LACy – UMR 8105
Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones

ANNEXE 5 -
Bilan scientifique 2013 - 2018

SOMMAIRE

I – Bilan général **4**
II – Le bilan de l'équipe Troposphère **6**
1) Le contexte 6
2) Bilan global de l'équipe 7
3) Variabilité de la vapeur d'eau, mécanismes et processus de la composition de la haute troposphère tropicale 8
A) Variabilité de la vapeur d'eau et inversion thermique dite "des alizés" 9
B) Echanges stratosphère-troposphère 13
C) Processus convectifs et composition de la haute troposphère 16
4) Physico-chimie de la troposphère tropicale 19
A) Impacts des COV et halogènes marins sur la physico-chimie troposphérique 20
B) Formation de nouvelles particules (nucléation, aérosols marins) 22
5) Panaches volcaniques 25
III – Le bilan de l'équipe Cyclones **29**
1) Le contexte 29
2) Bilan global de l'équipe 30
3) Changement d'intensité des cyclones tropicaux 31
A) Interaction avec un thalweg d'altitude 31
B) Ondes de gravité 33
4) Couplage océan-atmosphère 36
A) Apport d'un modèle océanique 3D pour la modélisation des cyclones tropicaux 37
B) Apport du couplage avec un modèle de vagues 38
5) Etude des systèmes convectifs de moyenne échelle 40
A) Variabilité spatio-temporelle des précipitations à La Réunion 41
B) Signature électrique des systèmes convectifs 46
6) Climatologie des cyclones du Sud-Ouest de l'Océan Indien 51
7) Outils d'aide à la prévision 54
A) Cyclade 54
B) Outils statistico-dynamiques pour la prévision d'intensité des cyclones du Sud-Ouest de l'Océan Indien 55
C) Weather-3D : applicatif de visualisation interactive en trois dimensions d'informations météorologiques via les navigateurs WebGL 57
IV – Le bilan de l'équipe Stratosphère **58**
1) Le contexte 58
2) Bilan global de l'équipe 60
3) Composition et transport des aérosols 61
4) Ondes et dynamique de la moyenne atmosphèrique 65
5) Variabilité de l'ozone et des rayonnements UV dans l'Océan Indien 68
A) Mesures et variabilité de l'ozone stratosphérique par lidar DIAL 69
B) Mesures, variabilité et tendance de l'ozone total 70
C) Mesure et variabilité des rayonnements UV (RUV) 70
V – Les thématiques transverses **73**
1) Interaction aérosols-nuages 73
2) Coopérations régionales Océan Indien et hémisphère Sud 76
A) Coopération hémisphère sud 76
B) Formation par la recherche 78

VI – Le bilan du LACy en observation atmosphérique 80
VII – Le bilan du LACy en modélisation numérique 92
1) AROME 92
2) Meso-NH 96
A) Modélisation des systèmes dépressionnaires tropicaux .. 97
B) Amélioration de la microphysique dans le modèle Meso-NH 98
C) Modélisation des COVB/couplage MEGAN dans SURFEx 99
D) Modélisation des panaches volcaniques..... 99
3) FLEXPART..... 100
A) Outils de prévision pour optimiser la stratégie de mesures de l'OPAR : FOOT (FLEXPART cOnvective Outflow prediction Tool) 101
B) Modélisation Lagrangienne à mésoéchelle : couplage FLEXPART-AROME 101
VIII – Références bibliographiques 102

I - Le bilan général

Entre 2013 et 2018, l'essor et l'évolution scientifique du LACy ont été très importants. Si ces résultats sont corrélés au développement de l'OPAR[1] et à l'accès aux ressources en calcul scientifique de Météo-France, ils reposent avant tout sur la volonté des chercheurs et agents du laboratoire de s'ouvrir sur des partenariats scientifiques solides à travers des collaborations scientifiques de haut niveau. Le LACy est aujourd'hui intégré dans le paysage national et est parfaitement reconnu dans son domaine de spécialité. Cette reconnaissance a permis au LACy de participer à de nombreux programmes de recherche en lien avec l'étude de l'atmosphère tropicale et des cyclones. Il a également été à l'initiative de plusieurs grands programmes comme ReNovRisk, ARSAIO, STRAP, OCTAVE ou MORGANE.

Durant le dernier contrat, le LACy a été impliqué dans une cinquantaine de programmes de recherche collaboratifs représentant 3.15 M€ de budget (5 ANR, 1 BRAIN-Be, 3 FEDER, 2 CPER, 3 INTER-REG5, 5 LEFE et 12 OMNCG[2],…). Il a également participé à 18 campagnes d'observation, dont la moitié intégrant un partenariat international. Ces chiffres sont à mettre en rapport avec la taille modeste du laboratoire et les données du contrat précédent (2008-2013), au cours duquel il n'y avait eu aucune campagne d'observation significative et seulement 210 k€ de contrats de recherche. Cette tendance devrait s'accentuer prochainement à travers le programme ReNovRisk et l'implication importante du laboratoire en tant que partenaire dans trois projets de recherche H2020 déposés en 2018 (EUNICE, FILIA et Jules Vernes project).

En termes de production scientifique dans les revues à comité de lecture (ACL), le LACy affiche une production de 106 articles entre le 1er Janvier 2013 et Avril 2018, soit une moyenne de 20 ACL par an. Cela représente une augmentation significative vis-à-vis du précédent contrat qui affichait une moyenne de 13 ACL par an. La moyenne par temps plein chercheur (les enseignants-chercheurs hors CNAP sont comptés à 50% d'activité recherche), représente une co-rédaction d'articles par les chercheurs du LACy à 3.21 ACL.an-1.ETP-1 contre 1.89 ACL.an-1.ETP-1 lors du précédent contrat. Cette production est globalement bien équilibrée entre les trois équipes du laboratoire (28 ACL pour l'équipe "Stratosphère", 41 ACL pour l'équipe "Troposphère" et 42 ACL pour l'équipe "Cyclones"), ce qui est cohérent rapporté aux tailles caractéristiques de chacune des équipes.

Le positionnement du LACy s'est également fortement accru dans la structuration nationale au sein des réseaux et des infrastructures de recherche comme ACTRIS-FR. On notera par exemple l'observatoire du Maïdo devenu un site éligible aux programmes Européens TNA d'ACTRIS et d'ENVRI+. En plus de sa participation historique au réseau NDACC/SHADOZ, aux SNO[3] NDACC, RAMCES-ICOS et PHOTONS-AERONET, le LACy coordonne la participation de l'OPAR dans le SNO CLAP et porte avec l'OSU-R[4] la candidature de l'OPAR comme site GAW global.

---

1 *Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion*
2 *Observatoire des Milieux Naturels et des Changements Globaux*
3 *Service National d'Observation*
4 *Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion*

Le LACy est un laboratoire pilote dans les coopérations regionales sur l'océan Indien. En atteste son rôle de coordinateur dans le GDRI[5] ARSAIO qui va se transformer en LIA[6] en 2019, et le développement de ses partenariats dans le cadre des programmes INTER-REG5 UV-Indien et ReNovRisk. Le LACy a également porté l'école d'été Maïdo Observing Summer School (2016) et le college doctoral RAMI (2013-2014) en s'appuyant sur son réseau dans la sous-région de l'ouest de l'océan Indien.

Dans le domaine de la modélisation numérique, l'ouverture de l'équipe "Cyclones" sur des partenariats solides (i.e. LOPS, LA, CNRM, LOA, LMD, CRC), couplée à l'organisation de thématiques transverses entre les équipes "Cyclones" et "Troposphère" ont permis au LACy d'occuper une position avant-gardiste et originale dans les domaines du couplage océan-vague-atmosphère et de la modélisation des interactions aérosols-nuages-rayonnement-électricité. Le LACy a également joué un rôle moteur dans le développement et la mise en opérationnel du modèle AROME-Indien, déployé en opérationnel par Météo-France en mars 2016.

Près de 50% des chercheurs titulaires du LACy sont des enseignants-chercheurs (E-C) de l'Université de La Réunion rattachés à la section 37 du CNU. Mis à part J. Brioude (décharge partielle lié au co-financement CNRS) et T. Portafaix (pour raison médicale), les E-C du LACy dispensent des services d'enseignement complets à 100%. Leurs activités pédagogiques (sous forme de cours magistraux, de travaux dirigés et de travaux pratiques) officiellement reconnues et déclarées sur leurs fiches de service, concernent les niveaux L et M.

En plus de leur service d'enseignement, certains E-C assurent également des responsabilités de filières ou de spécialités. Sur la période d'évaluation, N. Bègue est le directeur adjoint du département de physique et responsable pédagogique du L2 Physique, T. Portafaix est responsable pédagogique de la spécialité Atmosphère dans le master RNET, H. Bencherif a été responsable de la mention Géosphère et des spécialités Atmosphère et TRN (télédétection et risques naturels, 2012-2015) et F. Posny a été responsable pédagogique de la L3 physique.

Il est à noter que les E-C sont aussi engagés dans l'élaboration de nouvelles formations au sein de l'Université de la Réunion. N. Bègue est ainsi impliqué dans le développement de la licence sciences pour la santé (dont l'ouverture est prévue à la rentrée de septembre 2018) tandis que H. Bencherif et T. Portafaix coordonnent le dossier et la maquette pédagogique du M2 atmosphère pour la rentrée de septembre 2019. Le LACy a également organisé l'école d'été Maïdo Observatory Summer School (MOSS, 2016) et a porté le collège doctoral RAMI (2013-2018) en s'appuyant sur son réseau dans la sous-région de l'ouest de l'océan Indien.

Enfin, les chercheurs du LACy participent activement à la formation par la recherche, notamment par l'accueil de stagiaires de Master, d'élèves ingénieurs et par l'encadrement de thèses de doctorat. Sur la période 2014-2018, les équipes du LACy ont ainsi accueilli 46 stagiaires de Master 1 et 2 et engagé 14 thèses, parmi lesquelles 3 ont déjà été soutenues et 3 le seront en 2018.

Trois HDR ont également été soutenues durant la période quinquennale (C. Barthe en 2013 ; O. Bousquet en 2014 et A. Rechou en 2016) et deux soutenances sont prévues en 2018 (T.

5 Groupement De Recherche International
6 Laboratoire International Associé

Portafaix et J. Brioude). Cela portera le total à 10 HDR au LACy, soit 60 % des chercheurs permanents.

Le LACy participe également de manière conséquente aux instances de pilotage mises en place par les tutelles. Au sein de l'université de La Réunion, le LACy est impliqué dans le conseil plénier des directeurs de composantes (P. Tulet, J.-P. Cammas), dans le conseil académique (T. Portafaix) et dans l'école doctorale STS (P. Tulet puis C. Barthe).

Au sein de Météo-France, P. Tulet et O. Bousquet sont membres du conseil de la Recherche. O. Bousquet est également membre du conseil des responsables de division de la DIROI.

Au niveau des institutions scientifiques, H. Bencherif est membre de la commission régionale d'expert (CRE) de l'AUF (agence universitaire de la francophonie), coordinateur du LIA ARSAIO et directeur de l'école doctorale RAMI de l'AUF. S. Evan a été membre du comité scientifique "ondes de gravité" de SPARC (2013-2015). M-D. Leroux fait partie du comité d'expert sur l'atterrissage des cyclones (ETLP) auprès de l'OMM. T. Portafaix et V. Duflot font partis du NDACC lidar working group. P. Tulet est membre du comité d'organisation du SNO CLAP. Jean-Pierre Cammas est membre d'ACTRIS-PPP. O. Bousquet a été membre du radar steering committee de l'AMS[7] (2012-2014) et membre du comité scientifique radar européen (ERAD, 2010-2016). Beaucoup de chercheurs, BIATSS/ITA et doctorants du LACy participent à l'organisation de l'OSU-R en étant élus du conseil scientifique ou du conseil administratif.

Au niveau administratif le LACy s'est doté d'un règlement intérieur et d'un livret d'accueil synthétisant les règles et usages du laboratoire. Ces documents sont fournis à tout nouvel arrivant au laboratoire. Le laboratoire a fortement incité ses agents à passer une formation de sauveteur secouriste au travail, de manipulation des extincteurs et de serre-file; huit agents sont formés SST et trois sont guides et serre-files. Avant 2013, aucun agent n'était formé et n'assurait des fonctions de sécurité au travail. Un travail approfondi sur le document unique d'évaluation des risques (sur plate-forme dématérialisée DIGIRISK) a également été mené.

II - Le bilan de l'équipe Troposphère

1) Le contexte

L'équipe Troposphère s'intéresse aux processus atmosphériques qui conditionnent la composition de la troposphère subtropicale en gaz trace réactifs, en gaz à effet de serre et en aérosols à l'ouest de l'océan Indien. Le premier enjeu concerne le rôle de la composition chimique atmosphérique sur l'évolution du climat en lien avec la capacité oxydante de l'atmosphère (programmes IGAC[8] et NDACC[9]). Un deuxième enjeu se focalise sur l'étude des aérosols pour leurs propriétés radiatives, CCN[10] et IFN[11] et leurs effets sur la physique des

7 *American Meteorological Society*
8 *International Global Atmospheric Chemistry*
9 *Network for the Detection of the Atmospheric Composition Change*
10 *Cloud Condensation Nuclei*
11 *Ice-Forming Nuclei*

nuages et des précipitations (thématique transverse avec l'équipe Cyclones). Un troisième enjeu, plus restreint au contexte insulaire, tropical et volcanique, vise à étudier les circulations locales, la formation de nouvelles particules, l'oxydation des composés organiques volatils et la dispersion et la physico-chimie des panaches volcaniques.

Plus spécifiquement l'équipe troposphère s'est positionnée sur trois thèmes scientifiques durant le dernier contrat quinquennal.

Le premier thème est celui de la variabilité de la vapeur d'eau et des mécanismes et des processus dynamiques du transport modifiant la composition de la haute troposphère tropicale (TTL[12]).

Le deuxième thème scientifique de l'équipe s'intéresse aux émissions et aux transformations physico-chimiques de la basse troposphère tropicale qui regroupe l'action des aérosols naturels, marins, et anthropiques.

Le troisième thème scientifique de l'équipe Troposphère est celui de l'étude des panaches volcaniques.

L'ensemble de ces thèmes de recherche s'appuie sur le positionnement stratégique de La Réunion en bordure de la ceinture tropicale, sur la localisation pertinente de l'observatoire du Maïdo, sur la montée en puissance du parc instrumental de l'OPAR et des bases de données associées, sur l'organisation de campagnes intensives, ainsi que sur l'utilisation et le développement d'outils de modélisation numériques (eulériens et lagrangiens) pour identifier, étudier et quantifier les processus de transport et de transformation physico-chimiques en jeu.

2) Bilan global de l'équipe

L'équipe Troposphère regroupe (au 1er juin 2018) les personnels permanents suivants : trois MCF de l'UR, deux DR CNRS, deux CR CNRS, un phys.-adj. CNAP, et un IR CNRS BAP E à 50% (les autres 50% de cette IR étant sur l'équipe Cyclones). En termes de flux de personnels permanents entre le 1er janvier 2013 et le 1er juin 2018, on peut noter le recrutement de deux CR CNRS (concours en 2014 et mutation en 2018) et d'un MCF, ainsi que le départ et l'arrivée d'un phys.-adj. CNAP. L'équipe "Troposphère" a donc été renforcée en potentiel scientifique pendant cette période, amenant ce potentiel de recherche théorique à sept ETP chercheur en 2018. Cependant, il faut noter que les deux DR CNRS de l'équipe Troposphère sont également tous deux directeurs d'unités (UMS 3365 et UMR 8105), ce qui diminue considérablement leur temps disponible d'investissement en recherche dans l'équipe Troposphère. Sur la période, l'équipe a encadré sept stages de master, cinq thèses (deux soutenues, trois en cours) et deux post-docs.

43 publications scientifiques dans des revues de rang A ont été produites sur la période janvier 2013-juin 2018, ce qui équivaut à ~2 $ACL.an^{-1}.ETP^{-1}$. De plus, on peut compter ~70 conférences internationales avec actes sur la période. Ces publications et conférences portent les thématiques de recherche de l'équipe évoquées plus haut et sont liées à des activités

12 *Tropical Transition Layer*

d'observations réalisées au sein de l'OPAR ou sur campagnes intensives, ainsi qu'à des travaux de modélisations utilisant principalement les modèles FLEXPART et Meso-NH.

L'équipe a porté trois projets LEFE (“MoPaV 2013-2015”, "VAPEURDO 2015-2018", “AEROMARINE 2018-2020”), deux ANR ("STRAP 2014-2018" et "CONCIRTO 2017-2021"), et quatre projets interdisciplinaires de la fédération OMNCG de l'OSU-R ("GPS", "FARCE", "ALEAVOLC", "CLEVER"). Elle est également impliquée dans trois projets H2020 (en tant que porteur de WP pour deux d'entre eux) en cours d'instruction ("EUNICE", "FILIA" et "Jules Verne"). A noter également le dépôt infructueux de quatre ANR sur la période 2013-2017, ainsi que le programme ANR BIO-MAIDO en cours d'évaluation (phase deux). L'équipe est également très impliquée dans la structuration nationale en terme d’observation pérenne via sa participation dans l’OPAR et sa contribution dans le NDACC, les SOERE[13] ROSEA/ORAURE-ATMOS, dans l’IR[14] ACTRIS-FR et dans le SNO CLAP.

Enfin l’équipe Troposphère est largement impliquée dans le programme ReNovRisk sur les risques intégrés associés aux cyclones tropicaux. Le coordinateur global et le responsable du programme ReNovRisk-Transfert sont membres de l’équipe “Troposphère”. Dans ReNovRisk, l’équipe se positionne sur les propriétés CCN et IFN des aérosols marins (couplage microphysique et études d’impacts) et sur l’observation atmosphérique par lidar et radio-sondages durant la campagne d’observation 2019 (ReNovRisk-Cyclones). Egalement dans le cadre de ReNovRisk-Transfert, l’équipe “Troposphère” est impliquée dans l’exploitation des données de l’OPAR pour la validation des modèles météorologiques et la fusion des données de précipitation pour l’alimentation des modèles hydrologiques.

L'équipe a organisé ou participé à 16 campagnes de mesures intensives sur la période. Parmi celles-ci, évoquons les campagnes "FARCE/pré-BIOMAIDO" (interactions COV et aérosols biogéniques-nuages), "STRAP" (composition et évolution du panache du Piton de la Fournaise), "MORGANE" (labélisation NDACC des lidars de l'OPAR) et "OCTAVE" (sources et variabilité des O-COV en atmosphère tropicale). Ces campagnes ont permis l'initiation ou le développement de fortes collaborations avec des laboratoires nationaux et internationaux (qui ont pu bénéficier du soutien des dispositifs TNA[15] ACTRIS et ENVRI+) ; citons en particulier le LATMOS, le LA, le LaMP, l’IASB, le CNRM et la NOAA.

3) Variabilité de la vapeur d’eau, mécanismes et processus de la composition de la haute troposphère tropicale

PARTICIPANTS PRINCIPAUX

S. Evan, J. Leclair de Bellevue, F. Posny, J.-P. Cammas, H. Vérèmes, V. Duflot, D. Héron, E. Lees (LACy), J.-L. Baray (LaMP), P. Keckhut (LATMOS), R. Dirksen (DWD/GRUAN Lead

13 *Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement*
14 *Infrastructure de Recherche*
15 *Trans-National Access*

Centre), S. Meier (DWD/GRUAN Lead Centre), H. Vömel (NCAR), K. Rosenlof (NOAA), S. Davis (NOAA/CIRES).

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

La vapeur d'eau est sans doute l'un des plus importants gaz à effet de serre et ses variations en haute troposphère jouent un rôle dans l'équilibre thermique de la planète (en piégeant le rayonnement infrarouge terrestre). Bien comprendre et quantifier les mécanismes régulant la vapeur d'eau en troposphère et plus particulièrement dans la haute troposphère tropicale est important pour les prévisions quant au futur du climat terrestre.

La convection contrôle en partie le transport de vapeur d'eau ainsi que d'autres constituants chimiques dans le système climatique (Sherwood et al., 2010). La convection tropicale transporte rapidement l'air de la couche limite vers les hautes altitudes. Cependant l'impact de la convection sur le contenu en vapeur d'eau troposphérique est encore très incertain. Dans les modèles climatiques, les biais associés aux phénomènes convectifs vont être source d'incertitudes dans la composition chimique troposphérique et le bilan radiatif terrestre. Or l'élargissement de la circulation d'Hadley lors du changement climatique (Seidel et al., 2008), la position de la zone de convergence intertropicale et la convection organisée (i.e. l'oscillation de Madden-Julian dans l'océan Indien) sont des phénomènes encore mal représentés dans les modèles climatiques (Bony et al., 2015). Dans l'hémisphère sud, le site de La Réunion (21°S, 55°E) est particulièrement adapté à l'étude de la composition chimique de la troposphère tropicale du fait de la position géographique et météorologique de l'île. Selon la saison de l'année, le site de la Réunion peut être sous l'influence de phénomènes tropicaux comme les cyclones.

A) Variabilité de la vapeur d'eau et inversion thermique dite "des alizés"

Le contenu atmosphérique en vapeur d'eau reste une donnée fondamentale pour l'évolution du climat à l'échelle globale puisqu'elle représente 60% de l'effet de serre naturel en incluant l'effet des nuages. La variabilité climatique lui est aussi très fortement liée car sa répartition conditionne la convection profonde dans les tropiques et par conséquent les précipitations à des échelles multiples. Il s'agit également d'une source d'incertitude pour la prévision numérique du temps puisque les changements d'états de l'eau sont sources de non-linéarité dans les modèles et de divergence des solutions trouvées. Le sud de l'océan Indien est une des régions les moins pourvues en moyens d'observation atmosphérique et la technique de mesure GNSS de la colonne totale de vapeur d'eau a le double avantage d'être opérationnelle quelque soit le temps sensible (y compris en présence de nuages ou d'hydrométéores) et ce avec une résolution temporelle importante (horaire ici). Les phénomènes étudiés peuvent donc aller du cycle diurne à l'inter-annuel (El Nino, dipôle subtropical de l'océan Indien, par exemple).

CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA VAPEUR D'EAU DANS LE SUD DE L'OCÉAN INDIEN

Un des objectifs de la thèse de E. Lees (2016-2019) est de documenter la variabilité saisonnière du contenu intégré en vapeur d'eau (CIVE) dans la région océan Indien à partir d'observations GNSS[16]. La saisonnalité est davantage marquée à mesure que l'on se déplace vers les hautes latitudes (Figure 1). Entre 5°S et 15°S sur océan, le CIVE est fort tout au long de l'année (~ 45 mm) avec un ratio de CIVE entre le mois le plus humide et le plus sec de l'ordre de 1,3 à 1,5. L'été austral correspond au passage de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) centrée vers 10°S et engendre des valeurs de CIVE de l'ordre de 50 mm avec une dispersion relativement faible autour de la moyenne. L'influence de la subsidence subtropicale reste peu définie avec une saison sèche courte et peu marquée, l'extrême étant sur Singapour qui présente des valeurs voisines de 50 mm en toute saison et deux maxima saisonniers en avril et novembre.

L'influence subtropicale est plus sensible sur continent à partir de 10°S et sur océan à partir de 15°S avec un ratio max/min de 2 à 3. L'influence de la ZCIT reste sensible jusqu'à 15°S sur continent avec une saison sèche qui reste bien définie mais elle diminue sur océan où les distributions de CIVE sont beaucoup plus variables pendant l'été austral avec des valeurs conditionnées à la fois par la proximité de la ZCIT et la subsidence subtropicale.

Enfin aux latitudes subtropicales (20-30°S), la faible teneur en vapeur d'eau hivernale est beaucoup plus marquée à l'est du bassin qu'à l'ouest avec une saison sèche plus longue et avec des minima plus bas à altitude équivalente (13 mm à Karratha, 21°S, Australie occidentale, contre 18 mm à Richardson Bay, 29°S, Afrique du sud). L'influence humide estivale disparaît totalement au sud ouest de l'Australie puisque le maximum annuel n'est que de 23 mm à Perth alors qu'il est de 39 mm à Richardson Bay à latitude équivalente en Afrique du sud.

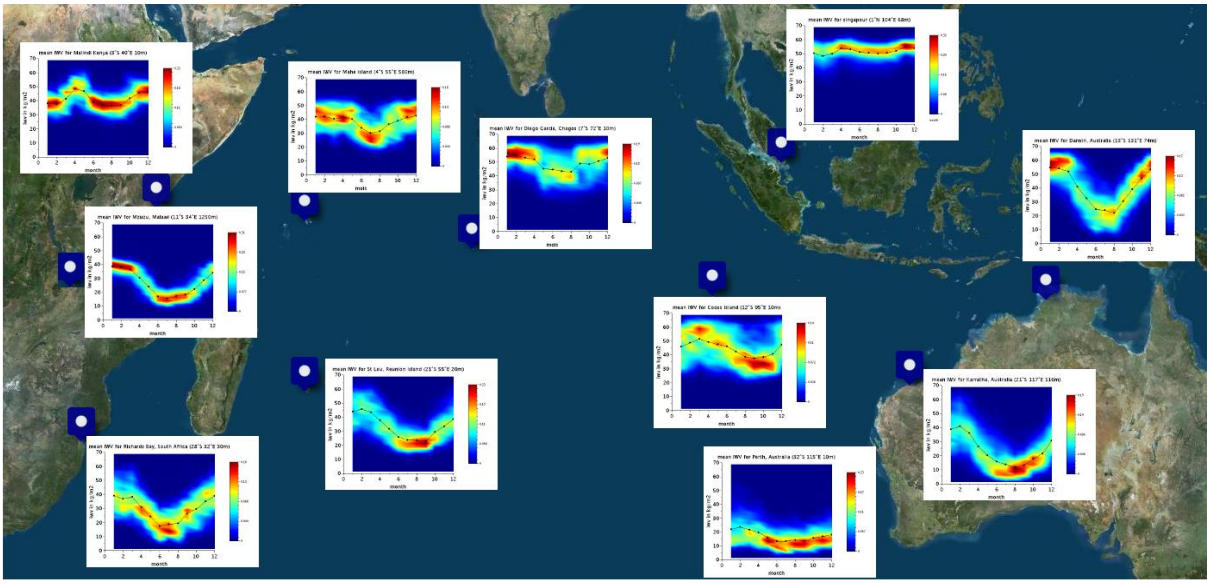

Figure 1 : Moyenne climatologique mensuelle du contenu intégré en vapeur d'eau (mm) réalisée à partir de mesures GNSS pour un échantillon de stations de l'Océan Indien. Fréquence d'occurrence associée en couleur.

16 *Global Navigation Satellite System*

INVERSION THERMIQUE DITE "DES ALIZÉS"

Des radiosondages journaliers PTU sont réalisés à Gillot à 12h TU par Météo-France depuis 2011. L'analyse des profils mensuels du gradient de rapport de mélange en vapeur d'eau et du gradient thermique moyen issus de ces observations montre que la zone de gradient thermique faible, proche de 0 à -2°C par km en moyenne, pendant les mois de mai à novembre, est associée à une zone de gradient négatif de rapport de mélange. On a alors un assèchement de l'atmosphère qui se produit en moyenne entre 2000 m et 2500 m en association avec la zone de stabilité thermique relative (Figure 2a - 2b).

