



**HAL**  
open science

# Variabilité du Réservoir Stratosphérique Tropical Ozone et rayonnements UV en région tropicale

Thierry Portafaix

► **To cite this version:**

Thierry Portafaix. Variabilité du Réservoir Stratosphérique Tropical Ozone et rayonnements UV en région tropicale. Océan, Atmosphère. Université de la Réunion, 2019. tel-02480579v2

**HAL Id: tel-02480579**

**<https://hal.univ-reunion.fr/tel-02480579v2>**

Submitted on 25 Feb 2020

**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.



Mémoire d'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

## Variabilité du Réservoir Stratosphérique Tropical Ozone et rayonnements UV en région tropicale

**Thierry PORTAFAIX**

Soutenance le 16 Décembre 2019

### Composition du jury :

<b>Rapporteurs</b>	Dr Alain HAUCHECORNE Dr Philippe RICAUD Dr Jean-Luc BARAY	DR CNRS LATMOS, Paris DR CNRS CNRM, Toulouse Physicien Adj. LAMP, Clermont F <sup>d</sup>
<b>Examineurs</b>	Dr Sophie GODIN-BEEKMANN Pr Hassan BENCHERIF	DR CNRS LATMOS, Paris Professeur, LACy, Réunion

## REMERCIEMENTS :

---

Ces presque 25 années passées l'Université de la Réunion au LPA puis au LACy, m'ont données l'occasion de croiser la route et de travailler avec de nombreuses personnes. Il me sera difficile de toutes les remercier et je m'excuse par avance de mes oublis.

Pour commencer, je souhaite manifester ma reconnaissance à Jean-Pierre Pommereau sous la direction de qui j'ai effectué mon DEA en 1994 et sans qui je ne serais sûrement pas aujourd'hui à la Réunion.

Ma reconnaissance et ma sincère gratitude vont à Serge Baldy et Sophie Godin-Beekmann, mes 2 directeurs de thèse, qui m'ont soutenu et encadré pendant mon doctorat, puis sont devenus des partenaires de recherche de qualité.

Je remercie l'ensemble de mes collègues anciens et actuels du LPA et du LACy, et également ceux de l'UMS 3369 : enseignants-chercheurs, chercheurs, personnels ingénieurs, techniciens, et gestionnaires.

Un remerciement plus appuyé pour les anciens directeurs et en particulier pour Jean-Leveau. Je remercie tout particulièrement Pierre Tulet, le directeur actuel du LACy, pour avoir su me remettre le pied à l'étrier après ma longue période de détachement et d'arrêt maladie.

Un grand merci à Sandrine Prunier pour sa disponibilité sans faille et sa bienveillance.

Je remercie mes collègues les plus proches, c'est à dire ceux de mon équipe et tout particulièrement Hassan Bencherif qui a su tenir la barre de l'équipe pendant si longtemps et qui me fait l'honneur aujourd'hui de me passer le flambeau.

Merci à Franck, mon ami très proche et très cher, qui m'a accompagné tout au long de mon parcours universitaire. Il a toute ma gratitude pour tous les bons moments passés ou à venir...

Pour finir, j'adresse une tendre pensée à ma femme Lila, à mes 2 enfants, à mes parents et à ma famille proche qui sont mon principal soutien dans tout ce que j'entreprends.

# RESUME DE MEMOIRE de HDR

## T. Portafaix - 2019

Dans l'introduction générale (chapitre 1), une synthèse chronologique de la carrière de T. Portafaix est présentée. L'activité de recherche de M. Portafaix s'est déroulée au cours de 2 périodes distinctes séparées par un période de 5 ans environ où M. Portafaix a été, en particulier, détaché au ministère des affaires étrangères sur une mission d'appui au système de recherche et d'enseignement supérieur au Burkina Faso.

La description du travail de recherche est séparée en 3 chapitres. Le chapitre 2 décrit les activités instrumentales. L'accent y est mis sur la responsabilité du lidar DIAL ozone stratosphérique de l'observatoire du Maïdo, et également sur la création et le pilotage d'un réseau de mesures dans l'Océan Indien (UV-Indien) impliquant 5 pays, 8 stations de mesures, et 17 instruments. Les chapitres 3 est dédié à l'analyse de l'évolution de l'ozone stratosphérique à la Réunion et dans les tropiques sud. Différentes méthodes et outils d'analyse de mesures ont été développées et sont présentés ici. On peut citer le code DyBal et l'algorithme des K-Means permettant la détection des barrières stratosphériques au transport. Pour l'études des tendances, diverses méthodes ont été explorées au LACy et appliquées à des longues séries d'observation. Récemment la méthode EMD (Empirical Model Decomposition) a permis la décomposition du signal en ses composantes significatives sans connaissance à priori sur les forçages. Le chapitre 4 présente les travaux de recherche sur la variabilité du rayonnement UV au sol en région tropicale. Ce chapitre présente les éléments qui contrôlent la variabilité diurne du RUV et également les évolutions futures de ces rayonnements aux tropiques, sous l'effet du changement climatique et de l'accélération de la circulation de Brewer-Dobson.

Le chapitre 5 expose les conclusions et les perspectives des thématiques de recherche exposées auparavant, à la fois sur le volet dynamique de la stratosphère et l'étude de l'élargissement du réservoir tropical, et également sur la thématique du rayonnement UV à l'échelle de l'Océan Indien.

Ce mémoire essaye de montrer la cohérence entre l'implication en matière instrumentale (avec la responsabilité scientifique de divers instruments ou réseaux de mesures) et les activités de recherche portant sur l'évolution de l'ozone et du rayonnement ultraviolet en région tropicale sud. Le premier axe d'activité permet d'alimenter le deuxième en données et mesures dédiées. Parallèlement, de nombreux outils ou méthodes originales d'analyse de données ont été développées.

# Variabilité du Réservoir Stratosphérique Tropical Ozone et rayonnements UV en région tropicale

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>Sommaire</b>	<b>3</b>
<b>1. Introduction générale</b>	
• Synthèse de carrière	5
• Contexte scientifique général et plan du manuscrit	11
<b>2. Expertise en matière instrumentale</b>	
2.1 Contexte local : l'OPAR et les mesures atmosphériques à la Réunion	14
2.2 Mesure de l'ozone	
2.2.1 Le lidar ozone stratosphérique	16
2.2.1.1 Validation du lidar $LiO_3s$ dans le cadre du réseau NDSC puis NDACC ; campagne MORGANE	
2.2.1.2 5 années de mesures en routine d'ozone au Maïdo	
2.2.2 Implication dans les autres mesures d'ozone à l'OPAR	26
2.3 Mesure des Rayonnements UV à la Réunion et dans la zone Océan Indien	
2.3.1 Le spectro-radiomètre Bentham	27
2.3.2 Les radiomètres UV large bande	28
2.3.3 Le réseau $UV_{indien}$	29
2.4 Travaux	35
Baray et al., 2006	
Baray et al. 2013	
Portafaix et al., 2003	
Hubert et al., 2016	
Fernandez et al. 2016	
Pastel et al., 2014	
Tohir et al., 2015	
<b>3. Etude de la variabilité du réservoir stratosphérique tropical :</b>	
- Variabilité et tendances de l'ozone	
- Etude des barrières stratosphériques tropicales.	
3.1. Introduction	43
3.2. Outils numériques pour l'étude des barrières dynamiques	
3.2.1. MIMOSA et DyBal	45
3.2.2. Méthode des K_Means	50
3.3. Outils numériques pour l'étude des tendances :	
3.3.1. Trend_Run	54
3.3.2. EEMD	59
3.4. Travaux:	64

Portafaix 2001 (Thèse)  
 Portafaix et al., 2003  
 Bencherif et al. 2003  
 Morel et al., 2005  
 Bencherif et al., 2006  
 Sivakumar et al, 2007  
 Kirgis 2008 (Document de Thèse – Thèse encadrée)  
 Bencherif at al., 2011  
 Toihir 2015 (Document de Thèse - Thèse encadrée)  
 Begue et al., 2017  
 Sivakumar et al., 2017  
 Toihir et al., 2018  
 Perez et al., 2017

<b>4. Variabilité et tendance des rayonnements UV au sol en zone tropicale sud</b>	
4.1 Introduction	79
4.2 Évaluation du rayonnement UV à la Réunion, à partir des données sol et de la modélisation	83
4.3 Évolution climatique des UV dans les tropiques sud	90
4.4 Travaux :	96
Cadet al., 2017	
Lamy 2018 (Thèse encadrée)	
Lamy et al., 2018	
Lamy et al., 2019	
Cadet et al., 2019	
<b>5. Conclusions et perspectives</b>	<b>102</b>

## **Annexes**

Annexe 1 : Liste de mes publications et communications	105
Annexe 2 : Publications référencées dans le texte	111
Annexe 3 : Encadrement de thèses – Résumé	116
Annexe 4 : Innovation et valorisation par le numérique	122
Annexe 5 : Liste des Acronymes	123
Annexe 6 : Abstract	125

# CHAPITRE 1

## Introduction générale

- Synthèse de carrière
- Points saillants, responsabilités passées et actuelles
- Activité scientifique générale et plan du manuscrit

### *Synthèse de carrière :*

#### En chiffres :

Publications de rang A : 24

Conférences ACL : 43

Thèses encadrées : 2 en encadrant principal soutenues (6 en tout)

Mandats électifs : 5 (3 en cours)

Responsabilités pédagogiques d'année : 2 (L1 Geosciences et Master 1)

Responsabilité adjointe de département d'enseignement

Responsabilités instrumentales : 9 dont 3 instruments labélisés NDACC

Responsabilité de réseau international de mesure : 1

Projets de recherche écrits et portés : 8

Projets de recherche participation : 15

Films et produits valorisation : 9

Ma carrière dans la recherche et l'enseignement supérieur a débuté en 1994 par un DEA en « Télédétection et Techniques Spatiales » de l'Université Paris 6. Mes obligations militaires effectuées comme Ingénieur de recherche (VAT) au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de l'Université de la Réunion (UR) en 1995-1996, m'ont permis d'obtenir une très bonne expertise sur les instruments de mesure atmosphérique telles que les mesures par radiosondage météorologiques et ozono-sondage (ECC), les mesures par spectrophotométrie (SAOZ) et les différents types de mesure par lidar (Rayleigh, Raman ...).

J'ai ensuite effectué ma thèse de doctorat à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 (1998-2001) intitulée « Ozone stratosphérique en zone tropicale sud, transport méridien et effets de barrières dynamiques », sous la direction de Sophie Godin-Beckmann (DR1- LATMOS/IPSL) et du Pr Serge Baldy (Université de la Réunion). Au cours de ma thèse, j'ai pris la responsabilité de l'installation et de l'exploitation scientifique d'un lidar DIAL ozone stratosphérique, construit en partenariat entre l'Université de Genève et le Service d'Aéronomie (devenu depuis le LATMOS) CNRS, puis installé en juin 2000 à l'université de la Réunion. Cet instrument a très vite été qualifié pour le réseau international de mesure NDACC dédié à l'Observation des changements atmosphériques.

Installé depuis décembre 2012 à l'observatoire atmosphérique du Maïdo, cet instrument fait partie du Service National d'Observation NDACC et j'en assure la responsabilité scientifique (PI). Cette responsabilité consiste à assurer le financement pérenne, le traitement des mesures, la livraison des données validées sur les réseaux internationaux et enfin l'exploitation et la valorisation scientifique.

Après 2 années comme ATER à l'Université de la Réunion (UR), j'ai été recruté comme Maître de Conférences en septembre 2003 au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, aujourd'hui LACy-UMR 8105, et à l'UFR Sciences et Technologie de l'UR.

Durant les 4 années de carrière qui ont suivi, j'ai pris la responsabilité pédagogique de la L1 Sciences de la Terre et de l'Atmosphère (au moment du passage au LMD en 2006-2007) et j'ai également été directeur adjoint élu du département de Physique (2005-2007), avec une implication toute particulière dans la coordination du passage au système LMD pour les filières Physique.

Durant cette période, j'ai encadré un étudiant en DEA (Guillaume Kirgis - 2005) puis en doctorat (2005-2008) sur le sujet « Evaluation du transport isentropique à travers la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l'hémisphère sud ». Cet étudiant travaille aujourd'hui à la NOAA comme chercheur permanent (Boulder - Colorado). J'ai également écrit différents projets de recherche en particulier dans la zone Océan Indien (Projet ROCK - campagne de radiosondages- ECC aux Kerguelen – (Bencherif et al., 2011)).

A partir de novembre 2007 et jusqu'à fin 2011, je suis parti 4 années en détachement au ministère des affaires étrangères, en poste au Burkina Faso, sur une mission d'appui au système d'enseignement supérieur et de la recherche du Burkina Faso. Parmi mes nombreuses responsabilités, j'ai été en charge de 3 projets sur Fonds de Soutien Prioritaire (RESEAU 4 M€ pour l'appui aux universités du Burkina Faso, le passage au LMD et la relève du corps universitaire, ADER 1.3 M€ appui institutionnel à la Recherche et SIST 500 k€ appui à l'Information Scientifique et Technique dans les pays ACP), dans une équipe de 2 Experts Techniques Internationaux basée à l'Université de Ouagadougou. En lien direct avec le ministère ESR du Burkina Faso et les différents recteurs/présidents des universités de la sous-région Afrique de l'Ouest, cette expérience m'a permis de me familiariser avec les structures universitaires de tutelles, tant françaises qu'africaines, et de mettre en place de très nombreux partenariats interuniversitaires.

Cette expérience d'expatriation m'a été bénéfique et m'a formé à la coopération universitaire internationale. J'ai pu mettre en place des partenariats en formation et recherche entre universités africaines et françaises ce qui m'a été très profitable par la suite. Mes activités de recherche ont diminué pendant cette période mais l'expertise acquise m'a permis de mettre en place par la suite, à mon retour à l'UR, des projets de coopération internationale bénéfiques à



mes activités de recherche et/ou d'enseignement. J'ai réussi néanmoins pendant cette période à travailler sur la fin de la thèse de G. Kirgis (septembre 2008) et sur une publication en 2011 (basée sur les résultats du projet ROCK Radiosondage Ozone Complémentaires aux Kerguelen que j'avais initié avant mon départ en détachement).

Ma réintégration à l'UR début 2012 a été marquée par un accident de santé très important, me laissant éloigné de mes activités académiques durant plus d'un an.

A partir de mi-2013, le retour aux charges d'enseignements et de recherche s'est fait progressivement jusqu'à la fin 2013. Je me suis en particulier fortement impliqué, sur l'installation et la mise en route de l'Observatoire Atmosphérique du Maïdo, avec le déménagement de nombreux instruments dont 4 grands lidars de recherche.

Aujourd'hui, pleinement réintégré au LACy, à l'OSU-Réunion et à la FST, je partage mon temps entre mes activités d'enseignements, de recherche, mes responsabilités administratives et pour finir mes responsabilités instrumentales.

### ***Points saillants, responsabilités passées et actuelles***

Je suis actuellement en charge de divers instruments au sein de l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion) ou en dehors. En particulier, j'ai la responsabilité (ou la co-responsabilité) scientifique de 3 instruments (lidar DIAL ozone stratosphérique, spectrophotomètre UV-Visible SAOZ et spectromètre UV Bentham) intégrés au réseau international NDACC et dont les données partent en quasi-temps réel sur les réseaux mondiaux.

Au cours de ma carrière, j'ai été impliqué dans de nombreux programmes scientifiques. Je porte ou ai porté 8 programmes scientifiques nationaux ou internationaux (OMNCG, Ministère Outre-Mer, Université, Europe, Région). Je participe ou ai participé à plus de 15 projets de recherche autres que ceux que je porte (ANR, Région, GDRI, FEDER, Europe FP7, Europe H2020,...).

Plus récemment, j'ai écrit et porté la création d'un nouveau réseau de mesures d'ozone et d'UV dans l'Océan-Indien Occidental : programme UV-indien. Ce réseau a fait l'objet de divers financements dont le Ministère des Outre-Mer, fédération de Recherche OMNCG, TOSCA/CNES, et surtout un financement Europe/Etat/Région jusqu'à fin 2021. Il sera détaillé par la suite

Sur l'ensemble de ma carrière, j'ai contribué à 24 articles de recherche parus dans des revues internationales ACL (de rang A), dont 7 en premier ou 2<sup>nd</sup> auteur, à 43 communications dans des conférences internationales avec comité de lecture et quelques articles dans des revues nationales (Liste en annexe 1). Récemment, ma production a été de 14 articles de recherche parus au cours la période 2015-2019, c'est à dire après ma reprise d'activité au LACy à la mi-2013.

Concernant mon implication dans la formation par la recherche, j'ai encadré ou co-encadré 3 thèses soutenues :

1. Guillaume Kirgis - (2005-2008) « Evaluation du transport isentropique à travers la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l'hémisphère sud » - financement région Réunion, Encadrant principal. Guillaume Kirgis a été recruté en 2013 comme chercheur permanent au laboratoire CIRES de l'université du Colorado - Boulder (NOAA).
2. Mohamed Tohir Abdoulwahab (2013-2016) « Etude de la variabilité et du transport de l'ozone stratosphérique au-dessus de l'Afrique du Sud et l'océan Indien », financement région Réunion, Encadrement 50%. 3 publications acceptées.
3. Kevin Lamy (2015 –2018), « Impact de la variabilité dynamique de l'ozone stratosphérique sur le rayonnement UV à la Réunion et dans l'Océan Indien Occidental », financement Région Réunion, Encadrant principal - 70%, 3 publications. K. Lamy est aujourd'hui en post-doctorat sur le programme UV-Indien.

Je suis actuellement co-encadrant de 3 autres thèses :

4. Jean-Maurice Cadet (2016 - 2019) « Impact des rayonnements UV sur la santé en zone tropicale sud », financement Région Réunion, Encadrement 40 %, 2 publications acceptées, 1 soumise.
5. Loua Renée Tatou (oct 2016, en cours) « Variabilité et changement des structures dynamiques et thermiques par observations (sol et satellite) et modélisation numérique: interaction troposphère-moyenne atmosphère ». Encadrement 20%.
6. Bibiana Culo Lopez (2018-2021) « Characterization of UV variability in Southern Space Observatory region – Brazil », thèse en co-tutelle avec l'université de Santa Maria au Brésil. Encadrement 40 %

J'ai encadré entre 2003 et 2007, puis entre 2013 et 2018, 6 stagiaires de Master 2 (Master OASC Toulouse, Master RNET Réunion, DEA Méthodes Physiques en Télédétection Paris VII) et de nombreux stagiaires de Master 1.

D'un point de vue responsabilité pédagogique, comme mentionné précédemment, j'ai donc été responsable pédagogique du L1 sciences de la Terre entre 2004 et 2007. J'assure actuellement la responsabilité pédagogique du M1 du nouveau Master R-NET Mention Sciences de la Terre, des Planètes et de l'Environnement, parcours Atmosphère, pour l'habilitation ayant démarré en septembre 2015 et jusqu'à la rentrée 2020. Je participe actuellement à l'écriture du projet d'ouverture en 2020 d'une année de M2 atmosphère du R-NET, en partenariat avec les pays de la région (Madagascar-Comores). Des demandes de financements sont en cours sur appel à projet Européen Erasmus + Capacity Building ou interreg région Réunion.

Je participe activement à la vie collective de l'établissement, grâce à plusieurs mandats électifs. Je suis actuellement membre de la Commission Recherche et du CAc (plénier et restreint) de l'Université, membre élu des conseils de la Faculté des Sciences et Technologies (FST) ou du conseil de l'OSU-R (depuis 2013).

J'ai été directeur adjoint du département de Physique entre 2005 et 2007, en charge de la mise en place du LMD.

J'ai co-organisé et participé à différentes écoles d'été. L'école d'été internationale MOSS (Maido Observatory Summer School - décembre 2016) 'troposphere-stratosphere composition and dynamics' labélisée SPARC (Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate) du programme WCRP, sur 7 jours. On peut citer également la co-organisation de 2 écoles d'été TRN (Télé-détection et Risques Naturels) en Afrique du Sud de niveau master pour des étudiants de la région Océan Indien et dans le cadre du master International TRN (2014-2015).

Je suis membre de différents **groupes de recherche et de réseaux d'observation nationaux et internationaux** :

- Groupe de Recherche International **ARSAIO** (Atmospheric Research in Southern Africa and Indian Ocean) devenu depuis 2019 un LIA (Laboratoire international associé) [http://lacy.univ-reunion.fr/activites/\\_programmes-de-recherche/gdri-arsaio/](http://lacy.univ-reunion.fr/activites/_programmes-de-recherche/gdri-arsaio/). Ce LIA franco-sud-africain, regroupe 8 laboratoires et bénéficie de financement CNRS et NRF (30 k€/an).
- Fédération de Recherche **OMNCG** «Observations des Milieux Naturels et des Changements Globaux » est orientée vers l'observation, et l'étude de la dynamique et de l'évolution des milieux naturels. Elle est intégrée dans l'OSU-Réunion
- **NDACC** (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)

Le **NDACC** est un réseau international dédié à l'observation sur le long terme de la composition atmosphérique. Il est composé de plus de 70 stations instrumentées de télédétection réparties sur le globe qui effectuent des mesures par télédétection afin d'observer et de comprendre l'état physico-chimique de la troposphère libre à la stratosphère. La contribution française à ce réseau couvre les différentes bandes de latitudes. La station du Maïdo permet de documenter la bande tropicale de l'hémisphère Sud.

- **SAOZ** (Système d'Analyse par Observation Zénithal) – Réseau de plus de 20 spectromètres UV-Visible SAOZ répartis globalement, pour la surveillance de l'ozone et intégré au réseau NDACC.
- **UVindien** : Réseau international dans l'Océan Indien, dédié à la surveillance des rayonnements UV au sol. Il implique 5 pays, 9 laboratoires, ou structures nationales et régionales. Il bénéficie d'un financement FEDER/Interreg5. Cette action sera détaillée par la suite.

J'ai été membre du Conseil Scientifique du collège doctoral régional RAMI (observations environnementales et **R**isques **n**aturels en **M**ilieu **I**nsulaire) entre 2014 et 2018 incluant 7 universités et organismes de recherches de la région Océan Indien. Ce collège fonctionnait comme une sorte d'école doctorale à l'échelle de la sous-région. Son objectif était d'animer la formation à la recherche afin de créer un environnement de recherche de qualité (à travers des partenariats, projets de thèse) pour le suivi d'une cohorte de jeunes chercheurs originaires des pays de la zone Océan Indien en adéquation avec les besoins des pays de la région. Cela passait par la promotion et le soutien de la mobilité des jeunes chercheurs et par la participation et/ou la mise en place de formations sous forme de séminaires, ateliers, conférences et stages dans des équipes et laboratoires du consortium.

J'ai participé ou co-organisé plusieurs campagnes internationales de mesures parmi lesquelles on peut citer :

- Campagne **MORGANE** (Maïdo ObservatoRy Gaz and Aerosols NDACC Experiment)  
Campagne internationale de 6 semaines en partenariat avec NASA et le NDACC, qui s'est tenue en mai 2015 à l'observatoire du Maïdo. Cette campagne de comparaison en aveugle et sous la supervision d'un arbitre international, visait la labellisation des 3 grands instruments lidar de l'observatoire du Maïdo, dont le lidar DIAL ozone stratosphérique. J'ai donc participé à l'organisation, autant qu'à la mise en œuvre.
- **MALICCA 1** (2013) & **MALICCA 2** (2014) – Maïdo Lidar Calibration Campagne pour la calibration des lidar vapeur d'eau, température et ozone.

Enfin, j'ai, ou j'ai eu, diverses responsabilités collectives autour du numérique, comme une mission UNT (Université Numérique Thématique) auprès de la FST (Faculté des Sciences et

Technologies) ou la nomination au Comité de Pilotage des usages du numérique de l'Établissement.

J'ai écrit et réalisé de nombreux produits de diffusion et valorisation du savoir, comme des produits pédagogiques numériques ou des films de valorisation de la recherche au LACy (ou ailleurs à l'UR). Parmi ces films, certains ont été primés lors de festivals nationaux, d'autres ont été présentés lors de congrès scientifiques et ajoutés en supplément numériques à des articles (EGU 2017 et supplément à article ACP Tulet et al., 2017). La liste de ces contributions est détaillée dans l'annexe 4.

Pour finir ce rapide survol de carrière, j'ai obtenu une promotion à la Hors Classe du corps des maîtres de conférence en septembre 2016 et la PEDR en septembre 2018. Je serai responsable de l'équipe stratosphère, une des 3 équipes du LACy, à partir de janvier 2020. À ce titre, j'ai présenté le projet de l'équipe lors de l'évaluation HCERES du LACy en novembre 2018.

### *Contexte scientifique général et plan du manuscrit*

Mon activité de recherche s'effectue au sein de l'équipe stratosphère depuis mon arrivée au LACy en 1995. Il s'agit aujourd'hui d'une des 3 équipes de cette UMR et la plus petite (2 MC, 1 Pr, 1 chercheur associé). Elle porte principalement sur l'étude de la variabilité de la stratosphère tropicale. La suite présente succinctement le contexte global de mes travaux et le plan du présent rapport.

La région tropicale est une zone particulièrement importante de l'atmosphère et paradoxalement mal étudiée car peu observée. C'est le lieu de la planète où l'air entre préférentiellement dans la stratosphère à travers la tropopause. Le transport des constituants vers la stratosphère des moyennes et hautes latitudes se produit ensuite à travers les barrières dynamiques subtropicales par différents mécanismes : déferlement d'ondes de Rossby et d'onde de gravité, formation de filaments et de couches turbulentes, etc..., définissant la circulation, générale de Brewer Dobson. C'est également la région qui reçoit le plus d'énergie solaire, moteur de la dynamique atmosphérique et de la production photochimique à l'échelle planétaire. Cette région est aujourd'hui particulièrement perturbée par les conséquences des changements climatiques planétaires.

Le protocole de Montréal en 1987 a permis la régulation des rejets de substances destructives d'ozone (ODS) dans l'atmosphère et ainsi de contrôler progressivement la destruction de l'ozone stratosphérique mise en évidence à la fin des années 70. De nombreux signes de retour aux niveaux antérieurs sont déjà observés sur la planète à diverses latitudes. Pour autant, les

déséquilibres climatiques importants produits par les émissions anthropiques massives de gaz à effet de serre, laissent incertaine l'évolution future de l'ozone, et donc du rayonnement UV en surface. Plus particulièrement au niveau tropical, plusieurs auteurs ont montré que l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère provoque une accélération de la circulation de Brewer-Dobson (Lin and Fu, 2013). L'ozone est transporté plus rapidement des tropiques où il est produit, vers les pôles, induisant une augmentation de la colonne totale d'ozone aux moyennes latitudes et une diminution de l'ozone aux tropiques. Le rayonnement UV (RUV) à la surface, fortement dépendant de l'ozone et anti corrélé, devrait donc augmenter aux tropiques (Hegglin and Shepherd, 2009, Butler et al., 2016), dans des zones où les expositions naturelles sont déjà critiques.

Les questions scientifiques liées à la variabilité et les tendances de l'ozone et des RUV (mesures et modèles) aux tropiques sont donc fondamentales et constituent un enjeu majeur de santé publique.

Les études autour de ces questions nécessitent la mesure fiable et pérenne des paramètres liés à l'ozone stratosphérique (ozone total, profils d'ozone), ou aux RUV (UV spectral, UV large bande, et nébulosité). Ainsi, une partie importante de mon activité scientifique a été consacrée, depuis mon début de carrière, aux activités instrumentales et d'observation, elle fera l'objet du chapitre 2 de ce document.

Après cette introduction (chapitre 1), le manuscrit se déclinera donc selon le plan suivant :

Chapitre 2 : Expertise en matière instrumentale : Cette partie présentera les divers instruments dont je suis PI ou co-I, et qui permettent de mesurer l'ozone et les rayonnements UV à la Réunion ou dans l'océan Indien. Un focus tout particulier sera fait sur le lidar DIAL Ozone stratosphérique qui a été construit au cours de ma thèse et qui est aujourd'hui un des 3 instruments lidar labélisé NDACC de l'Observatoire du Maïdo.

Cette partie présentera également le nouveau réseau UV-Indien déployé dans le sud-ouest de l'Océan indien, impliquant 5 pays et 9 établissements de recherche ou de météorologie.

Chapitre 3 : Etude de la variabilité du réservoir stratosphérique tropical :

- Variabilité, et tendances de l'ozone
- Étude des barrières stratosphériques tropicales.

Cette partie présentera les outils originaux développés au cours de ma thèse (DyBaL), ou par la suite (méthode des K-Means) afin d'étudier la variabilité des barrières dynamiques en stratosphère. Elle présentera également les études des tendances et enfin

les résultats obtenus et publiés concernant les barrières et l’ozone en stratosphère tropicale.

#### Chapitre 4 : Variabilité et tendances des Rayonnements UV en zone tropicale sud

Cette partie sera consacrée à mon apport sur cette nouvelle thématique au LACy, tant d’un point de vue modélisation qu’observation. En particulier, je présenterai la stratégie de recherche qui a été développée pour l’étude des RUV dans notre région. Cette dernière consiste à valider un modèle 1D de transfert radiatif à partir de mesures sols et à appliquer ensuite ce modèle en le couplant à des sorties de modèles chimie-climat à grande échelle (sorties CCMI), pour réaliser les premières études de variations climatiques des RUV en zone tropicale.

#### Chapitre 5 : Conclusions et perspectives

# CHAPITRE 2

## Expertise en matière instrumentale

---

- 2.1 Contexte local : l'OPAR et les mesures atmosphériques à la Réunion.
- 2.2 Mesure de l'ozone
  - 2.2.1 Le lidar ozone stratosphérique
    - 2.2.1.1 Validation du lidar  $\text{LiO}_3\text{s}$  dans le cadre du réseau NDSC puis NDACC ; campagne MORGANE
    - 2.2.1.2 5 années de mesures en routine d'ozone au Maïdo
  - 2.1.1 Implication dans les autres mesures d'ozone à l'OPAR
- 2.3 Mesure des Rayonnements UV à la Réunion et dans la zone Océan Indien
  - 2.3.1 Le spectro-radiomètre Bentham
  - 2.3.2 Les radiomètres UV large-bande
  - 2.3.3 Le réseau  $\text{UV}_{\text{indien}}$
- 2.4 Travaux
  - Baray et al., 2006
  - Baray et al. 2013
  - Portafaix et al., 2003
  - Hubert et al., 2016
  - Fernandez et al. 2016
  - Pastel et al., 2014
  - Toihir et al., 2015

### *Synthèse du chapitre 2 :*

#### En chiffres :

PI d'un grand instrument de mesure lidar, labélisé NDACC depuis 15 ans,  
PI d'un réseau de mesure international, comptant plus de 18 instruments,  
Co-I de 2 spectromètres labélisés NDACC,  
7 articles ACP,  
12 communications dans des congrès internationaux.

### 2.1 Contexte local : l'OPAR et les mesures atmosphériques à la Réunion.

Les premières mesures atmosphériques au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de l'Université de la Réunion ont démarré en 1992, il s'agissait des sondages ballons pour les paramètres météorologiques et pour les concentrations d'ozone. Dans la suite des années 1990, de nombreux autres systèmes de mesure (lidar, spectromètres...) ont été déployés à La Réunion, principalement pour le suivi de la composition de l'atmosphère dans le cadre du réseau NDACC ex NDSC.



L'attractivité de l'île de la Réunion pour la mesure atmosphérique provient de sa situation géographique exceptionnelle (position 21° Sud, 55° Est) au cœur de l'Océan Indien. Les mesures atmosphériques dans cette région, et dans l'hémisphère sud en général, sont très peu nombreuses et la possibilité d'y implanter une station multi-instrumentée est rapidement apparue être une opportunité scientifique majeure pour le CNRS et l'Université de la Réunion. Une situation politique stable, un développement économique adapté et une implantation géographique dans l'hémisphère sud au cœur des tropiques avec un environnement purement marin, garantissait le succès d'une telle opération. Très vite la station de la Réunion s'est développée, donnant naissance à l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion).

Dans la troposphère, du fait de sa latitude, en hiver austral, le site de la Réunion est situé près de la zone d'influence du courant-jet subtropical, susceptible d'induire des échanges de masses d'air entre la stratosphère et la troposphère (foliations subtropicales, gouttes froides).

En été austral, elle est soumise à l'influence de la convection tropicale et au printemps, étant à l'est de l'Afrique et de Madagascar, dans la partie sud-ouest de l'Océan Indien, elle subit l'influence des contaminations des brûlages de biomasse, suivant un mécanisme différent des contaminations observées en basse couche en Afrique de l'Ouest, au-dessus de l'océan Atlantique. Située aux tropiques, le site de la Réunion permet l'étude de la branche ascendante de la circulation de Brewer-Dobson, injectant composés chimiques et particules dans la basse stratosphère.

Ce site présente donc un intérêt majeur pour les études en stratosphère. Il est positionné en zone tropicale mais en bordure sud de cette région, tout proche de la barrière dynamique de confinement stratosphérique. C'est donc un point privilégié d'observation et d'analyse des mécanismes de transport et d'échanges entre cette zone et les latitudes moyennes.

Le LPA, puis le LACy ont été les porteurs scientifiques et techniques de la création de l'OPAR. En 2012, un nouvel observatoire a été mis en service au Maïdo, à 2200 m au-dessus du niveau de la mer : il abrite divers instruments de mesure atmosphérique.

Cet observatoire, rattaché à l'OSU-Réunion, est une structure communautaire, pleinement implantée dans les principaux réseaux internationaux d'observation comme le NDACC, GAW, et PHOTON. La majorité des instruments d'observations historiques du LACy, ainsi que de nouveaux instruments (lidar Raman vapeur d'eau, vapeur d'eau par GPS, mesures in-situ de gaz et d'aérosols, etc...) ont été implémentés au sein de cet observatoire. Ce dispositif vient compléter les deux autres sites d'observation de l'OPAR (aéroport de Gillot et Campus du Moufia - Université de La Réunion) hébergeant d'autres systèmes de mesures.

Le rôle du LACy est central dans l'exploitation scientifique de ces mesures et dans le développement des partenariats scientifiques s'y rattachant.

Cette nouvelle station d'altitude Maïdo permet :

- 1) d'améliorer la performance des instruments optiques au-dessus de la couche limite marine et d'ouvrir de nouvelles perspectives sur les études dans l'UTLS et dans la stratosphère.
- 2) de mettre au point des mesures in situ de la composition de l'atmosphère pour l'étude du changement climatique, dans un site de référence dans la région tropicale/subtropicale de l'hémisphère sud
- 3) d'offrir un accès transnational à des expériences ou à des campagnes de mesure pour des études de processus ciblées.



*Photo 2.1 : photo aérienne de l'observatoire atmosphérique du Maïdo – 2200 m (Crédit Photo Pôle Recherche UR)*

## 2.2 Mesures de l'ozone

### 2.2.1 Le lidar ozone stratosphérique

Un système DIAL LiDAR permettant de mesurer l'ozone dans la haute troposphère et la stratosphère est opérationnel à La Réunion depuis juin 2000. La construction de cet instrument a résulté de la collaboration entre l'Université de Genève (Flesia/Hirt) et le Service d'Aéronomie (Godin-Beekmann/Porteneuve). Il a été installé dans les locaux du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère (LPA) de l'Université de la Réunion, à St Denis, sur le campus

de Moufia. Au cours de ma thèse (1998-2001), j'ai participé directement à son installation et à son exploitation durant les années qui ont suivi. Il faut préciser qu'à cette époque, le LPA n'avait pas encore d'opérateur lidar dédié et que toutes les mesures étaient réalisées par les doctorants ou les jeunes chercheurs. L'instrument a été arrêté au Moufia en 2007, suite à des problèmes techniques et à mon départ en détachement.

Il a été jouvencé grandement en 2011 et installé ensuite à l'observatoire du Maito dès son ouverture (2012). Après une période de réglages, les premiers profils du lidar DIAL du Maito ont été obtenus en février 2013.

Je suis officiellement PI de cet instrument depuis novembre 2011.

Les objectifs géophysiques associés à cet instrument étaient et sont toujours (1) la surveillance à long terme de l'ozone stratosphérique, (2) l'étude du bilan de l'ozone stratosphérique dans la région tropicale, (3) l'étude de la dynamique stratosphérique et sa variabilité.

Cet instrument a joué un rôle important dans ma carrière, tant d'un point de vue technique que scientifique, je vais décrire ci-après rapidement ses caractéristiques principales, faisant de ce lidar un instrument original et complexe (avec celui de l'Observatoire de Haute Provence - OHP).

Comme pour tout système DIAL dédié à l'ozone (Godin et al., 1989), il est nécessaire d'utiliser deux longueurs d'onde émises. Le choix de ces longueurs d'ondes est important puisqu'il va déterminer l'importance des erreurs commises sur la mesure.

Tout d'abord, le domaine spectral choisi est dans l'ultraviolet où l'absorption de l'ozone est la plus efficace. A la différence des mesures dans la troposphère où le choix des longueurs d'ondes doit correspondre à une absorption maximale (les quantités d'ozone étant faibles), le choix des longueurs d'onde en stratosphère est surtout déterminé par la minimisation de l'erreur statistique sur la mesure.

En effet, au-dessus de 25 km d'altitude, on constate en même temps une diminution de la densité atmosphérique totale, qui fournit le support du signal retro-diffusé, et de la quantité d'ozone, directement liée à l'épaisseur optique à détecter. Ces deux phénomènes conduisent à une diminution rapide du rapport signal/bruit lorsque l'altitude augmente. Dans ce cas, les paramètres expérimentaux sur lesquels on peut jouer, en dehors de l'énergie émise et du taux de répétition des lasers, sont les épaisseurs optiques d'absorption par l'ozone des deux longueurs d'ondes émises. L'optimum est atteint pour une valeur de l'ordre de 1.1 pour la longueur d'onde absorbée et une absorption nulle pour la longueur d'onde non absorbée [Pelon, 1986].

D'un point de vue expérimental, la source laser doit donc être suffisamment puissante pour atteindre des altitudes supérieures à 40 km malgré l'absorption de l'ozone et émettre entre 305 et 310 nm. Le choix des longueurs d'ondes retenues pour l'installation de la Réunion est le même que celui fait à l'Observatoire de Haute Provence :

- $\lambda_1=308$  nm pour la voie ON, absorbée
- $\lambda_2=355$  nm pour la voie OFF, non absorbée

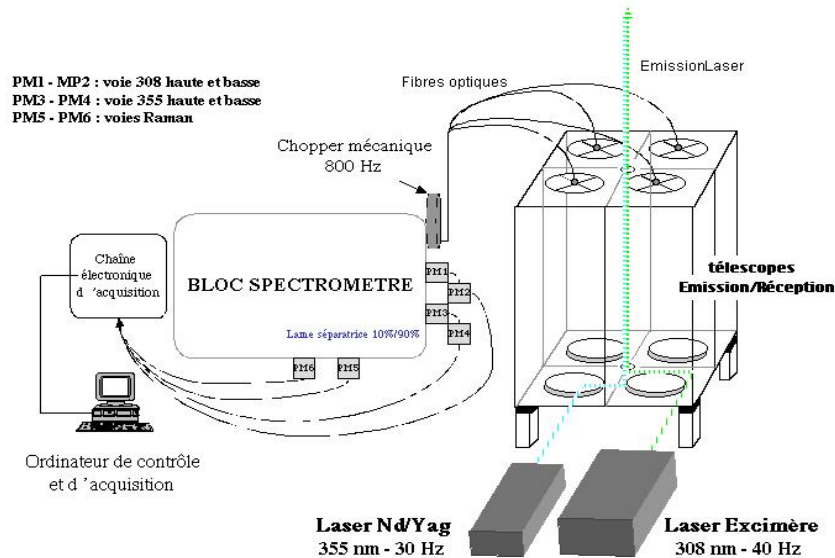
Dans le cas du DIAL stratosphérique de la Réunion, les sources laser choisies sont un laser néodyme-Yag triplé (Spectra-Physics Lab 150) et un laser excimer XeCl (Lumonics PM 844). Le Nd-Yag fournit le faisceau non absorbé @ 355 nm avec une fréquence d'impulsions de 30 Hz et une puissance d'environ 5 W, tandis que l'excimer fournit le faisceau absorbé @ 308 nm avec une fréquence d'impulsions de 40 Hz et une puissance supérieure à 9 W. Un système optique afocal est utilisé pour réduire la divergence du faisceau à 0,5 mrad.

La partie optique de réception est composée de 4 miroirs paraboliques (diamètre : 500 mm). Le signal rétrodiffusé est capté par 4 fibres optiques situées au point focal de chaque miroir. Le spectromètre utilisé pour la séparation des longueurs d'onde est un réseau holographique Jobin Yvon (3600 lignes/mm, efficacité > 25%). Après la séparation par le réseau holographique, les deux faisceaux de Rayleigh à 308 nm et 355 nm sont à nouveau séparés à la sortie du spectromètre par un système de lentilles respectivement dans les proportions 8% et 92% afin d'adapter le signal à la plage de non saturation du système de comptage photonique. Les signaux optiques sont détectés par 6 photomultiplicateurs (PM) non refroidis Hamamatsu.

Un chopper mécanique a été utilisé jusqu'en 2018 (voir figure 2.1 du principe du système DIAL du Mado, avec obturation mécanique) pour cadencer les tirs laser et couper le signal de haute énergie provenant de la gamme d'altitude inférieure et provoquant une saturation importante des détecteurs. Ce chopper fonctionnait sous vide primaire et permettait une fréquence d'obturation de 800 Hz. L'amélioration technologique des photomultiplicateurs a permis de s'affranchir de l'utilisation du Chopper pour l'obturation mécanique du signal bas, grâce à l'utilisation combinée d'un générateur électronique de fréquence et de PM de nouvelle génération obturés électroniquement.

La configuration actuelle sans chopper permet l'acquisition simultanée de 6 canaux : 2 canaux à 355 nm correspondant aux parties inférieure et supérieure du profil, 2 canaux à 308 nm (parties inférieure et supérieure) et 2 canaux Raman à 332 et 387 nm. Tous les canaux de Rayleigh sont équipés d'une obturation électronique, réglée à 7 km pour les voies basses et à 19 km pour les voies hautes.

Le système a fonctionné de 2000 à 2006 sur le site de St Denis de l'Université de la Réunion et a été labellisé par le réseau NDACC (ex NDSC) en 2003. Les voies Raman ont été ajoutées au système en 2005 et il a été déplacé sur le site du Maïdo après la mise à jour des systèmes électroniques d'acquisition (maintenant les enregistreurs transitoires LICEL TR et PR) et du laser excimer XeCl. La nouvelle configuration sans chopper mécanique, nous permet d'obtenir des profils d'ozone dans une plage d'altitude de 10 à 45 km.



*Figure 2.1 : Schéma de principe du système DIAL du Maïdo, avec obturation mécanique (avant 2018)*

Le système actuel permet des mesures de la concentration d'ozone avec une résolution variable en altitude de 200 m en bas de profil, jusqu'à plus de 6 km en haut. Les erreurs associées sont également variables de 3% en bas jusqu'à plus de 20% vers 45 km.

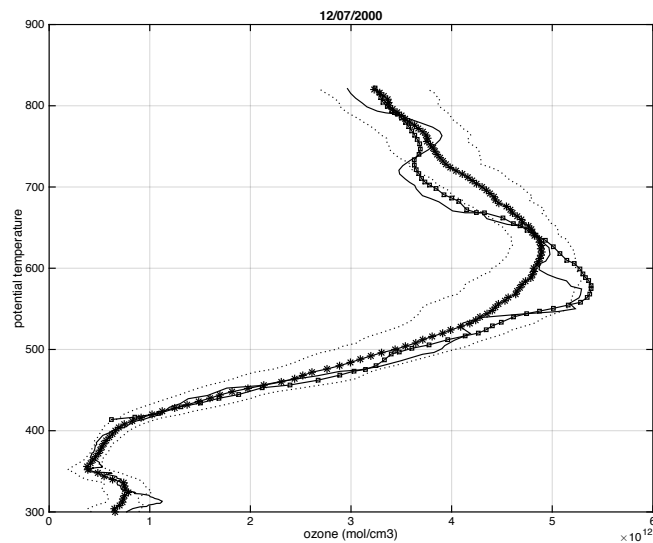
Le lidar ozone de l'observatoire du Maïdo a été impliqué dans le projet Européen FP7 NORIS, dont l'objectif était de fournir des profils d'ozone en quasi-temps réel à la communauté Copernicus.

Les mesures de cet instrument (aujourd'hui dénommé lio3S), ont été utilisées dans différentes études. Je vais en préciser brièvement quelques-unes dans la suite de ce paragraphe.

