La variabilité et l'évolution de l'ozone troposphérique dans le basin Sud-Ouest de l'océan indien & Analyse d'un modèle statitstique de prévision de trajectoire et d'intensité de cyclones tropicaux

Miloud Bessafi

▶ **To cite this version:**

Miloud Bessafi. La variabilité et l'évolution de l'ozone troposphérique dans le basin Sud-Ouest de l'océan indien & Analyse d'un modèle statitstique de prévision de trajectoire et d'intensité de cyclones tropicaux. Océan, Atmosphère. Université de La Réunion, 2000. tel-01405452

HAL Id: tel-01405452
https://hal.univ-reunion.fr/tel-01405452

Submitted on 30 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JOI YH 551.5 BES f

Université de la Réunion
Faculté des Sciences et Technologies

HABILITATION
A DIRIGER
DES RECHERCHES

La variabilité et l'évolution de l'ozone troposphérique dans le bassin Sud-Ouest de l'océan indien

&

Analyse d'un modèle statistique de prévision de trajectoire et d'intensité de cyclones tropicaux

SERVICE COMMUN de la DOCUMENTATION
UNIVERSITE de la REUNION

Présenté par *Miloud BESSAFI*

Maître de Conférences, spécialité atmosphère.

Soutenue à l'Université de La Réunion, prévue le 6 décembre 2000

Composition du jury:

S. Baldy	Professeur, Université de la Réunion: Directeur HDR
P. Courtier	Directeur Général Adjoint de Météo-France: Examinateur
R. Diab	Professeur, Université du Natal (Afrique du Sud): Examinateur
Y. DeKeyser	Professeur, Université de Marseille: Rapporteur
J.P. Lafore	HDR, Ingénieur en chef de la Météorologie (CNRM Toulouse): Rapporteur
G. Mégie	Professeur, Université de Paris VI: Rapporteur

SCD UNIVERSITE DE LA REUNION
350104 0350

Avant-propos

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches représente un moment fort dans ma carrière universitaire car il s'agit de faire le bilan de mes dix années d'activité au sein de l'université de La Réunion. De plus, faire un récapitulatif de mon évolution dans l'exercice de ma fonction d'enseignant-chercheur pour la période 1991-2000 n'est pas un exercice aisé dans la mesure où je me suis trouvé au sein d'une université très jeune et en pleine expansion. Juste quelques chiffres évocateurs: la capacité d'accueil de l'université de La Réunion était de 4804 étudiants en 1990 contre plus de 9000 en 2000. La Faculté des Sciences et Technologies comptait pour sa part 735 étudiants en 1990 avec une offre de 12 diplômes nationaux contre 2100 étudiants aujourd'hui avec 30 formations initiales "diplômantes". Le département de Physique-Mécanique auquel j'appartiens a également joué un rôle significatif dans le développement de l'UFR Sciences et Technologies. Rappelons simplement qu'à l'époque de mon recrutement ce département comptait en son sein une dizaine de membre alors qu'aujourd'hui l'effectif a triplé. Le recrutement effectué pendant cette période a porté essentiellement sur des postes de Maître de Conférences et des Professeurs Agrégés. L'effectif des professeurs est quant à lui reste constant avec 5 professeurs dont un détaché au Rectorat de La Réunion. Nous reviendrons ultérieurement sur cet aspect concernant l'environnement universitaire en matière de recherche et en particulier au département de physique mécanique. Ce développement répondait donc à une conjoncture démographique, économique et géopolitique locale singulière par comparaison avec d'autres départements de la métropole. Des investissements très importants ont été engagés de la part des différents organismes de tutelles, dont l'état, les collectivités locales et l'Europe, pour répondre à cette dynamique de développement. Un nombre considérable d'aménagements ont été réalisés au cours de ces dix dernières années avec, rappelons-le aujourd'hui, de nouvelles structures telles qu'une Faculté des Sciences et Technologies, une Faculté de Droit et Sciences Economiques & Sociales, une Faculté des Lettres, une Bibliothèque de Droit-Lettre-Sciences Economiques, un Restaurant universitaire pour le site de Saint-Denis et pour le Sud un complexe technologique incluant un IUT (comprenant 2 départements) à Saint-Pierre et une antenne de l'université au Tampon. A titre de comparaison, lorsque j'ai été recruté le site Nord de l'université comptait une faculté des sciences et des bâtiments administratifs. Pour ce qui est de l'avenir, la tendance est toujours à l'expansion des effectifs étudiants (13000 étudiants en 2006 d'après les chiffres de l'INSEE) et à de nouvelles perspectives de développement pour l'université (renforcement du développement des pôles technologiques, etc...).

Je m'arrêterai là sur ce descriptif car ce n'est pas le propos de ce document mais je souhaitais en préambule "planter le décor" dans lequel j'ai évolué afin de situer clairement le contexte de mes diverses actions de recherche et d'enseignement au sein de l'université.

1 Introduction 4

2 Observation et analyse de l'évolution de l'ozone troposphérique en zone tropicale océanique à partir du site de La Réunion 7

2.1 Introduction 7

2.2 Influence régionale du brûlage de biomasse 8
2.2.1 Introduction 8
2.2.2 Radiosondage Ozone 8
2.2.3 Mesures des Satellites NOAA 15
2.2.4 Prélèvements d'aérosols carbonés 18

2.3 Influence de la météorologie 18

2.4 Influence régionale du courant jet subtropical 22

2.5 Modulation par les oscillations intra-saisonnières de Madden-Julian 30

2.6 Conclusion 34

2.7 Publications et communications sur le sujet 34

2.8 Bibliographie générale 35

3 Modèle statistique de prévision de trajectoires et d'intensité des systèmes dépressionnaires tropicaux 38

3.1 Introduction 38

3.2 Le concept du modèle MOCCANA 39

3.3 Analyse des performances sur l'ensemble des bassins cycloniques 44
3.3.1 Contexte de l'analyse 44
3.3.2 CLIPER: concept de niveau de difficulté de prévision 48
3.3.3 MOCCANA et comparaison des performances avec CLIPER 50

3.4 Conclusion 55

3.5 Publications et communications sur le sujet 55

3.6 Bibliographie générale 55

4 Conclusion et perspectives 57

5 Annexes 1 59

5.1 Activités pédagogiques et charges d'enseignement 59

5.2 Activités administratives 62
5.2.1 Département de Physique-Mécanique 62
5.2.2 Université 63

6 Annexes 2 64

6.1 Curriculum Vitae 64

6.2 Autres travaux 64

6.3 ENCADREMENTS 65
6.3.1 Responsable Stage de D.E.A. 65
6.3.2 Thèses 65

1 Introduction

J'ai été nommé Maître de Conférences à l'Université de La Réunion le 1er octobre 1991. Lors de mon arrivée à l'université l'activité de recherche au sein du département physique-mécanique connaissait une période de mutation profonde. L'essentiel de l'activité de cette époque était centré sur des problématiques de recherche dans le domaine de la thermique avec des applications en matière de maîtrise de l'énergie(confort thermique de l'habitat, séchage, gisement solaire et éolien, analyse exergétique des procédés sucriers) développées en relation avec les industriels locales. Le Laboratoire de Thermique et Energétique Solaire sous la direction du professeur Jean Leveau (62ème section CNU) s'est également orienté vers un nouvel axe de recherche qui était la physique de l'atmosphère. Le professeur Serge Baldy (37ème section CNU) nouvellement recruté fut l'initiateur de ce projet de recherche. C'est donc dans cette atmosphère particulière que j'ai été recruté pour compléter la nouvelle équipe de recherche atmosphérique. A la suite de cela, c'est assez rapidement (1993) que les deux équipes du LTES se sont définitivement séparées de l'entité mère pour former ce qui est la structure actuelle de recherche au sein du département de physique-mécanique, à savoir le Laboratoire de Génie Industriel (LGI) et le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère (LPA). En 1991, la recherche atmosphérique à l'université de La Réunion était donc à l'état de projet. De plus, la nouvelle équipe ainsi constituée en 1991 était représentée par un ensemble de 5 enseignant-chercheurs appartenant à des sections CNU très diverses (1 MCF spécialisé en électronique: 63ème section, 1 MCF spécialisé dans le traitement du signal: 61ème section, 1 MCF (moi-même) et 1 professeur spécialisé en mécanique des fluides: 37ème section et enfin 1 professeur spécialisé en optique, énergétique affilié à la 62ème section). C'est dans ce contexte de diversité des compétences et de la localisation géographique particulière que cette équipe s'est résolument orientée vers l'observation de l'activité dynamique dans la moyenne atmosphère tropicale par sondage Lidar et l'identification des mécanismes dynamique et physico-chimique contribuant à la variabilité de l'ozone troposphérique. Comme je l'ai précédemment indiqué tous les enseignant-chercheurs relevant de la 37ème section ont été affectés au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère (LPA). Actuellement, l'effectif est de 7 enseignant-chercheurs dont 2 professeurs (62ème: le directeur; 37ème: le vice-directeur), 4 MCF (37ème: 4; 60ème: 1; 61ème: 1). La 37ème section représente donc 11% de l'effectif total du département de physique-mécanique et 57% du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère. Il est important de préciser que dans ce ratio le LPA compte un effectif qui représente 14 % de l'effectif global au sein du département de physique-mécanique. La Figure 1 permet de montrer l'évolution de l'effectif de la 37ème section au cours de ces dix dernières années. A titre indicatif est représenté sur cette figure l'effectif du laboratoire de physique de l'atmosphère ainsi que celui du département. On peut noter que le LPA connaît une croissance faible depuis sa création par comparaison avec celle du département de physique-mécanique. La représentativité de la 37ème section a eu une évolution similaire à celle du LPA. Néanmoins, l'effectif de cette section est assez faible puisque nous n'avons jamais excédé un taux de 20% par rapport à l'effectif global du département. Toutefois, ces effectifs sont en rapport avec la moyenne nationale qui compte environ 100 MCF et 50 professeurs en 37ème section.

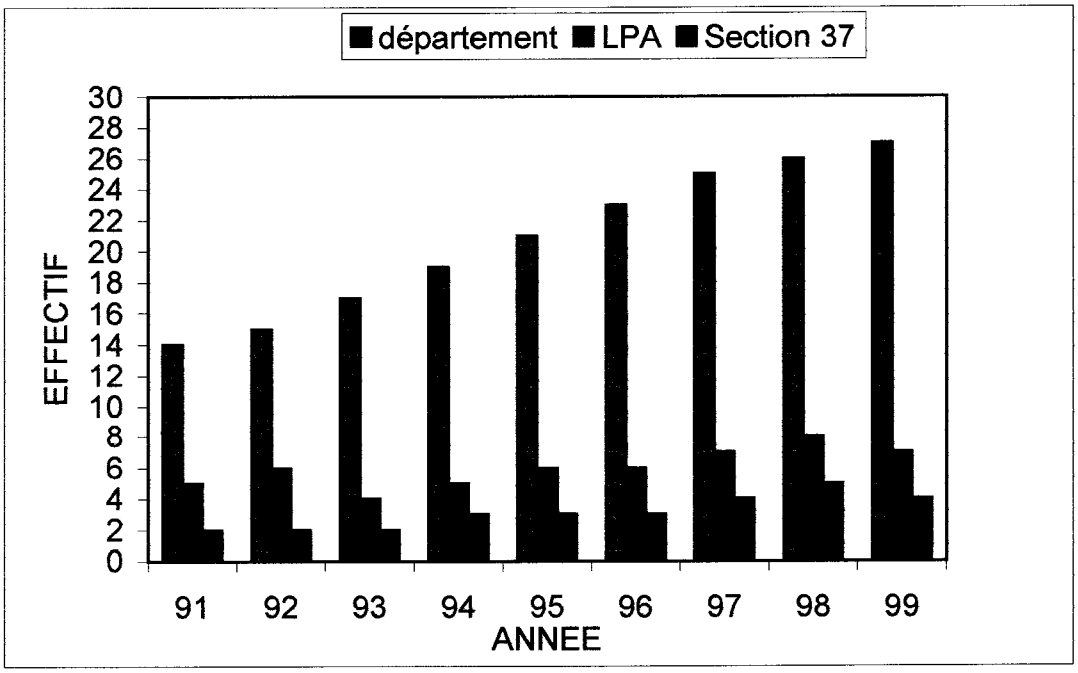

Figure 1: Evolution de l'effectif du département de physique-mécanique, du laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de la section N°37 au cours des dix dernières années.

Le laboratoire de Physique de l'Atmosphère s'est donné comme perspective de recherche l'étude de l'activité dynamique dans la moyenne atmosphère par sondage Lidar et l'évolution du contenu troposphérique d'ozone de la zone tropicale en utilisant essentiellement des mesures effectuées sur le site de La Réunion. C'est autour de ces deux thèmes que s'articule actuellement l'essentiel de l'activité de recherche effectuée au sein de ce laboratoire. On doit le développement technique du LPA d'une part, à un appui logistique fort d'un certain nombre de partenaires nationaux permettant un transfert technologique efficace et d'autre part, à une contribution scientifique importante de ces partenaires pour accompagner ce jeune laboratoire dans ses activités de recherche. Le Service d'Aéronomie de Paris VI a, à ce double titre, grandement contribué au développement instrumental et scientifique soutenu du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère. Dés 1992, le LPA s'est trouvé engagé dans une campagne de mesure d'ozone troposphérique par radiosondage (campagne SAFARI 92) et ultérieurement dans une stratégie de mesures en routines dans le cadre de programmes nationaux (PAMOY, PNCA, ...). En 1994, on assiste à la première installation Lidar à La Réunion dans une configuration primaire pour des mesures de température dans la stratosphère principalement. Ce système a été ultérieurement amélioré par l'ajout de voies polarisées, de 6 voies comptages, de 2 voies analogiques et de voies ozone. Ces mesures régulières au sein du LPA sont utilisées également par le réseau de surveillance NDSC où La Réunion est une station d'observation secondaire. Actuellement, le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère participe à un projet de mise en place d'un observatoire de physico-chimie de l'atmosphère, à des campagnes internationales de mesures (SHADOZ, SAFARI 2000, INDOEX) avec les instruments opérationnels suivants:

Radiosondages PTU-O_3	Lidar exciplexe ozone
Spectromètre UV-Visible SAOZ (O_3 et N_2O)	Photomètre ozone Dasibi
Lidar Nd-Yag Rayleigh-Mie / Température	Prélèvements aérosols sur filtre
Lidar Nd-Yag Dial Ozone	Aethalomètre

Les capacités techniques du LPA, la qualité des mesures effectuées, la contribution de ses observations atmosphériques pour la communauté scientifique en font actuellement un laboratoire reconnu au sein de l'université de La Réunion ainsi qu'au niveau national et international.

Dans une première partie, je ferais état des différents thèmes que j'ai développé au sein du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, du contexte scientifique, mes actions d'encadrement et du bilan de mon engagement détaillé par type d'action. Cette période couvrira les années 1991-1998 où ma principale activité portait sur la problématique de l'ozone troposphérique en milieu tropical. En 1998, j'ai décidé de donner un nouveau tournant dans mes activités de recherche en direction de la Cellule Recherche Cyclone de Météo-France à La Réunion. Un point sur mes actions administratives et de recherche au sein de cette cellule sera donc proposé dans un deuxième chapitre concernant la période 1998-2000. Dans cette partie j'exposerai la problématique de la prévision de trajectoire et d'intensité des cyclones et mon intégration auprès d'un service de recherche extérieure à l'université. Enfin, dans une dernière partie je proposerai un panorama de mes actions de recherche futures au sein du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et les orientations que je compte conduire avec l'équipe de la Cellule Recherche Cyclone (CRC) de La Direction Interrégionale de La Réunion de Météo-France.

En annexe, je proposerai une synthèse de mes activités relevant de l'enseignement et de l'administratif "terreau" de mon activité universitaire. Je la compléterai par une mise en revue les sujets de DEA et de thèse et pour lesquels j'ai effectué un travail d'encadrement. Sous la rubrique intitulée "autres travaux", une liste de communications sera simplement donnée, pour rendre compte des thèmes qui n'ont pas été abordés ici.

L'ensemble de ces aspects de mon travail devrait permettre d'une part, d'illustrer mes engagements d'enseignant-chercheur et d'autre part, de montrer le contexte dans lequel s'est effectué mon parcours lequel, s'il ne peut être qualifié d'initiatique, a tout même nécessité une certaine dose d'adaptation et exigé beaucoup d'organisation.

2 Observation et analyse de l'évolution de l'ozone troposphérique en zone tropicale océanique à partir du site de La Réunion

2.1 Introduction

Les études sur le bilan d'ozone troposphérique dans les régions tropicales et particulièrement pour l'Océan Indien région sont relativement récentes (Fabian,1977; Fishman, 1987; Pillay, 1995; Diab, 1995; Thompson, 1996; Baldy, 1996; Garstang, 1996). La compréhension et l'impact des processus intervenant dans cette zone sur le bilan de l'ozone tels que la convection profonde, les cyclones, les transferts stratosphère/troposphère et la chimie hétérogène associée aux rejets issus du brûlage de biomasse, restent un objectif d'actualité. Bien que les observations sur ce sujet dans les régions de l'hémisphère sud demeurent rares, un certain nombre de campagnes de mesures très ciblées ont été réalisées (TROPOZ I/1987, TROPOZ II/1991, ABLE/1987, STARE/1992, DECAFE/ 1988, TRACAS, SAFARI/2000, INDOEX). Ces différentes campagnes traduisent les efforts entrepris par la communauté nationale et internationale pour tenter de répondre à des questions sur:

- le rôle des espèces chimiques très actives, telles que l'ozone, la vapeur d'eau ou les oxydes d'azote dans la haute troposphère, sur l'effet de serre additionnel (forçage radiatif),
- le lien entre émissions régionales d'espèces gazeuses, particulaires (naturelles et/ou anthropiques) et impact global,
- l'influence des processus dynamiques tels que les courant-jets subtropicaux sur les mécanismes de mélange à petite échelle et de transport de traceurs chimiques entre la haute troposphère et la basse stratosphère.

C'est donc dans ce contexte que le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère débute en 1992 des travaux de recherche sur l'évolution de l'ozone troposphérique dans la région tropicale du Sud-ouest de l'océan indien. Cinq sujets principaux de recherche sont actuellement développés autour de cette problématique:

- l'influence régionale du brûlage de biomasse sur la distribution de l'ozone troposphérique,
- l'interaction des espèces particulaires avec l'ozone,
- le lien entre échanges stratosphère-troposphère et bilan d'ozone troposphérique,
- la modulation de l'ozone par les oscillations atmosphériques intra-saisonnières,
- la modélisation chimique de la variabilité de l'ozone troposphérique en milieu tropical marin [1]

Dans une première partie, je ferai le point sur les observations d'ozone effectuées sur le site de la Réunion entre 1992 et 2000. Dans le même temps, j'exposerai les analyses que j'ai pu mener avec l'équipe de chercheurs et doctorants sur l'influence régionale des pratiques des feux de brousse sur le continent Sud-Africain et à Madagascar. Durant cette période, j'ai

[1] Thème qui ne fait pas l'objet de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches

co-encadré trois doctorants sur cette thématique, à savoir Fabienne Taupin qui a soutenu sa thèse en 1997, Tantely Randriambelo qui a soutenu en 1998 et Chatrapatty Bughwant qui devrait soutenir sa thèse en fin d'année 2000. Dans une deuxième partie, je compléterai cette présentation par une synthèse du travail que j'ai mené avec Jean-Luc Baray (thèse soutenue en 1999) sur les échanges stratosphère/troposphère et notamment l'influence du courant jet subtropical sur la structure verticale de l'ozone troposphérique. Je terminerais enfin par un troisième chapitre qui sera consacré à la possibilité de modulation du contenu d'ozone troposphérique dans notre région par les oscillations intra-saisonnières de Madden-Julian.

2.2 Influence régionale du brûlage de biomasse

2.2.1 Introduction

Après une année consacrée entièrement à la mise en place de nouveaux enseignements (Cf. annexe 1), c'est en 1992 que j'ai débuté avec S. Baldy mon travail sur le thème de l'ozone troposphérique. Après un temps de réflexion et de concertation, il a été établi (compte tenu de nos expériences respectives sur le sujet) qu'il était nécessaire d'inscrire notre travail dans le long terme autour de l'observation et l'analyse de la variabilité temporelle de la structure verticale de l'ozone troposphérique dans notre région. Dans ce paragraphe, je vais donc présenter une synthèse des travaux que j'ai effectués pendant la période 1992-1998 autour de cette thématique.

Tout d'abord, j'aimerais préciser que ma tâche première, en début de cette période, était de me familiariser avec les techniques de mesures par radiosondage et d'apprendre à mettre en place un protocole de mesure dans la perspective d'observations pérennes sur le site. Cette mise en place a du être rapide dans la mesure où nous étions impliqués directement dans la campagne de mesure SAFARI92 (Southern African Fire-Atmosphere Research Initiative 1992). L'apprentissage a également porté sur l'analyse du bilan d'ozone troposphérique et nécessitant un important travail bibliographique. A mon initiative, et à la suite de cette campagne où nos collègues d'Afrique du Sud étaient impliqués, nous avons instaurer une collaboration sur ce sujet avec le professeur R. Diab de l'université du Natal. Un volet important de mon travail fut également d'assurer, sous la responsabilité du professeur Serge Baldy, le suivi scientifique du travail de trois doctorants et de les accompagner en partie jusqu'à la présentation orale de leur thèse (Taupin, 1997; Randriambelo, 1998; Bughwant, 2000).

2.2.2 Radiosondage Ozone

En septembre 1992 que nous avons participé pour la première fois à une campagne de mesure d'ozone par radiosondage dans le cadre de la campagne instrumentée SAFARI92. Cette participation a été à l'origine de nos tous premiers travaux sur ce thème. A l'heure actuelle, le LPA comptabilise plus de 156 lâchers de ballon de radiosondage PTU_O_3 (pour Pression hUmidité, Température et Ozone) à son actif. Ces mesures effectuées en routine avec les soutiens des programmes PNCA et SHADOZ et complétées par quelques campagnes intensives (par exemple TRACAS) ont fait l'objet d'une qualification portant essentiellement sur la valeur du contenu d'ozone total (Figure 2) par comparaison avec des mesures d'autres instruments tels que le spectromètre SAOZ, les observations satellitaires TOMS et SAGEII .

Fabienne Taupin, dans son travail de thèse, a contribué à cette qualification, à partir de laquelle nous mis en place une analyse systématique des profils saisonniers d'ozone.

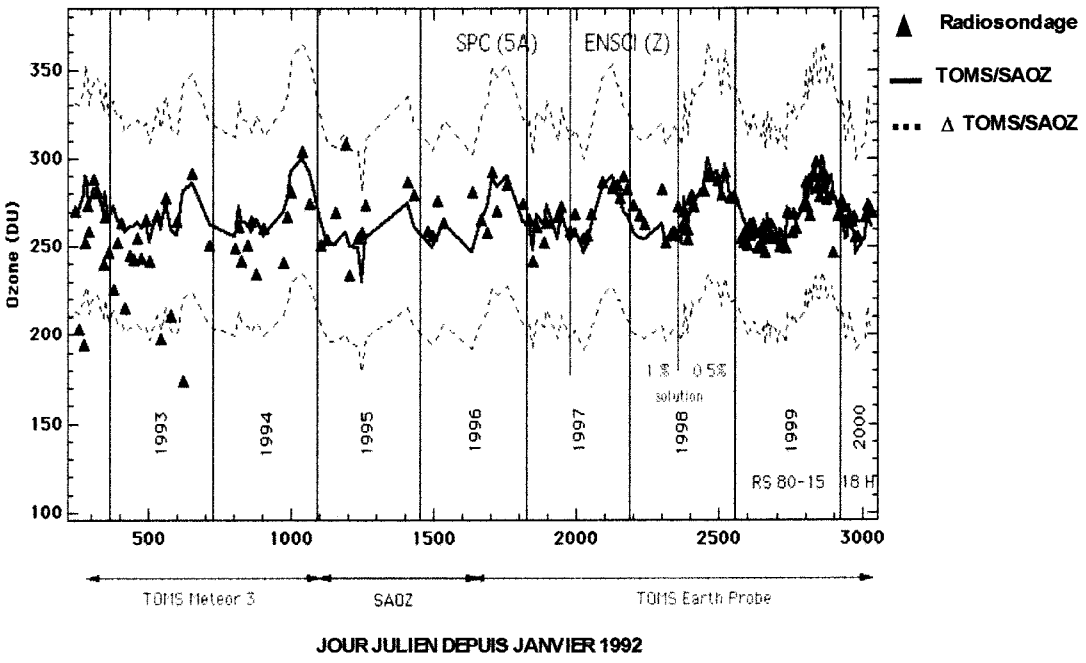

Figure 2: Comparaison de l'évolution temporelle de l'ozone intégré calculé à partir des profils radiosondages avec les mesures SAOZ, les mesures du sondeur SAGEII et les données issues du spectromètre TOMS.

La Figure 3 nous apporte une présentation synthétique de la variation saisonnière d'ozone par couche d'atmosphère et nous permet de relever quelques caractéristiques importantes pour la zone Sud-Ouest de l'Océan Indien. Les quatre courbes présentent l'évolution au cours de l'année du rapport de mélange d'ozone entre deux niveaux de pression (±100 hPa) de part et d'autre du niveau indiqué. Ainsi le rapport de mélange d'ozone au niveau 900 hPa correspond en fait à la moyenne entre les niveaux 800 et 1000 hPa. Cette première couche correspond à la couche limite océanique. Suit la couche 600-800 hPa (niveau moyen 700 hPa) située en dessous de l'inversion d'alizés, la moyenne troposphère (500 hPa) et enfin la haute troposphère.

Le comportement annuel de l'ozone à 900 hPa est marqué par une composante annuelle très forte avec un minimum pendant l'été (15 ppbv vers janvier-février) pour atteindre un maximum de 30 ppbv vers septembre-octobre. Dès 800 hPa, nous remarquons l'apparition d'un maximum en septembre-octobre qui atteint 55 ppbv en moyenne, et un palier à 35 ppbv entre mai et juillet. Nous avons donc une augmentation de l'ozone en septembre-octobre potentiellement imputable à l'influence des feux de biomasse en Afrique et Madagascar pour cette zone de l'Océan Indien (Fishman et Larsen, 1987). Néanmoins, cette hypothèse pourrait impliquer que s'effectue un retour des contaminations par la branche descendante de la cellule de Hadley-Walker au niveau des 30ème Sud et un transport en basse couche par le flux de sud-est des alizés. Toutefois, une diffusion turbulente à travers la barrière dynamique d'inversion d'Alizés des contaminations dues aux brûlages est aussi possible. Cette circulation de basse couche au-dessus de l'Océan indien avec des temps de résidence plus longs en basse couche (vitesses faibles) et des conditions physico-chimiques de couche limite marine constituent un puits d'ozone important.

Au niveau supérieur (500 hPa), nous apparaît une signature saisonnière plus importante pouvant être attribuer aux effets directs des feux de biomasse qui se distinguent du niveau directement inférieur par 30 ppbv d'écart pour le mois d'octobre (Diab et Bessafi, 1996; Baldy, 1996; Taupin et Bessafi, 1997; Diab et Bessafi, 1998). Pris dans la circulation rapide de haute couche de nord-ouest de la cellule d'Hadley-Walker, la dispersion de l'ozone et ses précurseurs injectés au dessus du continent africain et de Madagascar peuvent atteindre notre région approximativement en cinq jours, durée qui est relativement courte et permet de faire un suivi des effets de la contamination de la troposphère libre au dessus des océans tropicaux par les feux de biomasse.

