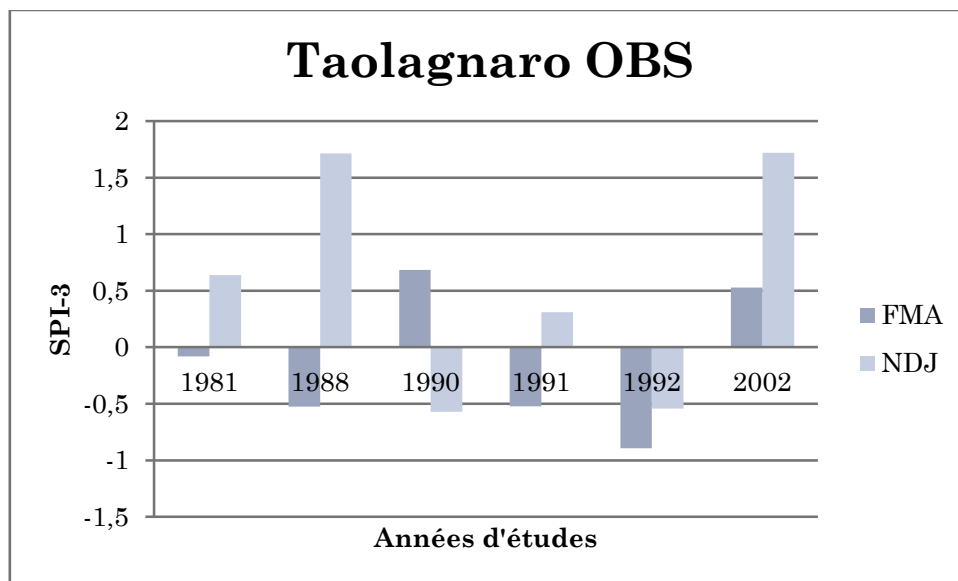


Figure 30 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira (SPI-3) (Observé-RegCM4)

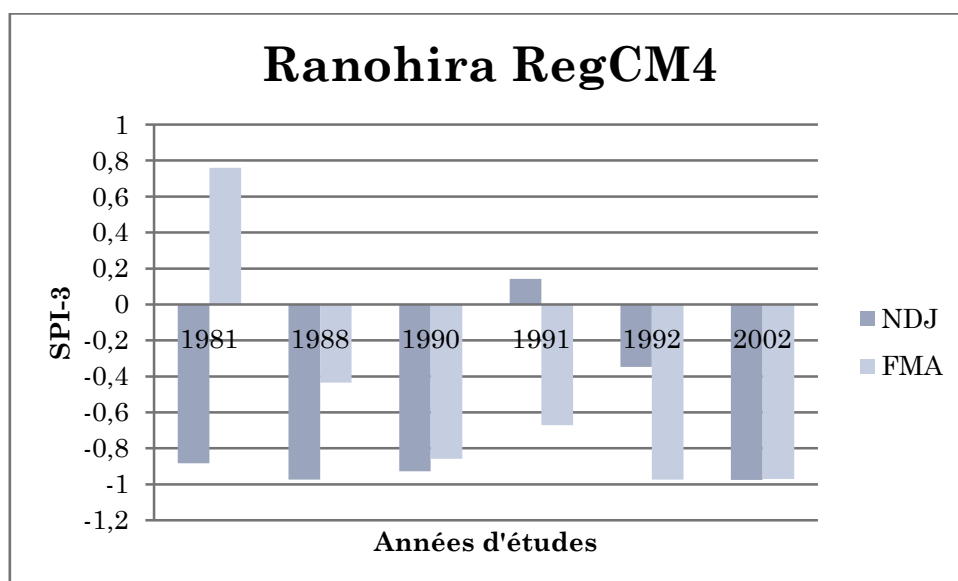
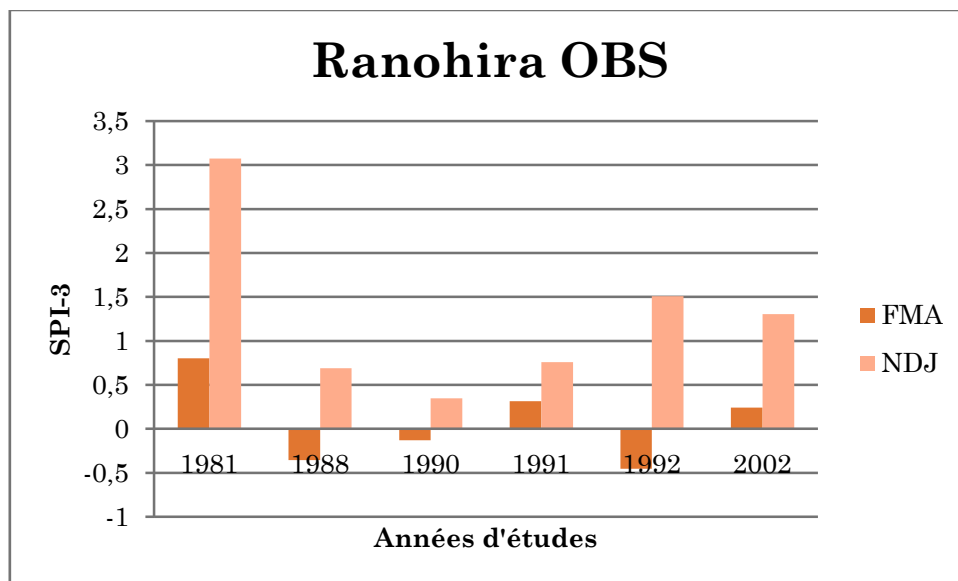


Figure 31 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-3) (Observé-RegCM4)

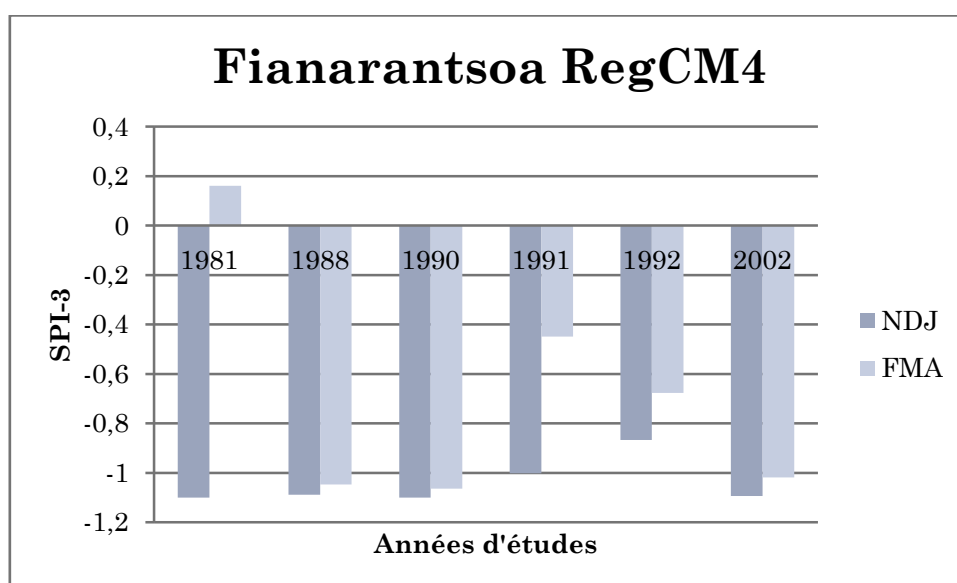
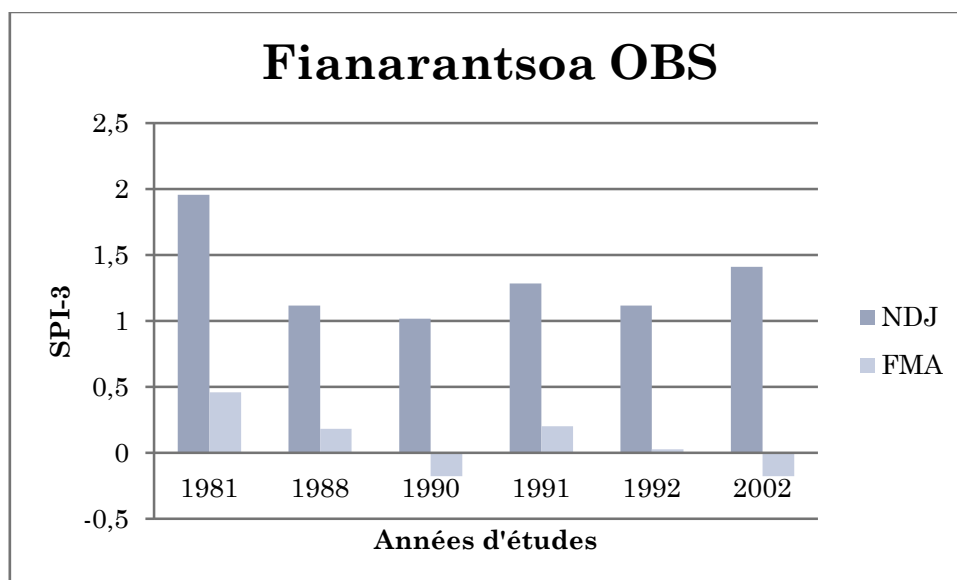


Figure 32 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-6) (Observé-RegCM4)

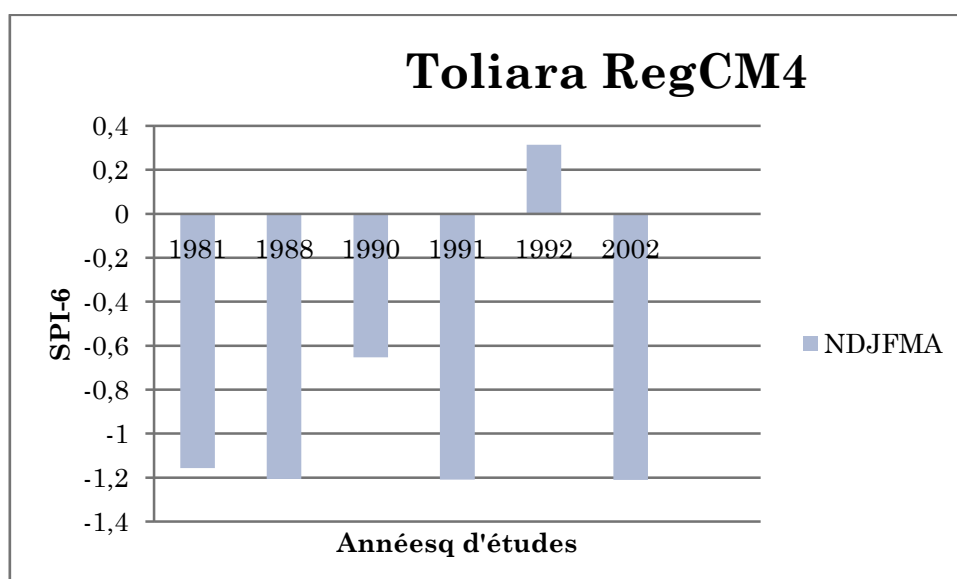
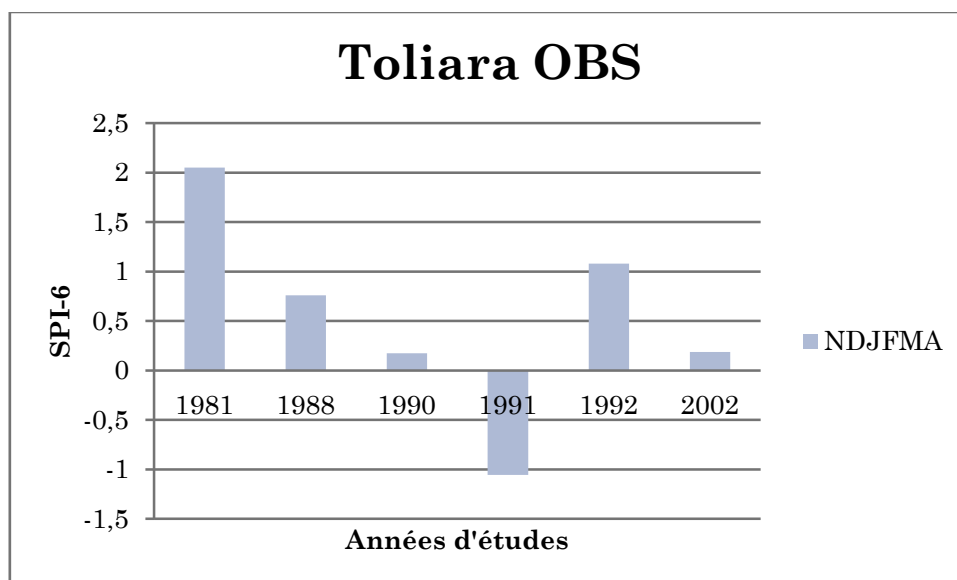


Figure 33 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-6)