Nous avons pu, par exemple, décrire précisément dans Portafaix et al. (2003), un cas remarquable de transfert méridien de masse d'air entre les moyennes latitudes et les tropiques grâce à l'utilisation d'un profil lidar obtenu le 12 juillet 2000 (figure 2.2).

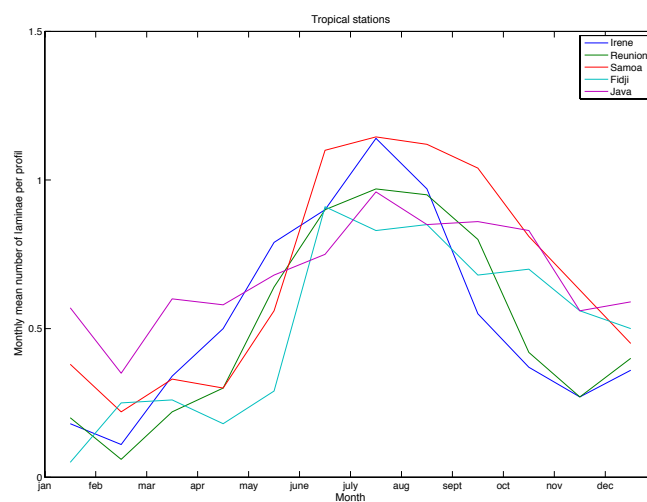
Bien que les résolutions verticales soient différentes entre les sondes et le lidar, ces profils sont cohérents et les fluctuations de l'ozone autour de 550 -750K sont bien mises en évidence.

Ce laminae d’ozone à haute altitude visible à la Réunion sera expliqué par un transport isentropique quasi horizontal et à grande échelle (branche basse de la circulation de Brewer Dobson), provenant des moyennes latitudes et atteignant la Réunion à partir du 10 juillet 2010.



*Figure 2.2* : Comparaison du profil de sondage de l’ozone (ligne continue noire) du 12 juillet 2000 avec le lidar du 12 juillet 2000 (noir carré) et un profil climatologique d’ozone de juillet (étoiles gras). Les lignes pointillées aux profils à  $\pm 2$  sigma par rapport au profil climatologique de juillet.

Plus tard, de nombreux autres cas similaires mais pour des altitudes différentes ou des périodes différentes, ont été mis en évidence à partir de la base de profils ozone par sondage ballon et des statistiques ont pu être obtenues (Portafaix et al., 2014). La figure suivante (2.3) montre la répartition statistique de ces laminae pour 5 stations du réseau SHADOZ. On peut voir nettement l’augmentation du nombre de laminae à ces latitudes en périodes d’hiver austral.



*Figure 2.3* : Nombre moyen de laminae d’ozone détectés dans les profils obtenus par ballons de la base SHADOZ, pour 5 stations tropicales (d’après Portafaix et al., 2014)

Malheureusement, les problèmes techniques rencontrés sur le site de Moufia (période 2000-2007) sur le système DIAL n'ont pas permis l'obtention d'une base de données suffisamment importante pour réaliser ce type d'étude à partir du lidar. Depuis l'ouverture de l'observatoire du Maïdo en 2012, et le déménagement du DIAL, des opérateurs dédiés réalisent les mesures en mode routine, au moins 2 fois par semaine. La base de données des profils ozone acquis depuis 2013 est aujourd'hui conséquente (plus de 320 profils) et devrait permettre rapidement de réaliser ce type d'étude.

Pour les estimations de tendances (voir chapitre 3), il est nécessaire d'avoir des séries de mesures suffisamment longues comme à l'OHP (plus de 20 ans en continu ce qui n'est pas le cas au Maïdo). Il faudra donc persévérer et être en capacité de continuer des mesures de qualité sur les prochaines décennies.

L'instrument lidar ozone stratosphérique du Maïdo a été également impliqué dans une vaste étude (Hubert et al., 2016) d'évaluation de 14 sondeurs satellitaires aux limbes ou par d'occultation qui, ensemble, fournissent plus de trois décennies de mesures globales de profils d'ozone (Hubert et al., 2016). Il s'agit des instruments SAGE II, SAGE III, HALOE, UARS MLS, Aura MLS, POAM II, POAM III, OSIRIS, SMR, GOMOS, MIPAS, SCIAMACHY, ACE-FTS et MAESTRO.

Les données satellites ont été comparées aux mesures des réseaux de mesures au sol par sondes ozone et de lidars d'ozone stratosphérique (NDACC). Les mesures de notre lidar ont revêtu ici une importance particulière, car très peu de profils ozone par lidar existent aux tropiques. Les principaux aspects de la qualité des données satellitaires ont été regardés, comme la stabilité à long terme, le biais global (voir figure 2.4) et la variabilité à court terme, ainsi que leur dépendance à l'égard des paramètres géophysiques. Parmi les nombreux résultats de cette étude, il a été montré des dérives à long terme de certains instruments (SCIAMACHY, OSIRIS, HALOE, GOMOS et SMR).

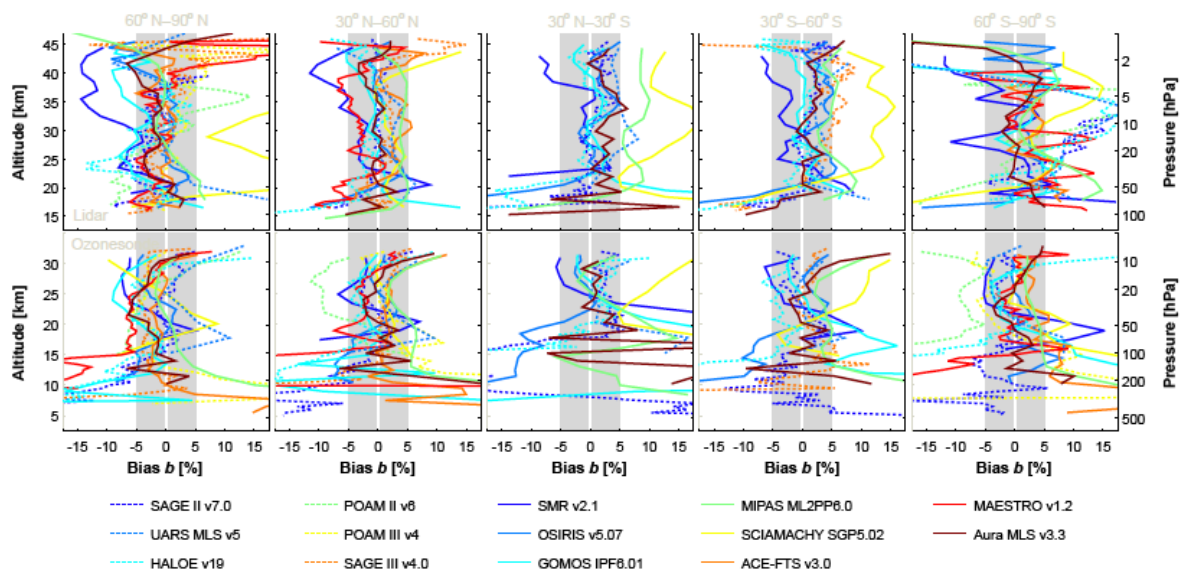


Figure 2.4 : Aperçu du biais de toutes les mesures d'ozone par satellite par rapport aux mesures lidar d'ozone stratosphérique (rangée supérieure) et aux ozonsondes (rangée inférieure) dans cinq bandes de latitude (colonnes). Les lignes en pointillés indiquent les instruments qui ont cessé leurs activités avant 2006. D'après Hubert et al., 2016.

Les écarts entre plusieurs tendances récentes publiées sur les profils d'ozone, pourraient s'expliquer principalement par ces dérives instrumentales. Cette étude démontre clairement la nécessité d'une approche systématique et globale de l'analyse comparative multi-instruments et la nécessité de continuer d'opérer sur le long terme les mesures au sol (comme ici les mesures par lidar) des paramètres physico-chimiques atmosphériques.

Le lidar Lio3S a également été impliqué dans diverses inter-comparaisons instrumentales, dont une étude portant sur la validation d'un radiomètre micro-onde GROMOS-C au Maito (Fernandez et al. 2016).

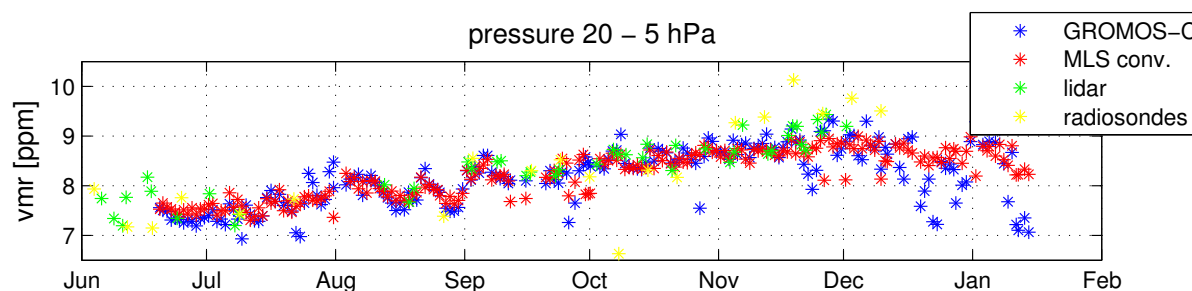
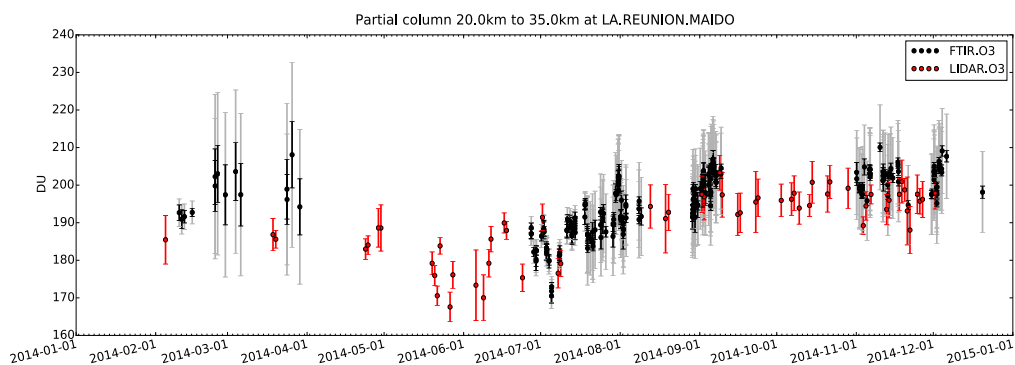


Figure 2.5 : Moyenne quotidienne des séries temporelles du rapport de mélange en volume de l'ozone mesuré par GROMOS-C et comparé aux mesures MLS, lidar convolué et radiosonde, pour le niveau 20-5 hPa (d'après Fernandez et al., 2016)



Des comparaisons ont également été menées dans Portafaix et al., 2016, avec le FTIR ou des sondages ECC co-localisés au Maïdo (voir figure 2.6).

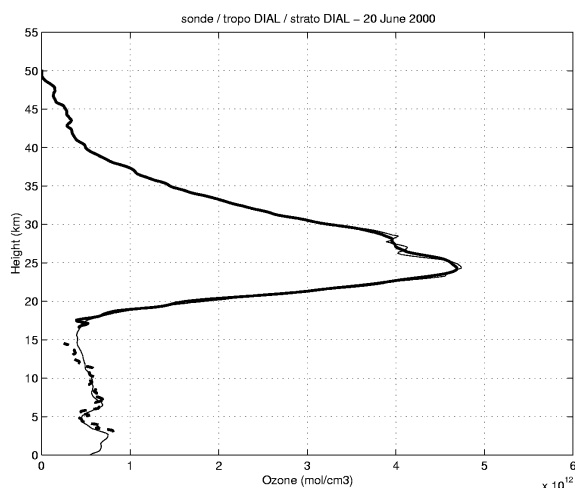


*Figure 2.6 : Série temporelle du lidar ozone et du FTIR pour la tranche 20-35 km*

En 2020, le lidar ozone stratosphérique du Maïdo, au même titre que les autres lidars NDACC de l'observatoire, devrait être jouvencé afin de permettre la mise en place de système d'automatisation des opérations (démarrage, fermeture).

### 2.2.1.1 Validation du lidar liO3S dans le cadre du réseau NDSC puis NDACC ; campagne MORGANE

La première version du lidar ozone, implanté au Moufia, a été labélisée dans le réseau international NDSC (Network for Detection Stratospheric Changes) en 2004.



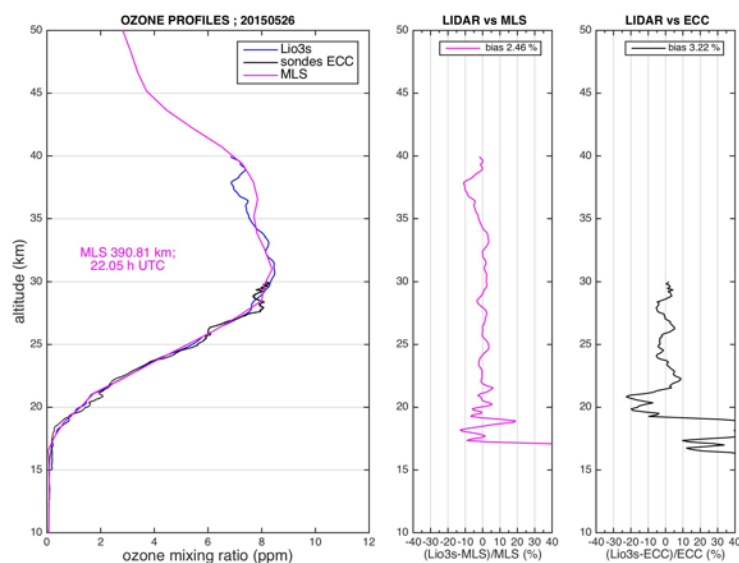
*Figure 2.7 : Exemple d'inter-comparaison de mesures co-localisées et simultanées, ayant permis la labélisation NDSC. Ici concentrations d'ozone obtenues le 20 juin 2000 par lidar d'ozone stratosphérique (en gras), lidar d'ozone troposphérique pointillés) et radiosondage ECC (courbe fine).*

Aujourd'hui le réseau NDSC est devenu NDACC. Le NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) est un réseau international dédié à l'observation sur le long terme de la composition atmosphérique. Il est composé de plus de 70 stations instrumentées réparties sur le globe qui effectuent des mesures par télédétection afin d'observer et de comprendre l'état physico-chimique de la troposphère ou de la stratosphère. La contribution française à ce réseau couvre les différentes bandes de latitudes. L'implication de l'observatoire du Maïdo, et plus largement de l'OPAR, permet de documenter la bande tropicale de l'hémisphère Sud.

Suite au déménagement de l'ensemble des lidar du campus de St Denis à l'Observatoire du Maïdo, une grande campagne d'inter-comparaison/validation a été réalisée en mai 2015 : la campagne MORGANE (pour Maïdo ObservatoRY Gaz and Aerosols NDACC Experiment), destinée à labéliser ou re-labéliser les lidar de l'OPAR : [https://www.univ-reunion.fr/fileadmin/Fichiers/communication/10\\_Presse/DP\\_CampagneMorgane\\_149-05-2015.pdf](https://www.univ-reunion.fr/fileadmin/Fichiers/communication/10_Presse/DP_CampagneMorgane_149-05-2015.pdf)

Durant cette campagne, les équipements lidar mobiles de la NASA (GSFC) ont été convoyés à la Réunion et ont opéré au Maïdo durant les 6 semaines de la campagne. 2 scientifiques de la NASA : Tom McGee et Grant Sunnicht, responsables ces lidars mobiles, ont également été invités. MORGANE a duré 5 semaines pour la période de comparaison en aveugle et 16 semaines au total. 43 profils lidar DIAL ozone stratosphérique ont été réalisés entre début mai et début septembre. Plus de 60 sondes sous ballon ont été lancées, dont 18 sondes ECC.

Malheureusement, le DIAL strato de la NASA est tombé rapidement en panne au début de la campagne et les seules comparaisons fiables qui ont pu être réalisées pour l'ozone l'ont été avec les sondeurs satellites (MLS) et les sondages ozone co-localisés.



*Figure 2.8 : Comparaison des mesures lidar DIAL (bleue), sondage ECC (noire) et mesures MLS (rose) pour le 26 mai 2015 pendant la campagne MORGANE.*

L'ensemble des comparaisons réalisées durant la campagne a montré des biais très faibles en stratosphère ( $z > 20$  km, biais inférieurs à 5% voir figure 2.8) avec le sondeur MLS, très inférieurs aux erreurs attachées à chaque type de mesure. Des biais plus importants ont été constatés avec les sondes ECC (figure 2.8), en particulier en basse stratosphère, mais des analyses plus poussées ont imputé ces différences à des problèmes de concentration dans les solutions électrochimiques des sondes ECC.

A l'issue de cette campagne, le lidar ozone stratosphérique du Maïdo a obtenu une re-labélisation NDACC. On peut signaler que les lidars température et ozone troposphérique ont également été labélisés. Un article est en cours d'écriture sur cette campagne, porté par le juge referee.

### 2.2.1.2 Plus de 5 années de mesures en routine d'ozone au Maïdo

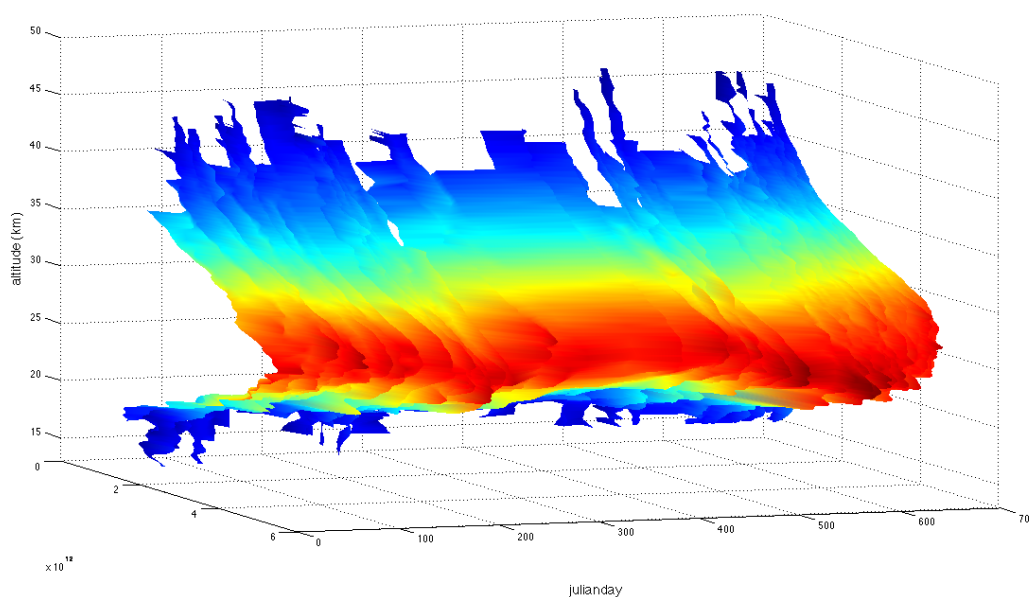
Depuis 2013, plus de 300 profils ont été réalisés (voir table 2.1) sur cet instrument grâce à l'implication des agents de l'UMS 3369.

Année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019 (mi-aout)
Nbre profils	45	57	71	43	50	32	26

*Table 2.1 : Statistiques de mesures lidar LiO3S exploitables au Maïdo depuis 2013*

Ces données ont été validées et livrées au NDACC jusqu'en 2017.

L'année 2018 a été marquée par des problèmes instrumentaux liés au chopper mécanique, ce qui explique le faible nombre de profils réalisés. Après différents tests techniques, il a été décidé de remplacer le chopper par des obturateurs électroniques sur toutes les voies Rayleigh.



*Figure 2.9 : Visualisation 3D des 2 premières années de mesures ozone au Maïdo par mesure lidar – 102 profils sont représentés.*

## 2.2.2 Implication dans les autres mesures d’ozone à l’OPAR

A mon arrivée à Réunion début 1995, au Laboratoire de Physique de l’Atmosphère, peu d’instruments étaient déjà installés. Le lidar Rayleigh de température stratosphérique venait d’être installé et était exploité dans le cadre de la thèse de Hassan Bencherif.

J’étais alors ingénieur de recherche en charge de certains instruments comme le spectromètre UV-Visible SAOZ, et je faisais également partie de l’équipe radio-sondage ECC. A ce titre je préparais les sondes ozone et procédais aux lâchers 2 fois par mois avant 1998 et 1 fois par semaine ensuite (démarrage de la collaboration SHADOZ en 1998).

Très vite, mon implication sur les lidars, le recrutement au LPA de nouveaux personnels techniques dédiés et mon travail de recherche de thèse ne m’ont pas laissé la possibilité de continuer dans l’équipe ballons mais j’ai continué à m’occuper localement du SAOZ et plus tard (2017) du mini-SAOZ. Ce dernier est actuellement installé sur le campus de Moufia, à côté du SAOZ historique. Il sera prochainement déplacé à l’observatoire du Maïdo (2020) après recalibration du capteur. Cette période m’a permis d’acquérir une très bonne connaissance de ces 2 instruments et techniques de mesure. Je suis aujourd’hui Co-I (responsable scientifique local) du spectromètre UV-Visible SAOZ. Les mesures du SAOZ ont été impliquées dans plusieurs études sur la variabilité de l’ozone total aux tropiques. Dans Pastel et al.(2014) nous avons investigué les différences observées entre les stations de Bauru (Brésil) et de la Réunion. Bien que les stations soient situées à la même latitude, des différences significatives sont observées dans les colonnes totales d’ozone. Elles sont attribuées à des différences dans le contenu troposphérique et la position en latitude équivalente de chaque site. Pour les 2 sites, les données du SAOZ ont été comparées à diverses mesures satellites. Elles ont permis la construction de séries temporelles fusionnées fiables et longues, destinées aux études de tendance.

Une autre étude de validation satellitaire a été réalisée à partir des données SAOZ de la Réunion. Dans Tohir et al., 2015, nous avons présenté les résultats de la comparaison des colonnes totales d’ozone sur 13 régions tropicales et subtropicales, enregistrées par le sondeur infra-rouge (IASI), à bord de satellite EUMETSAT MetOp (Météorologique Opérationnel). Les moyennes mensuelles de IASI entre juin 2008 et décembre 2012 sont comparées avec des mesures par d’autres capteurs (comme OMI sur le satellite Aura), ou par des instruments sol comme le Dobson ou le SAOZ. Les résultats montrent que IASI affiche un biais positif avec une moyenne autour de 2% comparé à OMI et au spectromètre Dobson, et un biais moyen autour de 1% par rapport au SAOZ de La Réunion et un peu plus élevé pour le SAOZ de Bauru, conformément aux résultats de Pastel et al. (2014).

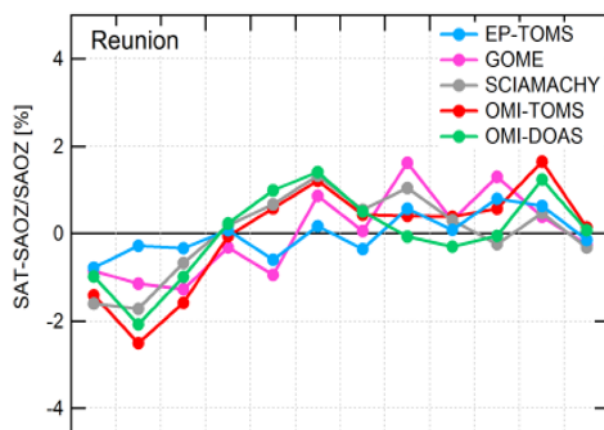


Figure 2.10: Différences relatives du cycle saisonnier de l'ozone entre les observations par satellite et au sol à La Réunion. GOME GDP5 (rose), EP-TOMS (bleu), SCIAMACHY OL3 (gris), OMI-TOMS (rouge), OMI-DOAS (vert) d'après Pastel et al., 2014.

% bias ( $1\sigma$ )	OMI		DOBSON		SAOZ	
	All data (2008–2012)	From September 2010 to the end	All data (2008–2012)	From September 2010 to the end	All data (2008–2012)	From September 2010 to the end
DJF	2.47 (2.00)	1.98 (1.76)	1.14 (2.34)	-0.78 (2.03)	-1.10 (2.70)	-0.53 (1.97)
MAM	3.86 (1.87)	2.18 (1.58)	3.46 (2.31)	0.67 (1.80)	2.18 (2.40)	0.47 (1.12)
JJA	3.05 (1.71)	1.62 (1.59)	1.53 (2.16)	0.57 (1.73)	2.03 (3.80)	1.25 (0.90)
SON	0.66 (1.90)	0.52 (1.48)	-0.82 (1.90)	-1.4 (1.72)	-2.38 (3.37)	-1.56 (1.57)
Annual	2.51 (1.87)	1.57 (1.60)	1.32 (2.17)	-0.23 (1.82)	0.73 (3.08)	-0.10 (1.39)

Table 2.2: Biais saisonniers observés entre IASI et les autres instruments (OMI, Dobson et SAOZ) pour tous les sites (d'après Tohir et al., 2015)

Dans l'ensemble, on a pu montrer que la version 5 de l'algorithme IASI (à partir de 2010) améliore considérablement la qualité des comparaisons, avec des biais moyens inférieurs à 1% avec les mesures au sol.

## 2.3 Mesure des Rayonnements UV (RUV) à la Réunion et dans la zone Océan Indien

### 2.3.1 Le spectro-radiomètre Bentham

Depuis 2009, des mesures d'UV sont réalisées à l'OPAR par un spectro radiomètre Bentham, acheté par le LACy. Cet instrument a été impliqué dans diverses études dont Brognez et al. (2016), Lamy et al. (2018) ou Cadet et al. (2019).

Les spectro-radiomètres UV permettent de mesurer le rayonnement UV spectral avec une résolution élevée. Le spectro-radiomètre utilisé ici est le BENTHAM DM 300n. Il est équipé

d'un double monochromateur permettant une résolution de 0.5 nm pour une fenêtre allant de 280 à 450 nm et un pas de mesure de 0.5 nm.

L'instrument est en service depuis 2009 sur le site du Moufia. Un étalonnage est réalisé 3 à 4 fois par an, à partir de lampes de référence (1000W, 150W et Mercure (Hg)). L'instrument est labélisé par le réseau NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). C. Brogniez (LA-Lille) est la P.I. de l'instrument et je suis le co-responsable local depuis 2017.

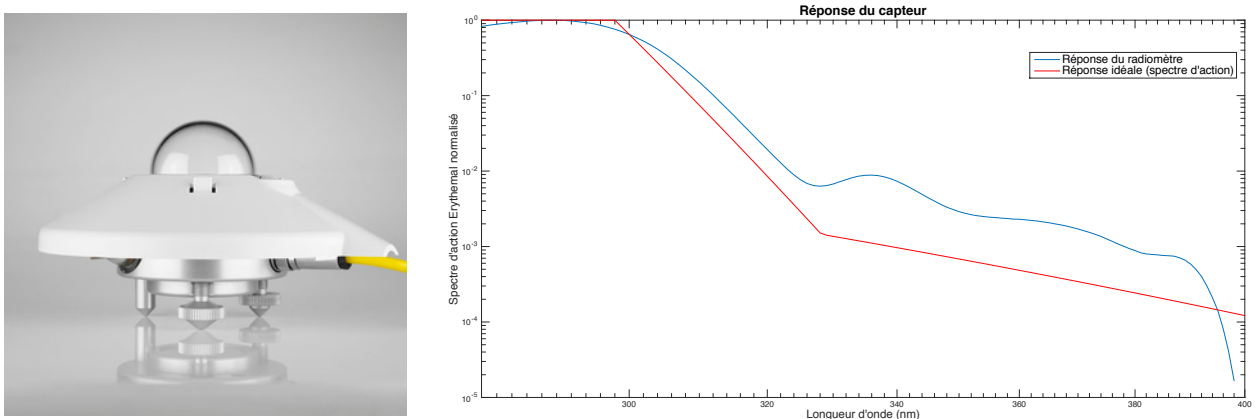
Il est considéré comme un instrument de référence, mesurant globalement le spectre UV. A partir de ces spectres et après correction, il est possible de calculer divers indices, comme les niveaux d'UVA, UVB ou UVE (indice UV).

Dans le cadre du réseau des mesures du réseau UV-Indien, cet instrument nous permet de vérifier la stabilité des mesures par les radiomètres large bande, de les re-calibrer et si nécessaire de renvoyer ces derniers en calibration.

### 2.3.2 Les radiomètres UV large bande

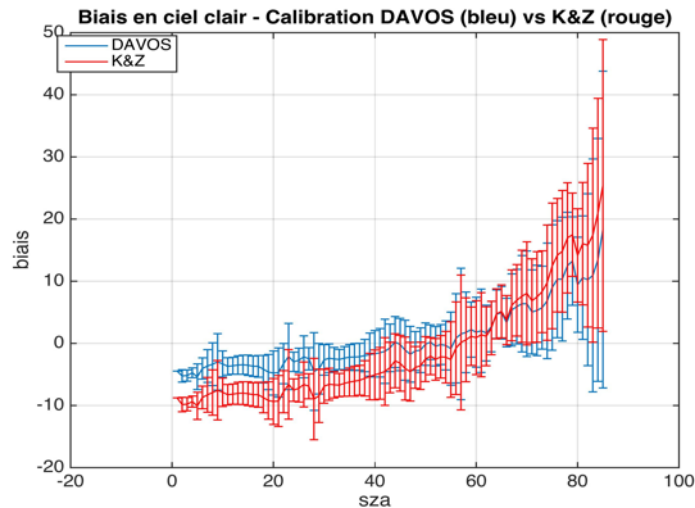
Moins coûteux que les spectro-radiomètres et beaucoup plus facile dans la mise en œuvre, le radiomètre UV large bande permet uniquement la mesure des RUV dans une bande spectrale particulière.

Les radiomètres UV-E mesurent les rayonnements UV intégrés sur le spectre d'action Érythémal (voir figure 2.11). Ils sont donc particulièrement adaptés aux études en santé. C'est le choix qui a été fait sur les instruments déployés à la Réunion et dans la région.



*Figure 2.11 : Réponse relative du radiomètre UV Kipp@Zonen comparé au spectre d'action Érythémal (norme ISO 17166:1999(E))*

La partie acquisition analogique et numérique, et le transfert des données (puce 4G ou ethernet) ont été développés au laboratoire.



*Figure 2.12 : Comparaison des biais entre le radiomètre K&Z de Saint Denis et le Bentham co-localisé, pour 2 calibration différentes.*

La comparaison du biais en ciel clair, entre le radiomètre large bande de Moufia et le Bentham, pour 2 calibrations différentes (calibration constructeur K&Z et calibration DAVOS\*) est montrée sur la figure précédente (figure 2.12) pour toutes les données acquises en 2017. On peut voir que la calibration effectuée à Davos permet de réduire considérablement le biais entre les 2 instruments entre -3% et 5 %, en fonction des angles zénithaux ( $SZA < 70^\circ$ ).

\*DAVOS : Le World Calibration Center for UV (WCC-UV) de Davos (Suisse) a pour mission d'évaluer la qualité des données du réseau mondial GAW UV et d'harmoniser les mesures UV du monde entier. Sa principale fonction est de s'assurer que les données soumises au Centre mondial des données UV (WOUDC), exploité par le Service météorologique du Canada à Toronto, soient de qualité suffisante pour répondre aux besoins de la communauté scientifique.

### 2.3.3 Le réseau UV<sub>indien</sub>

Dans le cadre des projets SECU-OI puis UV-Indien, j'ai initié en 2015 puis développé le **réseau UV-Indien**. Il s'agit d'un réseau international de mesures de rayonnements UV (RUV), de la nébulosité et de l'ozone total sur le bassin sud-ouest de l'Océan Indien.

Ce programme a été financé au départ par le Ministère de l'Outre-Mer (2015-2018), puis à partir de 2019, par un projet Européen Interreg 5 et TOSCA/CNES.



*Figure 2.13 : Carte prévisionnelle du Réseau UV-Indien mi-2020*

A terme, ce réseau comptera 9 stations réparties dans 5 pays de la Région (France, Madagascar, Seychelles, Comores et Maurice), avec 8 partenaires scientifiques, institutionnels ou opérationnels :

- LACy, Université de la Réunion
- IOGA, Institut de Géophysique d'Antananarivo, Madagascar
- Institut Supérieur de Technologie de Diego Suarez, Madagascar
- OPAR, Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion
- Seychelles Meteorological Authority (SMA), Mahé, Seychelles
- Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie, Moroni, Comores.
- L'université des Comores, Moroni, Comores
- Terre Australes et Antarctiques Françaises, St Pierre, France

En septembre 2019, 5 stations sont opérationnelles (Rodrigues, Réunion, Mahé, Antananarivo, Juan) pour la mesure des RUV et 3 stations pour la mesure de la nébulosité. Fin 2019 et au premier semestre 2020, de nouveaux sites seront instrumentés (Fort Dauphin, Diego-Suarez, et Moroni), portant à 9 le nombre de stations permettant le suivi régulier des UV dans l'Océan Indien.



N°	Station	Position	Instrument	Date de démarrage
1	Saint Denis, Réunion	20.09°S, 55.48°E	Radiomètre Caméra Imageur de ciel SAOZ	19/10/2016 15/09/2017 1993
2	Maido, Réunion	21.079°S, 55.383°E	Radiomètre Caméra Imageur de ciel	janv-20
3	Antananarivo, Madagascar	18.55°S, 47.33°E	Radiomètre Caméra Imageur de ciel	01/11/2016 07/06/2019
4	Diego-Suarez, Madagascar		Radiomètre Caméra Imageur de ciel	04/11/2019 04/11/2019
5	Fort-Dauphin, Madagascar		Radiomètre Caméra Imageur de ciel	mars-20
6	Plaine Corail, Ile Rodrigues	-19.75°S, 63.36°E	Radiomètre Caméra Imageur de ciel	09/05/2017 05/09/2019
7	Mahé, Seychelles	-4.679S, 55.531°E	Radiomètre Caméra Imageur de ciel SAOZ	06/09/2017 févr.-20 10/09/2017
8	Juan de Nova, France	17°054°S, 42.711°E	Radiomètre	01/04/2019
9	Moroni, Comores		Radiomètre Caméra Imageur de ciel SAOZ	dec-19 sep-20

*Table 2.3 : Sites instrumentés du réseau UV-Indien*

Les mesures d'UV se font par radiomètre large bande, calibrés tous les 2 ans sur le super site de Moufia (voir plus haut) grâce au spectromètre UV Bentham, les mesures d'ozone total se font avec le spectromètre UV-Visible SAOZ sur un maillage moins important (en raison du coût important de l'instrument et aussi de la variabilité plus faible de l'ozone). Pour les sites ne disposant pas de mesure locale d'ozone total, nous utilisons le satellite OMI. Actuellement seuls les sites de la Réunion et de Mahé sont équipés et il est prévu l'installation d'un nouveau SAOZ à Moroni (Grande Comore) courant 2020 (programme UN Environnement, financement acquis). Enfin, les mesures de nébulosité sont réalisées grâce à des caméras grand angle imageur de ciel total. Un développement a été demandé à la société qui fabrique les caméras afin que le calcul de la fraction nuageuse se fasse localement. C'est cette fraction nuageuse (données ascii de faible volume) qui est envoyée, nous évitant ainsi de transmettre les images acquises, dont la taille est incompatible avec les bandes passantes internet de la région.

Les mesures d'UV niveau 0 acquises et reçues à la Réunion sont retraitées en tenant compte des calibrations et de concentration d'ozone total mesurées simultanément. Les niveaux 2 (définitifs) obtenus sont archivés sur un serveur ftp accessible à tous les partenaires. Il est prévu rapidement de créer un site web et une base de données associée afin de rendre l'ensemble des données visualisables et téléchargeables facilement (open data).



*Photo 2.2 : Différents sites et instruments du réseau UV-Indien*

Les objectifs scientifiques attachés à ce réseau sont :

- L'étude de la variabilité annuelle et inter-annuelle des RUV sur tout le bassin Océan Indien Occidental.
- La validation des sorties des modèles numériques de prévision des RUV.
- Le suivi à long terme des UV dans le contexte du changement climatique et de la diminution prévue de l'ozone de 3 à 5% (voir chapitre 4).
- La validation satellitaire. Les instruments de Juan, Seychelles et Antananarivo sont impliqués et financés dans un programme TOSCA/CNES de validation des satellites GOME 2 et TROPOMI.

L'exploitation des données du réseau UV-indien permettra de caractériser finement la variabilité des UV dans cette région du globe, à la fois en ciel clair et également en ciel nuageux. Il faut noter l'importance de telles mesures dans une région où quasiment aucune donnée n'est disponible.

Il est prévu que les mesures d'UV et d'ozone intègrent rapidement le réseau international GAW UV WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre).

L'équipe du programme se compose actuellement de :

- porteur de projet – responsable scientifique du réseau
- 1 ingénieur d'étude en charge de la définition des solutions techniques et du déploiement des instruments

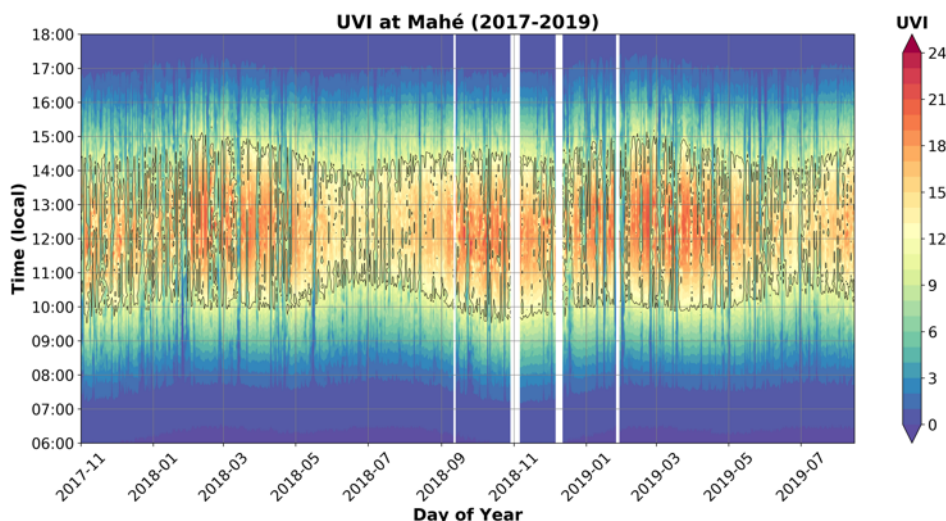
- 1 ingénieur de recherche (recruté en août 2019) en charge des études et de la valorisation du réseau
- une gestionnaire
- 2 responsables techniques de station au niveau local (Madagascar et Rodrigues).
- 4 chercheurs (en plus du porteur de projet)

Cette équipe sera complétée rapidement par un stagiaire de M2 et d'un doctorant (pays partenaires) qui travailleront sur l'exploitation des mesures de nébulosité du réseau. 2 nouveaux responsables techniques de station intégreront le groupe prochainement (Comores et Diego-Suarez).

Enfin, une formation de l'ensemble des partenaires sera réalisée à la Réunion en février 2020. Le déploiement de ce type de réseau instrumental dans le SOOI, s'accompagne de la création ou du renforcement de nombreuses collaborations scientifiques inter-établissements (Universités ou établissements météorologiques nationaux, établissement de recherche,...) tissant une toile dense de partenariats et permettant des mobilités tant de chercheurs que d'étudiants. Ces actions participent directement à notre mission de coopération internationale, de formation par la recherche et du rayonnement de la recherche scientifique française dans nos environnements géographiques immédiats.

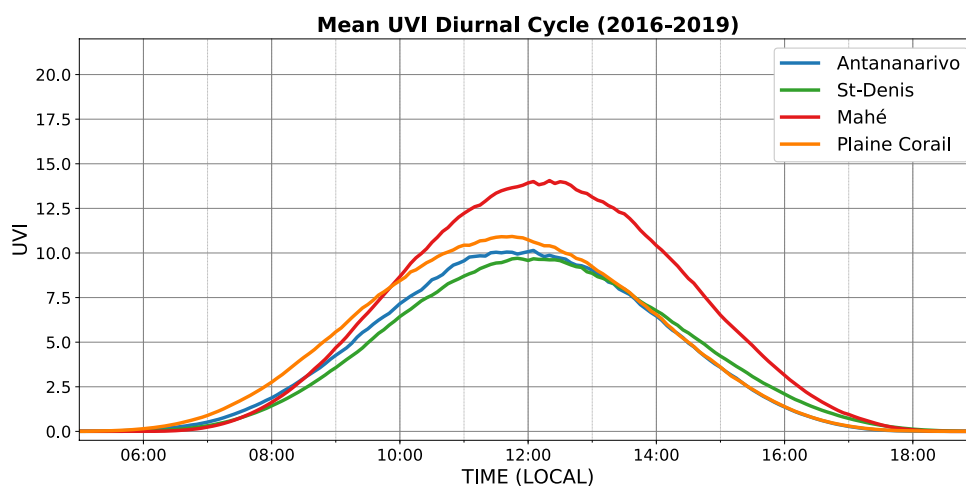
Le réseau UV-Indien est engagé dans un autre programme en cours d'instruction à la Région Réunion (sur financement FEDER), dont l'objectif est d'instrumenter une plateforme de mesures atmosphériques, sur le bateau de l'IFREMER 'Marion Dufresnes'. Dans ce projet, MAP-OI, notre équipe positionnera un imageur de ciel et 3 radiomètres UV (UVA-UVB et UVE). Ces instruments permettront de faire le lien avec les stations fixes du réseau UV-Indien, et d'obtenir un meilleur maillage de la région.

Les premières études de qualité et de climatologies ont été réalisées à partir des données acquises sur les premières stations installées en 2016 et 2017. Cette étude a fait l'objet d'une communication orale en septembre 2019 (Lamy et al., 2019) lors du meeting géosciences IOGA.



*Figure 2.14 : Série temporelle des mesures d'IUV aux Seychelles (Mahé), entre 2017 et 2019*

On peut voir que les indices UV peuvent atteindre et dépasser 23 sur le site des Seychelles (figure 2.14).



*Figure 2.15 : Moyennes journalières climatologiques de IUV sur 4 sites du réseau*

Le bilan sur cette thématique est actuellement de 7 articles acceptés, 14 communications dans des congrès internationaux et 1 post-doc en cours.

D'un point de vue responsabilité scientifique, j'assume celle d'un lidar labélisé NDACC, la coresponsabilité de 2 autres instruments NDACC. Plus récemment, j'ai porté la création d'un réseau international de mesure d'UV et de nébulosité, dont j'assume la responsabilité. Ce réseau sera bientôt labélisé dans le réseau international WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre : centre de données de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) qui supporte le programme de Veille de l'atmosphère global (GAW).

## 2.4 Travaux

Je présente dans la suite, la première page de articles acceptés dans des revues ACL, en lien avec cette partie. Il s'agit de :

Baray et al., 2006  
Baray et al. 2013  
Portafaix at al., 2003  
Hubert at al., 2016  
Fernandez et al. 2016  
Pastel et al., 2014  
Tohir et al., 2015

# An instrumented station for the survey of ozone and climate change in the southern tropics†

J.-L. Baray,<sup>\*ab</sup> J. Leveau,<sup>b</sup> S. Baldy,<sup>b</sup> J. Jouzel,<sup>a</sup> P. Keckhut,<sup>ac</sup> G. Bergametti,<sup>d</sup> G. Ancellet,<sup>e</sup> H. Bencherif,<sup>b</sup> B. Cadet,<sup>bc</sup> M. Carleer,<sup>f</sup> C. David,<sup>ae</sup> M. De Mazière,<sup>g</sup> D. Faduille,<sup>b</sup> S. Godin Beekmann,<sup>ae</sup> P. Goloub,<sup>h</sup> F. Goutail,<sup>ac</sup> J. M. Metzger,<sup>b</sup> B. Morel,<sup>b</sup> J. P. Pommereau,<sup>c</sup> J. Porteneuve,<sup>c</sup> T. Portafaix,<sup>b</sup> F. Posny,<sup>b</sup> L. Robert<sup>b</sup> and M. Van Roozendael<sup>g</sup>

Received 1st June 2006, Accepted 24th July 2006

First published as an Advance Article on the web 9th August 2006

DOI: 10.1039/b607762e

The assessment of changes induced by human activities on Earth atmospheric composition and thus on global climate requires a long-term and regular survey of the stratospheric and tropospheric atmospheric layers. The objective of this paper is to describe the atmospheric observations performed continuously at Reunion Island (55.5° east, 20.8° south) for 15 years. The various instruments contributing to the systematic observations are described as well as the measured parameters, the accuracy and the database. The LiDAR systems give profiles of temperature, aerosols and ozone in the troposphere and stratosphere, probes give profiles of temperature, ozone and relative humidity, radiometers and spectrometers give stratospheric and tropospheric integrated columns of a variety of atmospheric trace gases. Data are included in international networks, and used for satellite validation. Moreover, some scientific activities for which this station offers exceptional opportunities are highlighted, especially air mass exchanges nearby dynamical barriers: (1) On the vertical scale through the tropical tropopause layer (stratosphere–troposphere exchange). (2) On the quasi-horizontal scale across the southern subtropical barrier separating the tropical stratospheric reservoir from mid- and high latitudes.