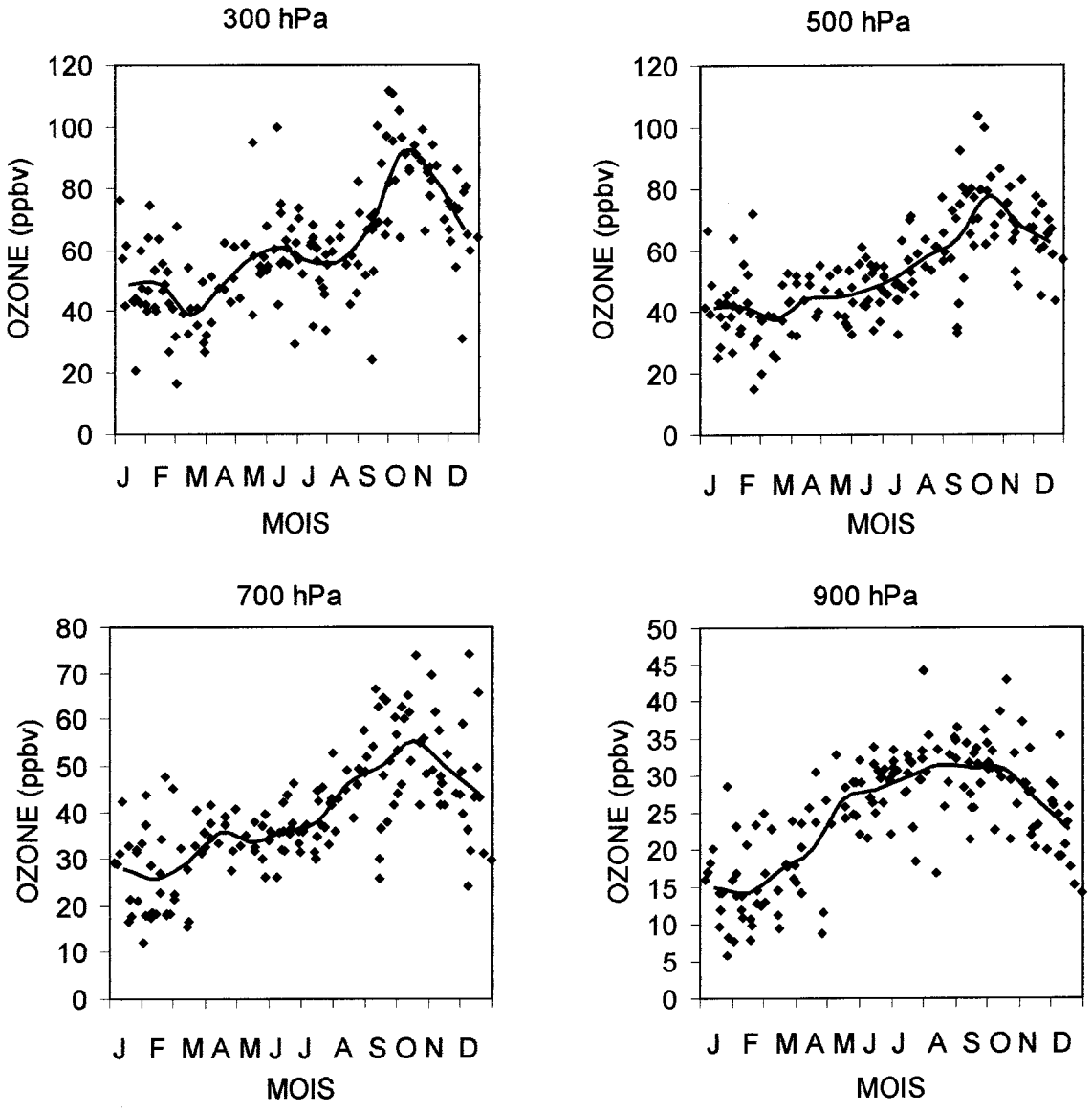

Figure 3: Variabilité mensuelle de l'ozone par couche d'altitude pendant la période 1992-2000.

Enfin, la couche supérieure (niveau 300 hPa) présente une modulation marquée de l'ozone avec trois 3 maxima au cours de l'année, d'intensité croissante. Le premier est en période d'été (février: 50 ppbv), la deuxième en hiver (juin: 60 ppbv), et la troisième se situe

pendant la période des feux dans le Sud-Est Africain (octobre: 90 ppbv). L'apparition à cette altitude d'un maximum en février et en juin correspond respectivement à des périodes où l'ITCZ et le courant jet subtropical d'ouest sont au plus proche de la Réunion. L'intrusion d'air troposphérique dans la basse stratosphère par la convection profonde d'été et les descentes d'air stratosphérique pourraient expliquer les premiers pics d'ozone observés à 300 hPa en février et juin. Cette hypothèse de travail pour la période d'hiver austral sera développée dans le chapitre correspondant à l'étude de ces échanges à partir du site de La Réunion.

Les Figure 4a, b, c permettent de visualiser le comportement saisonnier de la concentration verticale d'ozone dans la couche limite marine, la troposphère libre et la haute troposphère. Ces profils moyens accompagnés de leur écart-types respectif sont issus des 156 radiosondages (Ozone: sonde électrochimique ECC + Pression/Humidité/Température: capteurs VAISALA) réalisés pendant la période 1992-2000 à Saint-Denis de La Réunion. L'altitude maximale retenue ici pour la présentation des profils mensuels d'ozone est de 16 km afin de s'affranchir du masquage de la concentration de la troposphère libre par les valeurs élevées d'ozone à la tropopause (située en moyenne vers 17 km) et la basse stratosphère.

L'étude des profils individuels d'ozone pour chaque mois nous permet de constater une variabilité nette. Ainsi, pendant les mois de décembre à mars (Figure 4a) la basse troposphère (en dessous de 2km) est à son niveau le plus de bas de l'année (10 ppbv). La moyenne (2-12 km) et la haute troposphère (12-14 km) connaissent également une décroissance régulière du rapport de mélange pour être en deçà de 60 ppbv en moyenne troposphère. A partir du mois d'avril (Figure 4b et c), les rapports de mélange d'ozone augmentent régulièrement jusqu'à atteindre des concentrations maximales de l'année en troposphère libre au mois d'octobre. Nous noterons sur ces profils que la variabilité est également importante au cours de l'année, notamment en haute troposphère pendant le mois de mars (40 à 70 ppbv d'écart) et dans toute la troposphère pour le mois d'octobre (50-100 ppbv) à partir de 8 km jusqu'à la haute troposphère.

D'autre part, l'étude de ces profils mensuels du rapport de mélange d'ozone met en évidence la présence de transitions rapides vers 2 km, 4 km et 12 km. Ceci suggère l'existence au cours de l'année de processus dynamiques susceptibles de contrôler la variabilité de l'ozone troposphérique. La stratification de la troposphère en couches stables résulte d'inversion thermique et peut s'accompagner en zone tropicale d'une inversion des alizés. Ces inversions peuvent limiter fortement les échanges verticaux et rendre mieux identifiables la dispersion horizontale des précurseurs de l'ozone. En effet la troposphère de l'hémisphère sud à ces latitudes, présente, surtout pendant l'hiver austral, une inversion thermique intense de basse couche vers 2 km en moyenne assurant ainsi pendant cette période un confinement efficace des espèces chimiques dans la couche limite. Ce "piégeage" est rendu inopérant pendant l'été austral où l'activité convective est plus importante et se développe jusqu'à des altitudes élevées voire très élevées (elle peut atteindre la tropopause c'est à dire 17 km). L'inversion d'alizés correspond à une transition du flux synoptique régulier de sud-est en un flux de nord-ouest. Celle-ci est variable en altitude pendant l'année et la latitude. C'est la circulation de Hadley/Walker qui induit cette inversion de la direction zonale du vent et de ce fait contribue fortement à la stratification du profil d'ozone en couches enrichies (Taupin et Bessafi, 1999).

De plus, comme nous l'avons mentionné plus haut, les rejets de combustion de biomasse sur le continent africain et Madagascar pris dans le flux de nord-ouest, après une

injection convective au-dessus de ces zones, pourraient intéresser notre région en terme de contamination de la troposphère et de bilan d'ozone.

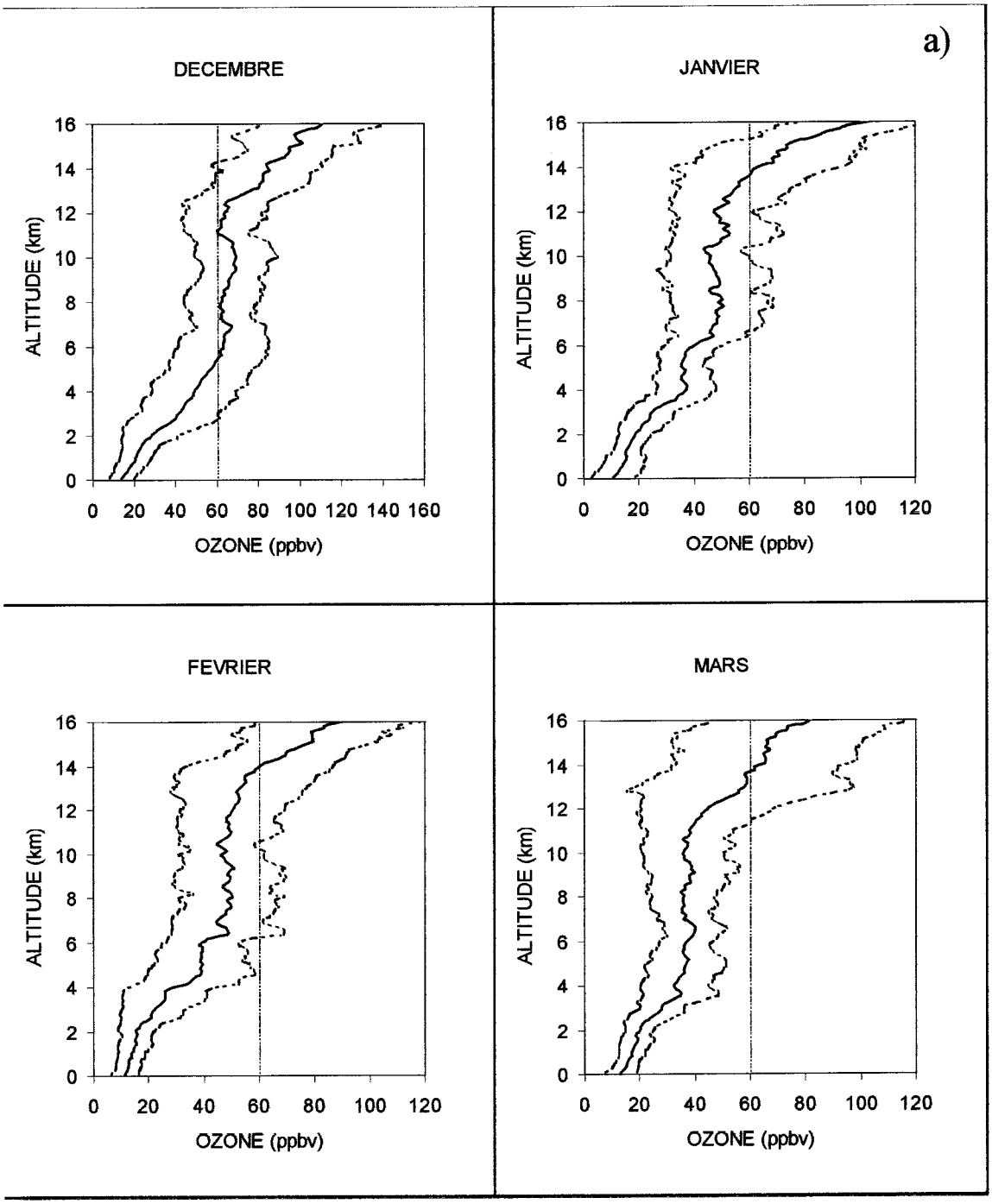

Figure 4: Profils mensuels de la moyenne et de ses écart-types du rapport de mélange d'ozone calculés sur la période 1992-2000.

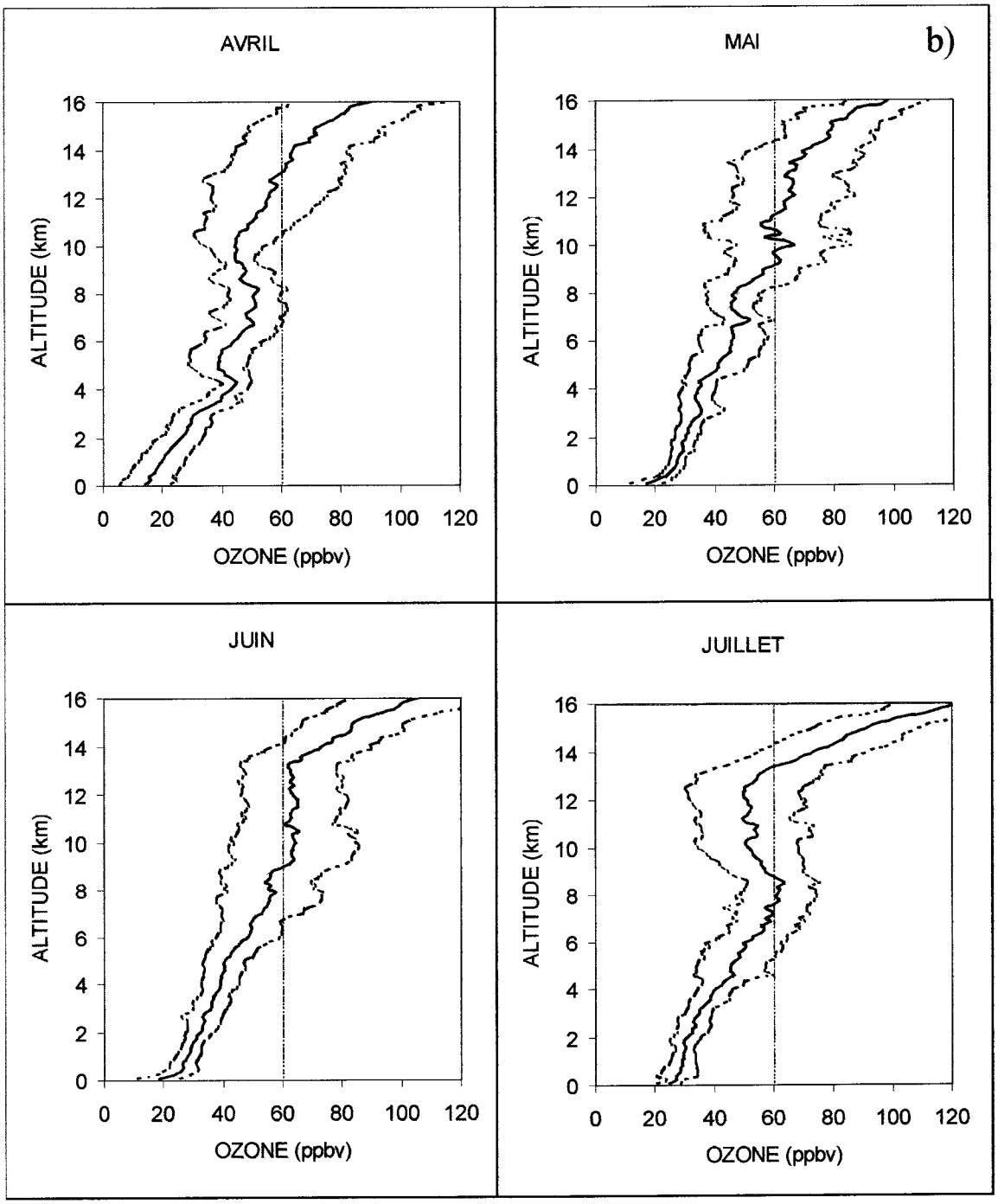

Figure 4: (Suite)

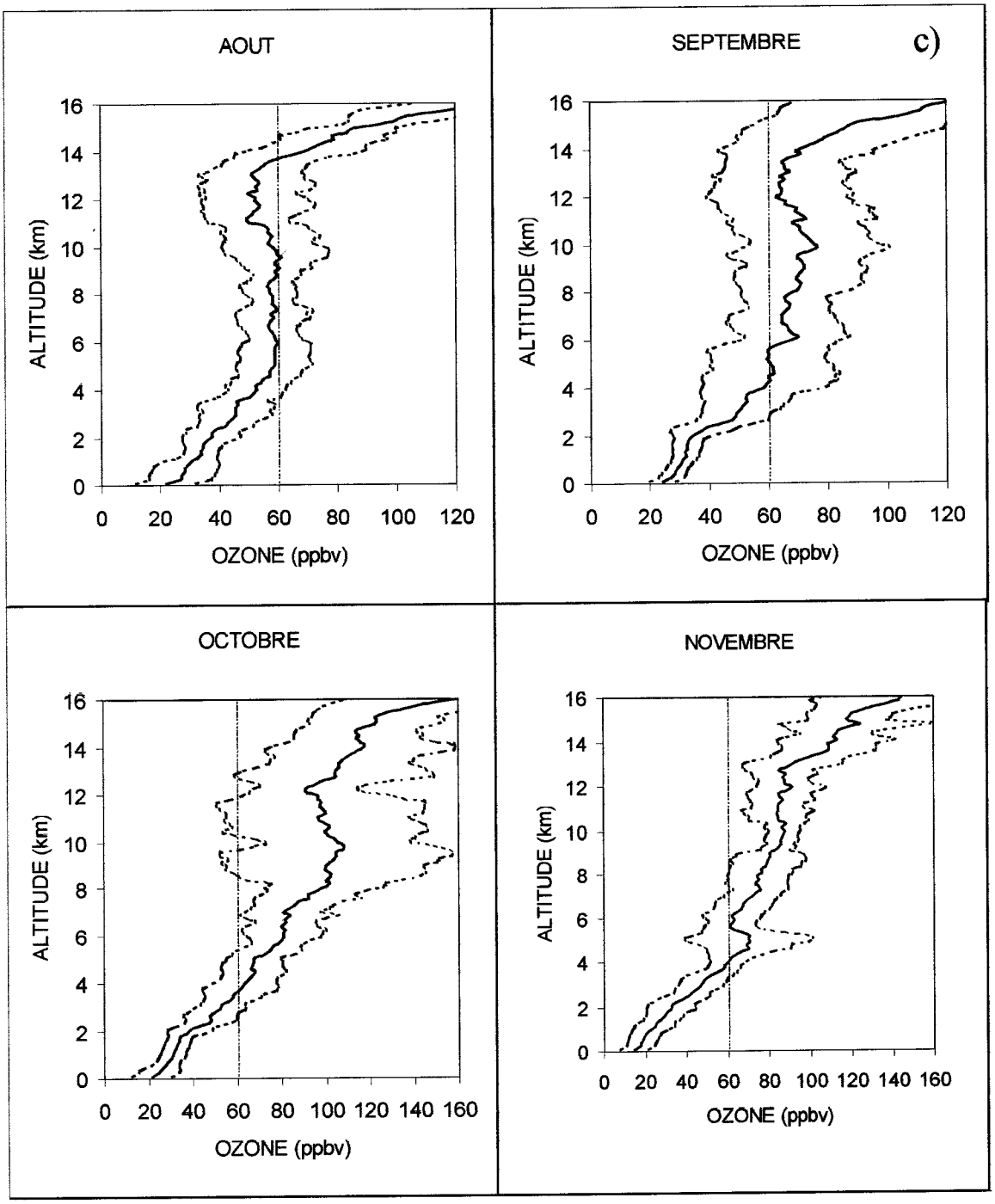

Figure 4: (Suite)

2.2.3 Mesures des Satellites NOAA

L'existence de pratiques de feux de biomasse à proximité de notre site d'observation (Afrique sud/sud-est et Madagascar), l'extension régionale des contaminants issus de ces feux dans la troposphère observée par satellite (Fishman, 1990; Justice, 1996), leur impact potentiel sur le contenu troposphérique et l'installation sur le site de l'université en 1993 d'une station de réception satellitaire de l'Institut de Recherche et de Développement (I.R.D.), nous ont amené tout naturellement à nous rapprocher de cet institut.

C'est donc dans le cadre d'une collaboration avec l'IRD Réunion que nous avons pu accéder aux données NOAA collectées par l'antenne réceptrice de la station SEAS (Surveillance de l'Environnement Assisté par Satellites).

Nous avons entrepris de développer des méthodes de télédétection des pixels chauds considérés comme des feux de végétation, des panaches de fumée et de détection conjointe des épisodes convectifs dans les mêmes zones au-dessus du continent sud-africain et de Madagascar, à partir de ces données de capteurs embarquées (radiomètre AVHRR) des satellites NOAA. Nous avons proposé un sujet de thèse sur cette thématique afin d'apporter un ensemble de réponse objective aux corrélations entre les observations d'épisodes d'augmentation du contenu d'ozone et les pratiques de feux de brousse. Ce travail a permis notamment de venir confirmer l'influence à l'échelle régionale de ces pratiques sur l'ozone troposphérique.

Une méthode multispectrale adaptée à la biogéographie diversifiée des régions citées fut donc mise en œuvre par Tantely Randriambelo, pour avoir des informations objectives sur la signature des feux de biomasse. Ce travail s'est appuyé sur des méthodes développées par d'autres auteurs pour des régions différentes (Amazonie: Kaufman, 1990; Afrique de l'Ouest: Kenedy, 1993; Franca, 1995 et Arino, 1995)

De façon succincte, pour la détection des feux, l'ensemble des canaux de NOAA-AVHRR est exploité avec quelques variantes dans les combinaisons des canaux entre le jour et la nuit. Les pixels feu sont définis à partir des critères suivants :

- Température Brillance Canal3 ≥ Température Brillance Seuil Canal3
- Température Brillance Canal4 ≥ Température Brillance Seuil Canal4
- Température Brillance (Canal3 - Canal4) ≥ Température Brillance Seuil (Canal3 - Canal4)
- 0 ≤ Température Brillance (Canal4 - Canal5) ≤ Température Brillance Seuil (Canal4 - Canal5)
- Réflectance Canal1 ≤ Réflectance Seuil Canal1
- Indice de végétation ≥ Indice Seuil de végétation

avec $\left(\text{Indice de végétation} = \frac{\text{Réflectance(Canal 2 - Canal 1)}}{\text{Réflectance(Canal 2 + Canal 1)}}\right)$

La méthode de télédétection de jour et de nuit peut être résumée par le Tableau 1 ci-dessous. Les valeurs des seuils vont donc dépendre de l'état de la végétation et de la période.

	JOUR		NUIT
	Forêt	Savane	
Température Brillance Canal 3 (°K)	316	320	297
Température Brillance Canal 4 (°K)	280	287	287
Température Brillance (Canal 3 - Canal 4) (°K)	12	15	7
Température Brillance (Canal 4 - Canal 5) (°K)	5	5	2
Réflectance Canal 1 (°K)	11	11	
Indice végétation (%)	3%	1%	

Tableau 1: les différents seuils utilisés pour la télédétection des feux le jour.

La Figure 5 présente une comparaison entre des données de "terrain" sur les feux de végétation à Madagascar et les observations par satellite. On obtient une assez bonne concordance des résultats extraits de notre méthode et des données au sol (Randriambelo et Baldy, 1998).

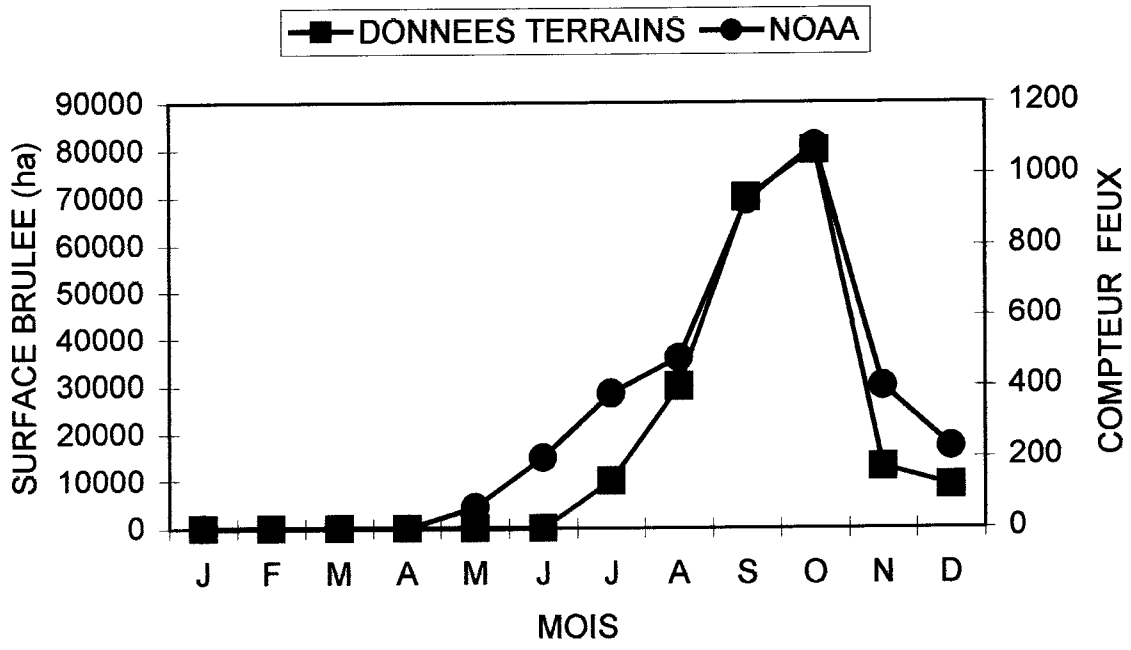

Figure 5: Comparaison entre données "terrains" (surfaces brûlées) et le niveau des compteurs de pixels de détection satellitale de feux pour l'année 1992.

Le caractère saisonnier des pratiques anthropiques de feux de biomasse se confirme également pour d'autre années à Madagascar (Figure 6a) et également sur le continent sud africain (Figure 6b) couvert par l'observation satellitale (Zimbabwe, Malawi, Swaziland, Kenya, Mozambique, Afrique du Sud). En début d'année, les feux de végétation sont faibles voire inexistants. Leur fréquence et leur étendue commencent à augmenter à partir du mois de Mai, pour atteindre un maximum au mois de Septembre (Afrique) et Octobre-Novembre (Madagascar). Pour Madagascar, la période des feux de végétation intensifs pour la partie

Ouest, qui est constituée de savanes, se situe au mois d'Août ou au troisième trimestre; pour la partie est, qui a une couverture constituée essentiellement de forêts, le maximum correspond à la période Octobre à Novembre. Concernant l'Afrique, beaucoup de feux sont observés au Nord du Mozambique au mois d'Août, tandis qu'au mois de Septembre, les feux intenses sont localisés au Sud du Mozambique. Ces périodes d'activité de brûlage de biomasse constituent un forçage anthropique en terme de contamination de l'air troposphérique (Randriambelo et Baldy, 1997; Randriambelo et Bessafi, 1997). De plus, nous avons montré que la convection dans ces régions sources est un facteur fondamental pour redistribuer les rejets de brûlage (particulièrement les précurseurs de l'ozone) en troposphère libre (Randriambelo et Baldy, 1997).