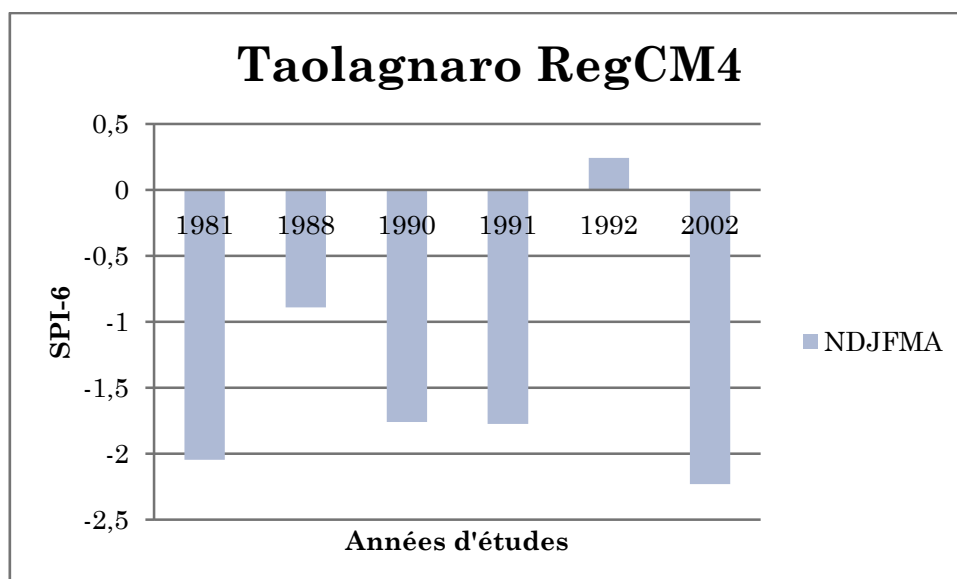
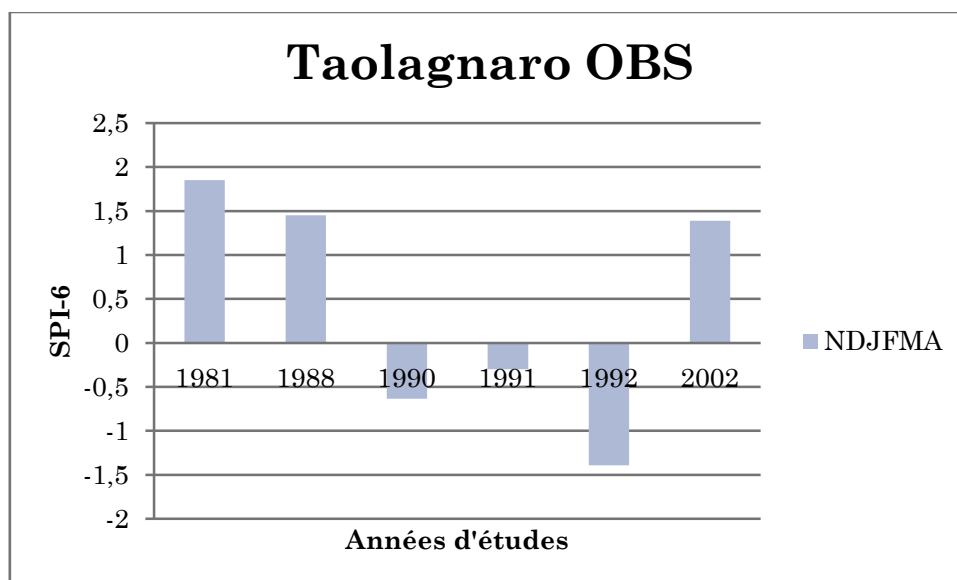


Figure 34 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira (SPI-6) (Observé-RegCM4)

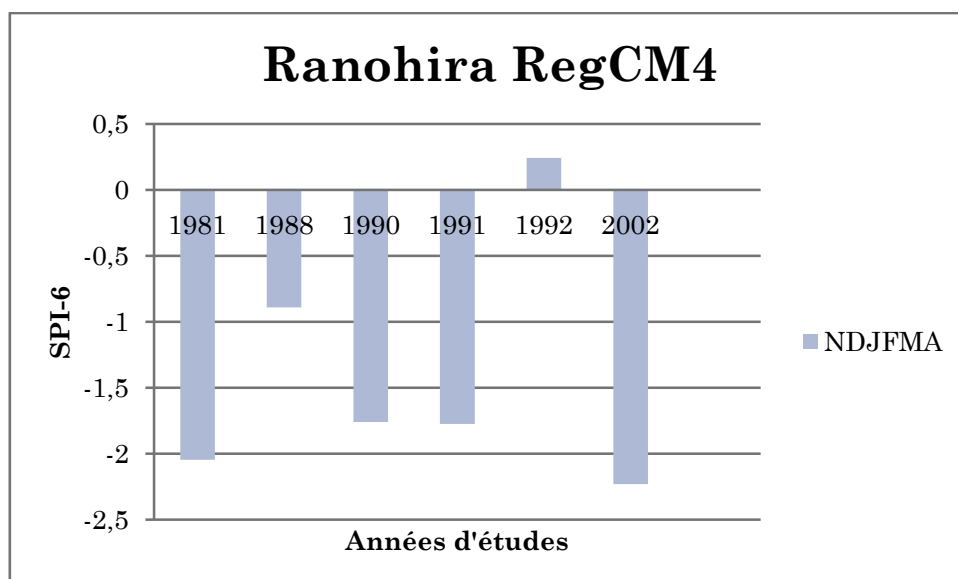
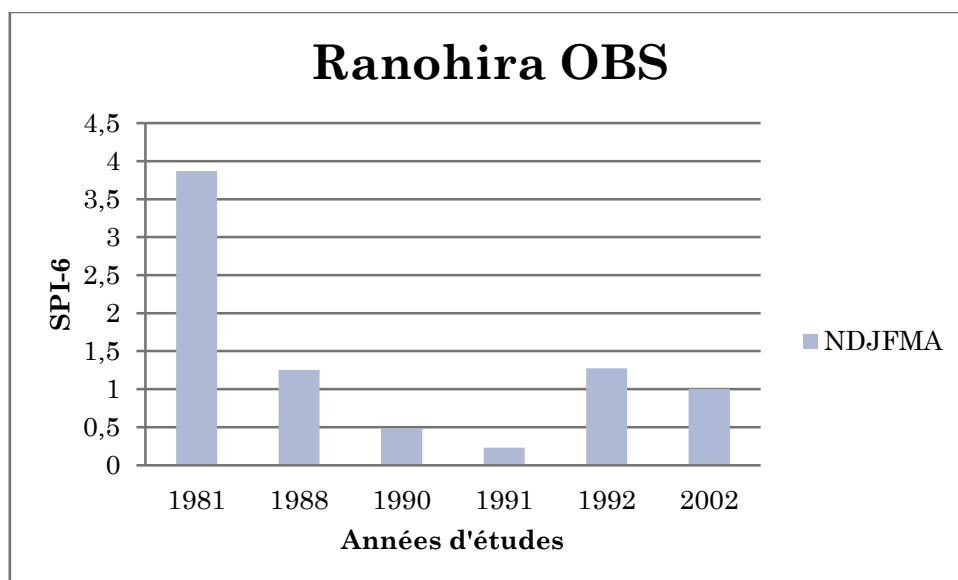


Figure 35 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-6) (Observé-RegCM4)

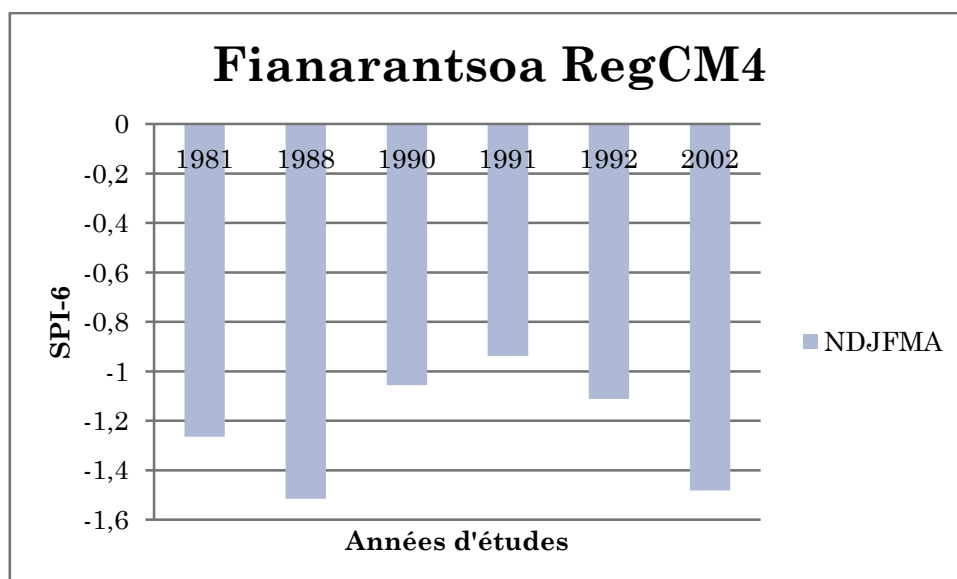
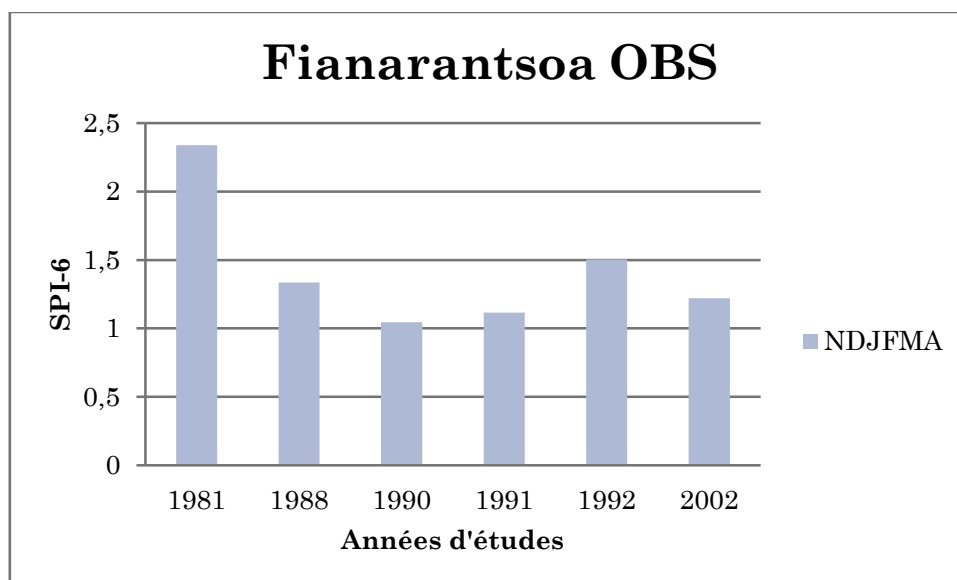


Figure 36 : Indice de précipitation standardisé de Toliara (SPI-12) (Observé-RegCM4)

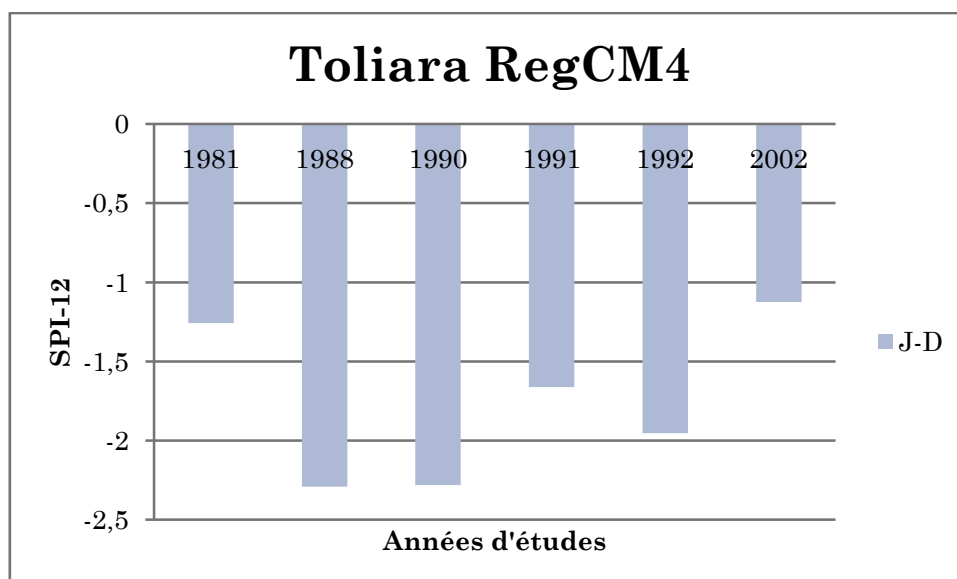
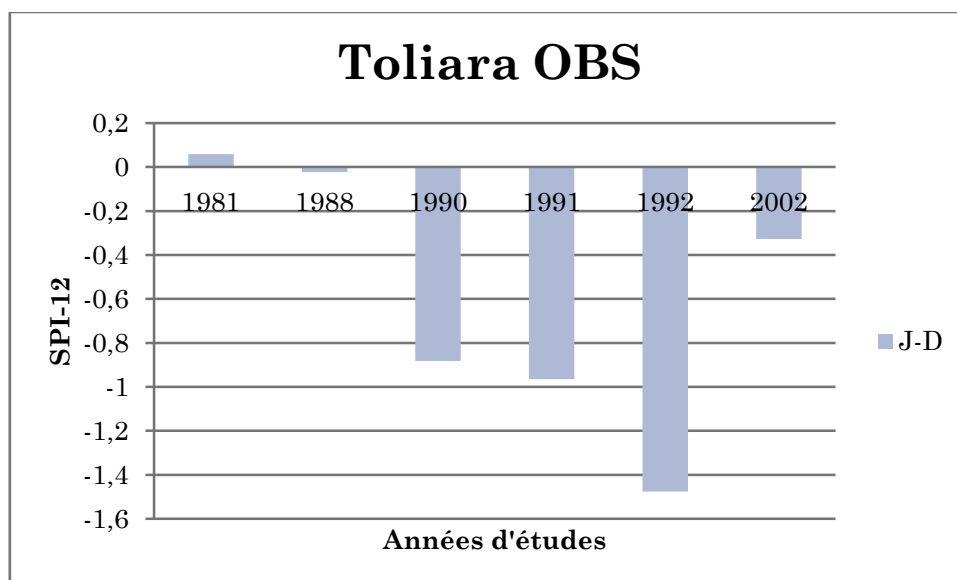