## Introduction

In the last 25 years, research in atmospheric chemistry and physics has been marked by the destruction of the stratospheric ozone layer in Antarctica<sup>1</sup> and the impact of increasing levels of carbon dioxide and other greenhouse gases on global climate.<sup>2,3</sup> The discovery of the sensitivity of the global atmosphere to growing emissions of anthropogenic substances put

in evidence the lack of adequate observations for understanding and thus possibly predicting the global evolution of the composition of the atmosphere (Fig. 1). The NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change) was set up rapidly at the end of the eighties based on the use of the most recent research instruments which could be deployed at stations distributed in latitude for starting the mandatory long term monitoring of the composition of the stratosphere.<sup>4</sup> Largely based on already existing stations at mid- and high latitudes of the Northern Hemisphere, the challenge was to extend the network to other latitudes, particularly to the Southern Hemisphere and the tropics where almost nothing was available. In 2006, to better reflect the free tropospheric and stratospheric coverage of NDSC, measurement, analyses, and modeling activities, as well as to convey the linkage to climate change, the steering committee voted to change the name of the network to NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). It is indeed now well-known that the UTLS (Upper Troposphere–Lower Stratosphere) is the atmospheric layer where the effects of the climate changes should be particularly marked. For example, climate models predict a cooling in the stratosphere up to 7 K, and a warming in the troposphere of about 2 K.<sup>5</sup> Thus, it is of primary importance to be able to detect and quantify such changes and to connect these changes into the different atmospheric compartments, to identify the dynamical links and the strength of their exchanges.

<sup>a</sup> Pierre-Simon Laplace (IPSL), Université Versailles Saint Quentin, 5 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France

<sup>b</sup> Laboratoire de L'Atmosphère et des Cyclones (LACy), UMR-CNRS 8105, 15, av. René Cassin, BP 7151, 97715 St-Denis Cedex 9, La Réunion, France. E-mail: baray@univ-reunion.fr; Fax: 262 93 86 65; Tel: 262 93 86 64

<sup>c</sup> Service d'Aéronomie (SA), UMR-CNRS 7620 Verrières le Buisson, 91371, France

<sup>d</sup> Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), UMR-CNRS 7583, 61 avenue du Général de Gaulle, F-94010 Créteil, France

<sup>e</sup> Service d'Aéronomie (SA), UMR-CNRS 7620 Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cédex 05, France

<sup>f</sup> Université Libre de Bruxelles (ULB), Chimie Quantique et Photophysique, CP 160/09, Avenue F.D. Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgium

<sup>g</sup> Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB-BIRA), 3 Av. Circulaire, B-1180 Bruxelles, Belgium

<sup>h</sup> Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), Université des sciences et technologies Lille 1, UMR-CNRS 8518, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

† The HTML version of this article has been enhanced with colour images.



## Maïdo observatory: a new high-altitude station facility at Reunion Island (21° S, 55° E) for long-term atmospheric remote sensing and in situ measurements

J.-L. Baray<sup>1,2,3</sup>, Y. Courcoux<sup>4</sup>, P. Keckhut<sup>4</sup>, T. Portafaix<sup>1</sup>, P. Tulet<sup>1</sup>, J.-P. Cammas<sup>1,2</sup>, A. Hauchecorne<sup>4</sup>, S. Godin Beekmann<sup>4</sup>, M. De Mazière<sup>5</sup>, C. Hermans<sup>5</sup>, F. Desmet<sup>5</sup>, K. Sellegri<sup>3</sup>, A. Colomb<sup>3</sup>, M. Ramonet<sup>6</sup>, J. Sciare<sup>6</sup>, C. Vuillemin<sup>6</sup>, C. Hoareau<sup>7</sup>, D. Dionisi<sup>4</sup>, V. Duflot<sup>1,2,8</sup>, H. Vèrèmes<sup>1,2</sup>, J. Porteneuve<sup>4</sup>, F. Gabarrot<sup>2</sup>, T. Gaudo<sup>2</sup>, J.-M. Metzger<sup>2</sup>, G. Payen<sup>2</sup>, J. Leclair de Bellevue<sup>1</sup>, C. Barthe<sup>1</sup>, F. Posny<sup>1</sup>, P. Ricaud<sup>9</sup>, A. Abchiche<sup>10</sup>, and R. Delmas<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>LACy (Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones), UMR8105, CNRS – Université de la Réunion – Météo-France, Saint Denis de la Réunion, France

<sup>2</sup>UMS3365 de l'OSU-Réunion, CNRS - Université de la Réunion, Saint Denis de la Réunion, France

<sup>3</sup>LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique), UMR6016, Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, CNRS – Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France

<sup>4</sup>LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), UMR8190, CNRS-UVSQ-UPMC, Guyancourt, France

<sup>5</sup>BIRA-IASB (Belgian Institute for Space Aeronomy), Brussels, Belgium

<sup>6</sup>LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement), UMR8212, CEA, CNRS, UVSQ, Gif-sur-Yvette, France

<sup>7</sup>LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), UMR8539, CNRS, UPMC, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

<sup>8</sup>Spectroscopie de l'Atmosphère, Service de Chimie Quantique et Photophysique, ULB (Université Libre de Bruxelles), Brussels, Belgium

<sup>9</sup>CNRM-GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique), UMR3589, Météo-France CNRS, Toulouse, France

<sup>10</sup>Division Technique DT/INSU, CNRS, Meudon, France

Correspondence to: J.-L. Baray (j.l.baray@opgc.fr)

Received: 26 June 2013 – Published in Atmos. Meas. Tech. Discuss.: 15 July 2013

Revised: 11 September 2013 – Accepted: 26 September 2013 – Published: 29 October 2013

**Abstract.** Since the nineties, atmospheric measurement systems have been deployed at Reunion Island, mainly for monitoring the atmospheric composition in the framework of NDSC/NDACC (Network for the Detection of *Stratospheric Change*/Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). The location of Reunion Island presents a great interest because there are very few multi-instrumented stations in the tropics and particularly in the southern hemisphere. In 2012, a new observatory was commissioned in Maïdo at 2200 m above sea level: it hosts various instruments for atmospheric measurements, including lidar systems, spectro-radiometers and in situ gas and aerosol measurements.

This new high-altitude Maïdo station provides an opportunity:

1. to improve the performance of the optical instruments above the marine boundary layer, and to open new perspectives on upper troposphere and lower stratosphere studies;
2. to develop in situ measurements of the atmospheric composition for climate change surveys, in a reference site in the tropical/subtropical region of the southern hemisphere;
3. to offer trans-national access to host experiments or measurement campaigns for focused process studies.

## Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier

Thierry Portafaix, Béatrice Morel, Hassan Bencherif, and Serge Baldy

Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Reunion University, St. Denis, Reunion, France

Sophie Godin-Beekmann<sup>1</sup> and Alain Hauchecorne

Service d'Aéronomie, CNRS, Paris, France

Received 10 July 2002; revised 29 October 2002; accepted 14 January 2003; published 29 March 2003.

[1] A large-scale transport event resulting in a thick ozone lamina originating from midlatitudes is observed in the tropical stratosphere over Reunion island (55°E, 21°S). This isentropic transport was detected from stratospheric balloon-borne ozone measurements that showed the occurrence of the lamina and was investigated using different tools based on Ertel's potential vorticity (E<sub>pv</sub>) analyses. An original software (DYBAL) using surface coordinate and the equivalent length of E<sub>pv</sub> contours as diagnostic tools in conjunction with high-resolution outputs from an E<sub>pv</sub> advection model MIMOSA allows us to specify the origin of the lamina. The results indicate that a broad layer of stratospheric air was isentropically advected from midlatitudes across the southern edge of tropical reservoir and reached Reunion island on 12 July 2000. In addition, Eliassen-Palm's flux vectors, calculated from ECMWF analysis, show that planetary wave activity was quite large during that time period, with wave-breaking occurring around 30 km, and could have driven that exchange. In contrast with analyses of filamentation events based on model and satellite data, the present study focuses on a fine-scale vertical survey from in situ measurements. The filament reported in this paper is characterized by a large vertical extension and is located around the maximum of ozone concentration in the tropical stratosphere (600 K). The analysis of such events, poorly documented in the tropics, could complement satellite studies and contribute to a better determination of the transport between the tropics and the midlatitudes. *INDEX TERMS:* 0341 Atmospheric Composition and Structure: Middle atmosphere—constituent transport and chemistry (3334); 3319 Meteorology and Atmospheric Dynamics: General circulation; 3334 Meteorology and Atmospheric Dynamics: Middle atmosphere dynamics (0341, 0342); 3364 Meteorology and Atmospheric Dynamics: Synoptic-scale meteorology; *KEYWORDS:* stratosphere, tropics, transport, ozone, laminae, barrier

**Citation:** Portafaix, T., B. Morel, H. Bencherif, S. Baldy, S. Godin-Beekmann, and A. Hauchecorne, Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier, *J. Geophys. Res.*, 108(D6), 4196, doi:10.1029/2002JD002741, 2003.

### 1. Introduction

[2] Stratospheric meridional transport is dominated by the slow diabatic transport of air masses from the tropics to the poles, associated with the Brewer-Dobson circulation marked by large-scale air rising in the tropics and sinking in the polar regions [Holton *et al.*, 1995]. Adiabatic exchanges along isentropic surfaces also play an important role in the stratosphere. Rossby wave breaking events at midlatitudes generate a rapid transport in which air filaments, originating from the tropics, are stretched isentropically and ultimately mixed in the surf zone [Waugh *et al.*,

1994]. Furthermore, meridional gradients of Ertel's potential vorticity (E<sub>pv</sub>) and long-lived chemical species reveal the existence in the stratosphere of a dynamical barrier that controls and limits isentropic horizontal exchanges between the tropical and extratropical regions [Trepte and Hitchman, 1992; Grant *et al.*, 1996]. Observations suggest the existence of a Tropical Stratospheric Reservoir (TSR) in which trace gas composition is distinct from that of the midlatitude stratosphere [McCormick and Veiga, 1992; Hitchman *et al.*, 1994]. Mote *et al.* [1998] and Rosenlof *et al.* [1997] suggest a vigorous two-way transport between the TSR and the extratropics in the lowest part of the tropical stratosphere. Isentropic transport in this region is important since it can shortcut the global mean Brewer-Dobson meridional circulation. Using a middle atmosphere circulation model, Hironouchi *et al.* [2000] showed that the transport between the tropics and the extratropics is strongly dependent on altitude and has geographic preferences in the lower stratosphere

<sup>1</sup>Now at Alfred Wegener Institut, Potsdam, Germany.





## Ground-based assessment of the bias and long-term stability of 14 limb and occultation ozone profile data records

Daan Hubert<sup>1</sup>, Jean-Christopher Lambert<sup>1</sup>, Tjil Verhoelst<sup>1</sup>, José Granville<sup>1</sup>, Arno Keppens<sup>1</sup>, Jean-Luc Baray<sup>2,3</sup>, Adam E. Bourassa<sup>4</sup>, Ugo Cortesi<sup>5</sup>, Doug A. Degenstein<sup>4</sup>, Lucien Froidevaux<sup>6</sup>, Sophie Godin-Beekmann<sup>7</sup>, Karl W. Hoppel<sup>8</sup>, Bryan J. Johnson<sup>9</sup>, Erkki Kyrölä<sup>10</sup>, Thierry Leblanc<sup>11</sup>, Günter Lichtenberg<sup>12</sup>, Marion Marchand<sup>7</sup>, C. Thomas McElroy<sup>13</sup>, Donal Murtagh<sup>14</sup>, Hideaki Nakane<sup>15,16</sup>, Thierry Portafaix<sup>2</sup>, Richard Querel<sup>17</sup>, James M. Russell III<sup>18</sup>, Jacobo Salvador<sup>19</sup>, Herman G. J. Smit<sup>20</sup>, Kerstin Stebel<sup>21</sup>, Wolfgang Steinbrecht<sup>22</sup>, Kevin B. Strawbridge<sup>23</sup>, René Stübi<sup>24</sup>, Daan P. J. Swart<sup>25</sup>, Ghassan Taha<sup>26,27</sup>, David W. Tarasick<sup>23</sup>, Anne M. Thompson<sup>27</sup>, Joachim Urban<sup>14,†</sup>, Joanna A. E. van Gijzel<sup>28</sup>, Roeland Van Malderen<sup>29</sup>, Peter von der Gathen<sup>30</sup>, Kaley A. Walker<sup>31,32</sup>, Elian Wolfram<sup>19</sup>, and Joseph M. Zawodny<sup>33</sup>

<sup>1</sup>Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB), Brussels, Belgium

<sup>2</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (Université de La Réunion, CNRS, Météo-France), OSU-Réunion (Université de La Réunion, CNRS), La Réunion, France

<sup>3</sup>Laboratoire de Météorologie Physique, Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (Université Blaise Pascal, CNRS), Clermont-Ferrand, France

<sup>4</sup>Institute of Space and Atmospheric Studies, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada

<sup>5</sup>Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>6</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA

<sup>7</sup>Laboratoire Atmosphère Milieux Observations Spatiales, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France

<sup>8</sup>Naval Research Lab, Washington, DC, USA

<sup>9</sup>NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, Boulder, Colorado, USA

<sup>10</sup>Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

<sup>11</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Wrightwood, CA, USA

<sup>12</sup>German Aerospace Center (DLR), Remote Sensing Technology Institute, Oberpfaffenhofen, Germany

<sup>13</sup>York University, Toronto, ON, Canada

<sup>14</sup>Department of Earth and Space Sciences, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

<sup>15</sup>Kochi University of Technology, Kochi, Japan

<sup>16</sup>National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, Japan

<sup>17</sup>National Institute of Water and Atmospheric Research, Lauder, New Zealand

<sup>18</sup>Department of Atmospheric and Planetary Science, Hampton University, VA, USA

<sup>19</sup>CEILAP-UNIDEF (MINDEF-CONICET), UMI-IFAECI-CNRS-3351, Villa Martelli, Argentina

<sup>20</sup>Research Centre Jülich, Institute for Energy and Climate Research: Troposphere (IEK-8), Jülich, Germany

<sup>21</sup>Norwegian Institute for Air Research (NILU), Kjeller, Norway

<sup>22</sup>Meteorologisches Observatorium, Deutscher Wetterdienst, Hohenpeissenberg, Germany

<sup>23</sup>Air Quality Research, Environment and Climate Change Canada, Toronto, ON, Canada

<sup>24</sup>Payerne Aerological Station, MeteoSwiss, Payerne, Switzerland

<sup>25</sup>National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, the Netherlands

<sup>26</sup>Universities Space Research Association, Greenbelt, MD, USA

<sup>27</sup>NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

<sup>28</sup>Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, the Netherlands

<sup>29</sup>Royal Meteorological Institute of Belgium, Brussels, Belgium

<sup>30</sup>Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany



# Results from the validation campaign of the ozone radiometer GROMOS-C at the NDACC station of La Réunion Island

Susana Fernandez<sup>1</sup>, Rolf Rüfenacht<sup>1</sup>, Niklaus Kämpfer<sup>1</sup>, Thierry Portafaix<sup>2</sup>, Françoise Posny<sup>2</sup>, and Guillaume Payen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics, University of Bern, Switzerland

<sup>2</sup>LACy, Université de la Réunion, Saint Denis, France

<sup>3</sup>OSU-Réunion, Université de la Réunion, Saint Denis, France

*Correspondence to:* S. Fernandez

(susana.fernandez@iap.unibe.ch)

**Abstract.** Ozone is a species of primary interest as it performs a key role in the middle atmosphere and its monitoring is thus necessary.

At the Institute of Applied Physics of the University of Bern, Switzerland, we built a new ground based microwave radiometer, GROMOS-C (GRound based Ozone MOnitoring System for Campaigns). It has a compact design and can be operated at remote places with very little maintenance requirements, being therefore suitable for remote deployments. It has been conceived to measure the vertical distribution of ozone in the middle atmosphere, by observing pressure broadened emission spectra at a frequency of 110.836 GHz. In addition, meridional and zonal wind profiles can be retrieved, based on the Doppler shift of the ozone line measured in the 4 directions of observation (North-East-South-West).

In June 2014 the radiometer was installed in the Maïdo observatory, on La Réunion Island (21.2°S, 55.5°E). High resolution ozone spectra were continuously recorded during 7 months. Vertical profiles of ozone have been retrieved through an optimal estimation inversion process, using the Atmospheric Radiative Transfer Simulator ARTS2 as the forward model. The best estimate of the vertical profile is done by means of the optimal estimation method. The validation is performed against ozone profiles from the Microwave Limb Sounder (MLS) on the Aura satellite, the ozone lidar located in the observatory and with ozone profiles from weekly radiosondes. Zonal and meridional winds retrieved from GROMOS-C data are validated against another wind radiometer located in situ, WIRA. In addition, we compare both ozone and winds with ECMWF model data. Results show that GROMOS-C provides reliable ozone profiles between 30 to 0.02 hPa. The comparison with lidar shows a very good agreement at all levels. The accordance with MLS is within less than 10% for pressure levels between 25 and 0.2 hPa.

## 1 Introduction

The stratospheric ozone layer absorbs ultraviolet radiation from the sun, protecting life at the surface of the Earth and, through heating by the absorbed radiation, determines the thermal state of the middle atmosphere. Variations in its concentration can significantly alter the radiative balance of the middle atmosphere and consequently influence climate through resulting cir-



# Construction of merged satellite total O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> time series in the tropics for trend studies and evaluation by comparison to NDACC SAOZ measurements

M. Pastel<sup>1</sup>, J.-P. Pommereau<sup>1</sup>, F. Goutail<sup>1</sup>, A. Richter<sup>2</sup>, A. Pazmiño<sup>1</sup>, D. Ionov<sup>3</sup>, and T. Portafaix<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, CNRS, UMR8190, Université Versailles Saint Quentin, Guyancourt, France

<sup>2</sup>Institute of Environmental Physics, University of Bremen, Bremen, Germany

<sup>3</sup>Research Institute of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR8105, CNRS – Université de la Réunion – Météo-France, Saint Denis de la Réunion, France

Correspondence to: M. Pastel (maud.pastel@latmos.ipsl.fr)

Received: 2 May 2013 – Published in Atmos. Meas. Tech. Discuss.: 31 May 2013

Revised: 28 June 2014 – Accepted: 22 August 2014 – Published: 7 October 2014

**Abstract.** Long time series of ozone and NO<sub>2</sub> total column measurements in the southern tropics are available from two ground-based SAOZ (Système d'Analyse par Observation Zénithale) UV-visible spectrometers operated within the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) in Bauru (22° S, 49° W) in S-E Brazil since 1995 and Reunion Island (21° S, 55° E) in the S-W Indian Ocean since 1993. Although the stations are located at the same latitude, significant differences are observed in the columns of both species, attributed to differences in tropospheric content and equivalent latitude in the lower stratosphere. These data are used to identify which satellites operating during the same period, are capturing the same features and are thus best suited for building reliable merged time series for trend studies. For ozone, the satellites series best matching SAOZ observations are EP-TOMS (1995–2004) and OMI-TOMS (2005–2011), whereas for NO<sub>2</sub>, best results are obtained by combining GOME version GDP5 (1996–2003) and SCIAMACHY – IUP (2003–2011), displaying lower noise and seasonality in reference to SAOZ. Both merged data sets are fully consistent with the larger columns of the two species above South America and the seasonality of the differences between the two stations, reported by SAOZ, providing reliable time series for further trend analyses and identification of sources of interannual variability in the future analysis.

## 1 Introduction

The inter-tropical belt is a key region for stratospheric ozone and climate. Indeed, it is the source of all tropospheric short- and long-lived chemical species emitted at the surface, water vapor and sulfate aerosols that are lofted across the tropopause and further transported to higher altitude and latitude by the Brewer–Dobson circulation. The need to understand the impact on the stratospheric composition of the increased emissions of pollutants and greenhouse gases (GHGs), changes in stratospheric circulation, solar activity, quasi-biennial oscillation (QBO) and El Niño events, makes monitoring of the composition of the atmosphere in this region necessary. Hence, it is important to have both ground-based and space-borne observations of trace gases among which ozone and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) columns have been measured during the last 20 years. But although total ozone and NO<sub>2</sub> satellite observations by Earth Probe (EP-TOMS), Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), followed by Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY) and Ozone Monitoring Instrument (OMI), have been thoroughly validated at mid-latitude by comparison with ground-based measurements (e.g. PETERS et al., 2006; BALIS et al., 2007; LAMBERT et al., 1998; CELARIER et al., 2008; IONOV et al., 2008; HENDRICK et al., 2011), with the exception of the last mentioned papers, the validation hardly applies to the tropics. The reason for that



# Comparison of total column ozone obtained by the IASI-MetOp satellite with ground-based and OMI satellite observations in the southern tropics and subtropics

A. M. Tohir<sup>1</sup>, H. Bencherif<sup>1</sup>, V. Sivakumar<sup>2</sup>, L. El Amraoui<sup>3</sup>, T. Portafaix<sup>1</sup>, and N. Mbatha<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, Université de La Réunion, St-Denis, Réunion Island, France

<sup>2</sup>School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu Natal, Durban, South Africa

<sup>3</sup>Centre National de Recherche Météorologique, Météo-France, Toulouse, France

<sup>4</sup>South African Weather Service, P.O. Box 320, Stellenbosch 7599, South Africa

Correspondence to: A. M. Tohir (mohamed.abdoulwahab@univ-reunion.fr)

Received: 14 May 2015 – Revised: 19 August 2015 – Accepted: 24 August 2015 – Published: 16 September 2015

**Abstract.** This paper presents comparison results of the total column ozone (TCO) data product over 13 southern tropical and subtropical sites recorded from the Infrared Atmospheric Sounder Interferometer (IASI) onboard the EU-METSAT (European organization for the exploitation of Meteorological SATellite) MetOp (Meteorological Operational satellite program) satellite. TCO monthly averages obtained from IASI between June 2008 and December 2012 are compared with collocated TCO measurements from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) on the OMI/Aura satellite and the Dobson and SAOZ (Système d'Analyse par Observation Zénithale) ground-based instruments. The results show that IASI displays a positive bias with an average less than 2 % with respect to OMI and Dobson observations, but exhibits a negative bias compared to SAOZ over Bauru with a bias around 2.63 %. There is a good agreement between IASI and the other instruments, especially from 15° S southward where a correlation coefficient higher than 0.87 is found. IASI exhibits a seasonal dependence, with an upward trend in autumn and a downward trend during spring, especially before September 2010. After September 2010, the autumn seasonal bias is considerably reduced due to changes made to the retrieval algorithm of the IASI level 2 (L2) product.

The L2 product released after August (L2 O<sub>3</sub> version 5 (v5)) matches TCO from the other instruments better compared to version 4 (v4), which was released between June 2008 and August 2010. IASI bias error recorded from September 2010 is estimated to be at 1.5 % with respect to OMI and less than  $\pm 1$  % with respect to the other ground-

based instruments. Thus, the improvement made by O<sub>3</sub> L2 version 5 (v5) product compared with version 4 (v4), allows IASI TCO products to be used with confidence to study the distribution and interannual variability of total ozone in the southern tropics and subtropics.

**Keywords.** Atmospheric composition and structure (middle atmosphere – composition and chemistry)

## 1 Introduction

Atmospheric ozone plays a key role since it protects the biosphere from harmful ultraviolet radiation. About 90 % of its mass is found in the stratosphere where ozone is formed through photochemical reactions. Most ozone is formed in the tropics but is rapidly transported to higher latitudes by Brewer–Dobson large-scale circulation (Weber et al., 2011). Global total column ozone (TCO) has depleted gradually since 1980 with an increase of chlorofluorocarbon concentrations in the stratosphere due to anthropogenic activities. Ozone is under high surveillance, especially since the discovery of the Antarctic ozone hole (Farman et al., 1985; Krueger et al., 1992; Stolarski et al., 1990). In 1987, the Montreal protocol was formulated in order to regulate the emissions of substances that deplete ozone (United Nations Environment Programme UNEP, 2009); thus we have been expecting an increase in ozone by now. So validation of new measurements is of paramount importance. In recent years, different observations and studies have shown that subtropical

## CHAPÎTRE 3

### Etude de la variabilité du réservoir stratosphérique tropical : - Variabilité, et tendances de l’ozone, - Etude des barrières stratosphériques tropicales.

---

- 3.1. Introduction
- 3.2. Outils numériques pour l’étude des barrières dynamiques
  - 3.2.1. Couplage de MIMOSA et DyBal
  - 3.2.2. Méthode des K-Means
- 3.3. Outils numériques pour l’étude des tendances :
  - 3.3.1. Modèle statistique multilinéaire Trend-Run
  - 3.3.2. EEMD : Décomposition Modale Empirique
- 3.4. Travaux:
  - Portafaix 2001 (Thèse)
  - Portafaix et al., 2003
  - Bencherif et al. 2003
  - Portafaix et al., 2004
  - Morel et al., 2005
  - Bencherif et al. 2006
  - Sivakumar et al, 2007
  - Kirgis 2008 (Document de Thèse – Thèse encadrée)
  - Bencherif at al., 2011
  - Toihir 2015 (Document de Thèse - Thèse encadrée)
  - Begue et al., 2017
  - Sivakumar et al., 2017
  - Toihir et al., 2018
  - Val Perez et al, 2019 (soumis)

#### **Synthèse du chapitre 3 :**

##### En chiffres :

3 documents de thèse  
5 projets de recherche dont 2 en cours  
11 articles ACL  
20 communications ACL

#### 3.1 Introduction

La stratosphère (10-50 km d’altitude) est une région de l’atmosphère particulièrement surveillée. Elle est directement impliquée dans deux des thématiques majeures de la recherche atmosphérique actuelle : surveillance du rétablissement de la couche d’ozone et évolutions climatiques en lien avec l’augmentation des concentrations des gaz dit à ‘effet de serre’ (GES).

Ces deux problématiques sont étroitement liées.

Dans ce contexte, la stratosphère tropicale joue un rôle fondamental. C'est le point d'entrée des masses d'air en stratosphère, et l'ozone y est produit sous l'effet d'un rayonnement solaire important. L'air tropical est redistribué vers les moyennes et hautes latitudes par la circulation méridienne dite de Brewer-Dobson (BDC) et influe donc sur l'ensemble de la planète. La BDC est mal connue et mal documentée par manque d'observations. Elle n'est pas régulière en intensité au cours de l'année. En hiver, la stratosphère tropicale est isolée de la stratosphère des moyennes latitudes, et la stratosphère polaire est isolée des moyennes latitudes. Les échanges entre ces zones sont bloqués par des barrières dynamiques de mélange [barrière dynamique subtropicale (BDS) ou vortex polaire (VP)], impliquant de forts gradients de vorticité potentielle et de constituants chimiques. Ce confinement des masses d'air dans le Réservoir Stratosphérique Tropical (RST) ou aux pôles, est contrôlé par l'activité des ondes planétaires aux moyennes latitudes.

La remontée progressive des quantités d'ozone suite au protocole de Montréal, combinée à l'émission anthropique massive de gaz à effet de serre, influe considérablement sur les propriétés radiatives de la basse stratosphère, modifiant en même temps la température de cette région, sa chimie et sa dynamique. De nombreux modèles numériques de climat prédisent une accélération de la BDC entre les tropiques et les moyennes/hautes latitudes, un élargissement du RST, et une possible diminution des quantités d'ozone en très basse stratosphère aux tropiques (SPARC CCMVal, 2010 ; Randel et al, 2011 ; WMO, 2018). L'âge moyen de l'air stratosphérique (AoA) est utilisé comme diagnostic de la force de la BDC. Il devrait diminuer puisqu'une parcelle d'air prendra moins de temps pour aller de son point d'entrée en stratosphère jusqu'à sa position à un instant donné.

Des études récentes ont toutefois révélé des tendances faiblement positives de l'AoA pour les moyennes latitudes de l'hémisphère nord et pour la période 1975-2005 (Engel et al., 2009), mais des tendances négatives ont été trouvées aux latitudes moyennes et tropicales de l'hémisphère sud. Dans l'ensemble, de nombreuses études à partir de traceurs chimiques montrent une telle structure hémisphérique asymétrique dans les tendances de l'AoA (Ploeger et al., 2015b, Eckert et al., 2014; Nedoluha et al., 2015a, b ; Mahieu et al., 2014 ; Chirkov et al., 2016 ; Glatthor et al., 2017).

Récemment, Stiller et al. (2017) ont calculé la position de la barrière stratosphérique subtropicale à partir de traceurs chimiques (mesures satellites) à longue durée de vie, afin d'en estimer les tendances. Ils ont montré un déplacement d'ensemble vers le sud de ces barrières et des zones de mélange, pouvant atteindre 5 degrés de latitude sur la période 2002-2012.

Pour conclure cette partie introductive, la stratosphère tropicale est un compartiment essentiel du système climatique et la prise en compte de sa variabilité, tant dynamique que chimique, est

particulièrement importante pour mieux comprendre les évolutions globales en stratosphère et plus généralement du système climatique dans son ensemble.

Pourtant, de grandes incertitudes demeurent quant à l'ampleur de cette variabilité et donc sur les tendances à long terme de ce compartiment atmosphérique.

Au cours de ma carrière, j'ai travaillé sur 2 aspects différents des changements de la stratosphère tropicale. Je me suis intéressé d'une part à la variabilité et aux tendances de l'ozone, et d'autre part, à la dynamique stratosphérique, J'ai dû développer pour cela (ou acquérir la maîtrise) différents outils. On peut citer par exemple les modèles d'analyse de tendance, les outils de diagnostic dynamique, les méthodes de classification, ... Par la suite, je les ai appliqués sur les séries, observées ou modélisées, des paramètres contrôlant la chimie et la dynamique pour mieux comprendre le comportement du RST.

Je présenterai dans la suite les outils numériques que j'ai développés au cours de ma carrière et je les articulerai au fur et à mesure avec les études, résultats et articles qui en ont découlé.

### 3.2. Outils numériques

#### 3.2.1. Couplage de MIMOSA et DyBal

La stratégie développée au cours de ma thèse pour étudier les barrières dynamiques en stratosphère consistait à s'appuyer sur le formalisme de Nakamura (Nakamura et al., 1996 ; Haynes et Shuckburgh, 2000) pour développer une méthode originale multicritères (les différents critères dynamiques calculés étant alors utilisés simultanément).

La vorticité potentielle isentrope est utilisée ici comme traceur dynamique. En effet, elle est conservée dans des conditions adiabatiques et sans frottement. Une température potentielle et une vorticité potentielle caractérisent alors *de facto* une masse d'air donnée. Les processus diabatiques susceptibles de modifier la vorticité potentielle ou la température potentielle dans la stratosphère s'opèrent sur des échelles de temps bien supérieures aux phénomènes que l'on souhaite décrire (Holton et al., 1995).

Nakamura a introduit un certain nombre d'outils diagnostiques basés sur la vorticité potentielle (PV) isentrope et exprimés en coordonnées de surface. Ils permettent de définir les barrières dynamiques et de dissocier les zones de mélange.

I.  $\frac{\partial PV}{\partial A}$ : le gradient de traceur (PV) en coordonnées de surface

Ce gradient doit présenter un *maximum relatif* à l'endroit des barrières

II.  $L_e^2 = \langle |\nabla PV|^2 \rangle / \left( \frac{\partial PV}{\partial A} \right)^2$  qui représente l'efficacité du mélange dû aux mouvements erratiques.

Cette longueur équivalente (ou diffusivité effective) doit présenter un minimum à l'endroit des barrières. En effet, ce paramètre est plus grand lorsque les contours du traceur sont longs comparativement à la longueur minimum possible, c'est à dire lorsque la structure géométrique des contours est plus complexe. Puisque la capacité d'un flux à se mélanger facilement correspond à sa capacité à produire des contours complexes, il en résulte que la longueur équivalente peut être considérée comme une mesure de capacité de mélange d'un flux.

Ainsi, une faible longueur équivalente est caractéristique d'une zone où le mélange est peu actif, c'est à dire une barrière.

Dans notre cas, il est pratique de remplacer la coordonnée de surface A par une coordonnée de latitude, qui sera appelée « latitude équivalente », notée  $\lambda$  et définie par :

$$\lambda = \text{Arcsin}(1-A) \quad \text{et} \quad A = \frac{S}{2\pi R^2} \text{ surface normalisée à un hémisphère}$$

La méthode est décrite dans Portafaix et al. (2003). Elle consiste tout d'abord à calculer les champs de vorticité sur des surfaces isentropes à partir des ré-analyses ECMWF, puis à les advecter par le modèle MIMOSA, afin d'obtenir des champs de vorticité isentrope à haute résolution (Hauchecorne et al., 2002).

Les champs produits par MIMOSA possèdent une très bonne résolution horizontale, nettement plus fine que celle des champs initiaux. Ils permettent donc de suivre l'évolution des structures filamentaires fines, non visibles sur les champs ECMWF et la détermination plus précise des barrières.

On peut noter ici que la résolution a été nettement améliorée dans les champs de la re-analyse ECMWF ERA 5 (30 km) produits en 2019. Il sera intéressant de vérifier si l'utilisation des concepts de Nakamura (1996) formalisés dans l'algorithme DyBal (voir plus loin), peut être directement appliquée sur les champs originaux ECMWF, sans advection préalable par MIMOSA.

Une fois les champs advectés, l'application de l'algorithme de DyBaL permet la localisation des zones de barrières sur des cartes de vorticité potentielle. J'ai développé ce code au LACy durant ma thèse (Portafaix et al., 2003), à partir des outils de diagnostic présentés dans le paragraphe précédent (gradient et longueur de mélange). Sa résolution de calcul est adaptable



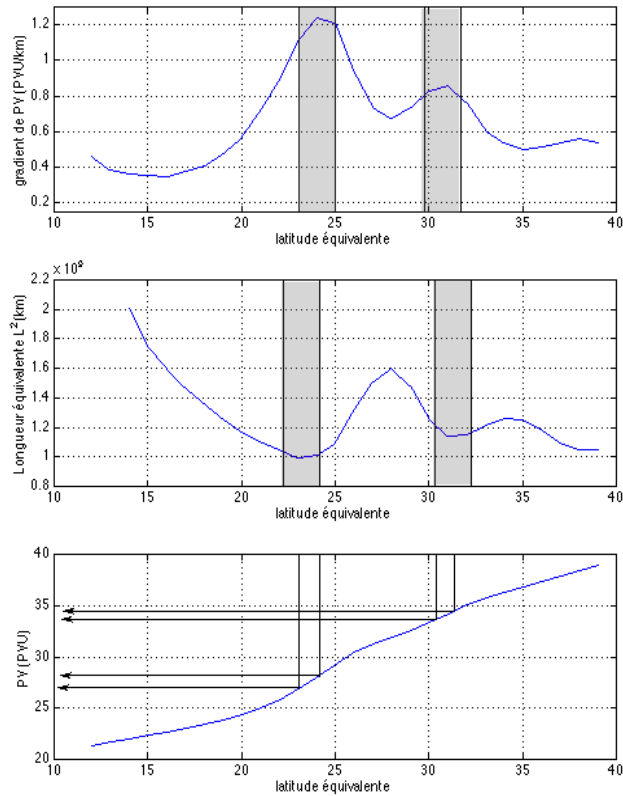
et dépend de la résolution des champs dynamiques initiaux utilisés. La fenêtre spatiale est ajustable car le nombre de lignes iso- $PV$  est pris égal au nombre de latitudes initiales (Nash et al., 1996).

Le fonctionnement de DyBaL est le suivant :

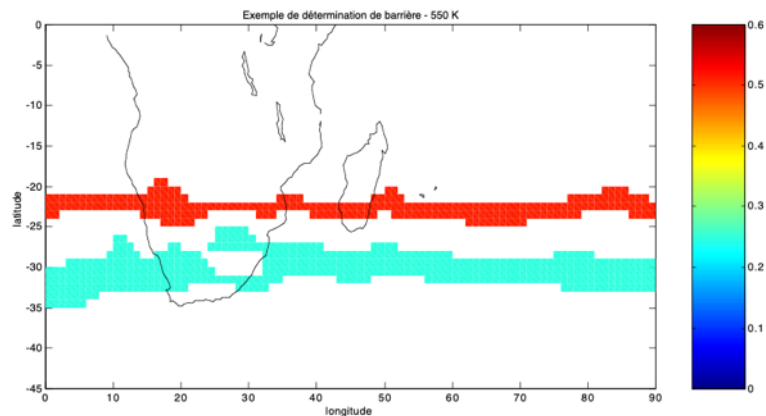
1. Dans un premier temps, on définit les lignes iso-contours de  $PV$  à partir de la carte initiale. Le pas entre chaque ligne iso- $PV$  est pris égal à la résolution en latitude de la carte d'origine.
2. On calcule, ensuite, les surfaces de Terre  $A$  délimitées par ces iso-contours. La latitude équivalente correspondante est calculée à partir de la fonction  $PV=f(A)$ .
3. Par dérivations successives, on obtient tout d'abord le gradient de  $PV$  puis sa dérivée en fonction de la latitude équivalente, afin de détecter les maxima.
4. On procède de façon similaire pour la longueur équivalente de contour.
5. Les zones de barrière, conformément à Nakamura et al. (1996), sont alors détectées lorsque les 2 critères sont validés ( $\frac{\partial PV}{\partial \lambda}$  maximum et  $L^2_e(\lambda)$  minimum). On peut ensuite remonter aux coordonnées géographiques des barrières en affichant sur les cartes initiales les pixels correspondants. Une idée de la force relative des barrières détectées est obtenue en évaluant la hauteur du maximum  $\frac{\partial PV}{\partial \lambda}$  par rapport à une ligne de base, calculée en appliquant un filtre polynomial sur la courbe  $\frac{\partial PV}{\partial \lambda} = f(\lambda)$ .

Cette méthode a été appliquée avec succès pour différents articles :

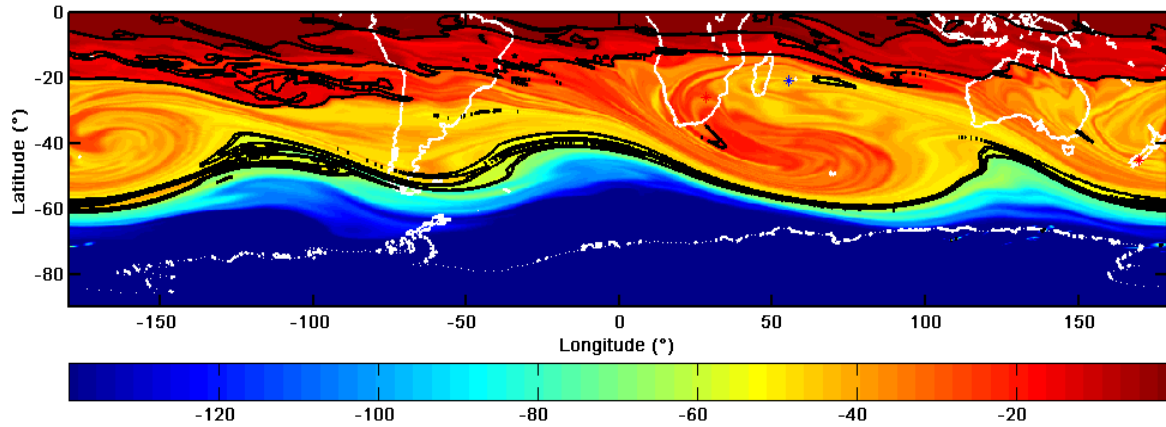
- Portafaix et al., 2003 et Morel et al., 2005, ont décrit finement un évènement de transport quasi-horizontale isentropique le 12 juillet 2000.
- Bencherif et al. 2003 ont décrit un épisode de transport à large échelle à travers la barrière dynamique subtropicale en 1999.
- Begue et al., 2017 ont utilisé cette méthode pour suivre le panache stratosphérique du volcan Calbuco.
- Val Perez et al., 2019 ont documenté les évènements filamentaires en provenance du vortex polaire au-dessus du sud du Brésil (Santa – Maria), article soumis.



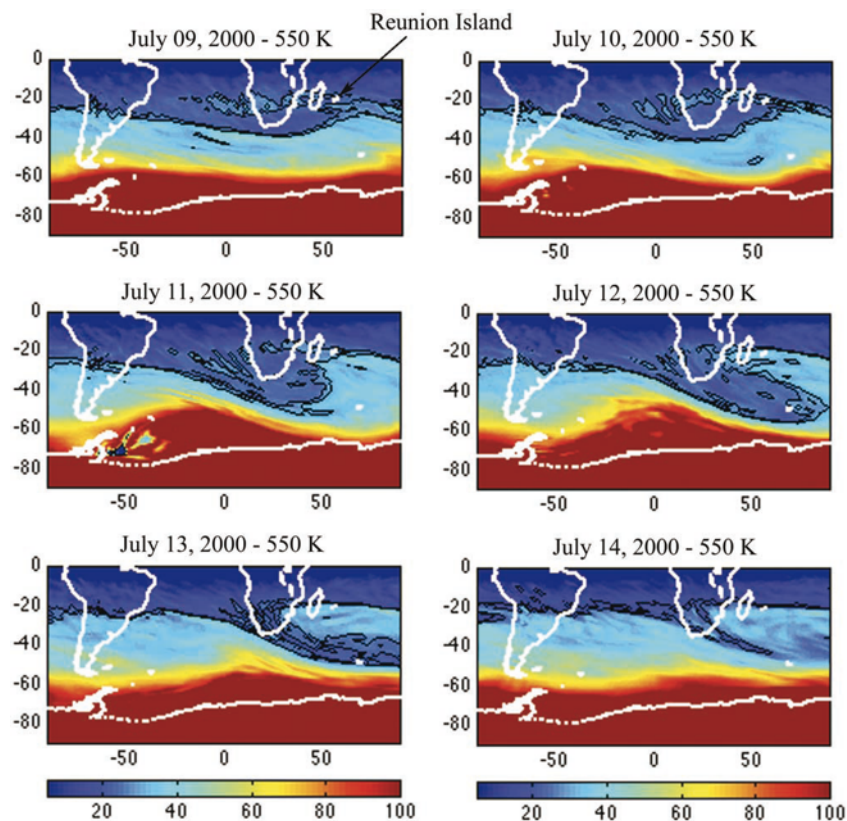
*Figure 3.1* : Illustration de la méthode de localisation des barrières du code DyBaL. La figure du haut présente le gradient de vorticité en fonction de la latitude équivalente. Les zones grisées correspondent aux maxima secondaires détectés par le code. La figure (b) présente la quantité  $L^2$  en fonction de la latitude équivalente. Les zones grisées correspondent aux minima secondaires détectés par le code. La figure en bas (c) présente la vorticité potentielle en fonction de la latitude équivalente (d'après Portafaix, 2003)



*Figure 3.2* : Exemple de zones de barrières détectées par le code DyBaL. La force relative des barrières est représentée par des codes couleur.



*Figure 3.3 : Carte de PV pour le 12 juillet 2000 pour tout l'hémisphère sud. Les contours de barrières détectés par DyBal sont représentés en noir.*



*Figure 3.4 : Évolution de la barrière stratosphérique subtropicale à 550 K autour du 12 juillet 2000 calculée avec Code DyBaL basé sur les outils de Nakamura. La position de la barrière (contour noir) est superposée sur les cartes de PV, d'après Portafaix et al., 2003.*

L'emploi des outils diagnostiques en coordonnées de surface est d'une grande utilité pour la détection des barrières dynamiques et ainsi pour localiser les différents réservoirs stratosphériques. Cependant, cette méthode numérique est sensible au bruit en raison de la

dérivation. Elle présente le désavantage de l'imprécision concernant la localisation géographique.

En particulier lorsque l'activité dynamique est forte et que les schémas de PV présentent des structures complexes (filaments ou langues), les positions de barrières trouvées par le gradient de PV et par la  $L^2$  peuvent différer significativement (plusieurs degrés), rendant la méthode DyBaL (double critère validé simultanément) non applicable.

Enfin, ces outils ne permettent pas de quantifier le transport entre les différents réservoirs.

### 3.2.2. Méthode des K-Means

Une autre méthode de détection des barrières a été développée au LACy en coopération avec le LATMOS et le LIM (Laboratoire d'Informatique et de Mathématique de l'UR). Il s'agit de la méthode de classification dite des K-Means, empruntée à l'analyse multidimensionnelle et dont le champ d'action se trouve habituellement en géographie ou en économie.