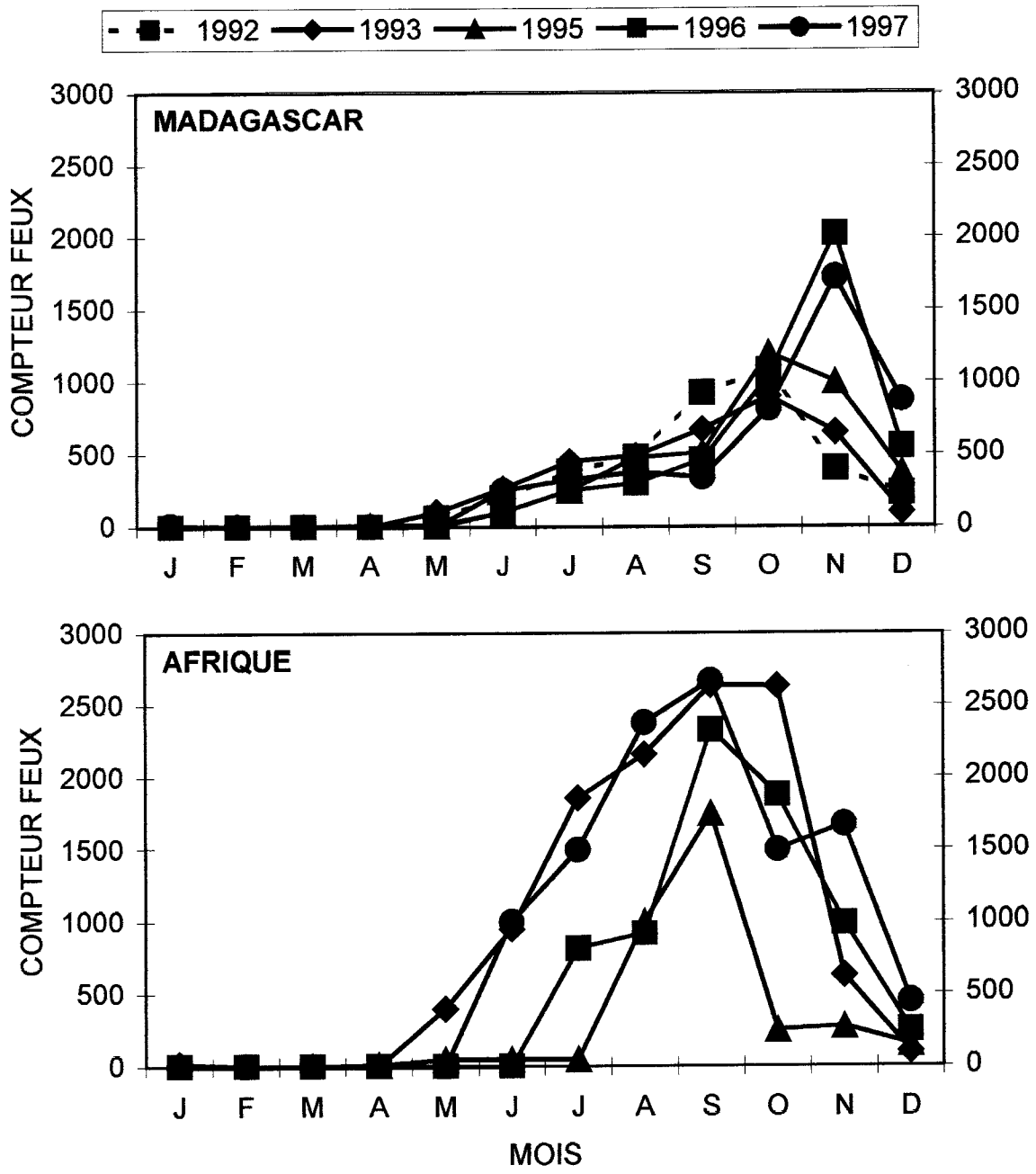

Figure 6: Evolution mensuelle des compteurs de pixels de feux observés sur Madagascar et l'Afrique entre 1992 et 1997.

2.2.4 Prélèvements d'aérosols carbonés

Nous avons montré que, pris dans le flux d'ouest d'altitude, les constituants issus des feux de biomasse (au dessus de la région sud-est de l'Afrique et de Madagascar), après avoir été injecté dans la troposphère libre par la convection, sont susceptibles d'intéresser l'océan indien et de contribuer à l'augmentation des quantités d'ozone observées entre septembre et octobre sur les profils verticaux. Une analyse de rétro-trajectoires a également confirmé l'hypothèse de cette contribution sur le contenu de l'ozone troposphérique pendant cette période. Des études de cas avec analyse trajectographique et de corrélation des profils radiosondages d'ozone entre le site de La Réunion et le site d'Irene (Afrique du Sud) menées conjointement avec le professeur Roseanne Diab (Diab et Bessafi, 1996; Diab et Bessafi, 1998), ont de nouveau montré clairement l'influence des contaminations issues du continent africain sur la concentration d'ozone troposphérique au-dessus de La Réunion pendant les mois de septembre–octobre.

Autour de cette thématique sur la variabilité de l'ozone troposphérique et en continuité avec les travaux déjà développés, nous avons décidé de mettre en place également un réseau de mesures complémentaires sur les aérosols de combustion (avec deux aethalomètres, prélèvements sur filtre, eau de pluie) à La Réunion. C'est ainsi qu'en 1996, nous avons établi en place une collaboration avec le LSCE de Gif/Yvettes (H. Cachier) et conjointement proposé un sujet de thèse sur une étude physico-chimique des aérosols de combustion dans la troposphère libre, la couche limite et l'influence de ces aérosols sur l'ozone.

Compte tenu du fait que ce travail de thèse (développé par Chatrapatty Bughwant) fera l'objet d'une soutenance prochaine, il me semble prématuré de faire état dans ce mémoire des résultats obtenus par ce doctorant. Une partie de ce travail nous a permis de conforter nos précédentes analyses sur la contamination de notre région par des composés issus des feux de brousse en Afrique et à Madagascar.

J'ai assuré avec Chatrapatty Bughwant l'implantation de deux cellules expérimentales de prélèvement sur les sites de Sainte-Rose (site côtier) et de Piton Textor (site d'altitude). Nous avons préalablement procédé à une phase de calibration et de mise en place d'un protocole de mesure des différents appareils.

2.3 Influence de la météorologie

Etudier l'influence régionale des feux de brousse sur l'ozone troposphérique et sa variabilité naturelle dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien, nous a conduit tout naturellement à prendre en compte le contexte météorologique particulier de cette région et en particulier à analyser la structure verticale des vents, de l'hygrométrie et de la température. Pour ce faire nous avons, pour la basse et la moyenne troposphère, analysé les corrélations entre l'ozone et les profils verticaux de température, d'humidité et du vent.

A partir des observations par radiosondage de la pression, la température et l'humidité effectuées sur le site de l'aéroport de Gillot, nous avons établi l'évolution du profil de température potentielle équivalente θ_e ($\theta_e = \theta \exp\left(\frac{Lq}{C_pT}\right)$) représentée sur la Figure 7. Cet

enregistrement de huit ans (1992-2000) apporte des informations intéressantes sur la nature et la structure saisonnière de l'air troposphérique sondée.

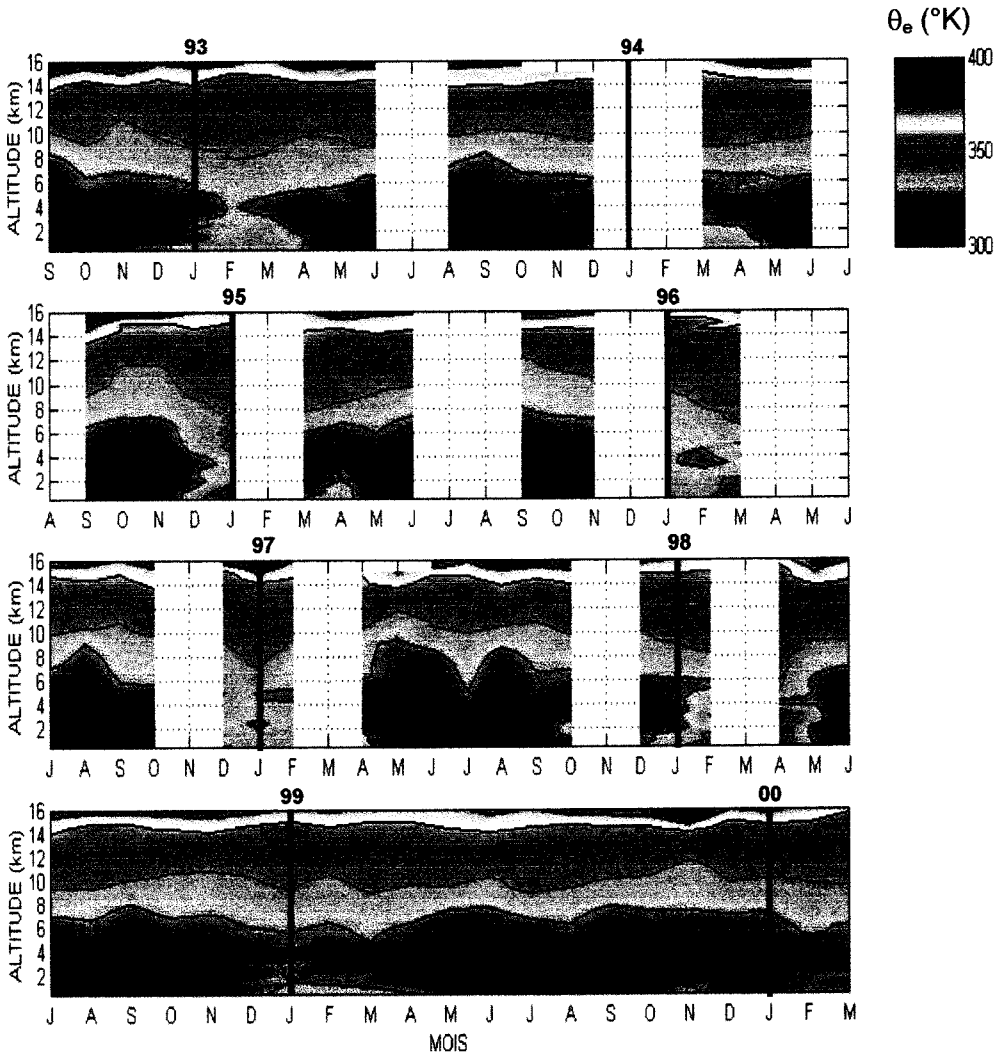

Figure 7: Variation mensuelle du profil vertical de température potentielle observée entre 1992 et 2000 à Gillot.

Ainsi, nous pouvons observer des structures moyennes remarquables en basse couche avec en premier lieu une couche 0-3km potentiellement instable ($\frac{d\theta_e}{dz} \leq 0$) pendant la majeure partie de l'année, une transition marquée vers 4 km séparant deux couches atmosphériques ayant des propriétés hygrométriques et thermodynamiques fondamentalement différentes (masses d'air humide en basses couches opposées à des masses d'air sèches au dessus). Ce "piégeage" de basse couche est quasiment inexistant entre décembre et février en raison du forçage convectif qui tend à réduire les gradients verticaux et "homogénéiser" l'air troposphérique.

Nous avons représenté sur la Figure 8, la fréquence moyenne d'apparition par saison (DJF: décembre-février; MAM: mars-mai; JJA: juin-août; SON: septembre-novembre) de la direction du vent par secteurs angulaires entre 0° et 360° et pour quatre niveaux moyens de pression (900 hPa; 700 hPa; 500 hPa et 300 hPa) pour la période 1991-2000.

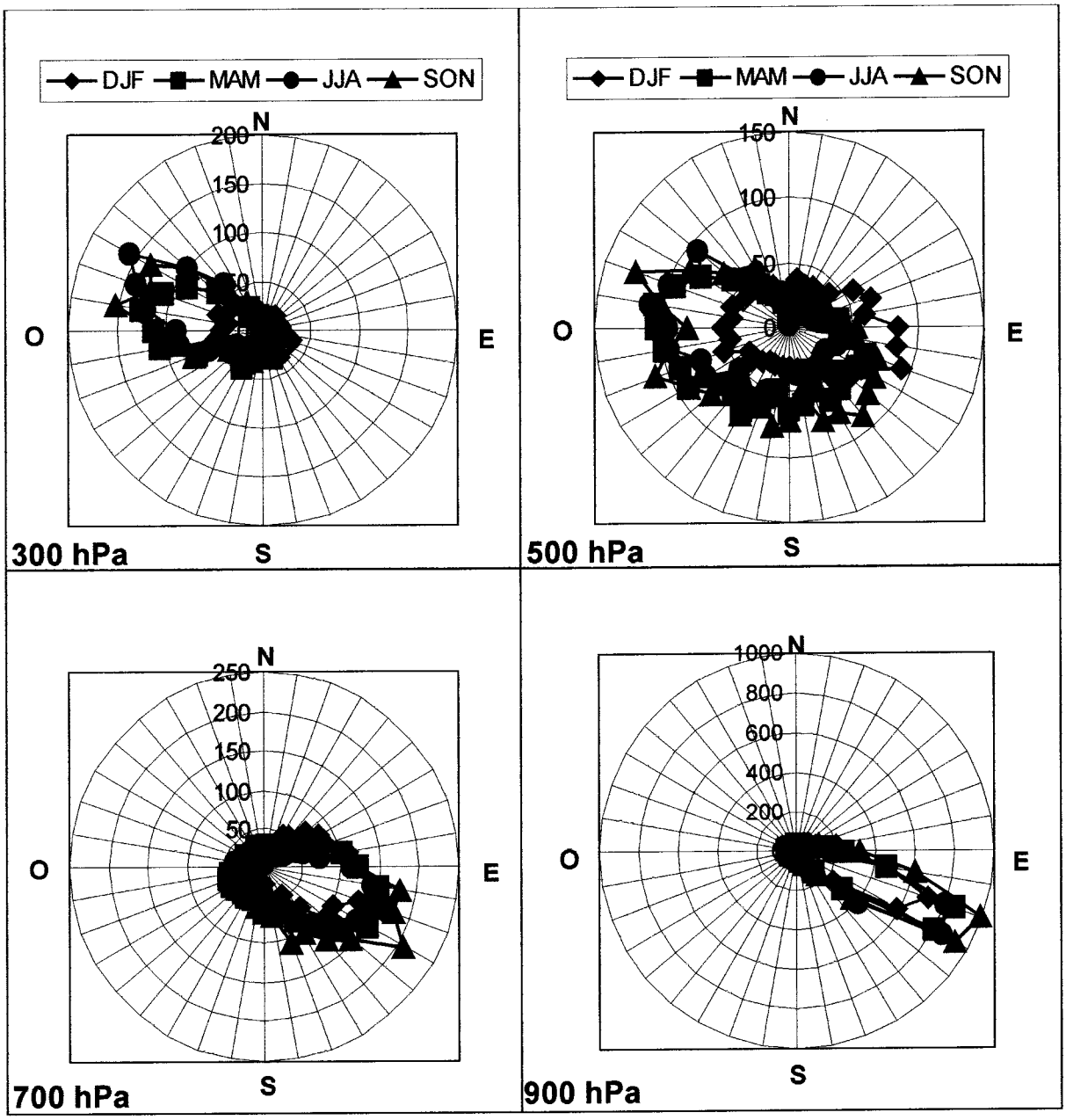

Figure 8: Fréquence moyenne d'apparition de la direction du vent calculée à partir des données de Gillot et de Tromelin pour la période 1991-2000.

Dans les basses couches (900 hPa et 700 hPa), les courants sont majoritairement de secteur sud-est. C'est le régime d'alizé. On peut observer qu'au niveau directement supérieur (500 hPa), les directions prises en moyenne par le vent, bien que différentes suivant les saisons, couvrent un secteur angulaire important allant de l'est vers l'ouest. Ce niveau correspond à un niveau intermédiaire de l'atmosphère. Enfin pour le dernier niveau 300 hPa, les courants sont de secteur nord-ouest excepté pour la période allant de décembre à février où il est difficile d'identifier un secteur dominant. Cette indétermination correspond à la période d'été austral où l'ITCZ est dans sa position la plus au Sud accompagné d'une activité convective importante.

La Figure 9 permet de compléter notre analyse par une illustration de l'évolution de la moyenne mensuelle (moyenne calculée sur la période 1991-2000 à partir des stations de Gillot et Tromelin) de la structure verticale de la composante zonale du vent. Nous y avons ajouté la position des inversions significatives de température potentielle équivalente θ_e. Cette figure confirme d'une part, la variabilité de l'altitude moyenne d'inversion des alizés et d'autre part, la présence de structures stables vers 2 km et 4 km. Ces niveaux d'inversion augmentent en nombre vers septembre-octobre et il y a une correspondance entre ces couches stables, enrichies en ozone, et le transport horizontal de moyenne et grande échelle.

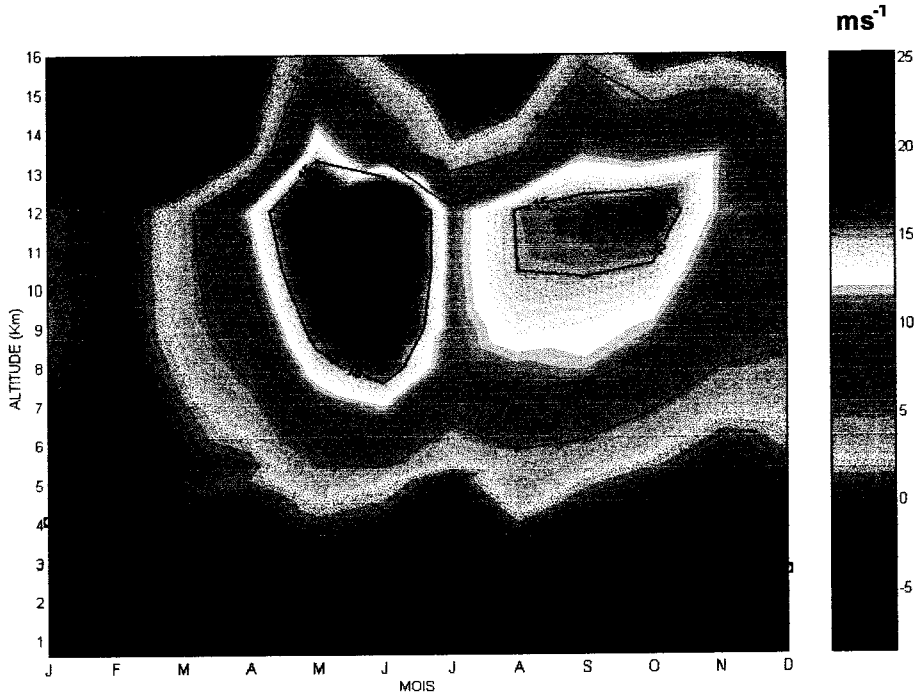

Figure 9: Evolution moyenne mensuelle de la composante zonale du vent observée sur les stations de Gillot et Tromelin (1991-2000) entre 0 et 16 km.

Notons également à 12 km une zone de vitesse de vent zonal très forte (25 m/s) qui met en évidence la présence du Jet Stream d'ouest au plus prés de la Réunion pendant l'hiver. La présence de ce jet d'altitude modifie notablement l'altitude d'inversion des alizés pour atteindre 2.5 km environ pendant l'hiver. Pendant l'été, la composante zonale très faible traduit le relâchement des alizés.

Dans l'immédiat, nous allons illustrer la corrélation entre inversions et échanges verticaux avec les profils d'humidité relative. L'humidité relative, qui peut être un bon traceur de la convection profonde, doit être également étudiée en raison de ses relations chimiques complexes avec l'ozone. Nous avons représenté l'évolution du profil d'humidité relative mensuelle moyenne (Figure 10) de façon à pouvoir compléter nos observations précédentes. La troposphère prise entre 0 et 16 km, présente un gradient important d'humidité vers 2-2.5 km qui marque la séparation entre une basse couche où le taux d'humidité relative atteint 70% et les couches supérieures où l'humidité varie fortement suivant la période de l'année.

Pendant les mois de décembre à mars, la troposphère est caractérisée par des valeurs élevées d'humidité relative jusqu'à 10 km (plus de 40%). Cette observation confirme la présence d'une convection profonde qui transporte la vapeur d'eau et ventile les produits de la

couche limite dans toute la troposphère dans un contexte de stabilité verticale des basses couches faible. Cette convection était fortement corrélée à la position de la branche ascendante de la cellule de Hadley pendant cette période, et donc de l'I.T.C.Z.

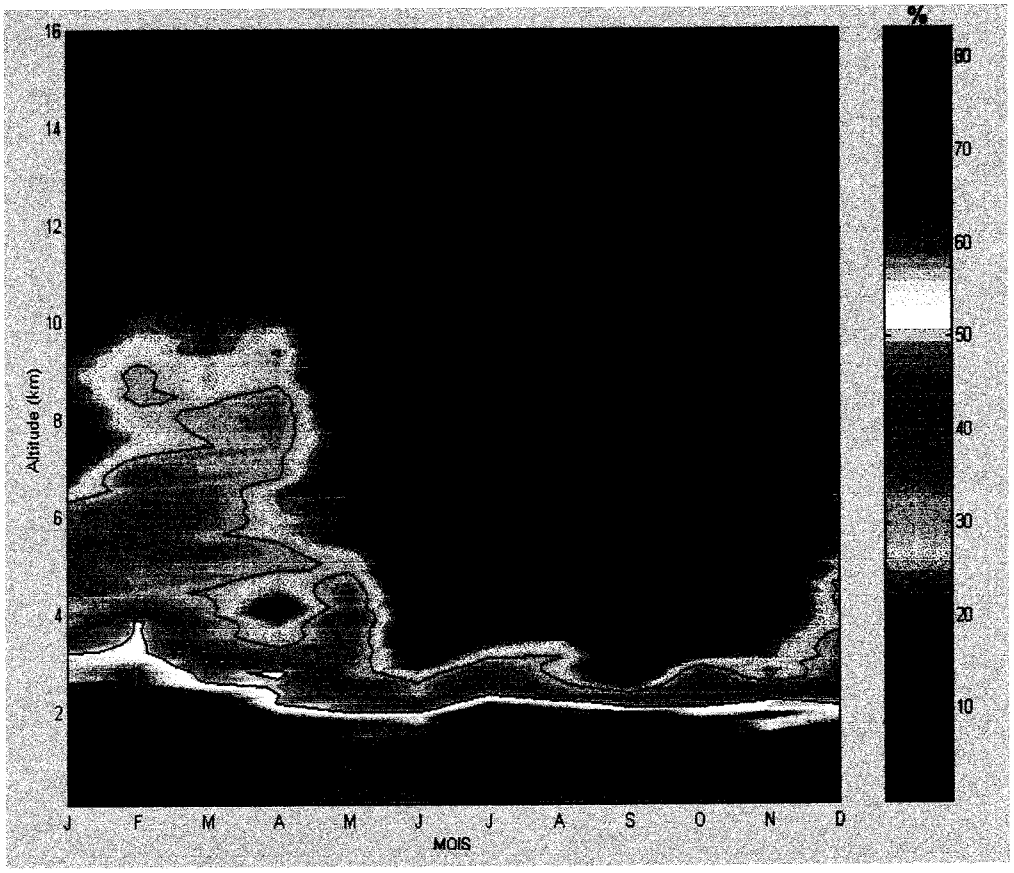

Figure 10: Evolution mensuelle de l'humidité relative entre 0 et 16 km pour la période 1992-2000.

Pendant la période de juin à octobre, l'humidité relative subit une décroissance brutale à partir du niveau de 2,5 km, ce qui confirme qu'au-delà de cette altitude nous avons une atmosphère quasiment sèche (moins de 10%). Cet assèchement brutal de la troposphère coïncide avec la présence de l'inversion d'alizés et son intensité est maximale pendant cette période.

2.4 Influence régionale du courant jet subtropical

Certains éléments de la climatologie de l'ozone présenté au début de ce mémoire ont suggéré la coexistence avec les contaminations anthropiques d'une source d'altitude vraisemblablement dynamique pour l'ozone troposphérique. Nous avons, pour ce dernier point également, entrepris d'engager une étude sur les mécanismes dynamiques de type foliations de tropopause, pouvant être générés par le courant jet subtropical, sur le bilan d'ozone troposphérique des tropiques Sud.

La question était de savoir si les mécanismes de foliation de tropopause au niveau des tropiques sont similaires ou proches de ceux élaborés pour le courant jet polaire de l'hémisphère Nord. Le renforcement en basse couche des alizés et du vent d'ouest d'altitude

pouvaient à priori constituer des contraintes dynamiques importantes et imposer des réajustements de l'atmosphère par des circulations agéostrophiques susceptibles de favoriser des déformations de la tropopause accompagnées éventuellement d'injections effectives d'air stratosphérique dans la troposphère.

Historiquement, j'ai initié en 1995 cette étude dans le cadre d'un travail de DEA (qui a donné lieu par la suite à un travail de thèse). Je ne présenterais ici que l'étude préliminaire dans laquelle je me suis investi plus explicitement et notamment le cas d'un épisode de foliation subtropicale le 10 août 1993 entre l'île de La Réunion et de Madagascar. Je compléterai cette présentation par une étude complémentaire qui a été développée ultérieurement dans le cadre d'un travail de thèse (Baray, 1999). Cette dernière étude détaille le cas de l'intrusion d'air stratosphérique du 1er octobre 1993 qui confirme les premiers résultats obtenus et la pertinence de notre approche.

L'analyse des champs de tourbillon potentiel sur la surface isentrope 330 K (valeur représentative de la haute troposphère tropicale) issus des analyses du CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme) sur la période du 9 au 12 août (Figure 11) indique clairement que: d'une part la Réunion se trouve à proximité de la barrière subtropicale, dont le bord forme une ondulation synoptique se propageant d'ouest en est, et d'autre part, l'existence à ces latitudes basses de valeurs de tourbillon potentiel supérieures à 2 PVu qui correspondent à un air d'origine stratosphérique.

