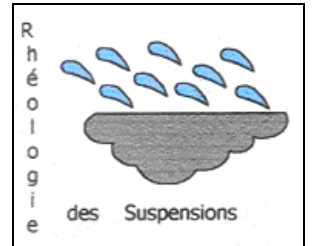




UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.)

Option : Mécanique et Physique des Suspensions

Présenté par

Mademoiselle ANDRY ARIVELO Tatiana

LA CLIMATOLOGIE DE LA PLUIE A MADAGASCAR

soutenu publiquement

le 30 Septembre 2005

devant la Commission d'Examen composée de

Président :

**Monsieur Emile Ralaisoa RAKOTOMAHANINA
Professeur Titulaire**

Rapporteur :

**Monsieur Adolphe Andriamanga RATIARISON
Professeur**

Membres de Jury :

**Madame Mariette RAZANAJATOVO
Professeur
Monsieur RABEMANOTRONA
Maître de conférences**

REMERCIEMENTS

- Un « parfum de bonne odeur » pour le Seigneur car il est ma protection, ma justice et ma joie. Les mots ne suffisent pas à dire sa bonté, à Lui seul la gloire éternelle.

- à Monsieur RAKOTOMAHANINA Ralaisoa Emile, Professeur Titulaire, qui me fait l'honneur de présider le jury, vos aimables paroles m'ont vraiment touchée. Je vous adresse un grand merci.

- à Monsieur RATIARISON Adolphe Andriamanga, Professeur Encadreur, ma profonde gratitude pour votre encadrement, vos encouragements et vos conseils, c'est grâce à vous que ce travail se réalise.

- à Madame RAZANAJATOVO Mariette, Professeur, qui a accepté de participer au jury, votre merveille douceur dissimule tant d'encouragements. Mes sincères reconnaissances vous sont adressées.

- à Monsieur RABEMANOTRONA, Maître de conférences, qui a ménagé son temps, ses efforts pour mener à bien cette étude, vos jugements avec bon sens m'ont beaucoup impressionnée. Merci !

- à Monsieur Miloud BESSAFI, Professeur, " without your good advice, something goes wrong – accept my deep recognition dear professor ".

Je tiens à remercier également Monsieur Zoharimalala RABEFITIA et Monsieur Hary RAZAFINDRABE, vos énormes apports sur mes recherches ont mis en valeur ce travail.

- à mes parents, vos soutiens constants morales et physiques me fortifient davantage. Merci.

Je n'oublierais pas aussi la Direction Générale de la Météorologie d'Antananarivo qui m'a permis d'accéder à la documentation et d'utiliser les nombreux fichiers de donnée climatologique. Merci à vous.

Enfin, que mes sincères remerciements s'adressent à toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin concernant ce mémoire.

LA CLIMATOLOGIE DE LA PLUIE A MADAGASCAR

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION GENERALE.....	1
GENERALITES SUR LA PLUIE.....	2
I- LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE GENERALE	
I-1.La circulation méridienne.....	5
I-2.La circulation zonale.....	6
II- ETUDE PLUVIOMETRIQUE	
II-1.Les régimes pluviométriques.....	7
II-2.Régionalisation pluviométrique.....	9
II-3.Analyse spatiale de la pluviométrie.....	11
III- ANALYSES DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES DEPUIS 1961-1990	
III-1.Données utilisées.....	13
III-2.Présentation des stations utilisées.....	15
III-3.Etude basée sur le cumul pluviométrique.....	
III-3.1.Le cumul annuel en moyenne de la pluie pour une série de 30 ans....	16
III-3.2.Le cumul pluviométrique depuis 1961 à 1990.....	17
III-3.3.La distribution statistique de la pluviométrie et le cumul de pluie mensuelle.....	24
III-4.Analyse spectrale des données sur les précipitations journalières.....	28
III-5.Etude de la tendance du nombre de jours de pluie depuis 30 ans.....	32
SYNTHESES DES RESULTATS DES ANALYSES.....	40

CONCLUSION GENERALE.....	41
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	42
ANNEXES.....	43

INTRODUCTION GENERALE

Située dans le canal du Mozambique, le long de la côte sud africaine, au sud ouest de l'Océan Indien , localisée entre 12° et 25° 30' de latitude sud, traversée au sud par le Tropique du Capricorne, Madagascar est la quatrième plus grande île du monde avec une superficie de 587.000km². Il dont le profil transversal est marqué par une forte dissymétrie entre les deux versants : à l'Est, l'altitude s'élève rapidement et on atteint les régions centrales par une falaise escarpée. Ses plaines côtières orientales sont très étroites. Vers l'Ouest par contre le relief s'abaisse de façon beaucoup plus progressive vers des régions basses plus étendues.[1]

A l'heure actuelle, la ressource en eau devient de plus en plus limitée et difficile à exploiter. Leur quantité sur le territoire malgache est inégale ; elle est relativement abondante dans la côte Est tandis que la région du Sud-Est présente une situation vulnérable de manière périodique à la sécheresse. La ressource en eau est surtout conditionnée par des précipitations sous forme de pluie accompagnée ou non par des cyclones affectant surtout la partie Est de Madagascar.

L' objectif de cette étude est d' établir la climatologie de la pluie à Madagascar qui servira de référence pour les études sur l'anomalie des précipitations. L'anomalie est en faite un phénomène qui dépasse la climatologie. Quelques auteurs définissent la climatologie comme :

« Science de l'atmosphère qui a pour objectif la description synthétique, le classement et l'explication des différents types de climat dans un cadre géographique ». (Beltrando et Chemery, 1995).[2]

« Branche de la géographie qui a pour but de décrire le climat terrestre, c'est-à-dire, d'estimer son état moyen. » (Von Storch et Zwiers, 1999). [3]

Le rôle de la climatologie de la pluie devient désormais crucial pour les hommes, puisque cette science prédit l'évolution future de la pluie à Madagascar qui conditionne directement la ressource en eau. Les décisions prises s'appuient d'ailleurs sur les rapports faits puisque la vie des êtres vivants en dépend.

Ce document va contenir les résultats des études effectuées avec des données relativement récentes. Il s'agit des données qui ont évoluées durant la période 1961-1990 disponibles auprès du service des Etudes de Recherches de la Direction Générale de la Météorologie.

La première partie de ce document renferme la circulation générale de l'atmosphère à Madagascar puisque elle est fortement liée avec la climatologie de la pluie à Madagascar.

La seconde partie est consacrée à l'étude basée sur la pluviométrie. Et enfin la troisième partie va couvrir les résultats des analyses faites avec les données de précipitation journalière.

GENERALITES SUR LA PLUIE

L'eau existe dans l'atmosphère sous trois formes : gazeuse (vapeur d'eau), liquide (les gouttelettes des nuages) et solide (les cristaux de glace). Liquide ou solide, l'eau ne se maintient en suspension dans l'air que sous forme de petite particule de moins de 0,1mm qui flotte comme des poussières. Si cette taille est dépassée, gouttes ou cristaux tombent vers le sol, ce sont alors des précipitations. Il ne faut donc pas penser que toute condensation donne une pluie. En effet, pour qu'on passe de la condensation à la précipitation, il faut qu'il y ait une ascendance de l'air. Cette ascendance est primordiale car c'est elle qui engendre la pluie.

La vapeur d'eau contenue dans l'air est à la fois fournie par l'évaporation opérée sur les océans, mers, lacs, cours d'eau et dans les sols humides, et par la transpiration physiologique de la végétation. L'évaporation est surtout régie par la température et par la radiation solaire directe, puis par l'humidité atmosphérique et la vitesse du vent.

En parlant de l'humidité atmosphérique, on définit l'humidité absolue comme la masse de vapeur d'eau contenue dans une unité de volume d'air. Cette **tension de vapeur d'eau** généralement symbolisée par la lettre **f** s'exprime souvent en gramme par m³. L'humidité absolue ne peut pas dépasser une certaine valeur limite appelée **tension maximale F**. On dit que l'air est saturé. La valeur de l'humidité saturante dépend de la température : faible pour l'air froid, elle s'élève de plus en plus rapidement au fur et à mesure que la température augmente. La capacité hygrométrique varie dans de grandes proportions à la surface du globe puisque elle est beaucoup plus élevée dans la zone intertropicale que dans les hautes latitudes. Elle est également plus élevée dans un milieu maritime (jusqu'à 30 g/m³) que dans un milieu continental en hiver.[4]

Le rapport (exprimé en pourcentage) de l'humidité absolue **f** sur l'humidité saturante **F** définit l'humidité relative. En effet, le point de saturation est atteint à 100% d'humidité absolue. La notion d'humidité relative est importante car elle nous renseigne sur le déficit de saturation. Exemple : Avec une température de 5°C, l'air qui contiendrait 6g/m³ de vapeur d'eau nous paraîtrait très humide car la saturation à cette température se fait à 6,8g/m³ et le rapport **f / F** serait donc égal à 88%. Par contre à 22.5°C, l'air ayant le même degré hygrométrique serait ressenti comme extrêmement sec, puisque la tension maximale ne serait atteinte qu'à 20g/m³. Le rapport **f/F** ne serait alors seulement que de 30%.

Pour cela, les **masses d'air** qui traversent la Grande Ile, viennent toutes de vastes étendues océaniques sur lesquelles elles ont cheminé longuement. Réchauffées par les mers chaudes, humidifiées par l'évaporation qui s'avère intense entre 10 et 30° de latitude Sud, ces masses d'air caractérisent en surface l'apport de températures élevées (de 20 à 27°C) et une assez grande humidité relative (75-85% ; souvent plus).

Les perturbations dues au **relief** sont aussi très importantes car l'Ile est en effet traversée dans toute sa longueur du Cap d'Ambre à Fort-Dauphin par une crête montagneuse. La barrière montagneuse est alors orientée grossièrement vers le Nord-Nord-Est et qui par conséquent exactement perpendiculaire à la direction moyenne de l'alizé. L'ascendance de l'air humide déclenchée par le relief est le facteur principal des nuages et de la pluie. C'est pour cela que la côte et le versant Est de Madagascar sont très humides pendant toute l'année à cause de l'interaction de l'alizé avec le relief. [5]

Les **cyclones tropicaux** sont aussi capables de produire de fortes pluies sur le territoire malgache car ils se forment dans l'Océan Indien et le canal du Mozambique. Tous les bassins susceptibles à ce phénomène ont chacun leurs profils saisonnières suite aux évènements cycloniques tropicales prélevés sur les stations situées à la proximité de chaque bassin considérés.

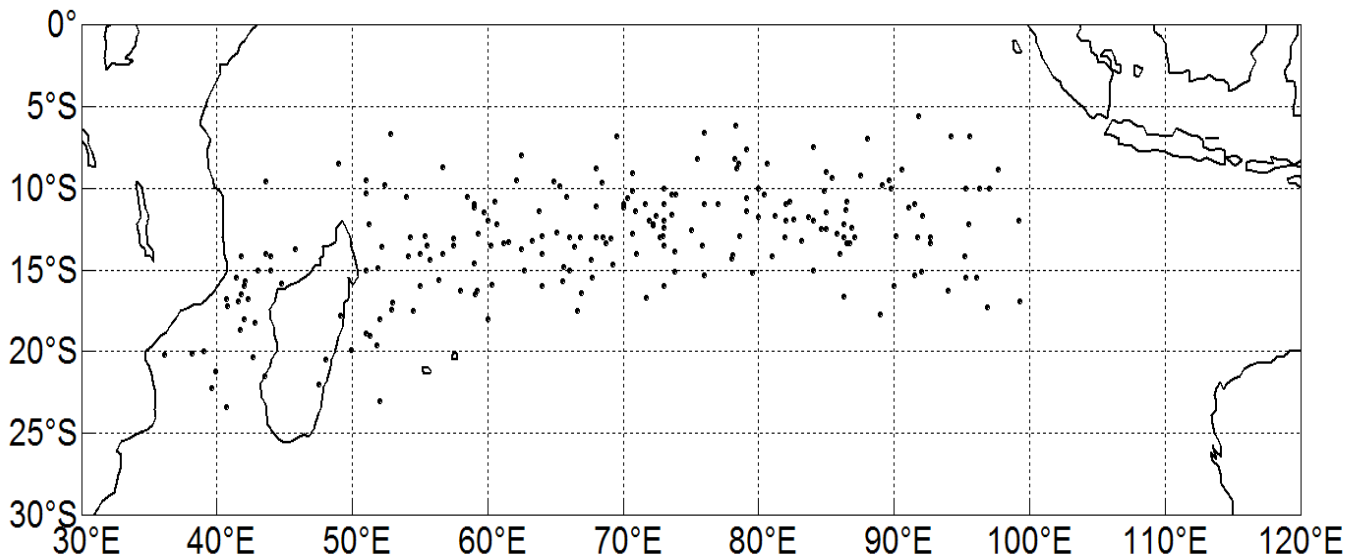


Figure 1 : Activité cyclonique de 1979-2004 : Répartition géographique [6]

D'après la figure 1, on note que Madagascar baigne dans la zone susceptible à la formation du cyclone dans l'hémisphère Sud durant l'été austral. Si on se limite entre la longitude 30°E à 100°E et la latitude 5°S à 25°S, on estime que 75% des cyclogenèses naissent dans l'Océan Indien et le reste dans le Canal du Mozambique depuis 1979 jusqu'en 2004.

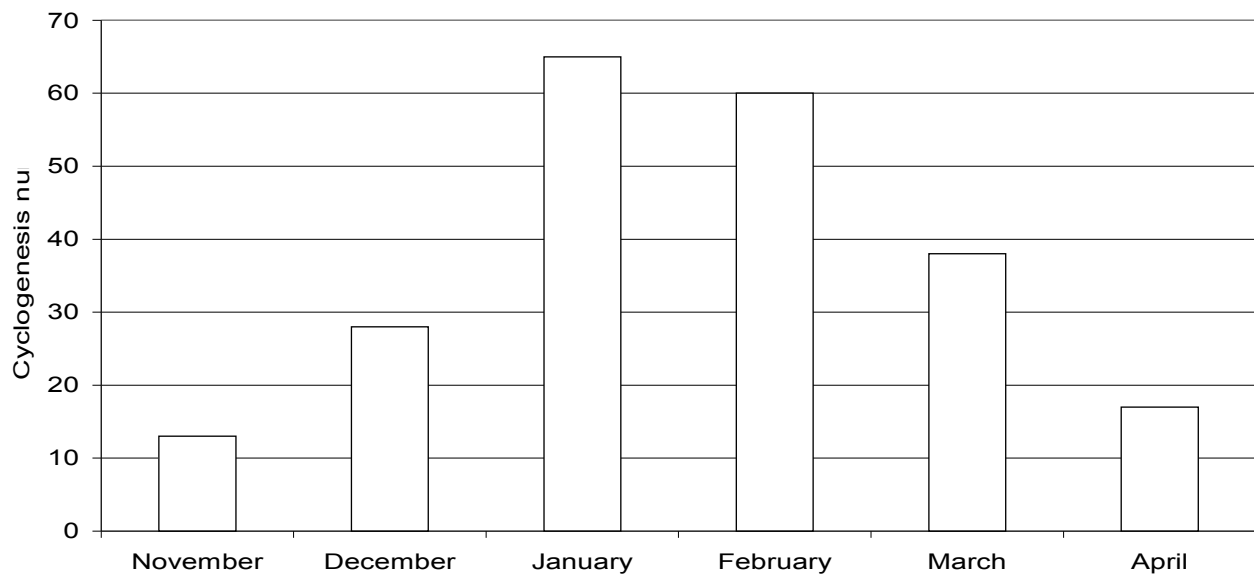


Figure 2 : Activité cyclonique de 1979-2004 : Nombre de cyclogenèses [6]

La figure 2 ne fait que compléter la figure 1 puisqu'elle montre le nombre de cyclogenèses par mois au même endroit et à la même période. En effet, on constate qu'à Madagascar l'activité cyclonique débute le mois de Novembre et prend fin le mois d'avril. Le nombre record de cyclogenèses mensuel depuis 25ans est de 65 fois pour les mois de Janvier depuis 1979 à 2004.

I- LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE GENERALE

La circulation atmosphérique générale est un milieu hyper-dynamique qui influe considérablement sur le climat des régions situées dans la bande tropicale. Elle est composée de la circulation méridienne et de la circulation zonale puisque les mouvements horizontaux et verticaux des vents ne sont pas homogènes dans tous les domaines.

1.1- La circulation méridienne

La circulation méridienne se déplace en suivant le mouvement apparent du soleil. La signature de la circulation méridienne peut être décrite par la convergence intertropicale parce que elle est localisée dans la bande latitudinale la plus chaude c'est-à-dire l'endroit normal au rayonnement solaire. En effet, la rotation terrestre suivant la trajectoire elliptique résulte que la bande latitudinale favorable à la formation des nuages se trouve dans l'hémisphère Nord pendant l'hiver austral et dans l'hémisphère Sud pendant l'été austral.

La ZCIT : ou Zone de Convergence InterTropicale, plus précisément la zone où convergent les alizés des deux hémisphères. Les alizés sont des vents d'est réguliers parfois assez forts, soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans l'hémisphère sud.

Il existe au niveau de cette zone une ascendance de grande échelle qui favorise la formation de puissants cumulonimbus générateurs de fortes pluies. En étudiant le balancement latitudinal de la ZCIT, on observe qu'elle peut représenter le modèle théorique des différents régimes pluviométriques dans cette zone. [7]

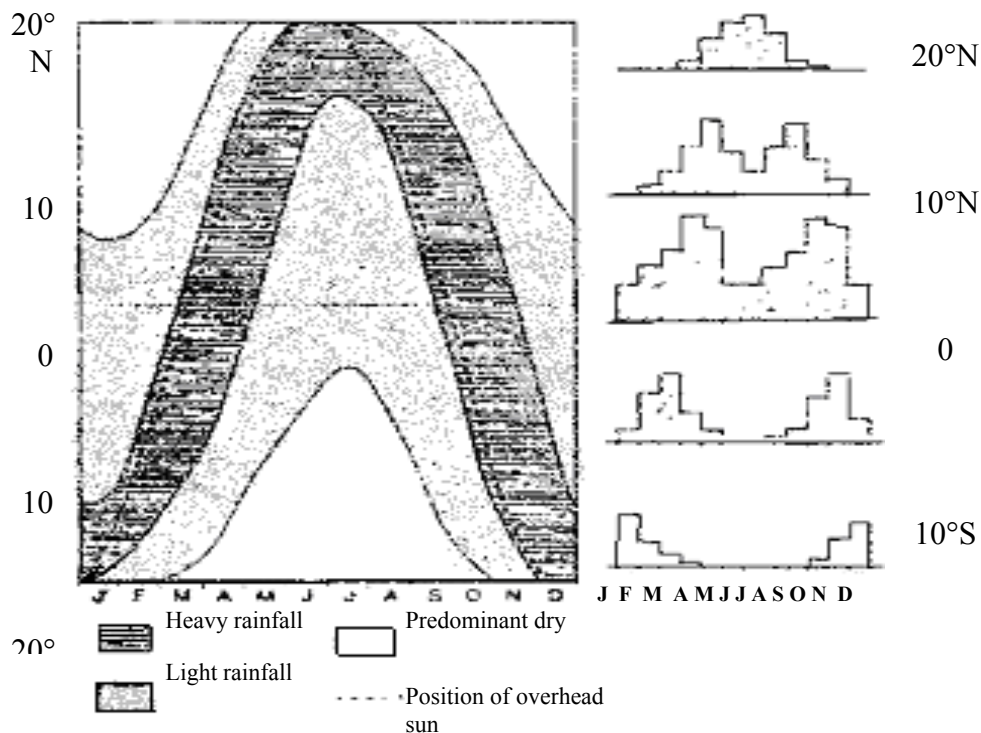


Figure 3 : Distribution des régimes pluviométriques en fonction de la latitude.

Heavy rainfall = fortes précipitations,
 light rainfall = faibles précipitations,
 predominant dry = sécheresse prédominant,
 position of overhead sun = position de l'équateur solaire.
 (d'après McGregor et Nieuwolt, 1998).[8]

Etant donné que Madagascar se localise entre 12°S et 25°S 30', les modèles théoriques de ses régimes pluviométriques peuvent être extraits à partir de la figure 3. Plus particulièrement, en se limitant à 20°S les régions se trouvant sur cette latitude possèdent deux types de saison. Il y a tout d'abord la saison pluvieuse qui est marquée par la conjugaison des fortes précipitations et des faibles précipitations ; ensuite la saison sèche qui va durer exactement six mois toujours d'après la figure 3.

1.2- La circulation zonale

La circulation zonale a été mise en évidence par une variation de la pression atmosphérique d'Est-Ouest (la branche ascendante se trouve à l'ouest et la branche subsidente à l'est) ou l'inverse (c'est le cas de l'Océan Indien). Actuellement, le nombre exact des cellules zonales ceinturant la terre n'est pas encore tenu en raison de la divergence qui existe entre les auteurs.