Figure 37 : Indice de précipitation standardisé de Taolagnaro (SPI-12) (Observé-RegCM4)

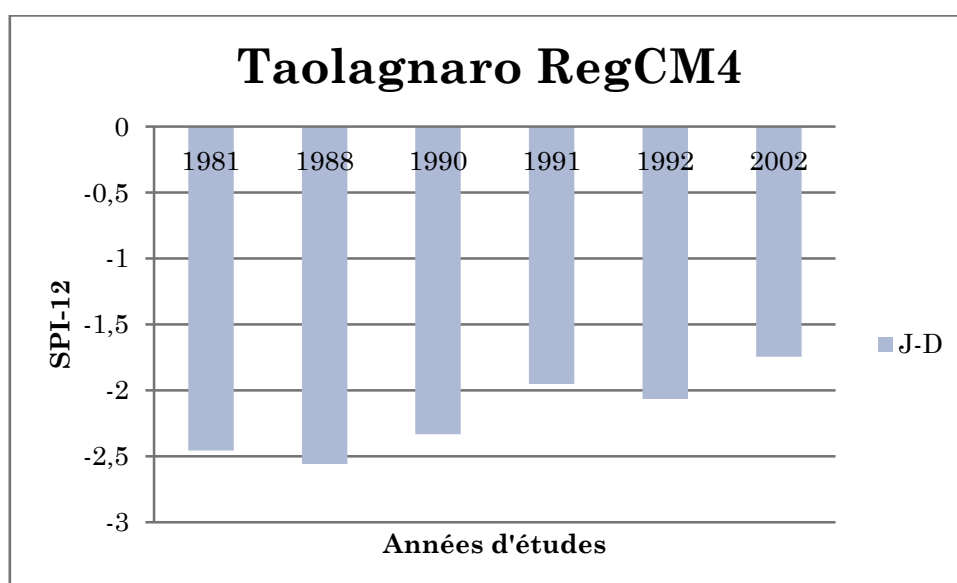
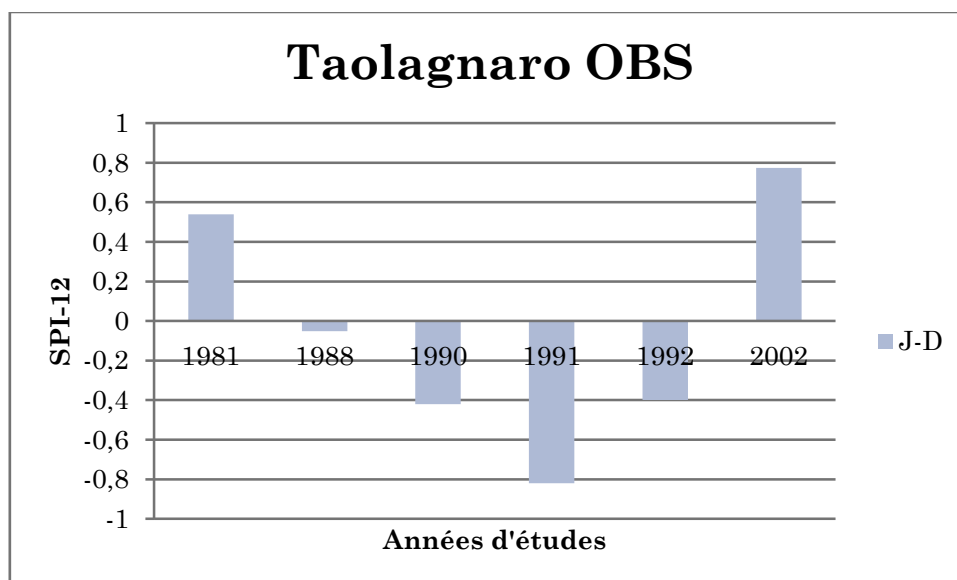


Figure 38 : Indice de précipitation standardisé de Ranohira(SPI-12) (Observé-RegCM4)

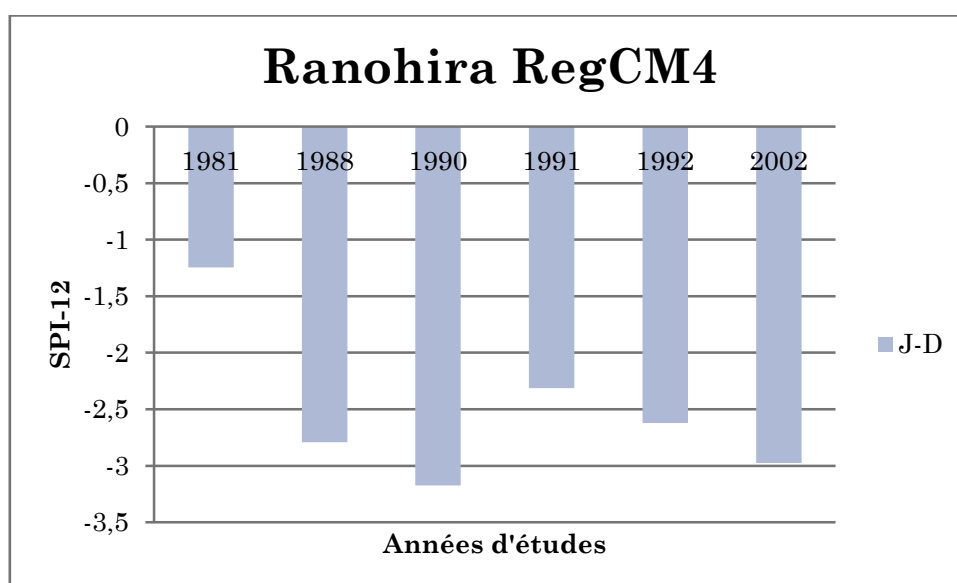
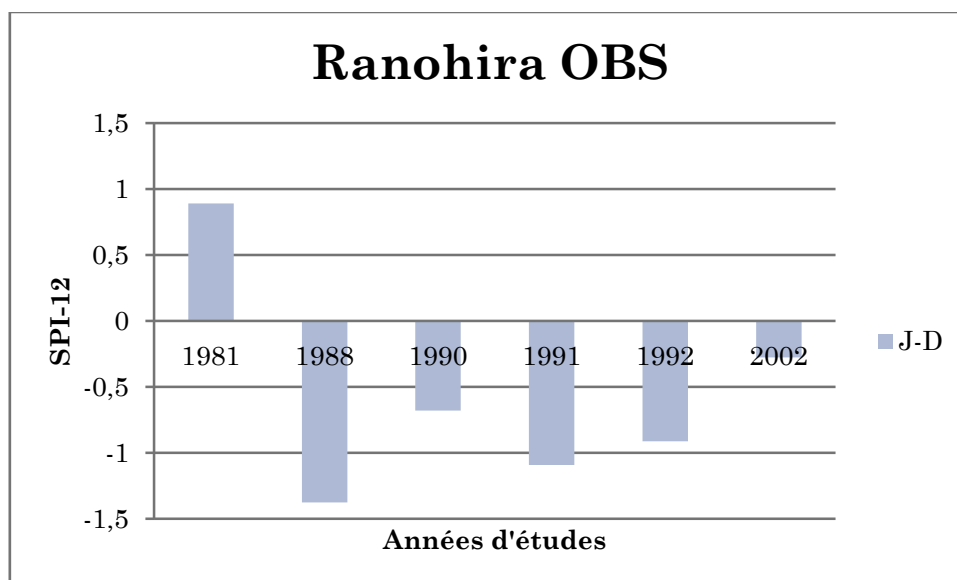


Figure 39 : Indice de précipitation standardisé de Fianarantsoa (SPI-12) (Observé-ReqCM4)

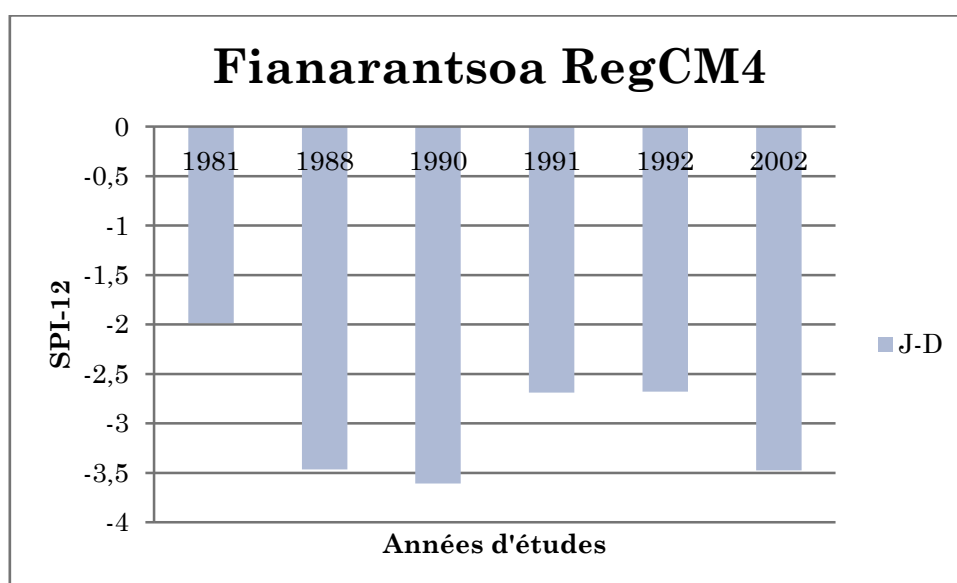
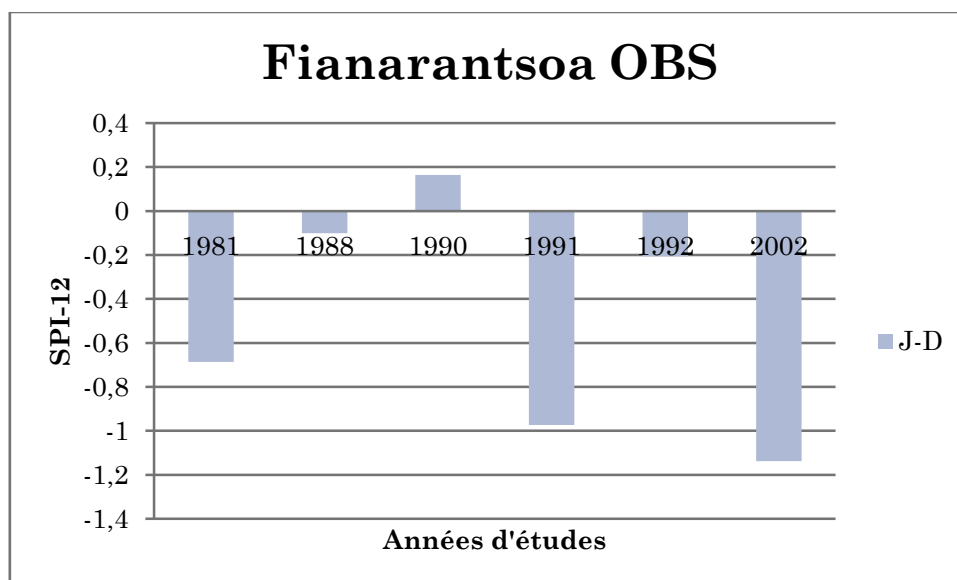


Figure 40 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara(SPI-1)