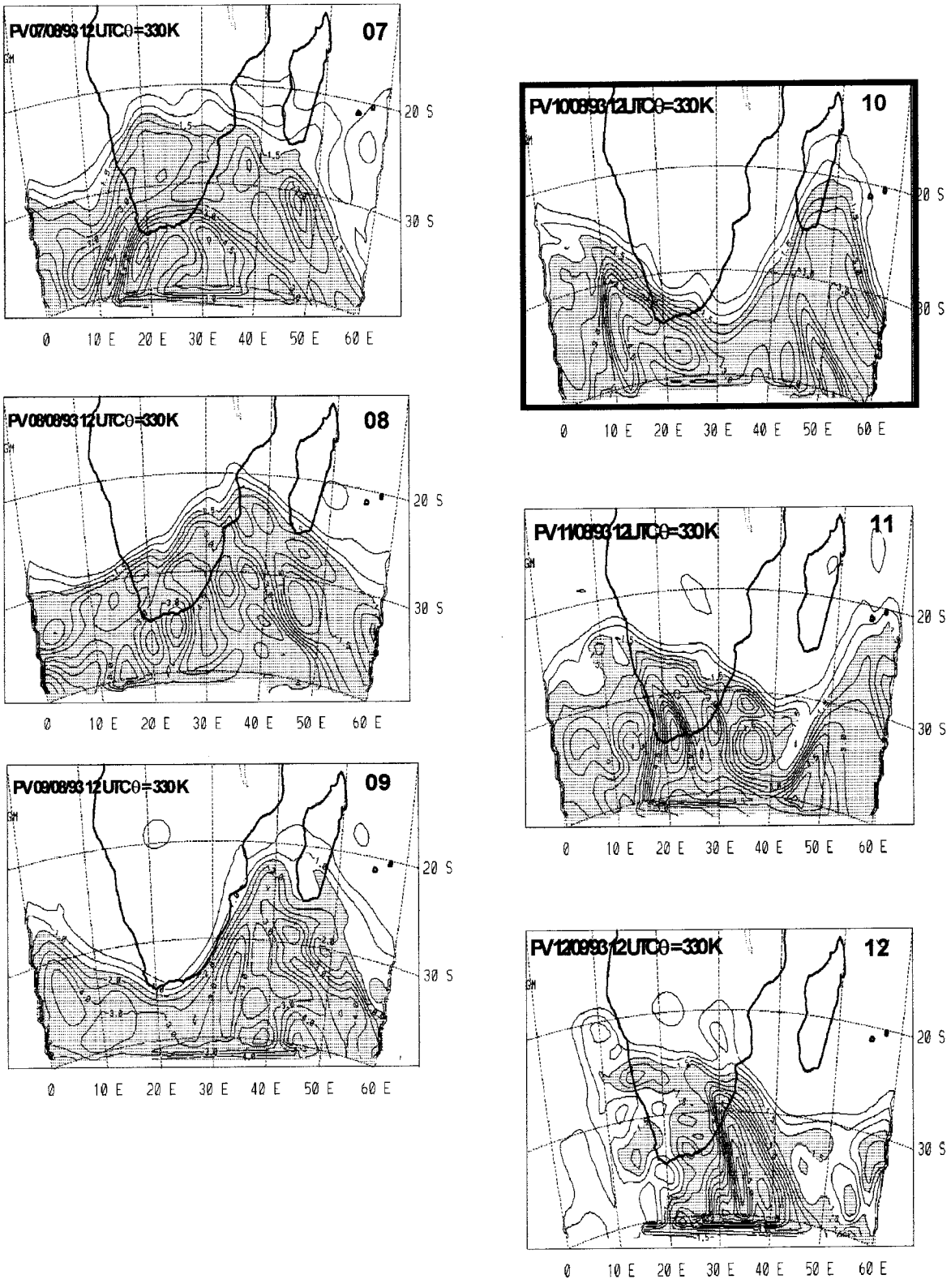

Figure 11: Anomalie de tourbillon potentiel sur la surface isentrope 330 K, du 7 au 12 août 1993. Les valeurs supérieures à 1.5 PVu ont été grisées.

Le champ de vent sur la surface isobare 300 hPa pour le 10 août présente sur la Figure 12 permet de visualiser la structure du courant-jet se développant dans la structure ondulatoire de la barrière subtropicale.

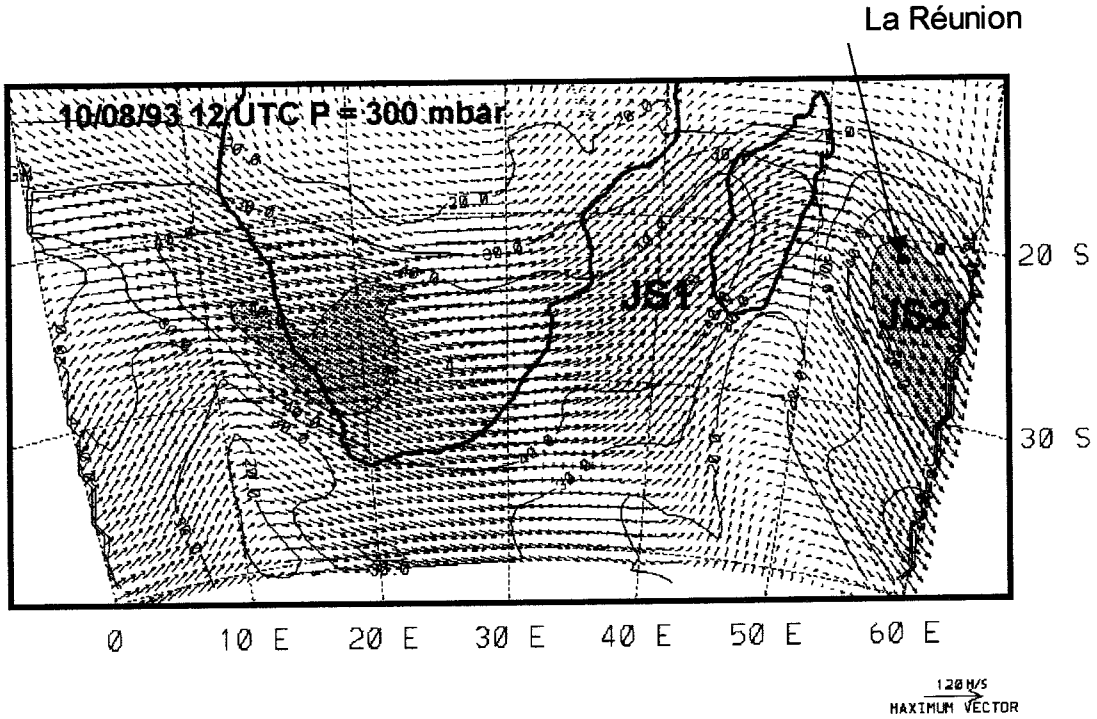

Figure 12: Champ de vent horizontal et isotachs sur la surface isobare 300 hPa.

Deux jets apparaissent, l'un autour de 40°E/25°S (JS1) et l'autre autour de 55°E/25°S. La force du vent au sein de ces deux structures est relativement élevée puisque nous y rencontrons respectivement des vitesses de 50 m/s et 60 m/s. La sortie du premier jet et l'entrée du second intéresse directement La Réunion, laquelle est située sur la face cyclonique de l'onde.

Le calcul de rétrotrajectoires (Figure 13)confirme l'origine stratosphérique de la masse d'air, ainsi que des transports dans le plan horizontal depuis le réservoir stratosphérique des latitudes moyennes. On peut remarquer que la masse d'air repérée au centre de l'anomalie le 10 août à 18 heures au niveau 350 hPa/325 K/ 2 PVu était repérée au sud de l'Afrique du Sud au niveau 250 hPa/330K/3 PVu. Les calculs de tourbillon potentiel (TP) le long de la trajectoire indiquent une décroissance du TP au cours de la subsidence sur un niveau isentropique quasi constant (entre 325 et 330 K), qui pourrait être expliquée par des mécanismes dissipatifs irréversibles (érosion, mélange turbulent,...).

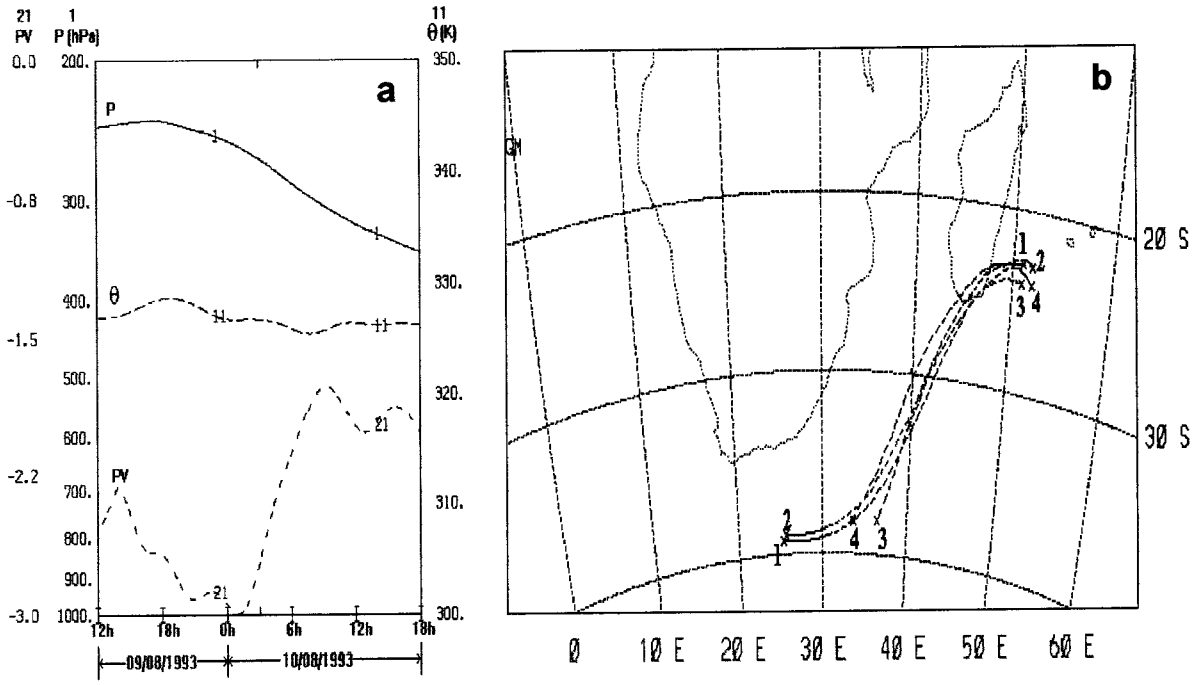

Figure 13: (a): Evolution temporelle du niveau de pression, de la température potentielle et de TP le long de la trajectoire 1. (b): Rétrotrajectoires calculées à partir du centre de l'anomalie de TP le 10/08/93. *Les pressions de début et de fin trajectoire le long du faisceau de quatre trajectoires sont respectivement (1) 242/350 hPa, (2) 241/350 hPa, (3) 278/400 hPa, (4) 267/400 hPa.*

L'influence de la présence de deux jets d'altitude (JS1, JS2) ancrés dans une onde synoptique à proximité de la barrière subtropicale aux basses latitudes avec des fortes valeurs de TP touche également les couches inférieures de la troposphérique libre. En effet, la Figure 14 montre une coupe méridienne de l'anomalie de TP au niveau de la courbure entre les deux jets JS1 et JS2. La déformation de la tropopause est très marquée et affecte le niveau 400 hPa (8 km) qui doit être comparé à l'altitude standard de la tropopause tropicale située vers 100 hPa. La différence des espacements des surfaces isentropes entre le coté cyclonique et le coté anticyclonique est caractéristique des différences entre les masses d'air de part et d'autre du courant jet.

L'impact dynamique, dans ce cas du 10 août 1993, induit par les effets de courbure liés à la structure ondulatoire synoptique d'altitude, l'ensemble des mécanismes agéostrophiques d'une part les circulations longitudinales liées à la courbure, et des circulations transverses combinées des deux jets JS1 et JS2 d'autre part, constituent des facteurs favorables à une contamination de la haute troposphère par un air stratosphérique riche en ozone.

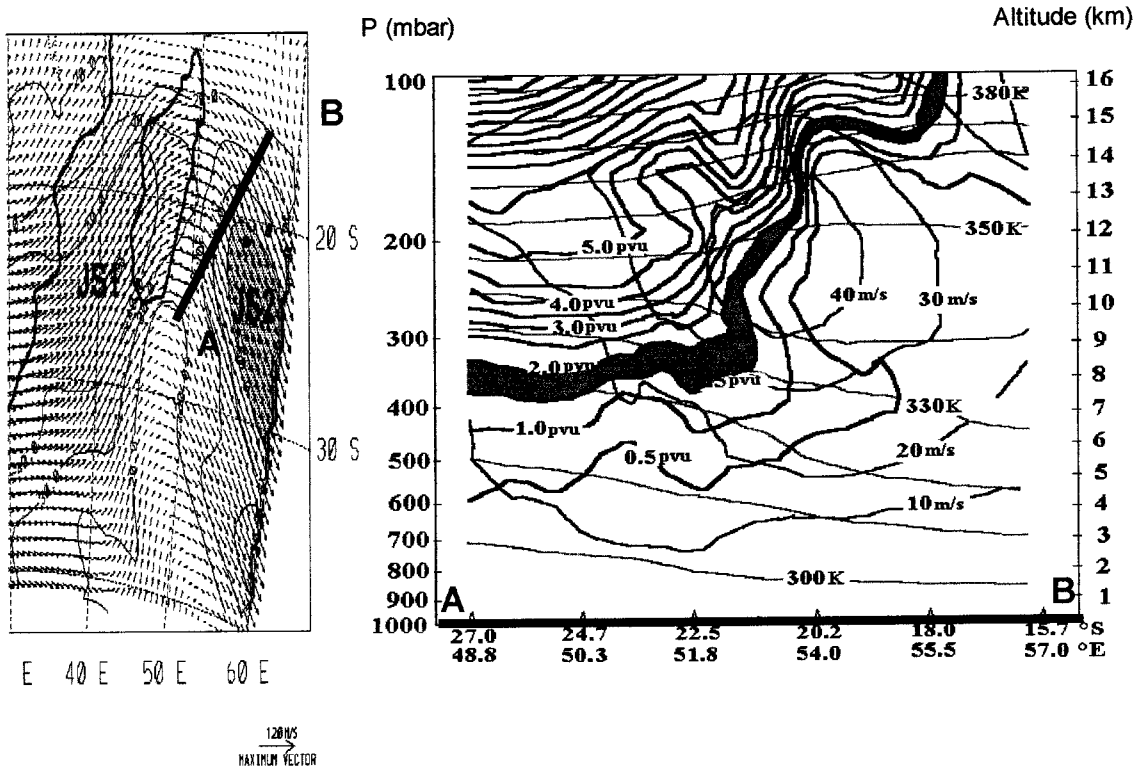

Figure 14: Coupe verticale transverse suivant la trace AB entre les deux jets JS1 et JS2 le 10/08/93 a 18 UTC. Les contours de TP sont en lignes continues, les contours isotachs sont en tiretés, et les contours de température potentielle sont en pointillés.

La Figure 15 présente le champ du contenu intégré d'ozone total mesuré par le spectromètre TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). L'utilisation de ce champ dans l'analyse de l'impact du courant-jet subtropical sur le bilan de l'ozone troposphérique doit être considérée avec prudence. L'anomalie d'ozone total est lié pour les tropiques à la variation troposphérique (Baldy, 1996), et dépend de la hauteur de la tropopause. Le champ d'ozone total le 10 août 1993 présente une zone de transition entre des valeurs d'ozone importantes caractéristiques des régions en moyenne latitude, et les faibles valeurs caractéristiques des régions tropicales. Prés de La Réunion, on peut observer un maximum local d'ozone (290 DU) entre les îles de La Réunion et de Madagascar localisé donc à l'endroit de l'anomalie de tourbillon potentiel présentée précédemment. La contribution à l'ozone troposphérique d'environ 20 DU, comparativement aux valeurs de 270 DU autour de ce maximum local, pourrait résulter de ce processus de foliation.

Bien que nous ne disposons pas de radiosondage PTU-O_3 pour cette date, on peut toutefois affirmer au regard du champ d'ozone total qu'il y a une forte concordance entre l'existence de ce maximum local d'ozone et la déformation de la tropopause induite par les deux courants jets JS1, JS2.

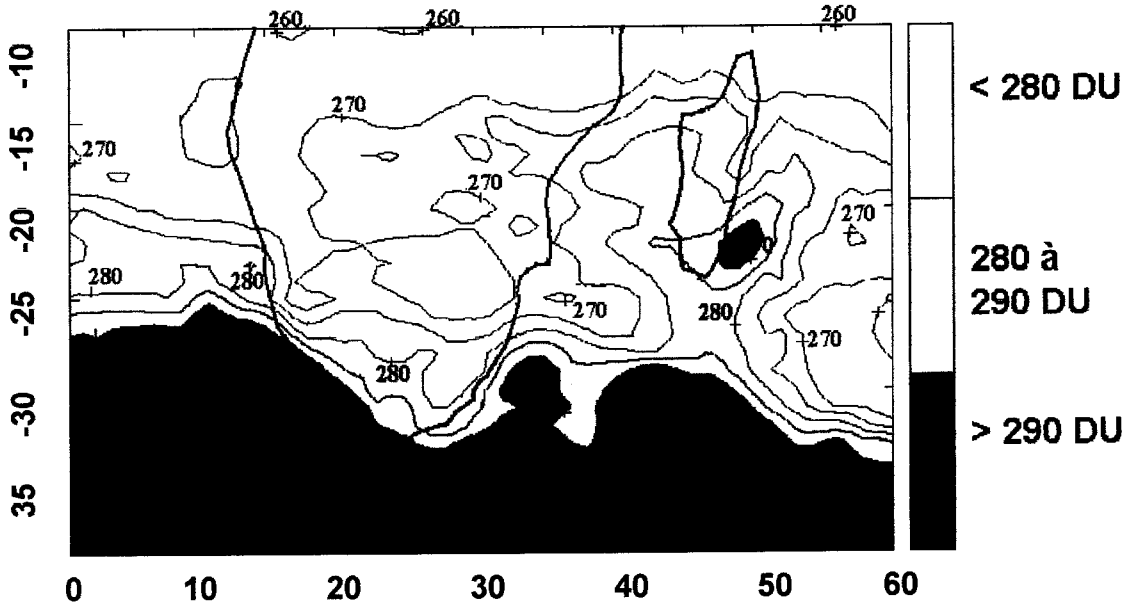

Figure 15: Distribution de la quantité d'ozone total mesurée le 10 août 1993 par le spectromètre TOMS. Les valeurs sont en Dobson, les régions dont le contenu intégré est supérieur à 280 DU ont été grisées.

Nous proposons de compléter cette analyse par l'étude d'un autre cas de foliation subtropicale survenue le 1er octobre 1996, lequel semble confirmer l'observation faite d'un maximum principal sur la moyenne d'ozone dans la couche 300 hPa (Cf. Figure 3). En effet sur la Figure 16, présentant les profils de radiosondage effectué à cette date montre une couche très enrichie en ozone entre 10 et 12 km avec des valeurs supérieures à 180 ppbv. Cet enrichissement est d'autant plus significatif qu'il excède de 80 ppbv la moyenne climatologique des profils d'ozone issue du calcul des profils d'ozone des mois d'octobre pendant la période 1992-2000.

De plus cette anomalie positive d'ozone est un événement inhabituel puisque l'écart type moyen d'ozone de la couche 10-12 km calculé pour toutes les mesures effectuées au mois d'octobre entre 1992 et 2000 est de 40 ppbv. L'hypothèse d'une contamination d'ozone de la haute troposphère via un processus de type échange troposphère-stratosphère est tout à fait envisageable car la couche enrichie d'ozone est également très sèche et stable comme le montre le profil d'humidité et de gradient vertical de température potentielle équivalente. Pour ce dernier, on peut remarquer une forte stratification en basse couche vers 3 km et une autre moindre mais significative entre 10 et 12 km.

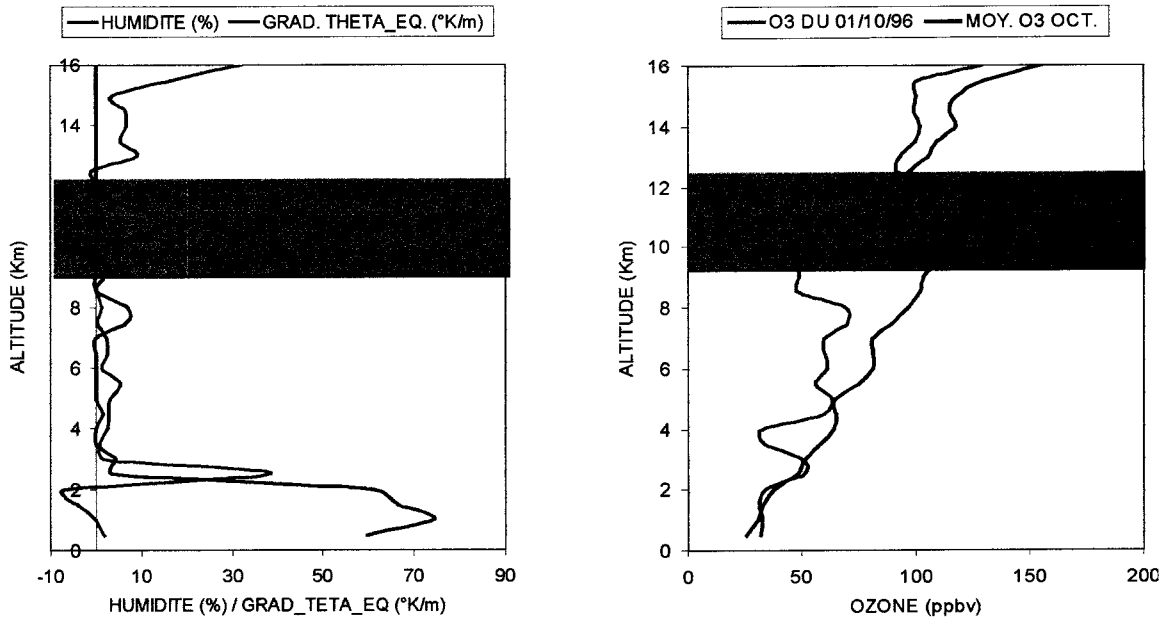

Figure 16: Profils verticaux d'humidité, de gradient vertical de température potentielle équivalente et d'ozone issus du radiosondage du 1er octobre 1996. *Sur le profil d'ozone est superposé un profil climatologique d'ozone calculé à partir des radiosondages effectués au mois d'octobre entre 1992 et 2000.*

La situation météorologique de ce cas d'étude présentée sur la Figure 17 montre qu'il existe certains points communs avec le cas précédent du 10 août 1993 avec des nuances sur la nature et l'importance des forçages d'altitude.

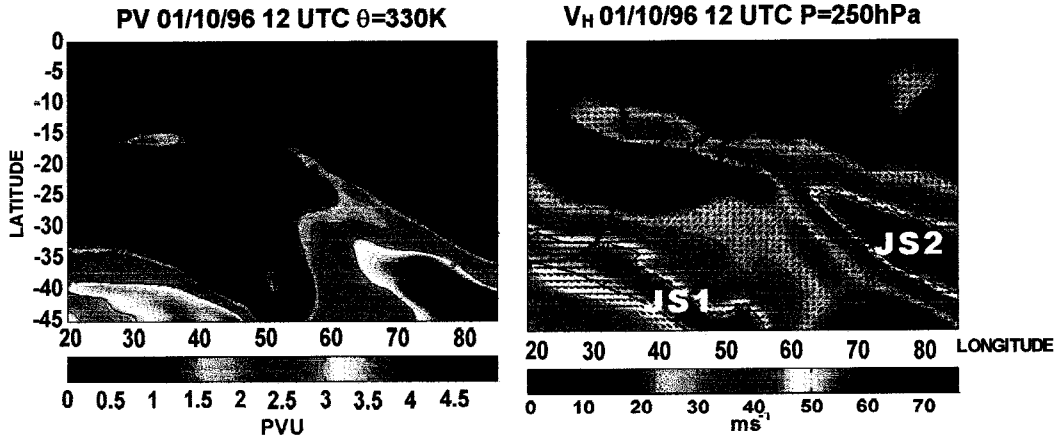

Figure 17: Champ de tourbillon potentiel sur la surface isentrope 330 K et de vent horizontal à 250 hPa pour le 1er octobre 1996 à 12 UTC.

L'anomalie de tourbillon potentiel localisée au-dessus de La Réunion correspond à une anomalie accompagnée au niveau vent d'un couple de courant-jets noté JS1 et JS2 dont les noyaux sont localisés respectivement vers 40°S-45°E et 35°S-80°E. La corrélation entre la structure verticale d'ozone observée à cette date par radiosondage et le tourbillon potentiel est très forte, comme le montre l'évolution temporelle du profil de tourbillon potentiel et la coupe méridienne à la longitude de la Réunion (cad 55°E) sur la Figure 18.

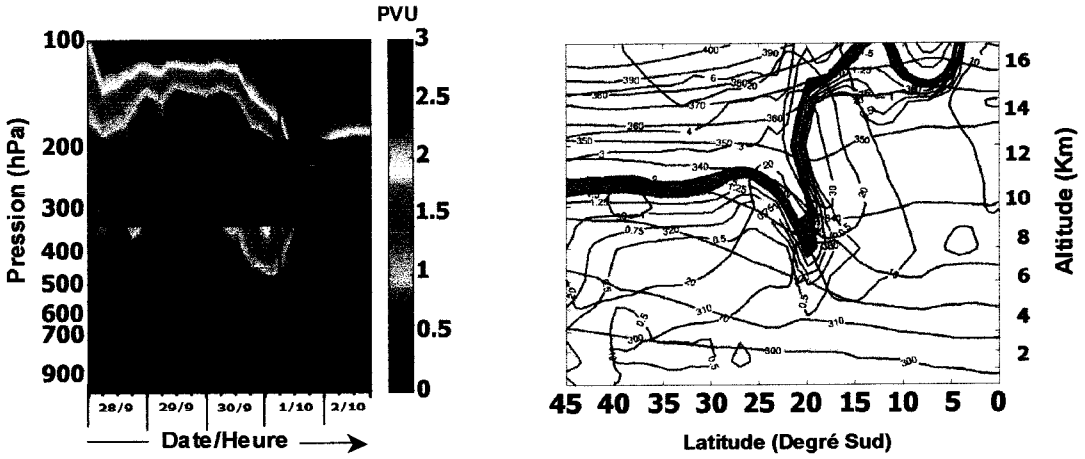

Figure 18: Evolution temporelle du tourbillon potentiel (à gauche) au-dessus du site de la réunion (la ligne verticale noire indique la date du lâcher de ballon de radiosondage: 1er octobre 1996 6 UTC). *La bande ombrée violette indique la bande d'altitude où le pic d'ozone a été observé sur le profil de radiosondage. A droite, il s'agit d'une coupe verticale transverse méridienne du tourbillon potentiel (lignes continues, l'intervalle [1,5–2] PVU est en ombré violet), du vent horizontal (traits bleus) et de la température potentielle (traits verts).*

2.5 Modulation par les oscillations intra-saisonnières de Madden-Julian

L'étude sur la variabilité de l'ozone troposphérique dans notre région, a conduit, comme on vient de le voir, à soulever un certain nombre de questions relatives aux processus pouvant influencer la distribution troposphérique de ce constituant. C'est en 1999 que j'ai voulu étendre cette analyse à l'étude de l'influence des oscillations intra-saisonnières sur l'ozone troposphérique. Pourquoi étudier l'influence de ces ondes en particulier?

Nous venons de voir que les dispositions météorologiques particulières de notre région pouvait au travers de certains facteurs (chimiques, dynamiques) influencer la distribution de l'ozone. Il s'avère que l'atmosphère tropicale, comme l'atmosphère en général, a sa propre variabilité qui se manifeste sous différentes formes et notamment par des mouvements ondulatoires. Dans notre région tropicale, les oscillations intra et inter saisonnières contrôle en partie les rythmes atmosphériques. De plus, en 1999 nous disposions d'une base de donnée de radiosondages pertinente pour aborder une étude sur les oscillations intra-saisonnières au travers d'un traceur tel que l'ozone.

Rappelons brièvement que ces oscillations sont bien connues et documentées ((Madden and Julian, 1972; Murakami, 1985; Weickmann, 1985; Knutson, 1986) sur leurs activités et propriétés spatio-temporelles. Elles se traduisent sur les paramètres météorologiques par des ondulations dans une gamme de période s'échelonnant de 30 à 60 jours. Ce signal est typiquement une onde 1 relativement bien confinée dans la bande équatoriale, de type ondes de Kelvin (Yasunari, 1979; Madden and Julian, 1993) et se propageant d'ouest en est avec une composante également méridienne dans le bassin Océan Indien (Yasunari, 1980; Lau and Chan, 1986). On soupçonne que ces ondes participent au déclenchement des processus de type mousson (Sikka, 1980; Murakami, 1985) voire sont des précurseurs d'épisode de coupe de vent d'ouest dans le phénomène El-Nino (Lau, 1988).