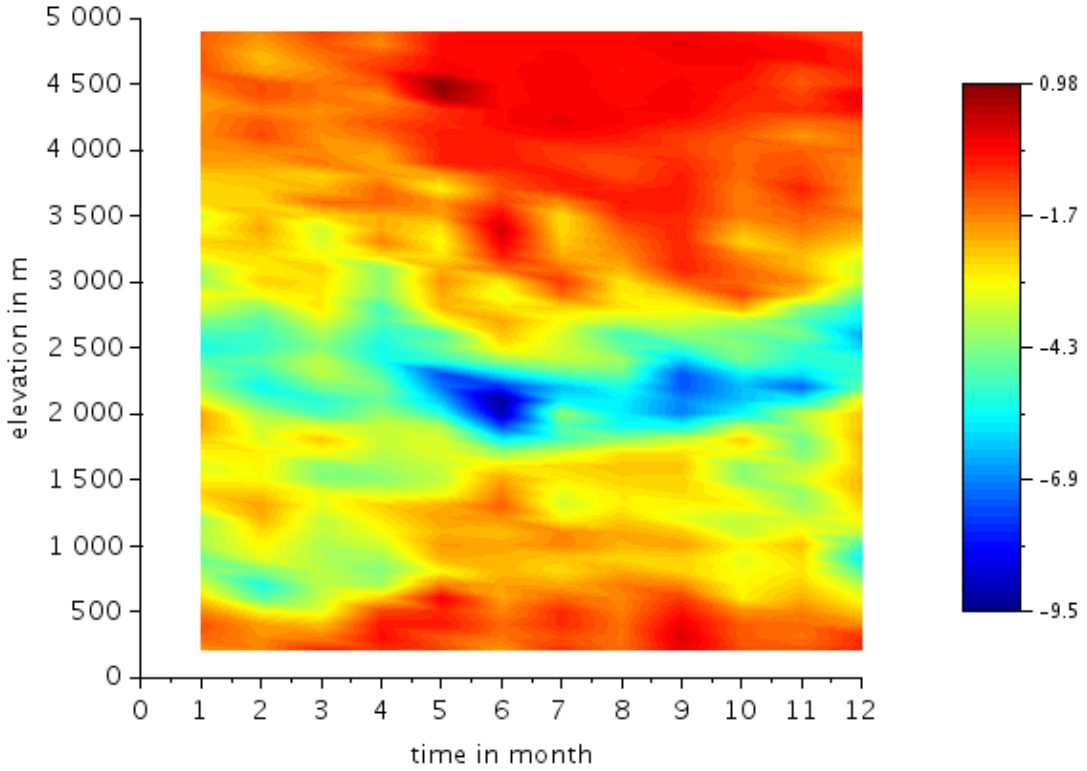

*Figure 2**a** : Moyenne climatologique mensuelle du gradient de rapport de mélange en vapeur d'eau (g/Kg/Km) issus de radiosondages journaliers opérés à Gillot entre 2011 et 2017.*

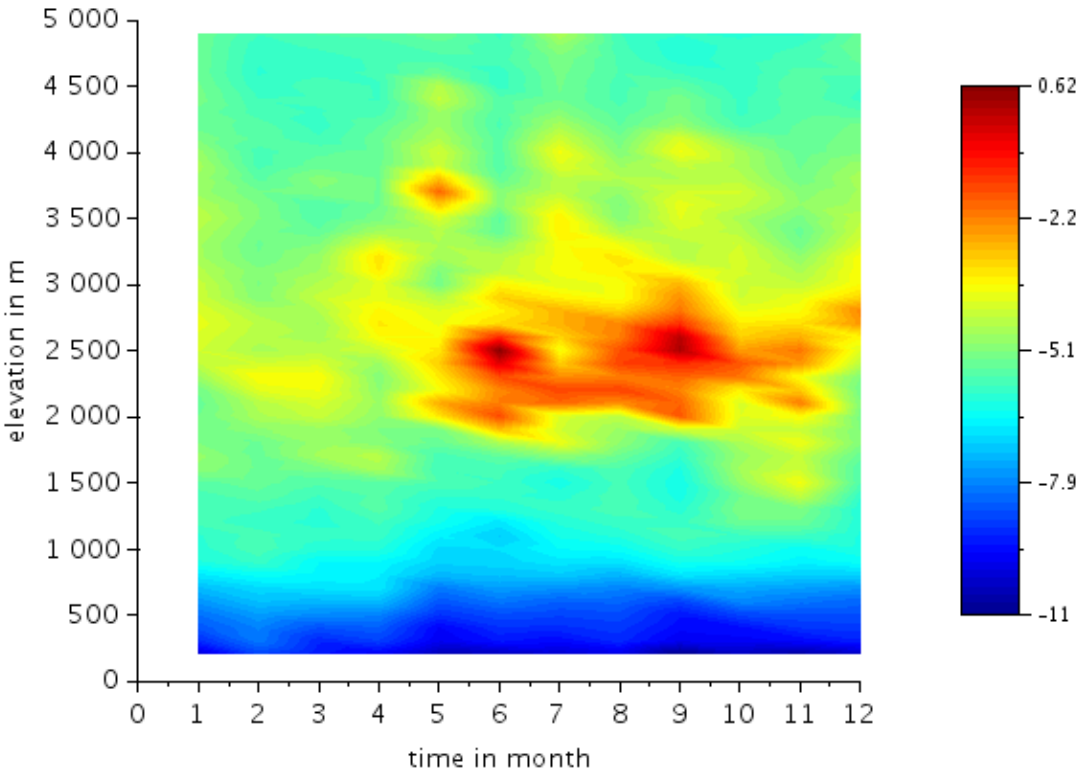

*Figure 2**b** : Moyenne climatologique mensuelle du gradient de température (K/Km) issus de radiosondages journaliers opérés à Gillot entre 2011 et 2017.*

La stabilité de la couche 2000-2500 m est, par conséquent, plus importante en hiver qu'en été. Il en est de même avec le gradient de rapport de mélange qui lui est associé. Les 700 premiers mètres environ sont concernés par un gradient proche de l'adiabatique (-9.8°C km^{-1}) puis la zone au-dessus correspond à une zone avec gradient adiabatique saturé (-6°C km^{-1}). Enfin entre 2000 m et 4000 m, les masses d'air sont plus stables avec des gradients thermiques faibles (moins de 4°C km^{-1}) et une zone quasi isotherme entre mai et novembre entre 2000 et 2500 m d'altitude.

L'inversion des alizés se produit en moyenne sur 55 % des 2100 radiosondages étudiés entre 2011 et 2017 (Figure 3). La fréquence d'inversion est en moyenne la plus présente en septembre avec 85 % des sondages concernés par au moins une inversion entre 600 m et 3400 m d'altitude. Le mois qui présente le moins d'inversion est le mois de février avec 28 % des sondages présentant une inversion. On peut remarquer qu'une deuxième inversion peut se produire jusqu'à environ 15 % des sondages au mois de septembre. On remarque également que l'inversion de moyenne troposphère voit sa probabilité d'occurrence augmenter jusqu'en juin, et présente un maximum de juin à septembre, avant de décroître brutalement au mois d'octobre. L'occurrence de cette inversion est probablement partiellement liée à l'incursion de systèmes perturbés (talweg et/ou queue de front froid) pendant l'hiver austral et celle-ci diminue brutalement en octobre avec l'arrivée du printemps austral et la migration vers le sud de l'anticyclone des Mascareignes.

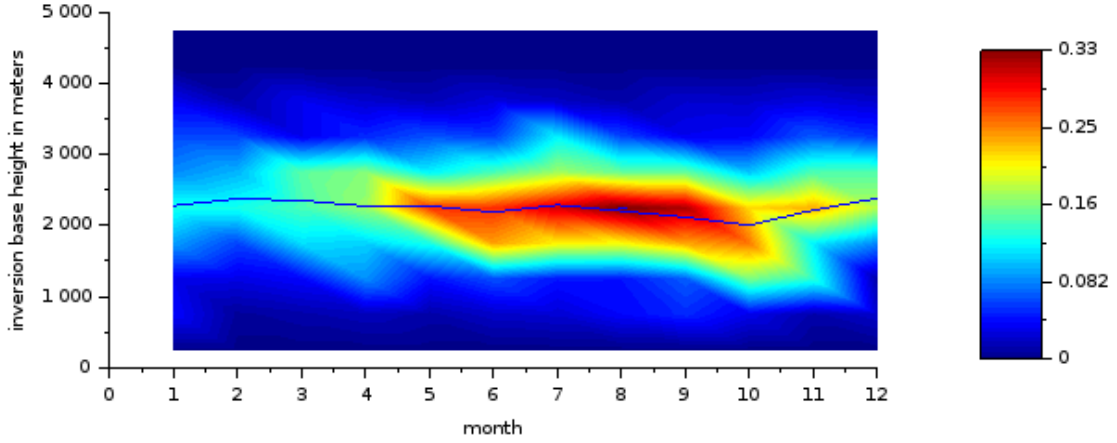

Figure 3 : Moyenne mensuelle de l'altitude du sommet de la couche d'inversion thermique des alizés (trait bleu) et fréquence d'occurrence de l'inversion (en couleur) (Radiosondages - Gillot - 2011/2017).

L'inversion des alizés se produit en moyenne annuelle à 2300 m ± 570 m d'altitude sur les radiosondages de La Réunion. Sa hauteur varie peu avec toutefois un minimum au mois d'octobre (2100 m d'altitude) qui correspond à une probabilité plus forte d'observer des inversions à basse altitude avec un décalage progressif vers les basses altitudes entre les mois de mai et octobre.

B) Échanges stratosphère-troposphère

La dynamique des courant-jets polaire et subtropical sur le sud-ouest de l'océan Indien conduit fréquemment à des échanges stratosphère – troposphère, en particulier à des intrusions stratosphériques irréversibles (Baray et al., 2003 ; Clain et al., 2009 ; Clain et al., 2010). Leur contribution au bilan de l'ozone troposphérique de ces régions n'est pas encore bien estimée à cause de la difficulté des modèles à reproduire le cycle de vie des intrusions qui se créent sous forme de couches isentropiques de seulement quelques centaines de mètres d'épaisseur. L'incertitude sur ce terme du bilan de l'ozone troposphérique en amène d'autres sur la capacité oxydante de la troposphère et sur la durée de vie des espèces chimiques. Lors de la campagne MALICCA-1 (MAïdo Lidar Calibration Campaign, avril 2013, La Réunion), un cas d'étude original avec des intrusions stratosphériques multiples a été documenté (Vérèmes et al., 2016) par une approche multi-méthodologique.

Des signatures d'intrusions stratosphériques ont été observées sur des observations quasi-simultanées et co-localisées d'ozone et de vapeur d'eau par deux lidars de l'observatoire du Maïdo le 4 avril 2013 (Figure 1). Les trois pics d'ozone (supérieurs à 90 ppbv à ~8, ~10 et ~13 km d'altitude) au sein d'une couche épaisse d'air sec suggèrent des processus d'intrusions stratosphériques avec plusieurs origines. Des rétro-trajectoires avec le modèle LACyTraj initialisées sur chaque pic d'ozone et calculées avec un modèle lagrangien sur des séries temporelles ERA-Interim permettent d'identifier leur origine stratosphérique. Le pic d'ozone avec l'altitude la plus basse est associé à un processus de foliation de tropopause du courant-jet polaire pendant la formation d'une dépression extratropicale. Les observations de vapeur d'eau du lidar de ce pic ont montré que l'anti-corrélation avec l'ozone n'existe plus, ce qui indique l'action dans le temps de processus de mélange. Les deux pics observés à plus haute altitude

sont associés à la dynamique du courant-jet subtropical. Les rétrotrajectoires et les observations confirment leur origine stratosphérique (anti-corrélation ozone-vapeur d'eau).

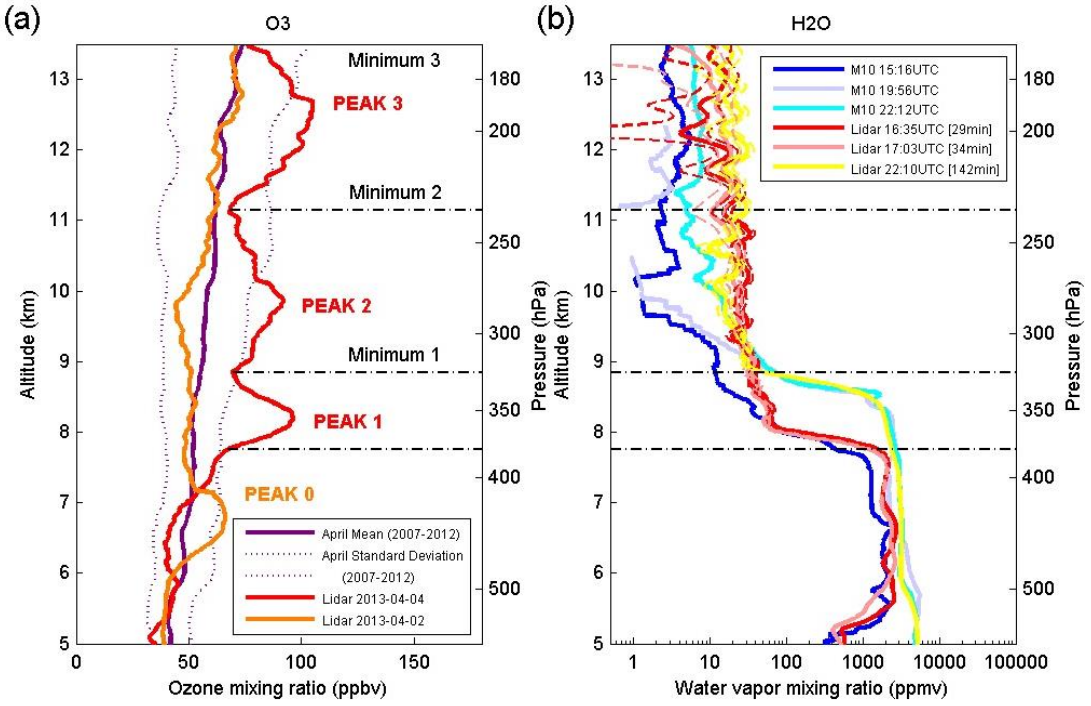

Figure 4 : ***(a)*** *: Profils lidar d'ozone du 4 (en rouge) et 2 avril 2013 (en orange), Observatoire du Maïdo. Profil moyen d'ozone pour un mois d'avril (en violet), calculé sur les radiosondages SHADOZ de la station de La Réunion entre 2007 et 2012.* ***(b)*** *: Profils de vapeur d'eau du 4 avril 2013, Observatoire du Maïdo; profils lidar à 16:35 UTC (en rouge), 17:03 UTC (en rose) et 22:10 UTC (en rouge) avec leur erreur 1-σ (en pointillé) et radiosondages Modem à 15:16 UTC (en bleu foncé), 19:56 UTC (en bleu ciel) et 22:12 UTC (en cyan). Figure extraite de Vérèmes et al. (2016).*

Une méthode lagrangienne (Reverse Domain Filling) appliquée à la reconstruction d'un traceur d'ozone stratosphérique et de tourbillon potentiel dans des coupes verticales au-dessus de La Réunion a permis de reconstruire des structures détaillées de tourbillon potentiel et d'ozone en accord avec les observations de fines échelles (Figure 2). Des résultats similaires ont été obtenus avec de la modélisation méso-échelle (modèle Méso-NH) en utilisant un traceur d'ozone stratosphérique passif. Une résolution verticale aussi fine que 150 m dans la région de la tropopause a dû être spécifiée dans le modèle pour reproduire les traits caractéristiques des intrusions stratosphériques (Figure 2). Ces résultats montrent les bonnes performances du modèle Méso-NH pour simuler ce type d'intrusions stratosphériques irréversibles. Le modèle pourrait être utilisé plus en avant pour faire des études de bilan des échanges stratosphère-troposphère.

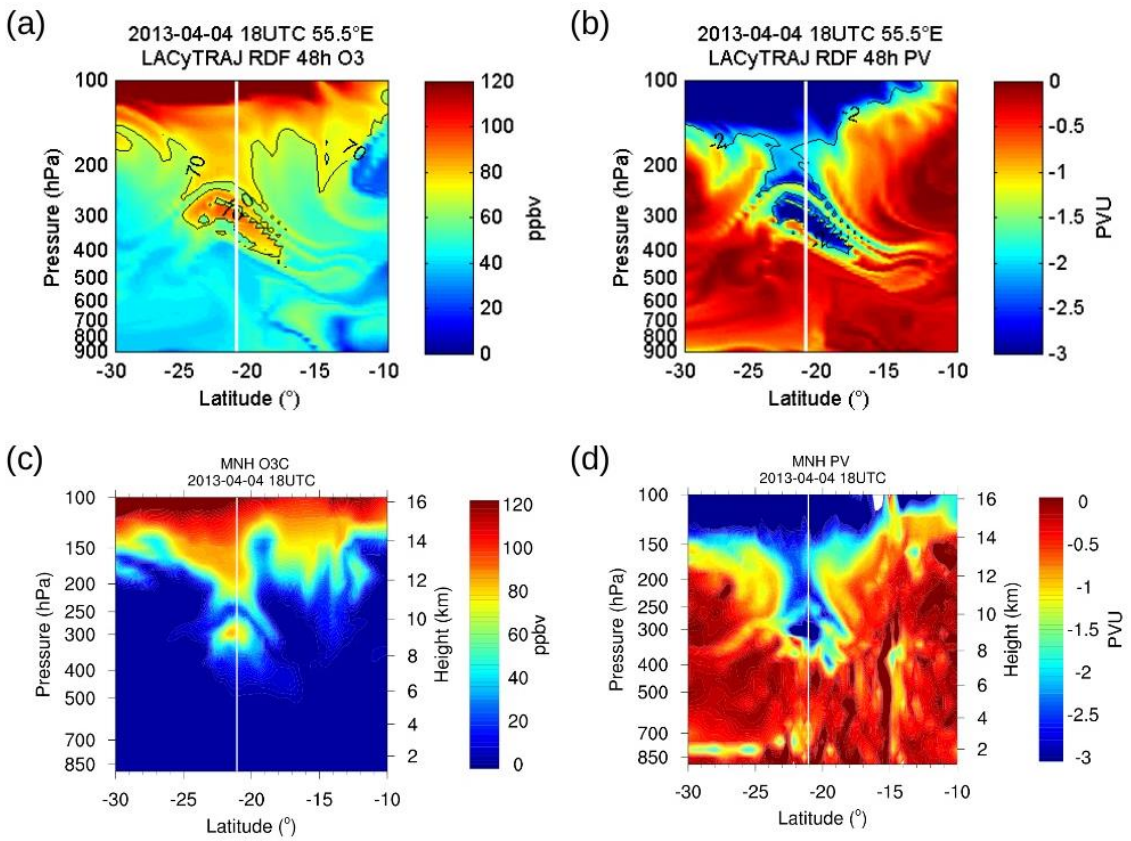

Figure 5 : Coupes verticales à 55.5°E le 4 avril 2013 à 18:00 UTC. Rapport de mélange d'ozone par la méthode RDF LACYTRAJ (advection de 48 heures arrière à partir des ré-analyses ECMWF ERA-Interim) (en haut). Traceurs stratosphériques d'ozone par Méso-NH (en bas). Figure extraite de Vérèmes et al. (2016).

Une analyse climatologique des courant-jets de moyenne latitude a été faite en exploitant la base de données des radars profileurs de vent du Laboratoire de Météorologie Physique à Clermont-Ferrand et du Laboratoire d'Aérologie à Lannemezan (Baray et al., 2017). L'étude démontre la capacité du radar à décrire certains aspects des processus d'échanges stratosphère - troposphère et ouvre des perspectives sur l'exploitation statistique de la base de données.

PRINCIPALES PUBLICATIONS

- Vérèmes, H., J.-P. Cammas, J.-L. Baray, P. Keckhut, C. Barthe, F. Posny, P. Tulet, D. Dionisi and S. Bielli, Multiple subtropical stratospheric intrusions over Reunion Island : observational, lagrangian, and eulerian numerical modeling approaches, J. Geophys. Res. Atmos., 2016JD025330, 2016
- Baray, J., Y. Pointin, J. Van Baelen, M. Lothon, B. Campistron, J.-P. Cammas, O. Masson, A. Colomb, C. Hervier, Y. Bezombes, S. Banson, C. Duroure, D. Hadad, and F. Tridon, Case study and climatological analysis of upper tropospheric jet stream and stratosphere-troposphere exchanges using VHF profilers and radionuclide measurements in France. J. Appl. Meteor. Climatol., https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0353.1, 2017

C) Processus convectifs et composition de la haute troposphère

La vapeur d'eau est sans doute l'un des plus importants gaz à effet de serre et ses variations en haute troposphère (14-17 km) jouent un rôle dans l'équilibre thermique de la planète (en piégeant le rayonnement infrarouge terrestre). Bien comprendre et quantifier les mécanismes régulant la vapeur d'eau en troposphère et plus particulièrement dans la haute troposphère tropicale est important pour les prévisions quant au futur du climat terrestre.

La convection contrôle en partie le transport de vapeur d'eau ainsi que d'autres constituants chimiques (*e.g.* ozone) dans le système climatique. La convection tropicale transporte rapidement l'air de la couche limite vers les hautes altitudes. Cependant l'impact de la convection sur la composition chimique (vapeur d'eau/ozone) de la haute troposphère est encore très incertain.

L'île de La Réunion à 21°S est particulièrement adaptée à l'étude de la composition chimique de la haute troposphère du fait de ses positions géographique et météorologique. L'OPAR dispose de plusieurs moyens d'observations de paramètres atmosphériques sentinelles de changement climatique comme la vapeur d'eau (lidar, sondes CFH[17]) et l'ozone (lidars, sondes ozone ECC[18]). Ces mesures sont faites en routine pour alimenter les bases de données de réseaux d'observations (NDACC, SHADOZ[19], GCOS[20]/GRUAN[21]) ou en mode campagne lorsqu'un cyclone tropical se forme près de l'île.

Dans le cadre du LEFE VAPEURDO, les mesures lidar et de radiosondages de vapeur d'eau/ozone de l'OPAR sur la période 2013-2016 ont été analysées pour caractériser la saisonnalité de la vapeur d'eau/ozone dans la haute troposphère tropicale de l'hémisphère sud. Ces mesures ont été utilisées pour étudier l'influence de la convection sur la composition chimique de la troposphère tropicale au-dessus de La Réunion.

La figure 6 montre l'évolution temporelle de l'humidité relative (RH) mesurée par les sondes météorologiques M10 depuis le site de Gillot dans le nord de l'île. Les fortes valeurs de RH (> 80%) observées en dessous de ~2km sont typiques des valeurs observées en couche limite marine. Dans la troposphère, on observe une alternance de périodes sèches et plus humides pendant la saison d'été austral (novembre-avril). Sur des périodes de plusieurs jours, les valeurs de RH peuvent dépasser 60% dans la moyenne troposphère entre 2km et 10 km (par exemple début décembre 2014). Cette humidification de l'ensemble de la colonne troposphérique est sans doute associée à des épisodes convectifs au voisinage de l'île. On peut citer par exemple le cyclone Bejisa en 2014 qui est passé au plus proche de l'île à 160 km le 2 janvier. De même, la saison d'été janvier-mars 2015 montre une humidification plus marquée de la troposphère, sans doute liée à des épisodes convectifs qui se sont succédés tout au long de cette saison (cyclones tropicaux Bansi du 11 au 15 janvier, Chedza du 17 au 18 Janvier et la tempête tropicale Haliba du 7 au 11 mars). La saison 2015-2016, en contraste, est plus similaire à la saison 2013-2014.

---

17 Cryogenic Frostpoint Hygrometer
18 Electro-Chemical Cell
19 Southern Hemisphere ADditional OZonesondes
20 Global Climate Observing System
21 GCOS Reference Upper Air Network

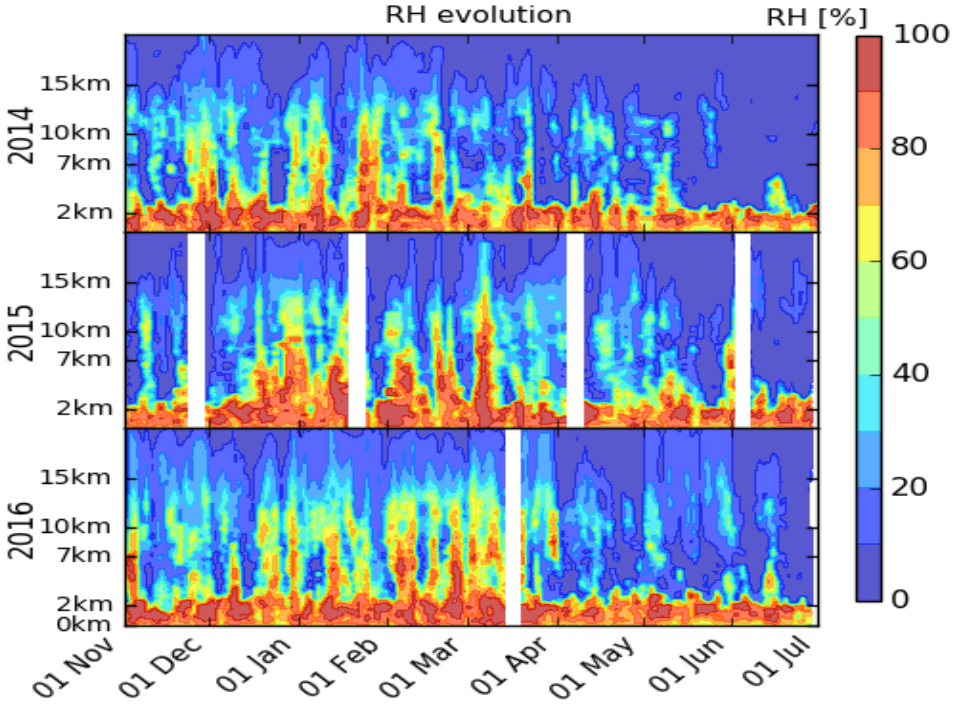

Figure 6 : Evolution temporelle de l'humidité relative (RH en %) mesurée par radiosondage pour les périodes novembre 2013-juillet 2014 (haut), novembre 2014-juillet 2015 (milieu) et novembre 2015-juillet 2016 (bas).Les signatures d'ozone et de vapeur d'eau d'origine convective ont été identifiées dans les profils, ceci en utilisant des méthodes statistiques et en établissant une climatologie des mesures. Ensuite, l'origine géographique des masses d'air mesurées a été identifiée à l'aide du modèle Lagrangien FLEXPART. L'analyse lagrangienne a été combinée avec des cartes de nuages convectifs établies à l'aide des mesures de température de brillance dans le canal infrarouge du satellite géostationnaire METEOSAT-7. La figure 7 montre l'origine convective des masses d'air mesurées en haute troposphère au-dessus de La Réunion pour les étés australs 2014 et 2015. Pour une masse d'air mesurée en haute troposphère au-dessus de La Réunion, il est possible de calculer sa probabilité d'origine en basse troposphère à l'aide des rétrotrajectoires de FLEXPART. De même les champs de température de brillance mesurée par METEOSAT 7 permettent d'estimer la fraction de nuages convectifs observés sur l'océan Indien. Les deux informations combinées fournissent ainsi des cartes d'origine convective comme illustrées sur la figure 7. L'analyse des mesures de vapeur d'eau/ozone, des trajectoires lagrangiennes et de la distribution des nuages convectifs sur le sud-ouest de l'océan Indien permet de mettre en évidence l'influence de la convection dans le canal du Mozambique et des cyclones tropicaux sur les distributions de vapeur d'eau/ozone dans la haute troposphère tropicale au-dessus de La Réunion. Un article est en préparation pour le Journal of Geophysical Research (Héron et al., en préparation).