Remarques

- Une circulation extra-tropicale a été localisée au Sud-Ouest de l'Océan Indien : l'anticyclone se détachant des cellules de hautes pressions circule d'Ouest en Est. Cet anticyclone quasi permanent qui, dominant la circulation générale de l'atmosphère à Madagascar, entretient sur la côte Est un régime d'alizé de secteur Est/Sud-Est.
- Le couple océan-atmosphère forme un système à boucle rétroaction car la chaleur spécifique de l'eau de mer est quatre fois plus importante que celle de l'air, l'océan constitue un réservoir de chaleur pour l'ensemble océan-atmosphère. Les manifestations les plus remarquables de cette capacité à emmagasiner de la chaleur et de la restituer dans l'atmosphère sont les cyclones, véritables soupapes de sécurité du couple océan-atmosphère[7].

II- ETUDE PLUVIOMETRIQUE

II.1- Les régimes pluviométriques

A partir du cycle annuel et saisonnier de la pluviométrie, les différents régimes pluviométriques de Madagascar sont présentés. Parmi les trois types de régime pluviométrique découverts par Jackson [9], Madagascar en possède deux.

Le premier représente le régime pluviométrique classé **plus humide** avec un total pluviométrique annuel supérieur à 2000mm. Deux cas de ce premier type de régime pluviométrique existent dans notre espace d'étude :

- le cas (1a) dont le total mensuel moyen est toujours supérieure à 100mm mais ne dépasse pas 150mm.
- le cas (1b) avec un total mensuel compris entre 150 et 300mm ou supérieur dont la station de Sambava (14°17S / 50° 10E) en est un exemple.

La classe plus humide envahit la majeure partie de l'île (Est, Nord, Nord-Ouest).

Le deuxième représente le régime pluviométrique avec une **alternance de saisons humide et sèche** ou moins humide. Le cas (2e) de ce régime concerne surtout la partie Sud-Ouest/Sud de Madagascar. Pour cela, la saison humide est de 3 à 4 mois avec des totaux annuels compris entre 250 et 650mm ; mais les mois humides ont un total pluviométrique moins de 50mm en moyenne. Cette zone est typique des régimes de moussons ou de climat tropical semi-aride c'est-à-dire avec une seule saison humide et sèche. Elle représente les régimes pluviométriques que l'on retrouve vers $\pm 20^\circ$ Nord ou Sud dans le modèle théorique.

Illustrons la répartition de Madagascar d'après ses propres régimes pluviométriques en utilisant les données pluviométriques durant la période 1961-1990, par la figure 4.

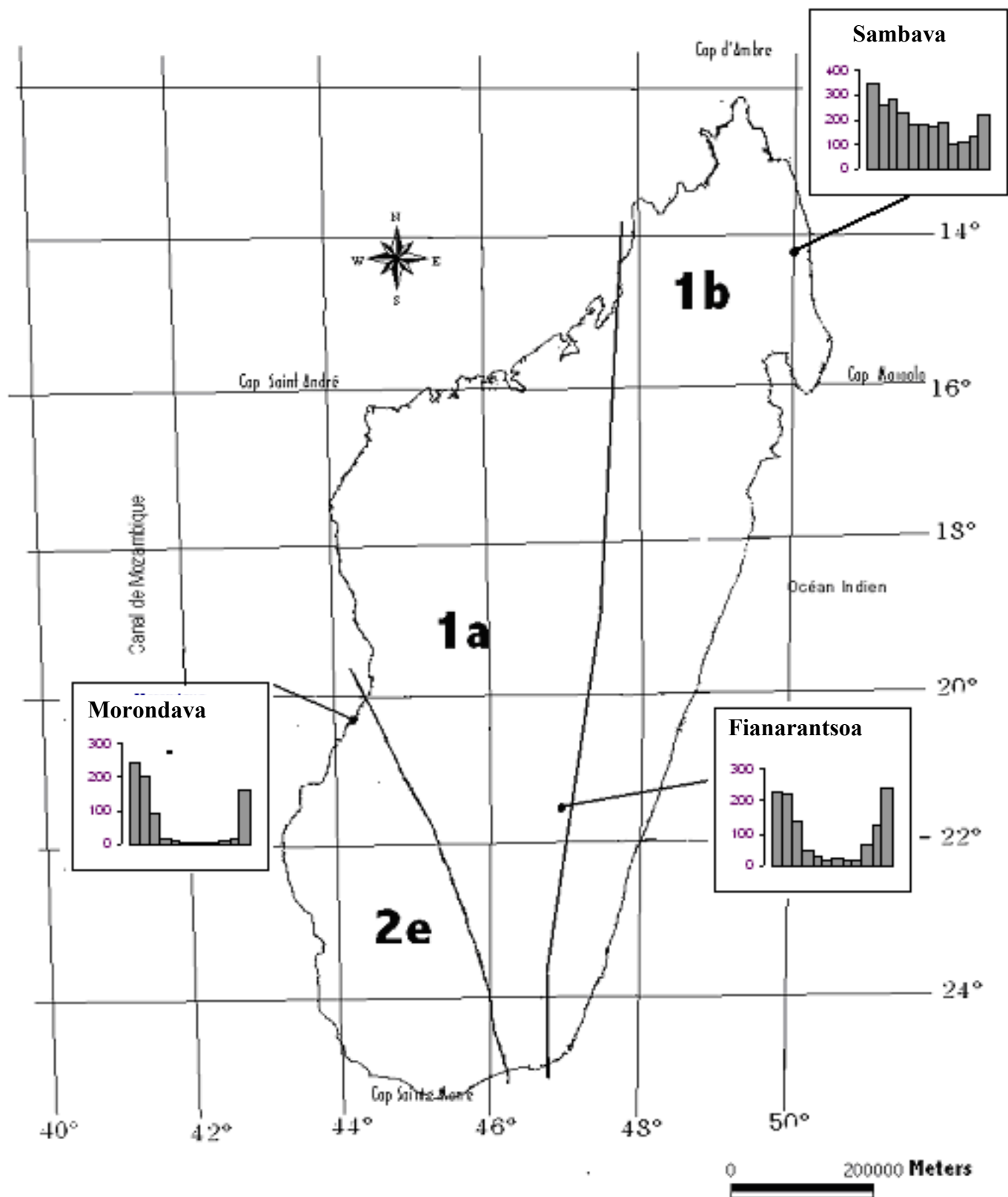


Figure 4 : La répartition des régimes pluviométriques rencontrées à Madagascar

II.2 Régionalisation pluviométrique

Elle est fortement influencée par le **relief**. On peut distinguer quatre régions climatiques : la côte Est, la côte Ouest, la région centrale et l'extrême Sud [7].

La côte Est

C'est la région la plus arrosée de l'Ile. Elle est sous l'influence, toute l'année des alizés du Sud-Est. Les masses d'air y subissent une ascendance orographique sur les pentes montagneuses ; il s'ensuit de fortes précipitations. Celles-ci sont encore plus importantes durant l'été austral puisque les basses pressions associées à la ZCIT couplées aux cyclones qui se développent au Nord de l'Ile apporte un complément de pluie (Fig. 5). Durant l'hiver austral (Fig. 6), les alizés sont plus forts à cause des anticyclones centrés sur l'océan indien ; en Septembre-Octobre, les précipitations sont plus faibles à cause de l'affaiblissement des alizés qui se produisent avant la remontée de la ZCIT en Novembre-Décembre. Cette zone est très humide dont la pluie moyenne annuelle atteint plus de 1800mm.

La côte Ouest

Durant l'hiver, elle est sous l'influence des alizés du Sud-Est, les masses d'air sont sèches, l'humidité ayant été déjà déposé sur le versant Est de l'Ile.

La région centrale

Elle correspond à des plateaux élevés (entre 700 et 1400 m) et est soumise aussi aux alizés du Sud-Ouest mais les précipitations sont faibles, les ascendances orographiques sont peu importantes et la couche d'air humide est peu épaisse. Les précipitations les plus importantes se produisent durant l'été austral, c'est-à-dire durant le passage de la ZCIT dans l'hémisphère Sud.

L'extrême Sud

C'est une région Semi-aride où la moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 600mm. On observe pendant la saison sèche que les températures des surfaces océaniques soient inférieures à 18° C. La quantité d'énergie se trouvant dans l'océan n'est donc pas assez élevée pour le rendre à l'état gazeux et finir par s'évaporer.

Remarque : A partir des précipitations annuelles, on peut faire une classification climatique selon le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Classification climatique en fonction de la pluie annuelle

Type de climat	Pluie annuelle (en mm)
Tendance aride	200 à 400
Semi-aride	400 à 600
Sub-humide	600 à 1200
Humide	1200 à 1800
Très humide	1800 et plus

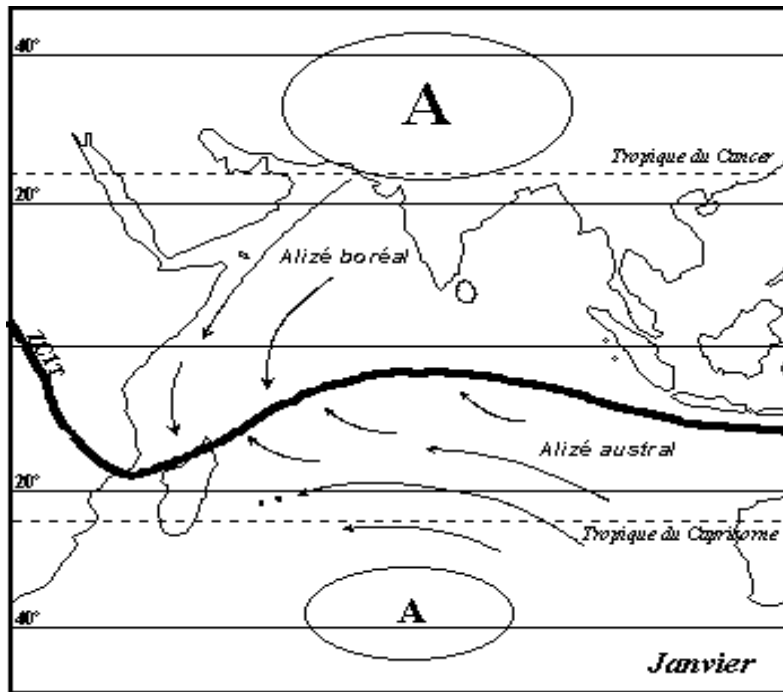


Figure 5 : Situation type en été austral

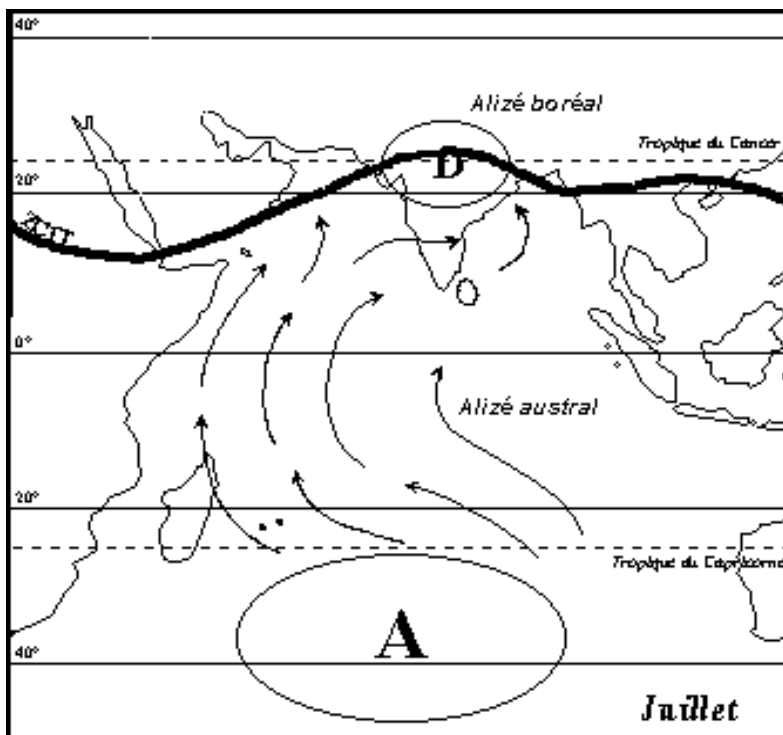


Figure 6 : Situation type en hiver austral

II- 3. Analyse spatiale de la pluviométrie

a) La carte pluviométrique suivante a été établie à partir des données de 1961 à 1990 dans les 111 stations météorologiques réparties dans chaque district de Madagascar.

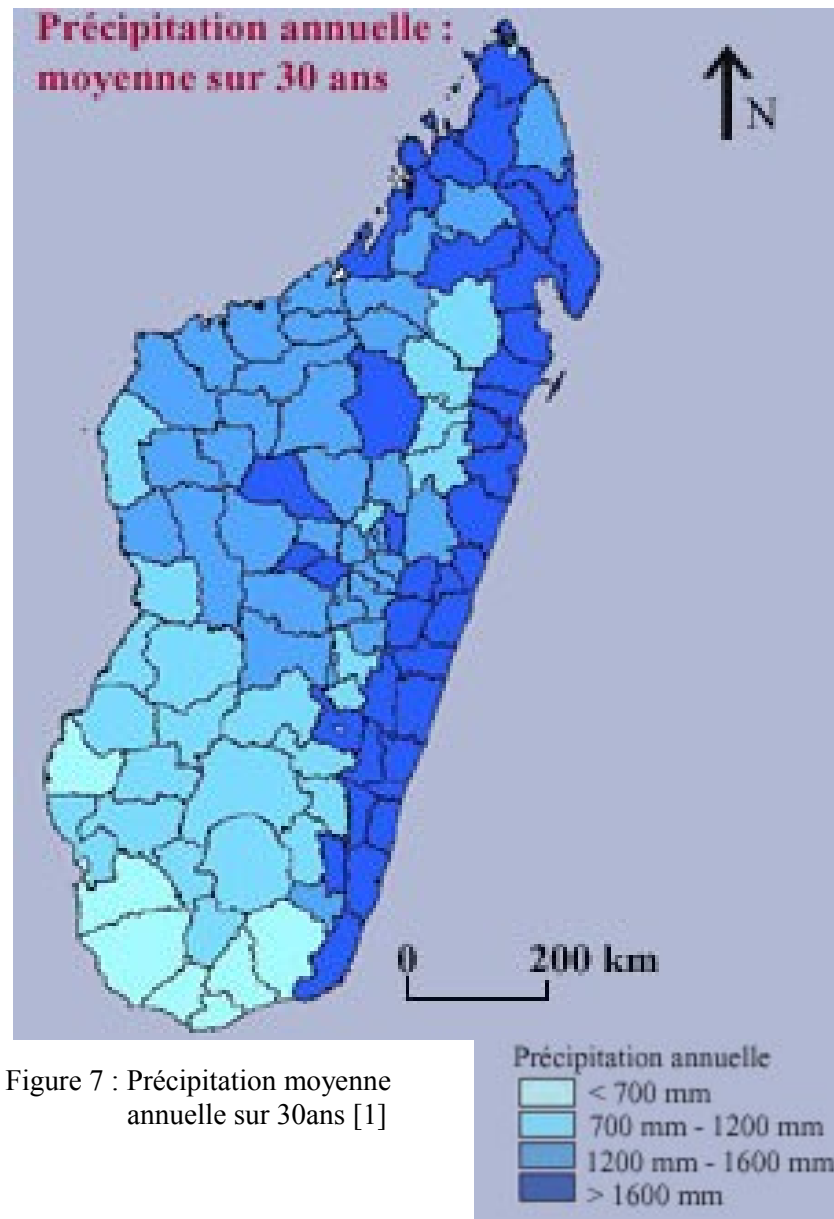


Figure 7 : Précipitation moyenne annuelle sur 30ans [1]

Schématiquement, nous distinguons sur cette carte 4 grandes zones :

- les *régions orientales* aux totaux annuels supérieurs à 1600 mm et où les lignes d'égale pluviosité s'ordonnent selon un axe méridien parallèle au rivage,
- le *Sud*, caractérisé par la faiblesse des précipitations et où l'effet de continentalité aggrave la sécheresse de l'intérieur,
- une bande de forte pluviosité relative au voisinage de *l'extrême Nord jusqu'à l'Ouest d'Antananarivo*, où les forts totaux sont dus à la mousson estivale,
- les *Hautes Terres Centrales et du Sud ainsi que les régions côtières occidentales* à pluviosité moyenne où se conjuguent pluies de mousson et d'alizé mais aux apports relativement faibles [1].

b) La carte suivante (Fig. 8) met en évidence les pluviométries mensuelles moyennées sur 30 ans toujours à partir des données enregistrées sur les 111 stations météorologiques malgaches.

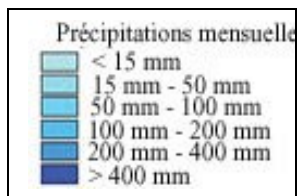


Figure 8 : Analyse spatiale de la pluviométrie moyenne mensuelle depuis 1961 à 1990 [1]

Sur cette carte, on distingue 5 grandes régions en fonction de la durée de la saison sèche:

- l'Est toujours humide,
- le Sud avec 11 ou 12 mois secs,
- l'Ouest où la saison sèche s'étale sur 6 à 7 mois avec, dans le Sud-Ouest un maximum de 8 à 9 mois dû à la continentalité,
- les plateaux s'asséchant progressivement vers l'Ouest,
- l'extrême Nord, autour d'Antsiranana, qui au-delà de l'interruption due aux massifs montagneux retrouve une sécheresse comparable à celle de l'Ouest.[1]

III- ANALYSE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES DEPUIS 1961-1990

III- 1. Données utilisées

Les données pluviométriques de base que nous utilisons proviennent de la Direction Générale de la Météorologie et de l'Hydrologie. Il s'agit en fait des pluies journalières mesurées en mm pour les 6 principales villes : Antananarivo, Tuléar, Antsiranana, Majunga, Tamatave et Fianarantsoa depuis 1961 jusqu'en 1990. Rappelons que la pluie du jour J est exprimée conventionnellement par le total de la pluie mesurée à 18h le jour J ajouté de la pluie mesurée à 6h le jour J+1[10].

Signalons que les valeurs pluviométriques journalières obtenues présentent moins de 1% de lacunes, elles ont été restituées en les remplaçant par la moyenne de la série. La validation a été faite pour la station comprenant les valeurs restituées en analysant les chroniques pluviométriques par la méthode des sommes cumulées.

A part des données journalières, on s'est servi des normales de précipitations mensuelles sur la même période des 19 autres stations comme référence des résultats issus des 6 stations.