Pour notre étude, nous avons donc procédé à une analyse spectrale préliminaire sur un ensemble de séries temporelles (pression 78-94, pluie 78-94, vents 91 & 94-95 observés sur le site de Gillot, et du contenu intégré d'ozone issu du satellite TOMS 78-94 et du spectromètre SAOZ 93-96) montre l'existence d'une signature de type MJO. A titre d'exemple, la Figure 19, présentant la pression quotidienne relevée sur le site de Gillot entre 1978 et 1994 et le spectre de ce signal, illustre clairement l'existence de deux modes dans la gamme 30-60 jours et d'une composante semi-annuelle.

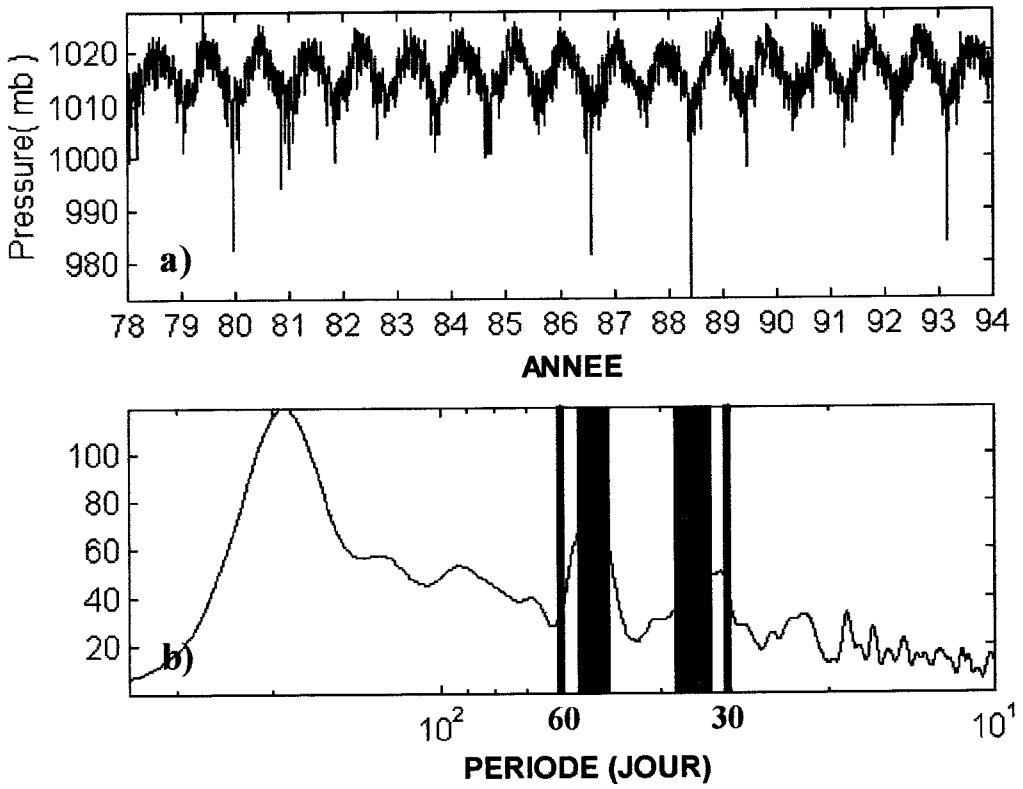

Figure 19: (a) Relevé quotidien de la pression sur le site de Gillot pendant le période 1978-1994. (b) Spectre correspondant à la densité de puissance du signal temporel dont la composante annuelle a été soustraite.

A la suite de ce constat, j'ai poursuivi ce travail en étudiant cette fois-ci les profils d'ozone obtenus par radiosondage des sites de la Réunion et d'Irene (site d'Afrique du Sud). L'échantillon de La Réunion porte sur l'ensemble des radiosondages effectués pendant la période 1992-1999. Pour la station d'Irene, l'échantillon est plus restreint puisque je ne

disposais que de mesures hebdomadaires couvrant la période 1990-1993. La Figure 20 donne un aperçu de l'évolution du contenu d'ozone dans la troposphère au cours de l'année. Les deux sites montrent des similitudes sur la variabilité intra saisonnière .

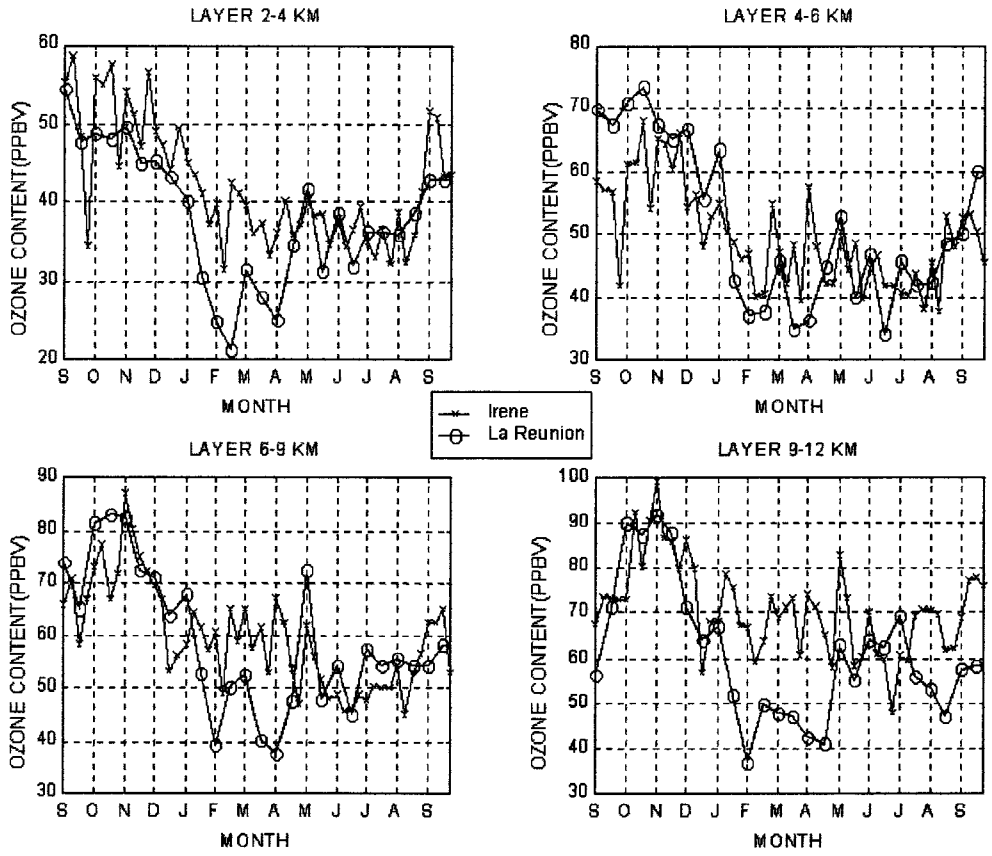

Figure 20: Moyenne du contenu d'ozone par couche sur les sites de La Réunion et d'Irene. *Pour Irene, il s'agit de la moyenne hebdomadaire calculeé sur la période 90-93 et pour La Réunion, la moyenne bi-mensuelle calculée sur l'ensemble des radiosondages effectué entre 1992 et 1999.*

La Figure 21 illustre les modes observables dans la bande de période 30-60 jours sur les deux stations de La Réunion et d'Irene suivant quatre niveaux moyens. On constate que ce signal intra-saisonnier est relativement bien observé et concerne l'ensemble de la troposphère. Cette modulation de l'ozone troposphérique par les oscillations intra-saisonnières a été également observé par une analyse en ondelettes (Bessafi, 2000). Cette étude tend à confirmer l'existence d'une modulation de l'ozone troposphérique par les oscillations de 30-60 jours.

REUNION IRENE

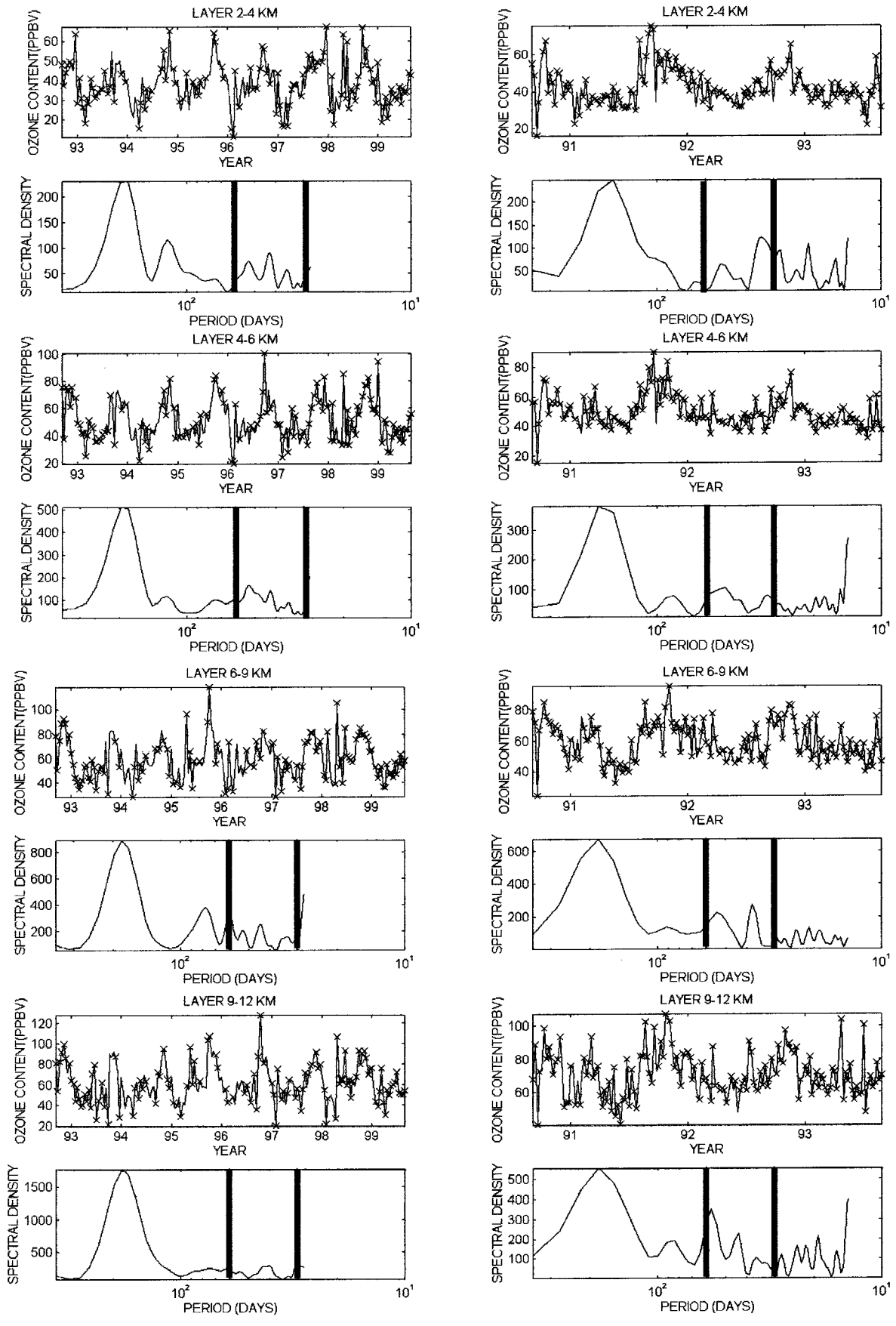

Figure 21: Relevé temporel et spectre correspondant de l'ozone suivant quatre couches pour les sites de La Réunion et d'Irene.

2.6 Conclusion

En résumé, à partir de l'étude de la quantité troposphérique intégrée et des profils d'ozone, nous avons mis en évidence deux altitudes, environ 2 et 4 km, pour lesquelles l'ozone enregistre une forte augmentation liée en grande partie à une dispersion de produits issus de feux de biomasse africains et malgaches. L'étude des profils de température potentielle équivalente nous a permis d'associer à ce phénomène, la présence de couches ayant des propriétés hygrométriques et thermodynamiques remarquables. L'extension de notre analyse aux paramètres vents et humidité a montré que ces deux inversions sont associées à une interaction d'échelles, entre un processus stabilisateur de grande échelle entretenu par la subsidence (inversion des alizés) et des processus méso-échelles mettant en jeu des réservoirs d'énergie convective potentiellement disponible (limitation verticale des développements nuageux). Nous avons conclu que l'enrichissement en ozone pouvait se faire selon deux voies sensiblement différentes d'une part, via le transport direct de l'ozone produit sur la zone de feux, depuis le continent africain vers l'Océan Indien et d'autre part, via le transport des précurseurs d'ozone depuis les zones de brûlage vers l'Océan Indien associé à une production d'ozone au cours du transport vers le site de la Réunion. Cette dernière question a fait l'objet d'une modélisation, proposée par une autre équipe de notre laboratoire, couplant le transport horizontal et la chimie de l'ozone. Cette modélisation propose une simulation du transport et de la chimie de l'ozone, et à partir de ses précurseurs, depuis le continent africain jusqu'à l'Océan Indien. Les spécificités météorologiques de notre région permettent également d'expliquer en partie le faible niveau d'ozone observé entre décembre et février et le rôle destructif de la convection tropicale profonde d'été. Nous avons montré que le courant jet subtropical pouvait de façon isolée mais non négligeable contribuer à la variabilité de l'ozone troposphérique au travers d'intrusions d'air stratosphérique. L'influence des cyclones et de la convection profonde d'été ont également été relevés par Jean-Luc Baray dans son travail de thèse.

2.7 Publications et communications sur le sujet

1. Baldy, S., Ancellet, G., **Bessafi, M.**, Badr, A., and Lan Sun Luk, D., 1996: Field observation of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (Southern Tropics), *J. Geophys. Res.*, **96**, 23835-23849.

2. **Bessafi, M**., Diab, R., Bencherif, H., Chane-Ming, F., Posny, F., Jury, M., 2000: A possible tropospheric ozone modulation by intaseasonal oscillations observed in a maritime and continental tropical region. Submitted to *J. Geophys. Res.*, juin 2000.

3. Baray, J.L., Keckhut, P., Taupin, G., F., **Bessafi, M.**, Baldy, S., 1997: Subtropical tropopause breaking as possible stratospheric source of ozone in the tropical troposphere. *1997 Joint Assemblies of the International Association Meteorology and Atmospheric Sciences*, Melbourne.

4. Baray, J. L., Ancellet, G., Taupin, G. F., **Bessafi, M.**, Baldy, S., and Kekhut, P., 1998: Subtropical tropopause break as a possible stratospheric source of ozone in the tropical troposphere, *J. Atm. and Sol.- Terr. Phys.*, **60**, 27-36.

5. Bughwant, C., Cachier, H., **Bessafi, M.**, Leveau, J., 2000: Impact of traffic on black carbon aerosol concentration at La Reunion Island (Southern Indian Ocean), *Atmos. Environ.*, **34**, 9-18.

6. Diab R., **Bessafi, M.**, Taupin, G., F., Randriambelo, T., 1996: Ozone transport off the east coast of southern africa. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium'96*, L'aquila (Italie).

7. Diab R., **Bessafi, M.**, Taupin, G., F., Randriambelo, T., 1998: Tropospheric ozone comparisons between southern Africa and southern Indian. . *J. Geophys. Res.*, en révision.

8. Randriambelo, T., Baldy, S., **Bessafi, M.**, 1997: The seasonality of ozone profiles at La Reunion Island: The Role of Biomass Burning and Transport. *IGARSS' 97 (International Geoscience and Remote Sensing Symposium)* Singapour.

9. Randriambelo, T., **Bessafi, M.**, baldy, S., 1997: Austral summer enhancement of tropospheric ozone content at Reunion Island induced by Biomass Burning: The role of transport over Southeastern Africa and Madagascar. *1997 Joint Assemblies of the International Association Meteorology and Atmospheric Sciences*, Melbourne.

10. Randriambelo, T., Baldy, S., **Bessafi, M.**, 1997: Deep convection cloud detection NOAA satellite: Applications to convection transport of Biomass Burning Convection emission over Southeastern Africa and Madagascar. *EUMETSAT, Meteorological Satellite Data user's conference*, Bruxelles.

11. Randriambelo, T., Baldy, S., **Bessafi, M.**, Petit, M., and Depinoy, M., 1998: An improved detection and characterization of active fires and smoke plumes in south-eastern Africa and Madagascar, *Int. J. Remote Sensing*, vol 19, **14**, 2623-2638.

12. Taupin, G., F., **Bessafi, M.**, Baldy, S., 1997: The control of the vertical distribution of tropospheric ozone over Reunion Island in the Southern tropics. *1997 Joint Assemblies of the international association meteorology and Atmospheric Sciences*, Melbourne.

13. Taupin, G., F., **Bessafi, M.**, Baldy, S., and Bremaud J.P., 1999: Tropospheric ozone above the southwestern Indian Ocean is strongly linked to dynamical conditions prevailing in the tropics. *J. Geophys. Res.*, vol.104, **7**, 8057-8066.

2.8 Bibliographie générale

1. Arino, O., and Melinotte, J. M., 1995: Fire Index atlas, *Earth Observation Quaterly*, **50**, 11-16.

2. Baray Jean Luc, 1999: Etude des transferts stratosphère-troposphère en bordure sud de la zone tropicale et impact sur le bilan d'ozone troposphérique. *Thèse de doctorat*, Université de Paris VI.

3. Bughwant Chatrapatty, 2000: Etude physico-chimique des aérosols de combustion et d'ozone dans la troposphère tropicale et la couche limite marine au sud-ouest de l'Océan Indien. *Thèse de doctorat*, Université de La Réunion.

4. Diab R., Thompson, A.M., Zunckel, M., Coetzee, G.J.R., Combrink, J., Bodeker, G.E., Fishman, J., Sokolic, F., McNamara, D.P., Archer, C.B., and Nganga, D., 1996a: Vertical ozone distribution over southern Africa adjacent oceans during SAFARI-92. *J. Geophys. Res.*, vol.101, **19**, 23823-23834.

5. Fabian P. And P.G. Pruchnevicz, 1977: Meridional distributions of ozone in the troposphere and its seasonal variations, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2063-2073.

6. Fishman J.and J.C. Larsen, 1987: The distribution of total ozone and stratospheric ozone in the tropics: Implications for the distribution of tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, **92**, 6627-6634.

7. Fishman J., Watson, C.E., Larsen, J.C., and Logan, J.A., 1990: The distribution of tropospheric ozone determined from satellite data, *J. Geophys. Res.*, **95**, 3599-3617.

8. Franca, J. R. A., Brustet, J. M., and Fontan J., 1995 : Multispectral remote sensing of biomass burning in west Africa, *Journal of Atmospheric Chemsitry*, **22**, pp 81-110.

9. Garstang, M., Tyson, P.D., Swap, R., Edwards,Kallberg, P., and Lindesay, J.A., 1996: Horizontal and vertical transport of air over southern Africa. *J. Geophys. Res.*, vol 101, **19**, 23721-23736.

10. Justice, C.O., Kendall, J.D., Dowty, P.R. and Scholes, R.J., 1996: Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campain using NOAA advanced very high resolution radiometer data. *J. Geophys. Res.*, vol 101, **19**, 23851-23863.

11. Kaufman, Y. J., Tucker, C. J., and Fung, I., 1990: Remote sensing of biomass burning in the tropics. *J. Geophys. Res.*, **95**, pp 9927-9939.

12. Kenedy, P., Gregoire, J. M., and Belward, A. S., 1993: An improved approach to fire monitoring in west Africa using AVHRR data. *Int. Journal of Remote Sensing*, **15**, pp 2235-2255.

13. Pillay, Y., Diab R., and Sokolic, F., 1995: Ozone maxima off the east coast of South Africa: the role of biomass burning. *South African Journal of Science*, **91**, 609-613.

14. Randriambelo Tantely, 1998: Détection satellitaire des feux de végétation et des zones de convection en zone tropicale: Application à l'étude climatologique de l'ozone troposphérique. *Thèse de doctorat*, Université de La Réunion.

15. Taupin-Goffinont Fabienne, 1997: Analyse et modélisation de la variabilité de l'ozone troposphérique en zone tropicale – Influence du brûlage de biomasse. *Thèse de doctorat*, Université de Clermont II.

16. Thompson, A.M., Pickering, K.E., McNamara, D.P., Scoeberl, M.R., Hudson, R.D., Kim, J.H., Browell, E.V., Kirchoff, V.W., and Nganga, D., 1996: Where did tropospheric ozone over southern Africa come from in October 1992? Insights from TOMS, GTE TRACE A and SAFARI 1992. *J. Geophys. Res.*, vol 101, **19**, 24251-24278.

3 Modèle statistique de prévision de trajectoires et d'intensité des systèmes dépressionnaires tropicaux

3.1 Introduction

Cette partie du document fait état du développement et de l'évaluation des performances d'un modèle statistique de prévision de trajectoire et d'intensité de cyclones tropicaux. Ce travail de recherche réalisé au sein de la Cellule Recherche Cyclone s'inscrit donc dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de La Réunion et Météo-France. Cette cellule de recherche fut mise en place en août 1998 date à laquelle j'ai également intégré l'équipe de Météo France. A cette époque, il m'apparaissait important que l'université de La Réunion participe aux activités de recherche sur un sujet qui concerne directement l'ensemble de la population locale: les cyclones tropicaux. La tâche ne fut pas simple car ce fut une initiative isolée qui ne s'inscrivait pas à l'époque comme étant une priorité du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, compte tenu de ses nombreux engagements par ailleurs dans le domaine de l'observation atmosphérique.

Dans le cadre d'une mise à disposition de la part de mon laboratoire de rattachement, j'ai donc exercé mon activité au sein de cette cellule liée par convention à l'université de la Réunion. Au-delà de l'intention première de collaborer, il a fallu préciser les termes de cette collaboration et plus particulièrement que je définisse, en concertation avec le responsable de cette cellule (Antoine Lasserre-bigorry), un sujet de recherche. Il m'apparaissait sain de commencer par le commencement en matière de prévision de cyclone, compte tenu de mon inexpérience sur le sujet. Nous avons convenu conjointement que je m'attacherai sur une période de deux ans à mettre en place un modèle statistique de prévision de trajectoire de cyclone et par la suite un modèle d'intensité si les conditions le permettaient. C'est ainsi que j'ai débuté mes activités au sein de la CRC.

Dans une première partie, nous présenterons le modèle que j'ai développé à la C.R.C. baptisé MOCCANA (Modèle Climatologique de Cyclones par ANAlogues) et notamment nous aborderons le concept d'analogues, l'analyse en composantes principales (ACP) et la régression. Dans un deuxième temps, nous ferons un bref récapitulatif des bassins cycloniques faisant l'objet de ce travail ainsi que leur rythme d'activité. Toujours dans la perspective d'une comparaison avec le modèle CLIPER utilisé actuellement comme référence parmi les modèles statistiques de prévision de trajectoire de cyclone, nous présenterons les résultats de ce modèle sur un échantillon de trajectoires observées pendant la période 1988-1997. Ce qui m'amènera tout naturellement à présenter les résultats proprement dits du modèle MOCCANA et l'évaluation de ses performances. Dans une dernière partie, je montrerais un résultat préliminaire sur la prévision d'intensité obtenu avec un modèle utilisant comme moteur statistique celui développé pour MOCCANA.

3.2 Le concept du modèle MOCCANA

Le concept du modèle MOCCANA est basé sur l'élaboration d'une loi de régression multivariable entre un jeu de prédicteurs et de prédictands. Des liaisons statistiques ayant déjà été établi par C. J. Neuman (1973) entre diverses variables météorologiques il était naturel de reprendre l'utilisation de ces variables pour le présent modèle.

Pour MOCCANA, les prédictands sont les déplacements relatifs du cyclone en latitude et en longitude aux échéances de +6h, +12h, +18h, ... ,+72h, soit un total de 24 prédictands:

Pour la latitude:

$Y_{+6}, Y_{+12}, Y_{+18}, Y_{+24}, Y_{+30}, Y_{+36}, Y_{+42}, Y_{+48}, Y_{+54}, Y_{+60}, Y_{+66}, Y_{+72}$

Pour la longitude:

$X_{+6}, X_{+12}, X_{+18}, X_{+24}, X_{+30}, X_{+36}, X_{+42}, X_{+48}, X_{+54}, X_{+60}, X_{+66}, X_{+72}$

Pour marquer la persistance, les caractéristiques du cyclone 6h, 12h, 18h et 24h avant la position à partir de laquelle ont désire effectuer une prévision ont été prises en considération. Ainsi, pour MOCCANA, les 13 prédicteurs primaires sont:

Symbole	Prédicteurs Primaires
D	La Date (jour julien)
X_0	La longitude initiale
Y_0	La latitude initiale
U_0	La composante zonale de la vitesse de déplacement pour la position initiale
V_0	La composante méridienne de la vitesse de déplacement " " "
U_{-6}	La composante zonale pour la position: 6 heures avant
U_{-12}	" " " " " 12 heures avant
U_{-18}	" " " " " 18 heures avant
U_{-24}	" " " " " 24 heures avant
V_{-6}	La composante méridienne pour la position: 6 heures avant
V_{-12}	" " " " " 12 heures avant
V_{-18}	" " " " " 18 heures avant
V_{-24}	" " " " " 24 heures avant

MOCCANA utilise dans sa procédure de calcul un module de régression sur la base d'un ensemble de prédicteurs primaires et secondaires (issus des prédicteurs primaires). Dans notre cas, il y a 546 prédicteurs secondaires qui correspondent à une combinaison polynomiale à l'ordre 3 des prédicteurs primaires. Pour des raisons de redondance de l'information et plus encore ici de conditionnement des matrices (559 prédicteurs à gérer simultanément), une méthode de sélection des prédicteurs a aussi été adoptée. Bien qu'elle soit utilisée dans un contexte totalement différent de celui de CLIPER, la régression non-linéaire multiple est aussi la méthode de prévision utilisée par MOCCANA. De plus les coefficients des équations de régression pour toutes les échéances sont calculés en bloc.

Nous avons introduit dans le modèle une procédure particulière d'adaptation vis à vis du type de cyclone qu'il avait à traiter. Pour cela, à partir de la base de donnée de départ et de la position initiale du cyclone cible à partir de laquelle on désire effectuer une prévision, une procédure de sélection de "cyclones analogues" a été intégrée dans MOCCANA pour générer une base d'analogues sur laquelle la régression sera effectuée (Figure 22).

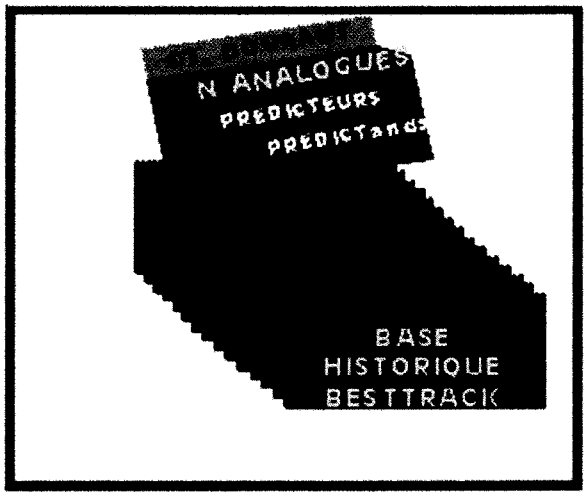

Figure 22: Extraction d'un ensemble d'analogues à partir de la base historique ou best-track de trajectoires de cyclones.