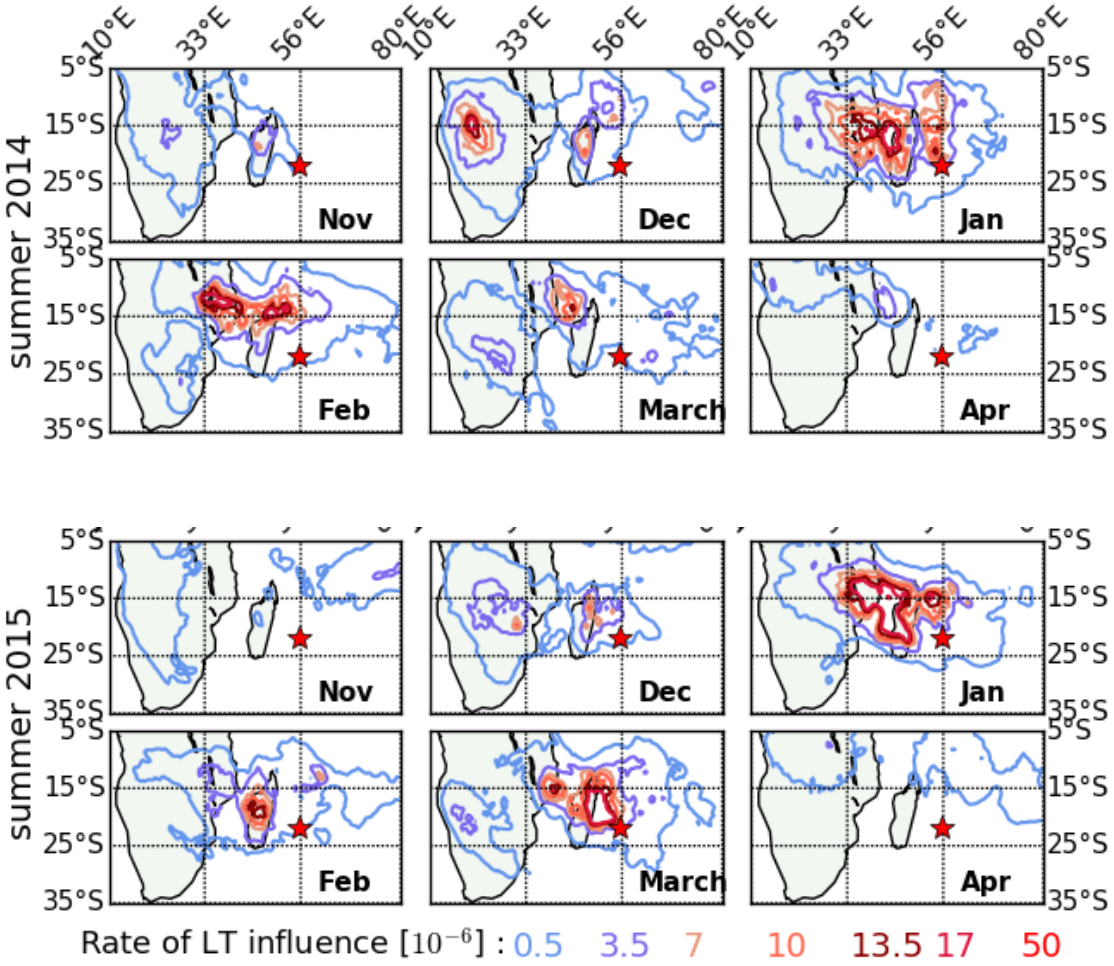

Figure 7 : Origine convective des masses d'air mesurées en haute troposphère au-dessus de La Réunion pour les mois d'été austral 2014 (haut) et 2015 (bas). Les isocontours correspondent à la probabilité qu'une masse d'air en haute troposphère au-dessus de La Réunion ait été influencée par la convection profonde.

Depuis 2014, nous disposons également de plusieurs cas d'épisodes convectifs sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien dont le panache convectif en haute altitude a pu être observé par instruments sous ballons météorologiques et lidars à l'observatoire du Maïdo (2200 m, ouest de l'île de La Réunion) et à Gillot (site côtier au nord de l'île). Il s'agit notamment des cyclones tropicaux Corentin (janvier 2016), Enawo (mars 2017) et Dumazile (mars 2018). L'analyse des profils de vapeur d'eau, d'ozone et de température a permis de mettre en évidence un rôle important des cyclones tropicaux dans l'hydratation de la haute troposphère tropicale (de 40 à 60% au-dessus des valeurs climatologiques). L'analyse de rétro-trajectoires effectuées avec le modèle FLEXPART et les données météorologiques à haute résolution (9 km) du ECMWF[22] ont permis d'isoler l'origine convective des masses d'air mesurées. Ces trajectoires montrent également que le modèle FLEXPART couplé aux données ECMWF à haute résolution fournit une estimation correcte du transport convectif sur la zone sud-ouest de l'océan Indien (Evan et al., 2018, soumis à JGR). Dans le cadre de la thèse de Damien Héron (qui a débuté en octobre

22 *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*

2017), des simulations avec le modèle méso-échelle Méso-NH sont utilisées pour l'étude des phénomènes convectifs en milieu océanique tropical et leur rôle dans le transport de la vapeur d'eau de la troposphère vers la haute troposphère/basse stratosphère (notamment le cas du cyclone tropical Enawo de mars 2017).

Une campagne d'observations (radiosondages, lidar, radar) est aussi prévue pour la période d'été austral 2018-2019 dans le cadre de l'ANR CONCIRTO. L'ANR CONCIRTO a été financée en 2017 (Responsable scientifique : Stéphanie Evan) et vise à approfondir notre compréhension des mécanismes contrôlant la variabilité de la vapeur d'eau dans la TTL de l'hémisphère sud. Il s'agira notamment de mieux comprendre l'influence des mécanismes de plus petite échelle que sont la convection profonde et la formation des cirrus qui sont encore mal pris en compte dans les modèles climatiques. Les objectifs scientifiques sont les suivants :

- Acquérir une base de données qui permettra d'améliorer la représentation des cirrus et de la vapeur d'eau dans les modèles de prévision numérique et les modèles climatiques.

- Caractériser les propriétés des cirrus, comprendre leurs mécanismes de formation au-dessus de l'océan Indien/hémisphère sud et évaluer les possibles différences avec les tropiques de l'hémisphère Nord.

- Déterminer l'influence de la convection profonde sur la teneur en vapeur d'eau dans la TTL au-dessus de l'océan Indien.

PRINCIPALES PUBLICATIONS

- Evan S., J. Brioude, K. Rosenlof, S. M. Davis, F. Posny, J. M. Metzger, V. Duflot, G. Payen, H. Vömel and J.-P. Cammas, Effect of tropical cyclones on the TTL composition over the Southwest Indian Ocean, 2018, soumis à J. Geophys. Res. Atmos.

4) Physico-chimie de la troposphère tropicale

PARTICIPANTS PRINCIPAUX

J. Brioude, P. Tulet, V. Duflot, B. Foucart, E. Lees, B. Verreyken (LACy), A. Colomb, K. Sellegri (LaMP), C. Amelynck (IASB), R. Volkamer (NOAA/CIRES), V. Gros, F. Vimeux (LSCE), M. Leriche, C. Jambert (LA), J. Sciare (Cyprus Inst.)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

L'île de La Réunion présente la caractéristique de posséder un couvert végétal dense, composé de landes et arbustes (tamarins, branles) et de forêts primaires (acacias, bois de nèfles…). Ce couvert végétal, associé à un ensoleillement tropical important et à une température de surface autour de 20-30°C, est très propice à l'émission de COV[23] biogéniques (COVB) comme l'isoprène. De plus, les Hauts de La Réunion sont quotidiennement dans les

23 *Composés Organiques Volatils*

nuages qui présentent un cycle diurne bien marqué, avec une formation en milieu d'après-midi et une dissipation en soirée (Lesouëf et al., 2011; Baray et al., 2013; Guilpart et al., 2017). Leur mode de formation (convection sur pente) indique probablement une interaction en milieu de journée entre la microphysique nuageuse, les gaz réactifs et les aérosols anthropiques, biogéniques et marins. La nuit et en début de matinée, les aérosols observés sur les Hauts de l'île sont déconnectés des sources locales et régionales de pollution et sont donc très vraisemblablement caractéristiques de l'environnement de la basse troposphère de l'ouest de l'océan Indien tropical. Les observations in-situ sont donc très intéressantes pour les réseaux mondiaux d'observation comme point de référence dans cette zone sous-documentée.

A) Impacts des COV et halogènes marins sur la physico-chimie troposphérique

Les composés organiques volatils oxygénés (COVOs) ont un impact important sur la capacité oxydante de l'atmosphère et sur le climat. Le méthanol, l'acétaldéhyde et l'acétone sont parmi les COVOs les plus abondants, en particulier dans l'atmosphère marine où ils représentent de 37 à 63 % des COVs dans l'atmosphère. Les COVOs sont émis par la végétation, les océans, l'oxydation de COV, les feux de biomasse et les émissions anthropiques. De larges incertitudes existent sur le budget des COVOs, notamment à cause d'une mauvaise représentation de leur production photochimique, et d'incertitudes dans les émissions terrestres et océaniques.

Des études ont montré que les concentrations d'acétaldéhyde, de méthanol et d'acétone sont largement sous-estimées dans les modèles atmosphériques, particulièrement dans les régions tropicales reculées, ce qui indiquerait qu'il existe des sources inconnues de COVO. Notre méconnaissance du budget des COVOs vient notamment d'un manque de mesures de concentration de COVOs dans les régions tropicales. Une meilleure compréhension des sources et des puits de COVO est donc nécessaire pour mieux quantifier leur impact en tant que oxydant atmosphérique, ce qui joue sur la durée de vie de gaz à effet de serre (*e.g.* le méthane) et donc sur le climat.

Les composés halogènes (chlore, brome, iode) réactifs ou à faible durée de vie (moins de 6 mois) sont également importants pour la physico-chimie troposphérique. Ils sont principalement émis à la surface des océans (OMM[24], 2010). Leur rôle dans le système climatique est important car ils participent à la destruction de l'ozone troposphérique et peuvent modifier la durée de vie de gaz à effet de serre tel que le méthane et l'ozone. Environ 75% de l'ozone troposphérique et du méthane sont détruits aux tropiques.

Les COVOs affectent la capacité oxydante de l'atmosphère en modifiant la chimie des HOx ($OH+HO_2$), NOx ($NO+NO_2$), BrOx ($Br+BrO_2$), et de l'ozone troposphérique. En perturbant l'équilibre du cycle des HOx et NOx, les halogènes peuvent également modifier le cycle chimique des COVOs.

Il est donc important de mesurer les COVs et les halogènes pour améliorer notre compréhension de la physico-chimie troposphérique.

24 *Organisation Mondiale de la Météorologie*

PROGRAMME OCTAVE

Le programme OCTAVE, financé par l'agence de recherche belge BELSPO, a pour but d'améliorer l'estimation des flux d'COVO dans les régions tropicales, et en particulier au-dessus des océans, en combinant mesures in situ, satellites et modélisation. Les objectifs sont :

- Générer une base de données de deux ans de mesures in situ de COVO par mesures spectrométriques PT-RMS et FTIR à l'observatoire du Maïdo. Ces mesures sont complétées par des mesures d'une campagne intensive à La Réunion de mars à mai 2018.

- Identifier et quantifier les sources de COVO à l'aide d'une analyse statistique, et d'une analyse basée sur FLEXPART-AROME, développée au LACy.

Ce programme est le fruit de collaborations historiques entre le LACy, l'OSU-R, l'IASB-BIRA et le LaMP. L'IASB-BIRA a plusieurs instruments de mesures installés sur le site du Moufia et à l'observatoire du Maïdo (FTIR, PICARRO) sur la composition chimique de l'atmosphère et des concentrations de gaz à effet de serre. Le LaMP participe depuis 2012 à des mesures gaz et aérosols au sein de l'OPAR et autour de campagnes de mesures des gaz et des aérosols d'origine naturelle (*e.g.* ANR STRAP, Pre-BIOMAIDO).

Les mesures in situ sur l'île de La Réunion seront effectuées par BIRA-IASB à l'aide d'un PTR-MS et des mesures FTIR à l'observatoire du Maïdo. En plus des COVOs d'origine marine, d'autres composés chimiques liés aux sources biogéniques (isoprène, monoterpènes), anthropiques (*e.g.* aromatiques) et feux de biomasse (acétonitrile) seront également identifiés. Une campagne intensive sera coordonnée par l'OSU-Réunion pendant laquelle Aurélie Colomb (LaMP) effectuera des mesures de COVOs au niveau de la mer et sur la forêt primaire de Bélouve.

BELSPO a également financé une thèse en cotutelle internationale entre l'université de La Réunion et l'université de Ghent. Le doctorant, Bert Verreyken, a débuté son contrat au LACy le 1er octobre 2017, et poursuivra sa thèse à BIRA-IASB le 1er octobre 2019.

Au LACy, les sources et puits des COVOs seront identifiés à l'échelle régionale à l'aide du modèle atmosphérique Lagrangien FLEXPART couplé aux sorties du modèle de prévision AROME de Météo-France à une résolution de 2,5 x 2,5 km^2. Le couplage de FLEXPART et AROME va faire l'objet d'un oral à la conférence EGU (Verreyken et al., 2018), et un papier est en préparation. Pour des cas d'étude spécifiques, FLEXPART sera couplé aux sorties du modèle méso-échelle Méso-NH à une résolution de 500 x 500 m^2.

MESURES D'HALOGÈNES

A travers une collaboration entre le LACy, BIRA-IASB et l'université du Colorado, les mesures halogènes et de COVO (glyoxal) ont été développés à La Réunion. Suite au financement de l'agence BELSPO, un spectromètre MAX-DOAS de BIRA-IASB a été installé au niveau de la mer au Port en juin 2016. L'agence américaine NSF a également financé l'installation d'un deuxième MAX-DOAS de l'université du Colorado à l'observatoire du Maïdo en janvier 2017 pour deux ans. Les spectromètres MAX-DOAS permettent de mesurer

les composés tels que BrO, IO, ClO, IO_2 à différents angles de vue, ce qui permet de restituer un profil partiel en troposphère et stratosphère de ces composés. Un angle de vue à 0 degré correspond à des mesures horizontales, tandis que des mesures à 90 degrés correspondent au zénith. L'exploitation scientifique conjointe des deux MAX-DOAS à deux altitudes différentes est unique au monde et va permettre de fournir des profils avec 5 points indépendants.

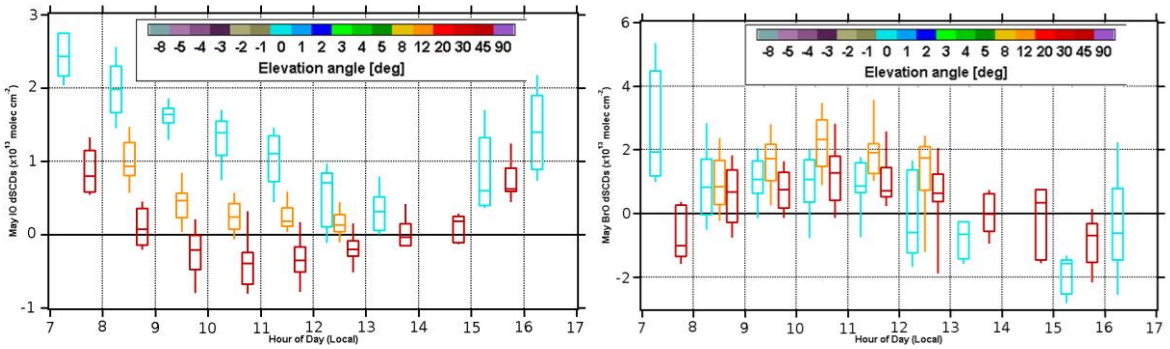

Figure 8 : variation diurne des mesures de IO (gauche) et BrO (droite) suivant l'angle de visée.

Un travail sur les "retrievals" est encore nécessaire pour obtenir des profils de concentration d'halogène. Les résultats préliminaires (Figure 5) montrent que IO a un signal fort à l'altitude de l'instrument (vers 2 km d'altitude) et faible pour les forts angles, c'est-à-dire en troposphère libre. Au contraire, les concentrations de BrO sont plus fortes en troposphère libre qu'au niveau de l'altitude de l'instrument. Ces résultats préliminaires sont cohérents avec des profils effectués par des campagnes aéroportées sur l'Atlantique et le Pacifique. L'estimation des profils de concentration d'halogène permettra de caractériser les différences chimiques entre le bassin sud de l'océan Indien et les autres océans tropicaux.

B) Formation de nouvelles particules (nucléation, aérosols marins)

MODÉLISATION DES SELS MARINS

Dans le contexte des études locales sur La Réunion et en particulier des interactions aérosols-nuages, il est apparu important d'étendre le modèle ORILAM aux sels marins. Cette évolution réalisée entre 2014 et 2016 considère une distribution lognormale à deux moments sur 5 modes (un mode d'Aitken, deux modes d'accumulations et deux modes grossiers). Cette distribution permet une bonne représentation des propriétés CCN et IFN des sels marins. Le schéma d'émission utilise la paramétrisation d'Ovadnevaite et al. (2014) qui a été implémentée dans le schéma SURFEx par Marine Claeys dans le cadre de sa thèse sur la modélisation des aérosols marins et de leurs propriétés radiatives dans CHARMEX/ADRIMED en collaboration avec le LACy.

L'ensemble des développements sur la modélisation des sels marins ont été exploités dans le cadre de la thèse de Thomas Hoarau (2015-2018) sur les interactions aérosols-cyclones tropicaux, et des post-docs de Joris Pianezze sur les interactions vagues-atmosphère dans le cyclone Bejisa (2017) et sur le mélange entre les panaches volcaniques, la pollution anthropique et les sels marins (2018).

L'ordre de grandeur des aérosols marins modélisés est consistant avec la littérature même s'il est complexe d'évaluer la représentativité du schéma d'émission par vents forts et en condition cyclonique. La campagne ReNovRisk 2019 notamment grâce à l'utilisation du drone BOREAL (mesures de turbulence et de la distribution en taille des aérosols à 6 m au-dessus de la surface océanique) et le programme LEFE AEROMARINE permettront très certainement d'apporter des éléments de réponse plus précis.

NUCLÉATION À L'OBSERVATOIRE DU MAÏDO

Dans le cadre de la thèse de Brice Foucart (2015-2018), la nucléation de nouvelles particules a été analysée à l'observatoire du Maïdo. Deux années d'analyses de mesures en taille des aérosols issues d'un DPMS (10 et 500 nm) et d'un AIS (0.8-42 nm) ont permis de dresser une climatologie de la nucléation et de la croissance des clusters vers des aérosols stables.

Il a été montré que la fréquence moyenne de formation de nouvelles particules est de 65 % des jours à l'observatoire du Maïdo (Foucart et al., 2017). Cette valeur est l'une des plus importantes observées au monde (Figure 6). Les deux pics principaux de nucléation s'observent au cours des intersaisons (mars à mai et septembre à décembre). Le taux de grossissement annuel moyen est mesuré à 15-16 $nm.h^{-1}$ avec des pics observés à 100 $nm.h^{-1}$ et le taux de formation moyen de nouvelles particules J_2 et J_{12} s'établit respectivement à 0,858 et 0,508 $cm^3.s^{-1}$. Ces valeurs sont établis en-dehors des situations où l'observatoire du Maïdo est sous l'influence du panache volcanique du Piton de la Fournaise.

Les diverses sources de nucléation possibles sont les sources marines, biogéniques et de pollution anthropique en provenance de la région du Port et de St-Paul. La campagne OCTAVE avec notamment le déploiement d'un API-TOF permettra de connaître la chimie des nouvelles particules formées et d'en établir les origines.

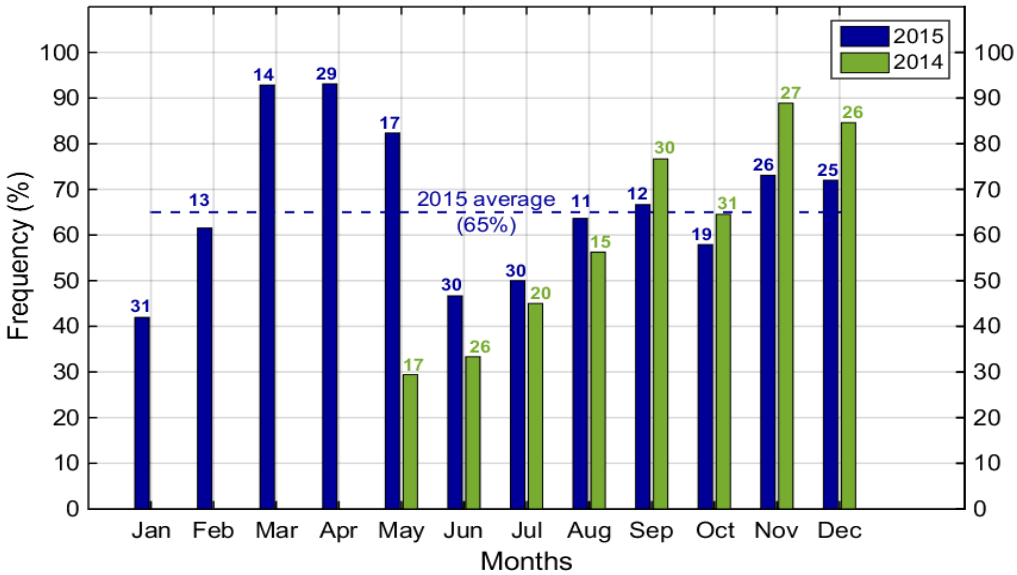

Figure 9 : Evolution saisonnière de la fréquence de nucléation entre mai 2014 et décembre 2015 mesurée à l'observatoire du Maïdo par l'AIS et le DMPS.

PRINCIPALES PUBLICATIONS

- Bègue, N, P. Tulet, J. Pelon, B. Aouizerats, A. Berger, A. Schwarzenboeck. Aerosol processing and CCN formation of an intense Saharan dust plume during the EUCAARI 2008 campaign. Atmos. Chem. Phys.,15, 6,3497-3516, 2015.

- Berger, A., C. Barbet, M. Leriche, L. Deguillaume, C. Mari, N. Chaumerliac, N. Bègue, P. Tulet, D. Gazen, J. Escobar. Evaluation of Meso-NH and WRF/CHEM simulated gas and aerosol chemistry over Europe based on hourly observations Atmospheric Research, Elsevier, 2016, 176-177, pp.43-63.

- Foucart, B., Sellegri, K., Tulet, P., Rose, C., Metzger, J.-M., and Picard, D. : High occurrence of new particle formation events at the Maïdo high altitude observatory (2150 m), Reunion Island (Indian Ocean), Atmos. Chem. Phys. Discuss., https://doi.org/10.5194/acp-2017-825, in review, 2017.

- Guilpart E., F. Vimeux, S. Evan, J. Brioude, J.-M. Metzger, C. Barthe, C. Risi, and O. Cattani. The isotopic composition of near-surface water vapor at the Maïdo observatory (Reunion Island, southwestern Indian Ocean) documents the controls of the humidity of the subtropical troposphere. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 122 (18), 9628-9650. doi:10.1002/2017JD026791, 2017.

- Shang, X., P. Chazette, J. Totems, E. Dieudonné, E. Hamonou, V. Duflot, D. Strasberg, O. Flores, J. Fournel, and P. Tulet. Tropical Forests of Réunion Island Classified from Airborne Full-Waveform LiDAR Measurements. Remote Sens., 8, 43, 2016.

- Mallet P.E., O. Pujol, J. Brioude, S. Evan, A. Jensen : Marine aerosol distribution and variability over the pristine Southern Indian Ocean, Atmospheric Environment, 182, 17-30, 2018.

- Langford, A.O., C.J. Senff, R.J. Alvarez, J. Brioude et al., An Overview of the 2013 Las Vegas Ozone Study (LVOS) : Impact of stratospheric intrusions and long-range transport on surface air quality, Atmospheric Environment, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.08.040, 2015.

- Cece, R., D. Bernard, J. Brioude, et al. Microscale anthropogenic pollution modelling in a small tropical island during weak trade winds : Lagrangian particle dispersion simulations using real nested LES meteorological fields. Atmospheric Environment, 139, 98-112 , 2016

5) Panaches volcaniques

PARTICIPANTS PRINCIPAUX

P. Tulet, J. Durand, B. Foucart, S. Bielli, G. Guimbretière, J. Pianezze (LACy), J.-B. Filippi (SPE), A. Di Muro, N. Villeneuve (IPGP), K. Sellegri, A. Colomb (LaMP), C. Denjean, T. Bourrianne (CNRM), M. Leriche (LA)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Depuis la crise aéronautique générée par l'éruption en mai 2010 du volcan Islandais Eyjafjallajökull, la physico-chimie des panaches volcaniques est devenue une priorité scientifique au niveau Européen. Depuis 2009, le LACy s'est engagé en fort partenariat avec l'OVPF[25] à comprendre les mécanismes d'émission de dispersion et de vieillissement des panaches volcaniques. Plusieurs programmes ont permis le financement de ce programme de recherche. Le programme INSU/LEFE MoPaV 2013-2015 qui a permis de modéliser les sources primaires et secondaires associées à la lave (collaboration SPE, OVPF, LA). Les programmes OMNCG de l'Université de La Réunion "FourNEx 2013", "gestion des aléas volcaniques 2014-2015" et "MIST 2017-2018" ont permis de financer plusieurs collaborations scientifiques avec l'INGV (Italie), le LMV (Clermont-Ferrand), le LA (Toulouse) et le LPC2E (Orléans). Plusieurs développements numériques (chimie aqueuse, nucléation volcanique) et instrumentaux (mesures dégazage, hauteur d'injection) ont été impulsés par ces appels d'offre.

FournEx et MoPaV ont été les incubateurs du programme ANR STRAP (N°CE03 2014) qui a permis de réaliser deux campagnes de mesures en 2015 sur le Piton de la Fournaise (85 jours d'éruption, Tulet et al., 2017) et sur l'Etna et le Stromboli en 2016 grâce à l'utilisation de l'ATR42 (UMS SAFIRE). Un des faits les plus marquants du programme STRAP est son caractère transdisciplinaire inédit entre les communauté Terre-solide et océan-atmosphère (LACy, IPGP, OVPF, LA, LMV, LaMP).