Tableau 2 : Exemples de données de précipitations journalières (en mm) du mois de janvier au mois de mars depuis 1961 à 1965 pour la station d'Antananarivo

mois	jour	1961	1962	1963	1964	1965
1	1	50,6	2,4	4,1	0	4,5
1	2	5,3	0	1	0	22,3
1	3	20,9	0	15,3	0,1	0,1
1	4	30,9	0	17,2	0	0,4
1	5	24,6	1,4	0,7	0	0
1	6	12,3	1,5	0	0	3,3
1	7	11,3	0	8,9	0	3,2
1	8	43,8	0	6,4	0	38,3
1	9	7,7	0	0	0	13,5
1	10	0	2,1	0	12,1	15,9
1	11	0	0	0	19	3,1
1	12	0	0	0	4,2	0,4
1	13	0	0	0	6,5	2,3
1	14	2,2	1,3	0	5,1	10,4
1	15	0	0,7	0	0	8,2
1	16	0	0	1,3	0	6,2
1	17	0	0	4	0	3,7
1	18	0	1,1	1,8	2,1	0
1	19	0	0,9	24	0	0
1	20	0	8,9	23	9,2	6,8
1	21	0	0	11,2	0	66,2
1	22	9,4	0	2,6	13,6	57,2
1	23	0,9	3,7	0	0,6	9,1
1	24	6,4	29,4	53	0	1,6
1	25	12	0	0	0	0,9
1	26	0,8	0	1,8	0	5
1	27	0,3	0	54,9	11	0
1	28	0	0	30,2	11,6	50,1
1	29	0	0	10,7	39,3	47,2
1	30	0	10,9	0,2	0	9,2
1	31	0	12,8	0	0	33,2
2	1	0	0,1	0	0	12,6
2	2	0	0	0,1	0	6,8
2	3	0	0	0	21,2	17,3

2	4	0	0	13,2	62,4	16,1
2	5	0	0	0	22,8	0
2	6	0	0	0	27,5	0,6
2	7	0	0	4,4	36,4	0
2	8	0	0	0,5	14,9	12,6
2	9	14,8	25,5	0	51,2	3,1
2	10	0	0,1	0	0,1	15,1
2	11	0	0	0	0,6	0
2	12	0	0	0	21	0
2	13	0	2	0	18,7	0
2	14	0	0,3	6,9	24,6	0
2	15	19,4	0	39,2	12,8	0
2	16	0	0	12,1	11,4	0
2	17	15,6	0	33,1	0	0
2	18	0	7,2	17,5	0	5,7
2	19	0	2,2	0	0	16,3
2	20	0	42,7	0,7	0,1	11,1
2	21	0	9,2	0	0,5	21,6
2	22	0	4	0	0	0,5
2	23	0	13,8	0	0,1	18,3
2	24	0	53,8	0	0	0
2	25	0	8,8	0	0,2	10,9
2	26	0	0	8,6	0,7	19,8
2	27	0	0	0	0	2,2
2	28	4,1	0,2	15,2	0	0,1
2	29				3,4	
2	30					
2	31					
3	1	0,1	27,8	25,3	1,8	0
3	2	0	0	0	14	0
3	3	3,8	0,6	0,2	0	1,1
3	4	5,8	0	0	2,4	0
3	5	4,1	0	0	0	0
3	6	0	31,4	0	1,7	0
3	7	56,3	16	0	9,7	0
3	8	11,4	0	0	68,4	0
3	9	23,4	0,4	2,5	24,3	1,4
3	10	21,4	0	3,2	3,9	4
3	11	2,2	15,2	0,7	5,1	9,2
3	12	32	38,1	0	7,8	0,2
3	13	8,8	18	0,6	0	4,1
3	14	15,5	1,8	0	0	0,2

III- 2. Présentation des stations pluviométriques

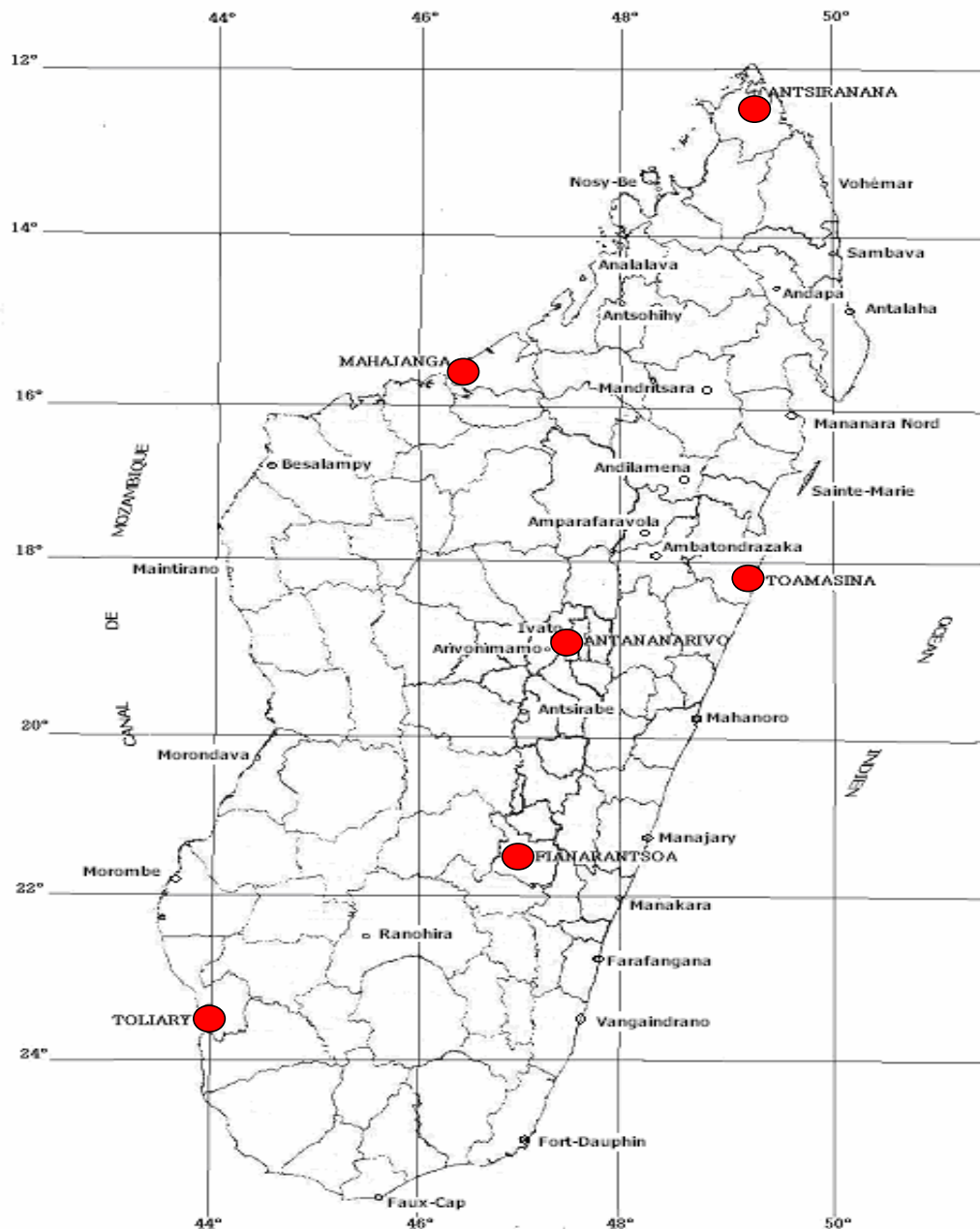


Figure 9 : Localisations de quelques stations

La figure 9 montre que parmi les 111 stations pluviométriques qui existent à Madagascar, notre étude se concentre essentiellement sur 6 stations qui couvrent l'ensemble de l'île du Nord au Sud. Elles se répartissent de la manière suivante : trois stations sont implantées dans l'Est dont deux sur les plateaux (Antananarivo, Fianarantsoa) et une le long de la côte Est soit Toamasina. Deux stations représentent la région du Nord avec une en pointe extrême (Antsiranana) et une représentant la région nord-ouest avec la station de Mahajanga. Enfin, la station de Tuléar est représentative de la région Sud-Ouest/Sud. De plus on suppose que ces 6 stations suffisent à évoquer les grandes idées qui caractérisent la pluie à Madagascar.

III- 3. Etude basée sur le cumul de la pluviométrie

III-3.1- Le cumul annuel en moyenne de la pluie pour une série de 30ans

On peut présenter le type de climat dans une station déterminée par la hauteur des précipitations moyennes au cours d'une série d'années. Cette série doit être la plus longue possible, de préférence, elle doit couvrir une période d'au moins 30 ans pour trouver une moyenne significative.

Tableau 3 : La pluviométrie moyenne annuelle sur les 25 stations à Madagascar durant la période 1961-1990 et le type de climat correspondant.

Station	Pluie annuelle (mm)	Type du climat
Sambava	4159,2	»Très humide
Andapa	1858,3	
Sainte-Marie	3660,7	
Toamasina	3368,2	
Mahanoro	2767,2	
Mananjary	2725,2	
Farafangana	2716,7	
Nossy-Bé	2228,2	
Antsiranana	1196,8	»Humide
Vohémar	1564,6	
Analalava	1640,3	
Antsohihy	1550,9	
Mahajanga	1486	
Besalampy	1258,5	
Antananarivo	1365,3	
Ivato	1456,3	
Antsirabe	1330,6	
Arivonimamo	1481,9	
Fianarantsoa	1167,8	
Fort-Dauphin	1677,9	
Morondava	763,8	»Sub-Humide
Ranohira	988,8	
Morombe	472	»Semi-aride
Faux-Cap	445,9	
Tuléar	417,9	

Le tableau 3 indique que presque toutes les stations localisées le long de la côte Est y compris celle de Toamasina indiquent un climat très humide avec une pluie moyenne annuelle supérieure à 1800mm. La région Sud-Ouest/Sud est caractérisée par deux types de climat : le climat Sub-Humide avec une quantité de pluie annuelle supérieure à 600mm mais ne dépassant pas 1200mm et le climat Semi-aride dont la pluie annuelle est entre 400mm et 600mm. On remarque aussi que la sécheresse s'avère importante lorsqu'on se rapproche de Tuléar. Les stations restantes sont classées parmi les régions à climat Humide avec un cumul de précipitation moyenne qui va de 1200mm à 1800mm.

Le tableau 3 montre alors que la connaissance de l'intensité des précipitations annuelles suffit pour le classement des stations selon leur climat et qu'elle diminue d'Est à l'Ouest (ex : de Mananjary vers Morondava, il y a un écart de 1961,4mm). C'est la pente du relief qui fait partie du facteur agissant sur les variations de la pluviosité. Cette pente est particulièrement forte dans le Sud entre Vangaindrano et Fort-Dauphin où la falaise rocheuse arrive directement à la mer et c'est ce qui explique le maximum pluviométrique de cette partie Est. Il

y a aussi la direction des vents dominants qui est certainement un facteur très important. La côte et la ligne de crête entre le Cap-Est et Fort- Dauphin sont, nous l'avons dit, à peu près exactement normales à l'alizé et la régularité de leur orientation explique la régularité de la pluviosité.[5]

III.3.2-Le cumul pluviométrique depuis 1961 à 1990

a)- Avec les données sur les cumuls pluviométriques des 6 stations, on veut savoir si la quantité des cumuls varie avec les latitudes. Pour cela, vérifions si cette hypothèse est vraie en fonction d'une représentation montrant les stations par ordre décroissante des latitudes.

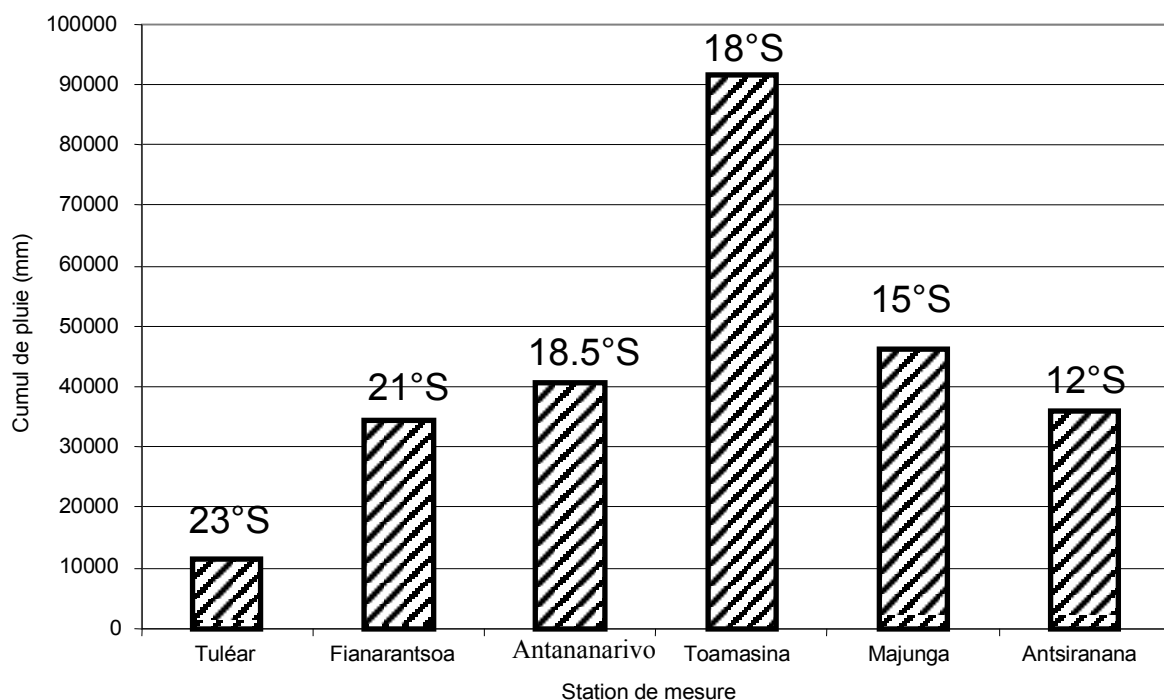


Figure 10 : Le cumul de pluie depuis 30ans en fonction des 6 stations de mesure suivant la latitude.

La figure 10 montre qu'il y a une différence entre les stations en allant du Sud vers le Nord sur le cumul annuel de pluie. La station de Toamasina présente un taux élevé de pluie comparativement aux autres. Ceci est en partie lié au fait que cette station est sur la côte sous le vent ou côte Est avec une influence certaine de l'orographie (barrière montagneuse).

A l'inverse la région la moins arrosée est celle du Sud comme on peut le noter sur le cumul de pluie de la station de Tuléar qui connaît une valeur de l'ordre de 10 m cumulée sur 30 ans soit quatre fois moins que la moyenne de toutes les stations confondues.

Les quatre régions restantes connaissent un cumul de pluie qui est proche de la moyenne des stations. On note que les latitudes ne sont pas directement liées au cumul annuel des précipitations.

b)- Il est utile de représenter la dispersion des cumuls annuels afin de voir s'il apparaît une structure qui régit l'ensemble des données. La possibilité de faire un groupement des stations

en fonction des intensités pluvieuses annuelles est aussi importante pour réduire les stations d'étude et pour focaliser l'analyse sur les cas typiques.

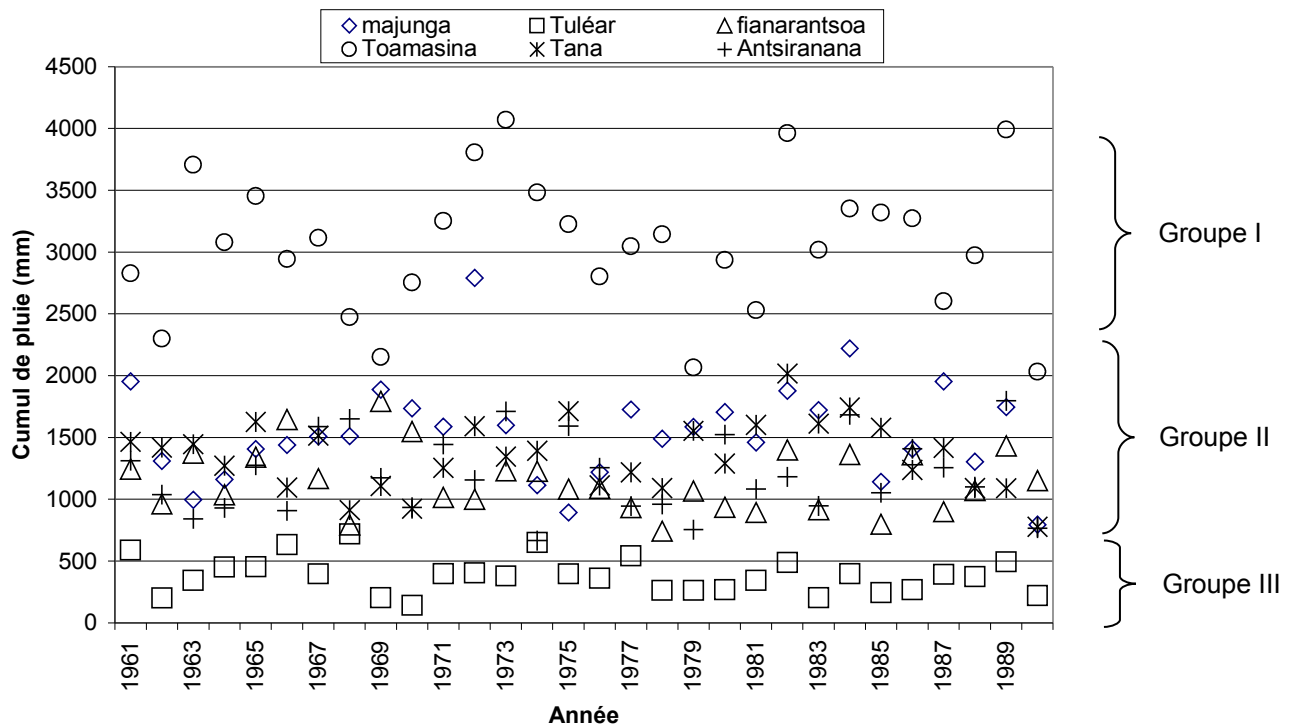


Figure 11 : Représentation dispersée des cumuls annuels de pluie pendant 30ans

Sur la figure 11 montrant la dispersion des cumuls annuels depuis 1961 jusqu'en 1990, on peut noter les trois groupes de régimes pluviométriques : les stations se comportant exactement comme Toamasina appartiennent au premier groupe, le deuxième groupe renferme les stations (ex : Mahajanga, Fianarantsoa, Antananarivo, Antsiranana) dont le régime pluviométrique varie essentiellement de 750mm à 2000mm.

On voit apparaître sur cette figure aussi la forte dispersion du cumul de pluie de Toamasina en fonction de l'année comparativement aux autres stations. Il semblerait qu'il y ait un mode inter annuel pour cette station à cause du passage de cyclonique caractérisé par des fortes précipitations. Par conséquent, il y a diversification forte des sommes annuelles de la pluviométrie sur la côte orientale de l'île.

c)-Suite à l'étude de la dispersion des cumuls annuels de pluie des 6 stations, on veut représenter le niveau de dispersion de ces grandeurs à partir du calcul de l'écart-type des cumuls annuels observées. En d'autres termes, on veut la mesure de l'écart entre les cumuls annuels et sa moyenne. Le but est toujours d'établir les valeurs moyennes calculées sur chaque station de mesure et aussi de vérifier l'homogénéité des cumuls annuels[11].

$$\text{Moyenne : } \overline{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \text{ où } x_i : \text{les cumuls annuels}$$

et m : le nombre total des cumuls

$$\text{Variance : } V(X) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2 - \overline{X}^2$$

Ecart-type : $\sigma(X) = \sqrt{V(X)}$

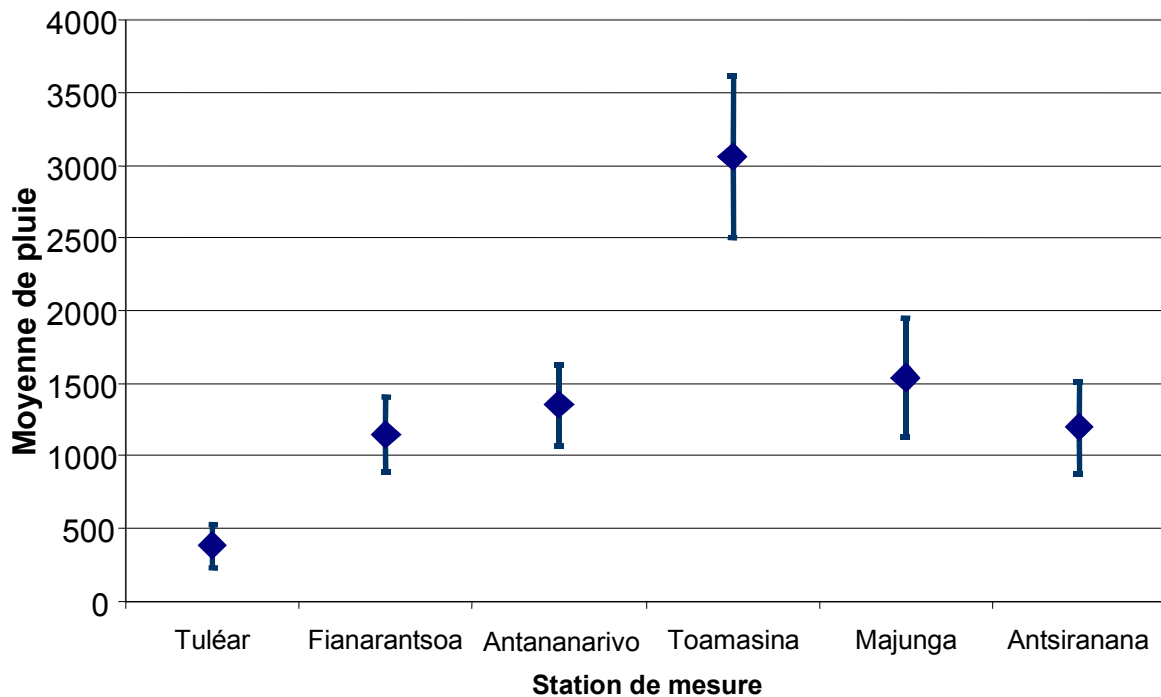


Figure 12 : L'écart entre la moyenne des cumuls et les valeurs observées en fonction des 6 stations de mesure.

D'après la figure 12 qui montre la dispersion des cumuls par rapport à sa valeur moyenne, on note que les valeurs observées sur les cumuls annuels de Toamasina ne sont pas homogènes puisque il montre un écart de 17% entre la moyenne et les valeurs observées. Cette dispersion est fortement influencée par la température à la surface de la mer qui induit les courants de surfaces, les écarts de pression, les vents et surtout les moussons qui produisent pour une grande partie les précipitations annuelles. Concernant les relevés pluviométriques de la station de Tuléar, les intensités pluvieuses annuelles sont relatives parce que le taux de dispersion est faible.

Les paramètres de dispersion sont presque voisins dans l'ensemble des données sur le cumul annuel pour les stations restantes. Ils se situent au milieu des deux cas extrêmes c'est-à-dire de Toamasina et de Tuléar avec un taux de dispersion plus ou moins homogène.