Ainsi pour chaque position d'un cyclone, à partir de laquelle on désire effectuer une prévision, le modèle établi son équation de régression avec l'ensemble des cyclones, autres que le cyclone cible, ayant eu des conditions "analogues" au cours de leur évolution. Une position de cyclone analogue à la position du cyclone cible sera choisie en fonction de critères (Figure 23)qui furent déjà proposés par J.R.Hope (1970), en l'occurrence elle doit:

- Avoir une date incluse dans une fenêtre de 30 jours autour de la position considérée.
- Etre repérée dans un carré de 10° de côté autour de la position considérée.
- Posséder un cap (pour le cyclone) compris dans une fourchette donnée autour de celui du cyclone considéré.

Moins lourde que la méthode de sélection progressive dans une utilisation répétée (dans CLIPER cette méthode n'était appliquée qu'une fois), la méthode adoptée pour la sélection des prédicteurs dans MOCCANA fait appel à l'analyse en composantes principales. Cette technique d'ACP est utilisée dans le domaine de la géophysique (Lorenz, 1956; Rinne, 1979, Preisendorfer, 1988) et on trouve dans la littérature quelques applications dans les modèles statistico-dynamiques de prévision de trajectoire de cyclone (Shaffer, 1982; Shapiro, 1984, Peak, 1986).

L'utilisation de l'ACP consiste ici à transposer le problème physique dans un espace où toute les variables ne sont plus corrélées et où la sélection des prédicteurs en fonction de leur contribution au pourcentage de réduction de variance est plus aisée à établir. Notons que toutes les variables sont ramenées à leur valeur centrée.

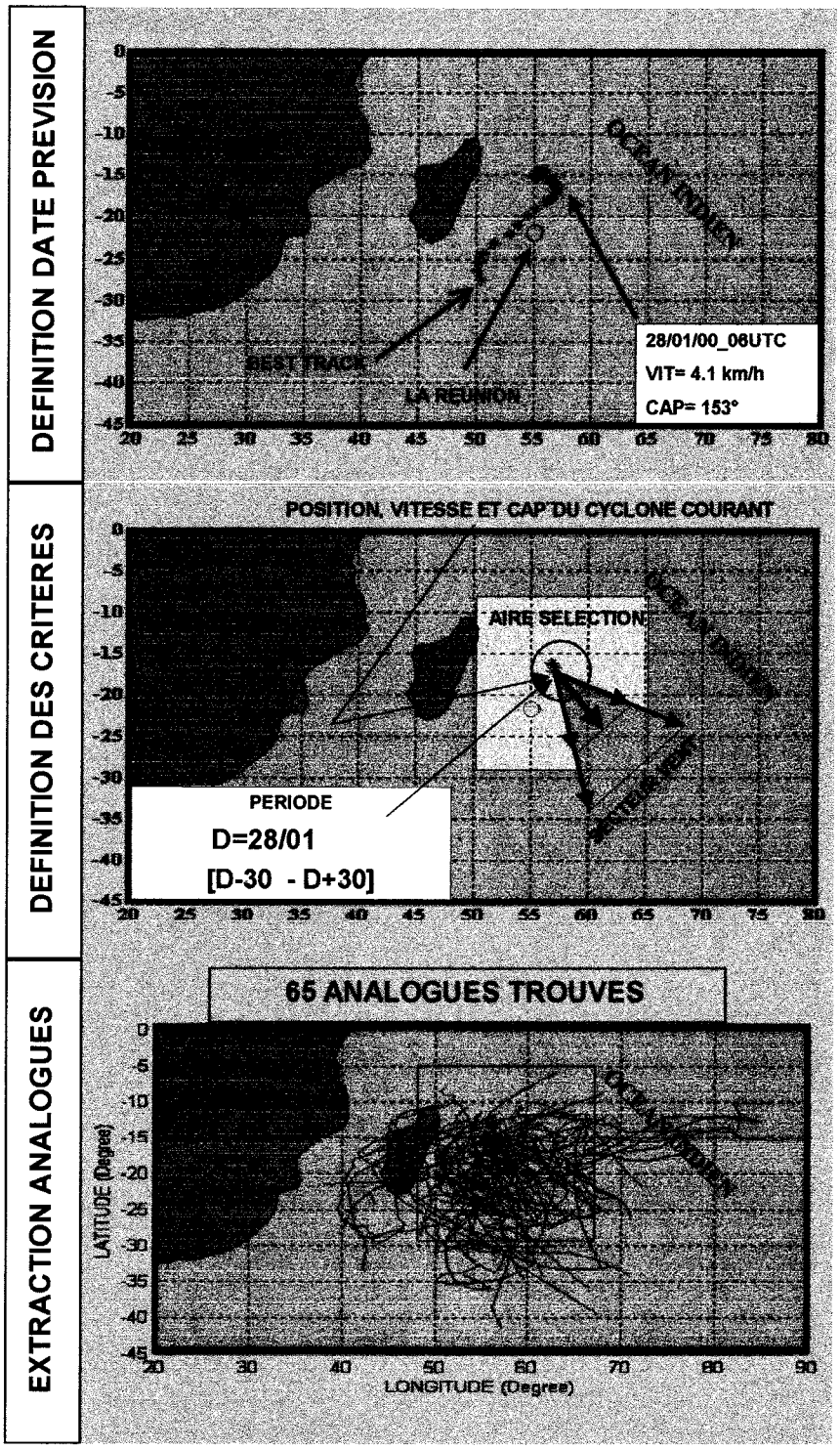

Figure 23: Application du critère de sélection d'analogues utilisé dans MOCCANA sur le cas du cyclone CONNIE (28/01/00).

Ainsi les prédictands et prédicteurs effectivement pris en compte par le modèle sont ceux énoncés plus haut amputés de leur moyennes respectives. Nous ne ferons plus dans la suite de différences entre les variables centrées et les variables primaires la relation liant les ces deux catégories étant triviales (retrait ou ajout de la moyenne). Disposant donc de p=559 prédicteurs, notons x_{ij} leur valeur pour les N analogues sélectionnés. On peut alors représenter ces $p \times N$ observation par la matrice X telle que:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{j1} & \cdots & x_{jj} & \cdots & x_{jp} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{N1} & \cdots & x_{Nj} & \cdots & x_{Np} \end{pmatrix}$$

Les traitements des déplacements relatifs en latitude et en longitude étant identiques, on parlera ici des prédictands comme étant les déplacements (sous entendu en latitude ou en longitude) relatifs à la position initiale aux échéances successives de +6h, +12h, +18h, ..., +72h. On dispose donc de q=12 prédictands observés pour les N analogues que l'on peut également organiser sous la forme d'une matrice des prédictands, Y telle que:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1j} & \cdots & y_{1q} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{j1} & \cdots & y_{jj} & \cdots & y_{jq} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{N1} & \cdots & y_{Nj} & \cdots & y_{Nq} \end{pmatrix}$$

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'étape centrale du modèle MOCCANA et consiste en un traitement particulier de l'information issue des observations. On introduit Σ_X la matrice de variance-covariance empirique des x_{ij} celle-ci a pour expression (rappelons que nous travaillons sur des variables centrées):

$$\Sigma_X = \frac{1}{N} X \cdot X^T = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \rho_{1i}\sigma_1\sigma_i & \cdots & \rho_{1p}\sigma_1\sigma_p \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{i1}\sigma_i\sigma_1 & \cdots & \sigma_i^2 & \cdots & \rho_{ip}\sigma_i\sigma_p \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{p1}\sigma_p\sigma_1 & \cdots & \rho_{pi}\sigma_p\sigma_i & \cdots & \sigma_p^2 \end{pmatrix}$$

De la même manière, on introduit Σ_Y la matrice de covariance des prédictands. L'analyse en composantes principales est un problème de diagonalisation de ces deux matrices de covariance et d'une recherche de la base de vecteurs propres (normalisée) de chaque matrice par détermination des valeurs propres λ_i (solutions de $\det(\Sigma_X - \lambda_i I)=0$ ou $\det(\Sigma_Y - \lambda_i I)=0$). Les vecteurs propres représentent alors les axes principaux de représentation des variables dans l'espace propre. Notons maintenant A_X et B_Y les matrices de vecteurs propres respectivement des prédicteurs et des prédictands. Ces matrices sont les matrices de passage de l'espace physique réel vers l'espace propre. On peut alors définir les matrices de covariances des images des prédicteurs et des images des prédictands, ξ et Ψ par:

Pour les prédicteurs	Pour les prédictands
$\xi = A_X^{-1} X$	$\Psi = B_Y^{-1} Y$

Les nouvelles matrices de covariance de ces prédicteurs "propres" et de ces prédictands "propres" sont donc diagonales. Ainsi, les variables sont effectivement anti-corrélées et les éléments de la diagonale correspondent aux variances des nouvelles variables "propres", qui sont donc en fait les valeurs propres calculées précédemment ou encore les composantes principales, et elles sont ordonnées de manière croissante. La résolution du problème de la sélection des composantes principales les plus informatives est dans ces conditions grandement facilitée. En effet la somme des valeurs propres représente 100% de la variance expliquée. Ainsi, en ayant fixé arbitrairement que les composantes principales devraient être représentatives de 99 % de l'information, il suffit de sélectionner les k premières composantes principales dont la variance cumulée représente 99 % de la somme totale des valeurs propres. Avec cette contrainte, on est alors amené à conserver k_A composantes principales pour les prédicteurs et k_B composantes pour les prédictands. L'étape suivante est le calcul des coefficients de la régression non-linéaire dans l'espace propre. Cette méthode de régression alors utilisée est similaire à celle présentée pour le modèle CLIPER. La principale différence est qu'elle revêt un caractère multiple au sens ou les coefficients des équations aux différentes échéances sont calculés en même temps, en ayant considéré au départ une matrice de l'ensemble des prédictands observés et non un vecteur des prédictands à une échéance donnée. L'autre différence, portant uniquement sur la forme, est que cette régression multiple s'effectue dans l'espace propre. On aura donc:

ξ_{k_A} : matrice des prédicteurs propres à N lignes et k_A colonnes.

ψ_{k_B} : matrice des prédictands propres à N lignes et k_B colonnes.

Alors, la matrice des coefficients de la régression, α telle que $\Psi=\alpha\,\xi$ est toujours obtenue par:

$$\alpha = V_{\psi\zeta} \cdot V_{\zeta\zeta}^{-1}$$

Reste ensuite à appliquer la formule de régression, sous forme matricielle à la position du cyclone cible. Il faut pour cela passer le vecteur des prédicteurs du cyclone cible dans l'espace propre en lui appliquant A_X^{-1}. On peut alors sélectionner les k_A premières composantes à partir desquelles, en appliquant α, on obtient les k_B composantes principales des prédictands propres. En complétant ces k_B composantes avec des zéros on obtient un vecteur de l'espace propre ψ_{cible} à 12 composantes qui représente les prévisions du modèle dans l'espace propre. Enfin, pour obtenir les déplacements relatifs du cyclone à +6h, +12h, ..., +72h, il suffit d'appliquer B_Y à ψ_{cible} et obtenir ainsi Y_{cible}, vecteur des déplacements relatifs du cyclone au différentes échéances: $Y_{cible} = B_Y\,\psi_{cible}$

La Figure 24 représente de façon synthétique l'organigramme de fonctionnement du modèle MOCCANA.

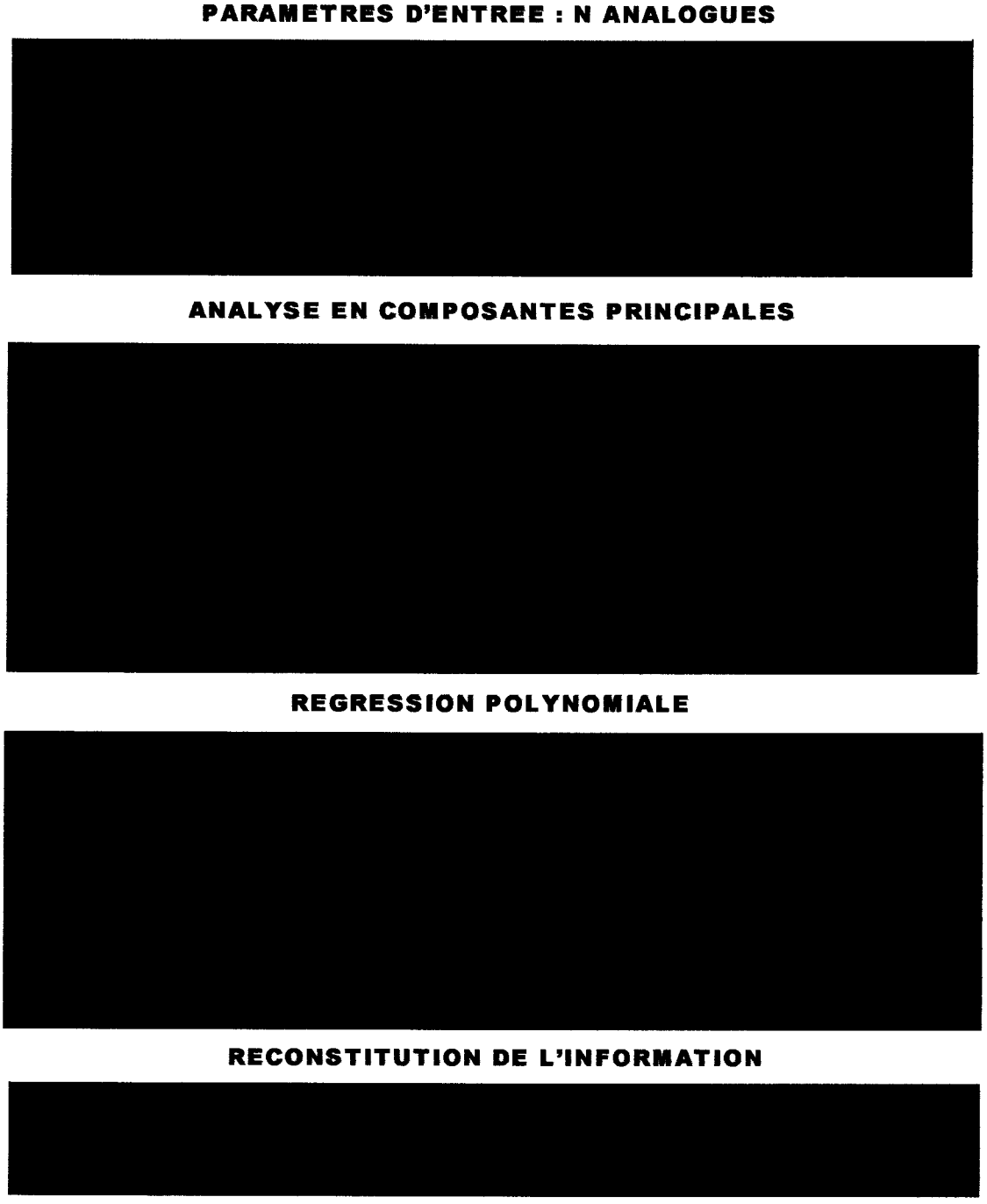

Figure 24: Organigramme du fonctionnement de l'Analyse en Composantes Principales.

3.3 Analyse des performances sur l'ensemble des bassins cycloniques

3.3.1 Contexte de l'analyse

Le modèle MOCCANA a tout d'abord été élaboré pour une application directe sur le bassin sud-ouest Océan Indien. Compte tenu des bons scores obtenus pour ce bassin, il nous a semblé naturel d'élargir l'application de ce modèle pour d'autres bassins. Cette perspective

permettrait également d'évaluer les potentialités d'utilisation de ce modèle dans d'autres bassins et sa capacité à être utiliser comme modèle de référence parmi les modèles statistiques pour les prévisions de trajectoires de systèmes dépressionnaires. L'évaluation de la qualité de ce modèle a été basée sur une comparaison directe avec le modèle CLIPER actuellement utilisé comme référence parmi les modèles statistiques de prévisions de trajectoire de cyclone. Nous avons pu entreprendre ce travail d'inter comparaison sur les mêmes échantillons grâce à la collaboration de UKMO (Communication personnelle avec Alan Radford) en 2000. En effet, nous avons pu disposer des diverses versions du modèle CLIPER utilisées actuellement pour chaque bassin cyclonique du globe pour la prévision statistique en mode opérationnel des trajectoires de cyclones. Nous présentons donc ici les principaux résultats de cette comparaison.

En préalable, nous allons faire une présentation succincte du contexte de notre l'analyse par une mise en revue des bassins cycloniques faisant l'objet de ce travail. A l'heure actuelle, on définit sept régions du globe où les cyclones apparaissent régulièrement. Les centres météorologiques responsables de ces zones, ainsi que leur étendue sont mentionnées dans le tableau suivant.

Nom du bassin	Abréviation	Zone géographique
HEMISPHERE NORD		
Nord Océan Indien Delhi, Inde	**NIO**	Golfe du Bengale et Mer d'Oman
Pacifique Nord Ouest Tokyo, Japon	**NWP**	Ouest du 180°E, y compris le sud de la Mer de Chine
Pacifique Nord Est Miami, USA	**NEP**	Amérique du Nord, jusqu'au 180°E
Atlantique Nord Miami, USA	**NA**	Océan Atlantique Nord, Mer des Caraïbes, et Golfe du Mexique
HEMISPHERE SUD		
Sud-Est Océan Indien Réunion, France	**SWIO**	Sud de l'Océan Indien, à l'ouest du 90°E
Sud-Est Océan Indien	**SEIO**	90°E à 142°E
Pacifique Sud-Ouest	**SWP**	142°E à 120°W

Les centres mentionnés dans ce tableau assument une responsabilité internationale sur la zone qui leur est attribuée.

La Figure 25 permet de visualiser de façon globale les trajectoires moyennes types de chaque bassin. D'une manière générale, on peut se rendre compte que les trajectoires sont typiquement paraboliques avec des courbures plus ou moins marqué suivant le bassin. En particulier, les bassins Atlantique Nord et Pacifique Nord-Ouest révèlent des trajectoires fortement déviées comparativement au bassin Pacifique Nord Est lequel présente des trajectoires moyennes relativement rectilignes. Les autres bassins se situent dans une configuration intermédiaire.

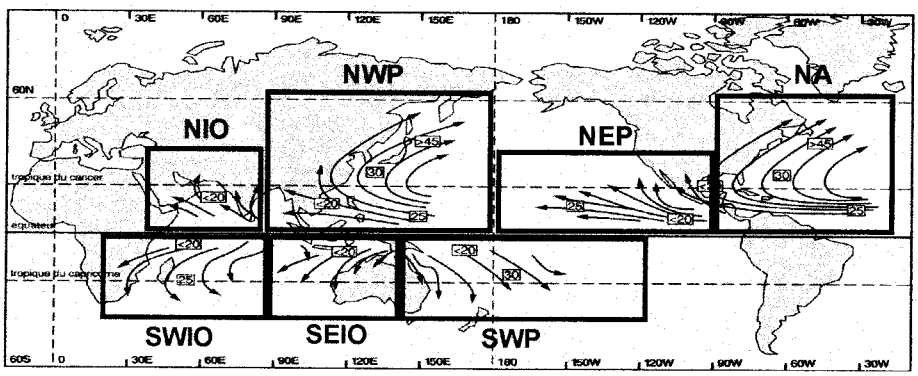

Figure 25: Répartition et trajectoires moyennes des systèmes dépressionnaires tropicaux. *Les cartouches indiquent les vitesses de déplacement en km/h. (Technical Document, Report No TCP-31, 1993). Les encadrés en couleurs bleus ou rouges indiquent les délimitations des bassins cycloniques.*

Les systèmes dépressionnaires tropicaux sont des systèmes qui en moyenne se déplacent relativement rapidement avec une vitesse qui se situe vers 25 km/h. Cette vitesse moyenne peut varier suivant les bassins et également suivant la latitude, notamment vers les zones de reprise de ces systèmes dans le flux d'ouest (zone de transition vers des systèmes extra-tropicaux). L'enregistrement des observations aux heures synoptiques (0h, 6h, 12h et 18h UTC) montre que ces systèmes possèdent également une certaine variabilité moyenne pendant un intervalle de 6 heures. La Figure 26 présente donc la valeur moyenne et l'écart type de la vitesse et du cap calculés entre deux observations synoptiques pour chaque bassin cyclonique.

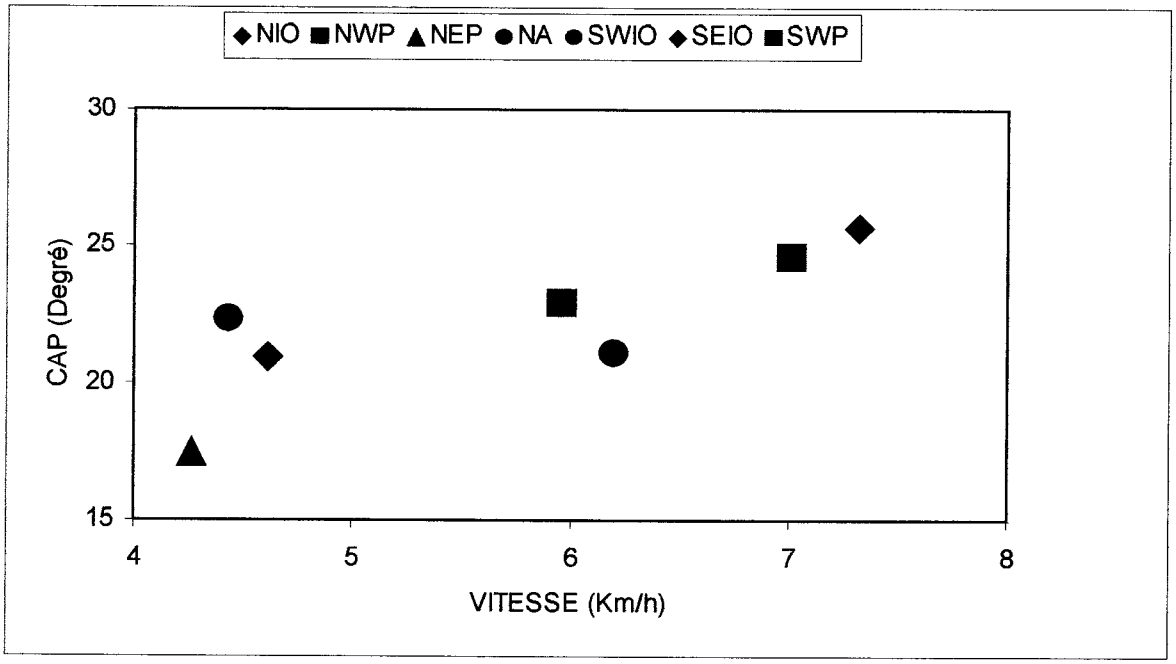

Figure 26: Relation entre écart-type du module de la vitesse et du cap évaluée sur 6 heures.

On peut noter qu'il y a une corrélation positive entre la variabilité de la vitesse et de la direction du déplacement. Le bassin Nord-Est Pacifique est le bassin où la variabilité de la vitesse et du cap est le plus faible ce qui serait lié en grande partie à la nature quasi persistante

des trajectoires climatologiques rencontrées dans ce bassin. Il est aussi intéressant de voir que le bassin australien possède la variabilité la plus importante de tous les bassins ceci serait lié essentiellement à la présence du continent australien. La partie Sud-Ouest et Nord de l'Océan Indien présente une variabilité relativement faible puisque nous avons quasiment les mêmes caractéristiques que le Nord-Est Pacifique avec cependant une plus grande variabilité sur la direction des déplacements. Les bassins Nord Atlantique et Nord-Ouest Pacifique possèdent une variabilité plus importante en vitesse que les deux bassins précédents.

Le niveau d'activité pendant une saison cyclonique est variable d'un bassin à un autre. La Figure 27 indique qu'en moyenne par an, on a repéré pour chaque bassin plus de dix systèmes dépressionnaires tropicaux pendant la période 1960 à 1997. Le bassin le plus actif est sans conteste le bassin Pacifique Nord-Ouest avec 30 systèmes répertoriés en moyenne dans l'année, suivi, dans l'ordre décroissant, du bassin Sud-Ouest de l'océan indien avec 20 systèmes, et entre 8 et 15 systèmes pour les bassins restants.

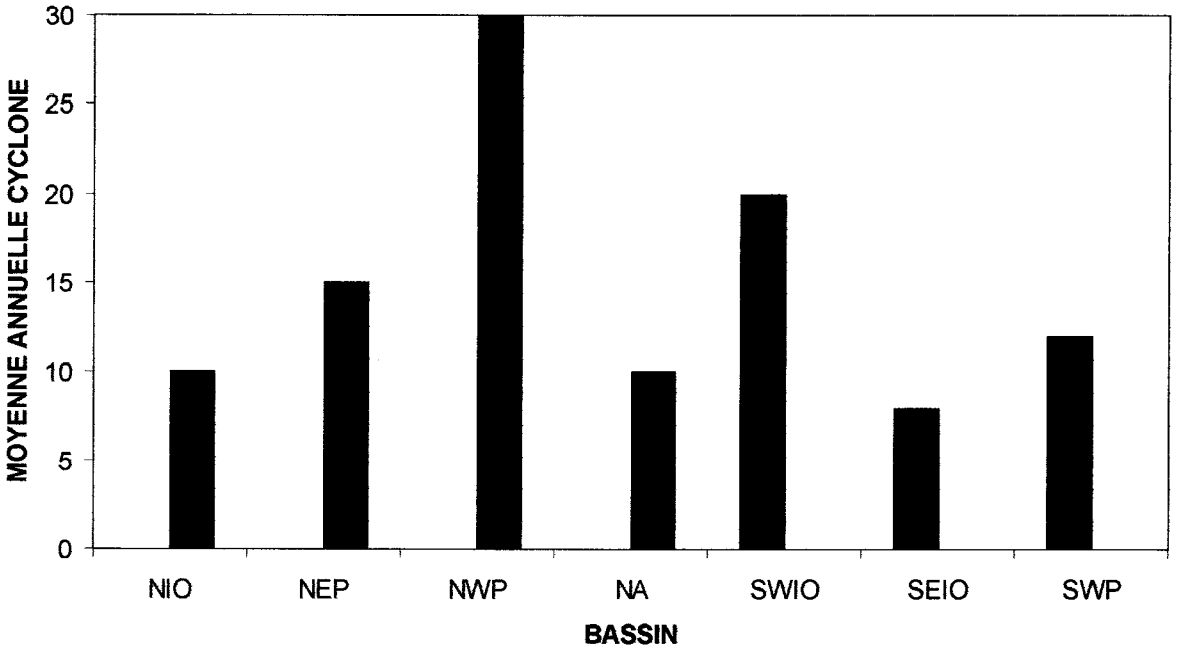

Figure 27: Moyenne annuelle de systèmes dépressionnaires répertoriés dans chaque bassin. Cette moyenne est calculée à partir d'enregistrement couvrant la période 1960-1997.

En terme d'activité cyclonique chaque bassin possède son propre calendrier d'activité. La Figure 28 représente le nombre total de jour cumulé par mois de l'activité cyclonique pour la période 1960/1997. Commençons par l'hémisphère Nord (Figure 28a). Le bassin Pacifique Nord-Ouest est le plus actif de tous les bassins du globe. Pratiquement toute l'année, nous avons une activité avec des occurrences très importantes de juillet à septembre. Vient ensuite le bassin Atlantique qui présente une importante activité centrée uniquement de juin à octobre, avec un maximum en septembre. L'activité cyclonique du bassin Pacifique Nord-Est est équivalente à celui du bassin Atlantique mais s'étend sur une période plus grande allant de mai à novembre. Enfin, le bassin Océan Indien Nord montre un double pic d'activité cyclonique en mai et en novembre. L'activité de ce bassin est la plus faible de tous les bassins du globe. Pour ce qui concerne l'hémisphère Sud (Figure 28b), l'activité cyclonique dominante se situe dans cette partie de l'hémisphère pendant l'été austral c'est à dire entre

novembre et février. Les bassins Sud de l'océan Indien et Sud Est Pacifique on le même rythme d'activité. Le bassin sud ouest de l'océan indien est le bassin le plus actif de cet hémisphère.