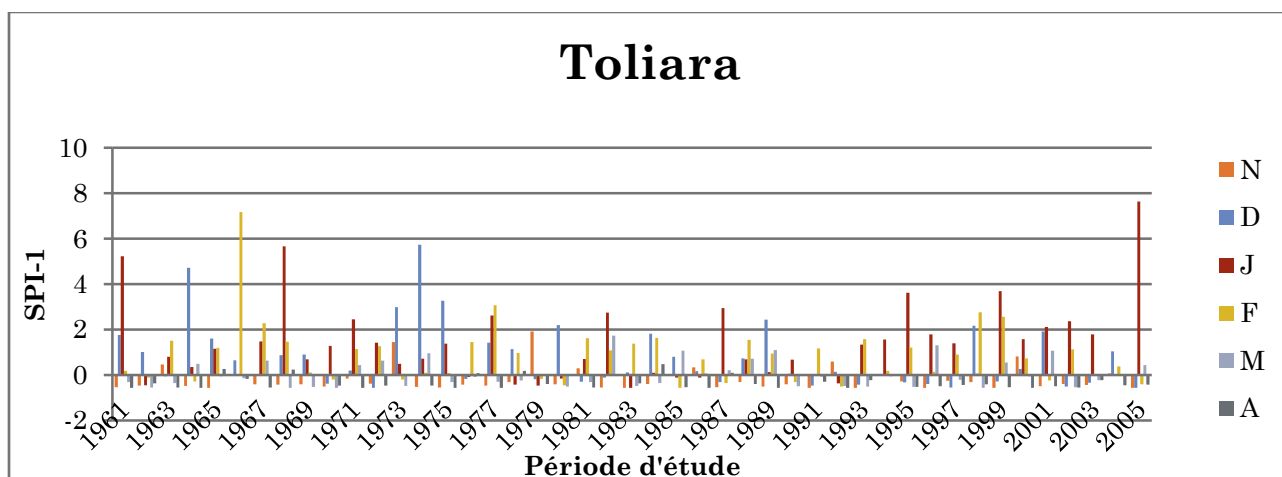


Figure 41 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-1)

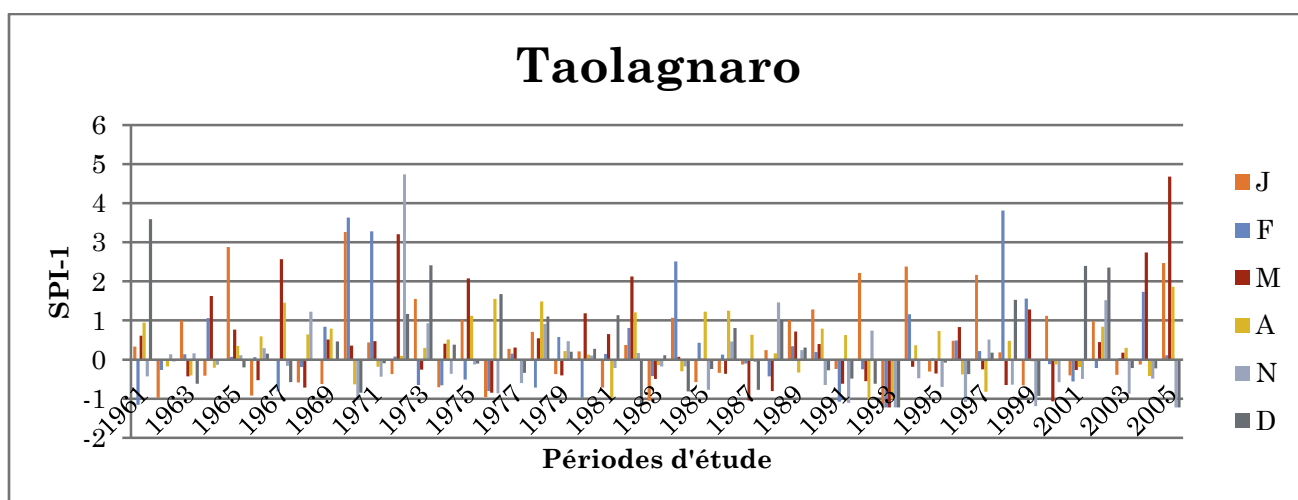


Figure 42 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira(SPI-1)

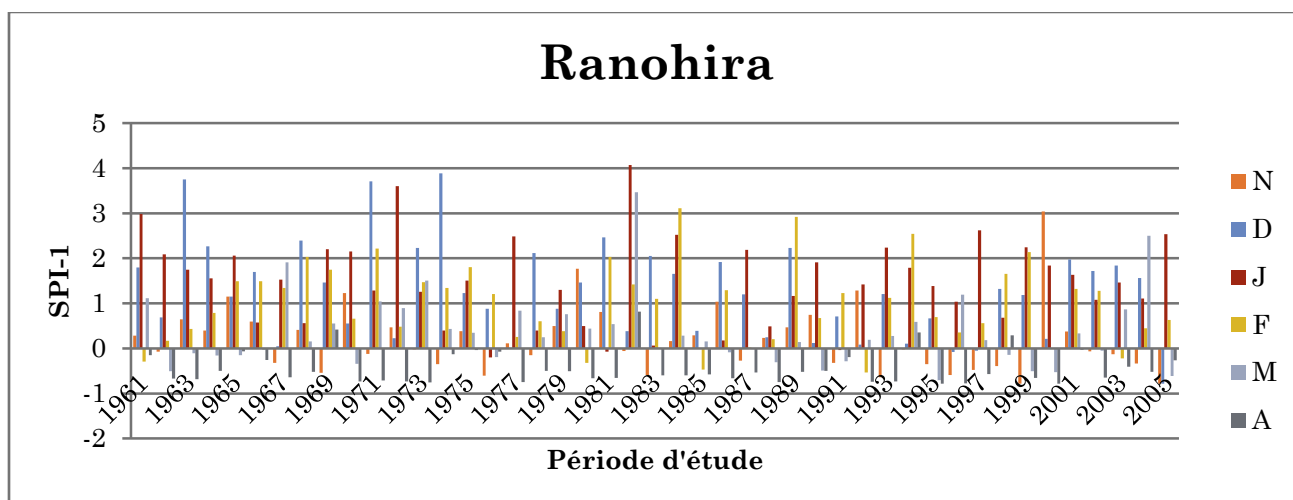


Figure 43 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-1)

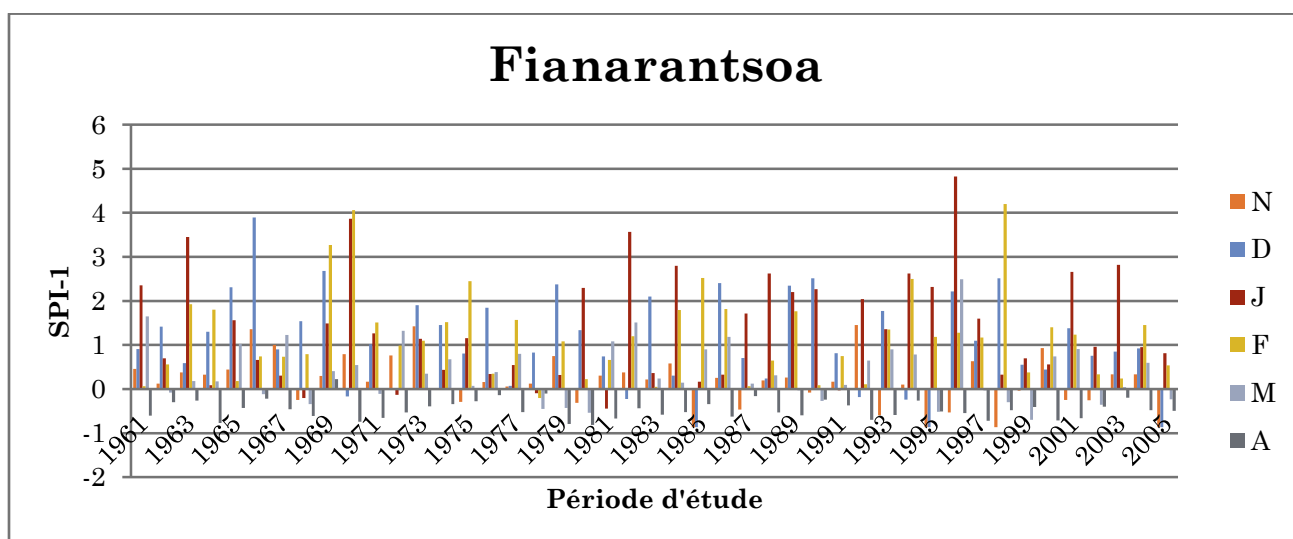


Figure 44 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara (SPI-3)

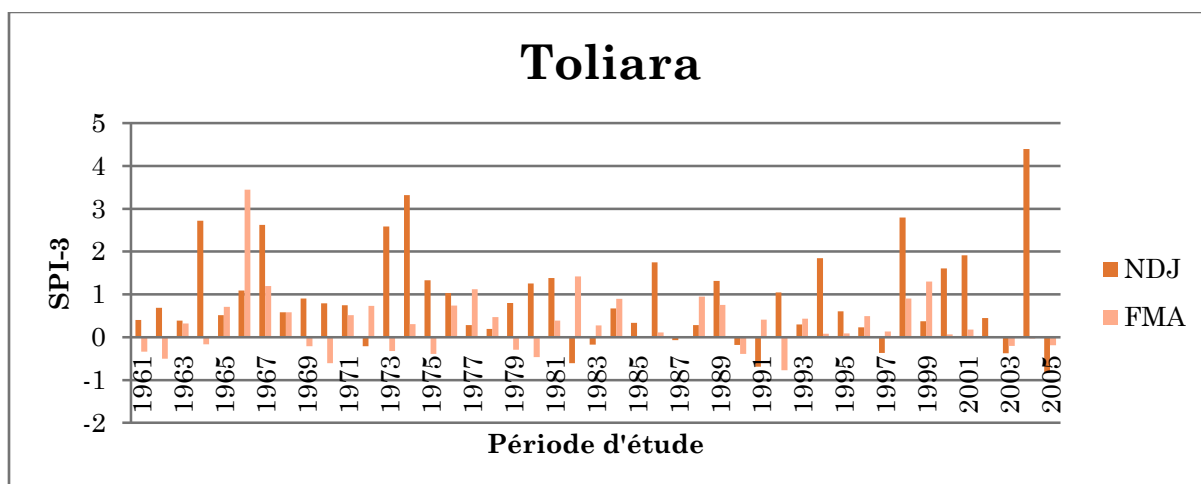


Figure 45 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-3)

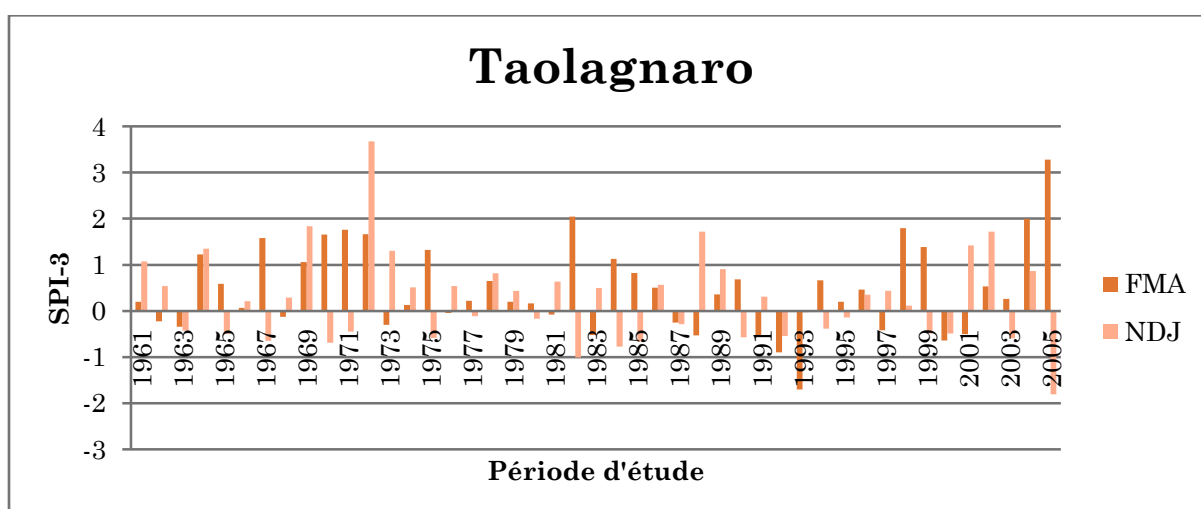


Figure 46 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira (SPI-3)

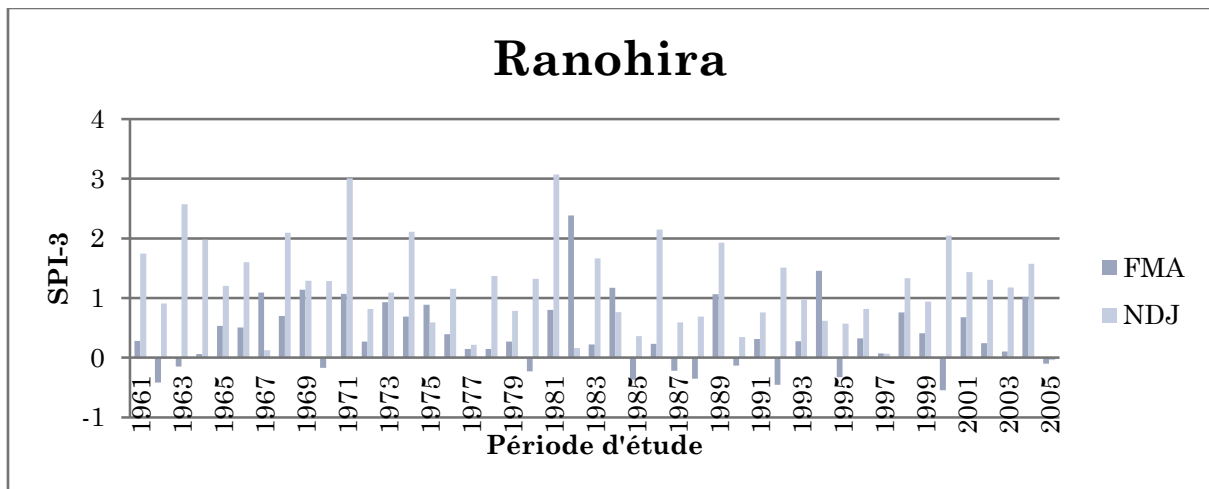


Figure 47: Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-3)