L'algorithme K-Means cherche à classer  $M$  points dans  $N$  dimensions en  $k$  classes différentes [McQueen, 1967]. Cet algorithme itératif recherche une solution locale qui minimise la distance euclidienne entre les éléments à classer et les centres de la classe. A chaque itération, les centres de classe évoluent. L'avantage de l'algorithme des K-Means (ou centres mobiles) est qu'il est facile à mettre en œuvre, en particulier d'un point de vue numérique.

Deux objectifs distincts ont ainsi été définis. Le premier consiste à détecter les barrières dynamiques (subtropicale et polaire) comme intersection entre deux classes puis de regarder leur évolution. Le deuxième a permis de reconstituer les cartes de PV advectée à l'aide des classes obtenues pour isoler les événements filamentaires. La finalité de ces deux objectifs a permis d'estimer le transport entre chaque région en suivant le changement de classe d'une parcelle d'air par rapport à la position climatologique définie, ou de mettre en évidence des routes plus privilégiées pour le transport inter-classes

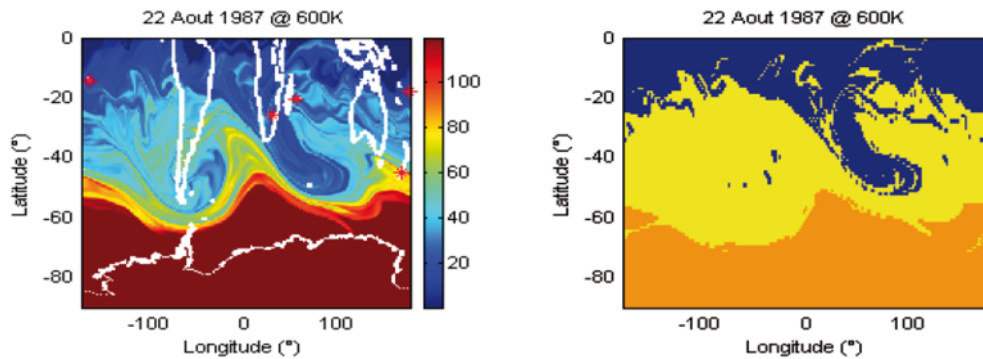
Pour cet algorithme, le nombre de classe ( $k$ ) doit être attribué en fonction des connaissances préexistantes des données.

Nous avons choisi ici une classification en trois classes ( $k=3$ ), où chaque classe représente une région géographique bien définie de l'atmosphère :

1. Le réservoir stratosphérique tropical (RST)
2. La surf zone ou stratosphère des moyennes latitudes où le mélange est important
3. Le vortex polaire.

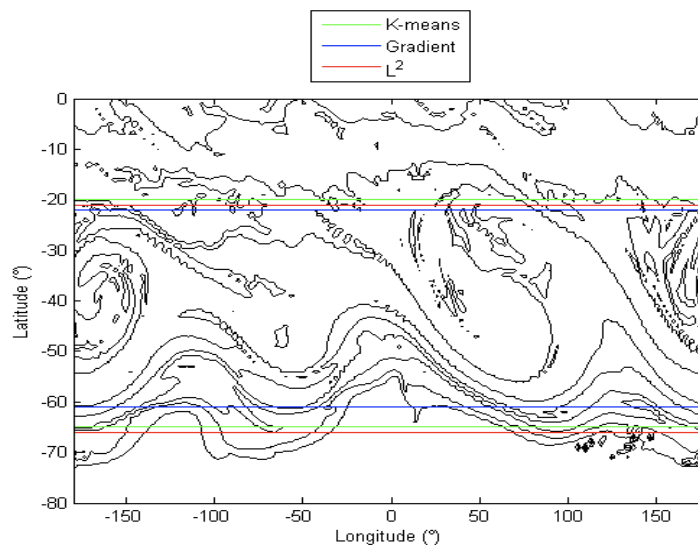
L'initialisation se fait par la technique dite divisive. La détection des barrières dynamiques (subtropicale et polaire) est réalisée comme intersection entre deux classes.

La méthode est décrite précisément dans Kirgis, 2008.



*Figure 3.5 : Exemple de carte de vorticité advectée pour les 22 août 1987, et des classes obtenues par les K-Means.(version incrémentale)- d'après Kirgis 2008*

Nous avons comparé les positions de barrières obtenues par la méthode DyBal (gradient de PV et  $L^2$ ) et celles obtenues par les K-Means. Un exemple est donné dans la figure suivante.



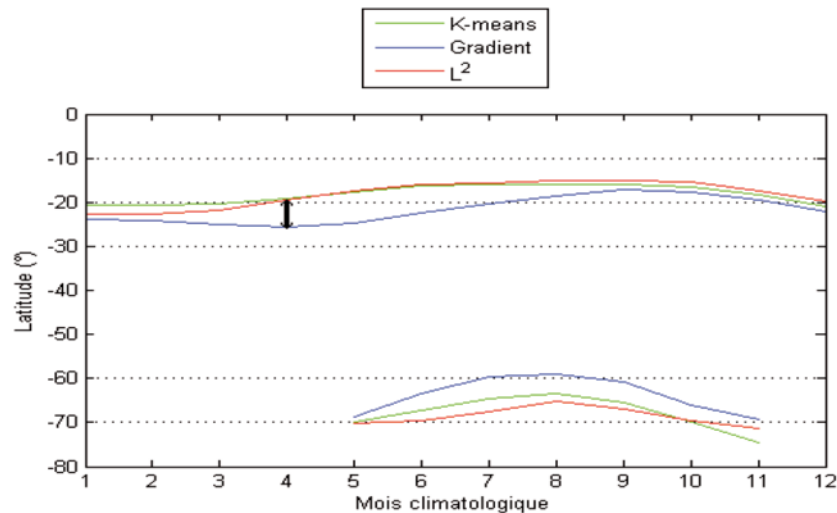
*Figure 3.6 : Contours des lignes iso-APV (intervalle de -20 APV) pour le cas du 12 juillet 2000. Les positions des barrières détectées par les trois méthodes (K-Means en vert, gradient de PV en bleu et longueur de mélange en rouge) ont été indiquées.*

Cette figure montre la superposition des contours de PV et des positions de barrières détectées par les trois méthodes pour le cas du 12 juillet 2000. On remarque tout d'abord une bonne correspondance dans la localisation de la position de la barrière subtropicale - 20°S pour la méthode des *K-Means*, 21°S pour la longueur de mélange et 22°S pour le gradient de PV.

Pour le vortex polaire, on constate également une bonne concordance de détection par la méthode de la longueur de mélange et la méthode des *K-Means*. La méthode du gradient de PV

diffère et détecte un vortex plus au nord. La méthode de la longueur de mélange et la méthode des K-Means positionnent le vortex polaire respectivement à 66°S et 65°S, la méthode du gradient de PV à 61°S. De manière générale, la position donnée par la méthode de classification se situe entre les deux autres.

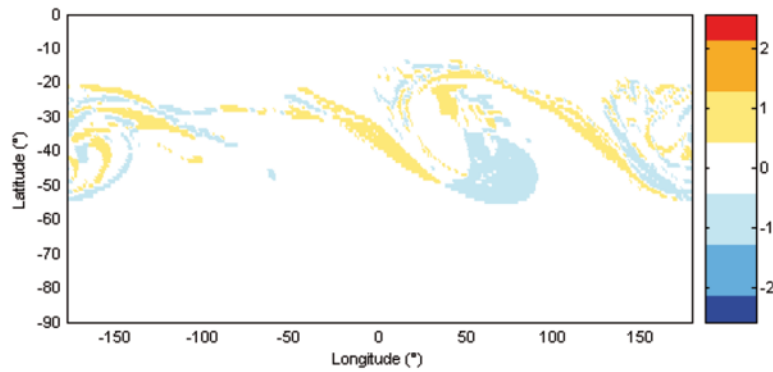
Ce positionnement est satisfaisant car la méthode du gradient et celle de la longueur de mélange caractérise deux phénomènes différents et les résultats présentent des écarts d'autant plus importants que les structures filamenteuses sont importantes ou que les iso-contours sont complexes.



*Figure 3.7 : Climatologie des positions de barrières à 600K. Les trois méthodes de détection sont représentées en différentes couleurs suivant la légende.*

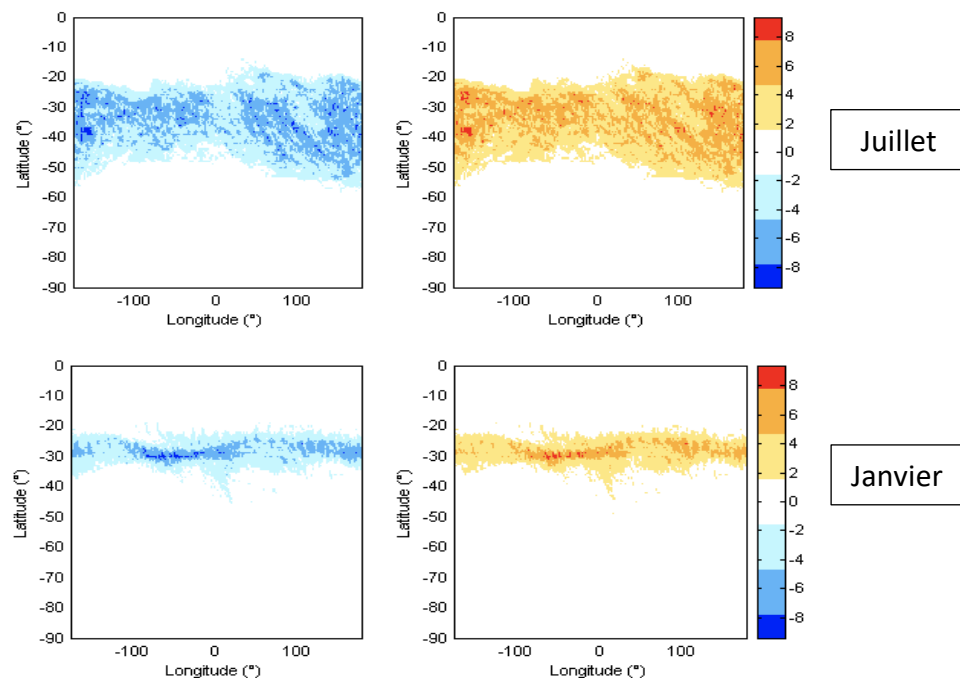
D'un point de vue climatologique (figure 3.7), la méthode de la longueur équivalente de mélange définit la position du vortex polaire à des latitudes plus hautes (plus sud) que les deux autres méthodes. En ce qui concerne la barrière subtropicale, une bonne concordance apparaît entre les trois méthodes mais des écarts pouvant atteindre 5° séparent les positions de barrière définies par les méthodes des K-Means, de la longueur de mélange et la méthode du gradient. La méthode du gradient positionne la barrière subtropicale plus au sud que les 2 autres méthodes, de manière climatologique.

Avec la même méthode, il est également possible de suivre de façon plus précise le comportement d'une parcelle d'air (soit d'un pixel) au cours du temps. Un premier compteur répertorie le nombre de changements de classe entre le RST et la surf zone (incrément de 1). Le deuxième compte le nombre de changements de classe entre la surf zone et le RST (incrément de -1). La figure suivante montre l'évolution des déformations subies par la barrière subtropicale entre le 11 et le 12 juillet 2000. Les zones colorées représentent des zones d'échanges entre les deux réservoirs.



*Figure 3.8 :* Représentation du nombre de changements de classe entre le 11 et le 12 juillet 2000. Les valeurs positives (+1) représentent les pixels changeant de la « classe Réserve tropicale » vers la « classe surfzone ». Les valeurs négatives (-1) représentent les pixels changeant de la « classe surfzone » vers la « classe RST ».

Appliquée à un mois de données en continu, cela permet de caractériser les routes privilégiées du transport. Les figures 3.9 haut et bas, représentent le nombre de changements de classes réalisés au cours des mois de juillet et de janvier 2000. On peut y voir la différence majeure entre l’hiver et l’été austral que Neu *et al.* (2003) avaient fait ressortir : la zone d’échange des moyennes latitudes est plus large (de 20°S à 50°S) en hiver qu’en été où elle est confinée autour de 30°S et large d’environ 10°.



*Figure 3.9 :* Changements de classe réalisés, pour chaque pixel, au cours du mois de juillet (haut) et de janvier 2000 (bas)

Par ailleurs, on constate que la différence entre les deux compteurs est minime et que les zones de changements importants - soit une dizaine de changement de classes (ce qui correspond, en moyenne, à 2 changements de classe par semaine) - sont similaires.

Ces travaux bien que particulièrement originaux et donnant des résultats nouveaux, n'ont jamais été publiés. Il convient aujourd'hui de les mettre à jour en utilisant en particulier les nouvelles re-analyses ECMWF ERA 5. C'est l'objectif d'un projet LEFE-CHAT déposé à l'INSU, il pourrait déboucher sur le démarrage d'une nouvelle thèse en 2020.

### 3.3. Outils numériques pour l'étude des tendances

Pour expliquer la variance observée dans les séries temporelles de barrière ou pour analyser la variabilité de l'ozone à la Réunion et aux tropiques, nous avons mis en place différentes méthodes, soit en adaptant certains outils proposés pour nos partenaires historiques (LATMOS) soit en développant de nouvelles méthodes originales.

Ces instruments numériques ont permis de réaliser de nombreuses études de tendances ou de variabilité, qui seront décrites au fur et à mesure.

#### 3.3.1 Modèle statistique TREND\_RUN : Analyse linéaire multiple

La première méthode utilisée est une méthode d'analyse multi-linéaire de la variabilité du signal. Cette méthode de régression mathématique a pour objectif de décrire les variations d'une série d'observations en les associant aux variations de plusieurs variables (ou proxy ou forçages) extérieures explicatives (dite aussi exogènes). Cette méthode s'appuie donc sur une connaissance a priori des phénomènes physico-chimiques induisant cette variabilité.

Un tel outil est utilisé au LACy pour l'étude de la variabilité de l'ozone ou de la température et in fine pour en estimer les tendances à long terme. Il s'agit du modèle **Trend\_Run**. Il a déjà été utilisé avec succès sur la variabilité et les tendances de l'ozone au cours de ma thèse et dans diverses autres études publiées sur divers paramètres stratosphériques (Bencherif et al., 2003, 2006; Bègue et al., 2010, Tohir et al., 2017) dans les tropiques sud. Il a également été appliqué à certaines séries de position de barrière dans la thèse de Kirgis (2008).

Les forçages exogènes qui peuvent être pris en compte dans un tel modèle sont par exemple : la QBO, l'ENSO, le flux solaire et les cycles annuel et semi-annuel, mais aussi la charge en aérosols de la stratosphère ou le flux d'Elisassen-Palm, caractérisant l'activité dynamique. Ils



peuvent être paramétrés par des fonctions analytiques ou par des indices réels (exemple MEI Multivariant ENSO Index pour le forçage ENSO).

Il est nécessaire ici de dresser une liste exhaustive de tous les forçages susceptibles d'entrer dans le modèle pour expliquer la variance des phénomènes à analyser.

Le signal temporel à analyser « Y » à un instant « t » peut être alors formulé de la manière suivante :

$$Y(t) = C_1 + \sum_i C_i Y_i(t) + \epsilon(t)$$

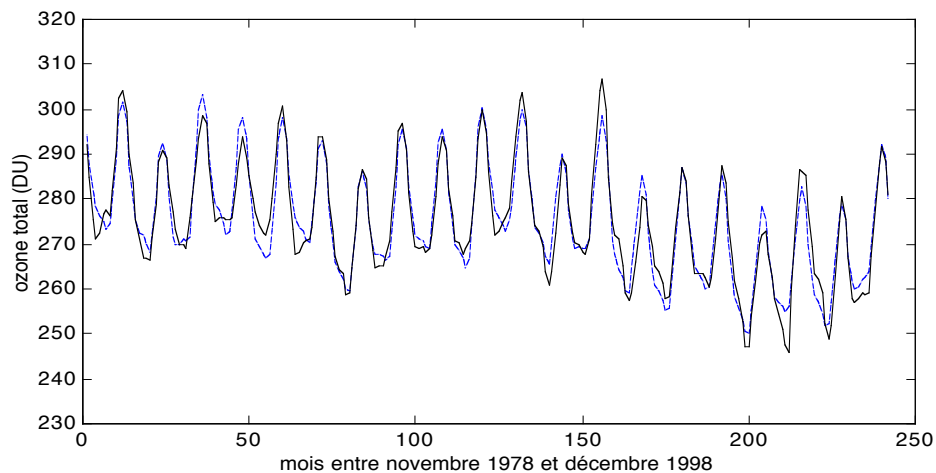
où les  $C_i$  sont les coefficients de régression caractérisant l'amplitude de la réponse du proxy  $Y_i$ .

Les coefficients de régression sont calculés à partir de la méthode des moindres carrés ordinaire afin de minimiser la somme des carrés du terme résiduel. Notons que le degré de dépendance entre les variables est évalué à travers le coefficient d'autocorrélation  $\phi$  du terme résiduel (Bencherif et al., 2006).

Dans la majorité des cas, la tendance est incluse dans les forçages, comme une fonction analytique linéaire et est le plus souvent exprimée par décennie (en % ou valeur absolue).

J'ai développé Trend\_Run au cours de ma thèse en l'adaptant d'un modèle statistique du Service d'Aéronomie (Amount\_O3, Hauchecorne et al., 1991 ; Keckhut et al., 1995b). Je l'ai ensuite utilisé pour estimer les tendances sur l'ozone total à la Réunion et également sur les profils verticaux d'ozone.

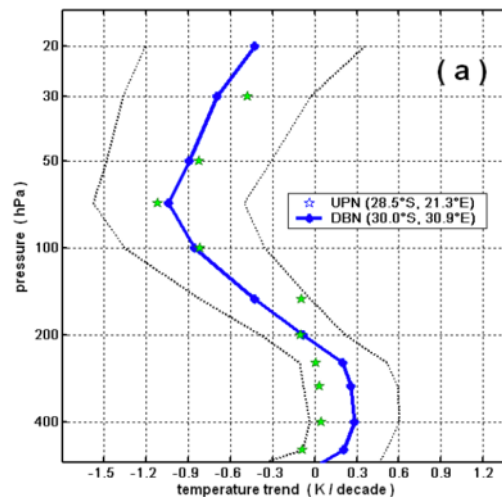
Les forçages utilisés alors étaient des variations saisonnières annuelles et semi-annuelles, la contribution de la QBO par l'intermédiaire d'un indice, des contributions du flux solaire et de la tendance. La tendance proprement dite, a été calculée en éliminant les périodes de contamination volcanique : El Chichon en 1982 (d'avril 1982 à septembre 1983) et Pinatubo en 1991 (de juin 1991 à octobre 1993). Les résultats ont montré que les contributions de la QBO et du cycle solaire de 11 ans sur la variabilité de l'ozone sont significatives à  $1\sigma$  et même à  $2\sigma$ . Le terme de tendance était également significatif, même à  $2\sigma$  ; il était égal à  $-0.75\% \pm 0.4\%$  par décennie. Cette estimation de la tendance était tout à fait compatible avec celle d'autres études menées pour des stations individuelles de latitudes comparables ou pour les tendances zonales calculées à partir des données satellites



*Figure 3.10 : Valeurs mensuelles moyennes d’ozone total à la Réunion (issues de SAOZ de et de TOMS) entre novembre 1978 et décembre 1998 (trait plein noir), valeurs issues de Trend\_Run (pointillés).*

Appliquée sur les données satellites SAGE II, de 1984 à 1998, pour les profils verticaux, Trend\_Run a montré des tendances négatives entre 20 et 24 km et significatives, avec un maximum vers 21 km de  $-5 \% \pm 3 \%$  par décennie. Plus haut, la tendance décroît pour finalement être proche de 0 vers 30 km.

Bencherif et al. (2006) ont utilisé ce type de méthode linéaire pour étudier les tendances des profils verticaux de température en Afrique du Sud.

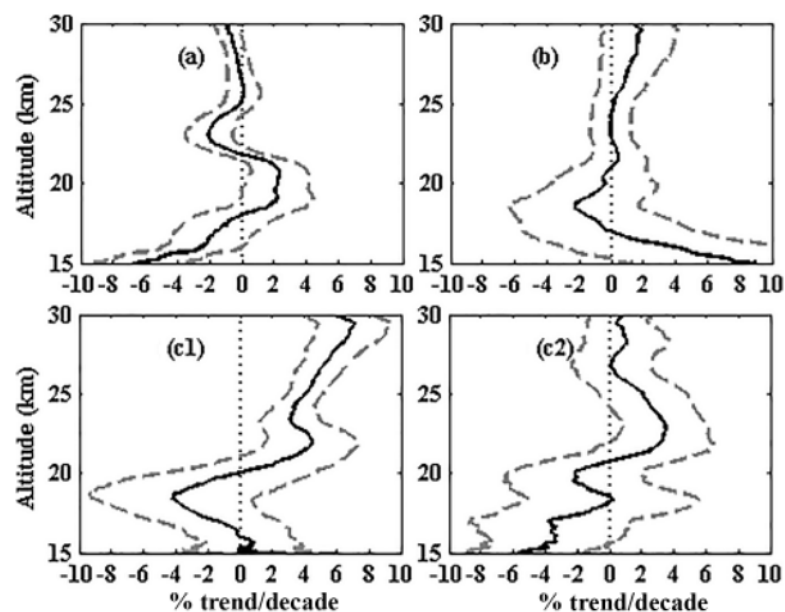


*Figure 3.11 : Profil de tendance de la température (en Kelvin par décennie) profil de hauteur encadré avec les profils de confiance à 95 %, dérivés de Durban : DBN (30,0 S, 30,9 E) données du matin. Upington (UPN : 28,5 S, 21,3 E), les tendances relevées entre janvier 1980 et mars 1999 sont représentées par des symboles étoilés.*

Trend\_Run a également été utilisé dans les articles suivant :

- Sivakumar et al. (2007), ont regardé la variabilité de l’ozone total et des profils verticaux d’ozone à la Réunion
- Begue et al. (2010) ont étudié la variabilité et les tendances de la température à la Réunion à partir de 16 années de mesures par radiosondage.
- Sivakumar et al. (2017), ont utilisé Trend\_Run sur les séries temporelles de mesures de température de surface à la station de Addo en Afrique du Sud (Eastern Cape).
- Enfin, Tohir et al. (2018), ont utilisé cette méthode pour analyser les tendances à long terme de l’ozone (total et vertical) sur 8 stations tropicales et subtropicales du réseau SHADOZ\*.

La figure 3.12 montre l'évolution des profils de tendance de l'ozone près de l'équateur, aux tropiques et plus particulièrement à la Réunion et à Irene en Afrique du Sud (janvier 1998 à décembre 2008). Pour la Réunion, les tendances de l'ozone sont obtenues à partir de 15 années de radiosondages ECC. Elles sont négatives dans la haute troposphère et la basse stratosphère, et positives pour les altitudes supérieures à 22 km.

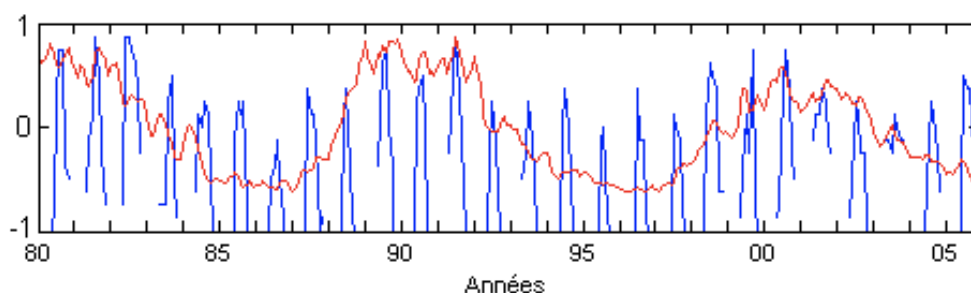


*Figure 3.12 : Profils verticaux des tendances décennales de l'ozone dérivées par le modèle Trend-Run de 15 à 30 km, près de l'équateur (a), aux tropiques (b), à la Réunion (c1) et à Irène (c2).*

\*SHADOZ ‘Southern Hemisphere Additional Ozonesonde’ (Thompson et al., 2003a) est un réseau de mesure des profils de concentration d’ozone par sondage ballons ECC, dans l’hémisphère sud, démarré en 1998.

Cela pourrait indiquer les premiers signes d'un retour de l'ozone stratosphérique à des niveaux antérieurs. Pour la région équatoriale, le profil de tendance montre un gradient positif de 15 km jusqu'à la tropopause (environ 18 km), puis une tendance positive maximale de l'ozone dans les 18-22 km. Une tendance négative est observée entre 22 et 25 km et une tendance nulle pour les altitudes supérieures à 25 km. Pour l'ensemble des stations tropicales, l'évolution de la tendance en dessous de 22 km est similaire à la tendance observée sur la Réunion, avec un pic négatif autour de 19 km. Pour l'ensemble des analyses à partir de 15 ans maximum des profils sondes SHADOZ, on peut noter les tendances observées sont peu ou pas significative avec le critère à  $2\sigma$ , excepté pour la Réunion au-dessus de 22 km. Il sera nécessaire de reprendre ces études en complétant les séries.

Concernant l'analyse de la variabilité des barrières, un certain nombre de résultats ont été mis en avant dans la thèse de G. Kirgis (2008).



*Figure 3.13 : Comparaison de la position du vortex polaire calculée par DyBaL et du cycle solaire de 11 ans (d'après Kirgis 2008). Les 2 courbes sont normalisées et centrées sur 0.*

Trend\_Run affiche ici une corrélation importante entre la position du maximum d'intensité du vortex et la variation du cycle solaire de 11 ans. On constate que la position du maximum du vortex polaire remonte vers les moyennes latitudes lorsque l'activité solaire est forte et redescend vers les hautes latitudes en phase de faible activité solaire.

Concernant la barrière dynamique subtropicale, des résultats adaptés de Kirgis (2008), montrent que Trend\_Run appliqué sur les anomalies journalières de la position de la barrière, révèle une forte dépendance à la QBO et dans une moindre mesure au cycle solaire.

Ces résultats sur les positions des barrières doivent être consolidés mais leur originalité et leur intérêt pour documenter l'impact du changement climatique sur le RST est certain ; c'est également l'objet du projet LEFE déposé à l'INSU (fin 2019) et des futurs travaux que je mènerai dans les prochaines années.

## 2. EEMD – Ensemble Empirical Mode Decomposition

La méthode Trend\_Run est efficace mais nécessite une connaissance a priori des modes de variabilités des séries que l'on souhaite analyser. D'autre part, elle ne tient pas compte des évolutions non-linéaires.

Pour tenir compte du caractère non-linéaire et non-stationnaire des séries temporelles d'observations, il est nécessaire d'opérer une analyse temps fréquence. La décomposition modale empirique (EMD, «Empirical Mode Decomposition» ; Huang et al., 1998) est une technique qui est adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires et non-linéaires dont on ne connaît pas a priori les caractéristiques.

Elle effectue une décomposition auto-adaptative du signal d'entrée, en une somme finie de composantes. Elle ne nécessite pas de définir une base de fonctions contrairement à la décomposition en ondelettes et ne nécessite pas de connaissance a priori des forçages comme pour la régression multilinéaire. C'est un outil assimilable à une ACP (Analyse en Composante Principale) non-linéaire.

L'EMD postule que tout signal réel peut se décomposer en une moyenne locale  $m$  et une composante fortement oscillante  $h_1$  appelée IMF (Intrinsic Mode Function). De  $m$ , on peut extraire le mode oscillant  $h_2$  et réitérer le procédé jusqu'à obtenir un résidu  $r$  non-oscillant. La décomposition totale s'écrit :  $s = \sum_i h_i + r = \sum_i IMF_i + r$ . Les principales étapes de l'analyse de variabilité sont :

- Identification des composantes  $h_i$  ( $IMF_i$ ) dominées par le bruit
- Élimination des composantes bruitées
- Caractérisation des composantes non bruitées
- Analyse du résidu en tant que tendance globale du processus étudié.
- Évaluation des contributions de chacune de ces composantes dans la variabilité de la série temporelle originale.

L'EEMD est une amélioration de la méthode EMD proposée par Wu et Wang (2009), lorsque le signal initial est bruité.

Après l'application de l'EMD, on obtient un nombre fini d'oscillations moyennes modulées en amplitude et en fréquence ou IMFs. Si le signal original  $x(t)$  est bruité, il est nécessaire de déterminer quelles IMF sont dominées par le bruit et de déterminer un critère de sélection. La technique dite DFA (Detrended Fluctuations Analysis) est utilisée pour obtenir un tel seuil.

Le principe de base de la DFA est de calculer comment la fluctuation moyenne quadratique (RMS) de la série temporelle dans la fenêtre temporelle varie en fonction de l'échelle de temps  $n$ .

Lorsqu'elle est appliquée à une série temporelle  $tsx(t)$  de longueur  $N$ , la première étape consiste à calculer la série temporelle intégrée  $tsy(k)$ , après avoir enlevé la moyenne de  $tsx(t)$  :

$$tsy(k) = \sum_{i=1}^k [tsx(t) - \overline{tsx}], 1 \leq k \leq N$$

où  $\overline{tsx}$  indique la moyenne de  $tsx(t)$  sur l'intervalle  $[1, N]$ .  $tsy(k)$  est alors divisé en fenêtres temporelles de longueur  $n$  chacune.

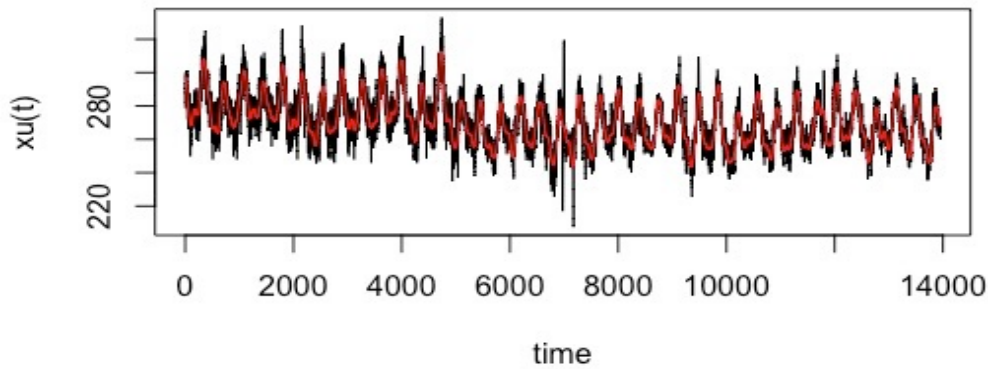
Pour chaque fenêtre temporelle, la tendance locale estimée  $tsy_n(k)$  est déterminée en utilisant l'ajustement des moindres carrés.

La méthode suggérée pour identifier les IMFs bruitées est d'utiliser la pente  $\alpha$  de la courbe  $\log(F(n))/\log(n)$  comme seuil. Cela consiste à exclure les IMF dont la valeur  $\alpha$  est inférieure à un seuil  $\theta$ . Dans la méthode dite DFA (Detrended Fluctuation Analysis), une valeur de 0,5 de  $\alpha$  caractérise un bruit blanc non corrélé.

De plus, comme la technique EMD présente un inconvénient appelé "mode mixing" qui indique qu'un IMF n'est pas mono-composant et qu'elle est mélangée avec les autres oscillations du signal, la valeur seuil couramment utilisée dans la littérature est 0,5 avec un intervalle de confiance de 0,2 qui donne  $\theta=0,7$ .

Cette méthode EEMD a été appliquée avec succès à différentes séries temporelles de mesures atmosphériques, comme les séries d'ozone total à la Réunion, ou en Argentine (45 années de mesures par spectrométrie Dobson), comme les séries de profil ozone par radiosondage ECC à la Réunion (travaux en cours et article en préparation). L'application aux séries dynamiques d'intensité et de position de barrières dynamiques en stratosphère, devrait donner de bons résultats.

Je montre ci-après un exemple concernant les séries d'ozone total à la Réunion avec 38 années de mesures quotidiennes par spectrométrie UV-Visible sol (SAOZ) et satellite (TOMS). Comparés à une méthode traditionnelle comme Trend-Run, les résultats sont très concordants, tout en permettant d'obtenir des tendances plus réalistes sur les périodes analysées (Delage et al., 2019).



*Figure 3.14. : Série temporelle d’ozone total par SAOZ/TOMS à la Réunion : 13952 mesures journalières. La série rouge correspond à la série originale débruitée (xu(t))*

Lorsque la méthode DFA avec un seuil de 0.7 est appliquée aux 12 IMFs fournies par la décomposition EMD de la série originale d’ozone  $x(t)$ , les résultats sont montrés dans le tableau 3.1.

IMF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\alpha$	0.27	0.21	0.22	0.33	0.59	0.94	1.11	1.41	1.7	1.91	1.94	1.96

*Tableau 3.1. : DFA appliquée aux 12 IMF fournies par la décomposition (EMD).*

Les cinq premières IMF de la décomposition EMD initiale sont donc liées au bruit.  $xu(t)$ , la version débruitées de  $x(t)$ , peut donc s'écrire comme :

$$xu(t) = \sum_{i=6}^{12} IMF_i(t) + R(t)$$

Une idée simple pour sélectionner les modes qui contribuent de manière significative à la variabilité de la série débruitée originale, est de conserver les modes pour lesquels le pourcentage d'énergie par rapport à l'énergie contribuant à la variabilité de  $xu(t)$ , est supérieur à un seuil  $\tau$ .

La variabilité de la série chronologique  $xu(t)$  est caractérisée par une série des fluctuations autour de la moyenne  $xu'(t) = xu(t) - \bar{xu}$  où  $\bar{xu}$  est la moyenne de la série chronologique  $xu(t)$ .

Le pourcentage d'énergie de chaque FMI dans les fluctuations de  $xu'(t)$  peut être exprimé comme suit :

$$C_{IMF_i} = \frac{E(IMF_i)}{E(xu')} = \frac{1/N \sum_{k=1}^N IMF_i(k)^2}{1/N \sum_{k=1}^N xu'(k)^2} \quad \text{avec } i=6, \dots, 12$$

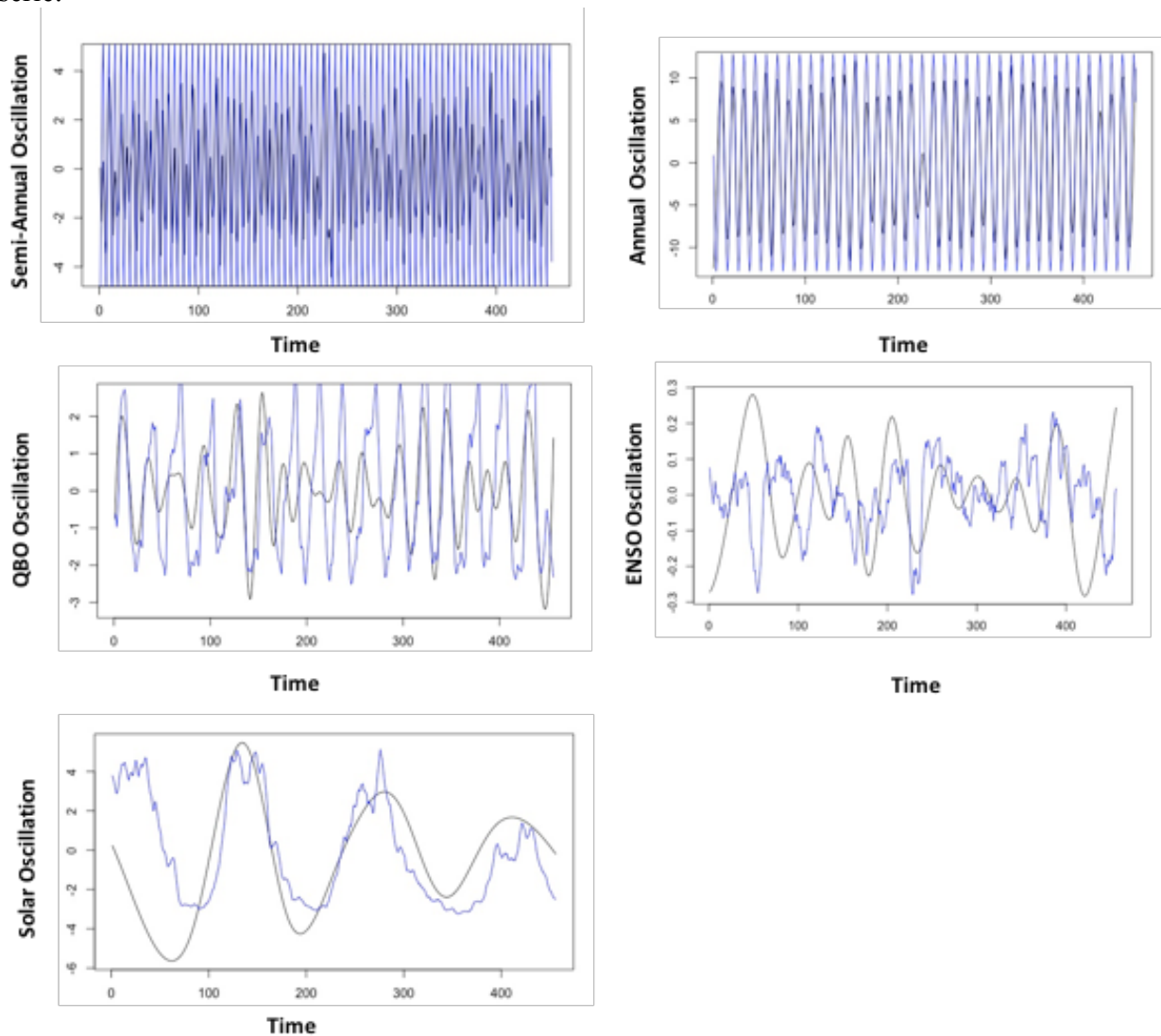
N est la taille de la série originale.  $E(IMF_i)$  et  $E(xu')$  représentent respectivement l'énergie du ième FMI de  $xu(t)$ . Par construction, chaque FMI est une fonction à moyenne nulle,  $xu'(t)$  a une moyenne de zéro et on peut donc écrire :

$$C_{IMF_i} = \frac{var(IMF_i)}{var(xu')}, \quad \text{avec } i = 6, 12$$

Le seuil  $\tau$  a été fixé à 0,01, ce qui représente 1 % de la série initiale  $xu'$ .

Le critère de sélection des modes pertinents est exprimé comme suit : Si  $C_{IMF_i} > \tau$ , on conserve la ième FMI. Dans le cas contraire, elle est éliminée et est ajoutée au résidu.

Avec ce critère, les IMF de 6 à 10 sont conservées. Elles sont représentées sur la figure suivante, et comparées aux contributions des forçages physiques calculés avec Trend\_Run sur la même série.

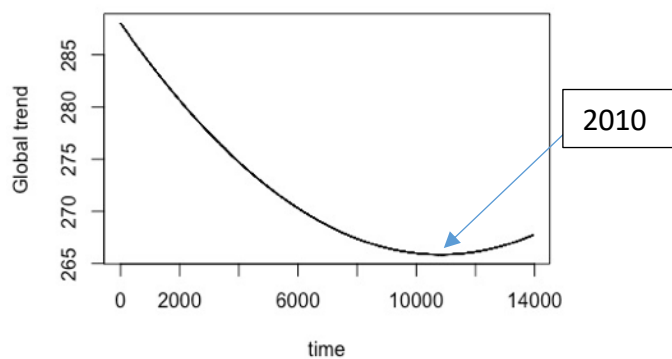


*Figure 3.15: IMF's 6,7,8,9,10 (lignes noires pleines) superposées respectivement aux oscillations semestrielles, annuelles, QBO, ENSO et solaires (ligne bleue pleine).*



Compte tenu des résultats présentés à la figure 3.15, on peut clairement identifier les IMF de 6 à 10, aux cycles semi-annuel, annuel, QBO, ENSO et cycle solaire de 11 ans, en terme de fréquence. En comparaison avec les forçages Trend\_Run, les IMF présentent une modulation d'amplitude et un petit déphasage, mais les résultats par les 2 méthodes sont très cohérents et il est remarquable de noter que la méthode EMD sans a priori physique, retrouve les mêmes cycles significatifs de variabilité.

Le couplage entre la décomposition EMD et la technique DFA a permis de décomposer la série originale  $x(t)$  en trois parties distinctes : une première partie liée au bruit et constitué des cinq premiers IMF, une seconde partie contenant la variabilité du signal et représentée par les IMF[6,10], une troisième et dernière partie assimilée à un résidu constitué de la partie non oscillante du signal et caractéristique de la tendance globale.



*Figure 3.16 : Évolution de la tendance sur l'ozone total observée au cours de la période d'analyse (38 années)*

La tendance de la série (c'est-à-dire la partie non oscillante) est montrée sur la figure précédente. On peut observer une inversion du signe de la pente autour de 2009-2010, qui pourrait indiquer le début de la 'recovery' à la Réunion. La tendance observée au début de la période est de l'ordre de -2.5 %/décennie, diminuant rapidement jusqu'à 2009. Sur la fin de la période considérée, la tendance sur l'ozone total est de l'ordre +1%/décennie.

Ces résultats ont été montrés à la conférence SAGA 2019 (Delage et al., 2019) et devraient rapidement donner lieu à un article.

Pour finir, d'autres méthodes d'analyse de variance ont été testées au LACy et ont été développées et utilisées au LACy, c'est le cas de l'EWT (« Empirical Wavelet Transform » ou décomposition en ondelettes adaptatives). Pour améliorer la résolution fréquentielle, elle consiste à construire, à partir du découpage du spectre de Fourier du signal original, un banc de filtres approprié en utilisant des ondelettes de Meyer.

L'avantage de l'utilisation de telles techniques (EEMD ou EWT) est qu'elles sont entièrement pilotées par les données et permettent d'extraire les modes de variabilité dominants des séries originales sans connaissance à priori.

### 3.4 Travaux:

Je présente dans la suite, la première page de articles acceptés dans des revues ACL ou des thèses en lien avec cette partie. Il s'agit de :

Portafaix 2001 (Thèse)  
Portafaix et al., 2003  
Bencherif et al. 2003  
Portafaix et al., 2004  
Morel et al., 2005  
Bencherif et al. 2006  
Sivakumar et al, 2007  
Kirgis 2008 (Document de Thèse – Thèse encadrée)  
Bencherif at al., 2011  
Toihir 2015 (Document de Thèse - Thèse encadrée)  
Begue et al., 2017  
Sivakumar et al., 2017  
Toihir et al., 2018  
Val Perez et al, 2019 (soumis)

**THESE DE DOCTORAT  
DE  
L'UNIVERSITE PARIS VI**

**Spécialité Physique**  
Mention : Géophysique externe

présentée par

**Thierry PORTAFAIX**

pour obtenir le titre de DOCTEUR de l'UNIVERSITE PARIS VI

Sujet de la thèse :

**Ozone stratosphérique en zone tropicale sud  
Transport méridien et effets de barrière dynamique**

soutenue le 06 juin 2001 devant le jury composé de :

**Pr. Gérard MEGIE  
Pr. Michel PIRRE  
Pr. Bernard LEGRAS  
Dr. Alain HAUCHECORNE  
Pr. Serge BALDY  
Dr. Sophie GODIN  
Pr. Pierre ENCRENAZ**

**Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Directeur de thèse  
Directrice de thèse  
Examineur**

## Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier

Thierry Portafaix, Béatrice Morel, Hassan Bencherif, and Serge Baldy

Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Reunion University, St. Denis, Reunion, France

Sophie Godin-Beekmann<sup>1</sup> and Alain Hauchecorne

Service d'Aéronomie, CNRS, Paris, France

Received 10 July 2002; revised 29 October 2002; accepted 14 January 2003; published 29 March 2003.