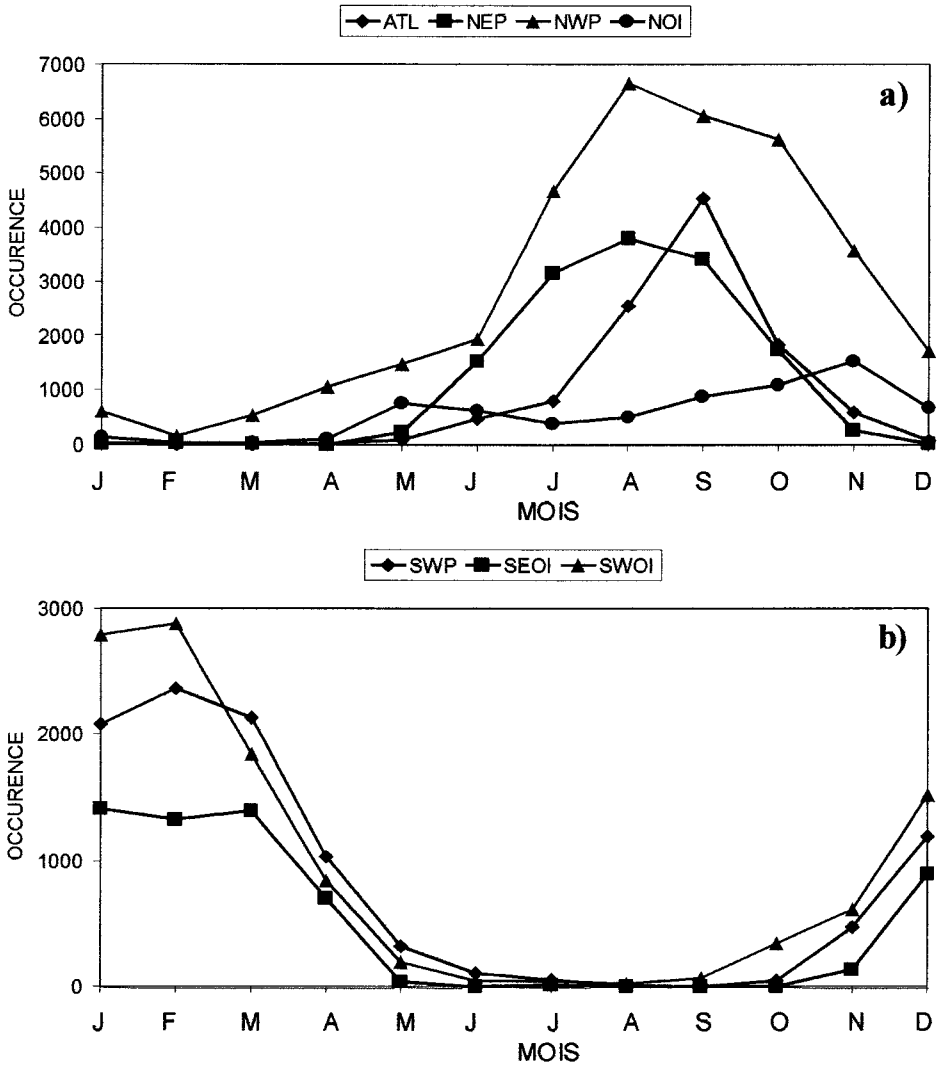

Figure 28: Répartition des activités cycloniques par bassin pour l'hémisphère Nord (a) et l'hémisphère Sud (b).

3.3.2 CLIPER: concept de niveau de difficulté de prévision

Le modèle CLIPER (Climatologie-Persistance) fait partie de la famille des modèles statistiques de prévision de trajectoires de cyclones (R.G. Miller, 1962; B.I. Miller, 1968). Il est basé sur l'élaboration d'un modèle de régression non-linéaire multivariable à partir d'une base temporelle de déplacements de cyclones. Il a été mis au point au Etats-Unis par Neumann en 1972 (C. J. Neumann, 1972) et succède à un modèle statistique de calcul d'analogues et d'ellipse de probabilité (J.R. Hope, 1970).

Ce modèle permet de calculer les coefficients de la régression sur la base d'un fichier test contenant le ou les prédictands (généralement les positions longitude/latitude cyclone à

12h, 24h,...,72h) et une base de prédicteurs (position et la vitesse initiale du cyclone, la date, les composantes zonales et méridiennes du vent à -12h). De plus, ce modèle définit une fois pour toute et pour chaque bassin une équation de régression reliant les informations pertinentes passées et celles que l'on souhaite prévoir. CLIPER a fait l'objet de nombreuses applications dans les différents bassins du globe (Crutcher, 1971; Fraedrich, 1989; Keenan, 1985; Neumann and Randrianarison, 1976; Leftwich and Neumann, 1977; Xu and Neumann, 1985). Ces différentes variantes reflètent le caractère empirique de cette méthode où la connaissance historique des caractéristiques trajectographiques des cyclones pour un bassin donné est importante dans le choix des prédicteurs. La Figure 29 présente la moyenne pour chaque échéance calculée sur la période 1988-1997 pour chaque bassin des écarts entre la position observée et la position prévue notée DPE.

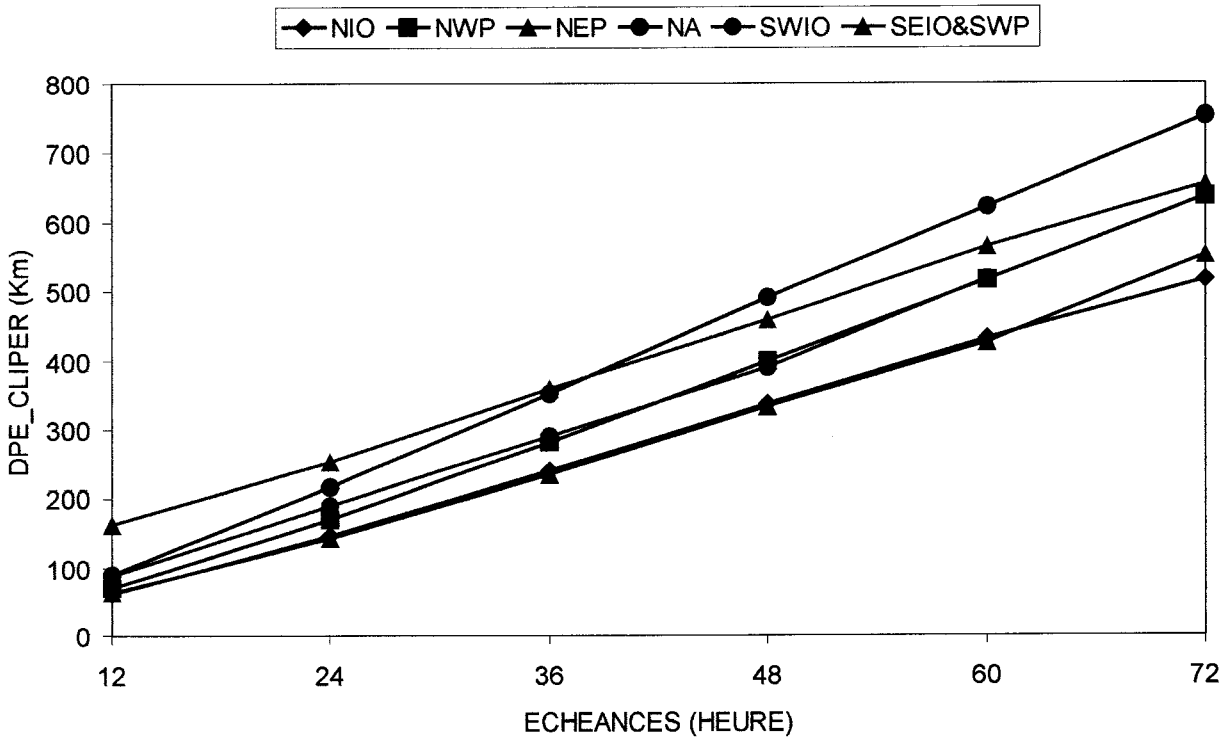

Figure 29: Moyenne de l'erreur directe du modèle CLIPER sur tous les bassins.

De façon générale, on peut observer que l'erreur directe évolue de façon linéaire avec les échéances variant entre 100 à 12h et 600 km à 72h. De plus, il apparaît que le modèle CLIPER ne donne pas les mêmes prévisions suivant les bassins. On a donc un certain niveau de difficulté de prévision par bassin. Pike et Neumann (1987) ont montré qu'il existait effectivement un niveau de difficulté de prévision ou FDL (Forecast Difficult Level) du modèle CLIPER et ont proposé un classement des bassins sur la base d'observations faites sur la période 1946-82.

Dans notre cas, il apparaît dés 24h que les meilleurs scores sont obtenus pour les bassins océan indien Nord et pacifique Nord-Est. Le bassin atlantique est le plus difficile à prévoir pour le modèle CLIPER. La nature de ces différences est liée en grande partie à la qualité de la loi de régression utilisée pour chaque bassin (laquelle rappelons-le est différente d'un bassin à l'autre) et que celle-ci est basée sur un développement polynomial des prédicteurs soit à l'ordre deux ou trois suivant les bassins. La qualité de cette loi et donc des

prévisions dépendent également de la taille d'apprentissage et de la base test lesquelles sont variables en taille suivant les bassins (où l'activité cyclonique est différente).

3.3.3 MOCCANA et comparaison des performances avec CLIPER

La Figure 30 montre la moyenne des erreurs de distance commises par MOCCANA sur l'ensemble des bassins sélectionnés pour la même période.

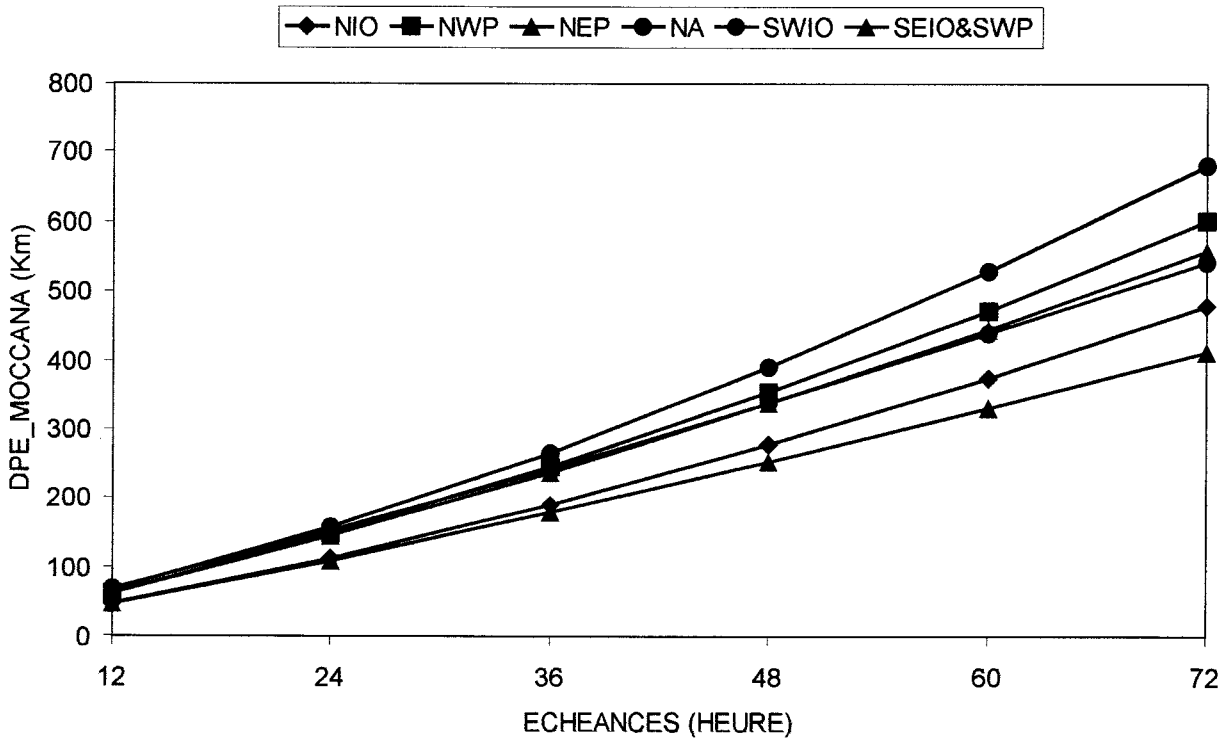

Figure 30: Moyenne de l'erreur directe du modèle MOCCANA sur tous les bassins.

On retrouve la même caractéristique de croissance linéaire de l'erreur en fonction de l'échéance mais le niveau moyen d'erreur est plus faible puisque nous avons ici 60 km à 12 h et 550 km à 72 h. De plus, on observe que le modèle MOCCANA ne présente pas de différence notable par bassin dans les scores pour les courtes échéances c'est à dire pour des prévisions inférieures à 36 heures. La différence fondamentale avec le modèle CLIPER, outre de meilleurs scores obtenus avec MOCCANA, est que ce modèle semble avoir un niveau de difficulté par bassin remarquable. En effet, on s'aperçoit qu'à partir de 36 heures le modèle possède trois niveaux de difficulté. Les plus faibles scores de performance sont obtenus pour le bassin atlantique et le pacifique Nord-Ouest. Le bassin pacifique nord-est et la partie nord de l'océan indien obtiennent les meilleurs scores. Enfin, on a des performances intermédiaires pour le bassin sud-ouest de l'océan indien et le bassin australien (sud-est de l'océan indien et la partie est du sud pacifique). Cette classification semble liée à la nature des trajectoires des différents bassins (Figure 25). MOCCANA présente les moins bons scores pour les bassins où statistiquement les trajectoires sont très incurvées (NA et NWP) et, inversement, les meilleurs scores dans les bassins où les trajectoires sont statistiquement proches de la persistance (NEP et NIO). L'erreur directe et sa variabilité du modèle MOCCANA est toujours inférieure à celle commise par le modèle CLIPER pour tous les bassins confondus (Figure 31). Nous

avons observé un écart supérieur de 100 km aux courtes échéances pour le bassin australien indiquant que CLIPER est mal calibré sur ce bassin.

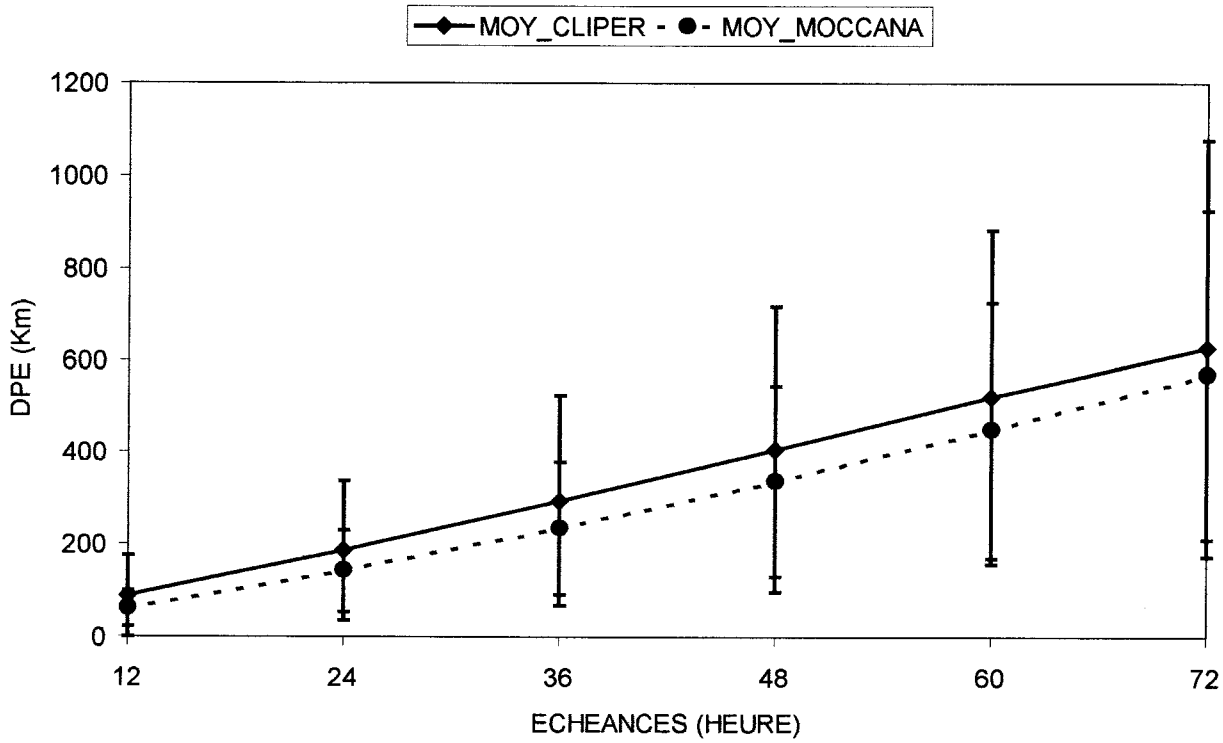

Figure 31: Moyenne et écart-type de l'erreur directe (DPE) du modèle CLIPER et MOCCANA pour l'ensemble des bassins.

En plus de l'erreur directe ou DPE, on peut évaluer la qualité des prévisions d'un modèle de trajectoire en étudiant deux autres types d'erreurs AT (pour Along Track) et CT (pour Cross Track) lesquelles donnent respectivement une idée sur les écarts entre position observée et prévue dans un repère orthogonal local définit par une direction le long de la trajectoire et une direction perpendiculaire.

La Figure 32 représente, à la fois pour les bassins cycloniques de l'hémisphère Nord et Sud les erreurs AT et CT du modèle CLIPER en fonction de celles de MOCCANA. La ligne pointillée rapportée sur chacune des sous-figures correspond à la bissectrice du système d'axe choisi, et la position relative par rapport à cette ligne indique pour chaque courbe d'erreur la qualité relative d'un modèle par rapport à l'autre puisque cette ligne représente la ligne où les deux modèles seraient équivalents en performance.

Concernant l'erreur de position de long de la trajectoire ou AT nous avons observé pour les deux modèles un biais négatif ce qui signifie en moyenne que ces deux modèles ont tendance à sous-estimer la vitesse de déplacement du cyclone. L'écart entre les deux modèles est sensible. Comme pour l'erreur directe, le modèle MOCCANA est globalement meilleure puisque dans ce cas de figure il a moins de dérive en décélération que CLIPER. Par contre, il a été plus difficile de tirer des conclusions générales sur les deux modèles concernant l'erreur commise dans une direction perpendiculaire à la trajectoire ou CT. Néanmoins, on a pu remarquer que les erreurs CT sont faibles comparativement aux erreurs AT.

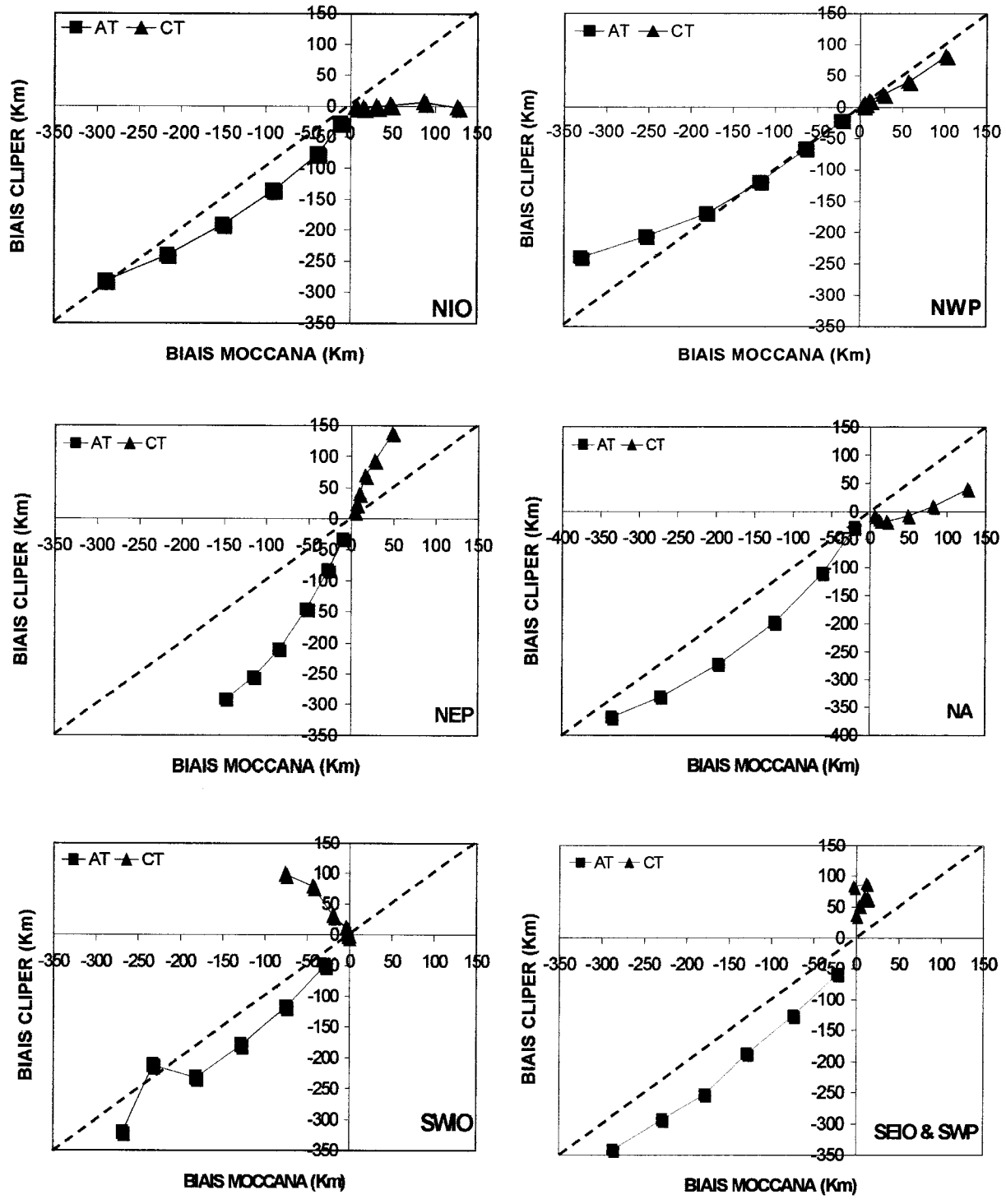

Figure 32: Comparaison des niveaux d'erreur Along-Track (AT) et Cross-Track (CT) en Km entre le modèle MOCCANA et le modèle CLIPER pour tous les bassins. *Chaque courbe d'erreur comporte 6 points correspondant aux échéances de prévisions 12, 24, 48, 60 et 72 h.*

Ce que l'on peut toutefois avancer, c'est le biais observé sur le bassin Océan Indien Nord et le bassin Atlantique nord de MOCCANA alors que CLIPER ne présente pas de biais ou du moins est très peu significatif. En revanche pour ce dernier, nous observons un biais pour le bassin du Pacifique Nord-Est, le bassin australien (SEIO&SWP) et le bassin Sud-Ouest Océan Indien. Il semblerait donc que CLIPER ait une composante climatologique qui

prédomine pour les moyennes et longues échéances compte du fait que pour ce bassin les trajectoires typiques présentent un caractère persistent alors que MOCCANA accentue les courbures dans les bassins où les trajectoires sont fortement parabolique, notamment le bassin Nord Atlantique.

En résumé, il apparaît clairement que le modèle MOCCANA est globalement plus performant que le modèle CLIPER. L'écart est très sensible dés les premières échéances. Les progrès les plus importants ont été obtenus pour les bassins Atlantique et le Sud-Est Pacifique où CLIPER est plus performant.

Un des objectifs au sein de la CRC fut également de développer un modèle de prévision d'intensité de cyclone. Au vu des résultats encourageants du modèle statistique de prévision de trajectoire (MOCCANA), nous avons opté sur une stratégie de continuité pour le développement d'un modèle d'intensité (développé cette année 2000). Nous avons donc conservé le concept de MOCCANA, à savoir la notion de sélection d'analogues et l'utilisation de l'ACP dans le calcul de l'équation de régression établissant un lien entre les prédictands et prédicteurs.

La différence fondamentale porte ici naturellement sur les choix des prédicteurs et des prédictands issus des données de best-track mais également par l'introduction de données issues de modèle. Nous avons donc ici un modèle de type statistico-dynamique de prévision d'intensité qui intègre des paramètres provenant de l'observation et des sorties de modèle sur les paramètres environnementaux (Vent à 200, 500 et 850 hPa, Cisaillement vertical de vent horizontal sur 3 niveaux, divergence d'altitude choisi à 200 hPa, convergence de basses couches choisie à 850 hPa, convergence d'humidité sur la couche 859-1000 hPa, approximation du tourbillon d'Ertel à 200 hPa, SST, Intensification potentielle). A l'heure actuelle, nous avons procédé à un test préliminaire sur le cas du cyclone DAVINA qui a intéressé La Réunion au mois de mars 1999 (Barbary, 2000). La Figure 33 illustre la qualité de la prévision du modèle d'intensité avec à la fois l'observation best-track et les prévisions du CMRS (des prévisionnistes). On s'aperçoit qu'en premier lieu le modèle d'intensité reproduit assez bien les différentes étapes du cycle de vie du cyclone avec de meilleurs résultats lors de la décroissance de l'intensité de DAVINA. La qualité des prévisions est comparable avec celle faite par les prévisionnistes.

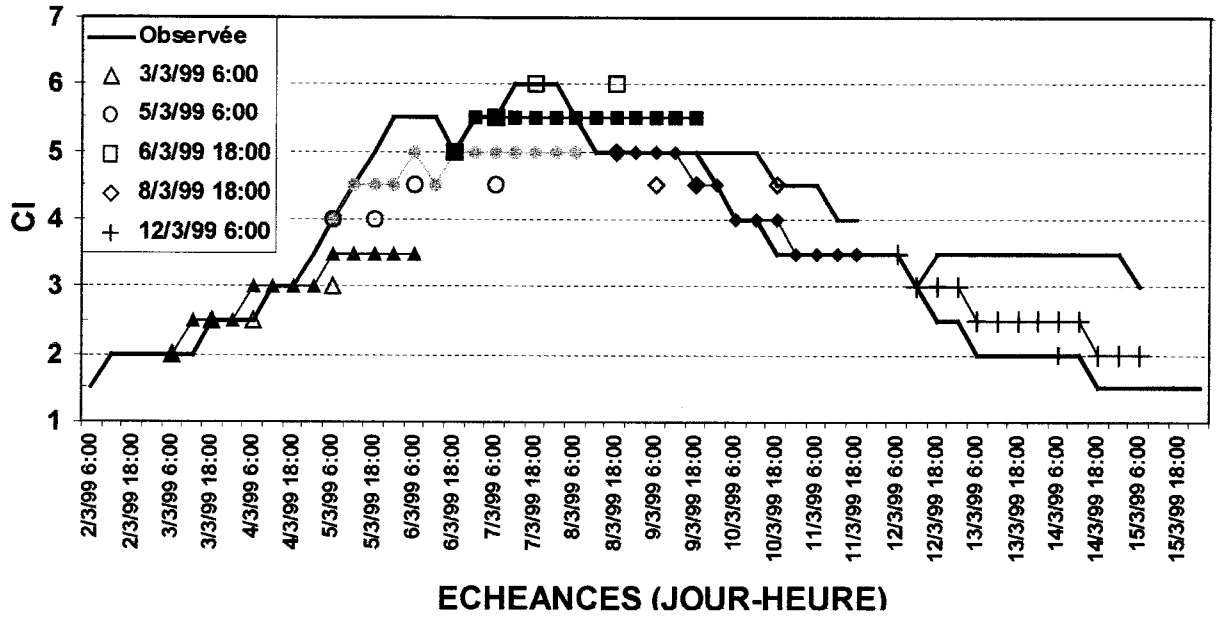

Figure 33: Prévision du coefficient d'intensité CI en fonction des échéances. La ligne continue en bleu représente l'observation ou best-track. *Les symboles noirs à fond blanc correspondent aux différentes prévisions du centre. Les lignes en couleur avec symboles représentent les prévisions du modèle d'intensité. Les lignes en couleur sans symbole correspondent aux prévisions du modèle d'intensité en tenant pas en compte des paramètres environnementaux.*

Nous avons également reporté pour les prévisions du 8 mars à 18h00 et du 12 mars à 6 h00, les prévisions du modèle d'intensité si on ne prend pas en considération les paramètres d'environnement. Les résultats sont en deçà des valeurs observées et montrent l'importance de ces paramètres sur la qualité du modèle.