En 2017, le LACy (P. Tulet) et l'OVPF (A. Di Muro) ont impulsé un regroupement transdisciplinaire encore plus étendu de 80 chercheurs issus de 19 laboratoires de l'INSU, l'INSIS, INC, Météo-France et du BRGM et la rédaction d'un livre programmatique blanc pour l'étude des panaches volcaniques (programme MIST, http://site.mist.eu/).

PRINCIPAUX RÉSULTATS

La thèse de Jonathan Durand (2013-2016) et une collaboration étroite avec J.B. Filippi (SPE) ont été l'occasion de développer un couplage atmosphère-lave basé sur le modèle de propagation des feux ForeFire et le modèle MesoNH. Initialement destiné aux feux de forêts, ForeFire a été adapté au cas d'une coulée de lave nous permettant d'obtenir une représentation réaliste et dynamique des émissions en surface associées (flux de chaleurs, SO_2, CO_2, CO…). ForeFire/Lava est muni d'un modèle d'émission pour les flux de chaleur sensible et latente et pour les flux chimiques associés au brûlage de la végétation ou à l'entrée de la lave en mer. En mode propagation, la lave est alors ralentie (augmentation de la rugosité du terrain) et

25 *Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise*

l'interaction de la lave avec la forêt émet dans l'atmosphère des flux de CO_2 proportionnels au taux de biomasse disponible. De même, ForeFire/Lava détecte la présence de la mer et injecte au modèle atmosphérique des flux de chaleur latente, de vapeur d'eau, de chlore, et la lave est ralentie exponentiellement en mode propagation. L'ensemble de ces développements a été exploité pour étudier l'éruption du Piton de la Fournaise d'avril 2007. Le couplage MesoNH/ForeFire s'est avéré très performant pour reproduire les niveaux de SO_2 observés à la surface et a permis de mettre en lumière l'importance de la prise en compte de la lave pour bien représenter les circulations locales à proximité de l'évent (Durand et al., 2014). En effet, les flux de chaleur sensible associés à la lave amplifient la convection à proximité de l'évent et transportent plus efficacement le soufre volcanique en altitude. Ils augmentent la température de l'air et génèrent une brise thermique qui accélère localement les alizés, orientant la convection volcanique vers les Hauts de La Réunion. Des animations 3D de la simulation sont disponibles sur youtube :

- évolution du panache de SO2 sous https://youtu.be/suHtkIk1Cng

- évolution du panache de SO2, de la propagation de la lave et du panache «laze» (eau nuageuse) sous https://youtu.be/tMw5N11sGgU

Fin 2015, via une collaboration avec le LA, un module de chimie en phase aqueuse (chaude et froide) a été introduit dans le modèle MesoNH afin d'étudier la formation des précipitations acides associées à la convection à l'évent ou au panache « laze » (Figure 10). Ce module, basé sur les travaux de Leriche et al. (2013), a été adapté à la chimie du soufre et du chlore. Bien que perfectible, il a été possible de produire des précipitations acides réalistes autour d'un pH de 2,75 qui s'approche des valeurs de pH observées dans les pluviomètres (~2,5). L'acidité dans les nuages est particulièrement importante dans les zones d'émission du SO_2 (évent) et au niveau du panache "laze" en lien avec les émissions de HCl (fragmentation du sel de mer).

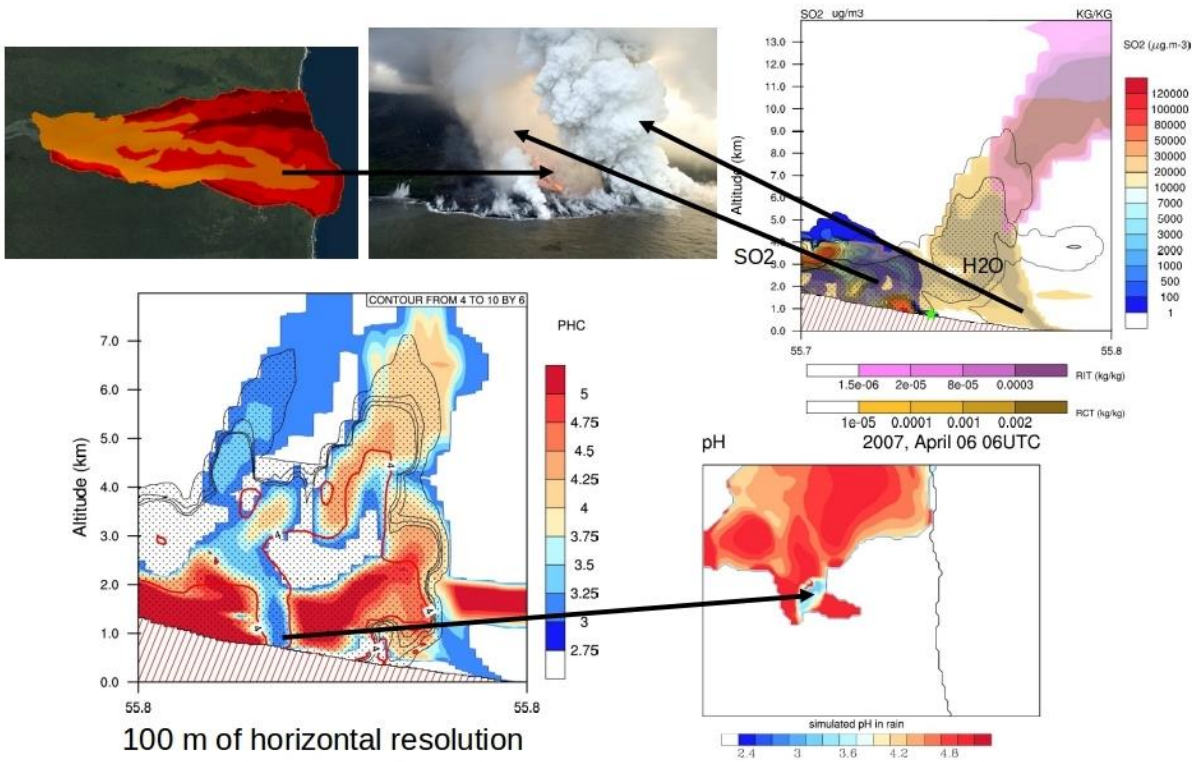

Figure 10 : Simulation Meso-NH de l'éruption du Piton de la Fournaise le 6 avril à 00 UTC. En haut à gauche la distribution de l'âge de la lave dans ForFire/LAVA ; en haut au centre une photo présentant le panache de soufre, la lave et le panache laze ; en haut à droite un coupe verticale (0-13 km asl) dans la zone de l'éruption représentant le SO2 (µg.m-3 en couleur, échelle à droite), le rapport de mélange en eau liquide (RCT en kg.kg-1 en marron, échelle en bas) et le rapport de mélange en glace (RCI en kg.kg-1 en rose, échelle en bas). En bas à gauche, coupe verticale du pH entre 0 et 8 km asl dans le nuage convectif et en, bas à droite le pH des précipitations.

ANR STRAP

Le LACy et l'OSU-R ont coordonné ce programme ANR ainsi que les work-packages 0 et 3. Le programme STRAP vise à déployer une approche intégrée pour étudier, analyser et simuler les processus de formation et de vieillissement des panaches volcaniques pendant leur transport, depuis leur source jusqu'aux régions de dispersion.

Deux campagnes d'observation ont été réalisées dans le cadre de cette ANR :

- la première sur l'ensemble de l'année 2015 sur le Piton de la Fournaise ;
- la deuxième partie a eu lieu mi-2016 sur l'Etna avec quatre vols de mesures ATR muni de l'instrumentation déployée pour la campagne DACCIWA et de quelques mesures in-situ sur les flancs de l'Etna.

La campagne STRAP 2015 sur le Piton de la Fournaise a reposé sur les moyens techniques de l'OPAR/OSU-R (LACy et UMS 3365) et de l'OVPF qui ont été mis à contribution sur alerte volcanique pendant l'ensemble de l'année 2015. P. Tulet (LACy) et A. Di Muro (OVPF/IPGP) ont organisé le dispositif de campagne. Des collaborations avec le CNRM, le LaMP (mesures

ULM et à l'observatoire du Maïdo) et avec l'agence de la qualité de l'air ORA, ont été mis en place dès septembre 2014.

Deux éruptions majeures en mai et en août-octobre 2015 ont été documentées par des mesures ULM, lidar, DOAS et in-situ via des prélèvements de lave, des mesures de dioxyde de soufre dans différents secteurs de l'île dont l'observatoire du Maïdo. Des simulations FLEXPART de trajectoires et de diffusion du panache ont été effectuées sur l'ensemble des périodes d'activité du volcan (84 jours). Près de 10000 profils lidar effectués entre le 18 mai et le 19 octobre 2015 sont exploitables. 18 vols par ULM ont été effectués entre le 19 mai et le 18 septembre 2015. Des niveaux très important en SO_2, excédant les 500 ppb et atteignant localement les 2 ppm, ont été mesurés à plus de 20 km du cratère par l'ULM (Figure 11). En surface les teneurs en SO_2 ont dépassé à plusieurs reprises les 1000 $\mu g.m^{-3}$.

Lors des épisodes de panaches volcaniques, le nombre de particules observées est 10 à 20 fois supérieur aux journées classiques mais la nucléation au Maïdo est bloquée par le très grand nombre de particules et il faut très probablement observer ce processus à proximité de la source, à l'évent.

Fin 2017, plusieurs simulations Meso-NH ont débutés sur les cas d'études les plus intéressants de la campagne STRAP. Le cas d'étude du 19 au 22 mai 2015 vise à étudier les zones et les périodes préférentielles de nucléation volcanique (thèse de Brice Foucart). Les premières simulations montrent que le modèle Meso-NH est capable de représenter correctement la dynamique et le transport du panache sur la topographie complexe de l'île de La Réunion, ce qui est un préalable pour comprendre les processus de nucléation de l'acide sulfurique. Parallèlement, un second cas d'étude a débuté en 2018 pour étudier la dispersion et le dépôt des composés volcaniques sur le cas du 29 août au 3 septembre 2015. Un dernier cas d'étude porté par Joris Pianezze (post-doc) concerne l'étude du panache de l'Etna et du Stromboli (campagne 2016). Cette situation bien documentée par 4 vols de l'ATR42 a permis de suivre les panaches de l'Etna et du Stromboli sur plusieurs centaines de kilomètres. L'objectif sera donc d'étudier le vieillissement du panache et son mélange avec la pollution sur la Méditerranée et les sels marins.

PRINCIPALES PUBLICATIONS

- Tulet, P., Di Muro, A., Colomb, A., Denjean, C., Duflot, V., Arellano, S., Foucart, B., Brioude, J., Sellegri, K., Peltier, A., Aiuppa, A., Barthe, C., Bhugwant, C., Bielli, S., Boissier, P., Boudoire, G., Bourrianne, 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, 2017.

- Durand, J., Tulet P., Leriche M., Bielli S., Villeneuve N., DiMuro A. and Fillipi J.-B. : Modeling the lava heat flux during severe effusive volcanic eruption : an important impact on surface air quality. J. Geophys. Res., 119, 20,11729-11742, 2014.

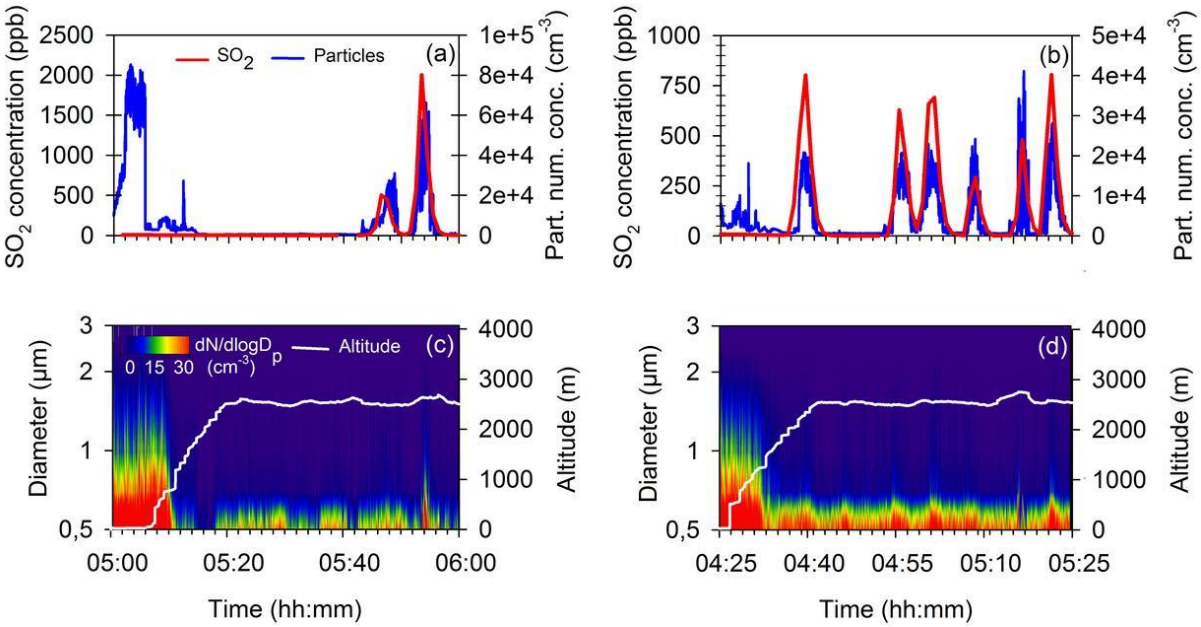

Figure 11 : En haut ; évolution du SO2 (ppb) et du nombre de particules (cm-3) d'aérosols mesurés par l'ULM le 1er septembre (à gauche) et le 2 septembre (à droite) 2015. En bas, altitude de l'avion (en m) et distribution en taille des aérosols (dN/dlogDp en cm-3 en couleur en fonction du diamètre en µm). Au-dessus de la couche limite les aérosols observés sont inférieurs à 0.5 µm. On observe une très bonne corrélation entre les pics de SO2 et le nombre d'aérosols (mesuré par CPC) majoritairement formés par nucléation (dont la majorité sont trop petits pour être discriminés en taille par l'OPC de l'ULM).

III - Le bilan de l'équipe Cyclones

1) Le contexte

L'équipe Cyclones s'intéresse à l'étude des systèmes dépressionnaires tropicaux et, plus généralement des systèmes convectifs de moyenne échelle. Elle maintient une relation étroite entre ses activités de recherche et les applications opérationnelles à travers ses liens avec le CMRS[26] Cyclones de La Réunion. A cet égard, elle est également fortement impliquée dans le développement des modèles de prévisions numériques de Météo-France et d'outils d'aide à la prévision au bénéfice des prévisionnistes du CMRS.

Le thème de recherche historique de l'équipe concerne l'étude et la prévision des mécanismes d'intensification des cyclones et repose sur l'utilisation de modèles numériques à haute résolution comme Meso-NH et, plus récemment, AROME Océan Indien. Un second thème important a trait à l'étude des mécanismes mis en jeu dans le développement de la convection profonde aux latitudes tropicales et, dans une moindre mesure, tempérées, ainsi qu'aux interactions entre les processus microphysiques, radiatifs et électriques mis en jeu au sein des systèmes fortement précipitants. Depuis quelques années, l'équipe Cyclones développe également de nouvelles activités dans le domaine de l'observation des nuages et des précipitations qui l'ont récemment conduite à faire l'acquisition de nombreux instruments.

26 *Centre Météorologique Régional Spécialisé*

2) Bilan global de l'équipe

L'équipe Cyclones est constituée au 1er juin 2018 de six post-doctorants, un doctorant et des personnels permanents suivants : trois MCF, un DR DD, une CR CNRS, une IR CNRS BAP E à 50% (les autres 50% de cette IR étant sur l'équipe Troposphère), trois ITM Météo-France (dont un seul a le statut de chercheur), et un TSM Météo-France. L'équipe Cyclones n'a pas été renforcée en potentiel scientifique au cours de cette période, le potentiel de recherche théorique s'élevant toujours à quatre ETP chercheur en 2018. En terme de flux de personnels permanents entre le 1er janvier 2013 et le 1er juin 2018, on notera le remplacement de trois des cinq agents Météo-France et le soutien technique à 50% d'une IR CNRS. Sur cette période, l'équipe a encadré vingt-trois stages de master (14 M2 ou ingénieur, 9 M1), trois thèses (deux soutenues, une en cours) et neuf post-doctorats.

42 publications scientifiques dans des revues de rang A ont été produites sur la période janvier 2013-juin 2018, ce qui équivaut à ~5 publications/an/chercheur. L'équipe a également porté ou co-porté une douzaine de programmes d'envergure représentant une dotation financière de plus de 2 M€ pour l'équipe : deux programmes LEFE ("ELECTRO" 2012-2014, "LIMA-TROPICS" 2017-2020), deux programmes TOSCA ("ARCEO" 2015-2017 et "SOLID" 2017-2018), trois programmes ANR ("DIMe" 2016-2018, "SPICy" 2014-2018 et "CARAVELE" 2017-2020), deux programmes régionaux ("BASTA-Réunion" 2014-2017 et "ESIEC-RUN" 2017-2019), deux programmes INTERREG-V Océan-Indien ("ReNovRisk-C3" 2017-2020 et "ReNovRisk-CP" 2017-2020) et un programme TAAF ("IOGA4MET-IO" 2017-2019). L'équipe Cyclones a également porté ou contribué à une dizaine de programmes interdisciplinaires de la fédération OMNCG de l'OSU-R et est également impliquée dans les projets H2020 "EUNICE", INTERREG-V "ReNovRisk-Transfert" et ANR "BIO-MAIDO" (tous en cours d'évaluation). Notons également le dépôt infructueux de quatre ANR et de deux projets LEFE sur la même période. L'équipe est également fortement impliquée dans la coordination internationale de la recherche sur les cyclones via le pilotage de plusieurs groupes de travail de l'IWTC[27] (OMM / WWRP[28]) et son implication dans le programme ReNovRisk.

Au cours de ces cinq dernières années, l'équipe Cyclones a également élargi significativement son réseau via la mise en oeuvre de nouvelles collaborations nationales (*e.g.*, LATMOS, LOPS, IGN, CNES, IFREMER, Biogéosciences/CRC) et internationales (*e.g.*, NOAA, CSU, IOGA, INAM, SMA, UEM, MOI, NTU, JMA). Elle contribue par ailleurs activement au LIA franco-taïwanais D3E et pilote les deux composantes du projet ReNovRisk-Cyclones - "Cyclones et Précipitations" (CP) et "Cyclones et Changement Climatique" (C3) - qui intègrent huit instituts de recherche régionaux (Maurice, Madagascar, Seychelles, Mozambique) et près d'une dizaine de partenaires français.

Le déploiement opérationnel, en septembre 2016, du modèle AROME Océan-Indien (voir ci-après), puis sa première mise à niveau en octobre 2017, sont des évènements particulièrement marquants pour l'équipe Cyclones et le LACy. La mise en service de ce modèle représente, en effet, l'aboutissement de plusieurs années de travail au cours desquelles l'équipe Cyclones a eut à définir les spécifications du modèle, à développer certaines parties du code (notamment le couplage océanique), et à évaluer ses performances dans une multitude de configurations.

---

27 International Workshop on Tropical Cyclones
28 World Weather Research Programme

Le démarrage, à l'issue de plusieurs années de travail préparatoire, du programme ReNovRisk en septembre 2017, et plus particulièrement des programmes C3 et CP, tous deux portés par l'équipe, constitue l'autre événement particulièrement marquant survenu au cours de cette période. Ce programme, qui s'intéresse à l'impact météorologique et océanographique des cyclones tropicaux sur les territoires du sud-ouest de l'océan Indien (SOOI) aux horizons actuel et futurs, est d'ailleurs l'un des projets phare de l'Université de La Réunion. Il ambitionne d'améliorer, et d'adapter au contexte insulaire, les outils de prévision cyclonique actuels, de favoriser la mise en place de stratégies d'adaptation et de résilience à l'aléa cyclonique dans un contexte de changement climatique, et de renforcer la coopération régionale autour de l'aléa cyclonique.

3) Changement d'intensité des cyclones tropicaux

PARTICIPANTS PRINCIPAUX

M.-D. Leroux, F. Chane-Ming (LACy), N. Davidson (CAWCR), Y-A Liou (CSRSR, Taiwan), Y. Kuleshov (BMRC, Australie)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

L'intensification rapide des cyclones répond à des mécanismes internes, se déroulant au cœur du système (cycles de remplacement du mur de l'œil, ondes de Rossby de vortex, ondes de gravité...), et externes (contenu thermique de l'océan superficiel, absence de cisaillement vertical de vent ou d'air sec, alimentation en basses couches...) avec des interactions complexes entre les deux mécanismes. Les mécanismes externes de grande échelle portant sur l'interaction d'un thalweg d'altitude avec un cyclone et internes de petite échelle portant sur les ondes de gravité générées par un cyclone ont été étudiés.

A) Interaction avec un thalweg d'altitude

Les actions cumulées d'un thalweg d'altitude sont complexes et difficiles à prévoir car un thalweg a de nombreux effets sur l'intensité d'un cyclone qui peuvent être contradictoires. La communauté scientifique des prévisionnistes et des chercheurs reste aujourd'hui confrontée à la question cruciale suivante : un thalweg d'altitude qui approche un cyclone va t-il l'intensifier ou le combler ? Cette étude fait partie des efforts internationaux visant à résoudre la problématique du "good trough/bad trough". Quels sont les processus physiques en jeu dans une telle interaction et leur impact sur l'intensité future du cyclone ? La modélisation numérique avec Aladin-Réunion du cyclone tropical Dora (2007) proposait un schéma conceptuel résumant les processus physiques clés de l'interaction cyclone-thalweg (Leroux et al. 2013). Des expériences numériques ont été poursuivies avec Aladin-Réunion afin d'évaluer la sensibilité de l'intensification cyclonique à d'autres intensités et géométries d'interaction cyclone-thalweg.

Un jeu de 98 simulations numériques a été réalisé avec Aladin-Réunion et sa procédure d'initialisation par bogus. Les simulations commencent à la même date que l'expérience de référence mais font varier l'intensité initiale du cyclone et sa position par rapport au thalweg

situé au sud-est (Figure 12a), pour reproduire la variabilité naturelle des interactions cyclone-thalweg ainsi que l'incertitude actuelle sur l'intensité (~10 hPa) et la position (~70 km) des cyclones dans les analyses numériques. Le thalweg est quant à lui inchangé, afin de laisser le cyclone évoluer dans un environnement réaliste.

Les résultats montrent :

- que l'intensification cyclonique croît avec l'intensité initiale du vortex et

- que le timing et la géométrie de l'interaction entre les deux anomalies de tourbillon potentiel associées au cutoff et au cyclone jouent un rôle majeur.

Le taux d'intensification augmente quand le cyclone, initialement situé à une distance de 12° au nord-ouest du thalweg, est déplacé de 1° en direction du thalweg. Parce qu'ils permettent une déformation et une inclinaison du thalweg en direction de l'équateur, ces deux scénarii favorisent un canal entrant (baptisé « inflow channel ») en moyenne troposphère avec injection de tourbillon cyclonique du thalweg vers le cœur du vortex cyclonique (Figure 12b). Ceci valide le schéma conceptuel de Leroux et al. (2013) basé sur la simulation de référence. A l'inverse, une interaction défavorable se produit quand le vortex est déplacé à 3° ou 4° à l'est par rapport à la position de référence. Ces derniers scénarii reproduisent presque à l'identique le cas d'interaction défavorable observé pour Fobane (2014) : le cut-off se rapproche trop près du cyclone par effet Fujiwhara et l'effet néfaste du cisaillement vertical de vent l'emporte.

Les variations du forçage de grande échelle relatives à l'expérience de référence montrent aussi que la relation entre changement d'intensité et cisaillement vertical de vent dans la couche 850-200 hPa n'est pas systématique et que la divergence à 200 hPa, le tourbillon potentiel moyen dans la couche 335-350 K, ou les flux relatifs de moment turbulent à 200 hPa pourraient être de meilleurs prédicteurs de l'intensification cyclonique durant les interactions cyclone-thalweg. Enfin, ces expériences de sensibilité démontrent l'importance d'une initialisation correcte des position et intensité des cyclones dans les modèles de prévision numérique du temps pour une prévision plus juste de leur intensité.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe High Impact Weather du Centre for Australian Weather and Climate Research (CAWCR, Melbourne, Australie) par le biais de deux bourses FASIC (2013, 2014, mises en œuvre par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et le Ministère des Affaires Étrangères).

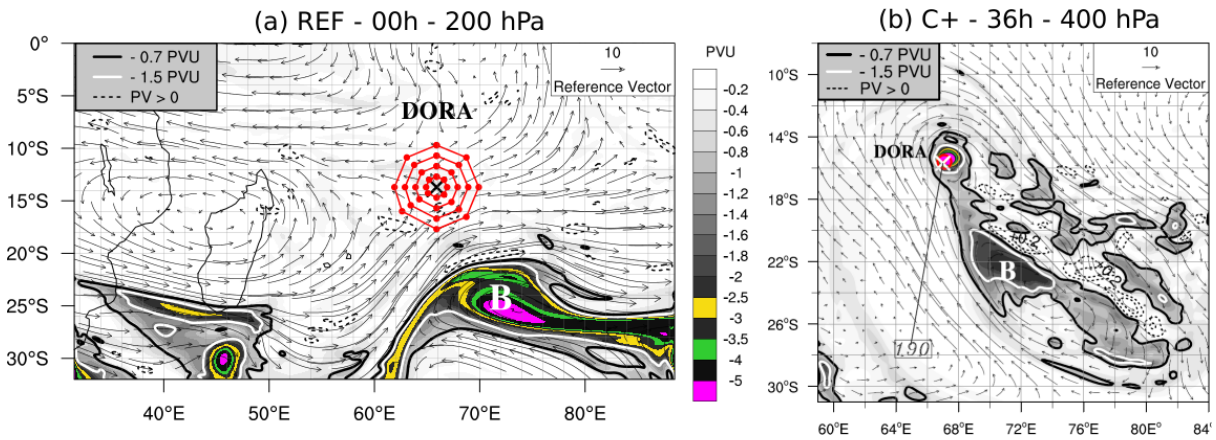

*Figure 12 : **(a)** Vent (flèches, m.s-1) et tourbillon potentiel (PVU, en plage de gris et couleurs, avec contours gras à -0.7 et -1.5 PVU) à 200 hPa et à l'instant initial dans l'expérience de référence. La croix indique le centre du cyclone (donnée best track). Les points rouges marquent les différentes positions du centre cyclonique dans les expériences de sensibilité. Le cutoff approchant le cyclone est noté "B". **(b)** Même champs mais à 400 hPa après 36 h de simulation dans l'expérience "C+" où le vortex n'est pas déplacé initialement mais a une intensité augmentée : l'injection de PV depuis le thalweg vers le cyclone est renforcée.*

B) Ondes de gravité

Nos précédentes études ont montré que l'activité des ondes de gravité produites par les cyclones tropicaux durant leur cycle de vie est liée à la dynamique des cyclones. Ces ondes affectent par ailleurs la dynamique globale de la stratosphère tropicale (Kafando et al., 2015) ainsi que les distributions des constituants atmosphériques tels que l'ozone, la vapeur d'eau et les aérosols (Chane Ming et al., 2016) et leur bonne représentation dans les modèles relève encore d'un véritable défi scientifique. Dans le cadre de l'observation et de la modélisation méso-échelle des ondes de gravité stratosphériques produites par le cyclone Ivan (2008) dans le sud-ouest de l'océan Indien, une activité importante d'ondes de gravité stratosphériques a été observée lors de l'intensification du cyclone caractérisée par une structure asymétrique de nombre d'onde 1 (Chane Ming et al., 2014). En effet, le vortex cyclonique, soumis à des instabilities asymétriques résultant des interactions entre le cyclone et son environnement, est rarement symétrique. Ces instabilités, dominées par le nombre d'onde 1, modifient entre autres la distribution convective au sein du météore et par conséquent la trajectoire et l'intensité des cyclones.