[1] A large-scale transport event resulting in a thick ozone lamina originating from midlatitudes is observed in the tropical stratosphere over Reunion island (55°E, 21°S). This isentropic transport was detected from stratospheric balloon-borne ozone measurements that showed the occurrence of the lamina and was investigated using different tools based on Ertel's potential vorticity (E<sub>pv</sub>) analyses. An original software (DYBAL) using surface coordinate and the equivalent length of E<sub>pv</sub> contours as diagnostic tools in conjunction with high-resolution outputs from an E<sub>pv</sub> advection model MIMOSA allows us to specify the origin of the lamina. The results indicate that a broad layer of stratospheric air was isentropically advected from midlatitudes across the southern edge of tropical reservoir and reached Reunion island on 12 July 2000. In addition, Eliassen-Palm's flux vectors, calculated from ECMWF analysis, show that planetary wave activity was quite large during that time period, with wave-breaking occurring around 30 km, and could have driven that exchange. In contrast with analyses of filamentation events based on model and satellite data, the present study focuses on a fine-scale vertical survey from in situ measurements. The filament reported in this paper is characterized by a large vertical extension and is located around the maximum of ozone concentration in the tropical stratosphere (600 K). The analysis of such events, poorly documented in the tropics, could complement satellite studies and contribute to a better determination of the transport between the tropics and the midlatitudes. *INDEX TERMS:* 0341 Atmospheric Composition and Structure: Middle atmosphere—constituent transport and chemistry (3334); 3319 Meteorology and Atmospheric Dynamics: General circulation; 3334 Meteorology and Atmospheric Dynamics: Middle atmosphere dynamics (0341, 0342); 3364 Meteorology and Atmospheric Dynamics: Synoptic-scale meteorology; *KEYWORDS:* stratosphere, tropics, transport, ozone, laminae, barrier

**Citation:** Portafaix, T., B. Morel, H. Bencherif, S. Baldy, S. Godin-Beekmann, and A. Hauchecorne, Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier, *J. Geophys. Res.*, 108(D6), 4196, doi:10.1029/2002JD002741, 2003.

### 1. Introduction

[2] Stratospheric meridional transport is dominated by the slow diabatic transport of air masses from the tropics to the poles, associated with the Brewer-Dobson circulation marked by large-scale air rising in the tropics and sinking in the polar regions [Holton *et al.*, 1995]. Adiabatic exchanges along isentropic surfaces also play an important role in the stratosphere. Rossby wave breaking events at midlatitudes generate a rapid transport in which air filaments, originating from the tropics, are stretched isentropically and ultimately mixed in the surf zone [Waugh *et al.*,

1994]. Furthermore, meridional gradients of Ertel's potential vorticity (E<sub>pv</sub>) and long-lived chemical species reveal the existence in the stratosphere of a dynamical barrier that controls and limits isentropic horizontal exchanges between the tropical and extratropical regions [Trepte and Hitchman, 1992; Grant *et al.*, 1996]. Observations suggest the existence of a Tropical Stratospheric Reservoir (TSR) in which trace gas composition is distinct from that of the midlatitude stratosphere [McCormick and Veiga, 1992; Hitchman *et al.*, 1994]. Mote *et al.* [1998] and Rosenlof *et al.* [1997] suggest a vigorous two-way transport between the TSR and the extratropics in the lowest part of the tropical stratosphere. Isentropic transport in this region is important since it can shortcut the global mean Brewer-Dobson meridional circulation. Using a middle atmosphere circulation model, Hironouchi *et al.* [2000] showed that the transport between the tropics and the extratropics is strongly dependent on altitude and has geographic preferences in the lower stratosphere

<sup>1</sup>Now at Alfred Wegener Institut, Potsdam, Germany.



# LIDAR observations of lower stratospheric aerosols over South Africa linked to large scale transport across the southern subtropical barrier

H. Bencherif<sup>a,\*</sup>, T. Portafaix<sup>a</sup>, J.L. Baray<sup>a</sup>, B. Morel<sup>a</sup>, S. Baldy<sup>a</sup>, J. Leveau<sup>a</sup>,  
A. Hauchecorne<sup>b</sup>, P. Keckhut<sup>b</sup>, A. Moorgawa<sup>c</sup>, M.M. Michaelis<sup>c</sup>, R. Diab<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Université de la Réunion, UMR-CNRS 8105, B.P. 7151, 97715,  
Saint-Denis cedex 9, France

<sup>b</sup>Service d'Aéronomie du CNRS, Paris, France

<sup>c</sup>School of Pure and Applied Physics, University of Natal, Durban 4041, South Africa

<sup>d</sup>School of Life and Environmental Sciences, University of Natal, Durban 4041, South Africa

Received 6 December 2001; received in revised form 20 November 2002; accepted 11 December 2002

## Abstract

The study of the variability of stratospheric aerosols and the transfer between the different atmospheric regions improves our understanding of dynamical processes involved in isentropic exchanges that take place episodically in the lower stratosphere through the subtropical barrier. One useful approach consists in combining in situ ground-based and global measurements with numerical analyses. The present paper reports on a case study of a horizontal transfer evidenced first by Rayleigh–Mie LIDAR observations over Durban (29.9°S, 31.0°E, South Africa). Additional data from MeteoSat and SAGE-2 experiments, and from ECMWF meteorological analysis have been used in this study. Contour advection maps of potential vorticity from the MIMOSA model derived from ECMWF fields, were also used.

By the end of April, 1999, LIDAR observations showed that aerosol extinction, in the lower stratosphere, has increased significantly and abnormally in comparison with other LIDAR and SAGE-2 observations recorded for the period from April 20 to June 14, 1999. The dynamical context of this case study seems to exclude the possibility of a local influence of the subtropical jet stream or tropical convection, which could inject air masses enriched with tropospheric aerosols into the stratosphere. On the contrary, a high-resolution model based on PV advection calculations and ECMWF meteorological analyses shows that air masses are isentropically advected from the equatorial zone close to Brazil. They cross the southern barrier of the tropical reservoir due to laminae stretching and reach the southern subcontinent of Africa 5–6 days later.

© 2003 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** LIDAR; Aerosols; Isentropic transport; Stratosphere; Subtropical barrier; PV-contour advection

## 1. Introduction

Aerosols have been shown to have a significant influence on radiative forcing and hence temperature (Robock

and Mao, 1992; Labitzki and McCormick, 1992; Kinnison et al., 1994). Furthermore, a survey of aerosols from Mount Pinatubo indicated that aerosol loading has important chemical effects by enhancing heterogeneous reactions (Brasseur and Granier, 1992) and can modify ozone concentrations (Solomon et al., 1996; Roumeau et al., 2000). Knowledge of mass exchange between different parts of the atmosphere is essential in understanding the transport and vertical and spatial distribution of aerosols. Eddy transport barriers

\* Corresponding author.

E-mail address: [hassan.bencherif@univ-reunion.fr](mailto:hassan.bencherif@univ-reunion.fr)  
(H. Bencherif).

## Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier:

### 2. Numerical simulations with coupled dynamics models

Béatrice Morel,<sup>1</sup> Hassan Bencherif,<sup>1</sup> Philippe Keckhut,<sup>2</sup> Thierry Portafaix,<sup>1</sup> Alain Hauchecorne,<sup>2</sup> and Serge Baldy<sup>1</sup>

Received 23 December 2004; revised 29 April 2005; accepted 8 June 2005; published 2 September 2005.

[1] The modeling of an event such as an ozone lamina requires reproducing both the global and the small scales. In this study we report on a specific model capable of resolving such scale issues: the COMMID model, which has been developed by coupling a mechanistic model, MSDOL, with a high-resolution advection model, MIMOSA. MSDOL, which is forced toward National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalyses below 100 hPa, provides a consistent picture of the stratospheric large-scale circulation from which MIMOSA simulates the fine-scale filaments generated by breaking planetary waves in the stratosphere. To evaluate the performances of the model, we present results for a particular event of tropical-air intrusion at midlatitudes across the southern subtropical barrier observed in July 2000 and described in part 1 (Portafaix et al., 2003). The model is used to examine the contribution of each wave to the structure and the development of that event. The methodology consists in filtering the NCEP tropospheric forcing by zonal wave number and by phase speed. Our results show that mixing is significantly reduced precisely at the locations where the phase speeds of the filtered waves are close to the speed of the mean zonal wind, thus confirming the findings of previous studies. However, what is important here is that they validate the use of an approach based on the coupling of two models. The next step will consist in using the COMMID model in a more general way for further investigations of the impact of the tropospheric circulation on the isentropic transport in the stratosphere for climate sensitivity purposes.

**Citation:** Morel, B., H. Bencherif, P. Keckhut, T. Portafaix, A. Hauchecorne, and S. Baldy (2005), Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier: 2. Numerical simulations with coupled dynamics models, *J. Geophys. Res.*, 110, D17101, doi:10.1029/2004JD005737.

### 1. Introduction

[2] Over the last 10 years, there has been increasing recognition of the heterogeneous nature of stratospheric transport and mixing. A summary of the main points relevant to stratospheric transport is made by *Plumb* [2002]. It is now widely recognized that the stratosphere is divided into regions of rapid isentropic stirring separated by barrier regions in which stirring is weak and across which there is no, or relatively little, transport. Some studies have been associated with the polar-vortex edge barrier [e.g., *Waugh et al.*, 1994a; *Bowman*, 1996], and others with the subtropical barrier [e.g., *Randel et al.*, 1993; *Chen et al.*, 1994; *Waugh et al.*, 1994b; *Bowman and Hu*, 1997; *Bencherif et al.*, 2003; *Portafaix et al.*, 2003].

Isentropic exchange of stratospheric air across those barriers has been a subject of considerable interest recently, in particular, by attribution of some of the observed trends in midlatitude ozone to the isentropic transport of polar air toward midlatitudes [*Hauchecorne et al.*, 2001; *U.N. Environment Programme/World Meteorological Organization (UNEP/WMO)*, 2002]. It is now well recognized that such exchange is controlled by Rossby-wave breaking in the surf zone [*McIntyre and Palmer*, 1984]. Although an overall understanding of how it works has been established, a number of details remain unclear and need to be sorted out in order to obtain reliable estimates of cross-barrier mass transport and to improve its representation in climatic models for long-term climate simulations.

[3] Rossby-wave breaking is typically characterized by the irreversible deformation of potential-vorticity (PV) contours on isentropic surfaces and the subsequent mixing of different air masses. The nature of the breaking is consistent with the predictions of the Rossby-wave critical-layer theory [*Stewartson*, 1978; *Warn and Warn*, 1978; *Haynes*, 2003]: As Rossby waves propagate upward from the troposphere through wintertime stratospheric westerlies, their

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Université de La Réunion, La Réunion, France.

<sup>2</sup>Service d'Aéronomie, Institut Pierre-Simon Laplace–CNRS, Verrières-le Buisson, France.

# Temperature climatology and trend estimates in the UTLS region as observed over a southern subtropical site, Durban, South Africa

H. Bencherif<sup>1</sup>, R. D. Diab<sup>2</sup>, T. Portafaix<sup>1</sup>, B. Morel<sup>1</sup>, P. Keckhut<sup>3</sup>, and A. Moorgawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR 8105 CNRS/Université/Météo-France, Université de La Réunion, B.P. 7151, 97715, Saint-Denis, Reunion Island, France

<sup>2</sup>University of KwaZulu-Natal, Durban 4041, South Africa

<sup>3</sup>Service d'Aéronomie, UMR-CNRS 7620, B.P. 3, Verrières-le-Buisson, France

Received: 20 September 2005 – Published in Atmos. Chem. Phys. Discuss.: 20 February 2006

Revised: 30 October 2006 – Accepted: 6 November 2006 – Published: 7 November 2006

**Abstract.** Temperature trends in the UTLS region are under-reported, particularly in the Southern Hemisphere, and yet temperature is one of the most important indicators of changes in dynamical and radiative processes in the atmosphere. Here radiosonde data from Durban, South Africa (30.0° S, 30.9° E) over the period 1980 to 2001 (22 years) between 250 and 20 hPa are used to derive a mean temperature climatology and to determine trends. The seasonal cycle at the 250-hPa level is anti-correlated with the seasonal cycles at the 150-hPa and 100-hPa heights. The 100-hPa level (local tropopause) exhibits a minimum temperature in late summer and a maximum in winter, and closely corresponds to previous results for tropical regions. Based on a Fourier analysis, both the annual cycle (AO) and the semi-annual cycle (SAO) are dominant, although the former is about 4 times stronger. The AO is strongest at the 100-hPa height. A trend analysis reveals a cooling trend at almost all heights in the UTLS region, with a maximum cooling rate of  $1.09 \pm 0.41$  K per decade, at 70-hPa. Cooling rates are in good agreement with other studies and are slightly higher in summer than in winter.

## 1 Introduction

Temperature controls the rates of chemical reactions and thus ozone abundance (and vice versa), and is one of the most important parameters in terms of its influence on dynamical and radiative processes in the terrestrial atmosphere, particularly in the upper troposphere – lower stratosphere (UTLS) region. The UTLS is a region where significant changes are taking place that have the potential to perturb the Earth's climate in the coming decades.

Correspondence to: H. Bencherif  
(hassan.bencherif@univ-reunion.fr)

Since dynamical activity is closely linked to temperature, temperature trends are a useful indicator of changes in dynamical processes and can contribute to a better understanding thereof. Indeed, any change in activity of gravity waves, equatorial Kelvin waves and Rossby planetary waves may have a consequent effect on mass and energy fluxes, including stratosphere-troposphere exchanges as well as tropical-midlatitude exchanges.

Relatively few studies of trends in temperature in the UTLS region have been undertaken. One of the most complete studies is that of Oort and Liu (1993). Their study is based on the global rawinsonde network of more than 700 stations, of which 70% are in the NH and about 50% in the 30–60° N latitude band. Only slightly more than 15% of the stations are situated in the Southern Hemisphere (SH).

Most of the temperature trend studies that have been performed for the 25–70 km altitude range, have used Indian, American, Japanese and Russian rocket-sondes (Mohanakumar, 1994; Keckhut et al., 1999a, b; Kokin and Lysenko, 1994), and French lidar measurements (Hauchecorne et al., 1991; Keckhut et al., 1995). Some authors have performed trend analyses from the large ozonesonde databases (Logan, 1994; Harris et al., 1997; Bodeker et al., 1998), but again, these are predominantly available for the NH.

Within this context, this study focuses on a climatological and trend analysis of temperature, in a subtropical region where data are sparse. Regular upper-air radiosonde data recorded by the South African Weather Service (SAWS) over Durban (30.0° S, 30.9° E), situated on the east coast of South Africa, are used as the basis of the temperature climatology and trend analysis.

Theoretical studies, transport models and in situ observations have shown that at subtropical latitudes, vertical and horizontal exchange processes are expected and have been observed (Grant et al., 1994; Holon et al., 1995; Vaughan and Timmis, 1998; O'Connor et al., 1999). Furthermore, recent observational studies have shown that in the southern

## Stratospheric ozone climatology and variability over a southern subtropical site: Reunion Island (21° S; 55° E)

V. Sivakumar<sup>1,\*</sup>, T. Portafaix<sup>1</sup>, H. Bencherif<sup>1</sup>, S. Godin-Beekmann<sup>2</sup>, and S. Baldy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR CNRS 8105, Université de La Réunion, Reunion Island, France

<sup>2</sup>Service d'Aéronomie, UMR CNRS 7620, Paris, France

\* now at: National Laser Centre, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), P.O. Box: 395, Pretoria, South Africa

Received: 27 March 2007 – Revised: 2 October 2007 – Accepted: 5 November 2007 – Published: 29 November 2007

**Abstract.** The study presents the climatological characteristics of stratospheric ozone observed over Reunion Island using in-situ (ozonesonde and SAOZ) and satellite (UARS-HALOE, SAGE-II and TOMS) measurements. It uses co-localised ozonesondes (from September 1992 to February 2005) and SAOZ measurements (from January 1993 to December 2004), SAGE-II data from October 1984 to February 1999 (~15 years), HALOE data from January 1991 to February 2005 (~15 years), and NIMBUS/TOMS data from January 1978 to December 2004 (27 years). The satellite measurements correspond to overpasses located nearby Reunion Island (21° S; 55° E). The height profiles of ozone concentration obtained from ozonesonde (0.5–29.5 km) show less bias in comparison with the HALOE and SAGE-II measurements. Though, the satellite (HALOE and SAGE-II) measurements underestimate the tropospheric ozone, they are in good agreement for the heights above 15 km. The bias between the measurements and the normalized ozone profile constructed from the ozonesonde and SAGE-II satellite measurement shows that the SAGE-II measurements are more accurate than the HALOE measurements in the lower stratosphere. The monthly variation of ozone concentration derived from ozonesonde and HALOE shows a nearly annual cycle with a maximum concentration during winter/spring and minimum concentration during summer/autumn months. The time evolution of total column ozone obtained from TOMS, SAOZ and the one computed from ozonesonde and SAGE-II, exhibits similar behaviour with analogous trends as above. The TOMS variation displays a higher value of total column ozone of about 3–5 DU (10%) in comparison with the SAOZ and the integrated ozone from ozonesonde and SAGE-II.

**Keywords.** Atmosphere composition and structure (Middle atmosphere – composition and chemistry) – Meteorology and atmospheric dynamics (Climatology; Middle atmosphere dynamics; Tropical meteorology; Instruments and techniques)

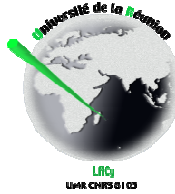
### 1 Introduction

Ozone plays an important role in the earth's radiation budget by preventing UV radiation from penetrating the earth's atmosphere. The stratosphere is a region in the earth atmosphere which exhibits maximum ozone concentration and helps to prevent UV radiation from penetrating the atmosphere and the earth surface (see review article by Staehelin et al., 2001). On the other-hand, the troposphere ozone concentration acts as an atmospheric pollutant and leads to global warming. Therefore, understanding ozone concentration variations in the stratosphere and troposphere height regions is of great importance to the research community.

There are different remote sensing instruments to provide vertical ozone profiles, such as spectrometers, ozonesondes, lidars, etc. Ozonesondes are recognized to be an effective tool for measuring ozone in the troposphere and part of the stratosphere (Beekman et al., 1994; Logan, 1999). Logan (1999) investigated the ozone variation in the lower stratosphere using ozonesonde data from the northern hemisphere and observed that the amount of ozone decreases between the tropopause and 100 hPa from March to September due to an increase in the tropopause height. Fujiwara et al. (2000) provided the seasonal variations of troposphere ozone over Indonesia (Watukosesk, 7.5° S; 112.6° E) using 5 years of ozonesonde measurements. The seasonal variations showed an enhanced ozone-mixing ratio during dry season (August–November), in comparison with the other seasons which is

Correspondence to: V. Sivakumar  
(svenkataraman@csir.co.za)





# THESE DE DOCTORAT

Spécialité Physique de l'Atmosphère

Présentée par

**Guillaume Kirgis**

Pour l'obtention du grade de **DOCTEUR de l'Université de la REUNION**

---

## **Evaluation du transport isentropique à travers la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l'hémisphère sud**

---

Soutenue le 9 Septembre 2008 devant le jury composé de :

M. Alain Hauchecorne	Président du jury
M. Bernard Legras	Rapporteur
M. Philippe Ricaud	Rapporteur
M. Jean Diatta	Examineur
Mme Sophie Godin-Beekmann	co-Directrice de thèse
M. Hassan Bencherif	co-Directeur de thèse

## Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4° S, 70.3° E)

H. Bencherif<sup>1</sup>, L. El Amraoui<sup>2</sup>, G. Kirgis<sup>1,\*</sup>, J. Leclair De Bellevue<sup>1</sup>, A. Hauchecorne<sup>3</sup>, N. Mzé<sup>1,3</sup>, T. Portafaix<sup>1</sup>, A. Pazmino<sup>3</sup>, and F. Goutail<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR CNRS 8105, Université de La Réunion, France

<sup>2</sup>CNRM-GAME, Météo-France and CNRS, URA 1357, Toulouse, France

<sup>3</sup>Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, Université Versailles St-Quentin, CNRS-INSU, Verrières-le-Buisson, France

\* now at: Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA

Received: 11 April 2010 – Published in Atmos. Chem. Phys. Discuss.: 23 July 2010

Revised: 8 November 2010 – Accepted: 30 November 2010 – Published: 14 January 2011

**Abstract.** This paper reports on an increase of ozone event observed over Kerguelen (49.4° S, 70.3° E) in relationship with large-scale isentropic transport. This is evidenced by ground-based observations (co-localised radiosonde and SAOZ experiments) together with satellite global observations (Aura/MLS) assimilated into MOCAGE, a Météo-France model.

The study is based on the analyses of the first ozonesonde experiment never recorded at the Kerguelen site within the framework of a French campaign called ROCK that took place from April to August 2008.

Comparisons and interpretations of the observed event are supported by co-localised SAOZ observations, by global mapping of tracers (O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and columns of O<sub>3</sub>) from Aura/MLS and Aura/OMI experiments, and by model simulations of Ertel Potential Vorticity initialised by the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) data reanalyses.

Satellite and ground-based observational data revealed a consistent increase of ozone in the local stratosphere by mid-April 2008. Additionally, Ozone (O<sub>3</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) profiles obtained during January–May 2008 using the Microwave Limb Sounder (MLS) aboard the Aura satellite are assimilated into MOCAGE (MODèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle), a global three-dimensional chemistry transport model of Météo-France. The assimilated total O<sub>3</sub> values are consistent with SAOZ ground observa-

tions (within ±5%), and isentropic distributions of O<sub>3</sub> match well with maps of advected potential vorticity (APV) derived from the MIMOSA model, a high-resolution advection transport model, and from the ECMWF reanalysis.

The event studied seems to be related to the isentropic transport of air masses that took place simultaneously in the lower- and middle-stratosphere, respectively from the polar region and from the tropics to the mid-latitudes.

In fact, the ozone increase observed by mid April 2008 resulted simultaneously: (1) from an equator-ward departure of polar air masses characterised with a high-ozone layer in the lower stratosphere (near the 475 K isentropic level), and (2) from a reverse isentropic transport from the tropics to mid- and high-latitudes in the upper stratosphere (nearby the 700 K level). The increase of ozone observed over Kerguelen from the 16-April ozonesonde profile is thus attributed to a concomitant isentropic transport of ozone in two stratospheric layers: the tropical air moving southward and reaching over Kerguelen in the upper stratosphere, and the polar air passing over the same area but in the lower stratosphere.

### 1 Introduction

Stratospheric Ozone is mostly created by sunlight at tropical latitudes, and circulates through the Brewer-Dobson cell from the tropics to mid-latitude- and polar-regions. In fact, due to interactions between planetary waves and the mean-zonal flow, ozone is transported away from its production region. Additionally, in the winter stratosphere, erosion of the dynamical barriers such as the polar-vortex and



Correspondence to: H. Bencherif  
(hassan.bencherif@univ-reunion.fr)



# THÈSE

Discipline : **PHYSIQUE DE L'ATMOSPHÈRE**

En vue de l'obtention du

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION**

Présentée par : **ABDOULWAHAB Mohamed Tohir**

**Analyse de la Variabilité et la Tendence de l'Ozone  
Stratosphérique au-dessus des Tropiques et Subtropiques sud**

Soutenue le : 24 août 2016 devant le jury composé de :

M. Alain SARKISSIAN	Rapporteur
M. Alain HAUCHECORNE	Rapporteur
Mme Andrea PAZMINO	Examinatrice
M. Laaziz EL AMRAOUI	Examineur
M. Thierry PORTAFAIX	Examineur
M. Hassan BENCHERIF	Directeur de thèse
M. Sivakumar VENKATARAMAN	co-Directeur de thèse



# Long-range transport of stratospheric aerosols in the Southern Hemisphere following the 2015 Calbuco eruption

Nelson Bègue<sup>1</sup>, Damien Vignelles<sup>2</sup>, Gwenaël Berthet<sup>2</sup>, Thierry Portafaix<sup>1</sup>, Guillaume Payen<sup>7</sup>, Fabrice Jégou<sup>2</sup>, Hassan Benchérif<sup>1,6</sup>, Julien Jumelet<sup>3</sup>, Jean-Paul Vernier<sup>4</sup>, Thibaut Lurton<sup>2,a</sup>, Jean-Baptiste Renard<sup>2</sup>, Lieven Clarisse<sup>5</sup>, Vincent Duverger<sup>2</sup>, Françoise Posny<sup>1</sup>, Jean-Marc Metzger<sup>7</sup>, and Sophie Godin-Beekmann<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR 8105 CNRS, Université de la Réunion, Reunion Island, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace, Université d'Orléans, CNRS UMR7328, Orléans, France

<sup>3</sup>Laboratoire Atmosphère Milieux Observations Spatiales, University of Paris VI, Paris, France

<sup>4</sup>NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA

<sup>5</sup>Spectroscopie de l'Atmosphère, Service de Chimie Quantique et Photophysique, Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

<sup>6</sup>School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu-Natal, Westville, Durban, South Africa

<sup>7</sup>Observatoire des Sciences de l'Univers de La Réunion, UMS3365, Saint-Denis de la Réunion, France

<sup>a</sup>now at: Institut Pierre-Simon-Laplace, UPMC/CNRS, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

**Correspondence:** Nelson Bègue (nelson.begue@univ-reunion.fr)

Received: 12 June 2017 – Discussion started: 22 June 2017

Revised: 2 November 2017 – Accepted: 6 November 2017 – Published: 19 December 2017

**Abstract.** After 43 years of inactivity, the Calbuco volcano, which is located in the southern part of Chile, erupted on 22 April 2015. The space–time evolutions (distribution and transport) of its aerosol plume are investigated by combining satellite (CALIOP, IASI, OMPS), in situ aerosol counting (LOAC OPC) and lidar observations, and the MIMOSA advection model. The Calbuco aerosol plume reached the Indian Ocean 1 week after the eruption. Over the Reunion Island site (21° S, 55.5° E), the aerosol signal was unambiguously enhanced in comparison with “background” conditions, with a volcanic aerosol layer extending from 18 to 21 km during the May–July period. All the data reveal an increase by a factor of  $\sim 2$  in the SAOD (stratospheric aerosol optical depth) with respect to values observed before the eruption. The aerosol mass *e*-folding time is approximately 90 days, which is rather close to the value ( $\sim 80$  days) reported for the Sarychev eruption. Microphysical measurements obtained before, during, and after the eruption reflecting the impact of the Calbuco eruption on the lower stratospheric aerosol content have been analyzed over the Reunion Island site. During the passage of the plume, the volcanic aerosol was characterized by an effective radius of

$0.16 \pm 0.02 \mu\text{m}$  with a unimodal size distribution for particles above  $0.2 \mu\text{m}$  in diameter. Particle concentrations for sizes larger than  $1 \mu\text{m}$  are too low to be properly detected by the LOAC OPC. The aerosol number concentration was  $\sim 20$  times higher than observed before and 1 year after the eruption. According to OMPS and lidar observations, a tendency toward conditions before the eruption was observed by April 2016. The volcanic aerosol plume is advected eastward in the Southern Hemisphere and its latitudinal extent is clearly bounded by the subtropical barrier and the polar vortex. The transient behavior of the aerosol layers observed above Reunion Island between May and July 2015 reflects an inhomogeneous spatio-temporal distribution of the plume, which is controlled by the localization of these dynamical barriers.

## 1 Introduction

Stratospheric aerosols affect the chemical and radiation balance of the atmosphere (McCormick et al., 1995; Solomon, 1999; SPARC 2006). The importance of stratospheric

## Use of the TREND RUN model to deduce trends in South African Weather Service (SAWS) atmospheric data: Case study over Addo (33.568°S, 25.692°E) Eastern Cape, South Africa

Venkataraman Sivakumar<sup>1</sup>, Raven Jimmy<sup>1</sup>, Hassan Bencherif<sup>1,2</sup>, Nelson Begue<sup>2</sup> and Thierry Portfaix<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Kwa-Zulu Natal, School of Chemistry and Physics, Discipline of Physics, Westville Campus, Durban, South Africa

<sup>2</sup> Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR 8105, Université de la Réunion, CNRS-INSU, Saint Denis, Reunion Island, France

### Abstract

This paper reports on the use of a multi-regression model adapted at the University of Reunion Island, that was formulated for surface temperature trend estimates in South Africa. Depending on the location of the observing site, the selected geophysical signal is expressed in the form of a sum of forcings, which account for most of its variability. The trend values are then derived from the residual terms as a linear function. The atmospheric forcings included in the model are: Annual, Semi-annual, Quasi-Biennial Oscillation, El-Nino Southern Oscillation (ENSO), the 11-year solar cycle (SSN) and Indian Ocean Dipole (IOD). Long-term data-bases of more than 20 years are typically considered for the measurement of decadal trends and to determine the contribution of different atmospheric forcings. In this study, the surface minimum and maximum temperature datasets collected from 1980 to 2004 (25 years) at the South African Weather Service (SAWS) Addo station (33.568°S; 25.692°E), located in the Eastern Cape, South Africa are employed. The first results obtained for this station are presented and illustrate the validity of the model to account for observed trends.

### Keywords:

*Decadal trends, Atmospheric measurements, Model simulation, Atmospheric forces and Linear statistics*

### Article History

Received : 25 June 2017

Revised : 07 October 2017

Accepted : 24 October 2017

Published : 23 November 2017

### Contact Details

Corresponding Author E-mail address:  
[venkataramans@ukzn.ac.za](mailto:venkataramans@ukzn.ac.za)

## 1. Introduction

Long-term climate trends and cycles have recently become the focus of many studies in the field of atmospheric research. However, the physical mechanisms responsible for these cycles are not understood and are therefore not included in current climate models. The increase in anthropogenic greenhouse gas emissions is known to result in temperature



# Variability and trend in ozone over the southern tropics and subtropics

Abdoulwahab Mohamed Tohir<sup>1</sup>, Thierry Portafaix<sup>1</sup>, Venkataraman Sivakumar<sup>2</sup>, Hassan Bencherif<sup>1,2</sup>,  
Andréa Pazmiño<sup>3</sup>, and Nelson Bègue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, Université de La Réunion, St-Denis, Réunion Island, France

<sup>2</sup>Discipline of Physics, School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa

<sup>3</sup>Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, CNRS, Université Versailles Saint Quentin, Guyancourt, France

**Correspondence:** Abdoulwahab Mohamed Tohir (fahardinetoihr@gmail.com)

Received: 24 August 2017 – Revised: 3 February 2018 – Accepted: 7 February 2018 – Published: 16 March 2018

**Abstract.** Long-term variability in ozone trends was assessed over eight Southern Hemisphere tropical and subtropical sites (Natal, Nairobi, Ascension Island, Java, Samoa, Fiji, Reunion and Irene), using total column ozone data (TCO) and vertical ozone profiles (altitude range 15–30 km) recorded during the period January 1998–December 2012. The TCO datasets were constructed by combination of satellite data (OMI and TOMS) and ground-based observations recorded using Dobson and SAOZ spectrometers. Vertical ozone profiles were obtained from balloon-sonde experiments which were operated within the framework of the SHADOZ network. The analysis in this study was performed using the Trend-Run model. This is a multivariate regression model based on the principle of separating the variations of ozone time series into a sum of several forcings (annual and semi-annual oscillations, QBO (Quasi-Biennial Oscillation), ENSO, 11-year solar cycle) that account for most of its variability.

The trend value is calculated based on the slope of a normalized linear function which is one of the forcing parameters included in the model. Three regions were defined as follows: equatorial (0–10° S), tropical (10–20° S) and subtropical (20–30° S). Results obtained indicate that ozone variability is dominated by seasonal and quasi-biennial oscillations. The ENSO contribution is observed to be significant in the tropical lower stratosphere and especially over the Pacific sites (Samoa and Java). The annual cycle of ozone is observed to be the most dominant mode of variability for all the sites and presents a meridional signature with a maximum over the subtropics, while semi-annual and quasi-biennial ozone modes are more apparent over the equatorial region,

and their magnitude decreases southward. The ozone variation mode linked to the QBO signal is observed between altitudes of 20 and 28 km. Over the equatorial zone there is a strong signal at  $\sim 26$  km, where  $58\% \pm 2\%$  of total ozone variability is explained by the effect of QBO. Annual ozone oscillations are more apparent at two different altitude ranges (below 24 km and in the 27–30 km altitude band) over the tropical and subtropical regions, while the semi-annual oscillations are more significant over the 27–30 km altitude range in the tropical and equatorial regions. The estimated trend in TCO is positive and not significant and corresponds to a variation of  $\sim 1.34 \pm 0.50\% \text{ decade}^{-1}$  (averaged over the three regions). The trend estimated within the equatorial region (0–15° S) is less than 1% per decade, while it is assessed at more than  $1.5\% \text{ decade}^{-1}$  for all the sites located southward of 17° S. With regard to the vertical distribution of trend estimates, a positive trend in ozone concentration is obtained in the 22–30 km altitude range, while a delay in ozone improvement is apparent in the UT–LS (upper troposphere–lower stratosphere) below 22 km. This is especially noticeable at approximately 19 km, where a negative value is observed in the tropical regions.

## 1 Introduction

Atmospheric ozone protects all life on earth from damaging solar ultraviolet radiation. About 90% of ozone is observed in the stratosphere where it is strongly influenced by various photochemical and dynamical processes. Three processes determine stratospheric ozone distribution and concentration,

# Observation and Model Simulation of the Influence of Antarctic Ozone Hole Over the Southern Space Observatory – SSO (29,26 ° S, 53,48 ° W), Brazil

**L. V. Peres<sup>1</sup>, D. K. Pinheiro<sup>2</sup>, H. Bencherif<sup>3,4</sup>, J. V. Bageston<sup>5</sup> ; T. Portafaix<sup>3</sup>, A. P. Schuch<sup>2</sup>; D. Mendes<sup>6</sup>; M. Tohir<sup>3</sup>, G. D. Bittencourt<sup>2</sup>, V. Anabor<sup>2</sup>, L. A. Steffanel<sup>7</sup> , N. Begue<sup>3</sup>; N. Mbatha<sup>7</sup>; A. Hauchecorne<sup>8</sup>; N. M. P. Leme<sup>9</sup> and N. J. Schuch<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Federal University of Western Pará, Santarém, PA, Brazil.

<sup>2</sup>Federal University of Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil

<sup>3</sup>University of Reunion, Reunion Island, France.

<sup>4</sup>University of KwaZulu-Natal, School of Chemistry and Physics, Durban, South Africa

<sup>5</sup>South Regional Center, National Institute for Space Research – CRS/INPE, Santa Maria, RS, Brazil.

<sup>6</sup>Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazil.

<sup>7</sup>University of Reims Champagne-Ardenne, Reims, France

<sup>8</sup>University of ZuluLand, Department of Geography, KwaDlangezwa, 3886, South Africa.

<sup>9</sup>LATMOS/IPSL, UVSQ Université Paris-Saclay, UPMC Univ. Paris 06, CNRS, 78280 Guyancourt, France

<sup>10</sup>Northeast Regional Center, National Institute for Space Research – CRN/INPE, Natal, RN, Brazil.

Corresponding author: Lucas Vaz Peres ([lucas.peres@ufopa.edu.br](mailto:lucas.peres@ufopa.edu.br))

## Abstract

In this paper we observed and model simulated the Influence of the Antarctic Ozone Hole events over the Southern Space Observatory SSO/CRS/INPE – MCTI (29.4 °S; 53.8°W; 488.7m) station between 2005 and 2014. The observations was done by daily Total Ozone Column (TOC) from Brewer Spectrophotometer #167 and OMI satellite and ozone profiles by AURA/MLS (Microwave Limb Sounder) satellite. The model simulation was done applying the DYBAL (Dynamical Barrier Localisation) code in Potential Vorticity (PV) fields from MIMOSA (Modélisation Isentrope du transport Mésoéchelle de l’Ozone Stratosphérique par Advection) model. We confirmed the occurrence of 62 events, with mean TOC reductions in Brewer#167 of  $7.0 \pm 2.9\%$  and the mean isentropic level in the AURA/MLS satellite occurred in  $640 \pm 150$  K with emphasis between the 500 and 850K isentropic levels in MIMOSA model PV fields. October occur more events (30.7%) and the 2006 is the year there were the highest number of events (10). Only 19.3% of total cases are Polar Tongue more frequent in October (50% of cases), with medium intensity (58.2%) and in the medium level in stratosphere (55.0%). Already Polar Filament events (80.7%) are more frequent in September (32.0%), with medium intensity (42.0%) and in the medium level in stratosphere (40.7%). The events are clearly influenced by the positive phase of ENSO index (61.3%), dominating the three categories of intensity (minor 57.9%, medium 51.6%, major 58.3%), while the QBO index does not have a clear influence once have 50% of total cases in positive and negative phase.

## CHAPITRE 4

### Variabilité et tendance des rayonnements UV au sol en zone tropicale sud

---

- 4.1 Introduction
  - 4.2 Évaluation du rayonnement UV à la Réunion, à partir des données sol et de la modélisation
  - 4.3 Évolution climatique des UV dans les tropiques sud
  - 4.4 Travaux
- Cadet et al. 2017  
Lamy 2018 (Document de Thèse- Thèse encadrée)  
Lamy et al., 2018  
Lamy et al., 2019  
Cadet et al., 2019

#### ***Synthèse du chapitre 3 :***

##### *En chiffres :*

- 1 document de thèse (Thèse encadrée)
- 2 thèses en cours (une thèse soutenue début 2020)
- 3 projets de recherche dont 2 en cours
- 1 post-doc en cours
- 1 projet de post-doc soumis
- 4 articles ACL
- 1 article soumis
- 6 communications ou oraux dans congrès ACL

Depuis 2014, après mon retour de détachement et d'arrêt maladie, j'ai développé une nouvelle thématique de recherche autour des rayonnements UV en zone tropicale. L'origine de ce nouvel axe d'études est née des résultats récents des modèles concernant l'évolution de l'ozone aux tropiques (WMO, 2014) qui prévoient une diminution dans cette région. Cette thématique a fait l'objet d'une thèse qui s'est déroulée entre 2015 et 2018 et que j'ai encadrée principalement, ainsi que d'une thèse co-encadrée qui sera soutenue en janvier 2020 sur la thématique UV-santé. Elle s'articule autour des mesures réalisées à la Réunion et dans le nouveau réseau de mesures UV-Indien (surveillance de l'évolution climatique de l'ozone et des UV dans l'Océan Indien- voir chapitre 2) dont je suis le responsable scientifique. Elle s'appuie également sur des outils de modélisation que nous avons adaptés à la Réunion et/ou pour différents sites de l'Océan Indien.



## 4.1 Introduction

Le rayonnement solaire produit un large spectre de radiations dont une partie correspond à des radiations ultraviolettes (UV) avec des longueurs d'ondes comprises entre 200 et 400 nm. La partie du spectre UV entre 200 et 280 nm, bande UV-C, est entièrement absorbée lors de la traversée de l'atmosphère. Le rayonnement UV-B, compris entre 280 et 320 nm, est fortement absorbé par l'ozone de la stratosphère et donc partiellement éliminé des radiations atteignant la surface de la terre. Cependant, les UV-B résiduels (principalement entre 300 et 320 nm) peuvent induire des effets prononcés au sol (biosphère, matériaux...). Enfin, le rayonnement UV-A, compris entre 320 et 400 nm, est très peu absorbé par l'atmosphère et atteint la surface de la terre sans atténuation.

Ces rayonnements UV (RUV) arrivant à la surface, ont un effet direct sur de nombreux compartiments de la vie à la surface du globe :

La biosphère est fortement dépendante des niveaux de RUV. L'agriculture montre une sensibilité importante des cultures à une dose trop faible ou trop forte d'UV-B (Kakani et al. 2003), avec des impacts sur la résistance des plantes ou la quantité de biomasse.

Dans la colonne d'eau liquide, la pénétration des UV-R est contrôlée par différents éléments caractérisant son épaisseur optique (dont par exemple les teneurs en organismes vivants) et les niveaux d'UV peuvent avoir des impacts importants sur l'écosystème marin où algues, bactéries ou coraux sont sensibles aux variations d'UV. La photosynthèse chez le phytoplancton est gérée par un équilibre délicat dépendant de la salinité et de la température de l'eau mais aussi des niveaux d'UV-A et UV-B (Hader et al, 2007).

Dans le secteur bâtiment, les UV ont des effets directs sur la corrosion des matériaux et leur vieillissement.

Bien sûr, le domaine où les RUV ont un effet majeur est la santé humaine. Ces effets peuvent être bénéfiques ou néfastes. Par exemple, l'exposition de l'homme aux UV-B permet d'assurer la synthèse de la vitamine D primordiale dans la minéralisation osseuse. En revanche, les UV-B ont un effet néfaste sur tous les organismes vivants, en altérant l'ADN des cellules. Chez l'homme, un accroissement du rayonnement UV-B augmente les risques de cancer de la peau, l'occurrence des cataractes et affaiblit le système immunitaire.

L'indice UV a été défini par l'OMS afin de mesurer la quantité des rayonnements UV atteignant la surface et potentiellement néfastes pour la santé humaine. Il tient compte du spectre d'action

érythémateux, représentant la sensibilité de la peau en fonction de la longueur d'onde de la lumière reçue. Selon cette définition, il peut varier de 0 à 11 mais en réalité il peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées dans certaines conditions. A titre d'exemple, lorsque le 'trou d'ozone' est présent en Antarctique (printemps austral), l'indice UV peut dépasser le niveau 18. Au-delà de 3, une protection est nécessaire, au-delà de 8, l'exposition prolongée peut devenir dangereuse. Des indices supérieurs à 11 sont considérés comme critiques.

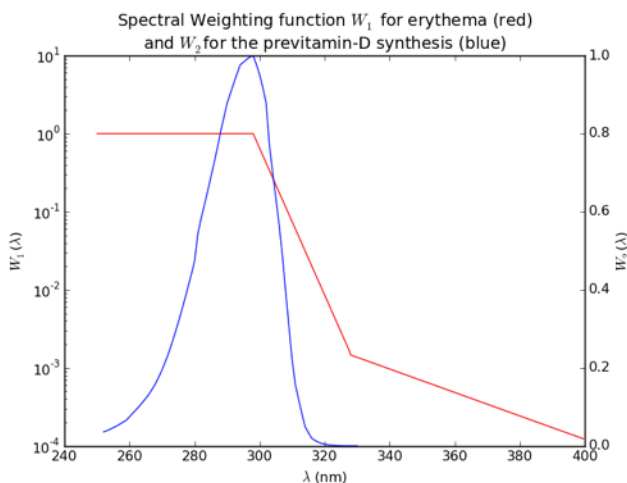


Figure 4.1 : Spectres d'action Erythemal et de prévitamine D

$$UVi = k_{er} \cdot \int_{250nm}^{450nm} E_{\lambda} \cdot W_{er}(\lambda) d\lambda$$

$E_{\lambda}$  est l'irradiance spectrale en  $W \cdot m^2 \cdot nm^{-1}$

$W_{er}$  est le spectre d'action Erythémal (courbe rouge)

$k_{er} = 40 m \cdot W^{-2}$

Naturellement, la zone géographique correspondant aux tropiques de l'hémisphère sud (tropiques et environnement dominé par les océans) expose plus les populations aux rayonnements UV. En effet, les angles zénithaux du soleil y sont très faibles toute l'année, de plus les quantités d'ozone stratosphérique ou d'aérosols atmosphérique sont moins importantes qu'aux latitudes plus élevées. Ce constat est vrai dans la grande majorité de la zone sud de l'Océan Indien (Madagascar, Seychelles, Comores). Les indices UV dans ces régions dépassent 10 quasiment toute l'année, impliquant des conséquences importantes sur la santé des populations.

A titre d'exemple, les dermatologues à La Réunion constatent une augmentation rapide des lésions de la peau dues au Soleil. Le nombre de ces lésions triple tous les 10 ans et avec une progression s'accéléralant (source ORS, 2014). Les doses de rayonnement reçues par les populations particulièrement exposées (enfants et travailleurs en extérieurs) dépassent presque toute l'année les seuils dangereux dans cette région de l'Océan Indien (Wright et al., 2013). Enfin, on peut noter que tous les phototypes de peau sont concernés puisqu'environ 1/4 des cancers observés aujourd'hui à la Réunion concernent les phototypes 5 et 6 (source société réunionnaise de dermatologie). Une partie importante de ce constat peut être expliquée par la modification des modes de vie, avec des activités balnéaires et une exposition solaire en constante augmentation. Le développement du tourisme, en particulier du tourisme local, est un facteur déterminant. Mais les changements climatiques liés à l'accumulation des gaz à effet

de serre dans l'atmosphère, font également partie des causes identifiées pour expliquer ces niveaux d'exposition en constante augmentation.

Lorsque le rayonnement UV pénètre l'atmosphère, son transfert jusqu'au sol dépend de divers paramètres. Parmi ceux-ci, on trouve les facteurs géométriques ou géographiques tels que l'angle solaire zénithal (SZA), la latitude, ou l'altitude. La nébulosité participe de manière importante, en réduisant généralement l'intensité du rayonnement, mais la couverture nuageuse peut aussi sous certaines conditions augmenter l'intensité, notamment en cas de couverture nuageuse fractionnée (Sabburg and Wong 2000). Les aérosols, petites particules d'origine naturelles (embruns, volcans) ou anthropiques (feux de biomasses, combustion d'énergie fossile), diffusent le rayonnement UV et peuvent en grande quantité affecter fortement le rayonnement UV de surface ou le forçage radiatif (Krzyścin and Puchalski 1998). La réflectivité d'une surface, ou albédo, participe aussi à la modulation de l'intensité du rayonnement mais pour finir, la concentration de certains gaz dans l'atmosphère tel l'ozone, joue un rôle essentiel. Il est bien connu que la couche d'ozone protège la vie sur Terre en filtrant efficacement les RUV dans les bandes les plus nocives comme les UVC.