Sans pour autant tirer des conclusions hâtives, une étude sur un nombre de cas plus élevé est bien sûr nécessaire pour évaluer objectivement la qualité de ce modèle d'intensité qui donne des résultats préliminaires intéressants.

3.4 Conclusion

Le travail présenté ici illustre une collaboration forte entre l'université de La Réunion et un service de Météo-France rattaché au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Ces deux années au sein de la Cellule Recherche Cyclone m'aura permis d'exercer mon activité de recherche en menant à bien les deux objectifs initiaux: le développement, d'une part, d'un modèle statistique de prévision de trajectoire de cyclone et d'autre part, un modèle d'intensité (en cours d'évaluation). Les résultats obtenus avec MOCCANA, dans sa version actuelle, montrent qu'il est très compétitif par rapport au modèle de référence actuel sur l'ensemble des bassins cycloniques. Son utilisation en mode opérationnel est effective depuis la saison cyclonique 1999-2000. J'ai également implanté ce code en Martinique à la Direction Inter Régional des Antilles-Guyannes de Météo-France en juin 2000. Il sera exploité pour la saison cyclonique qui vient de débuter dans cette partie du monde.

3.5 Publications et communications sur le sujet

1. **Bessafi, M.**, F. Pignolet, 1999: Développement d'un programme d'analyse statistique de prévision de trajectoire de cyclone. Note de Centre N°1, DIRRE, Météo-France, 44pp.

2. **Bessafi, M.**, Lasserre-bigorry, A., 2000: MOCCANA performance and comparison with CLIPER model. *AMS, 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meterology,* Fort Lauderdale.

3. **Bessafi, M.**, Lasserre-Bigorry A., Pignolet-Tardan, F., Payet, D., Lee-Ching-Ken, M., 2000: MOCCANA a new statistical tropical cyclone forecasts: comparison with CLIPER in seven major ocean basins, *submitted to Weather and Forecasting,* septembre 2000.

4. Soulan, I., **Bessafi, M.**, El-Khatib, R., Willemet, J. M., 2000: Two initialisation (bogussing) techniques used at METEO-FRANCE to improve tropical cyclone track. AMS, 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meterology, Lauderdale.

5. Soulan, I., **Bessafi, M.**, El-Khatib, R., Willemet, J. M., 1999: Bogussing pour l'amélioration de la prevision des cyclones tropicaux sur Arpège. *Atelier de Modélisation de l'Atmosphère,* Toulouse.

3.6 Bibliographie générale

1. Crutcher, H.L., 1971: Atlantic tropical cyclone statistics. NASA Contact report NASA CR-61355, National Aeronautics and Space Administration, George C. Marchall Space Flight Center, Huntsville, Al., 16 pp.

2. Fraedrich, K., Leslie, L. M., 1989: Estimates of cyclone track predictability. I: Tropical cyclones in the Australian region. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 79-92.
3. Hope, J.R., C.J. Neumann, 1970: An operational technique for relating the movement of existing tropical cyclones to past tracks. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, N°12, 925-933.

4. Keenan, T.D., 1985: An investigation of statistical forecasting of tropical movement in the Australian region. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 463-475.

5. Leftwich, P. W., and C. J. Neumann, 1977: Statistical guidance on the prediction of eastern North Pacific tropical cyclone motion. Part 2. NOOA Tech. Memo. NWS WR-125, 15 pp. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **65**, 223-231.

6. Lorenz, E.N., 1956: Empirical orthogonal function and statistical weather prediction. Sci. Rep. 1, Statistical Forecasting Proj., Dept. Meteor., MIT, 48pp.

7. Miller, B.I., E.C. Hill and P.P. Chase, 1968: Revised technique for forecasting hurricane motion by statistical methods. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 540-548.

8. Miller, R.G., 1962: Satistical Prediction by discriminant Analysis; Meteor. Monogr., N°25, Boston, Massa., Amer. Meteor. Soc., 54 pp.

9. Neumann C. J., 1972: An alternate to the HURRAN tropical cyclone forecast system. NOAA Tech. Memo. NWS SR-62, 32pp.

10. Neumann C. J., J.R. Hope, 1973: A diagnostic study on the statistical Predicatbility of tropical cyclone motion. *J. Apll. Meteor.*, **12**, 62-73.

11. Neumann C.J , E.A. Randrianarison, 1976: Statistical Prediction of Tropical Cyclone Motion over the Southwest Indian Ocean. *Mon. Wea. Rev.*,**104**, 76-85.

12. Peak, J.E., and R.L.,Elsberry, 1986: Prediction of tropical cyclone turning and acceleration using Empirical Orthogonal Function representation. *Mon. Wea. Rev.*,**114**, 156-164.

13. Preisendorfer, R.W., 1988: Principal Component Analysis in meteorology and oceanography. Elsevier, 425 pp.

14. Rinne, J., and V. Karhila, 1979: Empirical orthogonal functions of the 500 mb height in the Northern Hemisphere determined from a large data sample. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **105**, 873-884.

15. Shaffer, A.R., and R.L. Elsberry, 1982: A statistical-climatological tropical cyclone track prediction technique using an EOF representation of the synoptic forcing. *Mon. Wea. Rev.*,**110**, 1945-1954.

16. Shapiro, L.J., and C.J., Neumann, 1984: On the structure and orientation of grid systems for the statistical prediction of tropical cyclone motion. *Mon. Wea. Rev.*,**112**, 188-199.

17. Xu, Y., and C. J. Neumann, 1985: A statistical model for the prediction of western North Pacific tropical cyclone motion (WPCLPR). NOAA Tech. Memo. NWS-NHC 28, National Hurricane Center, Miami, FL, 30 pp.

4 Conclusion et perspectives

Ce mémoire présente certes un travail personnel mais je dois en grande partie les résultats qui y figurent à mes doctorants, lesquels ont contribué pour une large part au dynamisme de notre laboratoire et, pour ma part, à mon épanouissement.

Depuis le 1er octobre 1991 jusqu'à aujourd'hui, j'ai vécu la formidable expansion de l'université de La Réunion. Arrivé dans un tel environnement, il y avait beaucoup de choses à faire dans le département de physique-mécanique, le Laboratoire de Thermique et Energétique Solaire (maintenant le LPA) et l'université.

Apprendre à structurer mon activité de recherche, définir des thématiques, me former à l'encadrement des doctorants, faire l'exercice des collaborations, assurer une adéquation et une cohérence entre mon activité de chercheur et celle d'enseignant, ont été mes préoccupations majeures pendant ces 10 ans au sein de l'université. Compte tenu de la jeunesse de notre laboratoire dans le domaine de la physique de l'atmosphère, du faible effectif par rapport au nombre élevé de sujets abordés, j'ai également privilégié un rôle transversal en ne travaillant pas uniquement sur le thème de l'ozone troposphérique et des cyclones.

En terme de production scientifique, j'ai eu toujours le souci de privilégier l'accompagnement de mes thésards par une valorisation de leur travail au travers de publications afin qu'ils puissent également étoffer leur dossier scientifique en vue d'une qualification ou d'un recrutement.

Mon activité au sein du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère a pris un tournant majeur en janvier 1998 où jusqu'ici l'essentiel de mon exercice était de consolider la thématique de l'ozone troposphérique parmi les principaux axes de recherche du laboratoire.

Aujourd'hui, mes perspectives et aspirations ont quelque peu évolué dans la mesure où mon centre d'intérêt est devenu plus ciblé qu'auparavant (cyclones) en évoluant au sein de Météo-France (CRC/DIRRE). La thématique sur la prévision statistique de trajectoire de cyclone était une étape qui est arrivé à son terme. Au-delà de ce terme, je poursuis le travail d'évaluation des performances du modèle de prévision d'intensité des cyclones.

Nous avons, depuis l'année dernière au sein de la CRC, initié un thème sur l'inversion du tourbillon potentiel en vue d'une application aux systèmes dépressionnaires tropicaux. Un stage de DEA a pu être réalisé (Payet, 2000). Le développement d'un tel outil d'inversion permettrait d'apporter des éclaircissements sur les processus de grande échelle, les couplages basse et haute altitude contribuant au cycle de vie d'un cyclone.

La Cellule Recherche Cyclone a fait l'objet d'une évaluation par un comité scientifique au mois de juillet 2000 et le sujet sur l'inversion du tourbillon a notamment été retenu comme sujet de recherche à poursuivre sur les trois années qui viennent. Un projet de thèse devrait donc démarrer courant octobre 2000. J'en serais le responsable scientifique en collaboration avec le groupe RECYF/GMME de Météo-France (P. Arbogast).

De plus, il est important de souligner que la collaboration entre la CRC/DIRRE et l'université de La réunion aura permis d'une part, d'accueillir des stagiaires de maîtrise de physique (5 étudiants pour les deux dernières promotions 1998-2000), et de contribuer à permettre aux étudiants de l'université de se présenter au concours d'entrée à Météo-France (concours niveau maîtrise) à La Réunion (reconnue comme centre de concours depuis cette année).

Pour conclure, ce mémoire est résolument une ouverture vers l'avenir dans ma carrière d'enseignant-chercheur avec comme ambition affichée de poursuivre mon activité sur les cyclones et d'inscrire ma démarche initialement isolée comme le début d'une longue collaboration entre l'université de La Réunion et Météo-France sur les cyclones tropicaux.

5 Annexes 1

5.1 Activités pédagogiques et charges d'enseignement

Mon affectation d'enseignement au sein du département de physique-mécanique en 1991 se situe dans un contexte particulier avec la création de 4 filières de second cycle en trois ans (Licence de Physique et applications [1990], maîtrise de physique et applications [1991], Licence de Technologie mécanique [1992] et Licence d'Ingénierie Electrique [1992]) et l'émergence depuis 1989 d'une nouvelle thématique de recherche (physique atmosphérique) au sein du Laboratoire LTES (Laboratoire de Thermique et Energétique Solaire) avec le professeur Leveau (Section 62) comme directeur. De ce laboratoire émergera en 1993 deux laboratoires distincts le LGI (Laboratoire de Génie Industriel) et le LPA (laboratoire de Physique de l'Atmosphère). C'est donc sous la direction du professeur Leveau directeur du LTES et directeur du département de physique-mécanique en septembre 1991 que je me suis vu confié mes activités pédagogiques. Les tableaux suivants résument de façon synthétique l'ensemble de mes activités d'enseignant au sein de l'université de la Réunion pour chacune des années universitaires pendant la période 1991-2000.

91-92
Effectif du département: 14
3 Professeurs/6 MCF/ 5 PRAG

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37 (1)
1er CYCLE	0	37	37	29	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	53	34	57	71	1 MCF (M. Bessafi)
	53	71	94	11 (2)	

(1) Membre de la section représenté au sein du département de physique-mécanique
(2) Pourcentage Heures Complèmentaires ETD

Outre l'enseignement en première année de la mécanique générale, j'ai eu , au cours de ma première année à l'université de La Réunion, à mettre en place trois enseignements (Analyse Numérique, Laser et Traitement d'Images) au sein de filières nouvellement crées (Licence [1990] & maîtrise Physique et Applications [1991]). Cette mise en place portait sur l'élaboration d'un cours magistral, la constitution d'un ensemble d'exercices illustrant les thèmes abordés en cours et enfin la création de travaux pratiques. Pour ce dernier aspect, l'ensemble des travaux pratiques portait sur des expériences sur les lasers (cohérence spatiale, cohérence temporelle, stabilité des cavités, modes TEM) et le traitement d'image (seuillage, transformation d'histogramme, filtrage spatial: lissage, détection de contour, passe-bande). Ce travail a mobilisé la majorité de mon temps au cours de cette année car je ne disposais d'aucun support au sein du département sur lequel j'aurais pu baser mon enseignement. Il s'agissait pour moi d'une création complète de trois enseignements au sein de ces deux filières de second cycle. On pourra noter que la majorité de mes activités d'enseignement portaient sur des domaines qui sont relativement éloignés de ma spécialité initiale qui est la mécanique des fluides. Il est utile de rappeler que ces deux composantes de la filière Physique & Applications sont à l'origine d'une série de filières de second cycle crées au département de Physique-Mécanique (Licence de Technologie Mécanique [1991], Licence d'Ingénierie Electrique [1992]).

92-93
Effectif du département: 15
[3 Professeurs/7 MCF/ 5 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	0	37	37	21	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	79	74	57	79	1 MCF (M. Bessafi)
	79	111	94	52	

C'est une année qui s'effectue en continuité de la précédente, si ce n'est que j'ai eu à m'impliquer dans la mise en place d'un module d'analyse numérique au sein d'une filière nouvellement crée (Licence d'Ingénierie Electrique). J'ai également eu à dispenser un cours sur l'optique physique en Licence de Sciences Physique. Il y a au total, une augmentation horaire de mes activités d'enseignement de l'ordre de 30%. J'ai également été nommé responsable de la physique pour la filière DEUG Sciences et Structures de la Matière en première année. Ma tâche consistait à organiser et assurer le bon fonctionnement des enseignements de physiques (gestion des groupes Cours, TD, TP, examens, jury, chargés de cours) dans cette filière.

93-94
Effectif du département: 17
[4 Professeurs/8 MCF/ 5 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	0	37	44	27	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	53	50	79	73	1 MCF (M. Bessafi)
	53	87	123	30	

Il y a eu cette année la suppression du module "Laser" en maîtrise de physique et Applications, ce qui a permis de me libérer d'un certain nombre d'heure d'enseignement. Je me suis rapproché des premières années en raison de mes fonctions de responsable de physique en SSM1. J'ai à ce titre réorganisé entièrement les TD et TP en SSM1. Compte tenu de mon implication en mécanique générale dans cette première année, j'ai pris en charge la rédaction d'un fascicule de TD "mécanique" permettant aux étudiants de disposer d'un recueil d'exercices et de problèmes pouvant être traités chez eux. De plus, j'ai été nommé au sein du département comme représentant de physique-mécanique pour mener au niveau de la Faculté des Sciences le projet de réforme du DEUG (pour ma part, j'avais en charge la réforme concernant les DEUG SSM de l'époque). J'ai essentiellement coordonné et organisé les ambitions de notre département en matière de programmes et de contenu pédagogique.

94-95
Effectif du département: 19
[4 Professeurs/10 MCF/ 5 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	0	73	37	41	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	41	25	79	59	2 MCF (M. Bessafi + P. Bremaud)
	41	98	116	23	

Le département de physique-mécanique pour cette rentrée universitaire propose aux étudiants une nouvelle formation à caractère technologique en premier cycle (DEUG de Sciences et technologies mention "Génie des Systèmes" & "Génie des Procédés"). J'ai eu en charge l'enseignement de la mécanique générale de cette filière.

95-96
Effectif du département: 21
[4 Professeurs/12 MCF/ 5 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	25	73	52	50	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	42	50	49	50	2 MCF (M. Bessafi + P. Bremaud)
	67	123	101	52	

Cette année à vu le rééquilibrage de mes enseignements entre le premier(mécanique) et le second cycle(optique physique et Traitement d'images). J'ai été nommé responsable pédagogique de la Licence de Sciences Physiques et j'ai donc abandonné mon poste de responsable de Physique en première année.

96-97
Effectif du département: 23
[4 Professeurs/13 MCF/ 6 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	22	48	60	52	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	33	16	70	48	2 MCF (M. Bessafi + P. Bremaud)
	55	64	130	21	

Une Année charnière pour ma part avec la mise en route de la réforme du DEUG et d'une réorganisation de la Licence de Physique, j'ai eu l'opportunité d'exercer pour la première fois des enseignements en liaisons directes avec ma section (ici mécanique des fluides). J'ai de façon logique libéré dans le même temps mes heures d'optique et de traitement d'images. L'enseignement de mécanique des fluides en premier cycle représente 19% ETD de mon enseignement et 12% ETD pour le second cycle.

97-98
Effectif du département: 25
[4 Professeurs/15 MCF/ 6 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	22	48	34	51	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	20	8	93	49	3 MCF (M. Bessafi / P. Bremaud / H. Bencherif)
	42	56	127	6	

J'ai consolidé mon ancrage dans l'enseignement de la mécanique des fluides en continuité avec l'année précédente avec un enseignement de mécanique tout en limitant les surcharges horaires. 24% 1er cycle et 21% en 2ème cycle

98-99
Effectif du département: 26
[4 Professeurs/16 MCF/ 6 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	32	58	44	49	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	40	25	87	51	4 MCF (M. Bessafi / P. Bremaud / H. Bencherif / A Rechou)
	72	83	131	45	

99-00
Effectif département: 27
[4 Professeurs/17 MCF/ 6 PRAG]

FILIERE	C	TD	TP	% ETD	Section CNU 37
1er CYCLE	32	44	22	50	1 Professeur (S. Baldy)
2nd CYCLE	48	32	5	50	4 MCF (M. Bessafi / H. Bencherif / A Rechou/ F. Posny)
	80	76	27	11	

J'ai eu en charge l'enseignement de la mécanique des fluides en deuxième année d'IUP agro-alimentaire nouvellement créé [1998].

En résumé, ces dix années d'activité montrent qualitativement la charge pédagogique que j'ai eue à assumer. Ce fut, à certain moments, un engagement de tous les instants pour concilier mes motivations d'enseignant et mes ambitions de chercheur.

5.2 Activités administratives

5.2.1 Département de Physique-Mécanique

Ma toute première activité administrative au sein de ce département fut régisseur d'avance. Cette activité initiale fut assurée de 1991 à 1993 où l'essentiel de ma fonction consistait à assurer un lien entre l'agent comptable et notre département sur l'engagement de dépenses particulières relevant d'une régie d'avance. Outre cette tâche, j'ai pris en charge l'organisation et la gestion du DEUG Sciences et Structures de la Matière 1ère année. Mon travail portait sur la réflexion pédagogique de nos enseignements de physique effectués dans cette filière, ainsi que sur les prospectives pédagogiques découlant de cette réflexion. Au-delà

de cet aspect, j'ai du effectuer un travail au quotidien d'organisation des emplois du temps des collègues, gérer les notes et assurer la représentation du département de physique-mécanique dans les jurys de fin d'année. J'ai assumé cette tâche pendant trois années consécutives (1992-1995). Dans le même temps, suite à l'élection d'un nouveau directeur de département de physique-mécanique en 1992, j'ai été nommé par le directeur nouvellement élu (Jean-Daniel LanSunLuk) responsable de la gestion des services enseignants du département. J'ai donc assuré pendant tout le mandat (1992-1994) de cette direction la gestion des services individuels, l'évaluation de la charge horaire d'enseignement et la définition des besoins humains du département. Compte tenu de mon implication en 1ère année Sciences et Structures de la Matière, j'ai représenté le département de physique-mécanique au sein de la Faculté des sciences et technologies pour mettre en place la réforme des DEUG. De 1993 à 1995, j'ai participé aux diverses réflexions menées au sein des conseils de faculté et fait des propositions sur la définition des programmes, les contenus de physique et les programmes pour les filières SM, MISS, MIAS.

En 1999, j'ai été élu directeur-adjoint du département de physique-mécanique où je suis particulièrement en charge de la politique pédagogique du département.

5.2.2 Université

En 1995, j'ai été nommé par le Président de l'université, le professeur Patrick Hervé, chargé de mission des affaires culturelles de l'université. Pendant deux années, nous avons mis en place une commission des affaires culturelles dont j'ai assuré la présidence. Ma fonction consistait à mettre en place une politique de développement d'activités culturelles au sein de l'université (journées culturelles, ateliers artistiques: théâtre, danse, peinture,...), de partenariat avec les institutions locales (CROUS, associations étudiantes, Office Départemental de la Culture, Direction Régionale des Affaires Culturelles, Conservatoire National de Région, Rectorat,...) et nationales (universités, associations étudiantes, ...), d'accompagnement de projet étudiants(concerts, ciné-club, conférences-débats). J'ai également initié une politique d'échange d'étudiants autour de certaines activités (concours, festivals, spectacles,...) et fait aboutir un certain nombre de conventions entre l'université et des structures culturelles extra-universitaires (Espace Jeumon, Théâtre Fourcade, ...). J'ai organisé et coordonné un ensemble de manifestations culturelles au sein de notre université (les trois journées culturelles, des spectacles de théâtre et de musique, etc...).

De 1992 à 1996, j'ai été membre élu du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaires (CEVU).

S.C.D. REUNION

6 Annexes 2

6.1 Curriculum Vitae

Nom patronymique: **BESSAFI** Prénom: **Miloud**
Date et lieu de naissance: **06/10/61 à UXEAU(71)**
Nationalité: **Française**
Situation de famille: **Vie maritalement – 1 enfant**
Grade: **MCF.1C**
Date de nomination: **01/10/91**
Date de promotion d'échelon: **01/08/96**
Adresse personnelle: **2 Chemin des Fougères**
La Bretagne
97490 Ste Clotilde
N° de téléphone: **52 58 44**

TITRES UNIVERSITAIRES FRANCAIS

1983 DEUG A à l'université Paul Sabatier de Toulouse
1984 Licence de mécanique à l'université Paul Sabatier de Toulouse
1985 Maîtrise de mécanique à l'université Paul Sabatier de Toulouse
1986 DEA en Mécanique des fluides à l'Institut de Mécanique des Fluides de Marseille. Major de promotion.
1990 Doctorat nouveau régime
Spécialité: Mécanique des fluides
Titre: Modélisation bidimensionnelle des phénomènes aérothermodynamiques instationnaires induits dans un laser à exciplexe répétitif.
Date et lieu de soutenance: 29 mars 1990 à l'Institut de Mécanique des Fluides de Marseille
Directeur de thèse: Bernard Fontaine et Bernard Forestier (Directeurs de recherche au C.N.R.S., UM 34 C.N.R.S.)

6.2 Autres travaux

1. Denis, D., T. Portafaix, A. Sarkissian, J.P. Pommereau, F. Goutail, **M. Bessafi**, S Baldy, J. Leveau, P. Johnston, A.W. Matthews, 1995: SAOZ total O3 and NO2 at the southern tropics and equator. *Third European Symposium on Polar Stratospheric Ozone*, Schliersee (Allemagne), septembre.

2. F. Molinaro ; H. Bencherif , **M. Bessafi**, 1995: Analyse temps-fréquence du signal rétrodiffusé d'un Lidar pour l'étude des ondes de gravité dans l'atmosphère.*15 ème Colloque GRETSI (Traitement du signal et des Images)*, Juan les Pins, Septembre.

3. F. Molinaro, H. Bencherif , **M. Bessafi**, J. Leveau, 1996: Time-frequency analysis of backscattered Lidar signal to study atmosphere dynamics.*IGARSS' 96 (International Geoscience and Remote Sensing Symposium)* Nebraska, (U.S.A.).

4. H. Bencherif, P. Keckhut, A. Hauchecorne, J. Leveau, G. Megie, **M. Bessafi**, 1996: Lidar developments and observations over Réunion island. *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar.* Selected papers of the 18th International Laser Radar (ILRC), Berlin 22-26 july 1996, Eds. Andsmann, Neuber, Rairoux, and Wandinger.

5. F. Molinaro, H. Bencherif, **M. Bessafi**, 1996: Time-frequency analysis of lidar signal to obtain atmospheric gravity waves characteristics. *VIII European Signal Processing Conference*, Trieste (Italie), septembre.

6. L. Denis, J.P. Pommereau, F. Goutail, T. Portafaix, **M. Bessafi**, S Baldy,P. Johnston, A.W. Matthews, a. Buivan, 1996: Total O3 and NO2 at the southern tropics and equator. *XVIII Quadrennial Ozone Symposium'96*, L'aquila (Italie), septembre.

6.3 ENCADREMENTS

6.3.1 Responsable Stage de D.E.A.

1. Tantely Randriambello, **1994**: Analyse des données satellitaires d'ozone pour la zone de l'océan indien et des données d'ozone obtenues par radiosondages à la Réunion. *DEA de physique (option: atmosphère)* de Clermont-Ferrand.

2. Jean-Luc Baray, **1995**: Etude des échanges stratosphère-troposphère en zone tropicale pendant la période d'hiver austral. *DEA de physique (option: atmosphère)* de Clermont-Ferrand.

3. Laurent Sauvage, **1995**: Mise en place d'une deuxième voie d'acquisition du signal Lidar de l'île de la Réunion pour l'étude des aérosols dans les basses couches de l'atmosphère. *DEA d'astrophysique et techniques spatiales* de Paris VI.

4. David Payet, **2000**: Utilisation du tourbillon potentiel dans l'études cyclones tropicaux. *DEA Océan, Atmosphère, Environnement* de Université Paul Sabatier, Toulouse.

5. David Barbary, **2000**: Développement d'un modèle statistico-dynamique de prévision d'intensité des cyclones tropicaux. Stage d'approfondissement de fin d'étude de l'Ecole Nationale de la Météorologie.

6.3.2 Thèses

6. Fabienne Taupin(**1994**); **60%**: Analyse et modélisation de la variabilité de l'ozone troposphérique en zone tropicale – Influence du brûlage de biomasse. *Thèse nouveau régime* de l'Université de Clermont-Ferrand II. **Soutenue le 13/12/97 et membre du jury**.

7. Tantely Randriambello(**1995**); **30%**: Analyse des données satellitaires d'ozone pour la zone de l'océan indien et des données d'ozone obtenues par radiosondages à la Réunion. *Thèse nouveau régime* de l'Université de La Réunion. **Soutenue le 7/12/98**.

8. Jean-Luc Baray(**1996**); **20%**: Etude des échanges stratosphère-troposphère en zone tropicale pendant la période d'hiver austral. *Thèse nouveau régime* de l'Université de Paris VI. **Soutenue le 24/9/99 et membre du jury**.

9. Chatrapatty Bughwant(**1996**); **40%**: Etude physico-chimique des aérosols de combustion et d'ozone dans la troposphère tropicale et la couche limite marine au sud-ouest de l'Océan Indien. *Thèse nouveau régime* de l'Université de La Réunion. **Soutenance prévue fin 2000 et membre du jury**.

10. Richard Lorion, (**1997**); **30%**: Applications des algorithmes génétiques à la caractérisation thermique des matériaux. *Thèse nouveau régime* de l'Université de La Réunion. **Soutenance le 02/06/00 et membre du jury**.