Concernant la moyenne de pluie, on retrouve la station de Tuléar comme étant la station la moins arrosée (de l'ordre de 400 mm) sur la période de 1961-1990. On peut également noter que les cumuls annuels de pluie des stations de Fianarantsoa, Antananarivo, Majunga et d'Antsiranana sont voisines de 1400mm en moyenne. Toamasina est la station la plus arrosée avec une moyenne annuelle de pluie observée sur la période indiquée de l'ordre 3000 mm.

d)- Etudions maintenant trois cas typiques découverts par l'analyse des cumuls annuels. Il s'agit en fait des stations de Tuléar, Antananarivo, Toamasina. Cette fois-ci une question se pose : est-ce que la quantité de pluie est égale pour chacune des deux saisons ? Rappelons que l'été austral débute le mois de Novembre et prend fin le mois d'Avril et l'hiver austral commence le mois de Mai et cesse le mois de Septembre.

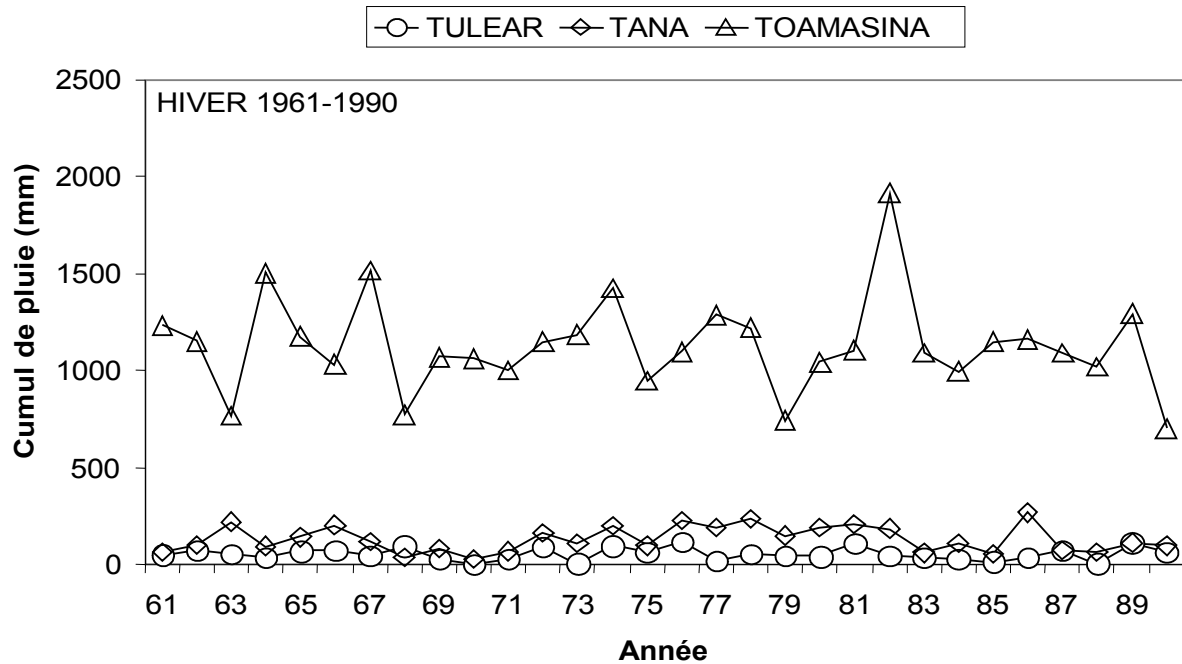


Figure 13 : Aspects des pluies cumulées en Hiver depuis 1961 jusqu'en 1990

La figure 13 représente le cumul de pluie annuel durant la période hivernale depuis 1961 à 1990. La courbe de Toamasina variant en moyenne autour de 1000mm et la courbe d'Antananarivo qui est presque confondue avec celle de Tuléar variant aux alentours de 100mm forment deux catégories de courbe. Déjà, on constate que la sécheresse débarque vers Antananarivo et Tuléar puisque dans l'hémisphère Sud, l'hiver est marqué par le déplacement de la zone couverte de puissants cumulonimbus. Cette zone se déplace suivant les saisons, allant de la chaîne himalayenne en hiver austral jusqu'au niveau des Mascareignes en été austral où elle génère de fortes pluies sur l'Ile. Les agents pluvieux sont donc réduits suite à ce mécanisme pendant l'hiver.

Mais cela n'empêche pas la formation de pluie qui est presque incessante sur la côte Est puisque l'Alizé qui frappe la ligne de crête montagneuse engendre des précipitations dont le type d'ascendance est purement orographique. Signalons encore que pendant l'hiver, l'anticyclone se manifeste par la montée de l'air qui va contribuer à la force de l'alizé.

e)- Pour compléter donc la dernière figure, voici l'aspect des pluies cumulées en été dans l'hémisphère Sud.

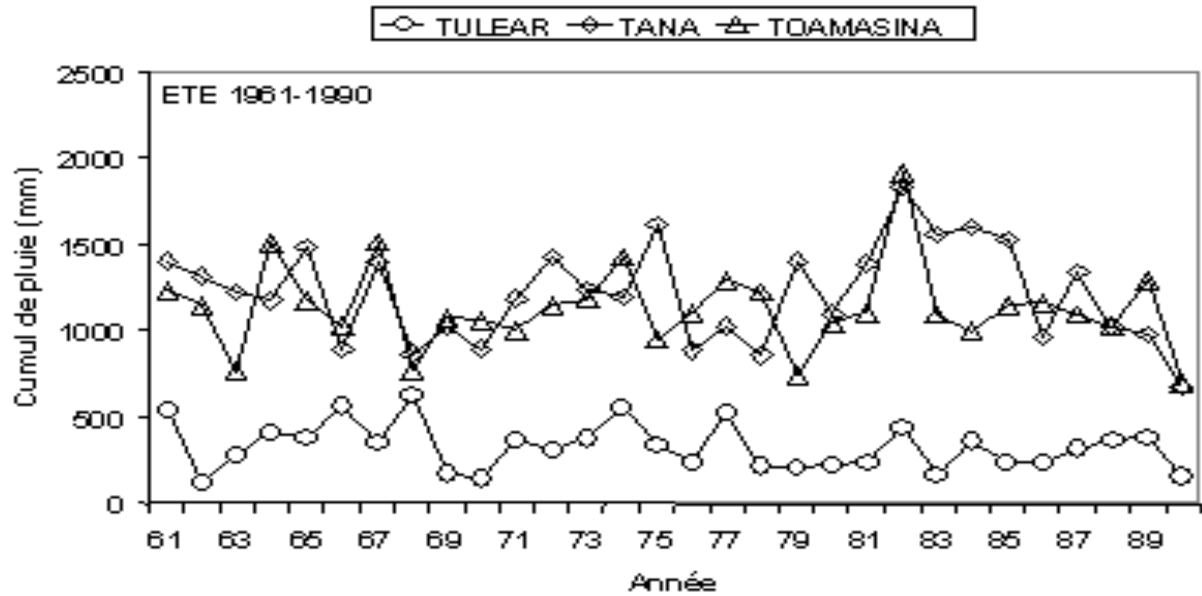


Figure 14 : Courbes des cumuls des trois stations (Tuléar, Antananarivo, Toamasina) en été depuis 1961 à 1990

La figure 14 représente le cumul de pluie annuel durant la période estivale depuis 1961 à 1990. La courbe de Toamasina et d' Antananarivo variant autour de 1000mm et la courbe de Tuléar variant aux alentours de 300mm forment deux catégories de courbe. Le balancement latitudinal de la zone de convergence intertropicale dans l'hémisphère Sud est le premier responsable de cette augmentation de cumul de pluie presque dans tout Madagascar. Par contre, la région Sud reçoit une quantité de pluie limitée puisque l'humidité absolue de cette région s'avère faible.

f)- La méthode suivante consiste à représenter le total annuel de la pluviométrie des trois stations avec leurs pluviométries hivernale et estivale depuis 1961 jusqu'en 1990. Cette opération pourra apporter de la contribution pour caractériser le climat à Madagascar.

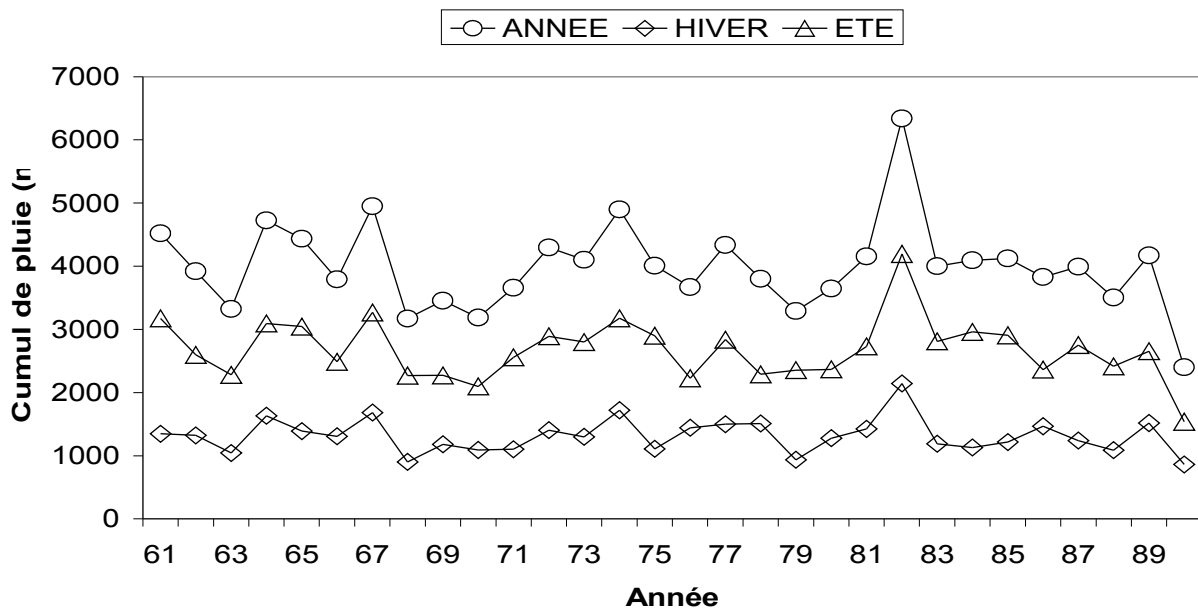


Figure 15: Courbes des cumuls de pluie durant toute l'année, en hiver et en été de 1961 à 1990.

Les figures 13, 14 et 15 sont de même type mais la seule différence c'est que la figure 15 représente la variabilité des cumuls annuels de précipitation sur l'ensemble des trois stations soit en été, soit en hiver, soit les deux. Ainsi la figure 5 évoque que malgré l'écart qui existe entre les trois courbes, ces dernières tendent à évoluer avec une même structure. Dans cette structure, à part les variations inter annuelles, on a notamment une période qui semble en faite remarquable puisque on a un cumul de grande quantité entre 1982.

g)- Dans la suite, cherchons les valeurs extrêmes de la série c'est-à-dire l'année avec une quantité de pluie maximum et l'année dont la quantité de pluie est minimum. L'objectif de cette méthode est de marquer l'année dont le phénomène dépasse la climatologie.

Tableau 4 : Les valeurs extrêmes de la série (ou max) et l'année la plus sèche (ou min).

Stations	Max (mm)	Min (mm)
Mahajanga	2790,90 (1972)	794,60 (1990)
Antananarivo	2016,70 (1980)	777,30 (1990)
Tuléar	718,80 (1968)	141,30 (1970)
Toamasina	4096,90 (1973)	2031,30 (1990)
Fianarantsoa	1792,30 (1964)	796,90 (1985)
Antsiranana	1796,20 (1989)	664,90 (1974)

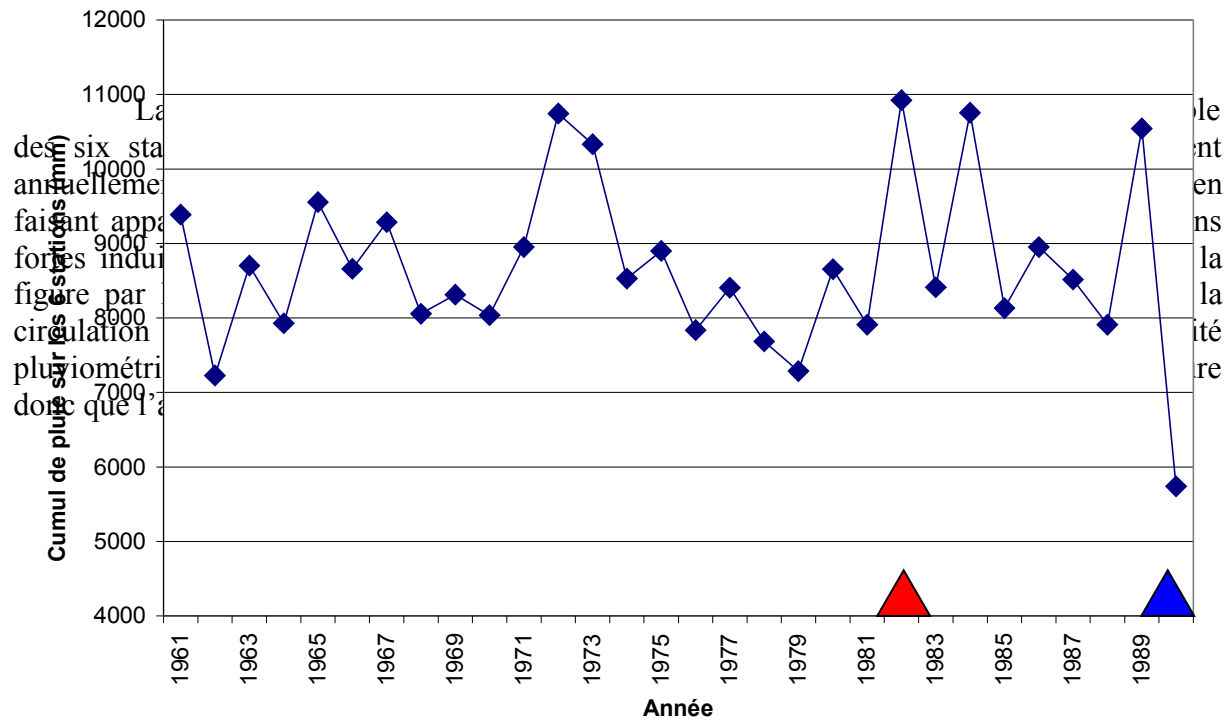
Lorsqu'on compare les tableaux 3 et 4, on voit que les valeurs marquées dans le tableau 4 dépassent largement les valeurs moyennes établies pour les stations présentes dans le tableau 3. Notons aussi que les années durant lesquelles il y a maximum de précipitation ne sont pas les mêmes dans les 6 stations, tandis que les trois stations (Mahajanga, Antananarivo, Toamasina) subissent tous une diminution considérable de précipitation en 1990.

Les valeurs minimums des cumuls pluviométriques peuvent être expliqués par des événements qui bouleversent la circulation atmosphérique. Aussi l'homme est un facteur responsable à la réduction de la ressource en eau puisqu'il pratique presque régulièrement le feu de brousse, le véritable ennemi de la végétation.

Les valeurs maximums de la précipitation annuelle sur les 6 stations (tableau 4) expliquent le passage cyclonique sur ces lieux. Le total pluviométrique maximum de Tuléar indique par exemple le passage du cyclone tropical Georgette qui atteint le Sud malgache du 22 au 30 Janvier 1968. Pendant ces 8 jours, la quantité de pluie recueillie sur la station de Tuléar est de 361,3mm, c'est plus que la moitié du maximum enregistré. De même pour Toamasina qui a subi les dégâts du cyclone tropical Hortense le 28 Janvier 1973, celui-ci lui apporte une augmentation rapide du total pluviométrique annuel [5]. Le passage du cyclone diversifie fortement les totaux pluviométriques surtout la cote Est.

L'homme et les phénomènes naturels tels que le cyclone peuvent donc produire des impacts sur la pluviométrie dans notre zone d'étude.

h)- La méthode suivante permet de vérifier si l'Ile toute entière subit le même changement climatique à la même période puisque on a supposé que les six stations d'étude peut couvrir l'ensemble de l'Ile. Précisons en fait que le dépassement de la valeur des cumuls vers un déficit ou un excédent par rapport à sa valeur moyenne détermine le passage d'un phénomène anormal.



III.3.3- La distribution statistique de la pluviométrie et le cumul de pluie mensuel

a)- Etant donnée l'analyse des cumuls annuels de pluie, on est tenté de savoir ce qui est caché derrière la distribution statistique de la pluviométrie. Dans ce cas notre donnée se transforme en donnée statistique de la pluviométrie (en mm) sans prendre en compte la date de chaque mesure. Pour cela, on divise la population statistique de la pluviométrie en 20 groupes selon leur quantité. Cette procédure est dans l'intérêt d'évaluer le nombre des événements (ou des jours) pluvieux en fonction de la pluviométrie dans une période de 30 ans.

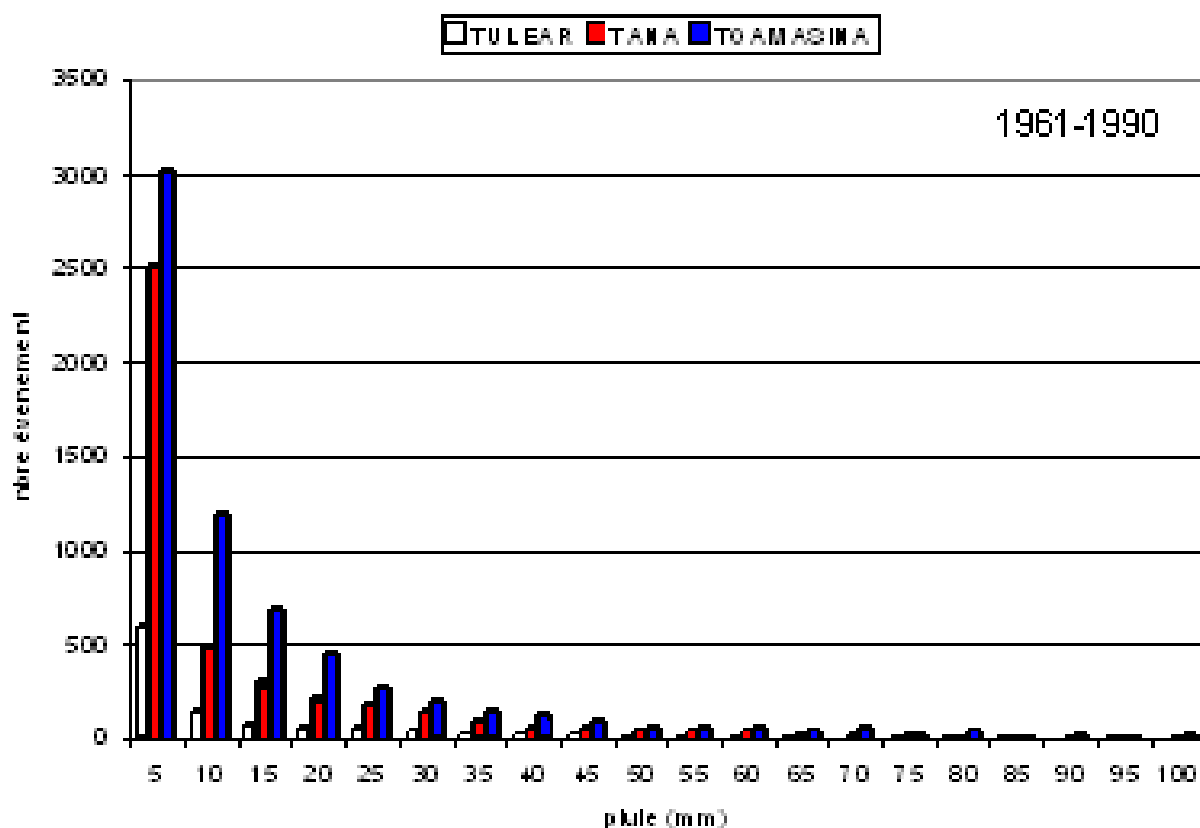


Figure 17 : La distribution statistique du nombre d'événements pluvieux en fonction de la pluviométrie.

La figure 17 met en évidence le nombre d'événements de chaque station au cours de 30 ans où la mesure de pluie appartient à une telle classe de précipitation. A partir de ceci on peut lire que le nombre d'événements décroît essentiellement tant que l'intervalle de mesures des précipitations augmente. De plus, rares sont les événements dont les quantités de pluie dépassent 30mm dans les trois stations typiques. Ceci est normal car les forts abats n'arrivent que pendant la période cyclonique.