Le modèle de rétro-trajectoires GROGRAT (Chane Ming et al., 2016) a été initialisé au-dessus de La Réunion à partir des caractéristiques des ondes de gravité stratosphériques, observées puis modélisées par le modèle Méso-NH du cyclone Ivan (Chane Ming et al., 2014). Les rétro-trajectoires identifient deux sources convectives intenses associées à la structure asymétrique de nombre d'onde 1 et la bande spirale principale comme des sources dominantes d'ondes de gravité méso-échelles de longueur d'onde horizontale 600 km au voisinage de la tropopause lorsque le cyclone Ivan (2008), distant d'environ 583 km de La Réunion, s'intensifie avant son atterrissage sur Madagascar (Figure 13). Ces ondes poursuivent leur propagation verticale vers le sud-est dans la stratosphère jusqu'à 26-27 km d'altitude à partir de La Réunion.

Par ailleurs, une étude climatologique a été menée pour identifier la production d'ondes de gravité méso-échelles dans les analyses ECMWF lors des observations de structures

asymétriques de nombre d'onde 1 sur les images satellite de température de brillance pour 32 cyclones du sud-ouest de l'océan Indien de 2006 à 2013. On observe que 56% des 32 évènements cycloniques produisent des ondes de gravité en présence de structures asymétriques dont 67% durant les stades de cyclone ou de cyclone intense et 50% des cas lors de l'atterrissage ou à l'approche des terres. Les modes dominants ont des longueurs d'onde horizontale moyennes de 450 et 650 km dans l'ensemble des cas.

Le modèle méso-échelle WRF-ARW a été utilisé pour simuler à fine échelle verticale le cyclone intense Soudelor (2015) entre le 5 août à 00 h UTC et le 7 août à 18h UTC avant son atterrissage sur Taïwan (24°N, 121.6°E). La structure dynamique du cyclone a été reproduite de manière réaliste comparée aux observations satellites et pluviométriques (radar, pluviomètres) faisant notamment apparaître une asymétrie de nombre d'onde 1 dans la composante de vent tangentiel ainsi que des ondes de gravité identifiées dans les données de radio-occultation GPS COSMIC (Kuleshov et al., 2016) et dans les analyses ECMWF (Liou et al., 2018). Les champs de vent horizontaux font effectivement apparaître des structures elliptiques de nature variée caractéristiques des ondes de gravité dans la troposphère et la basse stratosphère (Figure 14). La structure méso-échelle de longueur d'onde horizontale de 200 km est associée à la dynamique de la structure asymétrique et l'activité des ondes de gravité peut être observée au-dessus de Taïwan à une distance du cyclone d'au moins de 1100 km avant le passage du cyclone Soudelor sur Taïwan.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de projets ANR (StraDyVariUS ANR-13-BS06-0011-01 2014-2018, BOOST3R 2018-2021/Campagne Strateole 2 2020-2024) et en collaboration avec le Center for Space and Remote Sensing Research National Central University (Taïwan), le Royal Melbourne Institute of Technology/National Climate Centre du Bureau of Meteorology (Melbourne) et le Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement de l'Université de Ouagadougou. Le développement de l'assimilation des propriétés nuageuses issues du satellite MSG IODC par WRF fait l'objet d'une thèse CIFFRE (F. Kurzrock) au sein de la société Reuniwatt en co-encadrement avec l'UMR Espace-Dev Réunion et Guyane.

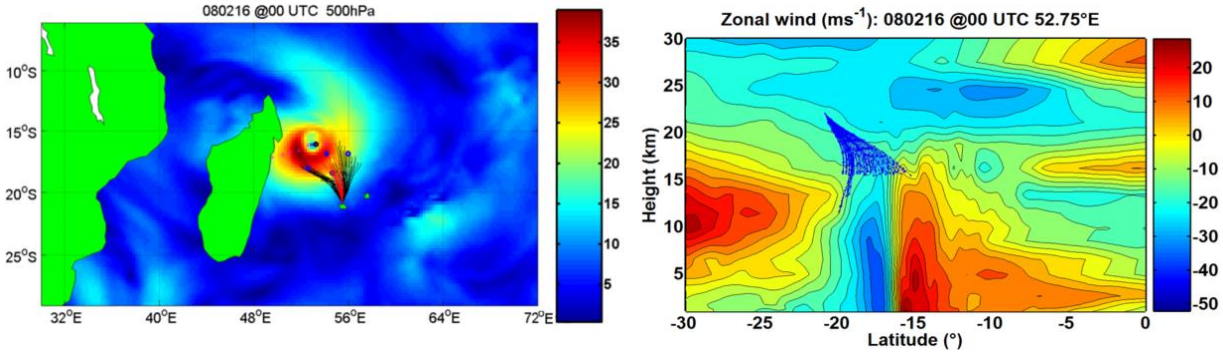

Figure 13 : Rétro-trajectoires des ondes de gravité méso-échelles initialisées au-dessus du site de La Réunion (20.9°S, 55.5°E) à 22 km d'altitude le 16 février 2008 à 12 h UTC superposées à gauche à l'intensité du champ ECMWF de vents horizontaux (m s-1) à 500 hPa à 00h UTC et à droite à la coupe verticale du vent zonal (m s-1) à 52,75°E.

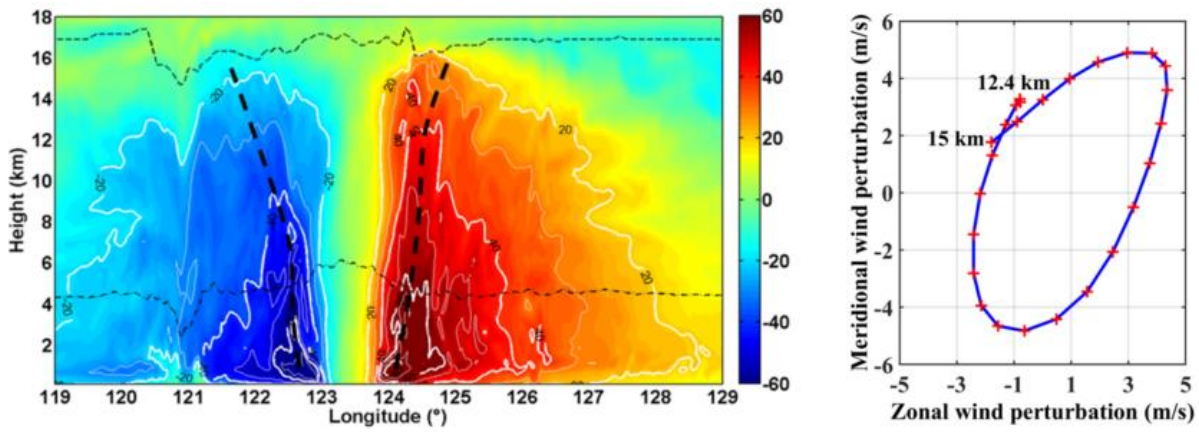

Figure 14 : A gauche ; coupe verticale du vent tangentiel (m s-1) au centre du cyclone Soudelor suivant la latitude de 23.1°N le 7 août 2015 à 12h UTC, les iso-contours sont représentés tous les 10 m s-1. Les tiretés fins indiquent l'isotherme 0°C et la tropopause. Les tiretés en gras localisent le rayon de vent maximum au sein du mur de l'oeil. A droite : hodographe elliptique des fluctuations de vents horizontaux à la position (25.5°N, 125.3°E) caractéristique d'une onde de gravité dans la haute troposphère. Le pas vertical est de 100 m (croix rouges).

PRINCIPALES PUBLICATIONS

- Leroux, M.-D., M. Plu, D. Barbary, F. Roux and P. Arbogast, 2013. Dynamical and physical processes leading to tropical cyclone intensification under upper-level trough forcing, *J. Atmos. Sci.*, **70**, 2547-2565, doi:10.1175/JAS-D-12-0293.1

- Leroux, M.-D., N. E. Davidson, Y. Ma, and J. D. Kepert, 2013. Prediction and diagnosis of the motion and rapid intensification of Typhoon Sinlaku during TCS08 (Tropical Cyclone Structure Experiment, 2008), *Mon. Wea. Rev.*, 141, 1413-1436, doi:10.1175/MWR-D-11-00346.1

- Leroux, M.-D., M. Plu, and F. Roux, 2016 : On the sensitivity of TC intensification under upper-level trough forcing. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 1179-1202, doi : 10.1175/MWR-D-15-0224.1

- Leroux, M.-D., K. Wood, R. L. Elsberry, E. O. Cayanan, E. Hendricks, M. Kucas, P. Otto, R. Rogers, C. R. Sampson, Z. Yu, 2018 : Recent Advances in Research and Forecasting of Tropical Cyclone Track, Intensity, and Structure at Landfall. *Tropical Cyclone Research and Review, 7(2), 85-105*.

- Rogers, R. F., K. Cheung, R. L. Elsberry, N. Kohno, M.-D. Leroux, P. Otto, The World Meteorological Organization Fourth International Workshop on Tropical Cyclone Landfall Processes (IWTCLP-IV) : A Summary. *Tropical Cyclone Research and Review, 7(2), 77-84*.

- Liou Y-A., L. Ji-Chyun, F. Chane-Ming, H. Jing-Shan, H. Ching-Yuang, C. Po-Kuan, and S. Jolivet, Remote Sensing of Typhoons in the Western Pacific Ocean, in Remote Sensing of the Asian Seas, Springer, sous presse.

- Chane Ming F., D. Vignelles, F. Jegou, G. Berthet, J-B. Renard, F. Gheusi and Y. Kuleshov, Gravity-wave effects on tracer gases and stratospheric aerosol concentrations during 2013 ChArMEx campaign, Special Issue : CHemistry and AeRosols Mediterranean EXperiments (ChArMEx), Atmos. Chem. Phys., 16, 8023–8042, doi : 10.5194/acp-16-8023-2016, 2016.

- Kuleshov Y., S. Choy, E. F. Fu, F. Chane-Ming, Y-A. Liou and A. G. Pavelyev, Analysis of Meteorological Variables in the Australasian Region Using Ground-and Space-based GPS Techniques, Atmos. Res., 276–289, doi : 10.1016/j.atmosres.2016. 02.021, 2016.

- Kafando P., F. Chane-Ming, and M. Petitdidier, Stratospheric variability of wave activity and parameters in equatorial coastal and tropical sites during the West African monsoon. Climate Dynamics, doi : 10.1007/s00382-015-2764-1, 2015.

- Chane Ming F., C. Ibrahim, C. Barthe, S. Jolivet, P. Keckhut, Y-A Liou and Y. Kuleshov, Observation and a numerical study of gravity waves during tropical cyclone Ivan (2008), Atmos. Chem. Phys., 14, 641-658, doi : 10.5194/acp-14-641-2014, 2014.

4) Couplage océan-atmosphère

PARTICIPANTS

C. Barthe, S. Bielli, J. Pianezze, P. Tulet (LACy), E. Cordier (UMS 3365), M.-N. Bouin, G. Cambon, S. Jullien et J.-L. Redelsperger (LOPS), E. Durand et J. Paul (MERCATOR)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Les échanges Océan-Vagues-Atmosphère (OVA) ne sont pas bien représentés dans les systèmes actuels de prévision numérique du temps, ce qui peut engendrer de grandes incertitudes dans les prévisions de la trajectoire et de l'intensité des cyclones tropicaux. Il est indispensable de réaliser un couplage 3D entre l'océan et l'atmosphère puisque l'océan constitue le carburant du cyclone tropical. Il est aussi primordial de bien reproduire le refroidissement induit sous les cyclones tropicaux puisqu'il réduit les flux d'enthalpie et l'intensité du système. D'autre part, comme les vagues représentent l'interface dynamique entre l'océan et l'atmosphère, elles sont impliquées dans les échanges air-mer et dans le cycle de vie du cyclone. Elles jouent un rôle à la fois sur les flux turbulents par modification du stress du vent et par génération de sprays marins.

Afin de mieux comprendre l'influence des interactions OVA sur la modélisation des cyclones tropicaux, un système entièrement couplé basé sur le modèle atmosphérique Meso-NH/SurfEx (alternativement AROME), le modèle de vagues WaveWatch3 et le modèle océanique CROCO (et alternativement NEMO-Indien) a été développé. Les développements techniques sont explicités dans la partie "Bilan en termes de modélisation".

Une partie de ce travail a été réalisée dans le cadre de l'ANR DiMe (ANR-10-IEED-0006-14) porté par France Energies Marines et qui se focalise sur les états de mer extrêmes, et du post-doc de J. Pianezze.

A) Apport d'un modèle océanique 3D pour la modélisation des cyclones tropicaux

Des simulations du cyclone tropical Bejisa sur 36 heures ont été effectuées avec AROME en mode couplé 3D avec NEMO et en mode couplé avec un modèle de couche de mélange océanique 1D pour étudier l'apport du couplage 3D par rapport à un couplage 1D tel qu'utilisé dans le modèle AROME Ocean-Indien. Les résultats montrent notamment que le refroidissement associé au passage du cyclone est bien mieux représenté en 3D qu'en 1D à la fois en terme d'intensité et de position/extension du maximum en comparaison avec les observations satellites (Figure 15). Un refroidissement maximum d'environ 2 degrés avec des valeurs maximales sur la gauche de la trajectoire est simulé avec le couplage 3D (Figure 15b) et qui est très comparable au refroidissement observé (Figure 15c). Le refroidissement est réduit d'environ un facteur 2 lorsqu'on utilise simplement le modèle de couche de mélange océanique 1D et la position du refroidissement maximum est différente (Figure 15a).

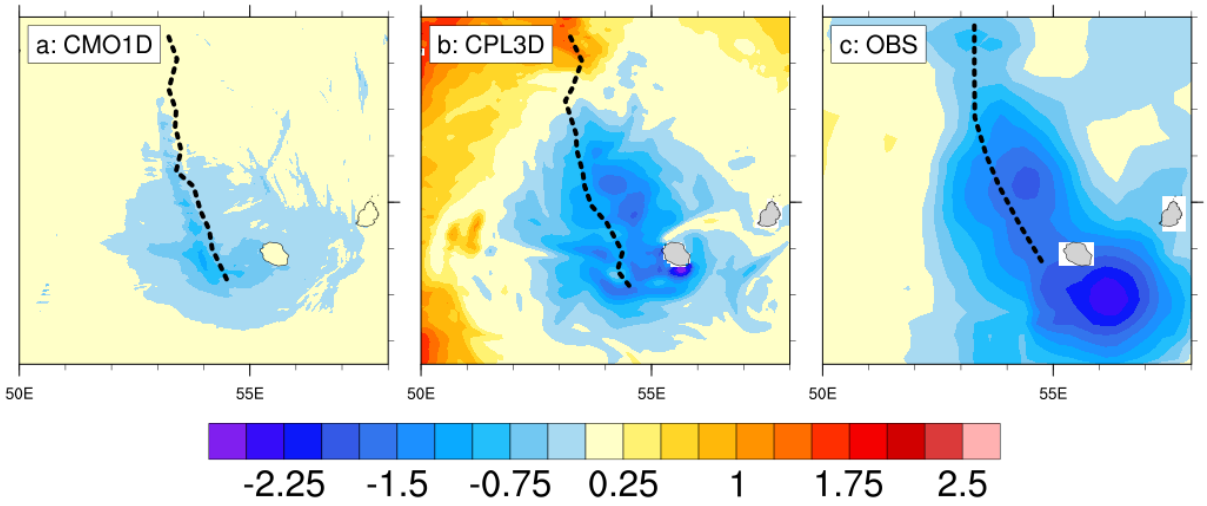

*Figure 15 : Différence de SST sur une période de 30h (entre 2 jan 12h et 1 jan 6h) pour **a)** CMO1D, **b)** CPL3D et **c)** données satellites (24h). La ligne noire pointillée montre la trajectoire simulée pour **a)** et **b)**, et la best track pour **c)**.*

Sur la verticale, le refroidissement associé au passage du cyclone est restreint à la thermocline (~40 m de profondeur) alors qu'il s'étend jusqu'à 300 m de profondeur avec un maximum de secondaire vers 200 m de profondeur dû à la prise en compte du phénomène d'upwelling dans l'océan 3D. Ce refroidissement se traduit par une réduction des flux de chaleur d'environ 15 à 20 % et dans une moindre mesure des flux de quantité de mouvement (Figure 16) dès 6 heures de simulation. Cela se traduit pas une baisse d'intensité, mais on ne simule pas de différence significative en terme de structure pour ce cyclone qui se déplace relativement vite et qui n'est pas très intense.

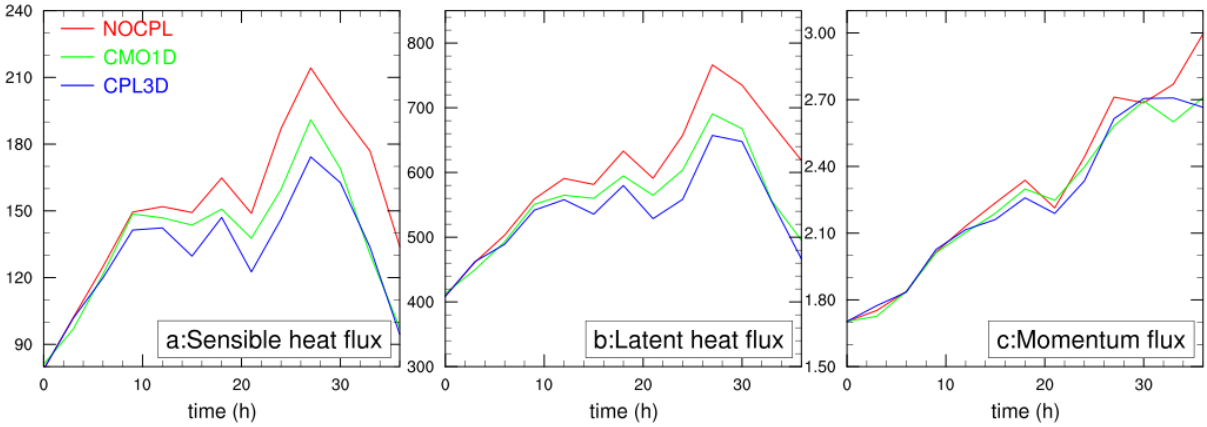

Figure 16 : Effet du couplage sur les flux de surface moyens dans un rayon de 200 km autour du centre du système Bejisa. En rouge pour la simulation avec AROME non couplé, en vert pour la simulation avec AROME couplé avec un modèle de couche de mélange océanique 1D et en bleu pour la simulation avec AROME couplé avec NEMO 3D.

B) Apport du couplage avec un modèle de vagues

Une simulation entièrement couplée du cyclone tropical Bejisa passé à proximité de La Réunion en janvier 2014 a été réalisée avec le système couplé Meso-NH/WW3/CROCO à 2 km de résolution horizontale. La réponse de la surface de l'océan au passage du cyclone est en accord avec la littérature : un refroidissement d'environ 2°C est attribué à un mélange vertical intense produit essentiellement par les courants qui sont maximums au niveau des quadrants gauches du cyclone, là où les vents le sont aussi. La hauteur significative des vagues simulée par le système couplé atteint plus de 8 m à l'avant du cyclone, au niveau du mur de l'oeil, là où l'effet du déplacement du cyclone se cumule avec l'augmentation du fetch des vagues. Elle est en bon accord avec les bouées proches de La Réunion et avec les satellites altimétriques.

Des expériences de sensibilité, utilisées pour mettre en évidence l'impact du couplage avec un modèle de vagues, montrent un effet limité sur la trajectoire, l'évolution de l'intensité et les flux de surface turbulents du cyclone tropical. Par contre, lorsqu'on intègre une paramétrisation de l'émission des aérosols marins fonction du vent en surface, de la hauteur significative des vagues, de la température et de la salinité en surface, il est montré que l'utilisation d'un système entièrement couplé OVA est essentielle pour obtenir des émissions cohérentes de sels marins (Figure 17). Le couplage en ligne avec un modèle de vagues permet de co-localiser l'émission de sprays marins avec le maximum de champ de vent et de hauteur significative de vagues (Figure 17a). L'utilisation d'un champ de vagues non cohérent avec les champs atmosphériques soit homogénéise les émissions d'aérosols marins (Figures 17b, 17c et 17d), soit positionne mal le maximum d'émission (Figure 17f). Le couplage OVA est donc primordial pour reproduire correctement l'impact des vagues sur les flux turbulents de chaleur et de quantité de mouvement, et d'aérosols marins, principaux noyaux de condensation nuageuse en atmosphère maritime propre.

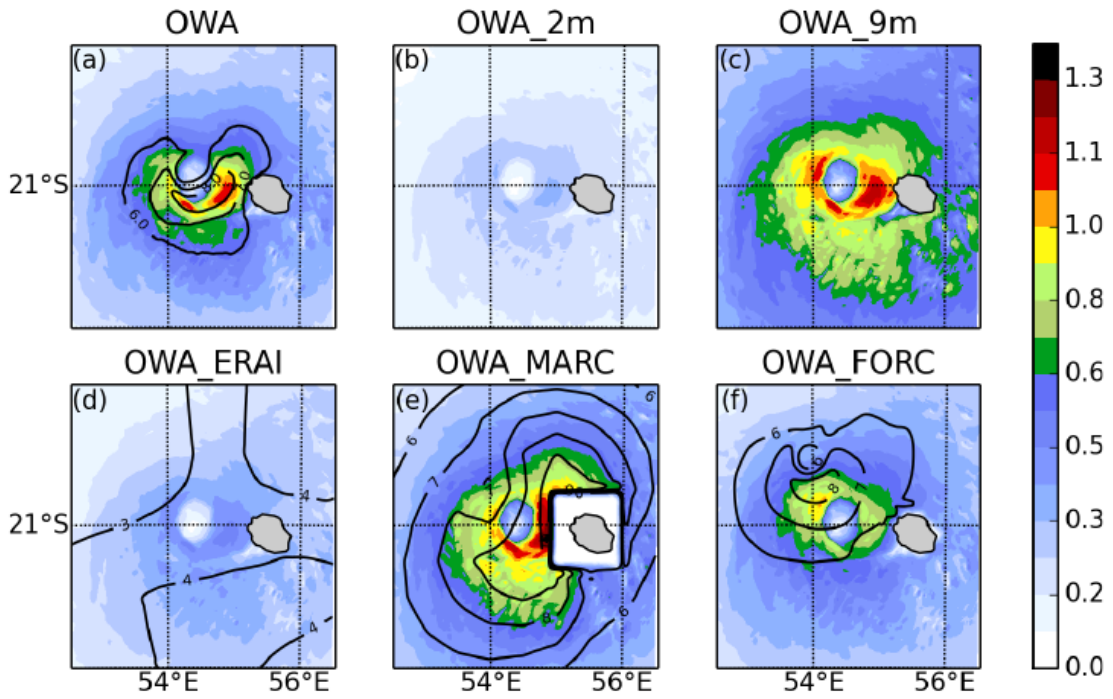

*Figure 17 : Flux instantané net total d'aérosols marins (µg m−2 s−1, couleurs) le 2 janvier à 06 UTC pour les simulations **(a)** OWA, **(b)** OWA_2m, **(c)** OWA_9m, **(d)** OWA_ERAI, **(e)** OWA_MARC et **(f)** OWA_FORC. Toutes les simulations sont des simulations couplées océan-vagues-atmosphère, mais l'origine du champ de vagues est différente. Elles ont été réalisées respectivement avec le couplage complet (OWA), avec un champ de vagues homogène, constant et égal à 2 m (OWA_2m) et 9 m (OWA_9m), avec un champ de vagues issu d'ERA-Interim (OWA_ERAI) ou des analyses MARC globales (OWA_MARC), et issu d'un couplage off-line de WW3 (OWA_FORC). Les contours noirs en **(d)** correspondent à des hauteurs significatives de vagues de 3.0, 3.5 et 4.0 m. En **(a)**, **(e)** et **(f)**, ils correspondent à des hauteurs significatives de vagues de 6, 7 et 8 m. Tiré de Pianezze et al. (2018).*

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Voldoire A., B. Decharme, J. Pianezze, C. Lebeaupin Brossier, F. Sevault, L. Seyfried, V. Garnier, S. Bielli, S. Valcke, A. Alias, M. Accensi, F. Ardhuin, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, S. Faroux, H. Giordani, F. Léger, P. Marsaleix, R. Rainaud, J.-L. Redelsperger, E. Richard, and S. Riette, 2017 : SURFEX v8.0 interface with OASIS3-MCT to couple atmosphere with hydrology, ocean, waves and sea-ice models, from coastal to global scales. Geosci. Model Dev., 10, 4207-4227, https://doi.org/10.5194/gmd-10-4207-2017.

- Pianezze, J., C. Barthe, S. Bielli, P. Tulet, S. Jullien, G. Cambon, O. Bousquet, M. Claeys, and E. Cordier, 2018 : A new coupled ocean-waves-atmosphere model designed for tropical storm studies : example of Tropical Cyclone Bejisa (2013-2014) in the south-west Indian ocean. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10, doi : 10.1002/2017MS001177, 2018.

5) Étude des systèmes convectifs de moyenne échelle

PARTICIPANTS

C. Barthe, O. Bousquet, C. Bovalo, M. Claeys, J.F. Ribaud, S. Bielli, T. Hoarau, A. Réchou, P. Tulet, N. Yu , J. Durand (LACy), J.-P. Pinty, E. Defer, S. Soula et V. Noël (LA), J. Delanoë (LATMOS), B. Pohl (Biogéosciences/CRC), B. Morel (LE2P)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

La Réunion (21°S, 55°E) est régulièrement impactée par de fortes précipitations qui peuvent avoir pour conséquence des crues et des inondations. La Réunion détient la majorité des records de précipitation entre 12 heures (1170 mm) et 15 jours (6083 mm) (http://wmo.asu.edu/). Ces records sont la conséquence à la fois d'un relief très escarpé (sommets supérieurs à 3000 m) et du passage régulier à proximité de l'île de tempêtes ou cyclones tropicaux majeurs avec de fortes accumulations de pluie.