L'incidence du rayonnement à certaines longueur d'onde, sur les molécules présentes dans l'atmosphère permet d'initier les réactions photochimiques, modifiant la composition atmosphérique et diminuant les rayonnements. L'ozone ( $O_3$ ) est le constituant atmosphérique le plus absorbant dans les longueurs d'ondes UV. Sa variabilité dans la stratosphère pilote en grande partie les niveaux d'UV au sol. Cette molécule est considérée comme bénéfique en stratosphère : la couche d'ozone stratosphérique protège la surface de la Terre des rayons ultraviolets les plus nocifs. Produit dans les tropiques sous l'effet de rayonnements solaires plus importants, l' $O_3$  est transporté vers les pôles grâce à la circulation dite de 'Brewer-Dobson' (BDC).

Les concentrations d'ozone se sont considérablement appauvries au cours des 35 dernières années en raison des émissions d'halocarbures, qui sont à la fois de puissants gaz à effet de serre et des substances appauvrissant la couche d'ozone (ODS : Ozone Depleted Substances). Succès incontesté de l'élaboration de politiques environnementales, le Protocole de Montréal (1987) et ses modifications, ramènent lentement les niveaux des ODS à des niveaux proches des niveaux historiques (1955-1975, avant leur épuisement important) d'ici la seconde moitié du siècle et préviendront les conséquences sanitaires importantes d'une exposition excessive aux UV (Chipperfield et al 2015).

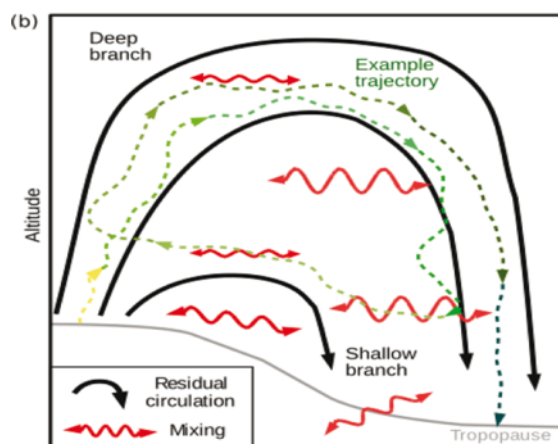
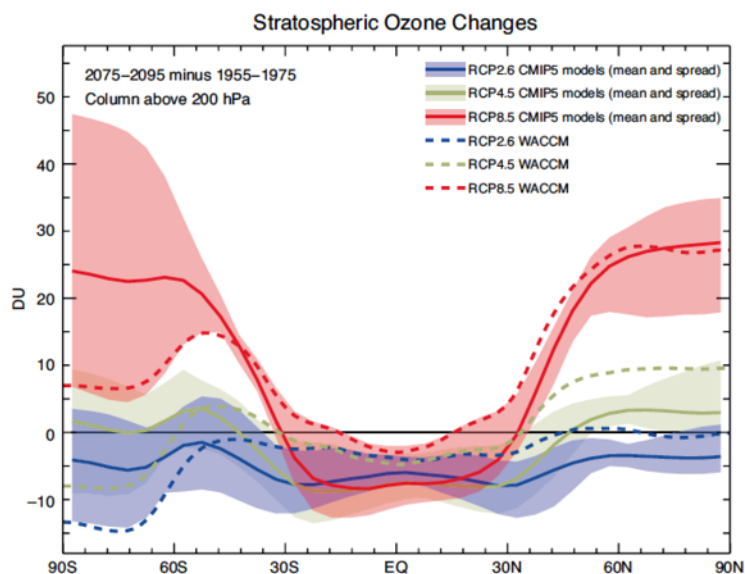


Figure 4.2 : Circulation de BDC – D’après Garny et al., (2014)

Cependant, l'évolution de l'ozone stratosphérique au-delà du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle, lorsque les émissions de ODS seront minimales et que leurs concentrations atmosphériques continueront de diminuer, sera largement déterminée par les concentrations de certains gaz à effets de Serres (GES) tels que le CO<sub>2</sub>, le N<sub>2</sub>O et le CH<sub>4</sub> (Eyring et al 2013, Stolarksi et al., 2015, Iglesias-Suarez et al., 2016). Dans certains scénarios d'émissions futures, l'ozone extratropical dépasse de loin les niveaux historiques, réduisant les UV de surface sous leurs niveaux historiques à ces latitudes (Hegglin et Shepherd 2009).

D’un autre côté, on s'attend à ce que l'augmentation du CO<sub>2</sub> accélère la circulation de BDC (Butchart, 2014 ; WMO, 2018 ; Lin and Fu, 2013). L’ozone sera alors transporté plus rapidement des tropiques vers les pôles et on observera ainsi une augmentation de la colonne totale d’ozone aux moyennes latitudes et une diminution aux tropiques. Le rayonnement UV à la surface étant directement dépendant de la colonne totale d’ozone, on peut s’attendre à une diminution de l’UV aux moyennes latitudes et une augmentation aux tropiques (Hegglin and Shepherd, 2009 ; Butler et al., 2016).

Butler et al. (2016) ont montré que malgré le succès du protocole de Montréal, des changements de concentration de l’ozone très différents sont possibles. Ces changements sont pilotés par les concentrations de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), protoxyde d’azote (N<sub>2</sub>O) et méthane (CH<sub>4</sub>), et influenceraient le rayonnement à la surface. Le rôle de la couverture nuageuse dans les fluctuations associées au rayonnement à la surface a été avancé par Bais et al. (2011). Paula Corrêa et al. (2013) ont mis en avant celui des aérosols sur la variation de l’irradiance érythémale jusqu’en 2100, tandis Hegglin and Shepherd (2009) ont analysé l’ampleur de ces changements en fonction de la modification de la BDC.



*Figure 4.3 : Évolution de l’ozone stratosphérique à la fin du XXIème siècle pour différents scénarios climatiques, d’après Butler et al., 2016*

L’Océan Indien occidental est principalement situé en région tropicale. C’est donc une partie du monde potentiellement impactée par les évolutions de rayonnement décrite précédemment. Pour autant, cette zone géographique souffre d’un déficit très important de mesures, tant pour l’ozone que pour le rayonnement UV au sol. La littérature est de facto pauvre en études associées à ces thématiques. L’originalité de la Réunion est qu’elle est située au cœur de cette région et qu’elle bénéficie depuis plusieurs décennies de mesures de qualité grâce à l’OPAR.

Les questions scientifiques principales auxquelles nous avons essayé de répondre ici sont :

1. Comment caractériser la variabilité actuelle des RUV en région tropicale sud et en particulier à la Réunion ? Quels sont les principaux facteurs influençant cette variabilité ?
2. Quelles seront les tendances à long terme des RUV dans le contexte des modifications climatiques et de l’augmentation des concentrations de GES ?

Je vais détailler dans la suite 2 études qui ont contribué à ces objectifs.

#### 4.2 Évaluation du rayonnement UV à la Réunion, à partir des données sol et de la modélisation

Cette partie a fait l’objet de l’encadrement à 80 % d’un doctorant entre 2015 et 2018, Kevin Lamy dont la soutenance a eu lieu en juin 2018. Les résultats de ces travaux ont également été

utilisés dans l'encadrement d'un autre doctorant Jean-Maurice Cadet (30%), qui soutiendra sa thèse en décembre 2019.

L'objet de cette partie est l'étude de la variabilité de l'irradiance erythmale (indice UV) à la Réunion grâce aux mesures effectuées par le spectro-radiomètre Bentham (voir chapitre 1). Malgré le fait que le rayonnement UV soit particulièrement fort dans cette région de la planète, très peu de mesures y sont réalisées et très peu de recherche y sont menées, ce qui met en avant l'originalité et l'importance de ce type d'études.

Nous avons travaillé en particulier sur les méthodes de filtrage ciel clair appliquées à ce site tropical (La Réunion) ayant un cycle diurne et saisonnier de nébulosité caractéristique. La modélisation des indices UV à la Réunion a été réalisée grâce au modèle de transfert radiatif TUV (Madronish et al., 1993), après avoir testé la sensibilité de ce modèle aux paramètres d'entrée. In fine, nous avons pu valider les sorties du modèle grâce aux observations filtrées en ciel clair.

Comme explicité précédemment, le rayonnement ultraviolet dépend de nombreux facteurs (angle solaire zénithal, distance Terre-Soleil, ...) et physico-chimiques (intensité du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère, absorption par l'ozone, diffusion des nuages, des aérosols, albédo de la surface...). Il faut donc définir précisément de nombreux paramètres à l'entrée du modèle si l'on souhaite obtenir des sorties précises du rayonnement UV et surtout que ces sorties soient adaptées au site de modélisation.

Le site de La Réunion est un site idéal pour réaliser ce type d'étude et pour vérifier la qualité des modélisations, puisqu'une grande variété de mesures y sont réalisées, en particulier celles nécessaires à une étude sur la modélisation de l'UV (voir Chapitre 1 sur l'OPAR). On peut noter que la majorité des instruments de mesure de l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion) sont labélisés et font partie de réseaux internationaux, ce qui garantit la qualité des mesures.

Les données utilisées ici sont présentées dans la partie 1 consacrée à mon implication en instrumentation. Les données d'ozone total proviennent du spectromètre UV-Visible SAOZ et celles de RUV du spectro-radiomètre UV Bentham. Ces deux instruments sont labélisés NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change).

Des radiosondages hebdomadaires permettent la mesure de la distribution verticale de l'ozone et de température. Ces radiosondages font partie du réseau Southern Hemisphere ADDitional OZonesondes -SHADOZ (Thompson et al. 2003) et NDACC. Un photomètre CIMEL effectuée

des mesures de l'épaisseur optique d'aérosol et du coefficient d'Ångström toutes les 20 minutes environ. Le coefficient d'Ångström décrit la dépendance de l'AOD à la longueur d'onde.

Nous ne disposons pas, pour la période d'étude, de données de couverture nuageuse par caméra imageur de ciel. Seuls des rapports horaires d'observateurs (Météo France) étaient disponibles pour une localisation à une dizaine de kilomètres du site du Moufia, où sont réalisées les mesures d'UV. Les données de colonne totale d'ozone sont obtenues grâce aux satellites OMI (Ozone Monitoring Instrument) et SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer).

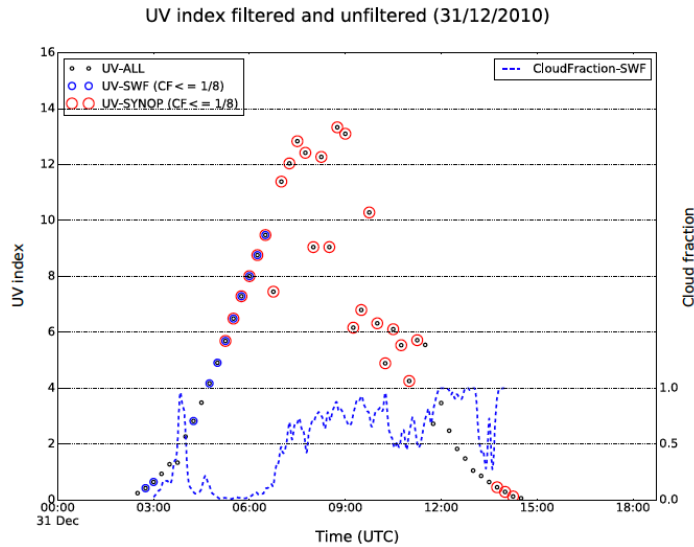
La modélisation du rayonnement UV est réalisée en ciel clair. Pour comparer les sorties modèle aux mesures du Bentham, il a donc fallu filtrer les mesures sol, afin d'éliminer les cas de couverture nuageuse trop importante.

Une partie de l'étude a donc porté sur les comparaisons de méthode de filtrage ciel-clair. Les rapports d'observateurs sont délivrés en oktas, 0/8 définissant un ciel complètement dégagé et 8/8 un ciel complètement couvert. A partir de ces observations, les données de rayonnements sont filtrées et nommées dans l'article  $UV_{SYNOPSIS}$ . Toutes les mesures prises pour une nébulosité inférieure ou égale à 1/8 sont considérées ciel-clair (filtrage équivalent à 20 % sur la fraction nuageuse mesurée par caméra imageur de ciel).

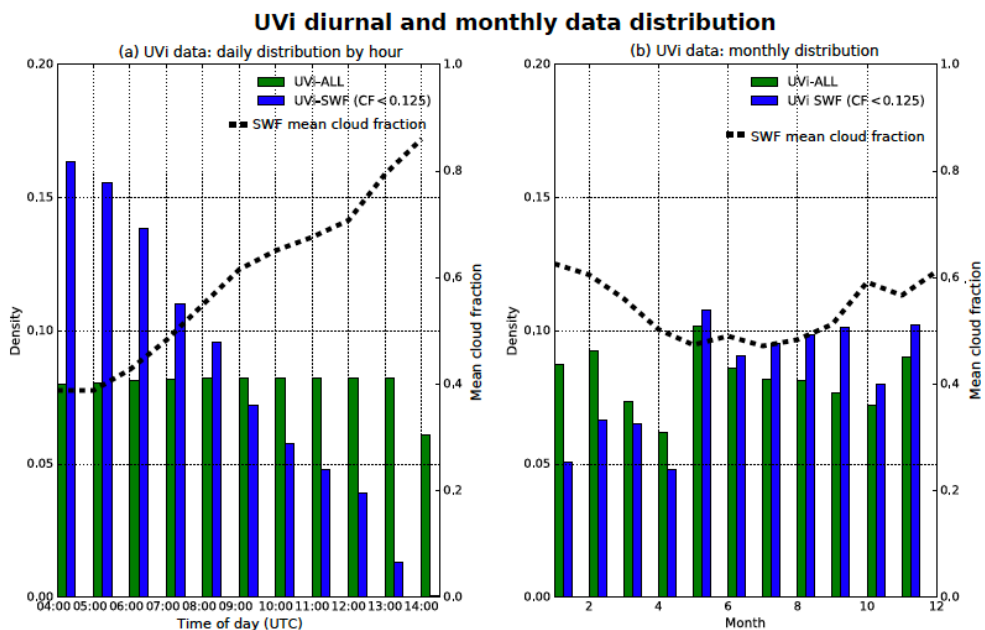
Une autre méthode dérivée des mesures de flux global et diffus a permis de dériver la couverture nuageuse. On utilise ici l'algorithme de Long and Ackerman (2000). Cette nouvelle estimation de couverture nuageuse permet un filtrage du rayonnement UV similaire à  $UV_{SYNOPSIS}$ , on obtient alors une mesure ciel clair nommé  $UV_{SWF}$ .

Ces deux variables,  $UV_{SYNOPSIS}$  et  $UV_{SWF}$ , sont comparées entre elles et analysées au regard du cycle journalier de l'indice UVI (figure 4.4) pour plusieurs jours.  $UV_{SWF}$  apparaît alors plus cohérent et sensible à l'évolution de la couverture nuageuse. Pour la suite, cette méthode a été retenue pour le filtrage des mesures d'UV ciel-clair.

Une comparaison de la répartition journalière et mensuelle des mesures d'UV tout temps et ciel clair, a ensuite été effectuée. Moins de mesures ciel-clair sont disponibles pour l'été austral. En effet cette période correspond à la saison des pluies pour le site étudié. De même, la topographie du site et le flux d'alizés dessinent un cycle nuageux journalier caractéristique, une matinée plutôt dégagée suivie d'une couverture nuageuse de plus en plus importante au cours de la journée. Les mesures ciel-clair sont ainsi moins disponibles au cours de l'après-midi.



*Figure 4.4 : Indice UV à La Réunion pour le 31 décembre 2010 ; pour les mesures UV-ALL Benthams sans filtrage, en cercles noirs, UV<sub>SWF</sub> : données UV filtrées avec méthode Long et Ackerman en cercles bleus, UV<sub>SYNQP</sub> : données UV filtrées avec CF<sub>SYNQP</sub> en cercles rouges. La fraction nuageuse est également représentée par la ligne pointillée bleue, échelle à droite*



*Figure 4.5 : Distribution des données UVI et de la fraction nuageuse moyenne à la Réunion par tranche de 1h. UVI-ALL est en vert, UVI-SWF est en bleu, la fraction de nuage est indiquée par la ligne pointillée.*

Le modèle de transfert radiatif utilisé au LACy est ‘Trospospheric Ultraviolet Model’ (TUV) développé par Madronich et al. (1998). Une étude de sensibilité a tout d’abord été réalisée sur les nombreux paramètres d’entrées de TUV.



Cela nous a amené à définir plusieurs configurations possibles du modèle, afin de déterminer la configuration optimisée pour le site de la Réunion (au regard des biais avec les mesures calibrées du Bentham). 7 configurations ont été testées (RTUV\_1 :7), plus un cas modélisé idéal (i-RTUV).

Les paramètres suivants ont été réglés dans le modèle afin de reproduire les mesures UVI et la climatologie propre au site :

- spectre extraterrestre (ETS),
- angle zénithal solaire (SZA),
- la quantité totale d'ozone dans la colonne (TO3),
- dioxyde d'azote total (TNO2),
- profil d'ozone (OP),
- profil de température (TP),
- l'épaisseur optique des aérosols (AOT) à 340 nm,
- aérosol Ångström exposant ( $\alpha$ ) entre 340 et 440 nm,
- albédo à diffusion unique (SSA)
- albédo (albédo de la surface du sol),
- altitude (z).

L'influence de deux différents spectres extra-terrestriel sur l'UVI a été regardée. Il est de l'ordre de 2 à 5 %. Cette différence apparaît comme dépendante de l'angle solaire zénithal et de la distribution verticale de l'ozone.

Un résultat similaire est obtenu pour la section efficace d'ozone. La différence est toutefois plus faible, elle varie de 2.5 à 3% environ, elle est aussi fonction de l'angle solaire zénithal.

Le choix des colonnes totales utilisées en entrée, provenant de mesures SAOZ au sol ou de mesures satellitaires (OMI et SBUV), a un impact faible sur l'UVI modélisé. Les mesures elles même sont très proches, avec moins de 2% en moyenne entre SAOZ et SBUV (Tohir et al., 2017). La différence sur l'UVI modélisé pour les différents cas est également inférieure à 1%.

Concernant les aérosols, la différence entre l'utilisation d'une climatologie mensuelle et la moyenne journalière a été estimée. Même si la différence moyenne entre les UVI calculés dans les 2 cas, est très faible (0.4 %), certains points montrent une différence pouvant atteindre 30%. Ces points particuliers correspondent notamment aux périodes de feux de biomasse où des masses d'air ont une charge très importante en aérosols de combustion.

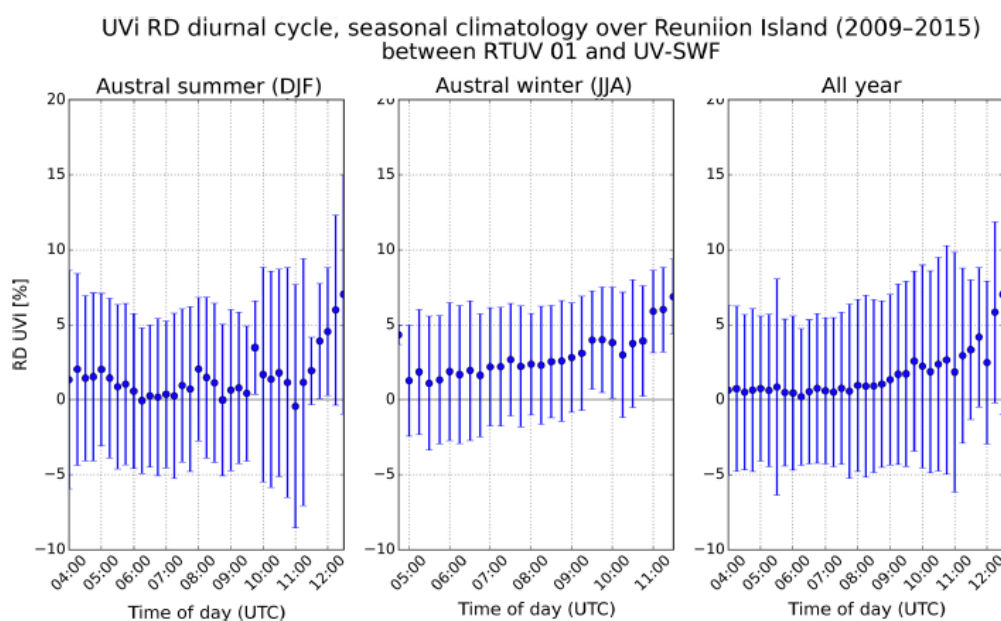
L'étude du RAF (Radiative Amplification Factor) pour l'ozone (Madronich, 1993), a permis de définir la relation entre une variation de la colonne totale d'ozone et une variation de l'indice UV pour notre site ou une région. Nous avons observé que le RAF décroît d'une valeur

d'environ 1.4 pour un SZA de 25° jusqu'à une valeur de moins de 1.2 lorsque l'angle solaire zénithal augmente.

Une analyse de la qualité de la modélisation du rayonnement UV a ensuite été réalisée. Afin de comparer l'UVI modélisé par TUV à la mesure d'UVI ciel-clair  $UV_{SWF}$ , nous avons calculé la différence relative entre ces deux quantités pour les différentes configurations de modélisation testées. La configuration la plus proche des observations du Bentham est RTUV03, avec une différence relative moyenne de 0.43 +/-5.83 %. Dans tous les cas la différence observée n'est pas significative au regard de l'incertitude de mesure de l'UVI qui est de 5%. La modélisation RTUV03 correspond à une colonne d'ozone total provenant de satellite SBUV, de mesures journalières d'aérosol par Cimel, d'un spectre extra-terrestre provenant de Dobber et al. (2008) et de section efficace d'ozone venant de Serdyuchenko et al. (2014).

Parameter	RTUV01	RTUV02	RTUV03	RTUV04	RTUV05	RTUV06
Mean relative difference (%)	0.94	0.54	0.43	1.29	4.18	4.38
Standard deviation	5.60	5.86	5.83	5.32	5.77	5.78
Median of the RD	1.07	0.70	0.44	0.73	4.31	4.51

*Table 4.1 : Cas d'études RTUV comparés aux observations d'UVI par ciel clair.*



*Figure 4.6 : Cycle diurne de la différence relative des UVI entre RTUV01 et UV-SWF pour l'hiver austral, l'été et toute l'année. Les valeurs climatiques des différences relatives UVI obtenues toutes les 15 min sont en points bleus avec barre de dispersion (1, écart-type).*

Le cycle diurne de cette différence entre modèle et mesure est représenté en figure 4.6, pour la configuration 01, pour toute l'année et pour deux saisons, été et hiver austral. Comme noté précédemment, le site d'étude possède un cycle diurne caractéristique de formation nuageuse,

avec un ennuagement généralement en fin de matinée. Cela a un impact direct sur la modélisation, en effet la différence relative entre observations et modèle augmente au cours de la journée. L'écart-type est aussi plus important pendant la saison pluvieuse en été austral. Lors de cette saison, moins de mesures ciel-clair sont disponibles et la comparaison modèle vs observation est alors statistiquement plus faible. La situation s'inverse en hiver austral.

Ce travail a donc permis de montrer que la paramétrisation précise d'un modèle de transfert radiatif comme TUV permet d'obtenir des sorties très proches des observations. En comparant avec des mesures instrumentales spectrales à haute résolution, il a permis de monter l'importance des facteurs géométriques et physico-chimiques au cours du processus de modélisation de transfert radiatif. Nous avons donc aujourd'hui au laboratoire une bonne maîtrise de cet outil. Cela nous permettra dans la suite de l'utiliser avec beaucoup de confiance sur différents autres sites et dans différentes autres circonstances. Ces résultats ont été publiés dans ACP en 2018. Ce même papier de Lamy et al. (2018) a également analysé la variation diurne et saisonnière des RUV à la Réunion, à partir des mesures du spectro-radiomètre Bentham et de produire des climatologies.

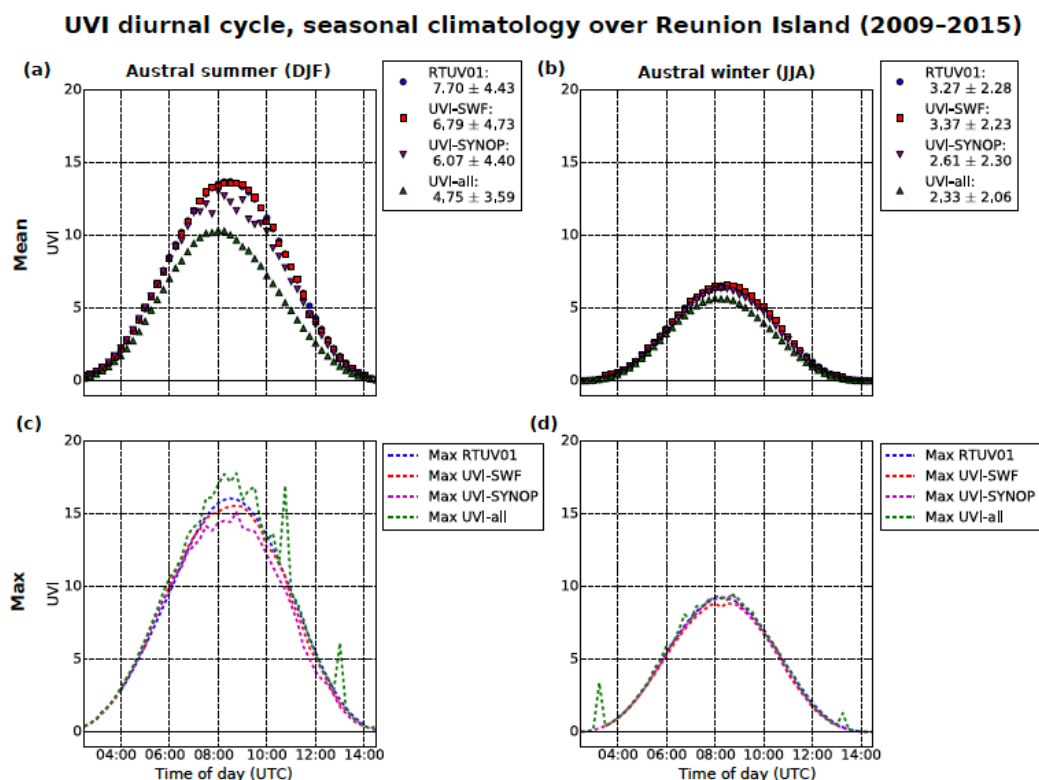


Figure 4.7 : Cycle diurne des UVI, climatologie saisonnière Été austral à gauche et hiver austral à droite. RTUV01 en bleu, UVI-SWF en rouge, UVI-SYNOP en violet et UVI-ALL en vert.

On voit sur ces figures que les mesures tout temps, donc sans filtrage, montrent des valeurs qui peuvent dépasser largement les valeurs filtrées en ciel clair (figure 4.7). Cette observation est

expliquée par le rôle de la diffusion multiple dans l'augmentation locale des RUV au sol. Dans le futur, la quantification de ce phénomène et des études plus précises sur le rôle de la couverture nuageuse seront menées, avec l'aide de nouvelles mesures par caméra imageur de ciel total (installation en 2017 sur la plateforme scientifique de Moufia, co-localisée avec le Bentham).

#### 4.3 Évolution climatique des UV dans les tropiques sud

La stratégie de recherche développée ici a consisté, après avoir consolidé nos connaissances sur la modélisation locale des RUV par modèle de transfert radiatif (voir partie précédente), à pouvoir coupler ce modèle 1D TUV avec des sorties de modèles climatiques de chimie grande échelle proposant les évolutions climatiques des différents paramètres clefs entrant dans la variabilité des RUV. L'objectif était d'obtenir des projections climatiques des rayonnements UV à horizon 2100.

Cette partie a fait l'objet du développement d'un nouveau champ de compétence au LACy, dans le cadre de la thèse de K. Lamy. Il s'est fait en partenariat avec le groupe GMGEC/COMETS du CNRM à Météo-France et a débouché sur la publication d'un article accepté à ACP en 2019 (Lamy et al., 2019)

Comme on l'a vu précédemment, l'histoire climatique récente, additionnée à la réduction des ODS suite au protocole de Montréal, va très certainement conduire à une compétition dans le contrôle futur des RUV au sol, entre la charge en ODS et celle en GES.

Les modèles climatiques actuels prévoient que l'augmentation de la concentration des GES devrait mener à une accélération de la circulation de Brewer-Dobson. Plus précisément, l'augmentation de la concentration des GES amène une réponse de la dynamique ondulatoire de l'atmosphère, celle-ci est moteur de la circulation de Brewer-Dobson. On s'attend ainsi à une modification de la distribution de l'ozone sur tout le globe. Une modification de la distribution de l'ozone aura un impact direct sur le rayonnement UV de surface.

Le travail présenté ici permet d'évaluer les changements possibles des niveaux de RUV selon différents scénarios climatiques et les changements attendus dans les colonnes d'ozone. Le rôle des GES, ODS et aérosols a également été analysé.

TUV a besoin de plusieurs paramètres d'entrée afin de modéliser correctement le rayonnement UV (voir partie précédente) : colonne totale d'ozone, albédo de surface, angle solaire zénithal, paramètres orbitaux, aérosols, etc ... La stratégie consiste à injecter comme paramètres en entrée de ce modèle de transfert radiatif, les sorties des modèles globaux ayant participé à l'exercice

d'inter-comparaison CCMI. 18 GCMs (Global Circulation Models) ou CTMs (Chemical Transport Model) ont ainsi été utilisés.

Le projet SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) a initié la réalisation de plusieurs exercices d'inter-comparaison entre les modèles de Chimie-Climat.

Le premier exercice, Chemistry-Climate Model Validation (CCMVal) (Eyring et al., 2008) avait pour objectif d'améliorer la connaissance des CCMs et GCMs. Plusieurs expériences types sont alors réalisées par différentes équipes représentant différents modèles. Les résultats de CCMVal ont été intégrés à l'un des chapitres du rapport de la World Meteorological Organisation (WMO) sur l'évolution de l'ozone (WMO Ozone Assesment, 2018).

CCMI-Phase I (Chemistry-Climate Model Initiative) (Eyring et al., 2013) est le dernier exercice en date et se place dans le cadre de la communauté CCMI, l'attention a été portée sur le couplage stratosphère-troposphère et la réponse de l'atmosphère à l'océan. Suite à CCMI, un nouvel exercice d'intercomparaison est en cours de réalisation : AerChemMIP (Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project) (Collins et al., 2017a). À partir des expertises récentes acquises au cours des projets AEROCOM (Aerosol Comparisons between Observations and Models), les différents exercices CCMI et ACCMIP, AerChemMIP ont donc pour objectif de quantifier l'impact de la chimie et des aérosols sur le climat.

A partir des sorties des 18 modèles (voir liste détaillées et institutions dans l'article ACP) de l'exercice CCMI, nous avons réalisé 6 expériences différentes de couplage avec TUV. Ces 6 expériences sont résumées dans le tableau 4.2.

Characteristics	EXP1	EXP2	EXP3		
			EXP3A	EXP3FTOZ	EXP3FAOD
Simulation	refC2 (RCP 6.0) RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	refC2 (RCP 6.0) senC2fODS senC2fGHG	refC2 (RCP 6.0)		
TOZ AOD	Transient Transient	Transient Fixed (Kinne et al., 2013)	Transient Transient	Fixed (2000-2010 values) Transient	Transient Fixed (Kinne et al., 2013)
MultiModelMedian from	CCSRNIES MIROC3.2 CMAM LMDZrepro SOCOL ULAQ	ACCESS-CCM CCSRNIES MIROC 3.2 CHASER (MIROC-ESM) CMAM LMDZrepro NIWA-UKCA UMSLIMCAT WACCM	same as EXP1		

*Table 4.2 :Les différentes expériences regroupant diverses simulations issues de différents groupes de recherche (dernière ligne).*

Plusieurs simulations ont été réalisées et classées par expériences. La sortie commune de CCMI de référence nommée refC2 est la modélisation du climat sur le globe de 1960 à 2100 selon le

scénario d'émission RCP 6.0. Les autres simulations effectuées dans CCMI sont senC2rcp26, senC2rcp45, senC2rcp85, senC2fODS et senC2fGHG. Dans notre étude, trois expériences sont définies.

Les trois premières simulations ; senC2rcp26, senC2rcp45 et senC2rcp85 (EXP 1) sont similaires à refC2 mais pour les scénarios d'émissions respectifs suivant : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 (Meinshausen et al., 2011). Ce premier set de simulations (refC2, senC2rcp26, senC2rcp45 et senC2rcp85), utilisé en entrée du modèle de transfert radiatif, permet d'obtenir le rayonnement UV de surface pour quatre futurs climatiques. Pour cette expérience l'AOD et le coefficient d'Ångström (440-870nm) sont obtenus à partir des seuls trois GCMs ayant fourni ces variables (EXP1).

Pour EXP2, les simulations en entrée de TUV sont refC2, mais également refC2 où les ODS sont fixés à leur niveaux de 1960 (senC2fODS), et également où les GHGs sont fixés à leur niveaux de 1960 (senC2fGHG). Cette expérience est réalisée afin d'étudier l'impact des GHGs ou des ODS sur l'évolution du rayonnement UV. Les paramètres aérosols (AOD, SSA,  $\alpha$ ) sont ici fixés à l'aide d'une climatologie contemporaine.

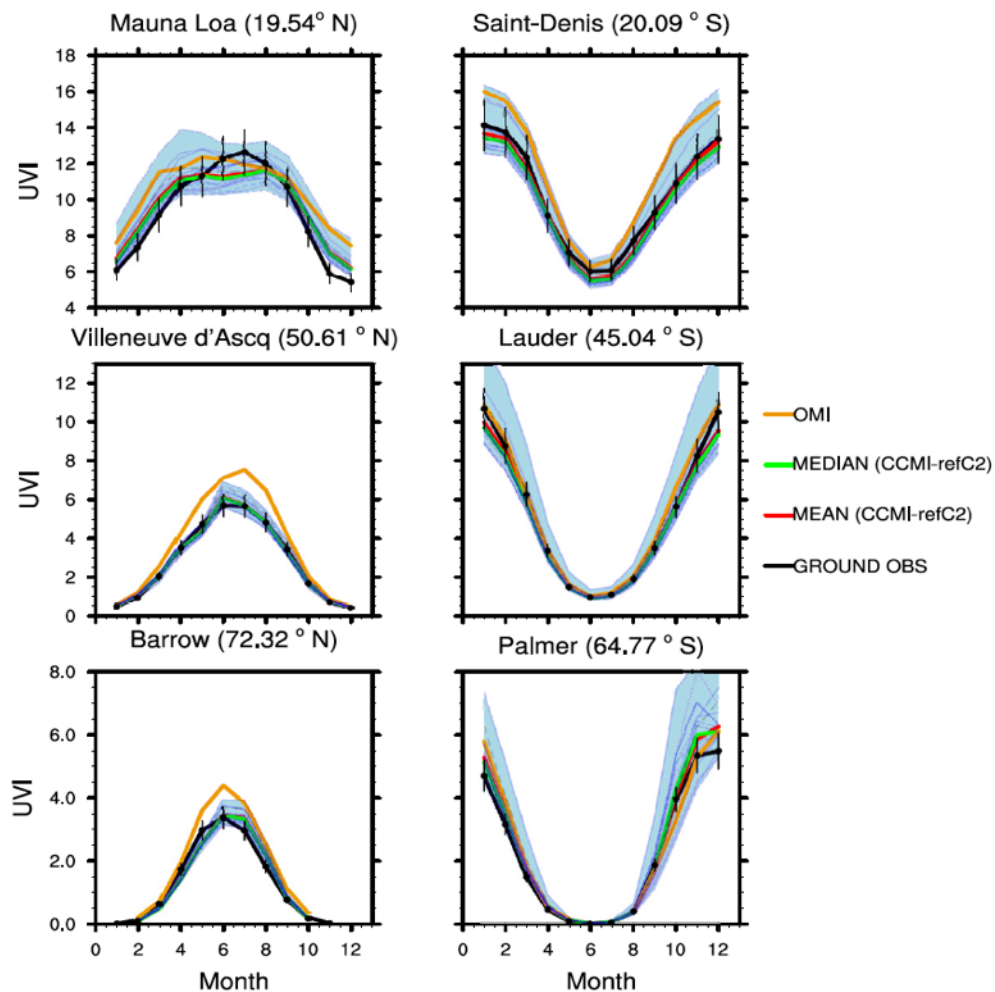
Une troisième expérience a été définie afin d'étudier l'impact de l'AOD sur l'évolution de l'UVI (EXP3). Les données CCMI issues de refC2 sont utilisées encore une fois en entrée à TUV, on distingue ici trois cas ; dans le premier cas, AOD et TOZ varie tout au long du 21ème siècle (EXP3A), dans le second cas, TOZ varie mais AOD reste fixe à ses niveaux de 2000-2010 (EXP3FAOD) et dans le dernier cas TOZ est fixé à ses niveaux de 2000-2010 et l'AOD varie (EXP3FTOZ). Ces trois sous-expériences sont nommées EXP3A, EXP3FTOZ et EXP3FAOD.

Ce travail a nécessité un important reformatage des sorties des différentes simulations des modèles participant à CCMI. Les simulations ont été ré-interpolées sur une grille de  $2^\circ \times 2^\circ$  et moyennées mensuellement. Les sorties de TUV sont également mensuelles.

Pour des raisons de temps de calcul trop importants, TUV n'a pas pu être appliqué à l'ensemble des sorties CCMI utilisées. Une moyenne et une médiane de l'ensemble des modèles CCMI ont alors été calculées et servent d'entrée au modèle TUV. Les sorties d'UVI correspondantes sont nommées  $UVI_{MEAN}$  et  $UVI_{MEDIAN}$ .

Afin de valider la méthode, une climatologie des sorties de modèle de climat (GCM + TUV) a été réalisée, en conditions ciel clair, puis comparée aux mesures sols. L'utilisation future de cette même stratégie pour estimer le rayonnement UV à la fin du siècle, pourra alors s'effectuer avec un bon niveau de confiance.

L'UVI climatologique a donc été calculé pour être caractéristique de la période actuelle (2000-2015) et comparé aux mesures de 6 stations sol faisant parties du réseau NDACC. Ces six stations ont été choisies afin de représenter six bandes latitudinales de largeur 30° allant du pôle sud au pôle nord. À partir des mesures ciel-clair de ces stations, un UVI climatologique mensuel au midi solaire a été calculé pour la période 2000-2017 ( $UVI_{GB}$ ). Les mesures du sondeur OMI (satellite Aura) ont également été utilisées lors de cette étape de validation, et un UVI climatologique mensuel au midi solaire a été calculé ( $UVI_{OMI}$ ).



*Figure 4. 8 :  $UVI_{GB}$  (2000-2010) pour six stations NDACC comparé à la simulation CCMI&TUV UVI ( $UVI_{MEAN}$  et  $UVI_{MEDIAN}$ ). Les mesures de la station sont représentées dans la courbe noire avec une barre de dispersion de  $2\sigma$ .  $UVI_{MEAN}$  et  $UVI_{MEDIAN}$  sont représentés en vert et rouge. Chaque modèle CCMI est représenté en bleu clair, la zone ombrée en bleu représente la répartition des modèles. Les  $UVI_{OMI}$  sont en orange.*

On a pu constater que les UVI modélisés médians et moyens sont proches des données au sol. Les différences moyennes relatives et absolues entre ces différentes sorties d'UVI climatologiques modélisées et les mesures d'UVI au sol, sont présentées dans la table 4.3. L'écart relatif entre l' $UVI_{MEAN}$  ou  $UVI_{MEDIAN}$  et les données sol varie environ de -12 % à 15%,

soit un écart absolu de -1.4 à 0.6 UVI. Ceci est très satisfaisant au regard des erreurs attachées à la mesure (5%), à la modélisation (5%) et surtout à la méthode. Seule la station de Mauna Loa présente un biais un peu plus important en écart absolu, pouvant atteindre plus de 1.5 UVI.

Station	Latitude	Longitude	Relative difference (%)			Absolute difference		
			MEAN	MEDIAN	OMI	MEAN	MEDIAN	OMI
Mauna Loa	19.54° N	155.58° W	-12.3 ± 6.0	-13.2 ± 6.1	-3.8 ± 8.5	-1.4 ± 0.9	-1.5 ± 0.9	-0.6 ± 1.1
Saint-Denis	20.09° S	55.5° W	-3.5 ± 2.8	-5.3 ± 2.8	13.6 ± 5.0	-0.3 ± 0.2	-0.5 ± 0.2	1.5 ± 0.7
Villeneuve d'Ascq	50.61° N	3.14° E	2.5 ± 6.3	2.8 ± 7.1	24.5 ± 6.1	0.2 ± 0.2	0.01 ± 0.2	0.8 ± 0.6
Lauder	45.04° S	169.68° E	15.8 ± 8.9	13.5 ± 9.3	28.7 ± 10.9	0.6 ± 0.3	0.5 ± 0.3	1.3 ± 0.5
Barrow	71.32° N	156.68° W	2.9 ± 9.5	2.0 ± 9.3	29.3 ± 5.4	0.04 ± 0.2	0.02 ± 0.2	0.6 ± 0.2
Palmer	64.77° S	64.05° W	10.6 ± 3.6	10.3 ± 3.2	8.1 ± 10.1	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.4

*Table 4.3 : Différence moyenne relative et absolue entre la climatologie mensuelle  $UVI_{MEAN}$ ,  $UVI_{MEDIAN}$ ,  $UVI_{OMI}$  et les mesures au sol ( $UVI_{GB}$ )*

On remarque également que OMI surestime systématiquement l'UVI au sol, avec des écarts relatifs de -3.8% à Mauna Loa jusqu'à 29.3% à Barrow. Cette observation est cohérente avec la littérature [Tanskanen et al., 2007 et Brogniez et al., 2016].

On peut noter ici l'importance d'avoir des mesures au sol fiables afin de vérifier et valider les sorties modèles. Le réseau UV-Indien, présenté précédemment, a été initié en ce sens et permettra assez rapidement de réaliser des études plus fines sur l'Océan Indien.

Les résultats de ces modélisations climatiques peuvent être résumées comme suit :

Nous avons confirmé le rôle important des GHG dans le retour aux niveaux de rayonnement UV d'avant 1960, via l'accélération de la récupération de l'ozone. Nous estimons en particulier que les GHG expliquent environ 3,8 % des changements de l'UVI entre 1960 et 2100. Bien que les ODS aient un effet sur l'UVI entre 1960 et 2050 en raison l'appauvrissement de la couche d'ozone, les simulations à GHG fixés, ne montrent que de petites variations dans l'UVI, en lien avec les modifications des ODS.

Dans ce contexte de changement climatique, l'éclairement UV de surface change dans des conditions de ciel clair et varie sur tout le globe au cours du prochain siècle. Les variations les plus importantes sont attendues pour les scénarios climatiques prévoyant une augmentation du forçage radiatif la plus élevée (RCP 8.5).

Dans presque tous les scénarios **aux latitudes élevées de l'hémisphère sud**, la colonne totale d'ozone (TOZ) revient aux niveaux d'avant 1960 et l'UVI reste de 5 à 7 % au-dessus des niveaux de 1960. Les niveaux d'UVI reviendront aux niveaux d'avant 1960, plus tôt pour RCP



8.5. Nous avons trouvé ici que les niveaux d'UVI sont principalement contrôlés par les variations dans les colonnes totales d'ozone (TOZ) à ces latitudes sud.

Concernant les latitudes moyennes, les changements d'UVI ne sont pas homogènes. En général, ils présentent des niveaux plus élevés comparés à 1960 dans les deux hémisphères, excepté pour RCP 8.5, où les UVI diminuent (voir tableau 4.4).

Dans l'hémisphère sud, les niveaux d'UVI sont principalement contrôlés par les quantités d'ozone (TOZ) alors que dans l'hémisphère nord, les quantités d'aérosols (AOD) et TOZ participent conjointement à la variabilité de l'UVI par ciel clair. La chute d'AOD contrebalance l'augmentation de TOZ. Ce rôle des aérosols avait déjà été mis en avant dans une étude précédente sur l'évolution climatique de l'UVI sur l'Europe (Corrêa et al., 2013). Notre étude montre également qu'à la fin du siècle l'UVI n'est plus corrélé aux diminutions de TOZ aux moyennes et basses latitudes de l'hémisphère nord (voir figure 4.9). La variation de l'AOD est dans ce cas environ deux fois plus importante que celle des TOZ. Cela est cohérent avec le fait que tous les scénarios RCPs prévoient une baisse d'émissions des précurseurs d'aérosols à partir des années 2050 environ (van Vuuren et al., 2011). D'autres études sont toutefois nécessaires pour approfondir ce résultat.