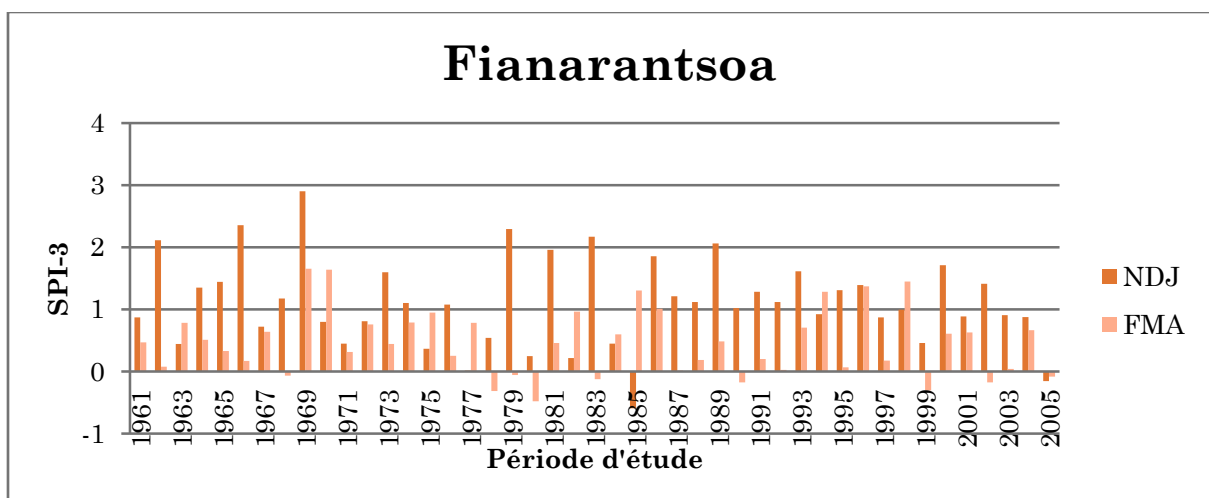


Figure 48 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara (SPI-6)

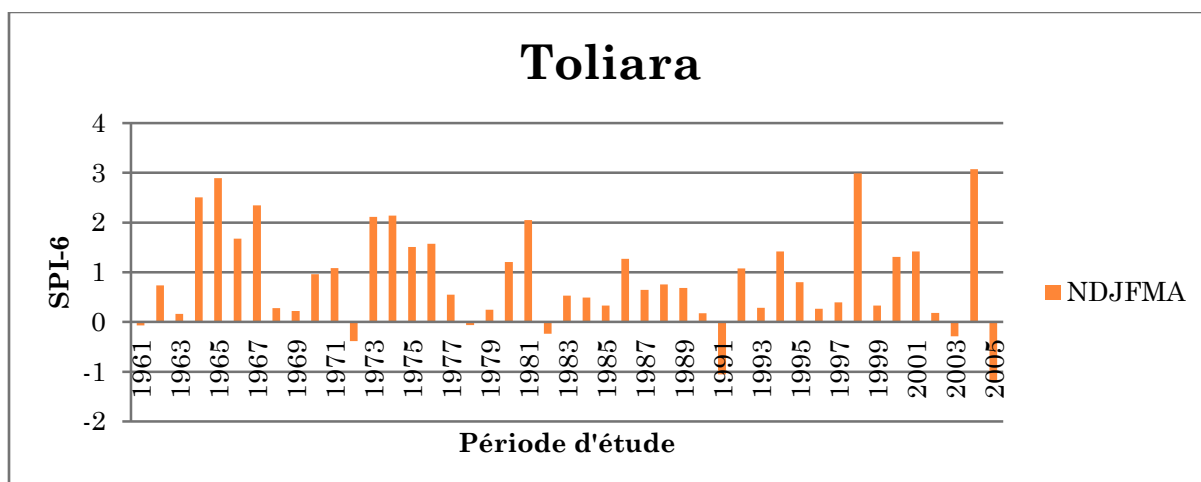


Figure 49 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-6)

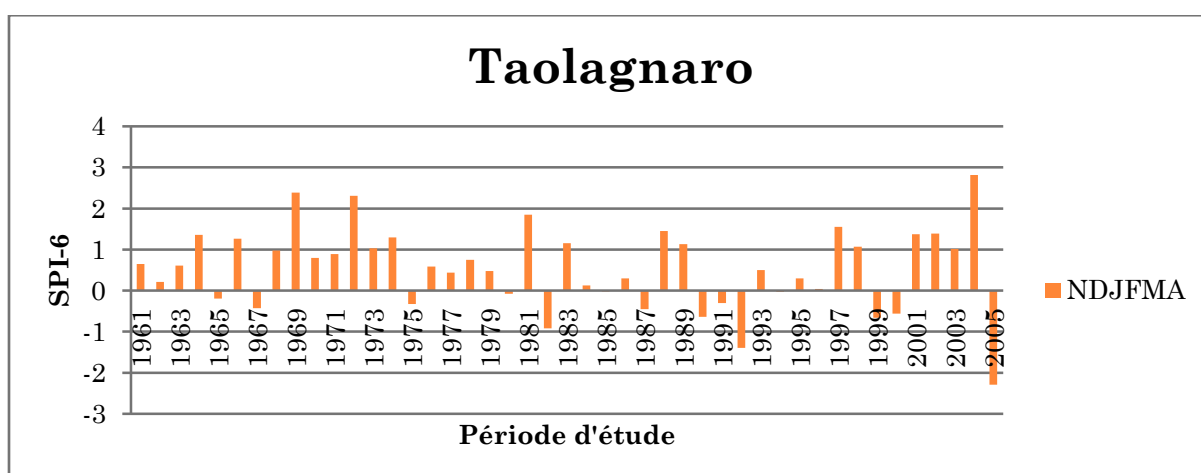


Figure 50 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira (SPI-6)

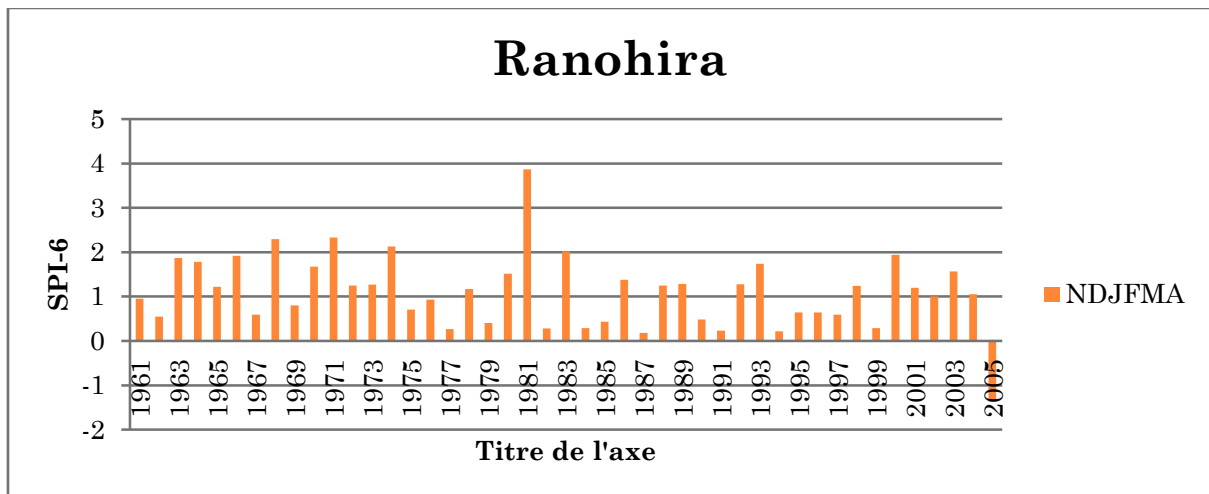


Figure 51: Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-6)

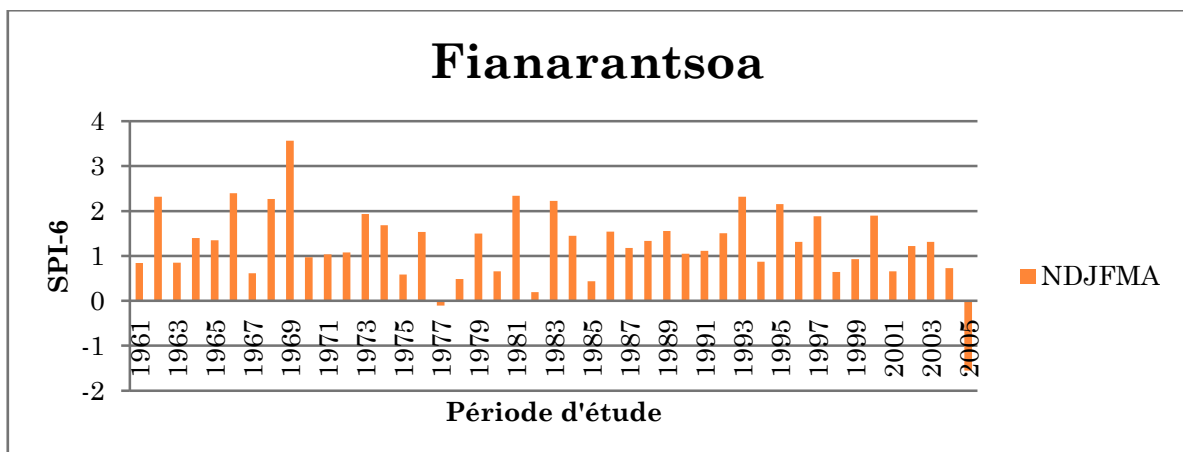


Figure 52 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Toliara (SPI-12)

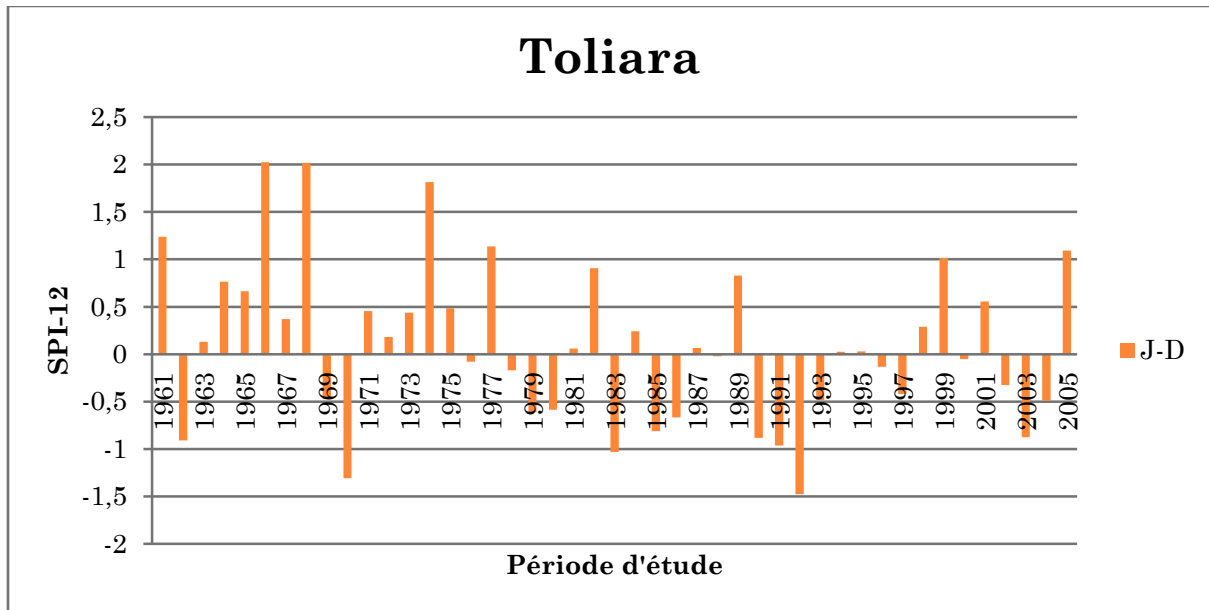


Figure 53 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Taolagnaro (SPI-12)