En termes de modélisation, en raison du relief escarpé de l'île, il est indispensable de cibler la résolution horizontale du modèle afin de bien reproduire l'orographie et les circulations sur La Réunion, tout en ayant un domaine suffisant grand pour reproduire l'environnement de grande échelle du système précipitant.

De plus, la représentation de la microphysique nuageuse dans les modèles numériques est maintenant reconnue comme jouant un rôle majeur dans l'intensité, la structure et les précipitations associées aux cyclones tropicaux à travers la modification du profil de chaleur latente. Des développements dans le schéma microphysique à 2 moments LIMA sont donc en cours dans le cadre du projet LEFE/IMAGO LIMA-TROPIC et du programme ReNovRisk CC. Ils sont réalisés dans le cadre de la thèse de T. Hoarau (2014-2018) et le post-doc de M. Claeys (2017-2019, ReNovRisk-C3). Pour progresser dans la prévision de l'intensité des cyclones tropicaux et dans la distribution spatio-temporelle des précipitations, il faut aussi prendre en compte l'effet des aérosols sur la microphysique et la thermodynamique. Ce point est abordé dans la thématique transverse "Interactions aérosols-nuages".

D'autre part, du fait de ses caractéristiques géomorphologiques, La Réunion abrite de nombreux microclimats. L'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations est une variable importante qui contraint la structure du couvert végétal et du réseau hydrique. Cependant l'évolution de cette variable est fortement méconnue. Il est donc indispensable de caractériser la variabilité spatio temporelle des pluies à très fine échelle sur l'île de La Réunion. Ce travail s'inscrit dans les programmes interdisciplinaires EROVEG (EROsion – VEGétation), financé par le Ministère de l'Outre-Mer, et VARPLUIES 1 et 2, financé par la Fédération OMNCG.

Enfin, le lien étroit entre dynamique, microphysique et activité électrique des systèmes convectifs peut être exploité pour mieux comprendre leurs variations d'intensité et leur structure. Ce thème a été fait l'objet des thèses de C. Bovalo (2010-2013) et J.-F. Ribaud (2012-2015).

A) Variabilité spatio-temporelle des précipitations à La Réunion

MODÉLISATION

La capacité d'un modèle de moyenne échelle à représenter précisément la distribution spatio-temporelle des précipitations est l'une des conditions nécessaires à l'obtention de simulations et de prévisions réalistes. L'objectif du post-doc de N. Yu (2012-2014), réalisé dans le cadre du projet PRECYP financé par la fondation MAIF, était ainsi d'évaluer la capacité du modèle Meso-NH à reproduire la distribution spatio-temporelle des précipitations sur La Réunion pour des pluies extrêmes. Le cas d'étude choisi est l'épisode de fortes pluies du 27 au 30 janvier 2011. Sur cette période, il est tombé plus d'un mètre d'eau sur les Hauts de Sainte-Marie (1076 mm) et de Saint-Denis (1013 mm). Près du littoral, les cumuls atteignent des valeurs que l'on observe en moyenne tous les 20 ans. Des simulations de cet épisode de fortes pluies ont ainsi été réalisées en faisant varier notamment la taille de la maille horizontale (4, 2, 1 et 0.5 km). A 4 km et 2 km de maille horizontale, les résultats sont similaires et présentent une mauvaise localisation du maximum de pluies (900 mm sur le volcan) et une forte sous-estimation des pluies dans le nord de l'île. Les résultats s'améliorent nettement au passage à 1 km de maille horizontale avec la disparition du pic sur les flancs du volcan et une relocalisation réaliste du maximum sur les hauts du nord de l'île (Figure 18). Lorsque la maille horizontale est trop lâche, le modèle ne reproduit pas la zone froide induite par évaporation des précipitations à l'est de La Réunion le 30 janvier. Le contraste de température induit alors une brise de terre qui, lorsqu'elle converge avec le flux dominant, déclenche la convection au large de La Réunion, produisant des précipitations confirmées par le radar. A 4 km et 2 km de maille horizontale, cette zone de convergence n'est pas présente et la convection est déclenchée par soulèvement orographique sur les pentes de l'île.

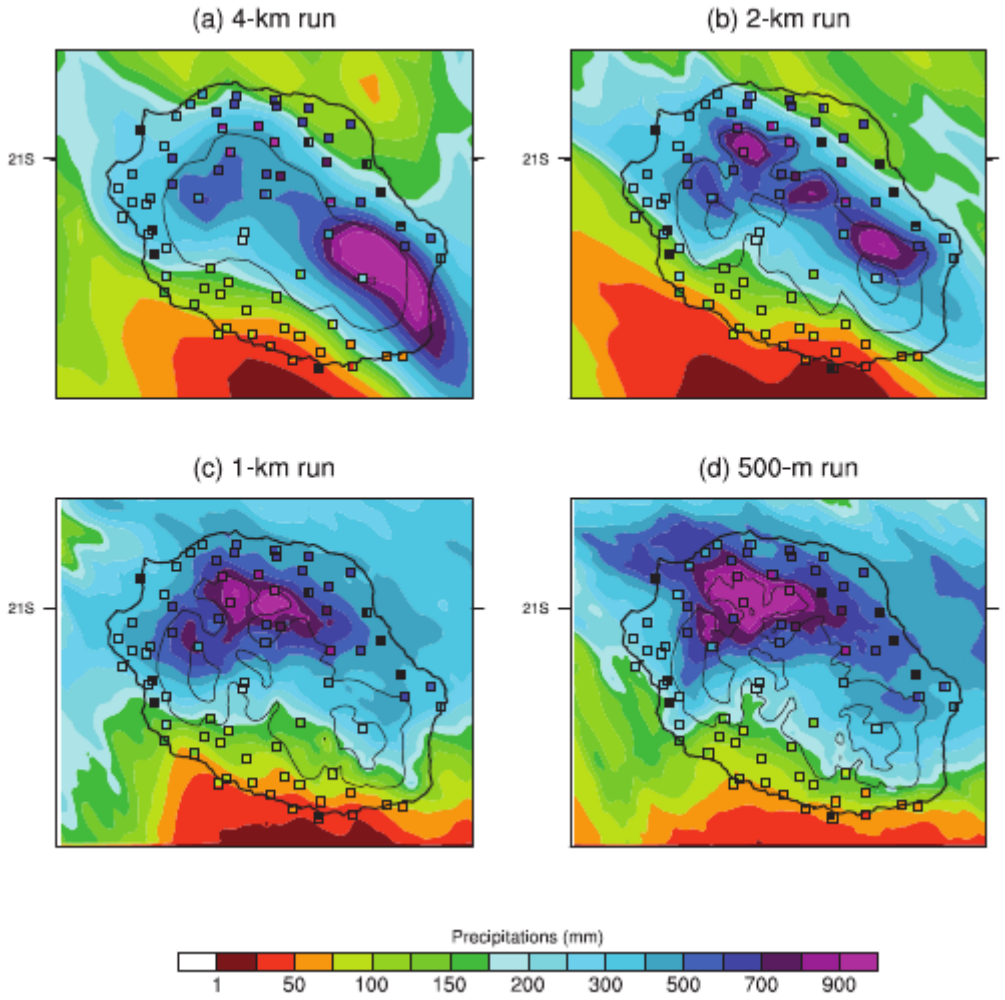

*Figure 18 : Cumul de précipitations sur 4 jours (mm) produit par les simulations à **(a)** 4 km, **(b)** 2 km, **(c)** 1 km et **(d)** 500 m de résolution (couleurs), superposé aux mesures des pluviomètres (carrés colorés). Les contours noirs représentent les altitudes 1000 et 2000 m vues par le modèle à différentes résolutions. Tiré de Yu et al. (2014).*

B. Pohl (Biogéosciences/CRC) et B. Morel (LE2P) ont également initié une étude sur la régionalisation des pluies à haute résolution sur l'île de La Réunion. Des simulations d'ensemble du cyclone tropical Ando (2000-2001) sur le sud-ouest de l'océan Indien ont été réalisées avec le modèle WRF. Grâce à 4 domaines emboîtés, à la fois la trajectoire complète du système sur le bassin et les précipitations à haute résolution sur l'île sont reproduites. Le modèle est forcé et rappelé vers les ré-analyses ERA-Interim pendant les premiers (un à six) jours du cycle de vie du système. Le *nudging* est stoppé à différentes dates et contraint donc totalement ou partiellement le cycle de vie du système. Le modèle montre une capacité raisonnable à simuler les précipitations locales à partir du moment où le système approche de La Réunion à une distance et un azimut réalistes. Le modèle est capable de reproduire les extrêmes de précipitations observées (> 1200 mm) et leur distribution sur les hauts de l'île (Figure 19). Par contre, les caractéristiques de petite échelle sont beaucoup moins réalistes. On montre que la vitesse du vent et la direction du flux en amont de l'île sont les principaux paramètres pilotant ces incertitudes et erreurs. Ils constituent un point clé pour l'étude des impacts locaux des cyclones sur un terrain aussi complexe.

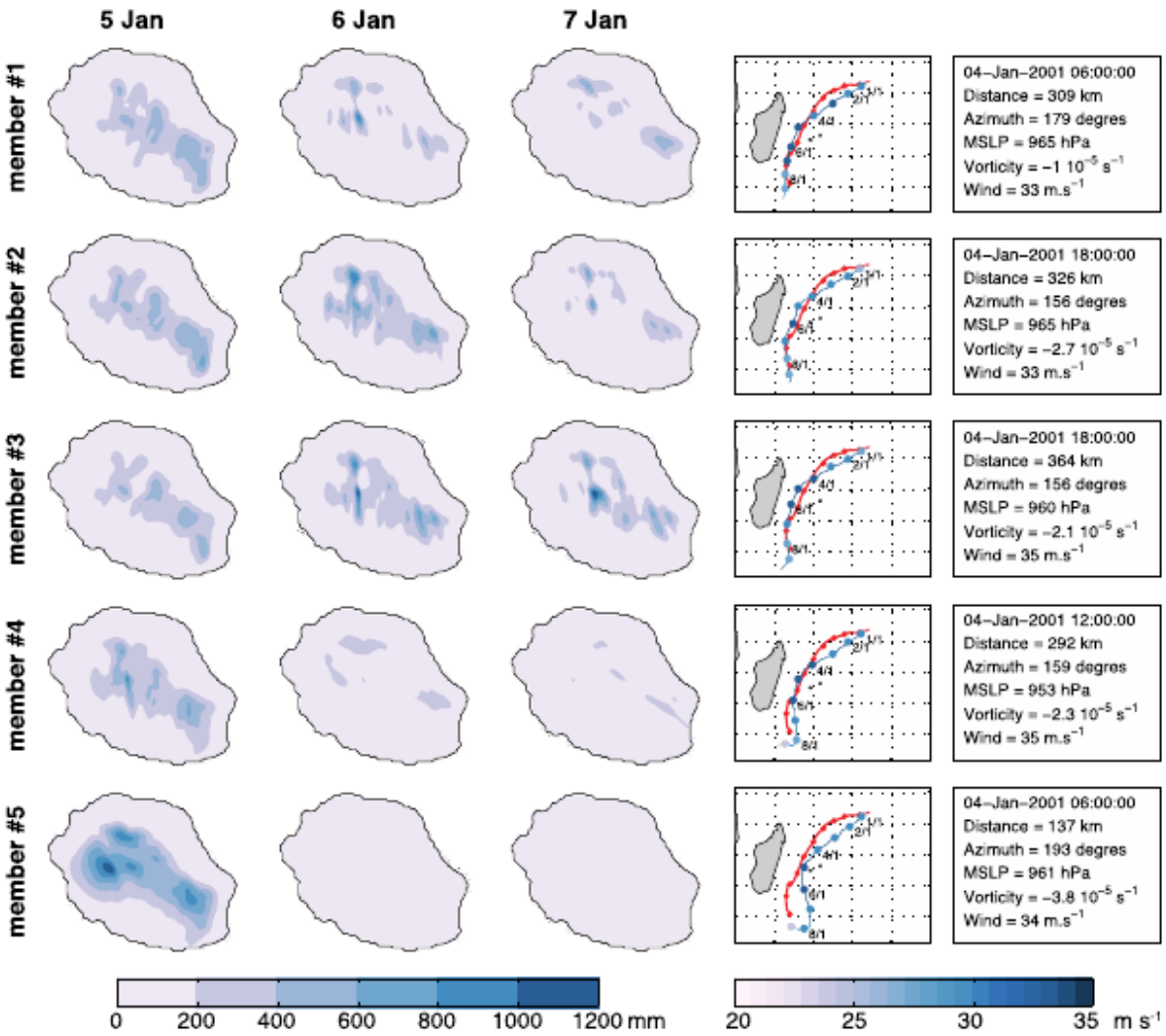

Figure 19 : simulations d'ensemble WRF. A gauche : taux de précipitations journalières (mm) sur La Réunion pour (de gauche à droite) le 5, 6 et 7 janvier 2011, et pour (de haut en bas) les 5 membres, simulés par WRF dans le domaine 4. Les panneaux de droite montrent les trajectoires et intensités simulées pour chaque membre, ainsi que des statistiques associées au cyclone lors de son passage au plus près de La Réunion.

OBSERVATIONS

Dans le domaine des observations, une première étude a été réalisée à l'exutoire du bassin versant de la Rivière des Pluies par Réchou et al. (2014). A l'aide de données radar UHF (Ultra Haute Fréquence) sur une année (2009-2010), il a été mis en évidence une variabilité des pluies en fonction de la saison et de l'altitude. Les précipitations en hiver sont importantes en dessous de 1500 m étant donné que le développement vertical des nuages est bloqué par la couche d'inversion des alizés. Durant l'été austral, les pluies s'étendent jusqu'à au moins une altitude de 3000 m (altitude retenue en dessous de laquelle les données radars sont fiables sur une longue période), mais deviennent fortement variables au-dessus de 1500 m (Figure 20). En

cette saison, les régimes d'alizés peuvent alterner avec des dépressions. La présence de l'inversion des alizés peut conduire à une diminution des pluies en dessus de 1500 m, tandis que des pluies sur toute la couche atmosphérique jusqu'à des altitudes élevées (> 2500 m) sont associées à des systèmes dépressionnaires.

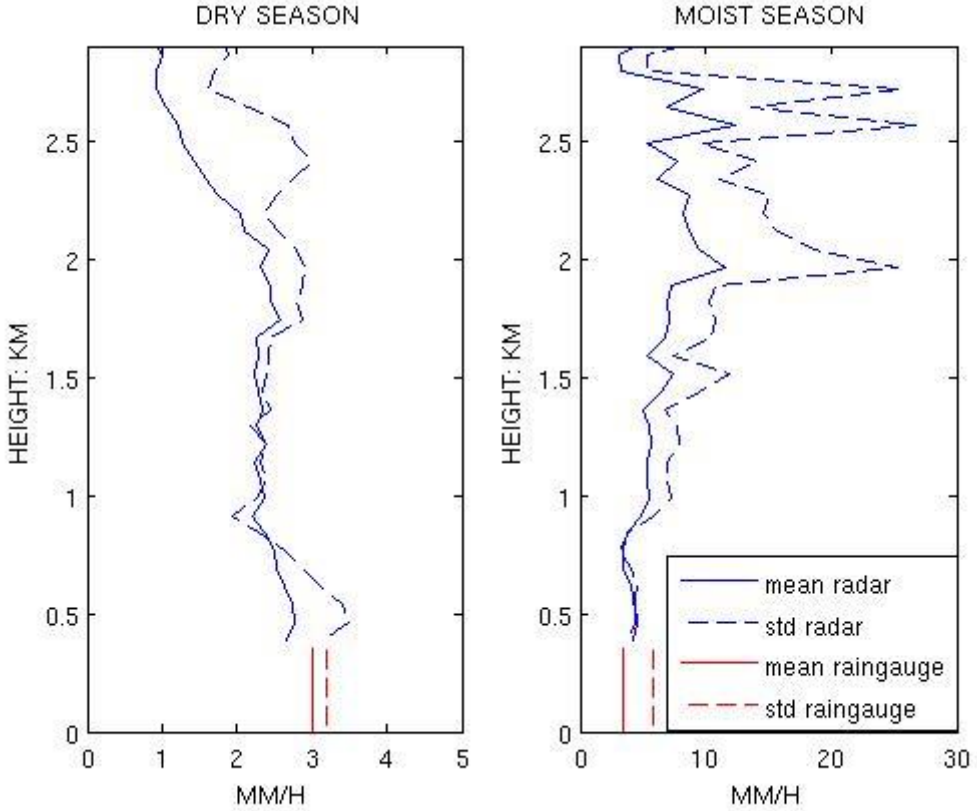

*Figure 20 : Profil vertical du taux de pluies moyen(trait plein) et de son écart type(trait continu) à partir des données radar UHF pendant **a)** la saison sèche et **b)** la saison des pluies. Les lignes rouges correspondent aux estimations du pluviomètre localisé à Gillot, c.à.d à proximité du radar UHF.*

Ces travaux ont été suivis d'une autre étude inscrite dans le cadre du projet interdisciplinaire EROVEG (érosion – végétation ; financement Ministère de l'Outre-mer) ayant pour ambition de mieux comprendre l'impact des précipitations sur l'érosion à l'échelle de La Réunion. Cette analyse, basée sur l'utilisation de données pluviométriques et de réanalyses ERA-INTERIM sur la période 1979-2015 (37 ans), a permis d'identifier différents régimes précipitants en fonction des propriétés des vents dominants à l'échelle du bassin océanique sur 4 périodes significatives : la saison des pluies (de décembre à mars, été austral) est caractérisée par des alizés faibles et une hauteur d'inversion élevée, deux saisons intermédiaires (avril à mai, et une saison sèche de septembre à novembre) sont caractérisées par une hauteur d'inversion plus basse, et la saison d'hiver (de juin à août) est caractérisée par des alizés plus forts et une hauteur d'inversion moyenne. La figure 21 présente un exemple de précipitations journalières durant les quatre saisons au cours d'une période couvrant 37 années de données pluviométriques.

Cette variabilité saisonnière a ensuite été affinée par une analyse statistique des différents types de temps associés : pour chaque saison, ces régimes sont définis par une distribution spatiale

des pluies caractéristique. Nous remarquons que le relief de l'île contribue à créer des conditions « au vent » et « sous le vent » en fonction du secteur du flux dominant. Les forts reliefs de l'île interagissent avec les systèmes de précipitations et introduisent une variabilité à petite échelle des précipitations qui vient compliquer les schémas définis en fonction des types de temps et de la saison. Enfin, les régimes de temps sont fortement marqués par la présence ou non d'inversion des alizés, ces derniers apportent un contraste important dans les hauteurs de pluie enregistrées.

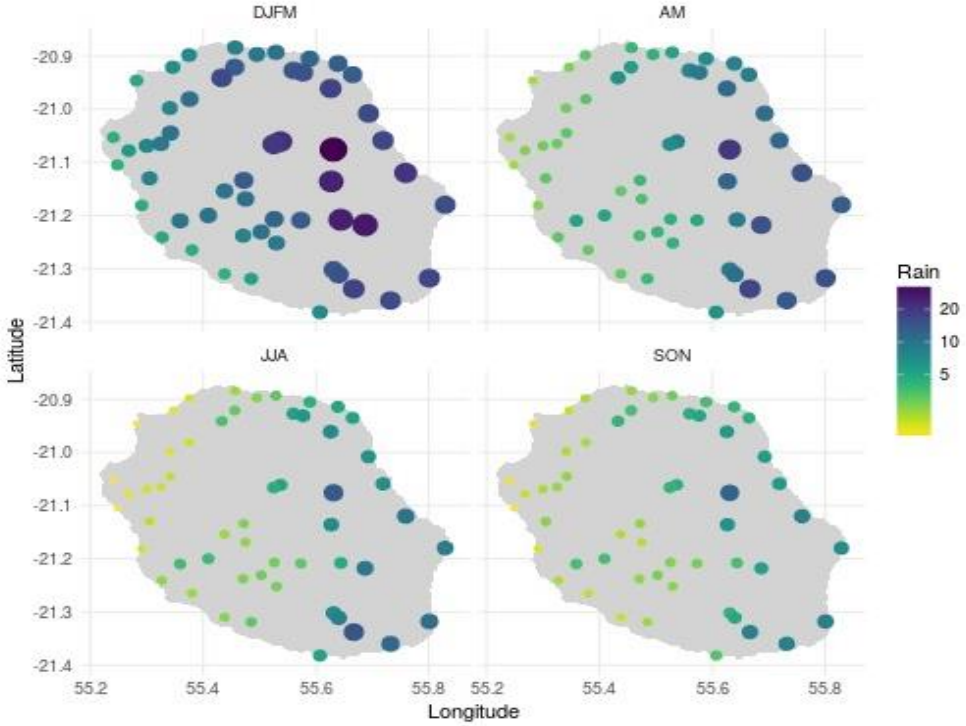

Figure 21 : Distribution de la variabilité journalière des pluies à La Réunion pour les 4 saisons (en haut à gauche décembre à mars; en haut à droite avril-mai; en bas à gauche juin à août; en bas à droite septembre à novembre). Données issues du réseau de pluviomètres de Météo-France. Les pluies (couleurs) sont en représentation logarithmique (moyenne journalière en mm/jour) et la taille des ronds indique aussi la quantité des pluies (des grands ronds correspondent à une forte quantité de pluies journalières).

Les données des radars permettent d'étudier les pluies à La Réunion avec une résolution de 1 km^2. Elles montrent une forte variabilité spatiale au niveau des cirques et de leurs remparts en fonction du type de temps. Toutefois, les zones présentant ces fortes variabilités spatiales ne sont pas équipées de pluviomètres et de stations météorologiques, ce qui ne permet pas de valider ces variations. Répondre à cette problématique constitue l'un des objectifs spécifiques des projets OMNCG VARPLUIES 1 et 2. Cette étude pluridisciplinaire (LACy, LGSR et PBVMT) a été initiée afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des pluies à fine échelle au sein du bassin versant de la Rivière des Pluies (site expérimental particulièrement bien instrumenté car site principal de l'Observatoire ERORUN, Observatoire de l'EROsion à La RéUNion) pour en connaître la réponse hydrologique en fonction de la végétation. Pour cela, des pluviomètres ont été ajoutés aux endroits où la variabilité radar est forte, et un disdromètre Parsivel a été placé au bas de la Rivière des Pluies afin d'affiner la loi Z-R pour différents types de temps. L'analyse de ces observations est actuellement en cours.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Yu, N., C. Barthe, and M. Plu, 2014 : Evaluating intense precipitation in high-resolution numerical model over a tropical island : impact of model horizontal resolution. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 2, 999-1032.

- Pohl, B., B. Morel, C. Barthe and O. Bousquet, 2016 : Regionalizing rainfall at very high resolution over La Réunion island using a regional climate model : A case study for tropical cyclone Ando. Mon. Wea. Rev, 144, 4081-4099, doi : 10.1175/MWR-D-15-0404.1.

- Réchou, A., T. Narayana Rao, O. Bousquet, M. Plu, and R. Decoupes, 2014 : Properties of rainfall in a tropical volcanic island deduced from UHF wind profiler measurements, Atmos. Meas. Tech., 7, 409-418, doi : 10.5194/amt-7-409-2014.

- Réchou, A., et al.: Spatio-temporal variability of rainfall in a high tropical island : patterns and large-scale drivers in Reunion island, QJRMS, soumis.

B) Signature électrique des systèmes convectifs

Depuis le début des années 2000, des études suggèrent que les éclairs pourraient être considérés comme des marqueurs des phases d'intensification des cyclones tropicaux. Or, malgré le nombre croissant d'études sur ce sujet, il n'existe toujours aucun consensus concernant la distribution spatiale des éclairs dans les cyclones tropicaux. Notre étude climatologique est partie du constat que les travaux précédents étaient réalisés près des côtes, là où les réseaux de détection des éclairs régionaux sont efficaces, souvent sur des systèmes exceptionnels en terme d'intensité, et que les paramètres utilisés pour décrire la structure du système étaient purement arbitraires. Nous avons réalisé l'analyse conjointe des données éclairs du WWLLN (dont l'une des antennes est installée à l'Observatoire du Maïdo) à l'échelle globale et des données *best-track* du Centre Météorologique Régional Spécialisé (CMRS) La Réunion. Le bassin Indien sud-ouest a été divisé en 3 régions pour traiter séparément les systèmes qui peuvent être influencés par les terres immergées : l'océan ouvert, le Canal du Mozambique et la région à moins de 400 km de la côte est malgache. Afin de tenir compte de la variabilité de la taille des systèmes, les seuils pour la définition du mur de l'œil, des bandes internes et externes sont basées sur des paramètres analysés issus des données *best-track* : le rayon de vent maximum et le rayon de la dernière isobare fermée. Grâce à cette approche originale, on montre que sur l'océan ouvert, les éclairs sont prédominants dans le mur de l'œil quelle que soit l'intensité du système, alors que près des côtes, l'activité électrique se répartit sur l'ensemble du système (Figure 22).

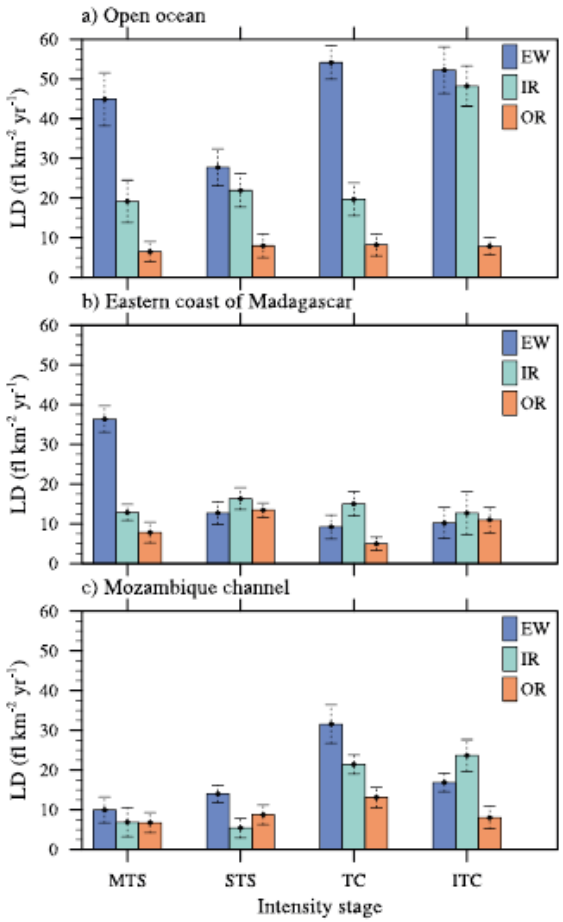

Figure 22 : Distribution radiale de la densité d'éclairs (flash km−2 yr−1) en fonction du stade d'intensité (MTS pour tempête tropicale modérée, STS pour forte tempête tropicale, TC pour cyclone tropical, and ITC pour cyclone tropical intense) pour ***(a)*** *l'océan ouvert,* ***(b)*** *la partie océanique à l'est de Madagascar, et* ***(c)*** *le Canal du Mozambique. Les barres bleues, vertes et oranges correspondent au mur de l'oeil (EW), aux bandes internes (IR) et aux bandes externes (OR). Les barres d'erreur représentent l'écart type. Tiré de Bovalo et al. (2014).*

Etant donné le manque d'observations dans le bassin sud-ouest Indien, il est difficile de déterminer les processus physiques régissant l'électrisation des cyclones tropicaux. Cette analyse est rendue possible par l'utilisation d'un modèle de nuage résolu possédant un schéma électrique explicite adapté pour une utilisation sur des grandes grilles avec une orographie complexe. Le schéma électrique explicite de Meso-NH (nommé CELLS pour Cloud ELectrification and Lightning Scheme) a été adapté pour une utilisation optimisée pour de grands domaines caractérisés par un relief complexe, dans le cadre du projet LEFE/IMAGO "ELECTRO" porté par C. Barthe sur la période 2012-2014. Afin d'analyser la structure microphysique et électrique du mur de l'oeil d'un cyclone tropical et les processus clés liés au déclenchement des éclairs dans un système aussi complexe, deux simulations d'un vortex cyclonique en contexte idéalisé (pour s'affranchir de l'influence de l'environnement) ont été réalisées avec Meso-NH couplé au schéma électrique CELLS : une simulation de référence utilisant un schéma microphysique à 1 moment, et une simulation pour laquelle les paramètres utilisés pour décrire les relations masse-diamètre et vitesse-diamètre du graupel ont été modifiés de façon à réduire sa vitesse de chute (v_g). On montre que le fait de diminuer v_g produit un cyclone moins intense avec un rayon de vent maximum plus grand, à des graupels dispersés

horizontalement sur une plus grande région par la circulation secondaire, et à une inclinaison plus prononcée du mur de l'œil produisant des pôles de charges qui ne sont pas alignés sur la verticale et donc un champ électrique vertical réduit (Figure 23). Ceci, ajouté à la réduction des taux de transfert de masse et de charge qui utilisent les relations masse-diamètre et vitesse-diamètre, réduit dramatiquement le taux d'éclairs dans la simulation où v_g est réduite.