Cette figure reflète aussi qu'on a presque la sécheresse sur la station de Tuléar puisque le nombre maximum d'événements pluvieux qu'elle en a depuis les 30ans n'est seulement qu'à peu près 600, soit moins de deux ans. Concernant la station de Toamasina, elle contient tous les 20 groupes de mesure et la probabilité d'avoir une telle quantité de pluie parmi ces 20 classes n'est pas nulle.

b)- Jusqu'à maintenant, aucune figure ne présente une structure satisfaisante des données pluviométriques, en effet on passe à *l'étude des cumuls mensuels de la pluviométrie* afin de découvrir un nouvel aspect de la pluviométrie en fonction du mois et aussi essayer de faire correspondre cet aspect à la réalité compte tenu de la théorie préliminaire.

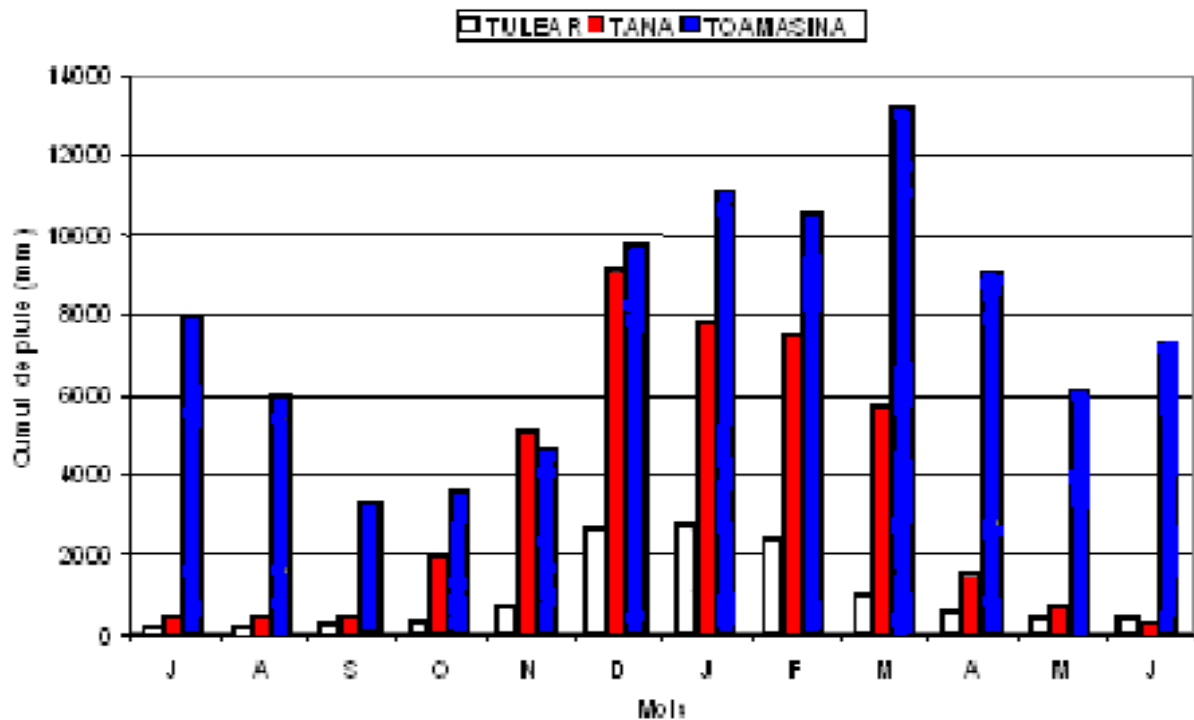


Figure 18 : Le cumul mensuel de la pluviométrie depuis 1961 à 1990

Le cumul de pluie mensuel depuis 1961 à 1990 pour chacune des stations est donné par la figure 18. Pour cela, elle montre qu'on a une structure bi modale de courbe dans l'ensemble. Mais lorsqu'on individualise chaque station, on observe que la structure bi modale provient des totales de précipitations calculées sur Toamasina. Les deux autres stations restantes ne témoignent qu'une seule mode de variation annuelle. Cette variation uni modale est centrée le mois de décembre puisque dans l'hémisphère sud la période cyclonique commence le mois de novembre. Il nous faut donc un chevauchement des deux années successives pour avoir deux saisons complètes.

c)- On appelle jour de pluie le jour qu'on a relevé un taux pluviométrique supérieur ou égal à 0.1mm. En effet un autre type de distribution peut être formé à partir du nombre de jour de pluie. Le niveau mensuel du nombre de jour de pluie sera exprimé en rang des percentiles (divisant la population en 100 groupes) dans le but de repérer facilement la probabilité d'avoir « jour de pluie » par mois depuis 1961 à 1990.

Avec le nombre de jour de pluie, on peut aussi délimiter les deux types de saison, c'est-à-dire on a la saison sèche lorsqu'il pleut moins de 5 jours tous les mois et la saison pluvieuse plus de 5 jours de pluie tous les mois[5].

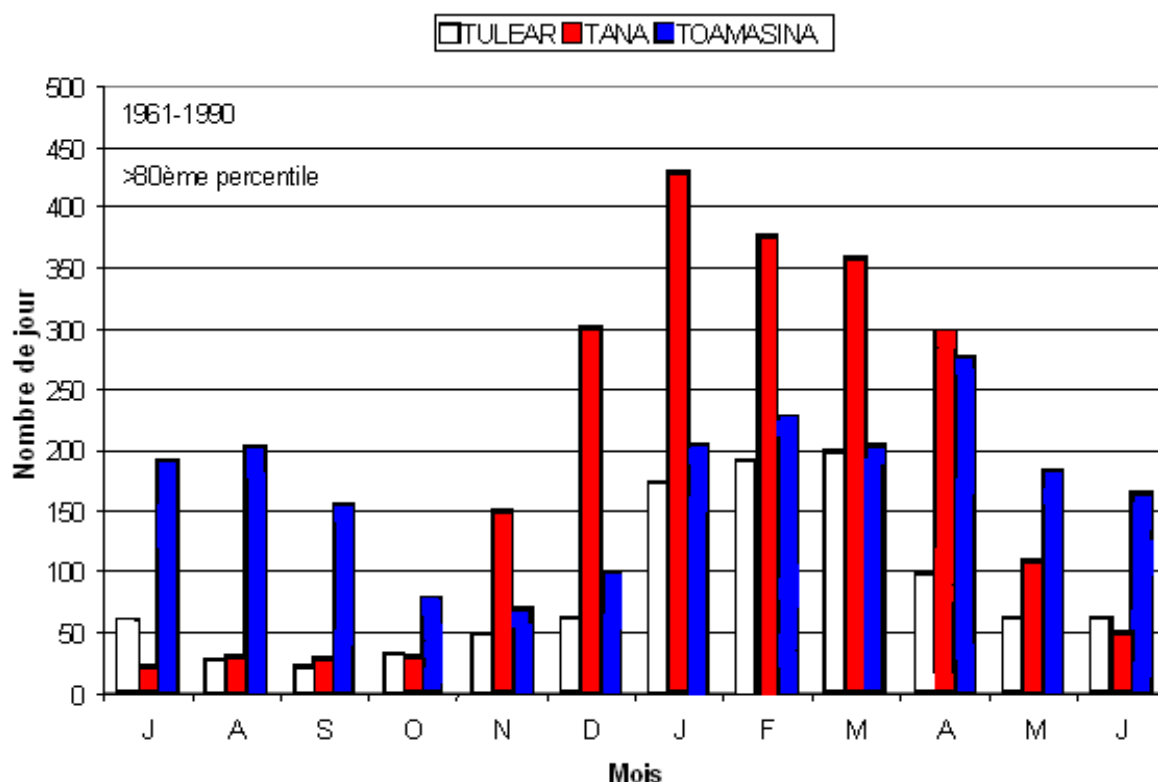


Figure 19 : Distribution du nombre de jour de pluie mensuel depuis 30 ans

La figure 19 est la même que la figure 18 mais l'unique différence c'est qu'au lieu d'avoir le cumul de pluie sur l'axe vertical on a le nombre de jour de pluie. Effectivement, on a pu constater qu'en premier lieu, on a toujours les mêmes observations que la figure 9 et en second lieu, le nombre de jour de pluie de la région centrale est élevé depuis Décembre – Avril comparé aux autres régions. Ceci s'explique peut être par un faible espacement des précipitations à intensité réduite de pluie sur les Hautes terres. Ainsi la figure 19 montre qu'on a 90% de chance d'avoir tous les jours pluvieux au dessous de la 80^{ème} percentile. Elle confirme aussi les caractères beaucoup plus constants des pluies sur l'Est (représenté par les 9 mois pluvieux de Toamasina), plus saisonnier ailleurs (cas de Antananarivo qui est caractérisé par 6 mois secs et 6 mois pluvieux), ainsi que la sécheresse très accusée au Sud et au Sud-Ouest à l'exemple de Tuléar qui n'a que 3 mois pluvieux durant toute l'année c'est-à-dire plus de 150 jours de pluie pendant 30 ans.

d)- Avec les cumuls mensuels de la pluviométrie des trois stations, on peut calculer le coefficient pluviométrique mensuel moyen durant la période 1961-1990. Pour un mois donné, le coefficient pluviométrique est :

$$C_p = \frac{12 \times \text{Précipitation mensuelle}}{\text{Précipitation annuelle}}$$

Le coefficient pluviométrique égal à 1 signifie que la précipitation pour le mois considéré est égale à celle qui correspond à une répartition uniforme de la pluviosité annuelle. La saison sèche est la période pour laquelle les coefficients pluviométriques sont inférieurs à 0.5. On a déjà ainsi délimité les saisons sèche et humide pour chacune des stations.[10]

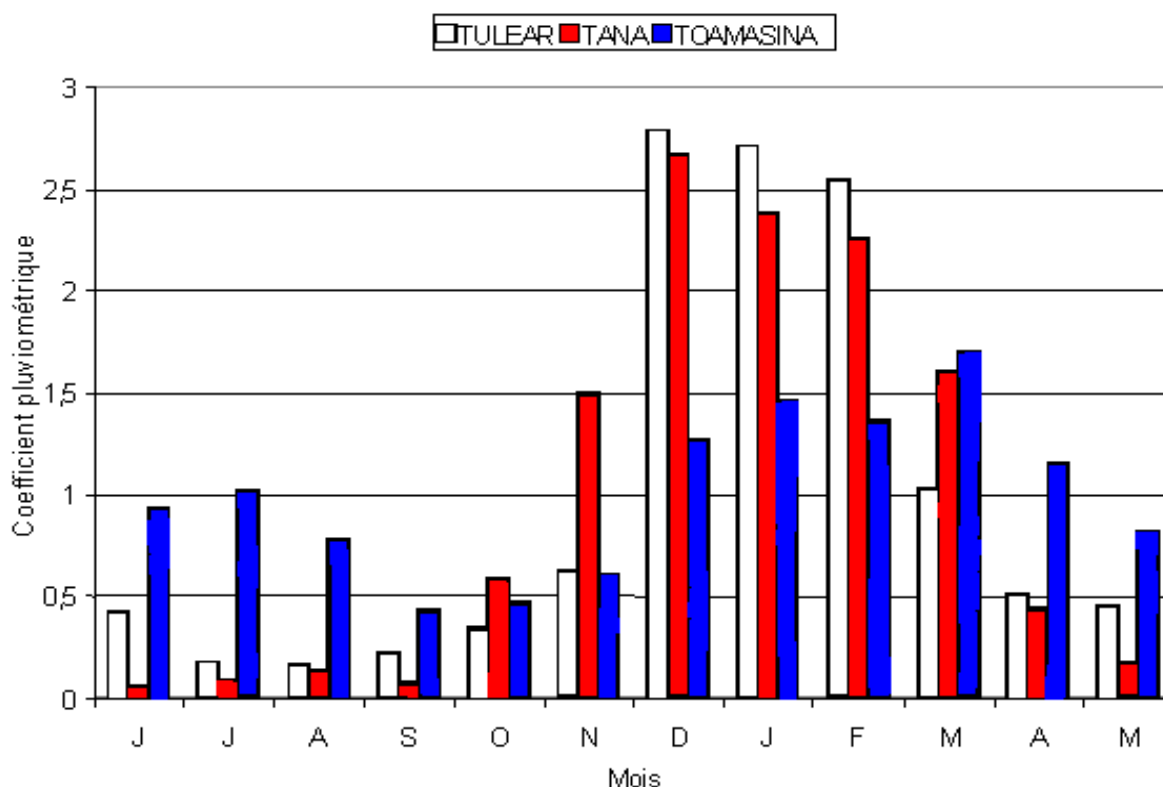


Figure 20 : Le coefficient pluviométrique mensuel depuis 1961 à 1990

La figure 20 est du même type que la figure 19 mais on a remplacé seulement le nombre de jour par le coefficient pluviométrique. On note d'après celle-ci que la répartition de la pluviométrie pour tous les mois n'est uniforme qu' à partir du mois de novembre en particulier pour la station de Antananarivo tandis que les restes commencent dès le mois de décembre. On peut dire aussi que l'allure bi modale de la station de Toamasina est encore tenue même si on traite avec les coefficients pluviométriques. Signalons que pour un $C_p < 0,5$ la sécheresse s'installe à l'exemple de la station de Toamasina ne possédant que deux mois secs (Septembre et Octobre) durant toute l'année. Pendant la saison pluvieuse, c'est la ZCIT couplée aux cyclones qui déterminent les conditions pluviométriques sur la côte Est tandis que c'est l'interaction relief - alizé est le principal responsable des précipitations durant la saison sèche.

III-4 . Analyse spectrale des données sur les précipitations journalières

Une méthode adaptée à la climatologie sera adoptée pour représenter les données sous une autre forme. Elle permet de préciser la période de changement climatique des séries chronologiques. Il s'agit en fait de l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier. Le but est de savoir si les saisons définies à partir de la pluviométrie soumettent à un rythme.

En une dimension, la **transformée de Fourier rapide** est déterminée par :

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi \left(\frac{k}{N} \right) n}$$

x_n : Précipitations journalières en quantités réelles

X_k : Précipitations journalières en quantités complexes

k, n : ordre de la série de précipitation

N : la longueur d'ordre de la série

f = k / N : la fréquence

Remarques :

-La transformée de Fourier rapide a un sens lorsqu'on lui applique au moins 256 points.

-Le moment d'exécution de la transformée de Fourier qui, dépend de la quantité de N, est très rapide si la longueur d'ordre est une puissance exacte de deux.

Exemple : N=512=2⁹

f = 0 / N , $X_0 = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{511}$

f = 1 / N , $X_1 = x_0 + x_1 \exp(-i 2\pi (1/N).1) + x_2 \exp(-i 2\pi (1/N).2) + \dots + x_{511} \exp(-i 2\pi (1/N).511)$

f = 2 / N , $X_2 = x_0 + x_1 \exp(-i 2\pi (2/N).1) + x_2 \exp(-i 2\pi (2/N).2) + \dots + x_{511} \exp(-i 2\pi (2/N).511)$

f = 3 / N , $X_3 = x_0 + x_1 \exp(-i 2\pi (3/N).1) + x_2 \exp(-i 2\pi (3/N).2) + \dots + x_{511} \exp(-i 2\pi (3/N).511)$

·
·
·

f = 511 / N , $X_{511} = x_0 + x_1 \exp(-i 2\pi (3/N).1) + x_2 \exp(-i 2\pi (3/N).2) + \dots + x_{511} \exp(-i 2\pi (3/N).511)$

Pour éviter donc les répétitions, on doit normaliser le rendement de l'FFT de sorte qu' une sinusoïde dans le domaine temporel correspond à une amplitude dans le domaine fréquentiel. La production d'une transformée de Fourier rapide normalisée pour un temps discret se fait à l'aide de la formule $Y = [\text{abs}(\text{fft}(x))]^2$. Puisque $\text{fft}(x)$ est une quantité complexe, $\text{abs}(\text{fft}(x))$ renvoie au module complexe $([\text{Réal}(\text{fft}(x))]^2 + [\text{Imaginaire}(\text{fft}(x))]^2)^{1/2}$.

La représentation graphique de Y en fonction de la période ne trace que les 256 points ($X_1, X_2, \dots, X_{256}$) dans l'axe significatif car les autres ne sont que leurs symétries.

Pour éliminer les pics qui semblent insignifiants, il fallait une deuxième application de la fonction **abs** sur Y. Cette fois ci Y est une quantité réelle, et $\text{abs}(Y)$ ne renvoie que la valeur absolue $|Y|$ d'où $|Y|^2$ [12].

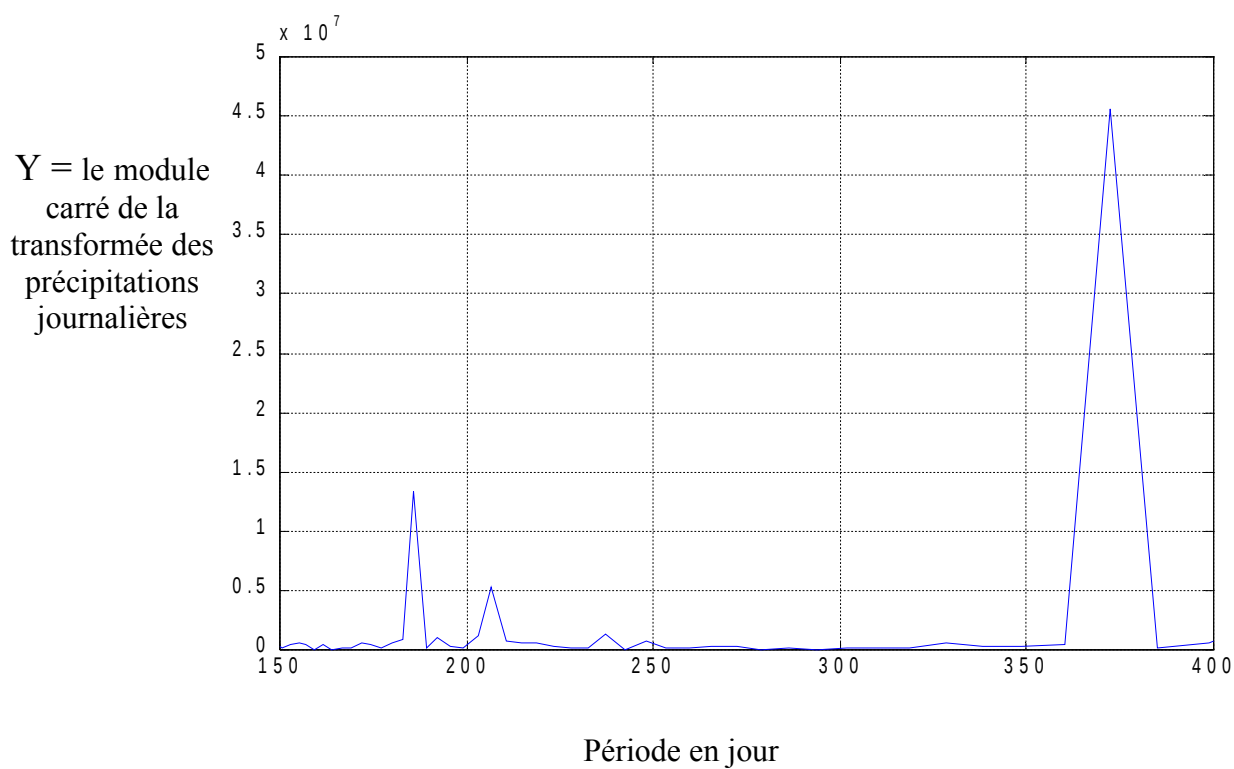


Figure 21 : Analyse spectrale des précipitations journalières des données allant de 1961 jusqu' à 1990 pour la station de Tuléar. $Y=f(\text{période en jour})$

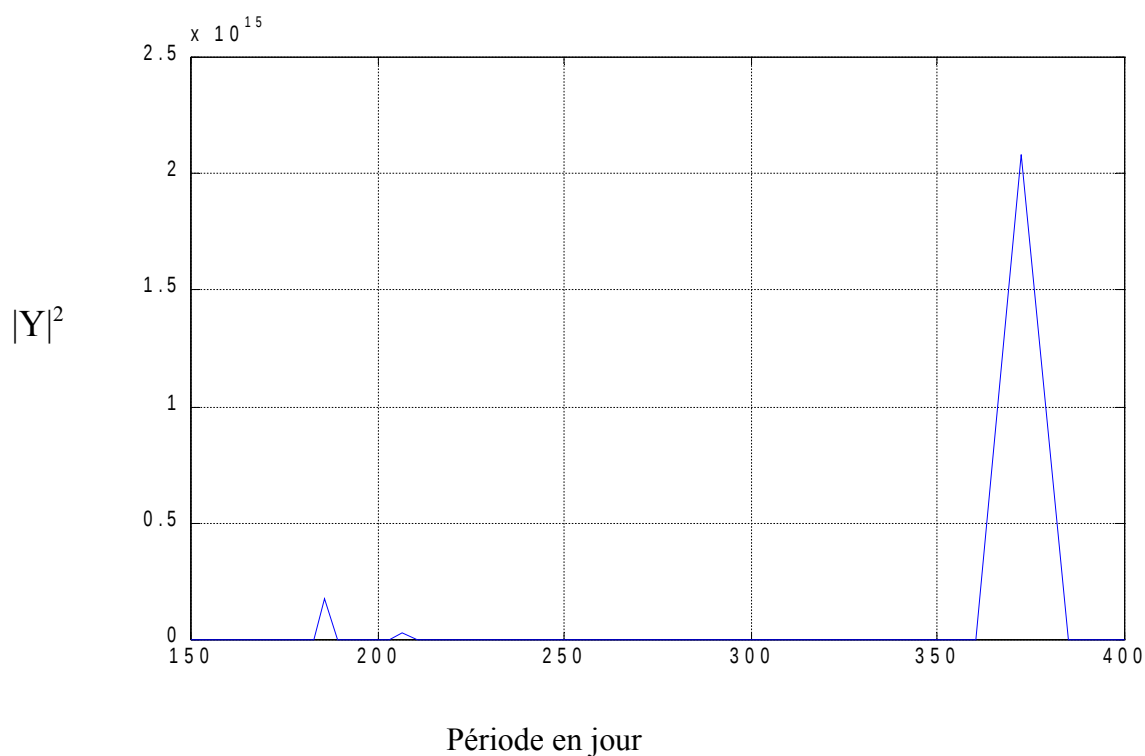


Figure 22 : Analyse spectrale des précipitations journalières des données allant de 1961 jusqu' à 1990 pour la station de Tuléar. $|Y|^2=f(\text{période en jour})$

La figure 21 montre l'analyse spectrale des précipitations journalières depuis 1961 jusqu'en 1990 soit (31x12x30) données insérées au programme (annexe 2) qui utilisent la transformée de Fourier rapide. La représentation graphique de $Y = f(\text{période en jour})$ montre deux pics repérés au 186^{ème} jour (= 31x 6 jours) et au 372^{ème} jour (=31x 12 jours) puisqu'on avait rempli les mois en 31 jours par zéro. Le deuxième pic semble significatif puisqu'il fait apparaître le changement de la saison tous les six mois, ceci est normal puisque généralement la période cyclonique dure 6 mois dans notre espace d'étude pendant l'été austral. De plus ce résultat est aussi compatible aux résultats obtenus précédemment. Par contre, la figure 22 qui représente $|Y|^2 = f(\text{période en jour})$ montre que le premier pic n'est pas négligeable puisque il apparaît toujours à la deuxième application du module carrée de la transformée des précipitations journalières. Ce pic signifie qu'il y a 4 alternances de saison par an, elle reflète alors qu'il existe quatre types de saisons à Madagascar comme en Europe mais pour de faible intensité soit 10% de l'intensité du pic qui interprète la double alternance. On a le même constat pour les stations de Antsiranana et Toamasina (annexe 4) tandis que Fianarantsoa, Majunga (annexe 4) et Antananarivo ne présentent pas des signatures considérables sur l'existence de ces 4 saisons car les pics correspondants ne sont que relativement très faibles d'après la figure 24.