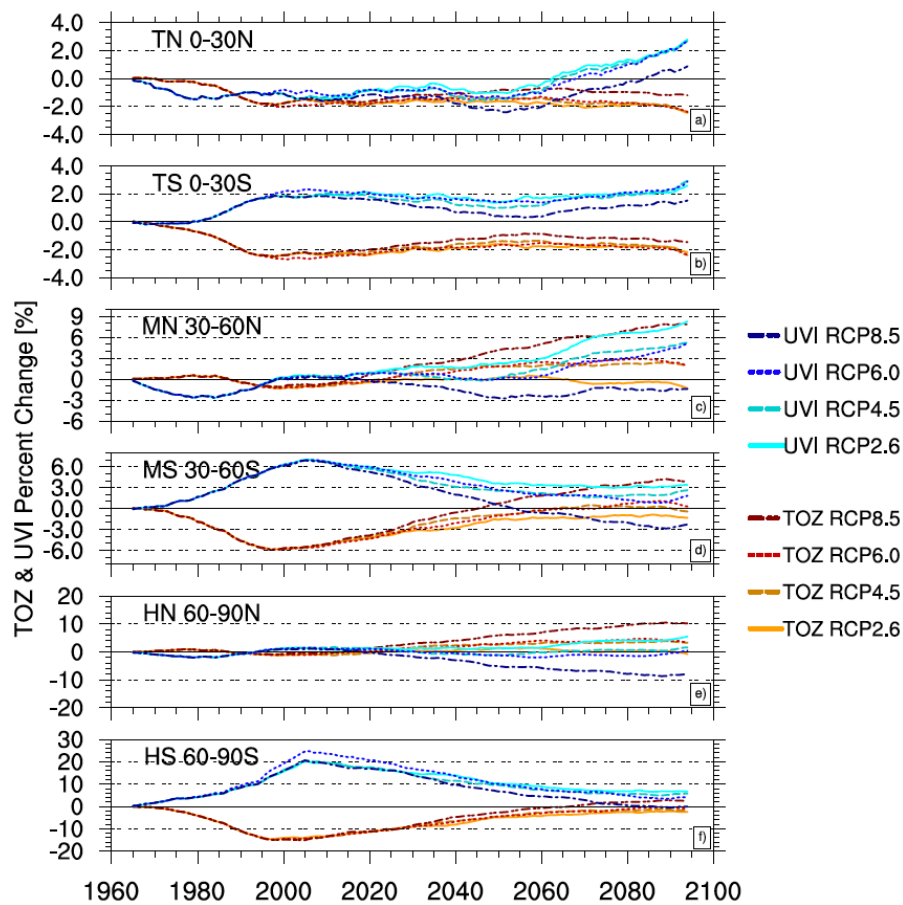
Region	RCP				RCP 6.0 with fixed AOD	senC2fODS	senC2fGHG	Bais et al. (2011)		Hegglin and Shepherd (2009)
	2.6	4.5	6.0	8.5				Table 2	Fig. 2	
60–90° N	5.5	1.7	0.5	–7.9	–4.8	–0.6	1.4	–7.48	~ –8	–9.1
30–60° N	8.3	5.2	5.0	–1.4	–1.9	2.3	0.7	–4.10	~ –4	–3.6
0–30° N	2.8	2.7	2.7	0.9	2.9	6.5	0.1	0.89	1–2	3.8
0–30° S	2.6	2.9	2.9	1.5	3.0	6.6	0.5	–4.16	~ –1	0.
30–60° S	3.4	2.6	1.8	–2.28	0.3	3.7	1.7	–9.8	~ –2	3.2
60–90° S	6.7	5.7	3.9	0.	–2	–0.1	2.7			

*Table 4.4 : Variation de l'UVI entre 2100 et 1960. Les résultats pour les RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 sont obtenus à partir de EXP1. Les résultats pour RCP 6.0 avec AOD fixe, senC2fODS et senC2fGHG sont obtenus à partir de EXP2. Les résultats de Bais et al. (2011) et de Hegglin and Shepherd (2009) sont également présentés.*

On peut noter qu'aux tropiques sud et nord (figure 4.9), les quantités d'ozone vont stagner, voire diminuer, à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Aux tropiques, les variations d'UVI par rapport aux niveaux de 1960 sont limitées à environ 3% sur les deux bandes tropicales (0–30 S et 0–30 N) entre 1960 et 2100. Ce résultat est similaire à celui trouvée par Bais et al. (2015), Bais et al. (2011) et Hegglin and Shepherd (2009).

Toujours aux tropiques, si on compare maintenant les UVI à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle aux niveaux de 2000- 2010, on observe une augmentation de l'ordre de 4% environ selon les régions. Cette valeur est relativement faible en pourcentage. Mais comme l'UVI est, en valeur absolue, très

élevé dans ces régions, une augmentation de l'ordre de 4% pourrait avoir des conséquences importantes sur la biosphère.



*Figure 4.9 : Variation en pourcentage de l'UVI et de la colonne totale TOZ par rapport à 1960-2070 pour six bandes latitudinales ; Les changements d'UVI sont représentés dans différentes nuances de bleu pour les quatre scénarios de RCP. Les changements de TOZ sont représentés dans différentes nuances de rouge.*

Le bilan sur cette thématique est actuellement de 4 articles publiés, 1 article soumis, 6 communications ou oraux dans des congrès internationaux, une thèse soutenue encadrée et 2 thèses en cours dont une sera soutenue début 2020, un post-doc en cours et un post doc demandé.

#### 4.3 Travaux

Je présente dans la suite, la première page de articles acceptés dans des revues ACL ou des thèses en lien avec cette partie. Il s'agit de :

- Cadet et al. 2017
- Lamy 2018 (Document de Thèse- Thèse encadrée)
- Lamy et al., 2018
- Lamy et al., 2019
- Cadet et al., 2019



Article

# Comparison of Ground-Based and Satellite-Derived Solar UV Index Levels at Six South African Sites

Jean-Maurice Cadet <sup>1,\*</sup>, Hassan Bencherif <sup>1,2</sup>, Thierry Portafaix <sup>1</sup>, Kévin Lamy <sup>1</sup>,  
Katlego Ncongwane <sup>3</sup>, Gerrie J. R. Coetzee <sup>3</sup> and Caradee Y. Wright <sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> LACy, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (UMR 8105 CNRS, Université de La Réunion, Météo-France), Saint-Denis de La Réunion 97744, France; hassan.bencherif@univ-reunion.fr (H.B.); thierry.portafaix@univ-reunion.fr (T.P.); kevin.lamy@univ-reunion.fr (K.L.)

<sup>2</sup> School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu-Natal, Durban 4041, South Africa

<sup>3</sup> South African Weather Service, Private Bag X097, Pretoria 0001, South Africa; katlego.ncongwane@weathersa.co.za (K.N.); gerrie.coetzee@weathersa.co.za (G.J.R.C.)

<sup>4</sup> Environment and Health Research Unit, South African Medical Research Council, Pretoria 0001, South Africa; Caradee.Wright@mrc.ac.za

<sup>5</sup> Department of Geography, Geoinformatics and Meteorology, University of Pretoria, Pretoria 0002, South Africa

\* Correspondence: jean.cadet@univ-reunion.fr; Tel.: +262-692-93-82-97

Received: 20 September 2017; Accepted: 6 November 2017; Published: 14 November 2017

**Abstract:** South Africa has been measuring the ground-based solar UV index for more than two decades at six sites to raise awareness about the impacts of the solar UV index on human health. This paper is an exploratory study based on comparison with satellite UV index measurements from the OMI/AURA experiment. Relative UV index differences between ground-based and satellite-derived data ranged from 0 to 45% depending on the site and year. Most of time, these differences appear in winter. Some ground-based stations' data had closer agreement with satellite-derived data. While the ground-based instruments are not intended for long-term trend analysis, they provide UV index information for public awareness instead, with some weak signs suggesting such long-term trends may exist in the ground-based data. The annual cycle, altitude, and latitude effects clearly appear in the UV index data measured in South Africa. This variability must be taken into account for the development of an excess solar UV exposure prevention strategy.

**Keywords:** solar ultraviolet radiation; UV index; ground-based measurements; satellite-derived data; OMI/AURA; South Africa

---

## 1. Introduction

Solar ultraviolet radiation (UVR) is known to have biological effects on ecosystems, plants, animals, and humans [**Error! Reference source not found.**]. Solar UVR is usually divided into three wavebands [**Error! Reference source not found.**]: UVA: 315–400 nm; UVB: 280–315 nm; and UVC: 100–280 nm. All UVC, potentially the most dangerous UVR band, is absorbed by ozone and oxygen in the atmosphere and, therefore, does not reach the Earth's surface, while UVA is weakly absorbed by ozone, and only a fraction of UVB reaches the surface with the majority being absorbed by ozone. The important implications of UVA and UVB on human health are translated via the application of an action spectrum, here, specifically, for erythema (sunburn) which occurs due to excess UVA and UVB exposure [**Error! Reference source not found.**]. The Ultraviolet Index is a standard unitless measure of UVR used to describe an erythemal dose rate where 1 UV index unit is equivalent to 25 mW·m<sup>-2</sup> [**Error! Reference source not found.**]. The UV index is recommended as a public communication tool to convey solar UVR levels and appropriate sun protection advice [**Error! Reference source not found.**]. Several

# THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LA REUNION

Spécialité: Physique de l'atmosphère

École doctorale: « Sciences, Technologies et Santé (STS) ED542 »

réalisée

au Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy)

présentée par

**Kévin Lamy**

pour obtenir le grade de :

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION**

Sujet de la thèse :

---

**Projection Climatique du Rayonnement Ultraviolet au cours du  
21ème siècle : Impact de différents scénarios climatiques**

---

Soutenance prévue le 26 Juin 2018 devant le jury composé de :

M.	Jean-Pierre Cammas	Président du Jury
Mme	Michaela Hegglin	Rapporteuse
M.	Marcelo de Paula Corrêa	Rapporteur
M.	Colette Brogniez	Examineur
M.	Béatrice Josse	Examineur
M.	Thierry Portafaix	Examineur
Mme	Sophie Godin-Beekmann	Co-Directrice de thèse
M.	Hassan Bencherif	Co-Directeur de thèse



## Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics

Kévin Lamy<sup>1</sup>, Thierry Portafaix<sup>1</sup>, Colette Brogniez<sup>2</sup>, Sophie Godin-Beekmann<sup>3</sup>, Hassan Bencherif<sup>1,4</sup>, Béatrice Morel<sup>5</sup>, Andrea Pazmino<sup>3</sup>, Jean Marc Metzger<sup>6</sup>, Frédérique Auriol<sup>2</sup>, Christine Deroo<sup>2</sup>, Valentin Duflo<sup>1</sup>, Philippe Goloub<sup>2</sup>, and Charles N. Long<sup>7</sup>

<sup>1</sup>LACy, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (UMR 8105 CNRS, Université de La Réunion, Météo-France), Saint-Denis, Reunion Island, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), Université Lille 1 Sciences et Technologies, Villeneuve d'Ascq, France

<sup>3</sup>Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, Service d'Aéronomie (LATMOS), CNRS, Institut Pierre Simon Laplace, Pierre et Marie Curie University, Paris, France

<sup>4</sup>School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu Natal, Durban, South Africa

<sup>5</sup>Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés (LE2P), Université de la Réunion, Saint-Denis, Reunion Island, France

<sup>6</sup>Observatoire des Sciences de l'Univers Réunion (OSU-R), UMS 3365, Université de la Réunion, Saint-Denis, Reunion Island, France

<sup>7</sup>National Oceanographic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Boulder, Colorado, USA

**Correspondence:** Kévin Lamy (kevin.lamy@univ-reunion.fr)

Received: 20 June 2017 – Discussion started: 24 July 2017

Revised: 30 October 2017 – Accepted: 9 November 2017 – Published: 9 January 2018

**Abstract.** Surface ultraviolet radiation (SUR) is not an increasing concern after the implementation of the Montreal Protocol and the recovery of the ozone layer (Morgenstern et al., 2008). However, large uncertainties remain in the prediction of future changes of SUR (Bais et al., 2015). Several studies pointed out that UV-B impacts the biosphere (Erickson et al., 2015), especially the aquatic system, which plays a central part in the biogeochemical cycle (Hader et al., 2007). It can affect phytoplankton productivity (Smith and Cullen, 1995). This influence can result in either positive or negative feedback on climate (Zepp et al., 2007).

Global circulation model simulations predict an acceleration of the Brewer-Dobson circulation over the next century (Butchart, 2014), which would lead to a decrease in ozone levels in the tropics and an enhancement at higher latitudes (Hegglin and Shepherd, 2009). Reunion Island is located in the tropics (21° S, 55° E), in a part of the world where the amount of ozone in the ozone column is naturally low. In addition, this island is mountainous and the marine atmosphere is often clean with low aerosol concentrations. Thus, measurements show much higher SUR than at other sites at

the same latitude or at midlatitudes. Ground-based measurements of SUR have been taken on Reunion Island by a Bentham DTMc300 spectroradiometer since 2009. This instrument is affiliated with the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC). In order to quantify the future evolution of SUR in the tropics, it is necessary to validate a model against present observations. This study is designed to be a preliminary parametric and sensitivity study of SUR modelling in the tropics.

We developed a local parameterisation using the Tropospheric Ultraviolet and Visible Model (TUV; Madronich, 1993) and compared the output of TUV to multiple years of Bentham spectral measurements. This comparison started in early 2009 and continued until 2016.

Only clear-sky SUR was modelled, so we needed to sort out the clear-sky measurements. We used two methods to detect cloudy conditions: the first was based on an observer's hourly report on the sky cover, while the second was based on applying Long and Ackerman (2000)'s algorithm to broadband pyranometer data to obtain the cloud fraction and then discriminating clear-sky windows on SUR measurements.



## Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative

Kévin Lamy<sup>1</sup>, Thierry Portafaix<sup>1</sup>, Béatrice Josse<sup>2</sup>, Colette Brogniez<sup>3</sup>, Sophie Godin-Beekmann<sup>4</sup>, Hassan Bencherif<sup>1,5</sup>, Laura Revell<sup>6,7,8</sup>, Hideharu Akiyoshi<sup>9</sup>, Slimane Bekki<sup>4</sup>, Michaela I. Hegglin<sup>10</sup>, Patrick Jöckel<sup>11</sup>, Oliver Kirner<sup>12</sup>, Ben Liley<sup>13</sup>, Virginie Marecal<sup>2</sup>, Olaf Morgenstern<sup>13</sup>, Andrea Stenke<sup>6</sup>, Guang Zeng<sup>13</sup>, N. Luke Abraham<sup>14,15</sup>, Alexander T. Archibald<sup>14</sup>, Neil Butchart<sup>16</sup>, Martyn P. Chipperfield<sup>17</sup>, Glaucio Di Genova<sup>18</sup>, Makoto Deushi<sup>19</sup>, Sandip S. Dhomse<sup>17</sup>, Rong-Ming Hu<sup>4</sup>, Douglas Kinnison<sup>20</sup>, Michael Kotkamp<sup>13</sup>, Richard McKenzie<sup>13</sup>, Martine Michou<sup>2</sup>, Fiona M. O'Connor<sup>16</sup>, Luke D. Oman<sup>21</sup>, Giovanni Pitari<sup>18</sup>, David A. Plummer<sup>22</sup>, John A. Pyle<sup>14</sup>, Eugene Rozanov<sup>6,23</sup>, David Saint-Martin<sup>2</sup>, Kengo Sudo<sup>24</sup>, Taichu Y. Tanaka<sup>19</sup>, Daniele Visoni<sup>25</sup>, and Kohei Yoshida<sup>19</sup>

<sup>1</sup>LACy, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (UMR 8105 CNRS, Université de La Réunion, Météo-France), Saint-Denis de La Réunion, France

<sup>2</sup>Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) UMR 3589, Météo-France/CNRS, Toulouse, France

<sup>3</sup>Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), Université de Lille, Faculté des Sciences et Technologies, Villeneuve d'Ascq, France

<sup>4</sup>Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, Service d'Aéronomie (LATMOS), CNRS, Institut Pierre Simon Laplace, Pierre et Marie Curie University, Paris, France

<sup>5</sup>School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu Natal, Durban, South Africa

<sup>6</sup>Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich (ETHZ), Zürich, Switzerland

<sup>7</sup>Bodeker Scientific, Christchurch, New Zealand

<sup>8</sup>School of Physical and Chemical Sciences, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand

<sup>9</sup>National Institute of Environmental Studies (NIES), Tsukuba, Japan

<sup>10</sup>Department of Meteorology, University of Reading, Reading, UK

<sup>11</sup>Institut für Physik der Atmosphäre, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany

<sup>12</sup>Steinbuch Centre for Computing, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

<sup>13</sup>National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), Wellington, New Zealand

<sup>14</sup>Department of Chemistry, University of Cambridge, Cambridge, UK

<sup>15</sup>National Centre for Atmospheric Science (NCAS), Cambridge, UK

<sup>16</sup>Met Office Hadley Centre (MOHC), Exeter, UK

<sup>17</sup>School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, UK

<sup>18</sup>Department of Physical and Chemical Sciences, Università dell'Aquila, L'Aquila, Italy

<sup>19</sup>Meteorological Research Institute (MRI), Tsukuba, Japan

<sup>20</sup>National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, USA

<sup>21</sup>National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center (NASA GSFC), Greenbelt, Maryland, USA

<sup>22</sup>Environment and Climate Change Canada, Montréal, Canada

<sup>23</sup>Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos World Radiation Centre, Davos Dorf, Switzerland

<sup>24</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan

<sup>25</sup>Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, USA

**Correspondence:** Kévin Lamy (kevin.lamy@univ-reunion.fr)

Received: 26 May 2018 – Discussion started: 11 June 2018

Revised: 17 May 2019 – Accepted: 26 June 2019 – Published: 12 August 2019

Article

# Solar UV Radiation in Saint-Denis, La Réunion and Cape Town, South Africa: 10 years Climatology and Human Exposure Assessment at Altitude

Jean-Maurice Cadet <sup>1,\*</sup>, Hassan Bencherif <sup>1,2</sup>, David J. du Preez <sup>3</sup>, Thierry Portafaix <sup>1</sup>,  
Nathalie Sultan-Bichat <sup>4</sup>, Matthias Belus <sup>5</sup>, Colette Brogniez <sup>6</sup>, Frederique Auriol <sup>6</sup>,  
Jean-Marc Metzger <sup>7</sup>, Katlego Ncongwane <sup>8</sup>, Gerrie J. R. Coetzee <sup>8</sup> and Caradee Y. Wright <sup>3,9</sup>

<sup>1</sup> LACy, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (UMR 8105 CNRS, Université de La Réunion, Météo-France), 97744 Saint-Denis de La Réunion, France; jean.cadet@univ-reunion.fr (J.M.C.); hassan.bencherif@univ-reunion.fr (H.B.); thierry.portafaix@univ-reunion.fr (T.P.);

<sup>2</sup> School of Chemistry and Physics, University of KwaZulu-Natal, Durban 4041, South Africa

<sup>3</sup> Department of Geography, Geoinformatics and Meteorology, University of Pretoria, Pretoria 0002, South Africa; dupreez.jd@gmail.com (D.J.D.P.); caradee.wright@mrc.ac.za (C.Y.W.);

<sup>4</sup> Centre Hospitalier Ouest Réunion, Service Dermatologie, 5 Impasse Plaine Chabier, Le Grand Pourpier Sud, 97460 Saint-Paul, Réunion, France; sultanbichat.n@ch-gmartin.fr

<sup>5</sup> Conseil Régional de la Réunion, 5 Avenue René Cassin, Sainte-Clotilde, 97490 La Réunion, France; matthias.belus@cr-reunion.fr

<sup>6</sup> Université Lille, CNRS, UMR 8518, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, F-59000 Lille, France; colette.brogniez@univ-lille.fr (C.B.); frederique.auriol@univ-lille.fr (F.A.);

<sup>7</sup> Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion, UMS3365, 97744 Saint-Denis de la Réunion, France; jean-marc.metzger@univ-reunion.fr

<sup>8</sup> SAWS, South African Weather Service, Private Bag X097, Pretoria 0001, South Africa; katlego.ncongwane@weather.co.za (K.N.); gerrie.coetzee@weathersa.co.za (G.J.R.C.);

<sup>9</sup> Environment and Health Research Unit, South African Medical Research Council, Pretoria 0001, South Africa; caradee.wright@mrc.ac.za

\* Correspondence: jean.cadet@univ-reunion.fr; Tel.: +262-692-93-82-97

Received: 05 August 2019; Accepted: 26 September 2019; Published: 1 October 2019

**Abstract:** Solar ultraviolet radiation (UVR) monitoring is important since it depends on several atmospheric parameters which are associated with climate change and since excess solar UVR exposure and has significant impacts on human health and wellbeing. The objective of this study was to investigate the trends in solar UVR during a decade (2009–2018) in Saint-Denis, Reunion Island (20.9°S, 55.5°E, 85 m ASL) and Cape Town, South Africa (33.97°S, 18.6°E, 42 m ASL). This comparison was done using total daily erythema exposure as derived from UVR sensors continuously at both sites. Climatology over the 10-year period showed extreme UVR exposure for both sites. Slight changes with opposite trends were found, +3.6% at Saint-Denis and –3.7% at Cape Town. However, these two sites often experience extreme weather conditions thereby making the trend evaluation difficult. Human exposure assessment was performed for hiking activities at two popular high-altitude hiking trails on the Maïdo–Grand Bénare (Reunion) and Table Mountain (Cape Town) with a handheld radiometer. Extreme exposure doses of 64 SED and 40 SED (Standard Erythemal Dose, 1 SED = 100 J.m<sup>-2</sup>) were recorded, respectively. These high exposure doses highlight the importance of raising public awareness on the risk related to excess UVR exposure at tourist sites, especially those at high altitude.

**Keywords:** solar ultraviolet radiation; UV index; UV dose; UV assessment; hiking; altitude; La Reunion; South Africa

# CHAPITRE 5

## Conclusions et perspectives

---

En conclusion, plus de vingt années passées au LPA puis au LACy m'ont permis d'acquérir une bonne maîtrise en matière instrumentale, tant sur la mesure par LIDAR, que sur les mesures par télédétection passive (radiométrique ou spectrométrique). Grâce à mes différentes expertises, je suis aujourd'hui pleinement intégré dans la communauté internationale, aussi bien pour les lidars (lidar working group NDACC), que pour le domaine des UV (WOUDC et UV-Indien au niveau régional). Cette connaissance instrumentale me permet aujourd'hui de déployer des solutions techniques adaptées aux objectifs scientifiques que j'ai définis. Plus particulièrement, la connaissance précise des biais, des erreurs et limites attachées aux divers instruments me permet une utilisation optimale de ces données dans le cadre de mes recherches.

Mes travaux de recherche peuvent se diviser en 2 grandes thématiques, correspondant à 2 périodes de ma carrière. La première a démarré au cours de ma thèse puis s'est poursuivie par la suite, avec mon recrutement comme Maître de Conférences. Elle se concentre autour de l'étude de la variabilité du réservoir stratosphérique tropical, de l'ozone et des barrières dynamiques en stratosphère. Elle m'a permis d'acquérir une bonne maîtrise de divers outils numériques, dont les outils qui m'ont permis de réaliser les estimations de tendances à long terme sur les longues séries d'observation.

Plus récemment, et après mon retour de détachement (2014), j'ai démarré une nouvelle thématique sur les rayonnements UV qui est parfaitement complémentaire avec les thématiques historiques du LPA puis du LACy. Les mesures sur le long terme de l'ozone stratosphérique ou de l'ozone total permettent le suivi climatologique de ce paramètre, mais in fine, c'est bien la variabilité au sol des rayonnements UV qui est le plus impactant sur la société et les écosystèmes.

La stratégie d'observation développée en partie 1 et les stratégies de recherche tant sur l'ozone que sur les UV, sont cohérentes entre elles. Par exemple, le réseau UV-Indien en cours de déploiement dans l'Océan Indien, permettra d'obtenir des mesures de référence au sol pour continuer les études sur le comportement climatique des rayonnements UV dans cette zone.

Les 5 années de recherche sur les UV m'ont permis d'acquérir une expertise à la fois en observation mais également sur la modélisation. Notre équipe maîtrise aujourd'hui un modèle



de transfert radiatif 1D, qu'il est possible de coupler avec différents autres modèles fournissant les paramètres d'entrée nécessaires à la modélisation de l'UV.

Couplé aux sorties des modèles de l'exercice CCMI, ceci nous a permis d'obtenir les premières estimations de niveaux de RUV à la fin du siècle et de commencer à comprendre quelles seront les grandeurs qui contrôleront les évolutions climatiques, en fonction des latitudes et en fonction des scénarios considérés.

Ces premières études ouvrent la voie à d'autres recherches pour comprendre plus finement les variations des UV au sol. Il sera important, par exemple, de regarder la variabilité climatique de la nébulosité atmosphérique produite lors des nouveaux exercices d'inter-comparaison et d'en estimer l'impact sur les UV.

Plus encore, le prochain exercice d'inter-comparaison de modèles climatiques AerChemMIP (Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project, Collins et al. (2017b)) prévoit, en plus des paramètres de CCMI, de porter une attention particulière à l'évolution des aérosols. Dans Lamy et al. (2019), nous avons montré que les variations climatiques du rayonnement UV en ciel-clair sont contrôlées par les variations d'ozone mais aussi par la charge en aérosols de l'atmosphère. L'utilisation des sorties AerChemMIP permettra de comprendre plus clairement le rôle des aérosols sur le rayonnement UV futur.

Mais pour aller plus loin, les développements que je souhaite faire autour de cette thématique, prévoient de coupler TUV avec d'autres modèles afin de réaliser des estimations à court terme et à haute résolution, des niveaux d'UV sur divers territoires, dont le territoire Réunionnais (demande post-doc déposée). La stratégie sera ici d'adapter TUV aux sorties du modèle de prévision numérique du temps (PNT) de Météo France, AROME Océan-Indien. Ce modèle à haute résolution permettra de prévoir en particulier les niveaux de nébulosité sur la Réunion (ou ailleurs dans l'Océan Indien), ce qui est un des input les plus importants pour le calcul des rayonnements UV au sol. Certains autres paramètres seront obtenus grâce aux très nombreuses observations atmosphériques de l'OPAR (observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion), dont les niveaux d'aérosols, les niveaux d'ozone, troposphérique ou stratosphérique, les concentrations de dioxyde de soufre ...etc. Aujourd'hui la principale difficulté pour prévoir à court terme les niveaux de RUV, est l'estimation correcte de la nébulosité, ce qui est rendu possible par l'utilisation des sorties du modèle Arôme Océan Indien. Une fois couplé à TUV et à un modèle numérique de terrain (MNT), il sera alors possible de réaliser des prévisions d'UV à haute résolution pour toute la Réunion, ou pour divers sites du réseau UV-Indien.

Le réseau UV-Indien m'a permis de passer de responsabilités locales d'instruments (lidar, radiomètre,...) à celles plus larges, d'un réseau régional d'observations, en développant un

large éventail de collaborations. Le programme UV-Indien prévoit déjà de nombreuses actions de formation technique des partenaires.

Je souhaite, dans les années à venir, poursuivre cette structuration de la recherche au niveau de l'Océan Indien, en développant et en impliquant les partenaires autour de nos actions de recherche, de la même manière que cela s'est fait avec l'Afrique du Sud via le LIA ARSAIO (né d'un GDRI). Cette implication recherche des partenaires s'articulera autour d'échanges d'étudiants ou de chercheurs. Il est déjà prévu un stage de M2 de 6 mois au premier semestre 2020, pour un étudiant malgache de IOGA. Le travail portera sur des algorithmes d'extraction de la nébulosité à partir des caméras imageurs de ciel, et de la variabilité de la nébulosité sur différents sites du réseau. Ceci pourrait se poursuivre par une thèse en co-tutelle avec l'Université d'Antananarivo et pourrait s'étendre aux autres partenaires du réseau (Comores, Diego Suarez, Seychelles).

Pour finir sur mes projets de recherche à un horizon proche, je souhaite poursuivre mes actions autour de la variabilité du réservoir tropical en complétant et valorisant les travaux qui ont été réalisés au cours de la thèse de G. Kirgis. Je prévois pour cela d'encadrer un étudiant de M2, avec une poursuite en thèse qui utilisera le dernier jeu de ré-analyse **ERA5**, la cinquième produite à l'échelle globale, couvrant la période 1950- présent et qui possède une résolution de 30 km.

L'objectif sera de :

- produire des séries temporelles de la position de vortex polaire et de la barrière subtropicale sur 70 ans, dans l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, par différentes méthodes (DyBaL, K-Means, Nash),
- décrire le comportement climatologique de ces barrières,
- caractériser leur variabilité et l'influence des grands cycles de variabilité atmosphérique (cycle solaire de 11 ans, QBO, ENSO), grâce à l'utilisation de l'EEMD ou de TREND\_RUN,
- estimer leur comportement à long terme et climatique et enfin regarder l'asymétrie hémisphérique dans l'évolution des barrières.

**ANNEXE 1**  
**LISTE DES PUBLICATIONS**

**Classement par type de publication**

**Dans revue internationale à comité de lecture,**

- 1/ Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Di Genova, G., Deushi, M., Dhomse, S. S., Hu, R.-M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O'Connor, F. M., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J. A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Visionsi, D., and Yoshida, K.: Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 10087–10110, <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>, 2019.
- 2/ Lamy, K., Portafaix, T., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Morel, B., Pazmino, A., Metzger, J. M., Auriol, F., Deroo, C., Dufлот, V., Goloub, P., and Long, C. N.: Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 227–246, <https://doi.org/10.5194/acp-18-227-2018>, 2018.
- 3/ Tohir, A. M., Portafaix, T., Sivakumar, V., Bencherif, H., Pazmiño, A., and Bègue, N.: Variability and trend in ozone over the southern tropics and subtropics, *Ann. Geophys.*, 36, 381–404, <https://doi.org/10.5194/angeo-36-381-2018>, 2018.
- 4/ Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Di Genova, G., Deushi, M., Dhomse, S. S., Hu, R.-M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O'Connor, F. M., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J. A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Visionsi, D., and Yoshida, K., *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, European Geosciences Union, 2018, 10.5194/acp-2018-525, 2018.
- 5/ Cadet, J. M., Bencherif, H., Portafaix, T., Lamy, K., Ncongwane, K., Coetzee, G., & Wright, C. Y. Comparison of Ground-Based and Satellite-Derived Solar UV Index Levels at Six South African Sites. *International journal of environmental research and public health*, 14(11), 1384. doi:10.3390/ijerph14111384, 2017.
- 6/ Venkataraman Sivakumar, Raven Jimmy, Hassan Bencherif, Nelson Bègue and Thierry Portafaix. Use of the TREND RUN model to deduce trends in South African Weather Service (SAWS) atmospheric data: Case study over Addo (33.568°S, 25.692°E) Eastern Cape, South Africa. *Journal of Neutral Atmosphere*, pp.51 - 58. hal-02098051, 2017,
- 7/ Vaz Peres, L., Bencherif, H., Mbatha, N., Passaglia Schuch, A., Tohir, A. M., Bègue, N., Portafaix, T., Anabor, V., Kirsch Pinheiro, D., Paes Leme, N. M., Bageston, J. V., and Schuch, N. J.: Measurements of the total ozone column using a Brewer spectrophotometer and TOMS and OMI satellite instruments over the Southern Space Observatory in Brazil, *Ann. Geophys.*, 35, 25–37, <https://doi.org/10.5194/angeo-35-25-2017>, 2017.
- 8/ Dufлот, V., Baray, J.-L., Payen, G., Marquestaut, N., Posny, F., Metzger, J.-M., Langerock, B., Vigouroux, C., Hadji-Lazaro, J., Portafaix, T., De Mazière, M., Coheur, P.-F., Clerbaux, C., and Cammas, J.-P.: Tropospheric ozone profiles by DIAL at Maïdo Observatory (Reunion Island): system description, instrumental performance and result comparison with

- ozone external data set, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 3359–3373, <https://doi.org/10.5194/amt-10-3359-2017>, 2017.
- 9/ Bègue, N., Vignelles, D., Berthet, G., Portafaix, T., Payen, G., Jégou, F., Benchérif, H., Jumelet, J., Vernier, J.-P., Lurton, T., Renard, J.-B., Clarisse, L., Duverger, V., Posny, F., Metzger, J.-M., and Godin-Beekmann, S.: Long-range transport of stratospheric aerosols in the Southern Hemisphere following the 2015 Calbuco eruption, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 15019–15036, <https://doi.org/10.5194/acp-17-15019-2017>, 2017.
  - 10/ Tulet, P., Di Muro, A., Colomb, A., Denjean, C., Dufлот, V., Arellano, S., Foucart, B., Brioude, J., Sellegri, K., Peltier, A., Aiuppa, A., Barthe, C., Bhugwant, C., Bielli, S., Boissier, P., Boudoire, G., Bourriane, T., Brunet, C., Burnet, F., Cammas, J.-P., Gabarrot, F., Galle, B., Giudice, G., Guadagno, C., Jeamblu, F., Kowalski, P., Leclair de Bellevue, J., Marquestaut, N., Mékies, D., Metzger, J.-M., Pianezze, J., Portafaix, T., Sciare, J., Tournigand, A., and Villeneuve, N.: First results of the Piton de la Fournaise STRAP 2015 experiment: multidisciplinary tracking of a volcanic gas and aerosol plume, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5355–5378, <https://doi.org/10.5194/acp-17-5355-2017>, 2017.
  - 11/ Hubert, D., Lambert, J.-C., Verhoelst, T., Granville, J., Keppens, A., Baray, J.-L., Bourassa, A. E., Cortesi, U., Degenstein, D. A., Froidevaux, L., Godin-Beekmann, S., Hoppel, K. W., Johnson, B. J., Kyrölä, E., Leblanc, T., Lichtenberg, G., Marchand, M., McElroy, C. T., Murtagh, D., Nakane, H., Portafaix, T., Querel, R., Russell III, J. M., Salvador, J., Smit, H. G. J., Stebel, K., Steinbrecht, W., Strawbridge, K. B., Stübi, R., Swart, D. P. J., Taha, G., Tarasick, D. W., Thompson, A. M., Urban, J., van Gijsel, J. A. E., Van Malderen, R., von der Gathen, P., Walker, K. A., Wolfram, E., and Zawodny, J. M.: Ground-based assessment of the bias and long-term stability of 14 limb and occultation ozone profile data records, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2497–2534, <https://doi.org/10.5194/amt-9-2497-2016>, 2016.
  - 12/ Fernandez, S., Rüfenacht, R., Kämpfer, N., Portafaix, T., Posny, F., and Payen, G.: Results from the validation campaign of the ozone radiometer GROMOS-C at the NDACC station of Réunion island, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 7531–7543, <https://doi.org/10.5194/acp-16-7531-2016>, 2016.
  - 13/ Tohir, A. M., H. Bencherif, V. Sivakumar, L. El Amraoui, T. Portafaix, and N. Mbatha, Comparison of total column ozone obtained by the IASI-MetOp satellite with ground-based and OMI satellite observations in the southern tropics and subtropics, *Ann. Geophys.*, 33, 1135–1146, 2015.
  - 14/ Pastel, M., J.-P. Pommereau, F. Goutail, A. Richter, A. Pazmiño, D. Ionov and T. Portafaix: Construction of merged satellite total O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> time series in the tropics for trend studies and evaluation by comparison to NDACC SAOZ measurement, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 3337–3354, 2014
  - 15/ Baray, J.-L., Y. Courcoux, P. Keckhut, T. Portafaix, P. Tulet, J.-P. Cammas, et al., Maïdo observatory: a new high-altitude station facility at Reunion Island (21° S, 55° E) for long-term atmospheric remote sensing and in situ measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2865–2877, doi :10.5194/amt-6-2865-2013, 2013.
  - 16/ Bencherif H., L. El Amraoui, N. Mzé , A. Pazmino, T. Portafaix, N. Begue - Total ozone variability and trends estimates from ground based and satellite observations in the southern subtropics, 2012
  - 17/ Bencherif, H., L. El Amraour, G. Kirgis, J. Leclair De Bellevue, T. Portafaix, Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4°S, 70.3°E), *J. Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1–11, 2011.
  - 18/ Sivakumar V., T. Portafaix, H. Bencherif, S. Godin-Beekmann and S. Baldy. Stratospheric ozone climatology and variability over a southern subtropical site: Reunion Island (21°S, 55°E), *Annales Geophysicae*, 25, 2321–2334, 2007.

- 19/ Bencherif H., R. Diab, T. Portafaix, B. Morel, P. Keckhut, and A. Moorgawa, Temperature climatology and trend estimates in the UTLS region as observed over a southern subtropical site, Durban, South Africa, *J. Atmos. Chem. Phys.*, p.1301-1320, 2006.
- 20/ JL Baray, J. Leveau, S. Baldy, J. Jouzel, P. Keckhut, G. Bergametti, G. Ancellet, H. Bencherif, B. Cadet, M. Carleer, C. David, M. de Mazière, D. Fadhuilhe, S. Godin Beekmann, P. Goloub, F. Goutail, J-M. Metzger, B. Morel, J-P. Pommereau, J. Porteneuve, T. Portafaix, F. Posny, L. Robert and M. Van Roozendael, An instrumented station for the survey of ozone and climate change in the southern tropics, *J. Environ. Monit.*, doi :10.1039/2006.
- 21/ Portafaix, T., H. Bencherif , D. Faduilhe , P. Keckhut , S. Godin-Beckmann, Inter-annual variability and trend analyses in the southern tropical UT/LS: Reunion Island (20.8°S, 55.5°E), *ASSP*, 102-111, 2006.
- 22/ Morel, B., H. Bencherif, P. Keckhut, T. Portafaix, A. Hauchecorne and S. Baldy, Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier. Part II: Results from the COupled Msdol Mimosa Interactive Dynamics model, *J. Geophys. Res.*, Vol110, D17101, doi:10.1029/2004JD005737, 2005
- 23/ Bencherif, H., T. Portafaix, J.L. Baray, B. Morel, S. Baldy, J. Leveau, A. Hauchecorne and A. Keckhut LIDAR observations of lower stratospheric aerosols over South Africa linked to large scale transport across the southern subtropical barrier, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 707-715, 2004.
- 24/ Portafaix, T., B. Morel, H. Bencherif, S. Godin-Beekmann, S. Baldy and A. Hauchecorne, Fine scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier, *J. Geophys. Res.*, 108, 4196-4205, 2003.

**Dans revue nationale avec ou sans comité de lecture,**

- 1/ Portafaix, T., Un nouveau lidar ozone DIAL à la Réunion, *Bull. de liaison du réseau de surveillance de la stratosphère (NDSC)*, N8,12-13, 2000
- 2/ Keckhut P., S. Godin, F. Goutail, A. Sarkissian, A. Hauchecorne , T. Portafaix, C. Souprayan, C. Vialle, C. David, V. Bergeret, A. Herzog, M. Marchand, J.P. Pommereau, M.L. Chanin , G. Megie, G., Guirlet , M., J. De La Noe , , P. Ricaud, O. Lezeau, H. Bencherif, F. Posny, M.F. Merienne, A. Barbe and T. Leblanc, Détection des changements de la stratosphère, Rapport Quadriennal 1995-1998 du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique. XXIIème Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, Birmingham (Angleterre), CNFGG (ed.), 199-218. 1999.
- 3/ Portafaix,T., S. Baldy, H. Bencherif, et S. Godin, Climatology, inter annual variability and trends of stratospheric ozone over Reunion Island (20.8 S, 55.5 E), *Air pollution research, Stratospheric ozone 1999 report*, EC Editor,645-649, 1999.

**• Conférences, congrès et colloques à communication (Conférences internationales à comité de lecture et actes) :**

- Portafaix, T, UV-Indien Network, presentation and first findings, MESO Workshop, Reims, 2019
- Lamy, K., T. Portafaix, Forestier, J.B, Rakotoniaina, S., Amélie, V. ; Réseau UV-Indien – Premiers résultats, Colloque Geosciences, Ressources, Risque, Technologies Antananarivo, 2019.

- Delage, O., T. Portafaix, H. Bencherif, G. Guimbretiere, R. Tato. Loua; Multi-scale variability analysis of time series in geophysics by using the empirical mode decomposition; 16th SAGA international Conference, Durban, 2019.
- Cadet, J.M., Portafaix, T., Bencherif, H., Brogniez, C., Sébastien, N., Inter-comparison campaign of solar UVR instruments at Réunion Island (21.0°S, 55,5°E): findings and recommendations. European Conference on solar UV Monitoring, Sep 2018, Vienne, Austria. doi: 10.13140/RG.2.2.24431.59044, 2018
- Hubert, D., Jean-Christopher Lambert, Tijn Verhoelst, Arno Keppens, José Granville, Pawan K. Bhartia, Adam E. Bourassa, Robert Damadeo, Doug A. Degenstein, Lucien Froidevaux, Sophie Godin-Beekmann, Bryan J. Johnson, Niklaus Kaempfer, Thierry Leblanc, Günter Lichtenberg, Donal P. Murtagh, Eliane Maillard Barras, Hideaki Nakane, Gerald Nedoluha, Thierry Portafaix, Richard Querel, Piera Raspollini, James-M. Russell, J. Salvador, Herman G. J. Smit, Viktoria Sofieva, Kerstin Stebel, Wolfgang Steinbrecht, René Stübi, Daan P. J. Swart, David W. Tarasick, Anne M. Thompson, Roeland van Malderen, Thomas von Clarmann, Peter von der Gathen, Kaley A. Walker, Mark Weber, Jacquelyn C. Witte, Wolfram Elian, Joseph M. Zawodny, AGU 2017 Fall Meeting, Dec 2017, New Orleans, United States, (insu-01683142), 2017.
- Khaykin, S., Sophie Godin-Beekmann, Philippe Keckhut, Alain Hauchecorne, Thierry Portafaix, et al.. Recent changes in stratospheric aerosol budget from ground-based and satellite observations. EGU General Assembly 2017, Apr 2017, Vienna, Austria. pp. EGU2017-14276. (insu-01516232).
- Portafaix, T. Evolution des rayonnements UV dans les tropiques de l'hémisphère sud, Congrès national de Dermatologie, France, 2017.
- Lamy, K., Béatrice Josse, Thierry Portafaix, Hassan Bencherif, Sophie Godin-Beekmann, et al.. Ultraviolet Radiation evolution during the 21st century. CCMI 2017, Chemistry-Climate Model Initiative Science Workshop, Jun 2017, Toulouse, France. (hal-01648231)
- Portafaix, T., Mohamed Tohir Abdoulwahab, Hassan Bencherif, Sophie Godin-Beekmann, Venkataraman Sivakumar, et al.. Influence of the dynamical activity on the inter-annual variability of ozone in the tropics. Quadrennial Ozone Symposium 2016, Sep 2016, Edinburgh, United Kingdom. pp. QOS2016-161. (insu-01355411).
- Posny, F., B.J. Johnson, Jean-Marc Metzger, Valentin Dufлот, Thierry Portafaix, et al.. La Réunion Island (21 S, 55.5 E) SHADOZ/NDACC station: First re-processed ozonesonde data and comparisons with lidar measurements at the Maïdo Observatory. Quadrennial Ozone Symposium, Sep 2016, Edinburgh, United Kingdom. 2016. (hal-01447020).
- Lamy, K., Thierry Portafaix, Hassan Bencherif, Sophie Godin-Beekmann, Colette Brogniez, et al.. Ultraviolet Radiation modeling from ground based and satellite measurements of Ozone over Réunion Island. Quadrennial Ozone Symposium 2016, Sep 2016, Edinburgh, United Kingdom. pp. QOS2016-81-6. (insu-01358032)
- Pommereau, J.P., Aymen Frihi, Florence Goutail, Andrea Pazmino, Slimane Bekki, et al.. Origin of Satellites and G-B SAOZ/NDACC total ozone measurement differences in the tropics. Quadrennial Ozone Symposium 2016, Sep 2016, Edinburgh, United Kingdom. pp. QOS2016-221. (insu-01355651)
- Vaz Peres, L., Mohamed Tohir Abdoulwahab, André Passaglia Schuch, N Mbatha, Nelson Bègue, et al.. Variability and Trend of Total Ozone Column from Brewer Spectrophotometer and Satellite Measurements Over South of Brazil. Quadrennial Ozone Symposium, Sep 2016, Edinburgh, United Kingdom. (hal-01767054).
- Tohir, A. M., Portafaix, T., Sivakumar, V., Bencherif, H., Mbatha, N., and Bègue, N. Variability and trend of ozone over the southern tropics and subtropics, QOS2016-5, 2016.