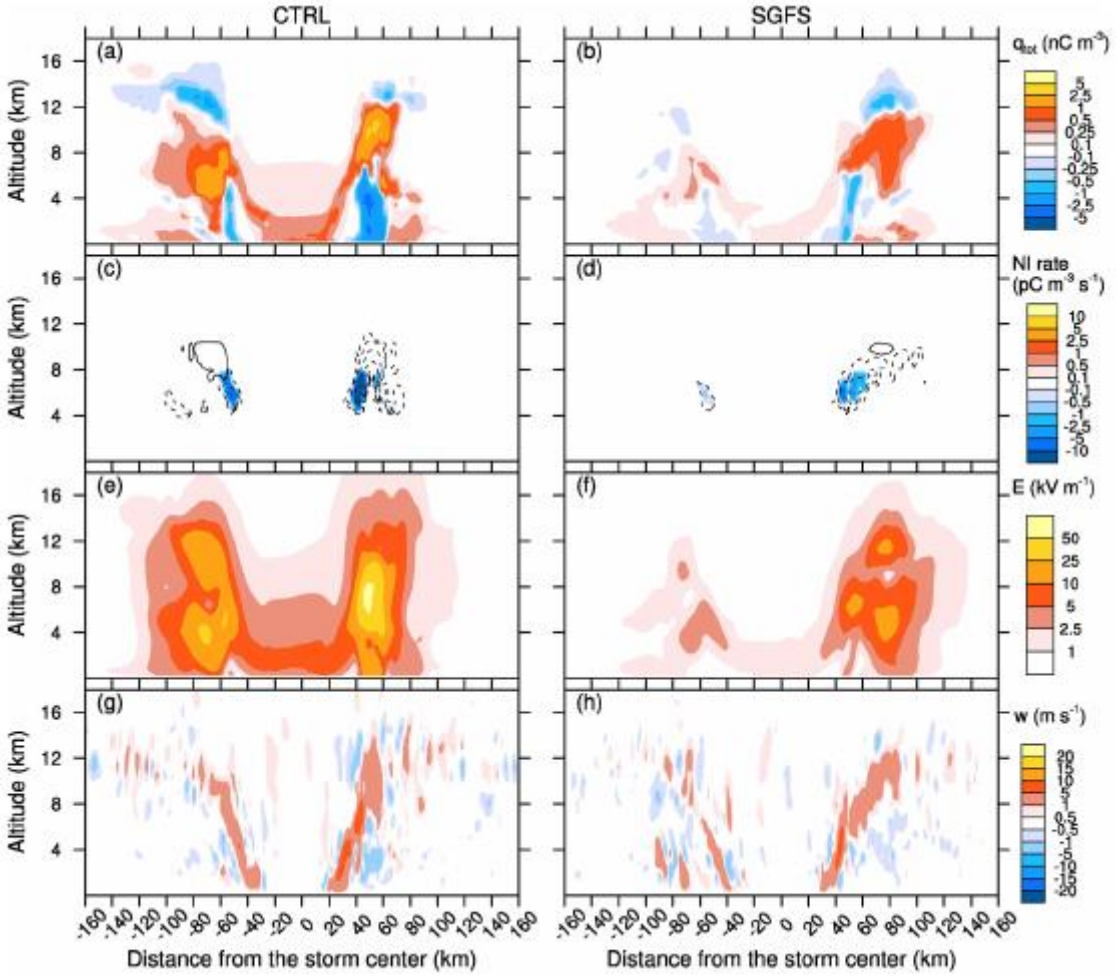

Figure 23 : coupe verticale passant par le centre du système et orientée ouest-est de la densité de charge totale (nC m-3), du taux de transfert de charge non-inductif (pC m-3 s-1), du champ électrique (kV m-1) et de la vitesse verticale (m s-1). Sur la 2ème ligne, les contours en traits tiretés et pleins représentent les taux de transferts de charge à -10, -5, -1 et -0.1 pC m−3 s−1 et à 0.1, 1, 5 et 10 pC m−3 s−1, respectivement. Tiré de Barthe et al. (2016).

Cependant, en raison du coût de calcul lié à l'utilisation des schémas électriques explicites, il n'est pas envisageable d'utiliser de tels schémas dans les modèles opérationnels. Ainsi, on a recherché des paramètres microphysiques et/ou dynamiques, disponibles dans tous les modèles, qui pourraient servir de proxys pour diagnostiquer l'activité électrique totale du nuage. Des simulations d'une dizaine d'orages de différents types ont été réalisées avec Meso-NH et son module électrique CELLS. Un certain nombre de paramètres et le taux d'éclairs sont enregistrés toutes les 5 minutes dans chaque cellule orageuse. A travers cette approche modèle-modèle qui permet de garder la cohérence entre la dynamique, la microphysique et l'électricité,

on a montré que la masse de graupel représente le mieux l'activité électrique totale et localise bien les maxima de densité d'éclairs (Figure 24).

A noter que Meso-NH est l'un des seuls modèles de nuage à posséder un schéma électrique et donc à être capable de simuler des orages électrisés dans un contexte météorologique réel. A. Morais, doctorant à l'INPE (Sao Paulo, Brésil) a effectué un séjour de 1 mois au LACy en 2017 pour se former à l'utilisation du modèle Meso-NH couplé au module électrique CELLS et une partie de sa thèse est dédiée à l'utilisation de ce modèle dans le cadre de la campagne CHUVA. Nous collaborons aussi avec C. Schultz (NASA-MSFC) et W.-K. Tao (NASA-GSFC) afin de porter le schéma CELLS dans NU-WRF.

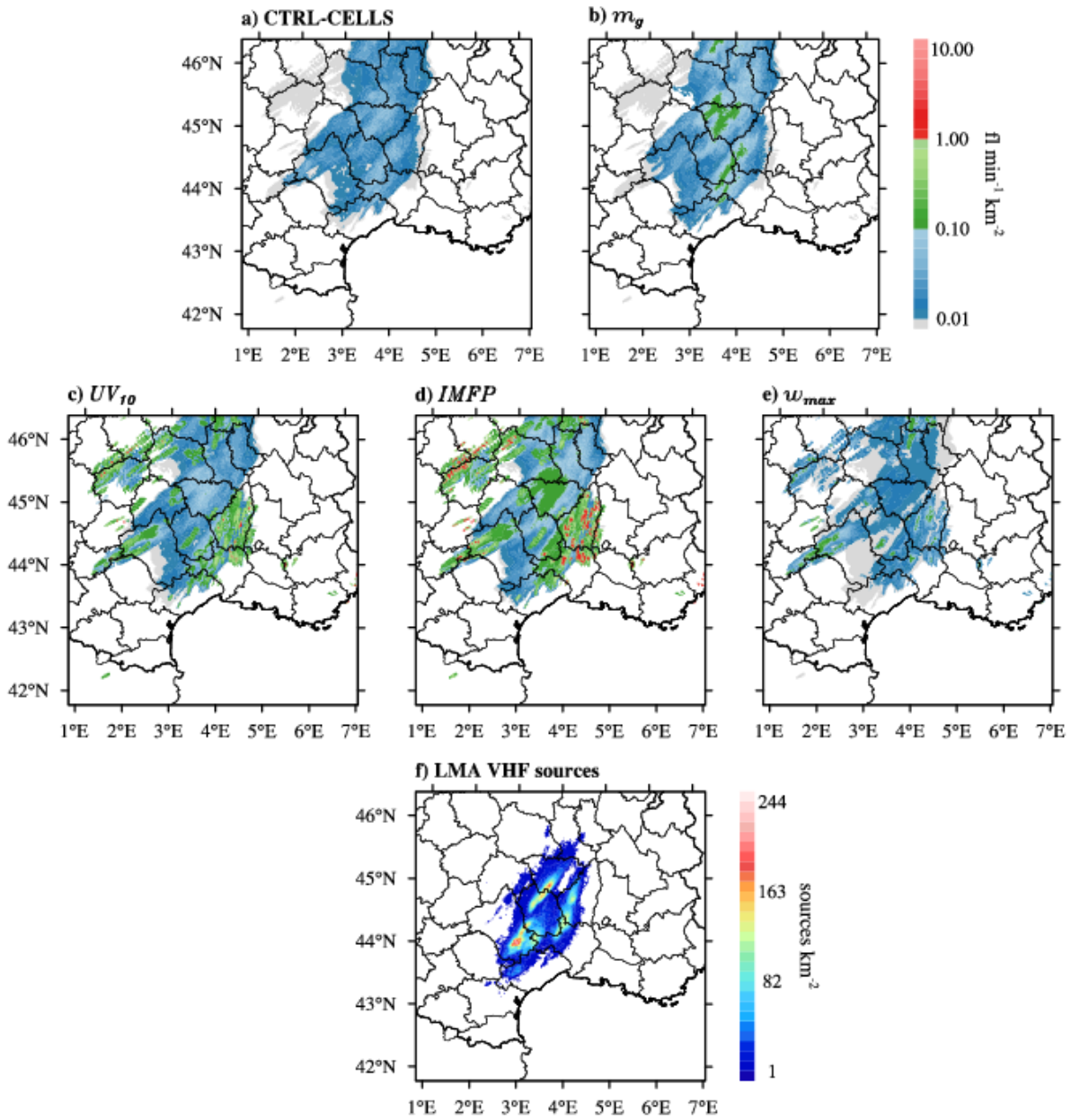

*Figure 24 : Cartes de densité d'éclairs (fl. min-1 km-2) obtenues **a)** explicitement avec le schéma électrique CELLS (CTRL), en utilisant **b)** la masse de graupel mg, **c)** le volume d'updraft avec w > 10 m s-1 UV10, **d)** le produit des flux de masse de*

*glace IMFP et **e)** le maximum d'updraft wmax. La zone grise représente la région impactée par des cellules convectives détectées par le modèle. Les valeurs négatives sont mises à 0. La densité de sources VHF issues du LMA (en sources km-2) est calculée sur la grille Meso-NH **(f)**. Cette variable représente l'extension spatiale de l'activité électrique observée.*

L'activité électrique au sein des systèmes convectifs des moyennes latitudes a également fait l'objet de nombreuses études basées sur l'exploitation de la synergie entre des mesures obtenues au moyen de radars et de différents réseaux de détection des éclairs pendant la campagne HyMeX. On pourra notamment citer les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de J.-F. Ribaud (2012-2015) qui ont mis en exergue l'importance des processus microphysiques dans l'électrisation des nuages d'orage, et souligner le rôle important de la topographie sur l'activité électrique. L'analyse des données issues de radars polarimétriques et d'un imageur d'éclair 3D (LMA) collectées pendant l'épisode fortement précipitant du 24 septembre 2012 ("golden case" d'HyMeX) a notamment permis de quantifier l'importance du milieu microphysique sur le déclenchement et la propagation des éclairs, respectivement répartis à hauteur de 99 % et 93 % dans les zones convectives. Il a également été mis en évidence que les deux catégories microphysiques les plus importantes pour la propagation (P) et de déclenchement (D) des éclairs étaient le graupel (D = 70 %; P = 58 %) et les cristaux de glace (D = 22 %; P = 33 %).

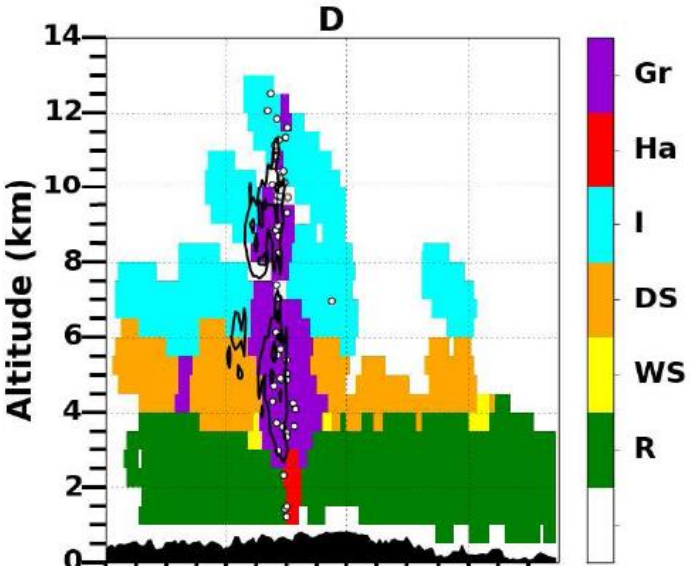

Figure 25 : Distribution verticale des espèces microphysiques (Gr: graupel, Ha: Hail, I : ice, DS: dry snow, WS: wet snow, R: rain) et des zones de déclenchement des éclairs (ronds) dans une ligne de grain observée pendant HyMeX . (d'après Ribaud et al. 2016).

Si la pluie et la neige n'apparaissent pas comme des milieux privilégiés pour le déclenchement et la propagation des éclairs, l'analyse des observations collectées pendant HyMeX montre que la grêle joue vraisemblablement un rôle non négligeable sur l'activité électrique en altérant les processus non-inductifs. Par ailleurs, l'éjection de particules chargées à très haute altitude dans les zones convectives a également pour effet de disséminer et de transférer en partie les charges des zones convectives vers les zones stratiformes, diminuant ainsi le champ électrique global et, par conséquent, l'activité électrique. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude offrent la possibilité d'évaluer des schémas électriques tels que le schéma CELLS, en évaluant

le réalisme des ratios sur le déclenchement et la propagation des éclairs simulé en fonction du milieu microphysique.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Lagouvardos, K., V. Kotroni, E. Defer and O. Bousquet, 2013 : Study of a heavy precipitation event over southern France, in the frame of HYMEX project : Observational analysis and model results using assimilation of lightning. Atmospheric Research, 134, 45-55.

- Bovalo, C., C. Barthe, N. Yu, and N. Bègue, 2014 : Lightning activity within tropical cyclones in the south-west Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 119, 8231-8244.

- Soula S., E. Defer, M. Fullekrug, O. van der Velde, J. Montanya, O. Bousquet, S. Coquillat, Jean-Pierre Pinty, W. Rison, P. R Krehbiel, R. Thomas, , S. Pedeboy, 2015 : Time and space correlation between sprites and their parent lightning flashes for a thunderstorm observed during the HyMeX campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120, 22, 11,552.* doi : 10.1002/2015JD023894.

- Soula, S., J. J. Kigotsi, J.-F. Georgis, and C. Barthe, 2016 : Lightning climatology in the Congo Basin, *Atmos. Res.*, 178-179, doi : 10.1016/j.atmosres.2016.04.006, 304-319.

- Barthe, C., T. Hoarau, and C. Bovalo, 2016 : Cloud electrification and lightning activity of a tropical cyclone-like vortex. *Atmos. Res.*, 180, doi : 10.1016/j.atmosres.2016.05.023, 297-309.

- Ribaud, J.F., O. Bousquet and S. Coquillat, 2016 : Relationships between total lightning activity, microphysics, and kinematics during the 24 September 2012 HyMeX bow echo system". Q. J. R. Meterolol. Soc., 142, 95-107. doi : 10.1002/qj.2756.

- Bovalo C., C. Barthe, and J.-P. Pinty : Examining relationships between cloud-resolving model parameters and total flash rates to generate lightning density maps. *Soumis au QJRMS*, accepté avec corrections mineures.

6) Climatologie des cyclones du sud-ouest de l'océan Indien

PARTICIPANTS

M.-D. Leroux, D. Mekies (LACy), P. Caroff (DIROI/Météo-France)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Aucune climatologie de référence n'avait mis en évidence les caractéristiques des systèmes tropicaux du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) pour les situer relativement aux autres bassins cycloniques, notamment en terme de seuil d'intensification rapide. Il n'existait

pas non plus, tout bassin confondu, de définition statistique des systèmes de petite taille nommés midgets. Une étude climatologique a donc été réalisée en lien étroit et privilégié avec les prévisionnistes du CMRS de La Réunion responsables du suivi cyclonique du SOOI, le CMRS disposant d'une base de données couvrant l'ensemble des systèmes tropicaux formés depuis 1981. L'étude se penche sur la série de données homogènes 1999-2016 couverte par le satellite géostationnaire Météosat. Cette climatologie servira de support à la campagne ReNovRisk et à de futures études sur le changement climatique en prenant une période de référence plus longue, une fois la réanalyse sur les systèmes antérieurs à 1998 terminée.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

En 17 ans (1999-2016), 165 systèmes tropicaux ont été observés sur mer dans le SOOI et sont classés selon la force des vents maximaux moyennés sur 10 minutes (VMAX) en nœuds (1 kt = 0.514 $m.s^{-1}$). En moyenne chaque année, 9.7 systèmes tropicaux se forment dans le bassin parmi lesquels 9.4 systèmes sont baptisés au stade de tempête (VMAX>=34 kt) tandis que 4.8 systèmes s'intensifient au stade de cyclone (VMAX>=64 kt). Cela représente environ 11% de l'activité cyclonique mondiale et équivaut presque à l'activité du bassin Nord Atlantique.

L'étude détaille l'activité cyclonique mensuelle pour chaque catégorie de système (dépression, tempête, cyclone), la répartition des trajectoires et la localisation des zones privilégiées d'intensification rapide, et dresse le bilan en terme d'impact. La figure 26 illustre le nombre de systèmes qui ont touché ou menacé les côtes de chacun des pays de la zone durant la période 1999-2016.

L'intensification rapide (RI) est définie statistiquement par un renforcement des vents maximaux de surface d'au moins 30 nœuds (15,4 m s^{-1}) sur une période de 24 heures, à partir du 95ème percentile de la distribution des changements d'intensité des systèmes tropicaux évoluant sur mer. Cette valeur est égale au seuil officiel de l'Atlantique Nord établi à partir de vents moyens sur 1 minute alors que nous utilisons des vents moyens sur 10 minutes comme le préconise l'OMM. 43% de tous les systèmes tropicaux ainsi que tous les cyclones très intenses (VMAX>=116 kt) du SOOI subissent au moins une période d'intensification rapide dans leur vie. Les statistiques montrent aussi que l'intensification rapide a plus de chance de se produire pour une intensité initiale comprise entre 65 et 75 kt (1er élément d'aide à la prévision). Le comblement rapide quant à lui peut être défini par une décroissance des vents d'au moins 13.9 $m.s^{-1}$ en 24 heures. La taille des systèmes est également analysée via la distribution des rayons de vents égaux à 34 kt (R34). Les midgets sont statistiquement caractérisés par des R34<=46 km (queue de distribution).

Un premier outil d'aide à la prévision est obtenu via la définition de l'intensité potentielle maximale (MPI) empirique pour notre bassin, qui découle de la relation statistique liant le maximum d'intensité des systèmes et la température de surface de la mer (Figure 27).

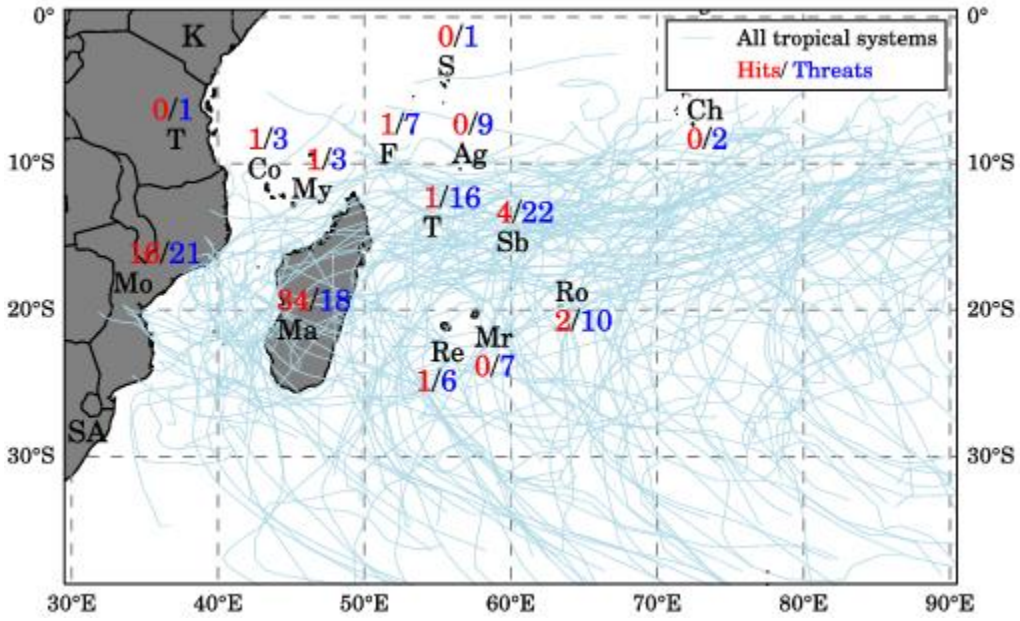

Figure 26 : Trajectoires de l'ensemble des systèmes tropicaux de la période 1999 − 2016 et pour chaque territoire, nombre de fois où le centre d'un système a touché la côte ("Hit") ou s'en est approché à moins de 100 km.

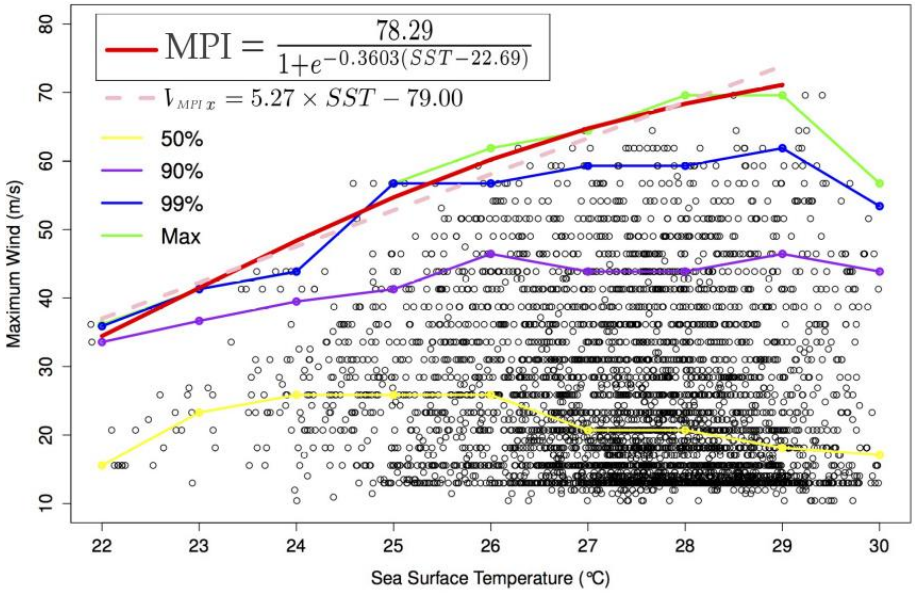

Figure 27 : Nuage de points des vents max (m.s-1) en fonction de la température de surface de la mer (°C) pour les systèmes tropicaux du SOOI sur la période 1999-2016. Les lignes verte, bleue, mauve et jaune suivent le maximum et les 99è, 90è, et 50è percentiles de la distribution par bin de 1°C. Le MPI empirique est obtenu par ajustement au moindres carrés du maximum d'intensité sur la plage 22-29°C. La ligne rose pointillée montre l'ajustement linéaire obtenu sur la même plage de valeurs.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Leroux, M.-D., J. Meister, D. Mekies, A. Dorla, and P. Caroff, 2018a : A Climatology of Southwest Indian Ocean Tropical Systems: their Number, Tracks, Impacts, Sizes,

Empirical Maximum Potential Intensity and Intensity Changes. J. Appl. Meteor. Climatol. doi : 10.1175/JAMC-D-17-0094.1, in press.

7) Outils d'aide à la prévision

PARTICIPANTS

M.-D. Leroux, D. Mékiès, R. Lee-Ah-Siem (LACy)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Si les principales thématiques de recherche de l'équipe Cyclones portent sur l'étude, l'observation et la modélisation de l'atmosphère tropicale, elle est néanmoins très fortement impliquée dans le développement d'outils numériques d'aide à la prévision. Le LACy, via l'équipe Cyclones, joue ainsi le rôle de levier scientifique dans les outils de prévision atmosphérique et climatologique déployés par Météo-France et le CMRS Cyclones de La Réunion dans l'océan Indien. Ces activités portent principalement sur le développement des modèles de prévision numérique du temps, et notamment du modèle AROME INDIEN (voir section dédiée), mais plusieurs études, menées en lien avec les prévisionnistes du CMRS Cyclones, ont également abouti au développement d'outils d'aide à la prévision potentiellement exploitable dans un cadre opérationnel.

A) Cyclade [29]

Cyclade est un outil permettant d'analyser les performances des modèles opérationnels de prévision du temps applicable à l'ensemble des bassins cycloniques de la planète.

Pour chaque cyclone ou tempête tropicale officiellement baptisé, la chaîne Cyclade intègre automatiquement, et en temps réel, les analyses des CMRS cyclones portant sur leur zone de responsabilité ainsi que les analyses et les prévisions de tous les modèles opérationnels disponibles (ARPEGE, AROMEs outre-mer, UKMO, IFS, GFS, JTWC...). Cet outil permet ainsi d'extraire automatiquement la position des systèmes dépressionnaires, leur pression centrale, ainsi que de nombreux autres paramètres de structure qui sont enregistrés dans une base de donnée hébergée à Météo-France, La Réunion.