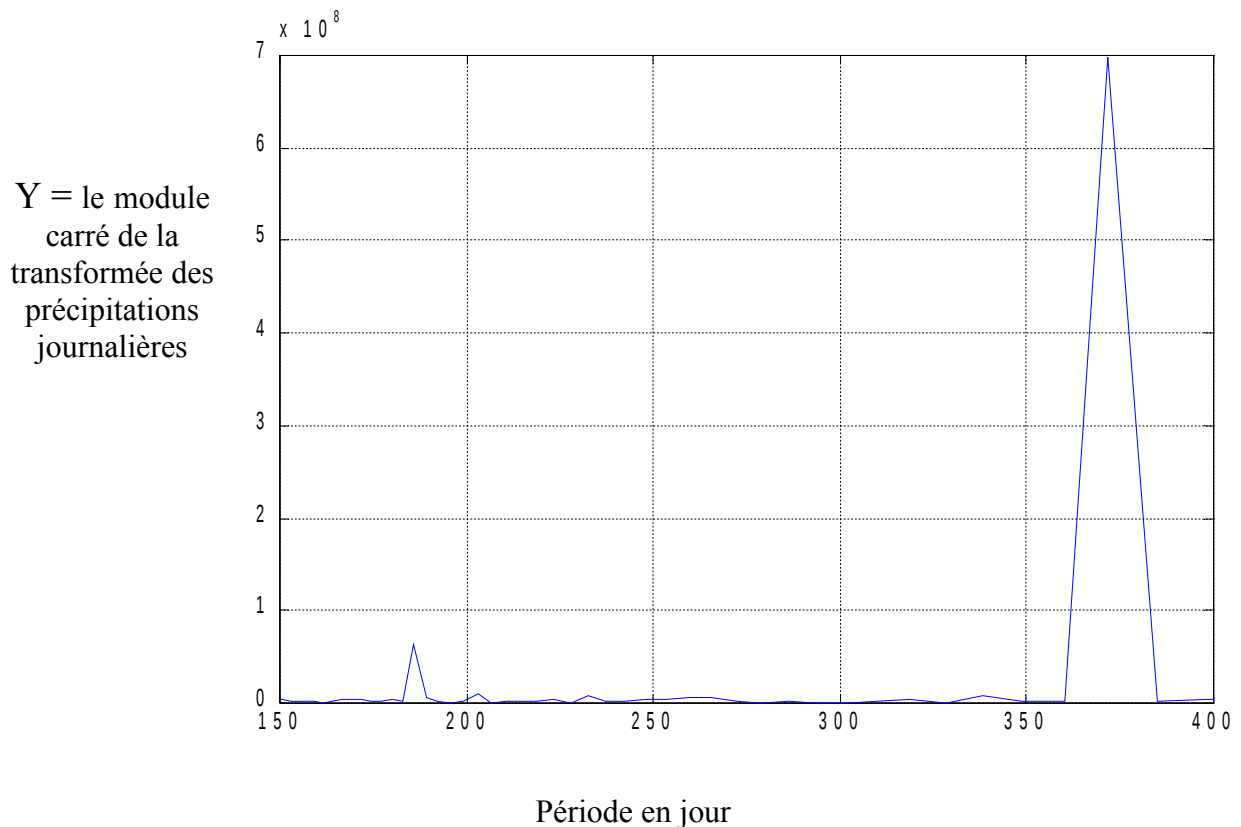


Figure 23 : Analyse spectrale des précipitations journalières des données allant de 1961 jusqu'à 1990 pour la station de Antananarivo. $Y=f(\text{période en jour})$

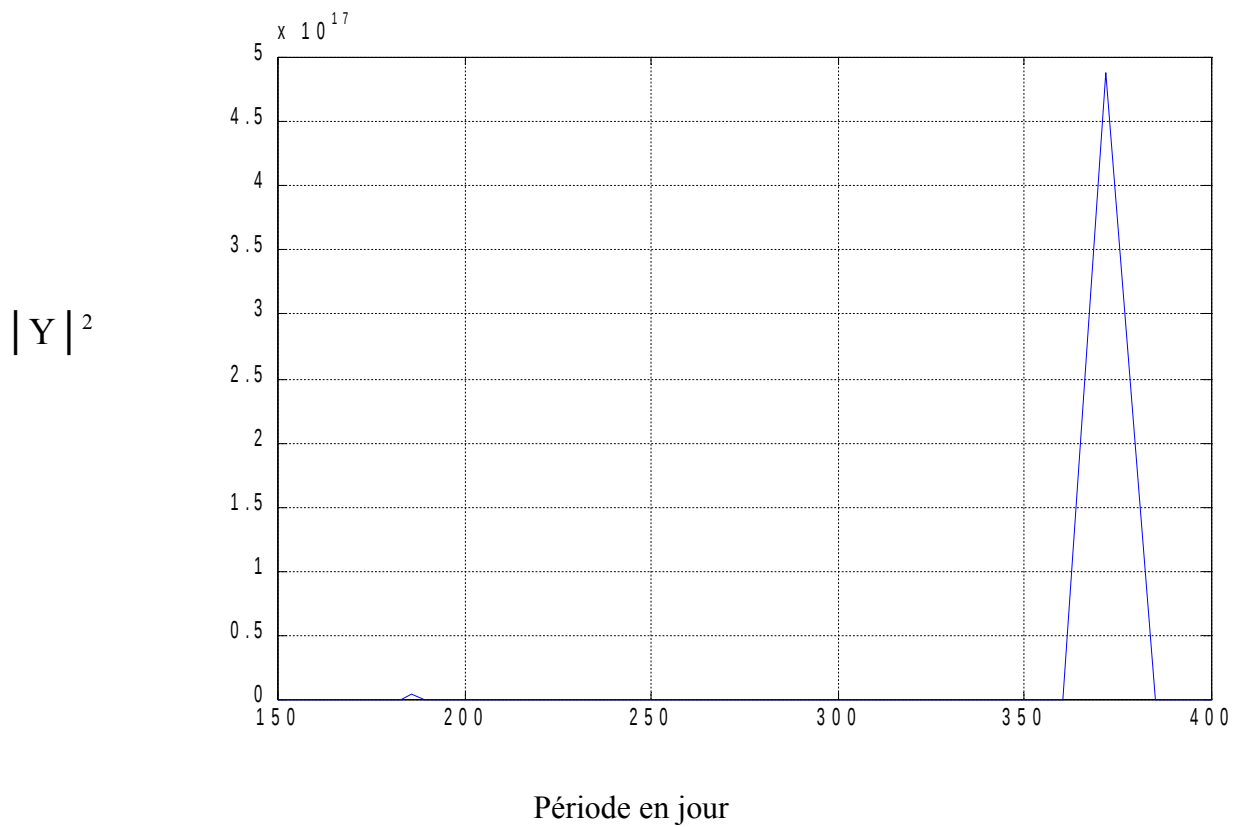


Figure 24 : Analyse spectrale des précipitations journalières des données allant de 1961 jusqu' à 1990 pour la station de Antananarivo. $|Y|^2 = f(\text{période en jour})$

Les résultats pour les autres stations se trouvent dans l'annexe 4.

III-5. Etude de la tendance du nombre de jours de pluie depuis 30ans

Le nombre de jours de pluie présente une grande importance au point de vue climatique et agricole. En considérant le nombre de jours de pluie depuis 1961 jusqu'à 1990 comme une série de données chronologiques, on peut connaître la tendance [15] afin de prendre une décision sur l'année à venir. La tendance (T) marque l'allure générale du nombre de jours de pluie, leurs variations à long terme. Pour estimer donc la tendance linéaire (T) du nombre de jours de pluie annuelle on calcule par la méthode des moindres carrés la droite de régression avec les années complètes des données.

En effet, on a comme équation : $Tt = at + b$

où Tt : la tendance linéaire (ou variable explicative)

a : le coefficient de régression de Tt

t : l'année qu'on veut estimer (ou variable dépendante à expliquer)

b : une constante

[13]

Coefficient de corrélation

En utilisant la droite de régression obtenue par application de la méthode des moindres carrés : $Tt = at + b$, on peut poser le problème de qualité d'ajustement en terme de prédiction ou de prévision. On peut simplifier les interprétations sur la qualité d'ajustement réalisé en faisant introduire la notion de *coefficient de corrélation* entre Tt et t notée r qui se définit comme suit :

$$r = \frac{\text{cov}(t, Tt)}{\sigma(t) \cdot \sigma(Tt)}$$

$$\text{avec } \text{cov}(t, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(Tt_i - \bar{Tt})$$

Propriétés de r

- a) r doit être comprise entre -1 et 1 c'est-à-dire $-1 \leq r \leq 1$
- b) Le signe et la valeur du coefficient de corrélation peuvent être interprétés comme suit :
 - r proche de zéro de 0 indique que t et Tt peu liées.
 - r proche de 1 indique que t et Tt sont fortement liées linéairement, en sens direct, c'est-à-dire qu'une augmentation de t tend à produire une augmentation de Tt .
 - r proche de -1 indique que t et Tt sont fortement liées linéairement, en sens contraire, c'est-à-dire qu'une augmentation de t tend à produire une diminution de Tt [13].

Tableau 5 : Equations des droites de tendance des six stations

Station	Tendance
FIANARANTSOA	$Tt = - 0,071 t + 155,144$
TULEAR	$Tt = - 0,005 t + 13,121$
MAHAJANGA	$Tt = 0,030 t - 52,3942$
ANTSIRANANA	$Tt = - 0,037 t + 84,675$
TOAMASINA	$Tt = 0,006 t + 9,217$
ANTANANARIVO	$Tt = - 0,057 t + 123,985$

Les figures suivantes tracent le nombre de jour de pluie mensuel avec la tendance Tt depuis 1961 à 1990.