- Van Zyl, P. G., J. P. Beukes, J. Swartz, C. Galy-Lacaux, C. Labuschagne, E- G. Brunke, T. Portafaix, C. Liousse and J. J. Pienaar, Long-term measurements of atmospheric inorganic gaseous species at Cape Point, South Africa, 6.003-IGAC 2016.
- Portafaix, T., S. Godin-Beekmann, G. Payen, M. de Mazière, B. Langerock, S. Fernandez, F. Posny, J.P. Cammas, J. M. Metzger, H. Bencherif, C. Vigouroux, N. Marquestaut, Ozone profiles obtained by DIAL technique at Maïdo Observatory in La Reunion Island: comparisons with ECC ozone-sondes, ground-based FTIR spectrometer and microwave radiometer measurements, ILRC, doi: 10.13140/RG.2.1.3061.0403 2015.
- Jégou, F., G. Berthet, T. Lurton, D. Vignelles, N. Bègue, T. Portafaix, G. Payen, H. Bencherif, JB. Renard, L. Clarisse, J.P. Vernier, G. Krysztofiak, T. Roberts, L. Jourdain, Quantifying the impact of moderate volcanic eruptions on the stratosphere, Aussois, 2015
- Godin-Beekmann, G., A. Pazmiño, S. Khaykin, I. Petropavloskikh, D. Hubert, J.C. Lambert, T. Portafaix, On the Recovery of Stratospheric Ozone, IUGG, 2015
- Camas, J. P., C. Barthe · E. Blanc · C. Brogniez · A. Colomb · V. Duflo · P. Goloub · Alain Hauchecorne · N. Kaempfer · Philippe Keckhut · G. Payen · T. Portafaix · F. Posny · M. Ramonet · J. Sciare · K. Sellegri · P. Tulet · F. Vimeux · J. Leclair de Bellevue · Martine De Mazière, A Climate Observatory in South West Indian Ocean: The Maïdo Observatory in La Réunion. Current achievements and Future Prospects, 2015
- Tohir, A. M., V. Sivakumar, H. Bencherif and T. Portafaix, Ozone climatology obtained by a combination of MLS/AURA and SHADOZ osonesondes profiles over the souther tropic and subtropic, Proc. 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 2015.
- Portafaix, T., H. Bencherif, S. Godin-Beekmann, N. Bègue, S. Beaupère and A. Culot, Analysis of isentropic transport in the lower tropical stratosphere from laminae observed in SHADOZ ozone profiles, doi: 10.13140/2.1.1102.1129, AGU 2014, San Francisco
- Abdoulwahab M. Tohir, V. Sivakumar, T. Portafaix and H. Bencherif : Study on variability and trend of Total Column Ozone (TCO) obtained from combined satellite (TOMS and OMI) measurements over the southern subtropic, Proc. SASAS, 2014
- Bencherif, H., L. El Amraoui, N. Mzé, A. Pazmino, T. Portafaix, N. Bègue, G. Coetzee, V. Siakumar, G. Held, and F. Goutail, Total ozone variability and trend estimates from ground-based and satellite observations in the southern subtropics. QOS, Toronto, 27-31, 2012 ;
- Ionov, I., F. Goutail, A. Pazmino, J.P. Pommereau, E. Kyro, T. Portafaix G. Held, P. Ericksen, V. Dorokhov, Comparison of satellite total ozone and NO<sub>2</sub> data with ground-based SAOZ network, EGU Vienna, Austria, 2008
- Kirgis, G., T. Portafaix, H. Bencherif, S. Baldy, S. Godin-Beekmann and Jean Diatta, Discrimination of air masses by Multivariate Analysis Applied to Barrier detection, J of SCOUT O<sub>3</sub>, 2007.
- Kirgis G., T. Portafaix, H. Bencherif, S. Baldy, S. Godin-Beekmann, and Jean Diatta, Evaluation of Transport across Dynamical Barriers by Multivariate Analysis, Proceedings of RiiS-2007, Reunion Island, 2007.
- Ionov, D., F. Goutail, J.P. Pommereau, T. Portafaix, G. Held ; Total NO<sub>2</sub> in the tropics from satellites and ground-based SAOZ measurements, Reunion Island International Symposium, 2007
- Pastel, M., F. Goutail, A. Pazmiño, J. P. Pommereau, Gerhard Held and Thierry Portafaix; Long-term evolution of stratospheric NO<sub>2</sub> in the tropics; Reunion Island International Symposium, 2007
- Kirgis, G., T. Portafaix, H. Bencherif, S. Baldy and S. Godin-Beekmann, A statistical approach to study isentropic transport events in the lower stratosphere nearby the southern subtropical barrier, EGU, 2006.

- Portafaix, T., G. Kirgis, S. Godin, H. Bencherif, S. Baldy and B. Morel; A state of the southern subtropical barrier during the 2003 austral winter, deduced from Ertel potential vorticity and chemical tracer measurements, Proc. of SPARC General Assembly, 125-152, 2004.
- Portafaix, T., H. Bencherif and J. Leveau; Study of interannual variability and trends of tropospheric and stratospheric temperature fields obtained from 20 years of soundings over South Africa, EMS Vol. 1, 00358, 2004.
- Portafaix, T., S. Baldy, H. Bencherif, J.L. Baray, S. Godin and B. Morel, Variability of the southern stratospheric subtropical barrier since 1992 over the southern Indian Ocean, European Geophysical Society/American Geophysical Union joint assembly, 2003.
- Morel, B., H. Bencherif, P. Keckhut, T. Portafaix, S. Baldy, A. Hauchecorne, Modelling of impact of planetary-scale waves on meridional mixing at the edges of the tropical stratospheric reservoir, European Geophysical Society/American Geophysical Union joint assembly, 2003.
- Baray, J.L., T. Portafaix, V. Sivakumar and S. Baldy, Detection of tropopause as a dynamical barrier during large scale subtropical tropopause fold, European Geophysical Society/American Geophysical Union joint assembly, 2003.
- Portafaix, T., S. Godin, S. Baldy, H. Bencherif, B. Morel and F. Posny, Ozone laminae in the southern tropical stratosphere between 1999 and 2001, Proc. Sixth European Symposium on Ozone, Goteborg September 2002.
- Portafaix, T., S. Baldy, H. Bencherif, S. Godin, and B. Morel, Variability of the southern stratospheric subtropical barrier in 1999 and 2000, European Geophysical Society general assembly, 2002.
- Réchou, A, J. L Baray, S. Baldy and T. Portafaix Influence of deep convection on the injection of ozone into the troposphere (stratosphere-troposphere exchange), 21st ILRC - Quebec city, Canada, 2002.
- Portafaix, T., S. Baldy, S. Godin, A. Hauchecorne, H. Bencherif, A case study of isentropic exchange through the southern dynamical barrier limiting the tropical stratosphere, Proc. 2nd SPARC General Assembly, Mar del Plata, 2000.
- Bencherif, H., T. Portafaix, B. Morel, J.L. Baray, S. Baldy, J. Leveau, A. Hauchecorne A. Moorgawa et M. Michaelis, A case study of sporadic transport across the southern boundary of the tropical stratospheric reservoir, Proc. 2nd SPARC General Assembly, Mar del Plata, 2000.
- Posny, F., T. Portafaix, J.L., Baray, S. Baldy and J. Leveau, Measurement of vertical ozone distributions by radiosoundings at Reunion Island (southern tropics), Proc. Spring Meeting AGU, 2000.
- Denis, L., T. Portafaix, J. P. Pommereau, F. Goutail, A. Sarkissian, M. Bessafi, S. Baldy, J. Leveau, P.V. Johnston et A. Matthews, SAOZ total O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> at the southern tropics and equator, Proc. 3rd Europ. Symposium on Polar Ozone, EC Editor, 458-462, 1996.
- Goutail F., J.P. Pommereau, L. Denis, and T. Portafaix, Total ozone and NO<sub>2</sub> at the southern Tropics and Equator, Proc. 1st SPARC General Assembly, Melbourne, 1996.



## ANNEXE 2

### LISTE DES PUBLICATIONS SITEES DANS LE TEXTE

(Autres que celles où je suis co-auteur)

Bais, A. F., Tourpali, K., Kazantzidis, A., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Chipperfield, M. P., Dameris, M., Eyring, V., Garny, H., et al.: Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7533–7545, <https://doi.org/10.5194/acp-11-7533-2011>, 2011.

Bais, A. F., McKenzie, R. L., Bernhard, G., Aucamp, P. J., Ilyas, M., Madronich, S., and Tourpali, K. : Ozone depletion and climate change : Impacts on UV radiation., *Photochem. Photobiol. Sci.*, 14, 19 – 52, doi :10.1039/c4pp90032d, URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25380284>, 2015a.

Bais, A. F., McKenzie, R. L., Bernhard, G., Aucamp, P. J., Ilyas, M., Madronich, S., and Tourpali, K. : Ozone depletion and climate change : impacts on UV radiation, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 14, 19–52, doi :10.1039/C4PP90032D, URL <http://dx.doi.org/10.1039/C4PP90032D>, 2015b.

Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.*, 104, 30 937, <https://doi.org/10.1029/1999JD900445>.

Borchi, F., and A. Marenco, 2002: Discrimination of air masses near the extratropical tropopause by multivariate analyses from MOZAIC data. *Atmos. Environ.*, 36, 1123–1135, doi:10.1016/S1352-2310(01)00576-3.

Brognez, C., Auriol, F., Deroo, C., Arola, A., Kujanpää, J., Sauvage, B., Kalakoski, N., Pitkänen, M. R. A., Catalfamo, M., Metzger, J.-M., and et al. : Validation of satellite-based noontime UVI with NDACC ground-based instruments : influence of topography, environment and satellite overpass time, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 15 049–15 074, doi : 10.5194/acp-16-15049-2016, URL <http://dx.doi.org/10.5194/acp-16-15049-2016>, 2016.

Butler, A. H., Daniel, J. S., Portmann, R. W., Ravishankara, A. R., Young, P. J., Fahey, D. W., and Rosenlof, K. H. : Diverse policy implications for future ozone and surface UV in a changing climate, *Environmental Research Letters*, 11, 064 017, URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/11/i=6/a=064017>, 2016.

Butchart, N., The Brewer-Dobson circulation, *Rev. Geophys.*, 52, 157–184, <https://doi.org/10.1002/2013rg000448>, 2014.

Chipperfield, M., Dhomse, S., Feng, W. *et al.* Quantifying the ozone and ultraviolet benefits already achieved by the Montreal Protocol. *Nat Commun* 6, 7233 (2015)

Collins, W. J., Lamarque, J.-F., Schulz, M., Boucher, O., Eyring, V., Hegglin, M. I., Maycock, A., Myhre, G., Prather, M., Shindell, D., and Smith, S. J. : AerChemMIP : quantifying the effects of chemistry and aerosols in CMIP6, *Geoscientific Model Development*, 10, 585–607, doi :10.5194/gmd-10-585-2017, URL <https://www.geosci-model-dev.net/10/585/2017/>, 2017a.

Chirkov, M., Stiller, G. P., Laeng, A., Kellmann, S., von Clarmann, T., Boone, C. D., Elkins, J. W., Engel, A., Glatthor, N., Grabowski, U., Harth, C. M., Kiefer, M., Kolonjari, F., Krummel, P. B., Linden, A., Lunder, C. R., Miller, B. R., Montzka, S. A., Mühle, J., O'Doherty, S., Orphal, J., Prinn, R. G., Toon, G., Vollmer, M. K., Walker, K. A., Weiss, R. F., Wiegele, A., and Young, D.: Global HCFC-22 measurements with MIPAS: retrieval, validation, global distribution and its evolution over 2005–2012, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3345–3368, <https://doi.org/10.5194/acp-16-3345-2016>, 2016.

Corrêa, M. D. P., Godin-Beekmann, S., Haefelin, M., Bekki, S., Saiag, P., Badosa, J., Jégou, F., Pazmiño, A., and Mahé, E. : Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100., *Photochem. Photobiol. Sci.*, 12, 1053 – 1064, doi :10.1039/c3pp50024a, URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23549360>, 2013.

Dobber, M., Voors, R., Dirksen, R., Kleipool, Q., and Levelt, P. : The high-resolution solar reference spectrum between 250 and 550 nm and its application to measurements with the Ozone Monitoring Instrument, *Solar Physics*, 249, 281–291, 2008.

Engel, A., T. Möbius, H. Bönisch, U. Schmidt, R. Heinz, I. Levin, E. Atlas, S. Aoki, T. Nakazawa, S. Sugawara, F. Moore, D. Hurst, J. Elkins, S. Schauffler, A. Andrews, and K. Berine, Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years, *Nat. Geosci.*, 2, 28–31, doi:10.1038/GEO388, 2009.

Eckert, E., von Clarmann, T., Kiefer, M., Stiller, G. P., Lossow, S., Glatthor, N., Degenstein, D. A., Froidevaux, L., Godin-Beekmann, S., Leblanc, T., McDermid, S., Pastel, M., Steinbrecht, W., Swart, D. P. J., Walker, K. A., and Bernath, P. F.: Drift-corrected trends and periodic variations in MIPAS IMK/IAA ozone measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 2571-2589, <https://doi.org/10.5194/acp-14-2571-2014>, 2014.

Eyring, V., Chipperfield, M. P., Giorgetta, M. A., Kinnison, D. E., Manzini, E., Matthes, K., Newman, P. A., Pawson, S., Shepherd, T. G., and Waugh, D. W. : Overview of the new CCMVal reference and sensitivity simulations in support of upcoming ozone and climate assessments and the planned SPARC CCMVal report, *SPARC Newsl*, 30, 20–26, 2008.

Eyring, V., J.M. Arblaster, I. Cionni, J. Sedlacek, J. Perlwitz, P.J. Young, S. Bekki, D. Bergmann, P. Cameron-Smith, W. Collins, G. Faluvegi, K.-D. Gottschaldt, L. Horowitz, D. Kinnison, J.-F. Lamarque, D.R. Marsh, D. Saint-Martin, D. Shindell, K. Sudo, S. Szopa, and S. Watanabe, Long-term changes in tropospheric and stratospheric ozone and associated climate impacts in CMIP5 simulations, *J. Geophys. Res.*, 118 , 5029–5060, doi:10.1002/jgrd.50316, 2013.

Garny, H., Birner, T., Bönisch, H., and Bunzel, F.: The effects of mixing on age of air, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 7015–7034, 2014.

Godin, S., G. Mégie, and J. Pelon, Systematic Lidar measurements of the stratospheric ozone vertical distribution, *Geophys. Res. Letters*, 16, 547-550, 1989.

Hauchecorne A., S. Godin, M. Marchand, B. Heese and C. Souprayen, Estimation of the Transport of Chemical Constituents from the Polar Vortex to Middle Latitudes in the Lower Stratosphere using the High-Resolution Advection Model MIMOSA and Effective Diffusivity, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8289, 2002.

Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.- C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. of the Royal Society of London A: Math., Physical and Engineering Sciences*, vol. 454, no. 1971, pp. 903995, 1998.

Glatthor, N., Höpfner, M., Leyser, A., Stiller, G. P., von Clarmann, T., Grabowski, U., Kellmann, S., Linden, A., Sinnhuber, B.-M., Krysztofiak, G., and Walker, K. A.: Global carbonyl sulfide (OCS) measured by MIPAS/Envisat during 2002–2012, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 2631–2652, <https://doi.org/10.5194/acp-17-2631-2017>, 2017.

Hader, D.-P., Kumar, H. D., Smith, R. C., and Worrest, R. C.: Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 6, 267–285, <https://doi.org/10.1039/B700020K>, 2007.

Haynes, P., and E. Shuckburgh, Effective diffusivity as a diagnostic of atmospheric transport, 2. Troposphere and lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 105, D18, 22,795-22,810, 2000.

Hauchecorne, A., S. Godin, M. Marchand, B. Heese and C. Souprayen, Estimation of transport of chemical constituents from the polar vortex to mid-latitude in the lower stratosphere using the high resolution advection model MIMOSA and effective diffusivity, *J. Geophys. Res.* 2002.

Hauchecorne, A., M.L. Chanin, and P. Keckhut, Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33-37 km) as seen by Rayleigh lidar over the south of France, *J. Geophys. Res.* , 96, 15,297-15,309, 1991.

Hegglin, M. I. and Shepherd, T. G. : Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux, *Nature Geoscience*, 2, 687–691, doi :10.1038/ngeo604, URL <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo604>, 2009.

Holton, J.R., P.H. Haynes, M.E. McIntyre, A.R. Douglass, R.B. Rood, and L. Pfister, Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, 33, 403-439, 1995.

Kakani VG, Reddy KR, Zhao D, and Sailaja K (2003a) Field crop responses to ultraviolet-B radiation: A review. *Agric. For. Meteorol.* 120:191 – 218, 2003

Keckhut, P., A. Hauchecorne, and M.L. Chanin, Midlatitude long-term variability of the middle atmosphere: Trends and cyclic and episodic changes, *J. Geophys. Res.* 100, D9, 18,887-18,897, 1995.

Kirgis, G. (2008). Thèse de doctorat ‘Evaluation du transport isentropique à travers la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l’hémisphère sud’.

Lin, P. and Fu, Q. : Changes in various branches of the Brewer–Dobson circulation from an ensemble of chemistry climate models, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118, 73–84, doi :10.1029/2012JD018813, URL <http://dx.doi.org/10.1029/2012JD018813>, 2013.

Mahieu, E., Zander, R., Toon, G. C., Vollmer, M. K., Reimann, S., Mühle, J., Bader, W., Bovy, B., Lejeune, B., Servais, C., Demoulin, P., Roland, G., Bernath, P. F., Boone, C. D., Walker, K. A., and Duchatelet, P.: Spectrometric monitoring of atmospheric carbon tetrafluoride (CF<sub>4</sub>) above the Jungfraujoch station since 1989: evidence of continued increase but at a slowing rate, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 333–344, <https://doi.org/10.5194/amt-7-333-2014>, 2014.

Madronich, S. : *The Atmosphere and UV-B Radiation at Ground Level*, pp. 1–39, Springer US, Boston, MA, 1993.

McCusker, K. E., J. C. Fyfe, and M. Sigmond, 2016: Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss. *Nat. Geosci.*, 9, 838–842, <https://doi.org/10.1038/ngeo2820>.

McQueen, J. B., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. I, Statistics, Berkeley, California, pp. 281–297.

Nakamura, N., Two-dimensional mixing, edge formation, and permeability diagnosed in an area coordinate, *J. Atmos. Sci.*, 53, 11, 1524-1537, 1996

Neu, J. L., Sparling, L. C., Plumb, R. A., 2003. Variability of the subtropical edges in the stratosphere, *Journal of Geophysical Research*, 108(D15), 4482, 2003

Pelon, J., Distribution verticale de l'ozone dans la troposphère et la stratosphère: étude expérimentale par télédétection laser et application aux échanges troposphère-stratosphère, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1985.

Ploeger, F., M. Abalos, T. Birner, P. Konopka, B. Legras, R. Müller, and M. Riese, Quantifying the effects of mixing and residual circulation on trends of stratospheric mean age of air, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2047–2054, doi:10.1002/2014GL062927, 2015.

SPARC CCMVal: Neu, J. and Strahan, S.: Chapter 5. Transport, in: SPARC Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Models, edited by: Eyring, V., Shepherd, T. G., and Waugh, D. W., SPARC Report No. 5, WCRP-132, WMO/TDNo. 1526, <http://www.atmosphysics.utoronto.ca/SPARC> (last access: 19 September 2017), 2010.

Randel, W.J., and Thompson, A. M., Interannual variability and trends in tropical ozone derived from SAGE II satellite data and SHADOZ ozonesondes, *J. Geophys. Res.*, 116, D07303, doi: 10.1029/2010JD015195, 2011.

Sabburg, J. and Wong, J.: The effect of clouds on enhancing UVB irradiance at the earth's surface: a one year study, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (20), 3337–3340, 2000a.

Sabburg, J. and Wong, J.: Evaluation of a sky/cloud formula for estimating UV-B irradiance under cloudy skies, *J. Geophys. Res.*, 105(D24), 29 685–29 692, 2000b.

Serdyuchenko, A., Gorshelev, V., Weber, M., Chehade, W., and Burrows, J. : High spectral resolution ozone absorption cross-sections–Part 2 : Temperature dependence., *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6, 2014.

Stiller, G. P., Fierli, F., Ploeger, F., Cagnazzo, C., Funke, B., Haedel, F. J., Reddmann, T., Riese, M., and von Clarmann, T.: Shift of subtropical transport barriers explains observed hemispheric asymmetry of decadal trends of age of air, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 11177–11192, <https://doi.org/10.5194/acp-17-11177-2017>, 2017.

Tanskanen, A., Lindfors, A., Määttä, A., Krotkov, N., Herman, J., Kaurola, J., Koskela, T., Lakkala, K., Fioletov, V., Bernhard, G., and et al. : Validation of daily erythemal doses from Ozone Monitoring Instrument with ground-based UV measurement data, *Journal of Geophysical Research*, 112, doi :10.1029/2007jd008830, URL <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD008830>, 2007.

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., and Rose, S. K. : The representative concentration pathways : an overview, *Climatic Change*, 109, 5, doi :10.1007/s10584-011-0148-z, 2011.

Wu, Z., and N. E. Huang, Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Adv. Adapt. Data Anal.*, vol. 1, no. 1, pp. 141, 2009.

Wu, Yutian, and Lorenzo M. Polvani, Recent Trends in Extreme Precipitation and Temperature over Southeastern South America: The Dominant Role of Stratospheric Ozone Depletion in the CESM Large Ensemble, *Journal of Climate* 30.16, 2017

Wright, C.Y., Colette Brogniez, Katlego P. Ncongwane, Venkataraman Sivakumar, Gerrie Coetzee, Jean-Marc Metzger, Frédérique Auriol, Christine Deroo and Beatrice Sauvage, Sunburn Risk Among Children and Outdoor Workers in South Africa and Reunion Island Coastal Sites, *Photochemistry and Photobiology*, 2013, 89: 1226–1233, 2013.

WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project, Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2018

**ANNEXE 3**  
**ENCADREMENT DE THESE**

**Thèses soutenues**

**1. Guillaume Kirgis - (2005-2008)**

**« Evaluation du transport isentropique à travers la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l'hémisphère sud »** - financement région Réunion.

Cette thèse est consacrée à l'évaluation des échanges entre le réservoir tropical et les moyennes latitudes au travers de la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l'hémisphère sud. La stratégie consiste à reconstituer le transport sur des surfaces isentropes avec le modèle d'advection de contours à haute résolution MIMOSA. Ce modèle a été alimenté par les champs de vorticité potentielle calculé sur 26 années consécutives (1980-2005) à partir des champs de vents et de température du modèle européen ERA-40. L'algorithme DYBAL a calculé l'intensité des barrières dynamiques (barrière subtropicale et vortex polaire) et du mélange. Couplé à l'algorithme des *k-moyennes*, il a permis la détection en coordonnées géographiques de la position des barrières et donc le calcul de l'extension méridienne des réservoirs stratosphériques. Cet algorithme a également été utilisé pour reconstituer les épisodes filamentaires caractéristiques du transport isentropique. Enfin, la perméabilité de la barrière subtropicale a été évaluée par le suivi des échanges et les routes privilégiées de ces échanges ont été mises en évidence. L'implication de ces événements sur le transport de l'ozone a été estimée ainsi que l'influence de l'oscillation quasibiennale (QBO) et du cycle solaire de 11 ans. Les résultats présentent la variabilité dynamique de la stratosphère sur l'isentrope 600 K et montrent une augmentation de la taille du réservoir tropical et des moyennes latitudes en correspondance avec le rétrécissement du vortex polaire. Une diminution de l'intensité des échanges à travers la barrière dynamique subtropicale depuis les années 1980 est également mise en évidence.

**MOTS-CLE**

Stratosphère ; barrières dynamiques ; transport isentropique ; réservoir tropical ; ondes planétaires ; algorithme des k-moyennes ; advection de contours ; QBO ; cycle solaire de 11 ans

**2. Mohamed Tohir Abdoulwahab (2013-2016)**

**« Etude de la variabilité et du transport de l'ozone stratosphérique au-dessus de l'Afrique du Sud et l'océan Indien »**, financement région Réunion.

L'ozone joue un rôle primordial sur l'équilibre photochimique de l'atmosphère et participe au processus d'équilibrage radiatif entre les deux hémisphères (Mecke, 1931). Dans la troposphère, l'ozone détermine la capacité oxydante de la majorité des gaz et absorbe continuellement dans la stratosphère les radiations ultraviolettes nocives (McMicheal et al., 2003). D'où l'intérêt de surveiller la variation de la couche d'ozone de façon régulière. Il a été constaté au début des années 80, une diminution inquiétante et progressive de la colonne totale de l'ozone dûe aux émissions anthropiques des substances riches en chlore, brome et fluore. Ce constat a conduit au Protocole de Montréal en 1987 dont l'objectif est de mettre en place une politique internationale visant à réduire les émissions des substances appauvrissant l'ozone. Dix ans après la signature du dit Protocole, la concentration de ces substances commence à diminuer dans l'atmosphère et la prospection d'un recouvrement progressif de la couche d'ozone demeure aujourd'hui un sujet d'actualité (UNEP/PNUÉ, 2009; WMO/OMM, 2010 et 2014). Les besoins d'aujourd'hui sont de réaliser des mesures continues et fiables de l'ozone dont leurs exploitations dans des méthodes et/ ou des modèles bien adaptés à la problématique aideront la communauté à suivre l'évolution de l'ozone et d'estimer les tendances à long terme. Dans ce travail, une variété de produits d'ozone issue de différents instruments a été combinée pour construire des bases des données fiables et homogènes afin d'étudier sa variabilité et d'estimer la tendance de l'ozone dans les régions tropicale et subtropicale sud. L'application de ces bases de données sur les ondelettes a permis d'identifier les principaux forçages qui contrôlent la variabilité de l'ozone et la période de retour associée à chaque forçage. Il s'agit des variations saisonnières du climat, les oscillations quasi-biennales, les oscillations australes El-Niño et l'activité solaire dont le cycle moyen est évalué à 11ans. Le comportement et l'influence de chacun de ces paramètres sur la viabilité de l'ozone sont étudiés. Cette étude est faite en s'appuyant sur des méthodes statistiques et sur le modèle Trend-Run. Avec ce modèle, la part de contribution et la réponse de chaque paramètre sur la variabilité de l'ozone sont quantifiées. Les résultats sur les tendances montrent une augmentation de la couche d'ozone avec un taux variant entre 0 et 2.78% par décennie (selon la région et le site) sur la période 1998-2012. Cette amélioration est bien observée au-dessus de 22km, surtout aux subtropiques par rapport à la région équatoriale.

**MOTS-CLE**

Ozone stratosphérique – variabilité – tendance – QBO – ENSO – cycle solaire – hémisphère sud – Trend-Run.

### 3. Kevin Lamy (2015 –2018)

**« Impact de la variabilité dynamique de l’ozone stratosphérique sur le rayonnement UV à la Réunion et dans l’Océan Indien Occidental », financement Région Réunion.**

Suite à la signature du Protocole de Montréal en 1987, la concentration atmosphérique des substances destructrices d’ozone (ODS) est en baisse. La couche d’ozone montre des signes de récupération (Morgenstern et al. 2008a). Toutefois, l’émission des gaz à effet de serre (GHG) est en augmentation et devrait affecter au cours du 21ème siècle la distribution et les niveaux d’ozone dans l’atmosphère terrestre. En particulier, la modélisation du climat futur montre des signes d’accélération de la circulation de Brewer-Dobson transportant l’ozone de l’équateur vers les pôles. L’ozone est un constituant chimique important de l’atmosphère. Bien que nocif dans la troposphère, il est essentiel à la vie sur Terre grâce à sa capacité d’absorption d’une grande partie du rayonnement ultraviolet (UV) provenant du Soleil. Des modifications dans sa variabilité temporelle ou géographique impliqueraient des changements d’intensité du rayonnement UV à la surface de la Terre (Hegglin et al. (2009), Bais et al. (2011)). Le rayonnement UV à la surface affecte toute la biosphère. Les interactions entre rayonnement UV et écosystèmes terrestres et aquatiques sont nombreuses. Ces interactions ont des effets sur les cycles biogéochimiques et engendrent des rétroactions positives et négatives sur le climat (Erickson III et al., 2015a). La capture du CO<sub>2</sub> atmosphérique par photosynthèse des plantes terrestres en est un exemple (Zepp et al., 2007a). Dans l’océan la pompe biologique du CO<sub>2</sub> par la photosynthèse du phytoplancton est aussi directement affecté par la variabilité du rayonnement UV (Hader et al., 2007a). Pour l’homme le rayonnement UV est nécessaire car il participe à la photosynthèse de la vitamine D (Holick et al., 1980), mais une surexposition à des niveaux d’intensité élevés du rayonnement UV est la cause principale du développement de cancer de la peau (Matsumura and Ananthaswamy, 2004). L’objectif de ce travail de thèse est d’analyser l’évolution possible du rayonnement UV au cours du 21ème siècle, en particulier aux tropiques sud, dans le cadre des modifications climatiques attendues. Une première partie de ce travail consiste à modéliser le rayonnement UV en ciel clair dans les tropiques grâce au modèle TUV (Madronich et al., 1998) et à comparer les résultats aux mesures sols réalisées à la Réunion. Cette première partie permet l’utilisation future du modèle aux tropiques avec un bon niveau de confiance. La sensibilité du modèle de transfert radiatif en fonction de différents paramètres d’entrée est analysée (section efficace d’absorption de l’ozone, spectre extraterrestriel du soleil, ...). Les sorties du modèle sont ensuite validées à partir de mesures UV spectral au sol obtenues grâce à un spectromètre BENTHAM DM300n. Un filtrage ciel-clair des données au sol est opéré à partir de mesures de flux et de l’algorithme de Long and Ackerman (2000). 167 168 RÉSUMÉ Les projections climatiques des indices UV (Mc Kinlay and Diffey, 1987) sont réalisées par la suite. Pour cela, on utilise les sorties de plusieurs modèles



de Chimie-Climat participant à l'exercice d'inter-comparaison CCMI (Chemistry Climate Model Initiative), couplées aux modèle TUV, validé en première partie dans les tropiques. L'exercice CCMI consiste à projeter le climat et la chimie Terrestre jusqu'en 2100 selon différents scénarios. Ces sorties décrivant la chimie et physique de l'atmosphère servent d'entrée au modèle de transfert radiatif, on obtient alors le rayonnement UV jusqu'en 2100 pour différents scénarios. Une première analyse comparative de l'UV obtenue pour quatre scénarios d'émissions (RCP2.6/4.5/6.0/8.5, Meinshausen et al., 2011) est effectuée. La fin du travail consiste à étudier l'impact des ODS, GHG et aérosols sur l'évolution du rayonnement UV au cours du 21ème siècle, avec un focus particulier sur les tropiques de l'hémisphère sud.

### **MOTS-CLE**

Rayonnement ultraviolet ; ozone ; tropiques ; climat ; aérosols ; projection climatique ; modélisation ; chimie de l'atmosphère ; transfert radiatif, changement climatique

### **Thèses en cours :**

#### **4. Jean-Maurice Cadet (oct 2016 - 2020)**

« **Impact des rayonnements UV sur la santé en zone tropicale sud** », financement Région Réunion

Les causes potentielles de l'augmentation des cancers de la peau sont nombreuses. Parmi celles-ci on peut citer les changements comportementaux ou les modifications de l'intensité des rayonnements ultraviolets (UV) à la surface, en réponse aux perturbations de paramètres environnementaux (ozone stratosphérique, nébulosité, aérosols, réflectivité) dues au changement climatique ou aux activités anthropiques. Le rayonnement UV est l'une des composantes majeures du rayonnement solaire transmise à la Terre au travers de l'atmosphère. Compte tenu de leur position géographique, les régions tropicales reçoivent le maximum de rayonnements solaire incident et donc d'UV. Ces régions et leurs populations sont très exposées, du fait de plusieurs facteurs dont la démographie, les habitudes d'activités en extérieur et du fait qu'elles reçoivent un rayonnement UV très intense, le plus intense comparativement aux autres régions du globe. En effet, l'indice UV mesuré aux latitudes tropicales en été est 2,5 fois supérieur à celui de l'été européen.

La mesure précise de l'intensité du rayonnement ultraviolet est donc primordiale. Un des objectifs de ce travail a été l'évaluation de la qualité de différents instruments permettant cette mesure. Un réseau Sud-Africain de 6 instruments de type UV-Biometer a été comparé au satellite OMI. Bien que la mesure UV par satellite soit connue pour surévaluer (~10%) le rayonnement UV de surface, une calibration et un suivi régulier des instruments sont nécessaire

(cadet et al., 2017). Aussi, différents types d'instruments mesurant l'UV au sol a été comparé à un instrument de référence. Une très bonne qualité et stabilité de mesure a été trouvé.

Dans un contexte de changements climatiques, une étude de tendance a été faite à partir de la base de données UV de la Réunion. Malgré la taille réduite de la base de données, 10 ans, une tendance claire d'augmentation a été trouvée. Cette augmentation peut être due à un changement d'ozone, via l'accélération de la circulation de Brewer-Dobson ou encore à un changement de nébulosité, liée à l'augmentation de la température des océans en région tropicale.

Enfin, il a été réalisé des mesures d'exposition dans des lieux où la population a tendance à s'exposer et où l'intensité du rayonnement est très élevée, en altitude par exemple. La Réunion étant une île montagneuse connue pour ses nombreuses possibilités de randonnées, l'estimation de l'exposition UV est donc très importante. De ce fait, une mesure d'exposition a été réalisée sur un sentier de randonnée fréquentée, le Maïdo-Grand Bénare. Réalisée en 7h de marche, il a été mesuré plus de 60 doses standards d'UV (60 SED). Le même exercice réalisé à Table Mountain, Cape Town, a relevé 40 SED (Cadet et al., 2019). Les doses maximales avant érythème étant de l'ordre de 2 à 20 SED selon le phototype, il en ressort clairement l'importance de la protection des populations ainsi que la nécessité de campagne de prévention sur le risque UV.

#### **MOTS-CLE**

Rayonnement ultraviolet ; mesures ; tropiques ; climat ; aérosols ; santé ;

### **5. Loua Renée Tatou (oct 2016, en cours)**

**« Variabilité et changement des structures dynamiques et thermiques par observations (sol et satellite) et modélisation numérique : interaction troposphère-moyenne atmosphère »**

Le système climatique terrestre est un système interactif et complexe. Du fait de sa sensibilité et de son action, l'atmosphère est la composante de ce système. En effet, l'atmosphère est le milieu le plus rapidement affecté par des perturbations des équilibres de notre environnement, qu'elles soient d'origines naturelles ou anthropiques.

L'atmosphère terrestre est structurée verticalement en fonction du gradient de température. La moyenne atmosphère – stratosphère et mésosphère- est une région de transition qui recouvre une large gamme d'altitude. Elle fait lien avec la troposphère et la thermosphère. La moyenne atmosphère (MA) se trouve ainsi soumise à une action conjuguée du changement climatique, du fait des activités anthropiques et de la variabilité naturelle. L'augmentation dans la troposphère des concentrations des gaz à effet de serre induit un réchauffement global dans la troposphère et un refroidissement global dans la MA. Nous proposons dans ce sujet de thèse

d'examiner la variabilité des structures thermiques et dynamique dans différentes couches de la troposphère et de la moyenne atmosphère. Comme objectif, il s'agit d'analyser et de quantifier les contributions de différents forçages, d'étudier les interactions entre les différentes couches et, de calculer et analyser les variabilités saisonnières et les tendances observées.

Les données météorologiques de 12 stations météorologiques en Guinée pour la période 1960 à 2016, les données ERA-Interim de température, de vent à différents niveaux de pression et de pluie de 1979 à 2016 pour la région de l'Afrique de l'Ouest, les données satellites MLS/Aura et SABER/TIMED, les données radiosondages ballon du réseau Wyoming de 1960 à 2016 sont utilisées. Dans le cadre de cette recherche, l'évaluation des outils de modélisation numérique est prise en compte.

## **6. Bibiana Culo Lopez (2019-2021)**

« **Characterization of UV variability in Southern Space Observatory region – Brazil** », thèse en co-tutelle avec l'université de Santa Maria au Brésil.

The main goal of this study is to obtain a characterization of the variability of UV in the region of the Southern Space Observatory, located in São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul - Brazil (29.4° S, 53.8° O). The ground measurements were done with a Brewer spectrophotometer MKIII #167 (Kipp & Zonen Inc.) which measures a series of variables such as ozone total column, SO<sub>2</sub> total column, Vertical profile of O<sub>3</sub> through the Umker method, stratospheric and tropospheric column NO<sub>2</sub>, total optical thickness and the most relevant measurement for the project is the UV radiation, in a spectral range from 286.5 nm to 363 nm, each 5 nm, it can also provide spectral distribution of the ground incident radiation. The data series ranges from the year of 1994 to 2017 and it refers to daily measurements of UV index and UV-B total column, mostly in the spectral range of 280 nm to 400 nm. Some of the main steps that will be followed by this study are UV data validation and modeling, which includes collecting the data and process in the software of the instrument, and the climatology, to obtain UV Index averages. In order to identify anomalies in the data, the wavelet method will be used. The data collected and processed will be compared to the cloud cover data set of each day analyzed, and also compared to the data from the model used. The analysis of UV during events of secondary effects of ozone hole was designated as a secondary goal of the project.

## ANNEXE 4 : INNOVATION ET VALORISATION PAR LE NUMERIQUE

1/ Innovation pédagogique : Réalisation d'une visite virtuelle et pédagogique de l'observatoire atmosphérique du Maito : <http://osur.univ-reunion.fr/observations/osu-rstations/opar/visite-virtuelle-de-lobservatoire-du-maito/> - financement OSUR – 6 mois IE BAP E- 2015 – Partie du projet IMMEX3D d'immersion en temps réel : <http://immersion.univ-reunion.fr/>

2/ Écriture et réalisation (tournage, post-production, coordination scientifique) de plus de 12 films documentaires scientifiques, dont 6 films de valorisation de la recherche au LACy, en partenariat avec le Service Audiovisuel et Multimédia de l'UR. Parmi les plus récents et films en cours

- 'Plumes of Piton de la Fournaise' présentation officielle à EGU 2017, film sur aux aléas liés aux panaches volcaniques à la Réunion et les recherches menées dans le programme ANR STRAP (13', 2017). Supplément à article ACP Tulet et al., 2017.  
<https://www.youtube.com/watch?v=svGidSVCXIo&index=37&list=PLJnvUWYNCYAbuFvgb1MQsAG-V0ZGukPAD>
- 'Observatoire du Maito, sentinelle du climat', sélection festival film scientifique de la Réunion (2017, 13')  
<https://www.youtube.com/watch?v=Pong7pJC9pE&index=40&list=PLJnvUWYNCYAbuFvgb1MQsAG-V0ZGukPAD>
- 'Piton de la Fournaise - Etna : Plumes de volcan' (30', 2019) : Ce film suit une équipe internationale et pluridisciplinaire de scientifiques, engagées dans un projet de grande envergure (STRAP : Transdisciplinary Synergy to Respond to Aleas related to Volcanic Plumes) destiné à étudier les panaches de moindre intensité, Sélection officielle au festival national ANTSIA 2019.  
<https://lacy.univ-reunion.fr/production/films-multimedia/plume>
- En cours 'Le risque cyclonique à la Réunion' (52' autour du projet RenovRisk en partenariat avec l'équipe cyclones du LACy et Météo France), financement FEDER interreg5, démarrage 2017, livraison 2020.

## ANNEXE 5 ACRONYMES

ACL : A Comité de Lecture  
AerChemMIP : Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project  
AOD : Aerosol Optical Depth  
ARSAIO : Atmospheric Research in Southern Africa and Indian Ocean  
ANR : Agence Nationale de la Recherche  
BDC : Brewer Dobson Circulation  
DIAL : Differential Absorption Lidar  
CAc : Conseil Académique  
CCMI : Chemistry-Climate Model Initiative  
COPIL : COmité de PILotage  
DFA : Detrended Fluctuations Analysis  
DyBal : Dynamical Barrier Location code  
ECC : Electrochemical Concentration Cell  
ESR : Enseignement Supérieur et Recherche  
EMD : Empirical Mode Decomposition method  
ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts  
ENSO : El Nino and Southern Oscillations  
EWT : Empirical Wavelet Transform  
FEDER : Fonds européen de développement régional  
FST : Faculté des Sciences et Technologies  
FTIR : Fourier Transform InfraRed spectroscopy  
GAW : Global Atmospheric Watch  
GDRI : Groupement de Recherche International  
GES : Gaz à Effet de Serre  
HCERES : Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur  
IASI : Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge  
IMF : Intrinsic Mode Function  
INSU : Institut National des Sciences de l'Univers  
IOGA : Institut de Géophysique d'Antananarivo  
IUV : Indice UV  
K&Z : Kipp et Zonen  
LEFE : Les Enveloppes Fluides et l'Environnement  
LIA : Laboratoire International Associé  
LMD : Licence-Master-Doctorat  
M2 : Master 2eme année  
MORGANE : Maïdo ObservatoRy Gaz and Aerosols NDACC Experiment  
MNT : Modèle Numérique de Terrain  
NDACC : Network for the Detection of Atmospheric Composition Change  
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration  
ODS : Ozoneing Substance  
OHP : Observatoire de Haute Provence  
OMM : Organisation Météorologique Mondiale  
OMS : Organisation Mondiale de la Santé  
OPAR : Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion  
OMNCG : Observations des Milieux Naturels et des Changements Globaux  
ORS : Observatoire Réunionnais de la Santé  
PI : Principal Investigator  
PNT : Prévision Numérique du Temps  
PV : Potential Vorticity  
QBO : Quasi Biennial Oscillation

RAMI : Risques nAturels en Milieu Insulaire  
RCP : Representative Concentration Pathway  
R-NET : Risques Naturels en Environnement Tropical  
RST :Réservoir Stratosphérique Tropical  
RUV : Rayonnement UV  
SAOZ : Système d'Analyse par Observation Zénithal  
SHADOZ : Southern Hemisphere Additional Ozonesonde  
SOOI : Sud-Ouest de l'Océan Indien  
SPARC : Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate  
SZA : Solar Zenith Angle  
TRN : Télédétection et Risques Naturels  
TUV : Trospospheric Ultraviolet Model  
TOC : Total Ozone Column  
UNT : Université Numérique Thématique  
UMR : Unité Mixte de Recherche  
UN : United Nations  
UR : Université de la Réunion  
UTLS ; Upper Troposphere and Lower Stratosphere  
VAT : Volontaire à l'Aide Technique  
WCC : World Calibration Center  
WOUDC : World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre

## ANNEXE 6 ABSTRACT

In the General Introduction (Chapter 1), a chronological summary of T. Portafaix's career is presented. Mr. Portafaix's research activity took place during 2 distinct periods separated by a period of approximately 5 years during which Mr. Portafaix was, in particular, assigned to the Ministry of Foreign Affairs on a mission to support for the Research and higher education system in Burkina Faso.

The description of the research work is divided into 3 chapters. Chapter 2 describes the instrumental activities. The focus is on the responsibility of the DIAL stratospheric ozone lidar of the Maïdo observatory, and also on the creation and management of a measurement network in the Indian Ocean (UV-Indien) involving 5 countries, 8 measurement stations, and 17 instruments. Chapter 3 is dedicated to the analysis of stratospheric ozone trends in Reunion Island and the southern tropics. Different methods and tools for measurement analysis have been developed and are presented here. These include the DyBal code and the K-Means algorithm for detecting stratospheric transport barriers. For trend studies, various methods were explored at LACy and applied to long observation series. Recently, the EMD (Empirical Model Decomposition) method has allowed the signal to be decomposed into its significant components without prior knowledge of proxies. Chapter 4 presents research on the variability of ground-based UV radiation in tropical regions. This chapter presents the elements that control the diurnal variability of the UVR and also the future trends of this radiation in the tropics, as a result of climate change and the acceleration of the Brewer-Dobson circulation.

Chapter 5 presents the conclusions and perspectives of the research themes presented above, both on the dynamic aspect of the stratosphere and the study of the expansion of the tropical reservoir, and also on the theme of UV radiation on the scale of the Indian Ocean.

This thesis attempts to show the coherence between the involvement in instrumental matters (with the scientific responsibility of various instruments or measurement networks) and research activities relating to the evolution of ozone and ultraviolet radiation in the southern tropical region. The first axis of activity provides the second with dedicated data and measurements. At the same time, many original data analysis tools or methods have been developed.