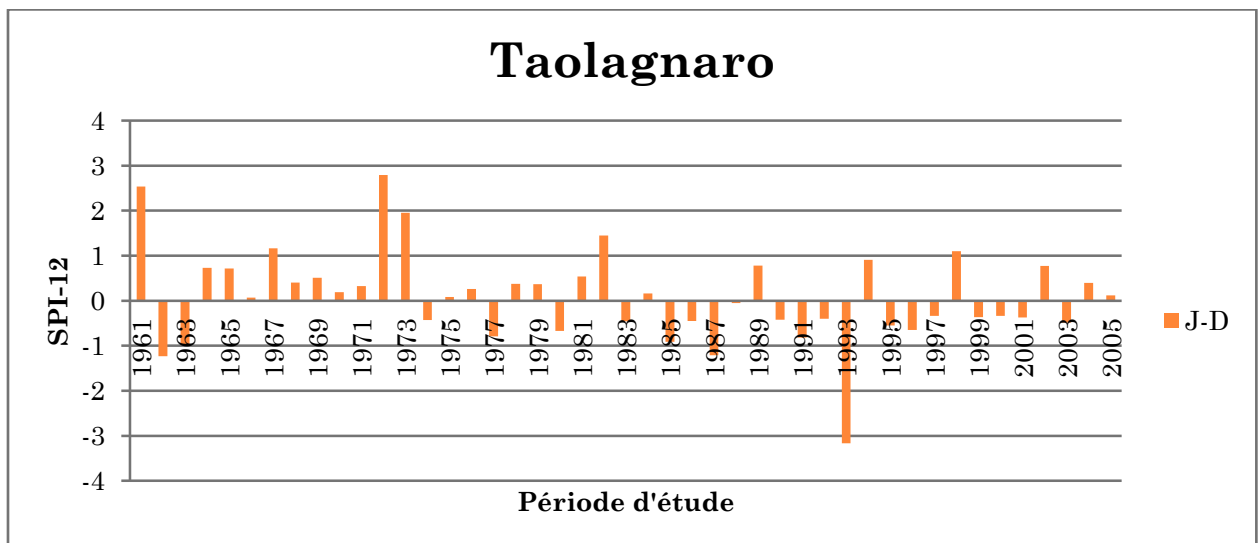


Figure 54 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Ranohira (SPI-12)

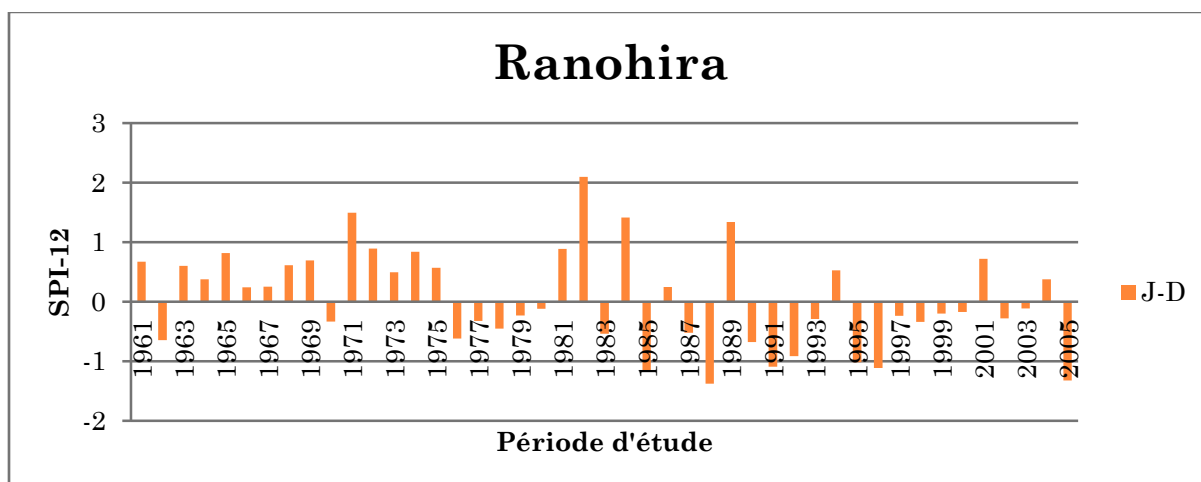


Figure 55 : Indice de précipitation standardisé de 1961 à 2005 de Fianarantsoa (SPI-12)

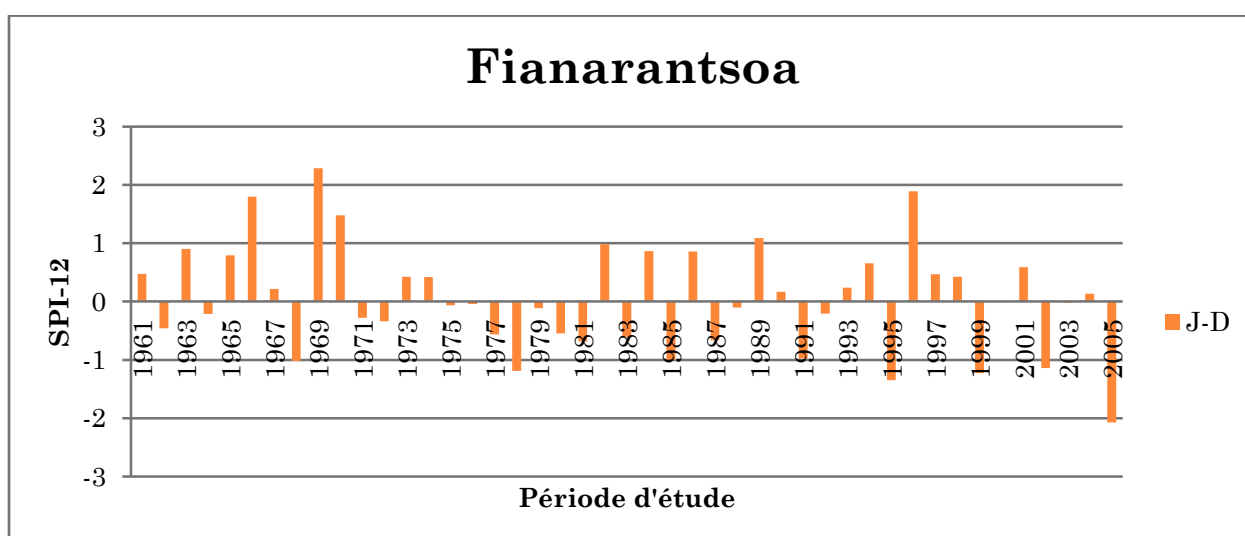


Figure 56: Histogramme d'écart à la moyenne de Tuléar (mm)

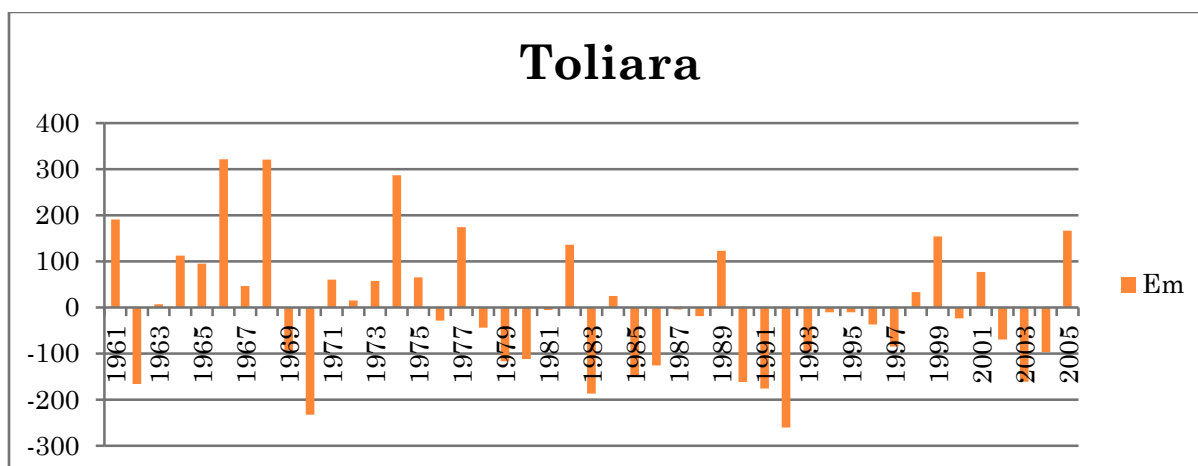


Figure 57 : Histogramme d'écart à la moyenne de Taolagnaro (mm)

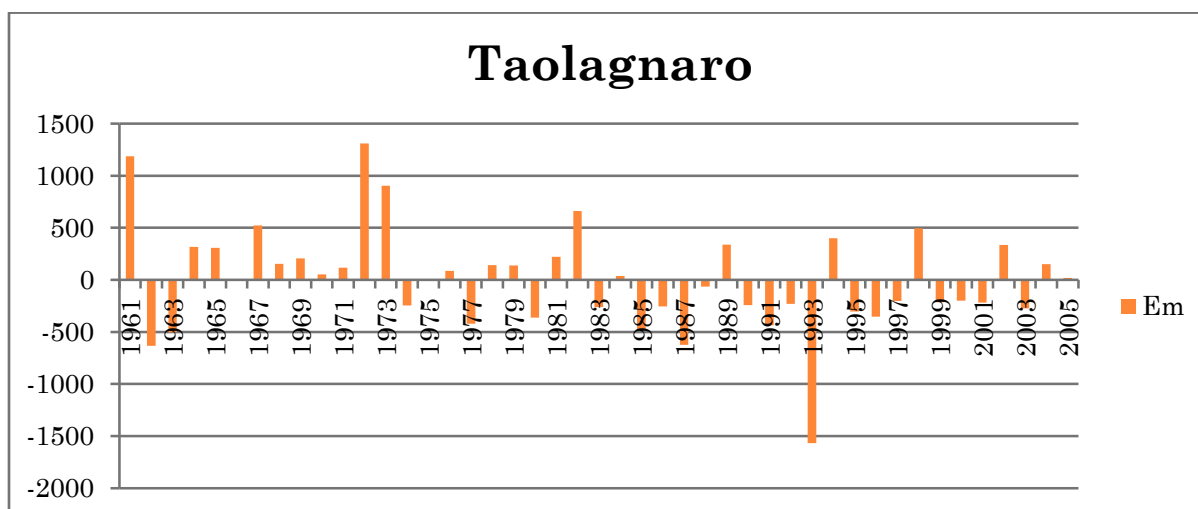


Figure 58 : Histogramme d'écart à la moyenne de Ranohira (mm)

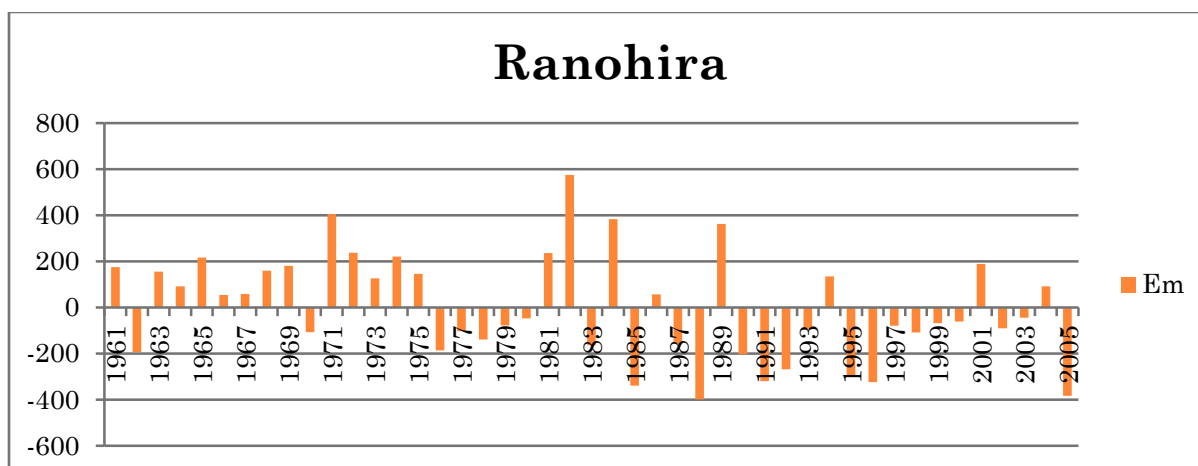
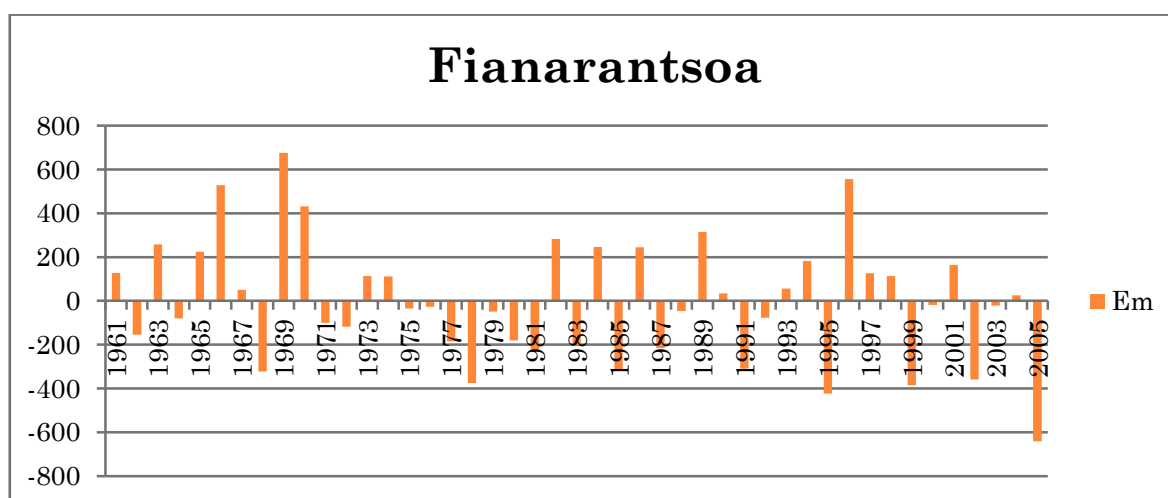


Figure 59 : Histogramme d'écart à la moyenne de Fianarantsoa (mm)



ANNEXE II : LOGICIEL UTILISE

Logiciel utilisé : GrADS

GrADS est préconisé pour la visualisation rapide des fichiers binaires de RegCM. Dans cette étude, GrADS est utilisé pour collecter les données de précipitation simulée pour chaque station étudiée.