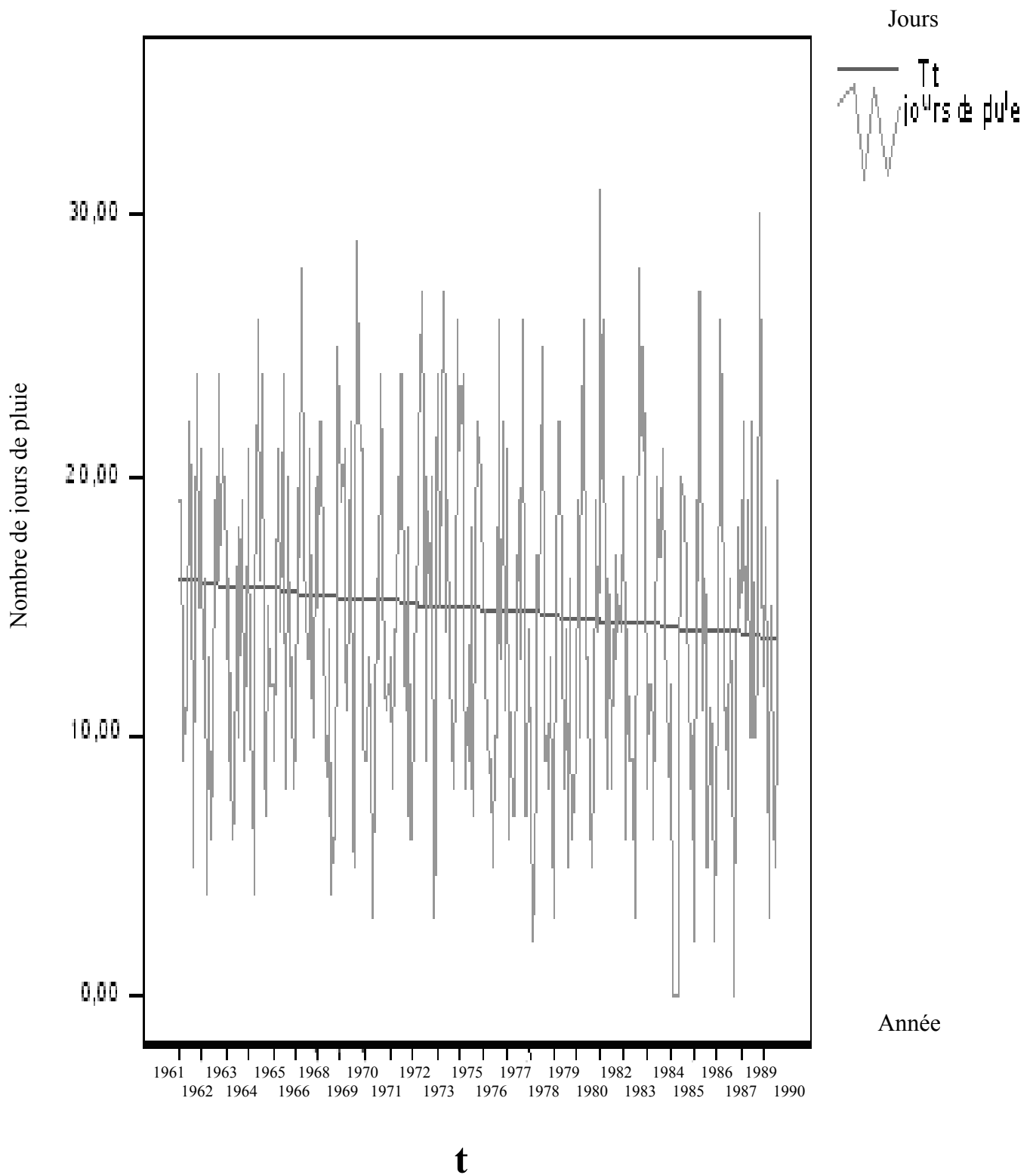


Figure 25 : FIANARANTSOA

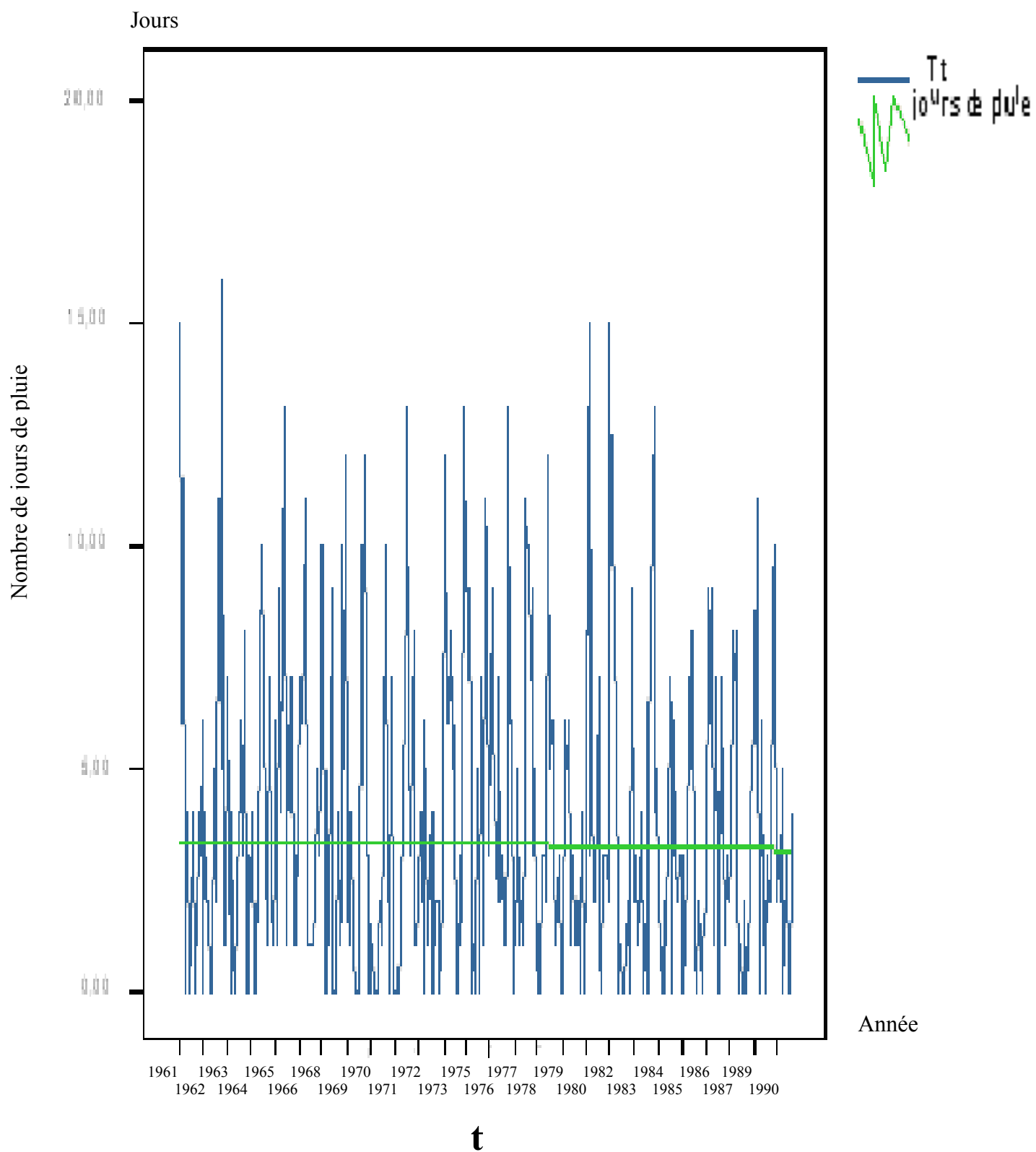


Figure 26 : TULEAR

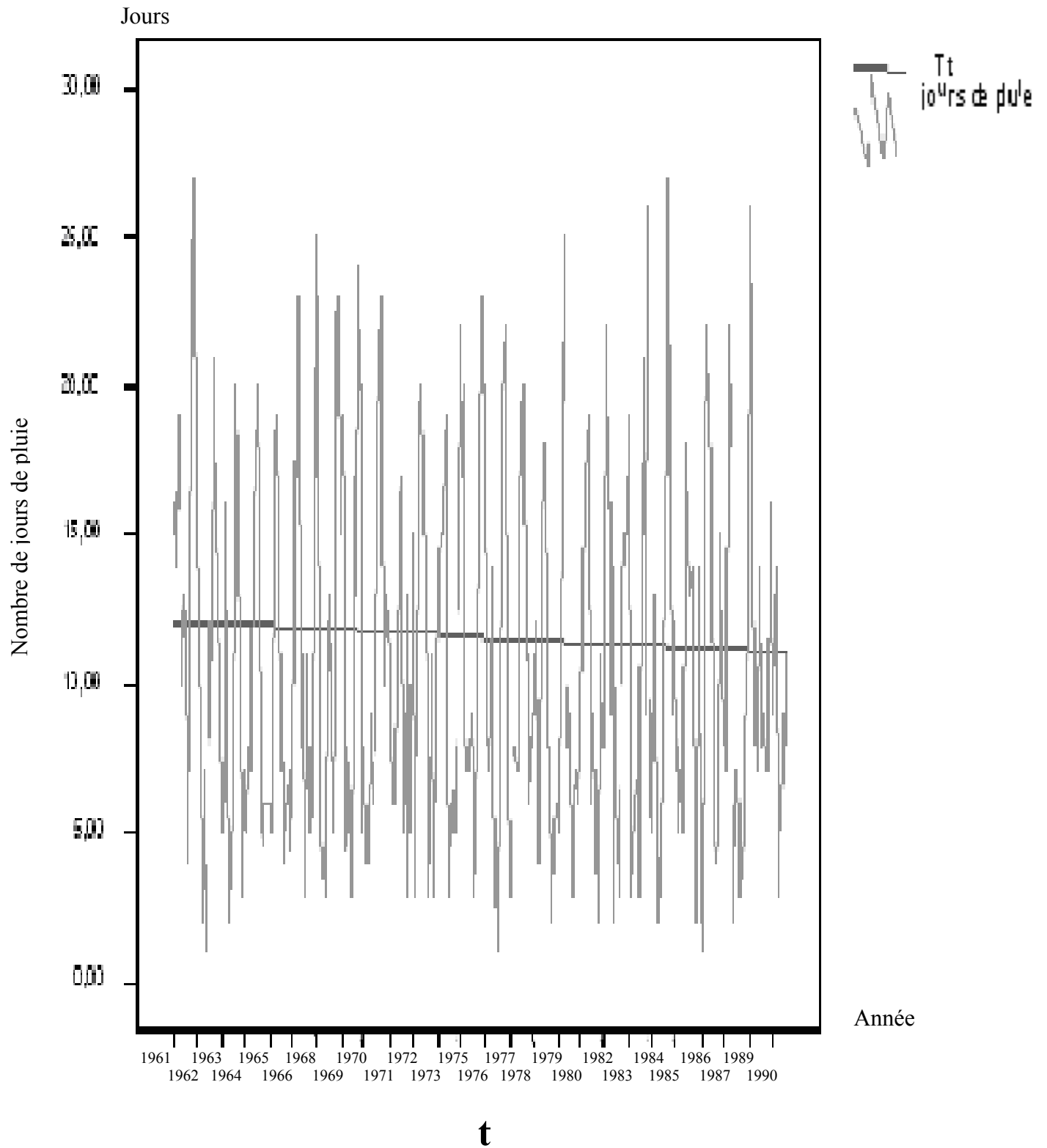


Figure 27 : MAHAJANGA

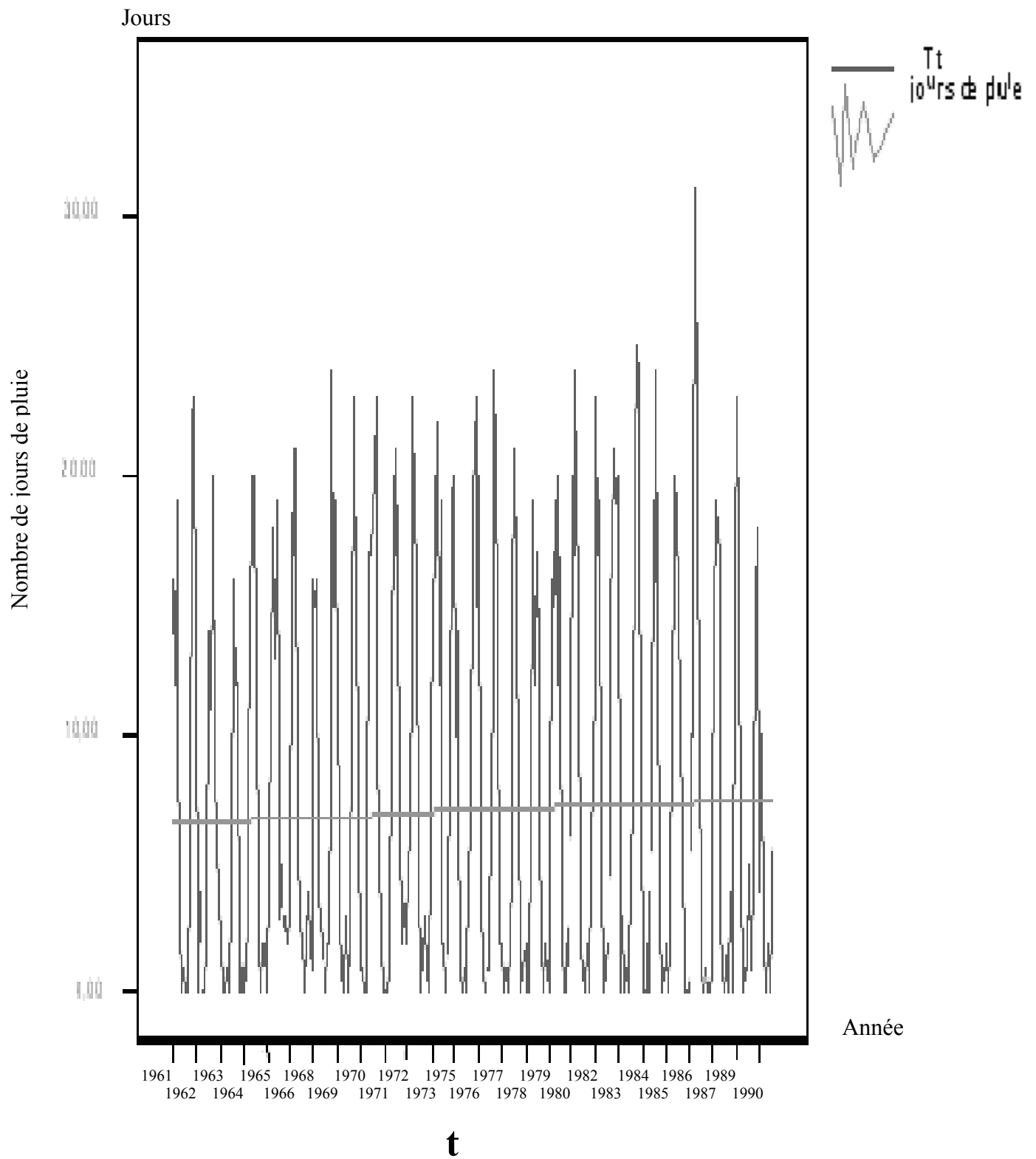


Figure 28 : ANTSIRANANA

Jours

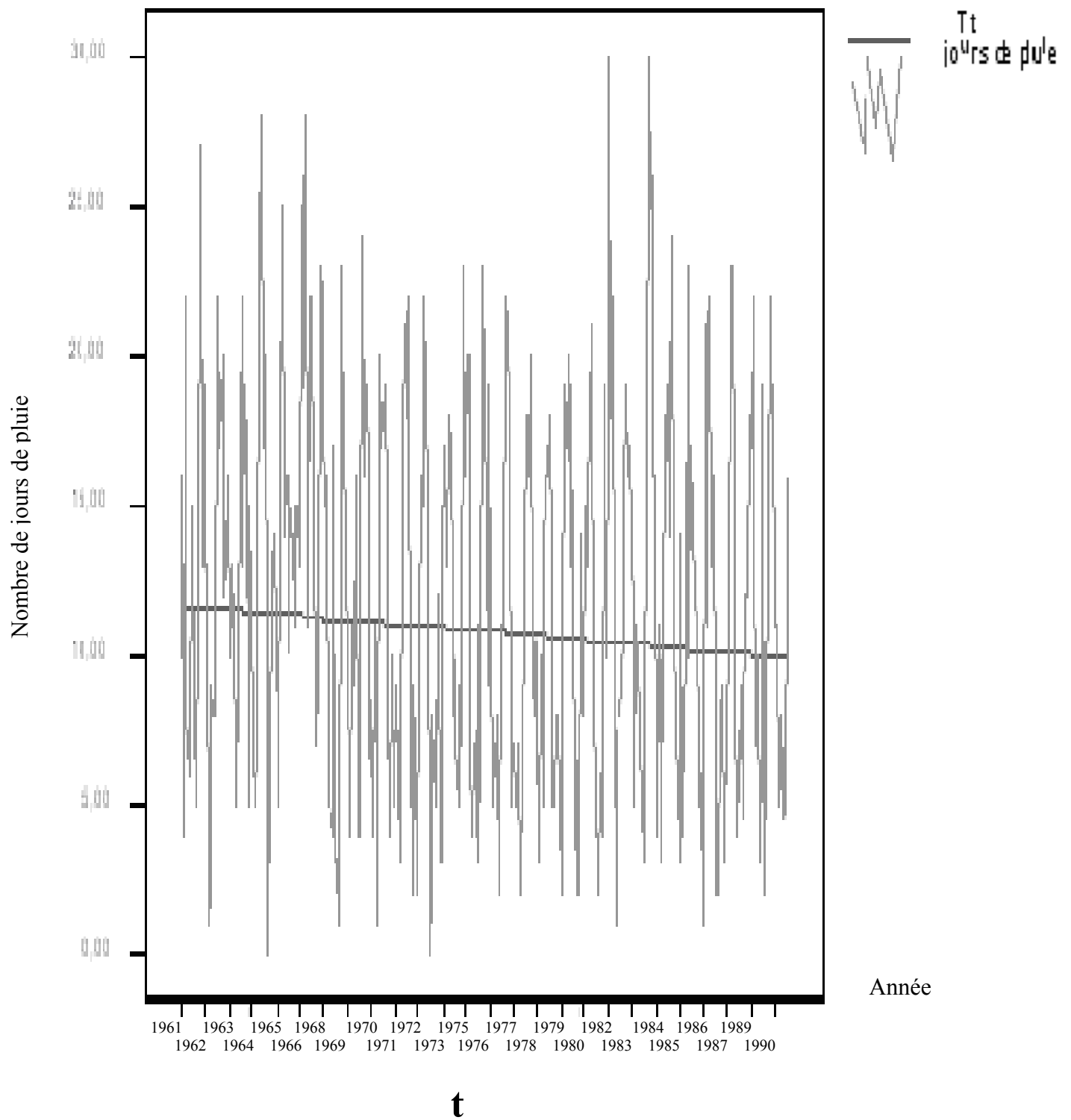


Figure 29 : ANTANANARIVO

Jours

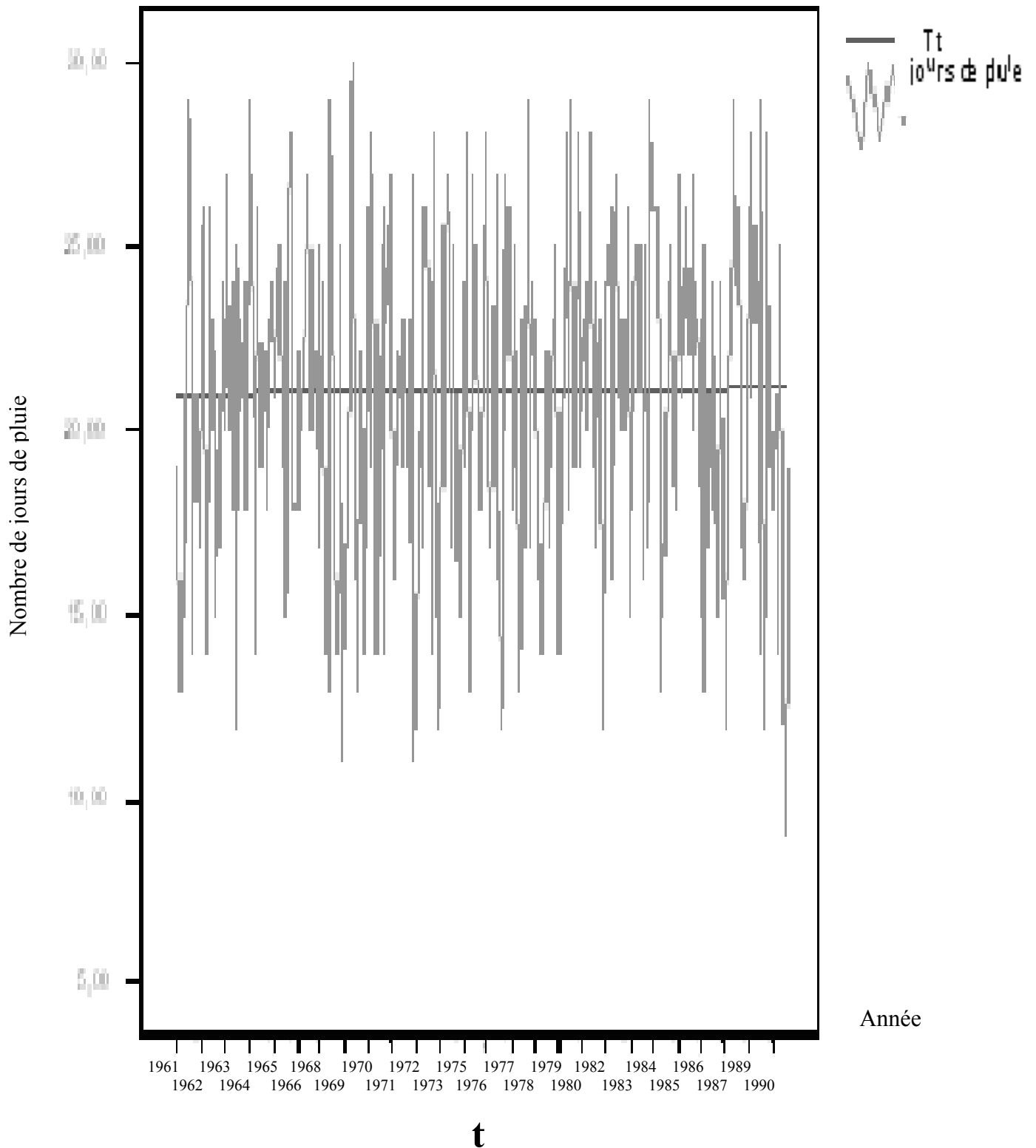


Figure 30: TOAMASINA

Les figures 25 à 30 montrent les évolutions des nombres mensuels de jours de pluie pour les six principales villes de Madagascar de 1961 à 1990. Les ajustements par la méthode des moindres carrés des nombres de jours de pluie mensuels montrent des tendances à la baisse aux stations de Mahajanga, Fianarantsoa et d'Antananarivo. A Tuléar, Toamasina et

Antsiranana, les nombres mensuels de jours de pluie n'ont pas subi de changement significatif.

Concernant les coefficients de corrélation, les valeurs de r informent qu'il y a une forte corrélation entre t et Tt , c'est-à-dire entre l'année et le nombre de jour de pluie d'après les résultats indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Les coefficients de corrélation linéaire du nombre de jour de pluie.

	Antsiranana	Fianarantsoa	Majunga	Toamasina	Tuléar	Antananarivo
r	-0,99	-0,99	1	+0,99	-0,99	-0,99

En effet, pour éviter la confusion sur l'interprétation des résultats indiqués dans le tableau 6, rappelons que :

- r proche de +1 indique que t et Tt sont fortement liées linéairement, en sens direct, c'est-à-dire qu'une augmentation de t tend à produire une augmentation de Tt ;
- r proche de -1 indique que t et Tt sont fortement liées linéairement, en sens contraire, c'est-à-dire qu'une augmentation de t tend à produire une diminution de Tt .

SYNTHESE DES RESULTATS DES ANALYSES

Avec le paramètre « pluviométrie » d'une certaine région, on peut établir sa propre climatologie reliée à la pluie. Notre étude sur la pluviométrie sera focalisée sur six stations

(Toamasina, Antananarivo, Tuléar, Antrrsiranana, Fianarantsoa et Majunga) qui couvrent l'ensemble de Madagascar et en découle en partie les caractéristiques climatiques qui influent directement sur les précipitations locales. Pour cela, on a pu voir que seule la côte Est représentée par Toamasina subit des fortes précipitations durant l'hiver austral (Novembre-Avril) à cause de la barrière montagneuse qui s'étend le long de la côte et qui s'entretient avec l'alizé austral et engendrent ainsi une ascendance purement orographique.

La partie Sud/Sud-Ouest de Madagascar est la moins arrosée même pendant la période estivale. Cela est due à l'effet de continentalité qui aggrave la sécheresse à l'intérieur. La partie Sud/Sud-Ouest de Madagascar témoigne aussi un déficit de saturation entraînant un faible taux d'humidité relative. Et la partie restante subit généralement une alternance de saison humide (6 mois) et sèche (6 mois). Ce régime pluviométrique est lié directement au déplacement « du puissant cumulonimbus » suivant les saisons et se dirige vers l'Inde en été boréal et descend jusqu'au niveau des Mascareignes en été austral. Les précipitations sont aussi abondantes lorsque la convergence inter-tropicale est couplée avec le phénomène naturel tel que le cyclone tropical.

En considérant toujours les données pluviométrique depuis 1961 à 1990 des 6 stations météorologiques de Madagascar, la méthode sur le cumul pluviométrique annuel permet de détecter les valeurs qui dépassent la climatologie (Maximum et minimum). Ils peuvent être expliqués par le passage du phénomène affectant l'île tel que le « El-Nino » capable d'engendrer une forte quantité de pluviométrie qui dépasse la normale. D'autre part, le déficit pluviométrique est le résultat de plusieurs mécanismes dus aux forçages extérieurs y compris l'activité humaine.

De plus les différentes représentations des cumuls annuels de la pluie mettent en évidence la variabilité inter annuelle de la quantité pluviométrique enregistrée par an dans notre espace d'étude. Aucune structure n'est comparable avec l'étude des cumuls en fonction de l'année.

La recherche d'une structure appropriée aux données nous conduit à transformer les données sous une autre forme. De ce fait, la distribution mensuelle du nombre de jour de pluie et du cumul de la pluie font apparaître une structure bi modale des précipitations de la côte Est et une structure uni modale de la partie restante.

Enfin, la méthode sur l'analyse spectrale demeure un outil très utile pour caractériser s'il y a un rythme suivi par les données utilisées, en effet elle fait apparaître le changement de saison tous les six mois.

En bref, la climatologie de la pluie à Madagascar est fortement liée aux circulations atmosphériques générales telles que la ZCIT (souvent couplée avec le cyclone), l'anticyclone (en synergie d'action avec l'alizé).

Concernant la tendance climatique, on a travaillé avec les données sur le nombre de jours de pluie mensuelle des 6 principales villes de Madagascar depuis 1961 jusqu'en 1990. Elle résulte avec vérification qu'il n'y aura pas de changement important en terme de nombre de jour de pluie mensuel si les facteurs intérieurs et extérieurs à la circulation atmosphérique responsable des différents phénomènes imprévisibles ne changent pas.

CONCLUSION GENERALE

La climatologie de la pluie ne peut pas être étudiée sans tenir compte de l'atmosphère.

En effet, la circulation atmosphérique dans la zone tropicale est donc composée par la circulation méridienne pouvant être décrite par le balancement latitudinal de la Zone de Convergence Inter Tropicale car elle se déplace suivant le mouvement apparent du soleil. Ensuite, elle est constituée par la circulation zonale caractérisée par la variation de la pression atmosphérique, le long de l'équateur sur l'Océan Pacifique et l'inverse sur l'Océan Indien, à l'exemple de la circulation extra tropicale localisée au sud-est de Madagascar.

Notre étude sur la climatologie de la pluie a été basée sur les données journalières de la pluviométrie des 6 stations depuis 1961 à 1990 avec les normales de précipitation des 19 stations malgaches. Plusieurs manières ont été adoptées pour le traitement de ces données afin de décrire, classer, expliquer et estimer le type de climat sur Madagascar.

Tout d'abord, l'analyse des cumuls annuels nous permet de classer chaque type de climat qui s'étire d'un climat très humide à l'Est à un climat semi-aride à l'extrême sud de Madagascar. Les valeurs anormales des cumuls sur chaque station reflètent la vulnérabilité de la climatologie au subit changement du mécanisme atmosphérique. Ainsi, la variabilité de la pluviométrie à taux excédentaire a été identifiée en 1982 et le déficit pluviométrique en 1990. Dans l'ensemble, Madagascar est caractérisée par la variabilité inter annuelle de la pluviométrie. Puisque les anomalies de la température à la surface de la mer se compliquent davantage, la circulation va être relativement rendue complexe.

Ensuite, les différents types d'étude de la distribution statistique mensuelle de la pluviométrie montrent que la valeur mesurant la tendance centrale est unique c'est-à-dire une seule valeur domine pour chacune des deux stations typiques malgaches Antananarivo et Tuléar. Pour la station qui représente la station de Toamasina, on a une distribution à deux modes qui ne sont plus des mesures à tendance centrale des distributions mais indiquant l'hétérogénéité des données en leur attribuant une valeur centrale pour chaque classe modale.