La grille d'analyse et d'affichage du système (GrADS, « Grid Analysis and Display System ») est un outil interactif de bureau qui est utilisé pour l'accès facile, la manipulation et la visualisation des données en sciences de la Terre. Le format des données peut être soit binaire, GRIB, NetCDF ou HDF-SDS (Scientific Data Sets). GrADS a été mis en œuvre dans le monde entier sur une variété de systèmes d'exploitation utilisés couramment et est distribué gratuitement sur Internet.

GrADS utilise un environnement de données dimensionnelles-4: la longitude, la latitude, le niveau vertical, et le temps. Les ensembles de données sont placés dans l'espace 4-D par l'utilisation d'un descripteur de fichier de données. GrADS interprète les données des stations ainsi que les données maillées, et les grilles peuvent être régulières, espacées de façon non linéaire, gaussien, ou de résolution variable. Les données de différents ensembles de données peuvent être superposées graphiquement, avec un registre d'espace et de temps correct. Les opérations sont exécutées de manière interactive en entrant les expressions FORTRAN à la ligne de commande. Un riche ensemble de fonctions intégrées est fourni, mais l'utilisateur peut également ajouter ses propres fonctions comme les routines externes écrites dans n'importe quel langage de programmation.

Les données peuvent être affichées en utilisant une variété de techniques graphiques: graphiques en ligne et en barre, des diagrammes de dispersion, contours lissés et hachurés, des lignes de courant, les vecteurs vents, grilles normales et hachurées, et les tracés de modèle de station. Les graphiques peuvent être sortis dans les formats PostScript ou image. GrADS fournit par défaut des graphiques géophysiques, mais l'utilisateur a la possibilité de contrôler tous les aspects des sorties graphiques.

GRADS dispose d'une interface programmable (langage de script) qui permet une analyse sophistiquée et des applications d'affichage.

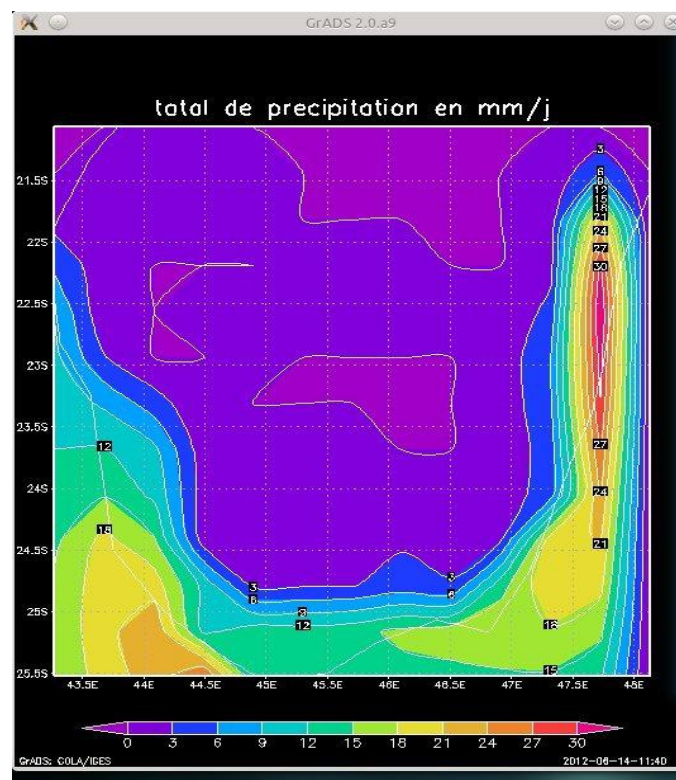
Un exemple graphique que nous pouvons obtenir sous Grads se présente sous la forme donnée dans la figure 60.

Figure 60: présentation du logiciel GrADS

```

output : grads
File Edit View Bookmarks Settings Help
v10m 0 99 southerly wind at 10m (m/s)
uvdrag 0 99 surface drag stress
tg 0 99 ground temperature (degree)
t1ef 0 99 temperature of foliage
t2m 0 99 air temperature at 2m (K)
q2m 0 99 water vapor mixing ratio at 2m(kg/kg)
ssw 0 99 upper layer soil water
rsw 0 99 root zone soil water
tpr 0 99 total precipitation (mm/day)
evp 0 99 evapotranspiration (mm/day)
runoff 0 99 surface runoff (mm/day)
scv 0 99 snow amount (mm, water equivalent)
sena 0 99 sensible heat flux (W/m2)
flw 0 99 net infrared energy flux (W/m2)
fsw 0 99 net absorbed solar energy flux (W/m2)
flwd 0 99 downward infrared energy flux (W/m2)
sina 0 99 incident solar energy flux (W/m2)
prcv 0 99 convective precipitation (mm/day)
psb 0 99 surface pressure (hPa)
zpbl 0 99 PBL layer height
tgmax 0 99 maximum ground temperature (K)
tgmin 0 99 minimum ground temperature (K)
t2max 0 99 maximum 2m air temperature (K)
t2min 0 99 minimum 2m air temperature (K)
w10max 0 99 maximum 10m wind speed (m/s)
ps_min 0 99 minimum surface pressure (hPa)
ga-> set gxout shaded
ga-> d tpr
Contouring: 0 to 30 interval 3
ga-> set gxout contour
ga-> d tpr
Contouring: 0 to 30 interval 3
ga-> run /home/meteo/RegCM-4.0/Tools/Scripts/GrADS/cbarn.gs
ga-> draw title total de precipitation en mm/j
ga-> █

```



ANNEXE III : TABLEAUX N° 23 A 33**Tableau 23: Configuration du domaine**

Paramètre	Valeur	Description
Jx	15	Nombre de points dans la direction d'E/w
ly	15	Nombre de points dans la direction de N/s
Kz	18	Nombre de niveaux verticaux: soutenus sont 14, 18 et 23
Nsg	1	Pour subgridding, nombre de points à décomposer. Si nsg=1, aucun subgridding n'est exécuté.
lproj	NORMER	Projection de carte (Normal Mercator)
Ds	50	Résolution de la grille en km
Ptop	5	Pression au sommet du model en cb
Clat	-23.50	Latitude du point central du domaine en degré (Sud-Nord)
Clon	45.50	Latitude du point central du domaine en degré (Ouest-Est)
Plat	-23.50	Latitude polaire (seulement pour la projection rotative de Mercator)
Plon	45.50	Longitude polaire (projection rotative de Mercator)
Truelatl	-23.50	Latitude vraie de Lambert (bas côté de latitude)
Truelath	45.50	Latitude vraie de Lambert (côté élevé de latitude)
Nspgx	12	Paramètre de frontière : nspgx-1 représente le nombre de points à travers les conditions de frontière de sponge ou de relaxation
Nspyd	12	Paramètre de frontière
Lkpts	10	Paramètre de modèle de lacs
globidate1	yyyymmjjhh	Date de début de la simulation (année, mois, jour, heure, UTC)

globidate2	yyyymmjjhh	Date de fin de la simulation
Dattyp	ERA40	Données d'analyse globale
Ssttyp	OI_WK	Données de température de surface de la mer

Tableau 24: Paramètre de redémarrage

Paramètres	Valeur	Description
lfrest	.true.	true=redémarrage de la simulation
idate0	Yyyymmjjhh	Date de début de la simulation
ldate1	Yyyymmjjhh	Date de début du redémarrage de la simulation
ldate2	Yyyymmjjhh	Date de fin du redémarrage de la simulation

Tableau 25 : Configuration des pas de temps

Paramètre	Valeur	Description
Radfrq	90	Pas de temps pour le modèle de rayonnement en minute
Abemh	18	Pas de temps pour l'observation/émissivité en heure
Abatm	600	Pas de temps pour le modèle de surface terrestre en seconde
Dt	100	Pas de temps pour le modèle atmosphérique en seconde

Tableau 26: Résolution pour des paramètres d'entrée de CLM

Glacier	0.05° x 0.05°	±179.975	±89.975
Lac	0.05° x 0.05°	±179.975	±89.975
Terre humide	0.05° x 0.05°	±179.975	±89.975
Fraction de terre	0.05° x 0.05°	±179.975	±89.975
LAI/SAI	0.5° x 0.5°	±179.75	±89.75
PFT	0.5° x 0.5°	±179.75	±89.75
Couleur du sol	0.05° x 0.05°	±179.975	±89.975
Texture du sol	0.05° x 0.05°	±179.975	±89.975
Max. sat. area	0.5° x 0.5°	±179.75	±89.75

Tableau 27: Classes de végétation et d'occupation des terrains utilisées par BATS

1. Culture
2. Savane
3. Arbre à feuilles en aiguille persistante
4. Arbre à feuilles en aiguille caduques
5. arbre à feuilles large caduques
6. arbre à feuilles large persistante
7. Steppe
8. Désert
9. Toundra
10. Culture Irriguée
11. Semi-désertique
12. Glace cap/glacier
13. Marais
14. Eau intérieure(Lac)
15. Océan
16. Arbuste à feuilles persistantes
17. Arbuste à feuilles caduques
18. Forêt mixte
19. Forest/champ Mosaïque
20. Plante des embouchures (Mangrove)

Tableau 28 : Configuration des paramètres physiques du modèle

lboudy	5	Traitement numérique des conditions aux limites latérales 5=relaxation exponentielle
lbtype	1	Schéma de couche limite planétaire : 1=Hostlag
lcup	2	Schéma de cumulus ; 2= schema de Grell
lgec	1	Schéma de convection; 1=Arakawa/Schubert
lpptls	1	Schéma de précipitation à grande échelle ; 1=SUBEX
loncnflsx	1	Schéma de paramétrisation du flux océanique ; 1=BAT
lpgf	0	Schéma de gradient de pression ; 0=normale
Lakemod	0	Modèle de lacs; 0=non
lchem	0	Modèle chimique; 0=non

Tableau 29 : Paramètre de SUBEX

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>	<u>Description</u>
<u>Qcklland</u>	250E-03	Taux d'autoconversion pour la terre
<u>Qcklloce</u>	250E-03	Taux d'autoconversion pour l'océan
<u>Cevap</u>	100E-02	Coefficient de taux d'évaporation de goutte de pluie $[(kgm^{-2}s^{-1})^{-1/2}]$
<u>Cacer</u>	3000	Taux d'accrétion de goutte de pluie $[m^3kg^{-1}s^{-1}]$

Tableau 30 : Configuration du domaine

Domname	'Madagascar_Sud'	Nom du domaine : Commande l'appellation des dossiers d'entrée
itype_in	1	Format d'I/O 1 = > binaire d'accès direct 2 = > netcdf
Ntypec	10	Résolution des données en entrée (terrain et occupation de terre) en minute
ntypec_s	10	Résolution des données en entrée (Même pour le subgrid)(utilisée seulement si nsg > 1)
lfinal	.true.	commande d'interpolation. vrai - > exécutez l'analyse d'objectif de cressman-type faux - > 16-point recouvrant l'interpolation parabolique.
Smthbdy	.false.	Si true=extra-lissage aux frontières
Lakadj	.false.	Si true=ajuste les niveaux de lacs à l'observation
fudge_Ind	.false.	Ajustement d'UTILISATION de la TERRE (grid)
fudge_Ind_s	.false.	Ajustement d'UTILISATION de la TERRE de Subgrid
fudge_tex	.false.	Ajustement de TEXTURE (grid)
fudge_tex_s	.false.	Ajustement de TEXTURE de Subgrid

Ntex	17	Nombre de catégories de texture de sol,
h2opct	75	Si le pourcentage d'eau est inférieur à h2opct, alors la terre est dépourvue d'eau
Dirter	'./Input'	-
Inpter	'./DATA'	-

Tableau 31 : Configuration des paramètres de sortie.

Paramètres	Valeur	Description
lfsave	.true.	Crée un fichier de sauvegarde pour ensuite pouvoir faire des redémarrages à partir de ce fichier.
Savfrq	7200	Fréquence de sauvegarde des données de sortie pour le redémarrage(en heure).
lftape	.true.	Crée un fichier de sauvegarde pour la sortie du modèle atmosphérique.
Tapfrq	6.	Fréquence de sauvegarde des données de sortie pour le modèle atmosphérique (en heure).
lfrad	.true.	Crée un fichier de sauvegarde pour la sortie du modèle radiatif
Radisp	6.	Fréquence de sauvegarde des données de sortie pour le modèle radiatif (en heure).
lfbat	.true.	Crée un fichier de sauvegarde pour la sortie du modèle de surface terrestre.
Batfrq	3.	Fréquence de sauvegarde des données de sortie pour les modèles de surface terrestre (en heure).
lotyp	2.	Type d'accès aux données de sortie ; 1= accès directe, 2=séquentielle
lfchem	.false.	Crée un fichier de sauvegarde pour la sortie de modèle traceur
Chemfrq	6.	Fréquence de sauvegarde des données de sortie pour le modèle traceur (en heure).

Tableau 32 : Pas de temps avec différentes résolutions

ds (km)	dt (sec)	abatm(sec)	abemh(hr)	radfrq(mn)
10	30	90	18	30
20	60	120	18	30
30	100	300	18	30
45	150	300	18	30
50	150	450	18	30
60	200	600	18	30
90	225	900	18	30

Tableau 33 : Valeurs des paramètres des classes de végétations et d'occupations des terrains utilisées par BATS

Parameter	Land Cover/Vegetation Type																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Max fractional vegetation cover	0.85	0.80	0.80	0.80	0.80	0.90	0.80	0.00	0.60	0.80	0.35	0.00	0.80	0.00	0.00	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Difference between max fractional vegetation cover and cover at 269 K	0.6	0.1	0.1	0.3	0.5	0.3	0.0	0.2	0.6	0.1	0.0	0.4	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	0.4	0.4	
Roughness length (m)	0.08	0.05	1.00	1.00	0.80	2.00	0.10	0.05	0.04	0.06	0.10	0.01	0.03	0.0004	0.0004	0.10	0.10	0.80	0.3	0.3
Displacement height (m)	0.0	0.0	9.0	9.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Min stomatal resistance (s/m)	45	60	80	80	120	60	60	200	80	45	150	200	45	200	200	80	120	100	120	120
Max Leaf Area Index	6	2	6	6	6	6	6	0	6	6	6	0	6	0	0	6	6	6	6	6
Min Leaf Area Index	0.5	0.5	5	1	1	5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0	0	5	1	3	0.5	0.5
Stem (dead matter area index)	0.5	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.5	0.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Inverse square root of leaf dimension ($m^{-1/2}$)	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Light sensitivity factor ($m^2 W^{-1}$)	0.02	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02
Upper soil layer depth (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Root zone soil layer depth (mm)	1000	1000	1500	1500	2000	1500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000
Depth of total soil (mm)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Soil texture type	6	6	6	6	7	8	6	3	6	6	5	12	6	6	6	6	5	6	6	0
Soil color type	5	3	4	4	4	4	4	1	3	3	2	1	5	5	5	4	3	4	4	0
Vegetation albedo for wavelengths $< 0.7 \mu m$	0.10	0.10	0.05	0.05	0.08	0.04	0.08	0.20	0.10	0.08	0.17	0.80	0.06	0.07	0.07	0.05	0.08	0.06	0.06	0.06
Vegetation albedo for wavelengths $> 0.7 \mu m$	0.30	0.30	0.23	0.23	0.28	0.20	0.30	0.40	0.30	0.28	0.34	0.60	0.18	0.20	0.20	0.23	0.28	0.24	0.18	0.18

ANNEXE IV: FICHIERS DE CONTROLE

Fichier 1 : Fichier contrôle de la Liste des variables de sortie du programme Terrain (DOMAIN)

```
dset ^Madagascar_sud.INFO
title RegCM domain information
options big_endian
undef -9999.
xdef 15 linear 42.5773 0.4496
ydef 15 levels
-26.15 -25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47
-22.05 -21.63 -21.21 -20.79 -20.37
zdef 1 levels 1000.00
tdef 1 linear 00z01Jan2001 1mo
vars 13
head 0 99 header information
ht 0 99 surface elevation
htsd 0 99 surface elevation std. dev
landuse 0 99 surface landuse type
xlat 0 99 latitude of cross points
xlon 0 99 longitude of cross points
dlat 0 99 latitude of dot points
dlon 0 99 longitude of dot points
xmap 0 99 map factors of cross point
dmap 0 99 map factors of dot points
coriol 0 99 coriol force
snowam 0 99 initial snow amount
mask 0 99 land/sea mask
endvars
```

```
dset ^OUT_HEAD
```

```
title RegCM domain information
options big_endian
undef -1.e34
xdef 13 linear 43.0270 0.4496
ydef 13 levels
-25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47 -22.05
-21.63 -21.21 -20.79
zdef 1 levels 1000.00
tdef 1 linear 00z01Jan2001 1mo
vars 11
head 0 99 header information
ht 0 99 surface elevation
htsd 0 99 surface elevation std dev
veg2d 0 99 vegetation type in BATS
landuse 0 99 surface landuse mod_type
```



```
xlat 0 99 latitude of cross points
xlong 0 99 longitude of cross points
xmap 0 99 map factors of cross point
dmap 0 99 map factors of dot points
coriol 0 99 coriol force
mask 0 99 land/sea mask
endvars
```

Fichier 2 : Liste des variables dans le fichier contrôle ICBCYYYYMMDDHH
dset ^Madagascar_sud_ICBC1992010100

```
title ICBC fields for RegCM domain
options big_endian
undef -9999.
xdef 15 linear 42.5773 0.4496
ydef 15 levels
-26.15 -25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47
-22.05 -21.63 -21.21 -20.79 -20.37
zdef 18 levels 1008.43 998.80 984.35 960.27 926.56 883.21 830.23 767.62 695.38 618.32
541.26 464.20 387.14 310.08 237.83 175.22 122.24 74.08
tdef 125 linear 0z01jan1992 6hr
vars 7
date 0 99 header information
u 18 0 westerly wind
v 18 0 southerly wind
t 18 0 air temperature
q 18 0 specific moisture
px 0 99 surface pressure
ts 0 99 surface air temperature
endvars
```

Fichier 3 : Fichier contrôle de la température de la surface de la mer (SST)

```
dset ^Madagascar_sud_RCM_SST.dat
title SST fields for RegCM domain
options big_endian
undef -9999.
xdef 15 linear 42.5773 0.4496
ydef 15 levels
-26.15 -25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47
-22.05 -21.63 -21.21 -20.79 -20.37
zdef 1 levels 1000.00
tdef 54 linear 00z29dec1991 7dy
vars 1
sst 0 99 surface elevation
endvars
```

Fichier 4 : Fichier de description des données radiatives « RAD »

dset ^RAD.1992010100

title RegCM normal output variables

options big_endian

undef -1.34

xdef 13 linear 43.0270 0.4496

ydef 13 levels

-25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47 -22.05

-21.63 -21.21 -20.79

zdef 18 levels 1008.43 998.80 984.35 960.27 926.56 883.21 830.23 767.62 695.38 618.32

541.26 464.20 387.14 310.08 237.83 175.22 122.24 74.08

tdef 125 linear 0z01jan1992 6hr

vars 14

cld 18 0 cloud fractional cover

clwp 18 0 cloud liquid water path

qrs 18 0 solar heating rate

qrl 18 0 longwave cooling rate

frsa 0 99 surface absorbed solar flux

frla 0 99 longwave cooling of surface

clrst 0 99 clearsky total column abs solar flux

clrss 0 99 clearsky surface absorbed solar flux

clrlt 0 99 clearsky net upward LW flux at TOA

clrls 0 99 clearsky LW cooling at surface (W/m2)

solin 0 99 instantaneous incident solar (W/m2)

sabtp 0 99 total column absorbed solar flux W/m

firtp 0 99 net upward LW flux at TOA (W/m2)

psa 0 99 Surface pressure (hPa)

endvars

Fichier 5 : Fichier de description des données de la surface terrestre « SRF »

```
dset ^SRF.1992010100
title RegCM normal output variables
options big_endian
undef -1.e34
xdef 13 linear 43.0270 0.4496
ydef 13 levels
-25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47 -22.05
-21.63 -21.21 -20.79
zdef 1 levels 1008.43
tdef 249 linear 0z01jan1992 3hr
vars 27
u10m 0 99 westerly wind at 10m (m/s)
v10m 0 99 southerly wind at 10m (m/s)
uvdrag 0 99 surface drag stress
tg 0 99 ground temperature (degree)
tlef 0 99 temperature of foliage
t2m 0 99 air temperature at 2m (K)
q2m 0 99 water vapor mixing ratio at 2m(kg/kg)
ssw 0 99 upper layer soil water
rsw 0 99 root zone soil water
tpr 0 99 total precipitation (mm/day)
evp 0 99 evapotranspiration (mm/day)
runoff 0 99 surface runoff (mm/day)
scv 0 99 snow amount (mm, water equivalent)
sena 0 99 sensible heat flux (W/m2)
flw 0 99 net infrared energy flux (W/m2)
fsw 0 99 net absorbed solar energy flux (W/m2)
flwd 0 99 downward infrared energy flux (W/m2)
sina 0 99 incident solar energy flux (W/m2)
prcv 0 99 convective precipitation (mm/day)
psb 0 99 surface pressure (hPa)
zpbl 0 99 PBL layer height
tgmax 0 99 maximum ground temperature (K)
tgmin 0 99 minimum ground temperature (K)
t2max 0 99 maximum 2m air temperature (K)
t2min 0 99 minimum 2m air temperature (K)
w10max 0 99 maximum 10m wind speed (m/s)
ps_min 0 99 minimum surface pressure (hPa)
endvars
```

Fichier 6 : Fichier de description des données atmosphériques « ATM »

```
dset ^ATM.1992010100
title RegCM normal output variables
options big_endian
undef -1.e34
xdef 13 linear 43.0270 0.4496
ydef 13 levels
-25.75 -25.34 -24.94 -24.53 -24.12 -23.71 -23.29 -22.88 -22.47 -22.05
-21.63 -21.21 -20.79
zdef 18 levels 1008.43 998.80 984.35 960.27 926.56 883.21 830.23 767.62 695.38 618.32
541.26 464.20 387.14 310.08 237.83 175.22 122.24 74.08
tdef 125 linear 0z01jan1992 6hr
vars 11
u 18 0 westerly wind (m/s)
v 18 0 southerly wind (m/s)
w 18 0 omega (hPa/s) p-velocity
t 18 0 air temperature (degree)
qv 18 0 water vapor mixing ratio
qc 18 0 cloud water mixing ratio
psa 0 99 surface pressure (hPa)
tpr 0 99 total precipitation(mm/day)
tgb 0 99 lower ground temp. in BATS
swt 0 99 total soil water in mm H2O
rno 0 99 accumulated infiltration
endvars
```



Titre :

Contribution à l'étude du changement climatique : « Étude de la sécheresse dans le sud de Madagascar et l'utilisation du modèle climatique régionale RegCM4 »

Auteur :

Mamy Andriamirado NOMENJANAHARY
e-mail anomenjanaharymamy@yahoo.com/mamyandriamirado@yahoo.com
☎ (+261)0330479677

Nombre de pages : 90

Nombre de tableaux : 33

Nombre de figures : 60

RESUME

La sécheresse a de graves effets néfastes sur le développement durable des pays et des régions en développement. Elle touche des différents secteurs économiques, et elle fait chuter la production agricole, entraînant ainsi pénuries alimentaires et insécurité alimentaire qui, à leur tour, engendrent famine, rareté de l'eau et perte des vies humaines.

Le présent mémoire étudie la mesure de la performance du modèle climatique régional RegCM4 pour caractériser la sécheresse. La zone d'étude porte sur la partie Sud de Madagascar et sur six années. La démarche se fait en confrontant les résultats du modèle avec des données réelles dans le calcul d'SPI (Indice de précipitation standardisé) et de l'indice de l'écart à la moyenne.

Nous pourrions apporter des solutions importantes, notamment dans la prévision de la sécheresse en utilisant le modèle RegCM4 et améliorer la pratique du système d'alerte précoce.

ABSTRACT

The drought causes serious harmful effects for lasting development of the countries and of the developing areas, it involves various economic sectors, it decreases the agricultural production, thus involving food shortages and food insecurity which, in their turn, generate starvation, water scarcity and human death.

The present report studies about the measurement of the performance of the regional climatic model RegCM4 to characterize the drought. The area of study is the Southern Madagascar whose studied cases are six years. The process is done by confronting the results of the model with real data in calculation of the SPI (Standardized Precipitation Index) and of the index of the average variation.

We will be able to bring significant solutions, especially in the drought forecast by using the RegCM4 model to improve the practice of the early alarm system.

Mots clés : Sècheresse – RegCM4 – Indice de Sècheresse – MCR – SPI

Rapporteur : Monsieur RANDRIANASOLO Léon