La méthode adaptée mais peu employée à la climatologie est l'analyse spectrale. Elle permet de situer la période de changement de saison dans la chronologie pluviométrique journalière tous les six mois. L'analyse spectrale détecte aussi mais pour de faible intensité la séparation des quatre saisons à Madagascar qui durent chacune trois mois.

Finalement, en supposant que les facteurs extérieurs responsables de toutes modifications restent stationnaires, on a établi la tendance du nombre de jours de pluies pour une telle année par la méthode d'ajustement des moindres carrées. Pour cela, la diminution ou l'augmentation du nombre de jours de pluie pour une période de 30 ans sera de 0 à 2 jours qui semblent relativement inaperçu par rapport à la période considérée.

Toutefois, notre étude sur la climatologie de la pluie à Madagascar sera limitée par les phénomènes non envisageables tels que le « El-Nino », « La-Nina » et d'autres encore qui ont un impact direct sur la pluviométrie c'est-à-dire notre paramètre d'étude.

Références bibliographiques

- [1] **Jeanne I. Randremanana R., Robert V., Ariey F., Tombo M.L., Wilmé L., Ranivoarisoa S. & Duchemin J.B.**, 1996 : Biogéographie de Madagascar.
- [2] **BELTRANDO G., CHEMERY L.**, 1995: Dictionnaire du climat. Ed. Larousse, Paris. 344p.
- [3] **VON STORCH H., ZWIERS F.Z.**, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research* Cambridge University Press, UK, 484p.
- [4] **SAIDI Mohamed ElMehdi** : Cours d'Hydrologie et de Climatologie, Faculté des Sciences et Techniques MARRAKECH.
- [5] **DONCQUE Gérald**, 1971 : Contribution géographique à l'étude du climat à Madagascar
- [6] **Bessafi M., and M.C. Wheeler**, 2005: Modulation of south Indian Ocean tropical cyclones by the Madden-Julian oscillation and convectively-coupled equatorial waves. *Mon. Wea. Rev.*, à paraître.)
- [7] **Bernard Duchiron**, 2002 : Variabilité inter annuelle de la pluviométrie dans l'espace riverain de l'Océan Indien
- [8] **Mc Gregor G.R. et Nieuwolt S.**, 1998 : *Tropical Climatology*. John Wiley & Sons eds, Chisester (UK). 339p.
- [9] **JACKSON I.J.**, 1989: *Climate, Water and Agriculture in The Tropics*. Longman. London. 328p.
- [10] **Ravet J.**, 1948 : Les pluies à Madagascar
- [11] Support de cours en SPSS (Logiciel pour analyser les données)
- [12] **Matlab** (Logiciel d'analyse spectrale) Signal Processing Toolbox : fft function
- [13] **Guy Mélard**, 1990 : Méthode de prévision à court terme

ANNEXES

1- Coordonnées des 25 stations

<u>Stations</u>	Longitude EST	Latitude SUD	Altitude (mètres)
Sambava	50°10	-14°17	5
Andapa	49°37	-14°39	474
Sainte-Marie	49°49	-17°05	3
Toamasina	49°24	-18°07	6
Mahanoro	48°48	-19°50	5
Mananjary	48°22	-21°12	6
Farafangana	47°50	-22°48	6
Antsiranana	49°18	-12°21	105
Nosy-be	48°19	-13°19	11
Vohémar	50°00	-13°22	5
Analalava	47°46	-14°38	57
Antsohihy	47°58	-14°53	18
Majunga	46°21	-15°40	22
Besalampy	44°29	-16°45	36
Antananarivo	47°32	-18°54	1310
Ivato	47°29	-18°48	1264
Antsirabe	47°04	-19°52	1540
Arivonimamo	47°10	-19°02	1450
Fianarantsoa	47°06	-21°27	1106
Fort-Dauphin	46°57	-25°02	8
Morondava	44°18	-20°16	8
Ranohira	45°24	-22°33	823
Morombe	43°22	-21°45	4
Faux-Cap	45°32	-25°33	20
Toliary	43°44	-23°23	8

2- Données sur les cumuls annuels des précipitations pour les 6 stations principales

	Majunga	Tuléar	Fianarantsoa	Toamasina	Antananarivo	Antsiranana
Année	Cumuls de pluie en mm					
1961	1953.4	588.30	1244.0	2827.6	1463.8	1311.0
1962	1309.8	201.30	961.80	2298.7	1417.4	1038.2
1963	996.00	342.60	1373.1	3705.9	1445.3	841.00
1964	1159.8	451.20	1036.4	3078.8	1271.1	930.10
1965	1406.9	452.80	1340.4	3453.3	1626.4	1274.8
1966	1439.0	632.50	1644.3	2943.6	1094.6	905.90
1967	1508.4	396.10	1166.5	3113.7	1515.1	1586.4
1968	1509.8	718.80	792.70	2472.5	912.60	1649.9
1969	1886.4	202.40	1792.3	2150.8	1107.6	1172.6
1970	1735.7	141.30	1547.9	2753.7	922.80	935.20
1971	1587.3	398.30	1015.8	3251.3	1253.3	1444.3
1972	2790.9	404.50	998.20	3805.5	1590.4	1154.9
1973	1597.8	378.40	1229.5	4069.9	1345.5	1710.4
1974	1113.5	650.00	1226.8	3482.5	1392.2	664.90
1975	892.70	397.00	1080.7	3224.9	1712.8	1592.0
1976	1217.4	361.70	1088.0	2802.6	1111.8	1254.7
1977	1726.2	540.90	930.70	3046.9	1217.5	944.70
1978	1488.6	262.80	741.10	3143.6	1090.7	957.90
1979	1584.6	251.40	1066.4	2065.9	1552.4	754.60
1980	1705.4	267.00	934.80	2935.5	1289.4	1523.2
1981	1459.9	343.30	893.00	2530.3	1600.7	1082.8
1982	1877.6	488.30	1399.0	3961.4	2016.7	1181.0
1983	1720.5	203.40	915.10	3017.3	1611.5	945.00
1984	2220.6	397.90	1361.5	3351.1	1741.3	1683.2
1985	1140.0	245.30	796.90	3318.9	1578.3	1051.5
1986	1406.8	267.70	1359.7	3271.7	1236.8	1408.7
1987	1953.4	391.40	899.70	2602.6	1414.2	1254.9
1988	1303.0	374.00	1069.9	2972.7	1090.0	1100.2
1989	1744.8	493.30	1430.6	3990.6	1089.4	1796.2
1990	794.60	221.00	1150.20	2031.3	777.30	764.60

3- Programme en MATLAB utilisé dans la méthode spectrale.

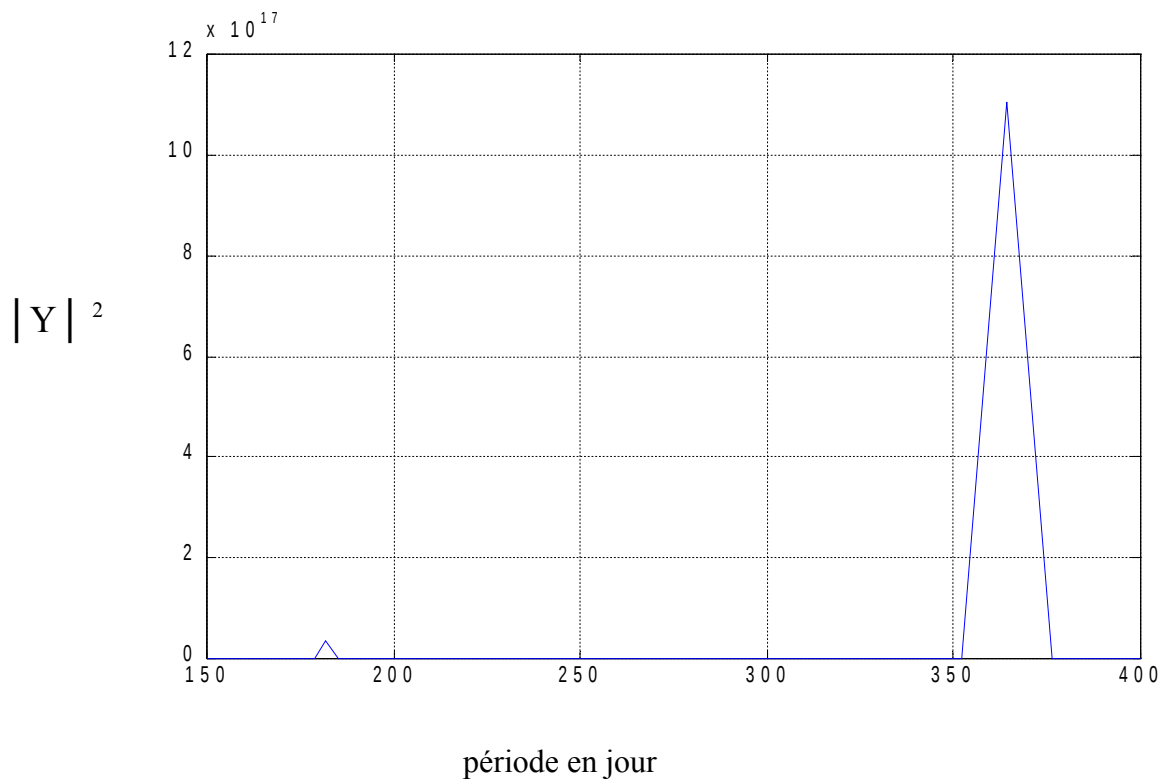
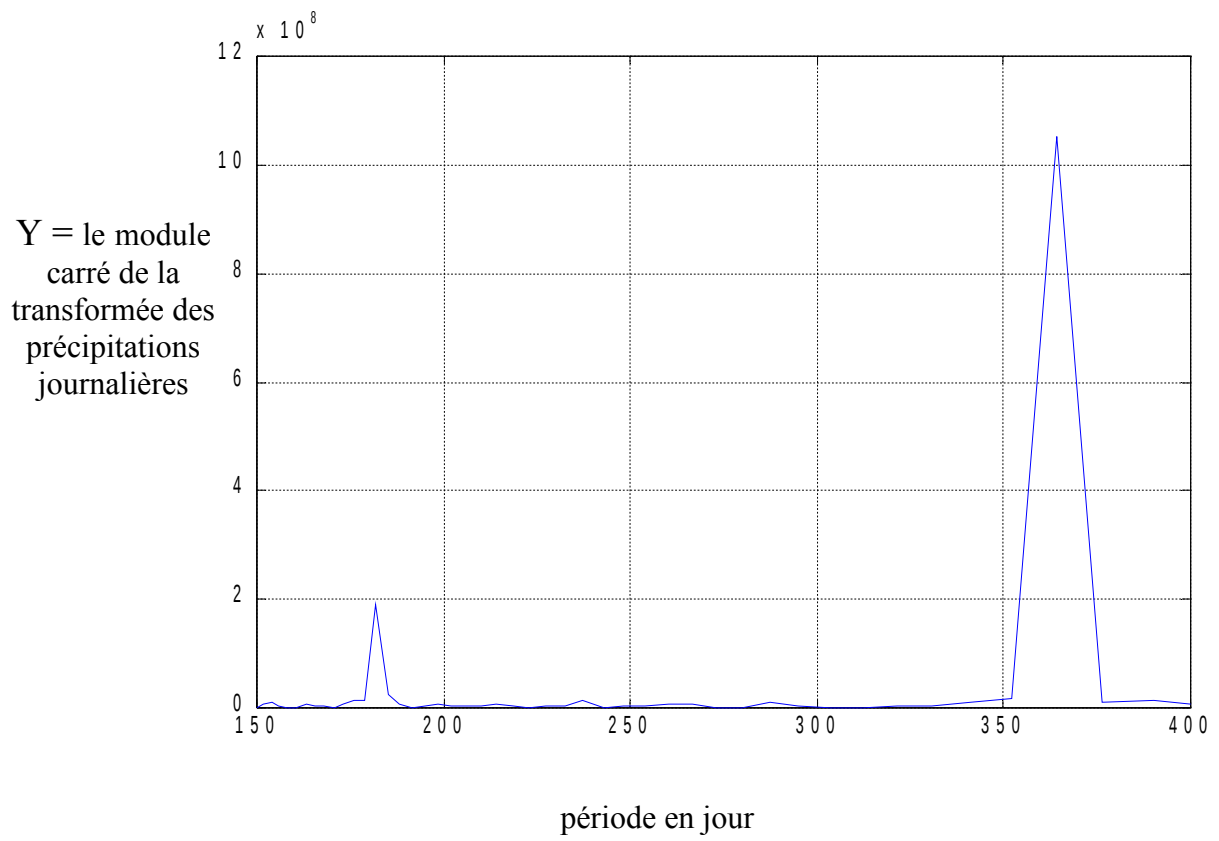
```
» load DATA.txt {appel des données}
```

```

» DATA
.
.
.
» X=fft(data) {décomposition spectrale des
données par la méthode de Transformée de
Fourier Rapide}
» X(1)=[] {suppression de la 1ère composante de
b qui exprime la somme des composantes des
données dans le plan complexe}
» n=length(X);
» Y=abs(X(1:n/2)).^2;{application de la densité
spectrale puissance aux variables décomposées}
» nyquist=1/2;
» freq=[1:n/2]/(n/2)*nyquist;
» plot(freq,Y);
» period=1./freq;
» plot(period,Y);
» grid on

```

4- Résultats des analyses spectrales des données journalières depuis 1961 à 1990.



Figures 31 : MAJUNGA (N=10922)

Y = le module
carré de la
transformée des
précipitations
journalières



période en jour

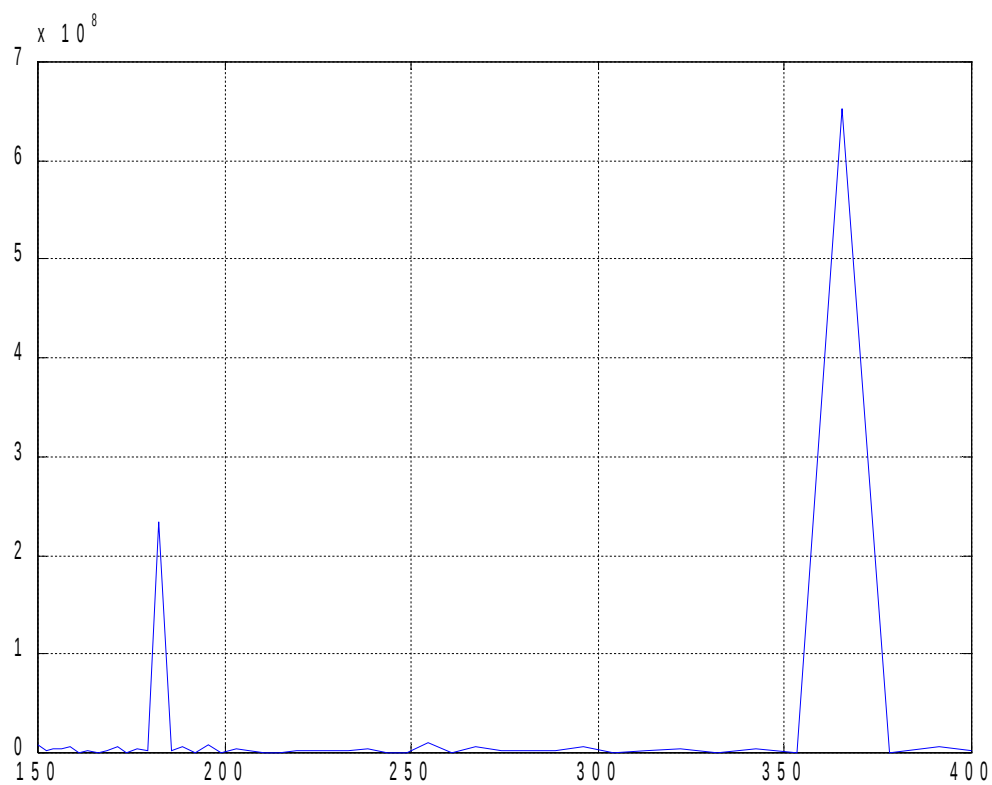
$|Y|^2$



période en jour

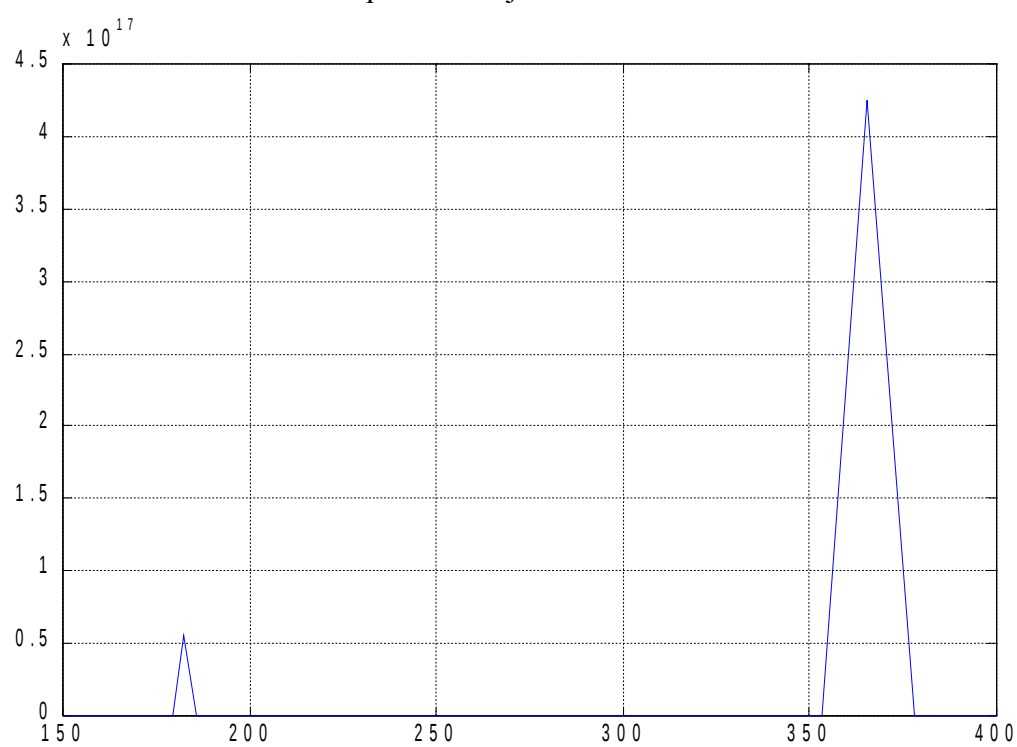
Figures 32 : FIANARANTSOA (N=10922)

Y = le module
carré de la
transformée des
précipitations
journalières



période en jour

$|Y|^2$



période en jour

Figures 33 : ANTSIRANANA (N=10922)

Y = le module
carré de la
transformée des
précipitations
journalières



$|Y|^2$



Figures 34 : TOAMASINA ($N=11160=31 \times 12 \times 30$)

RESUME

La climatologie de la pluie à Madagascar est disponible en considérant surtout les données de précipitations journalières de la période 1961 à 1990 des six stations principales de Madagascar. L'étude pluviométrique montre qu'il y a alternance de saison sèche et humide dans notre espace d'étude, cette alternance est due en fait au déplacement de la zone de convergence des alizés des deux hémisphères selon la saison. Ce type de régime pluviométrique n'est pas général dans tout Madagascar puisque d'une part, la saison sèche n'est pas respectée dans la partie orientale de l'Ile à cause du mouvement ascendant de l'air dont la barrière montagneuse le long de la côte Est en est le premier responsable, et d'autre part l'aspect de l'été sur la région Sud-Ouest/Sud semble différent car les analyses temporelles vérifient la domination de la sécheresse sur ces lieux.

MOTS CLES

Pluie- Madagascar-humidité relative- zone intertropicale- circulation méridienne- Zone de Convergence Intertropicale- cumulonimbus- circulation zonale- barrière montagneuse- côte Est- le Sud.

ABSTRACT

The climatology of rainfall for Madagascar is available by using daily rainfall measurement picked up from six main stations of Madagascar for the period from 1961 to 1990. The result of rainfall analysis provide basically that Madagascar has two alternated seasons as dry season or winter and rain season or summer. The alternation is caused by the displacement of southerly and northerly winds convergence zone according the season. This kind of rainfall cluster is not the same in the entire island because in one hand, winter appears like a rain season in the easterly area. It comes from the assembly line along the eastern coast which involve forced wind ascent and "dark clouds". In the other hand, the aspect of rain season in south-west/south area seems different, the reason why is the rainfall time analysis establishes that dryness control these places.

KEY WORDS

Rain- Madagascar- relative moisture- inter tropical zone- meridian circulation- Inter tropical Convergence Zone- cumulonimbus- zonal circulation- assembly line- East coast- South.