Le système cyclade permet également d'analyser les simulations et expériences des chercheurs de l'équipe, ou d'autres groupes de recherche du CNRM comme le Groupe de Modélisation pour l'Assimilation et la Prévision pour analyser la sensibilité des modèles de recherche à différents paramètres, ou de comparer leurs performances à celles des modèles opérationnels. S'il est très utilisé par les chercheurs et modalisateurs dans le cadre de leurs activités de recherche, Cyclade est également consulté par les prévisionnistes du CMRS de La Réunion, ceux d'Antilles-Guyane, de Nouvelle-Calédonie et de Polynésie, comme aide à la prévision.

29 *Cyclone analyse diagnostic dépouillement*

Les comparaisons se font sous forme de graphes et de tracés, représentant des diagnostics de structure (e.g. trajectoire, pression au centre, vent maximum...etc) et des statistiques globales (e.g. écart de trajectoire, différences de pression...etc). L'interface, entièrement interactive, de cyclade permet d'élaborer les diagnostics et statistiques de tout modèle ou simulation désirés, sur un système dépressionnaire. Cette chaîne est en constante évolution afin d'intégrer les nouveaux modèles de prévisions régulièrement disponibles, permettra prochainement d'intégrer également les prévisions d'ensemble, aussi bien opérationnelles qu'expérimentales.

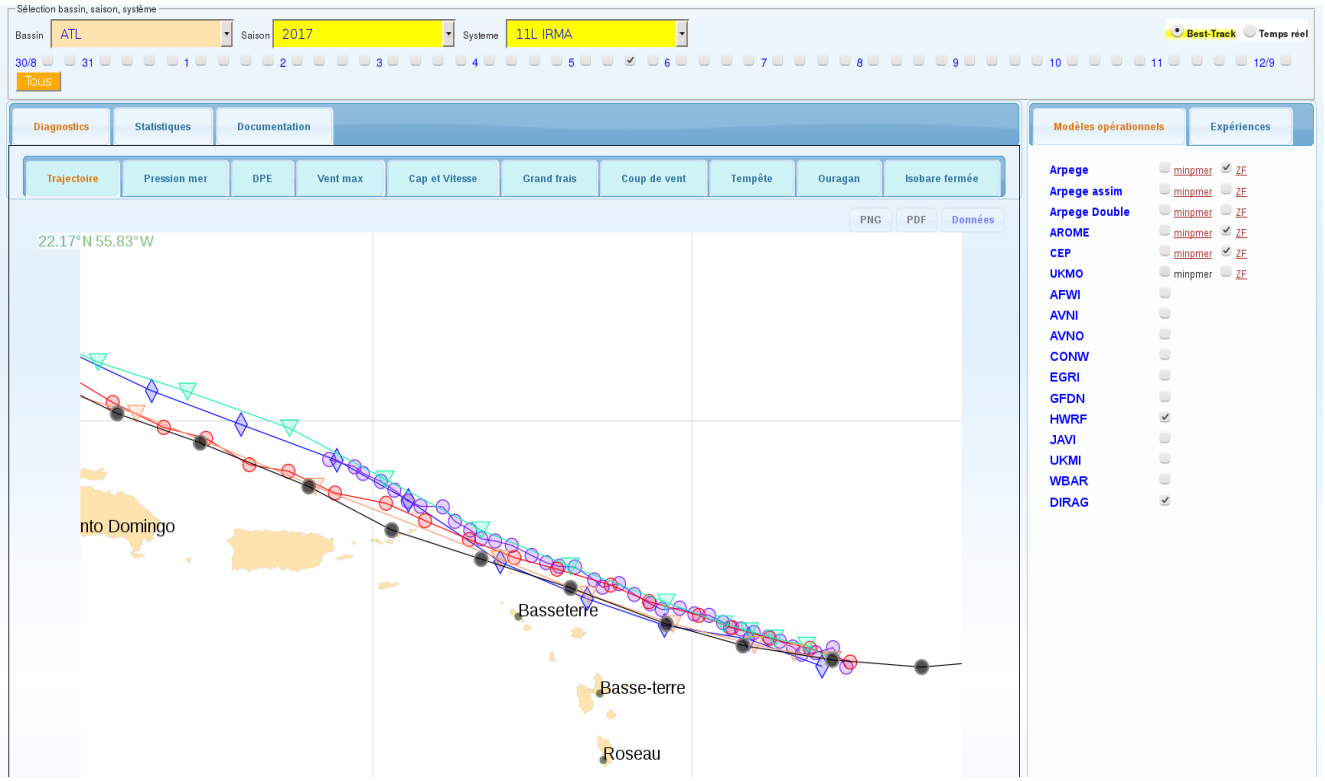

Figure 28 : prévisions de trajectoire du Cyclone Irma qui a ravagé les Antilles en 2017 – Prévisions du 05/09 à 12TU issues des modèles européens Arpège et ECMWF, Arome Antilles-Guyane, HWRF, et du centre des Antilles DIRAG.

B) Outils statistico-dynamiques pour la prévision d'intensité des cyclones du sud-ouest de l'Océan Indien

Pour soutenir les efforts internationaux visant à améliorer la prévision des systèmes tropicaux, les erreurs de prévision opérationnelle des systèmes du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) ont été examinées sur la période 2001-2016 au CMRS de La Réunion pour identifier les systèmes posant des difficultés. Les erreurs sont significativement plus élevées à courte échéance pour les systèmes subissant des intensifications rapides (IR), définies comme un changement d'intensité du vent ≥ 15.4 m/s en 24h : les erreurs moyennes de prévision à 24h pour ces systèmes sont de 10.8 m/s contre 4.9 m/s pour le reste de l'échantillon.

Des outils statistico-dynamiques de la même veine que ceux développés dans d'autres bassins ont donc été conçus pour améliorer la prévision à courte échéance :

- des changements d'intensité et
- de l'intensification rapide des systèmes du SOOI.

Ils se basent sur 26 prédicteurs météorologiques potentiels, découlant de l'examen des données d'observation du CMRS sur la période 1999-2016 et de l'analyse des champs dynamiques et thermodynamiques de l'environnement proche du cyclone (200 à 800 km du centre) dans les données ERA-Interim. Un prédicteur important est l'intensité potentielle maximale, formulée pour la première fois dans le SOOI (Leroux et al. 2018a), et qui constitue un premier diagnostic d'aide à la prévision en temps réel.

Le deuxième outil, développé pour la prévision d'intensité à 24h, est un modèle de régression multilinéaire à plusieurs variables tenant compte des non-linéarités et des interactions entre variables. Enfin, un troisième outil est l'arbre de décision construit pour la prévision des intensifications rapides dans les prochaines 24 heures (Figure 29).

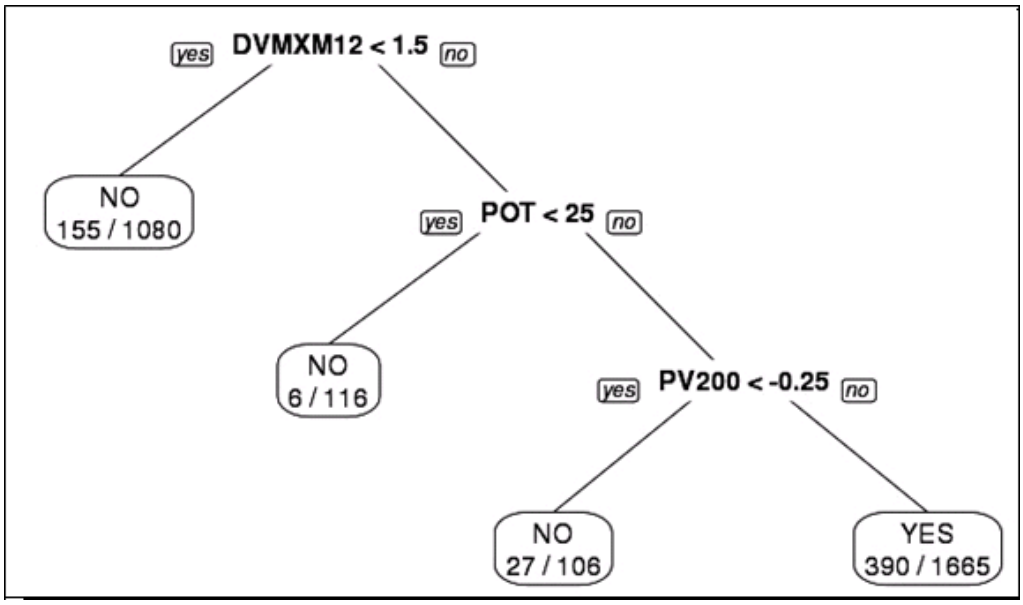

Figure 29 : Arbre de décision pour la prévision d'intensification rapide (classe étiquetée YES) à 24h d'échéance, basé sur les valeurs de 3 prédicteurs météorologiques : DVMX12 (changement d'intensité observé sur les 12 h précédentes, en m/s), POT (l'Intensité Potentielle Maximale MPI moins l'intensité initiale, en m/s), et PV200 (la vorticité potentielle à 200 hPa moyennée sur une couronne de 200 à 800 km de rayon autour du centre du système, en PVU). Dans chaque feuille terminale sont comptabilisées les observations mal classées parmi le nombre total d'observations qui suivent la branche.

Ces outils seront utilisés et testés lors des prochaines saisons cycloniques. Ils devraient soutenir les prévisionnistes du CMRS en leur apportant des directives supplémentaires pour améliorer la prévision à courte échéance des changements d'intensité des systèmes tropicaux du SOOI.

C) Weather-3D: applicatif de visualisation interactive en trois dimensions d'informations météorologiques via les navigateurs WebGL

La quantité d'informations scientifiques que doivent analyser les chercheurs et les prévisionnistes dans le cadre de leur travail augmente de manière exponentielle. Ils doivent traiter des fichiers de données de plus en plus importants en volume et en nombre. L'origine des informations se diversifie également, allant de fichiers issus de modèles numériques aux observations 3D. Il devient évident que les outils traditionnels de représentation et d'analyse en 2D sont de plus en plus lourds à manipuler et qu'ils ne conviennent vraiment que lorsque le chercheur ou l'observateur ont déjà une idée claire de la situation et des éléments à analyser.

La visualisation 3D des données permet d'analyser une situation plus rapidement, de construire une analyse plus précise, de cibler finement et facilement le positionnement des coupes 2D à effectuer, de changer l'angle de vue et la perception du phénomène étudié... Cependant, les outils de visualisation classiques en 3D présentent une courbe d'apprentissage souvent ardue. Ils demandent au chercheur un véritable investissement en temps pour maîtriser la manipulation de l'outil, des postes de travail performants et correctement configurés, ainsi qu'un travail informatique préalable de conversion des données afin qu'elles soient assimilables par ces outils.

C'est dans ce contexte que se présente Weather-3D. Cet outil développé au LACy est peu gourmand en ressources puisqu'il ne nécessite qu'un navigateur ; les données d'entrée sont déjà formatées, évitant aux utilisateurs de perdre du temps en préparation informatique. La visualisation et l'interaction sont intuitives et partageables en temps réel via internet, ce qui accélère l'analyse et facilite le travail en équipe.

L'outil accepte l'usage de périphériques de réalité virtuelle et offre :

- la possibilité de visualiser les données en 3 dimensions et à distance
- une perception immédiate et concrète des phénomènes ainsi visualisés, accélérant considérablement les phases d'analyses
- la possibilité de faire de la synergie de données (regroupement de données différentes ou comparaison observations-modèles)
- Une certaine souplesse et la rapidité de pré-traitement des données. Le traitement peut être automatisé pour construire des chaînes de production opérationnelles. Une telle chaîne de production vient d'être installée à Météo-France à La Réunion pour la visualisation en 3D des données radar (images composites des radars de Piton Villers et du Colorado).

Weather 3D a apporté au LACy une aide importante dans le cadre des campagnes de mesures comme lors du suivi des panaches de SO2 émis par le Piton de Fournaise en 2015 à La Réunion, ou encore lors de la campagne STRAP-ETNA en 2016. Pendant cette campagne, les représentations conjointes en 3 dimensions par Weather 3D des mesures effectuées par vols avion et des sorties de modèles ont permis de calibrer rapidement celui-ci.

Un autre usage important de l'outil a été fait par des doctorants qui ont montré que Weather 3D permettait une analyse plus rapide et une appréhension plus intuitive, presque "sensorielle" des phénomènes étudiés.

Dans le cadre de l'aide à la prévision à Météo-France et du support de notre laboratoire aux activités du CMRS de la DIROI[30], Weather 3D a été intégré courant 2017 dans une chaîne de production et de visualisation en 3D d'images composites de réflectivité radar obtenues à partir des mesures des radars de Piton Villers et du Colorado.

Météo-France envisage enfin de lier Weather 3D aux serveurs de données de son système d'analyse et de prévision SYNOPSIS. Une première version de cet objectif est attendue pour fin 2018.

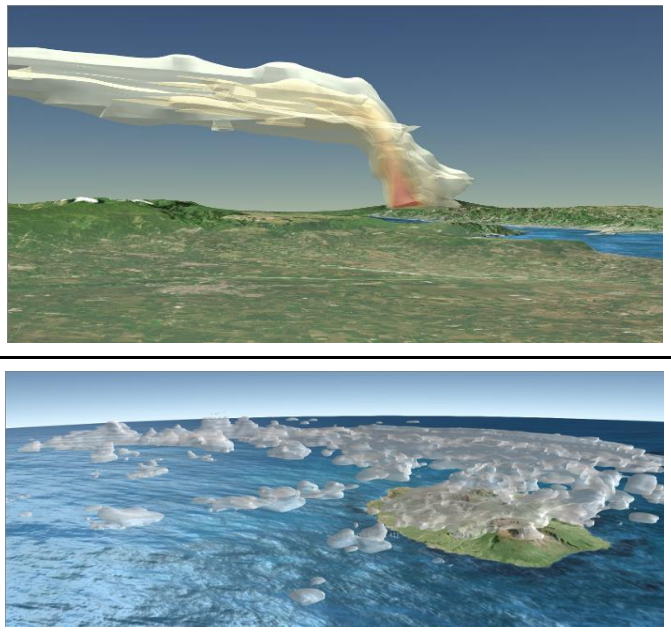

Figure 30 : Weather-3D : simulation du modèle FLEXPART. Panache de SO2 au dessus de l'ETNA. Image composite radar. Réflectivité 30 dBz observée au-dessus de La Réunion.

IV - Le bilan de l'équipe Stratosphère

1) Le contexte

Au cours des dernières décennies, les connaissances sur la stratosphère et sur les processus dynamiques qui s'y développent ont progressé (Shepherd, 2000, 2007). Néanmoins, on constate, à l'heure actuelle, qu'il reste des efforts à faire au niveau de la quantification de

30 *Direction de Météo-France pour l'Océan Indien*

ces processus dynamiques et de leur représentation dans les modèles (Gerber et al., 2012). En effet, il est admis que les processus d'échanges stratosphériques au travers des barrières dynamiques jouent un rôle important dans la diminution de l'ozone (Hauchecorne et al., 2001; Bencherif et al., 2011) ou dans l'augmentation de la vapeur d'eau stratosphérique. Cependant, il reste encore à quantifier le transport total et à estimer sa contribution sur le bilan de l'ozone et de la vapeur d'eau dans les différents réservoirs, notamment dans la stratosphère tropicale. Les phénomènes de transport isentropique sont encore assez mal étudiés du fait des échelles horizontales sur lesquelles ils se produisent (variables, de l'ordre de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres), mais surtout à cause d'un manque d'observation finement résolue dans l'espace.

A l'instar d'autres groupes de recherche, l'équipe Stratosphère du LACy a montré que les ondes atmosphériques jouent un rôle important dans les transferts d'énergie au niveau de la circulation locale et globale, mais aussi dans la redistribution des constituants atmosphériques (Bencherif et al, 2003 ; Portafaix et al., 2003 ; Morel et al., 2004 ; Morel et al., 2005 ; Bencherif et al., 2007 ; Bencherif et al., 2011 ; Bègue et al., 2017). En effet, il apparaît clairement que les processus d'échanges stratosphériques au travers des barrières dynamiques, peuvent se produire sous l'action des ondes atmosphériques (Bencherif et al., 2003 ; Portafaix et al., 2003 ; Morel et al., 2005). Les détails concernant ces processus demandent davantage de documentation ; en particulier, les contributions relatives des ondes tropicales et extratropicales restent à préciser.

Par ailleurs, la nature et la quantité des aérosols sont encore mal connues dans l'UT-LS tropicale, du fait notamment du nombre limité d'observations, alors que leur impact chimique et climatique apparaît comme important. Ce déficit d'observation est d'autant plus criant dans l'hémisphère sud, en raison de la spécificité de cette région (peu de terre), ce qui induit un faible nombre de stations d'observation et donc un faible échantillonnage. L'injection de SO_2 gazeux directement dans l'UT-LS par les éruptions volcaniques est susceptible de générer des quantités importantes d'aérosols sulfatés pouvant séjourner pendant plusieurs années (McCormick et al., 1992). Parmi les sources dans la région "Afrique australe - océan indien", il y a les aérosols volcaniques (Kelud, Calbuco, …) (Bègue et al., 2017) et les feux de biomasse particulièrement importants en saison sèche.

L'activité de l'équipe Stratosphère se focalise sur le bilan de la stratosphère tropicale, dans un contexte de changement global. Bien que la stratosphère tropicale soit un réservoir relativement isolé, elle communique sporadiquement avec les compartiments limitrophes, à travers les barrières dynamiques : la tropopause tropicale et les barrières subtropicales. Pour en faire le bilan, l'équipe Stratosphère du LACy axe ses activités sur des études de tendances, de la dynamique et des mécanismes de transports dans la stratosphère tropicale, ainsi que sur l'observation et l'analyse des radiations ultraviolettes à la surface. En plus des observations de l'OPAR à La Réunion, le développement des activités de recherche de l'équipe Stratosphère repose sur des collaborations stratégiques, sous forme de réseaux de recherche (comme le GDRI ARSAIO) et réseaux d'observations (comme le réseau UV-indien) dans l'hémisphère sud, notamment dans la zone océan Indien avec l'Afrique du Sud et Madagascar, et plus largement, avec le Brésil et l'Argentine (voir la fiche coopération Hémisphère Sud).

2) Bilan global de l'équipe

L'équipe Stratosphère est composée de 3 enseignants-chercheurs (2 MCF et 1 PR). C'est la plus petite équipe du LACy. Cependant, grâce à ses collaborations nationales et internationales, l'équipe augmente significativement son potentiel recherche et encadrement, notamment via le GDRI ARSAIO, réseau de recherche franco sud-africain. Sur la période janvier 2014-juin 2018, l'équipe a accueilli 15 chercheurs sud-africains, brésiliens et argentins, a encadré 16 stages de master et 6 thèses (2 soutenues et 4 en cours). Voir liste des stages.

Sur la même période, janvier 2014-juin 2018, l'équipe a produit 26 publications scientifiques dans des revues internationales ACL, ce qui correspond à ~4 publications/an/chercheur pour 1,5 ETP. Voir la liste des publications de l'équipe.

Durant la période 2014-2018, l'équipe a porté plusieurs projets, en dépit de son faible effectif. La plupart de ces projets sont à dimension internationale et sont construits sous forme de réseaux d'observation (projet SECU-OI de mesures d'ozone et du rayonnement UV dans l'océan indien, 2016-2018) et réseaux de recherche (programme GDRI ARSAIO franco sud-africain, 2010-2017). La coopération avec l'Afrique du Sud est un axe historique et important pour l'équipe, dont les premières actions remontent à 1998. En plus du GDRI ARSAIO, cet axe Réunion-Afrique du Sud a été consolidé par 2 projets bilatéraux soutenus dans le cadre des appels PHC/Protea (projet SAFE-UV 2015-2016 et projet STIC 2017-2018). En complémentarité avec ses objectifs de recherche, l'équipe a par ailleurs développé de nouvelles collaborations internationales dans l'hémisphère sud, avec le Brésil (projet MESO, 2017-2020) et avec l'Argentine (projet Ecos-Sud, 2017-2019).

Il est à noter que l'activité « aérosols » dans l'équipe strato a été initiée en 2015 dans le cadre d'un projet BQR de l'UR et s'est poursuivie dans le cadre du programme LEFE (projet SATORI, 2016). Elle a bénéficié de soutien Préciput ANR et a fait l'objet d'une demande ANR JC, malheureusement infructueuse. Récemment, l'équipe a mis en place 2 projets OMNCG (ASTRE et MARIONETTE, 2018).

Parmi les éléments de bilan de la période 2014-2018, on trouve également le montage de 2 projets structurants pour l'équipe : le LIA ARSAIO franco sud-africain et l'INTERREG UV-indien.

Il est à noter par ailleurs que l'équipe est impliquée dans les activités de responsabilités scientifiques d'instruments de l'OPAR, particulièrement pour ce qui concerne le LiDAR ozone strato, le LiDAR aérosols, le spectromètre SAOZ et le spectromètre Bentham UV. Ce qui implique la participation de l'équipe dans différentes campagnes d'observation, comme la campagne "MORGANE" pour la labélisation NDACC des lidars de l'OPAR et les mesures in-situ d'aérosols par LOAC et par LiDAR programmées sur alerte lors des éruptions des stratovolcans (e.g, Kélud, Calbuco, ...).

L'équipe statosphère étant composée à 100% d'enseignants-chercheurs, ses membres participent et portent des responsabilités pédagogiques à différents niveaux L, M et D et contribuent significativement à la formation par la recherche. Parmi les actions importantes de l'équipe, on trouve le portage et la direction du master international TRN (2012-2015), la direction de l'école doctorale régionale RAMI de l'AUF (2014-2018), le MOSS (*Maïdo*

Observatory Summer School) (2016) et 5 summer schools co-organisées en Afrique du Sud (Cape Town 2013, Pretorea 2014, Durban 2015 et 2017) dans le cadre du GDRI ARASIO.

3) Composition et transport des aérosols

PARTICIPANTS

N. Bègue, H. Bencherif, T. Portafaix, T. Ramarolahy (LACy), G. Berthet, F. Jégou, J.-B. Renard, D. Vignelles, V. Duverger (LPC2E), T. Lurton (IPSL), J.-P. Vernier (NASA Research Langley), L. Clarisse (ULB), J. Jumelet (LATMOS), G. Payen (UMS3365/OSU-R)

CONTEXTE

La tropopause tropicale contrôle les échanges verticaux et agit comme une barrière dynamique. Les masses d'air troposphérique entrent dans la stratosphère par les régions tropicales (Holton et al., 1995). Ce transport aux tropiques est responsable de l'acheminement d'un grand nombre de composés importants tels que les aérosols et la vapeur d'eau. L'injection de SO_2 gazeux dans l'UT-LS par les éruptions volcaniques majeures est susceptible de générer des quantités importantes d'aérosols sulfatés pouvant séjourner pendant plusieurs années. Récemment, Vernier et al. (2011) ont mis en évidence, à partir de mesures spatiales, que les éruptions modérées modulent le contenu en aérosols durant les périodes hors éruptions volcaniques majeures, dite période « de fond ». D'autres études révèlent la présence de populations d'aérosols absorbants en quantités significatives dans la basse stratosphère. Il s'agirait principalement d'aérosols organiques (Murphy et al., 2007 ; Renard et al., 2010).

Il demeure néanmoins des incertitudes sur la connaissance de ce contenu en aérosols au sein de l'UT-LS. Les observations in-situ, fournissant la distribution en taille et leurs paramètres intégrés (rayon effectif, densité de surface, extinction), manquent fortement aux latitudes tropicales sources d'aérosols sulfatés stratosphériques, alors qu'elles s'avèrent précieuses pour évaluer ou forcer la microphysique des modèles de Chimie-Climat.

Si ces aérosols sont soupçonnés jouer un rôle important sur le climat et la chimie de l'ozone stratosphérique (Bekki, 1997), il reste encore à poursuivre l'effort de recherche pour déterminer finement les propriétés optiques et microphysiques de ces aérosols au sein de l'UT-LS et, en particulier au sein des latitudes tropicales.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Compte-tenu de la finesse requise pour la mesure des aérosols, une approche pluri-instrumentale est nécessaire.

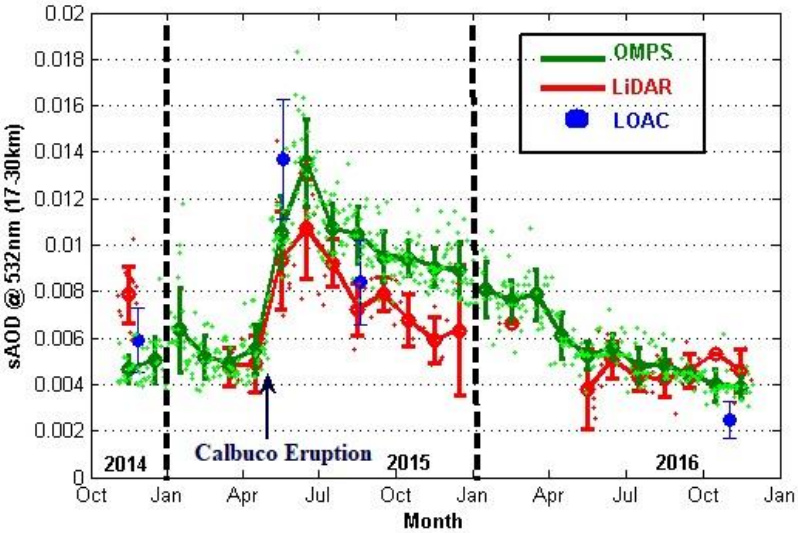

Figure 31 : Evolution de l'épaisseur optique calculée entre 17 et 30 km à 532 nm à partir des observations lidar (rouge), LOAC (bleu) et satellite (vert) entre novembre 2014 et novembre 2016 à La Réunion.

Avec le portage de plusieurs projets (LEFE SATORI, appel incitatif de l'université de La Réunion : BQR-aérosols et VALSES, PRECIPUT-ANR) par l'équipe et le travail collaboratif avec nos collègues du LPC2E (via le LABEX VOLTAIRE, de l'université d'Orléans), une approche pluri-instrumentale pour la mesure des aérosols au sein de l'UT-LS s'est développée sur le site de La Réunion. Cette approche pluri-instrumentale combine des informations provenant des observations lidar, du compteur optique d'aérosols atmosphériques LOAC (développé par le LPC2E) et spatiales. L'éruption du Calbuco a été un cas d'étude qui nous a permis d'évaluer et d'améliorer cette approche pluri-instrumentale (Figure 31). Par ailleurs, le modèle MIMOSA associé au code DyBAL a été utilisé afin de caractériser la provenance des masses d'air observées à La Réunion durant l'éruption (Figure 32). La présence des barrières dynamiques a conduit à une propagation du panache exclusivement au sein de l'hémisphère sud, et a également contribué à la modulation de la forme du panache. Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont été utiles à la prise de décision au développement des lidars, notamment dans la mise en place des voies spécifiques et multi-longueur d'onde.

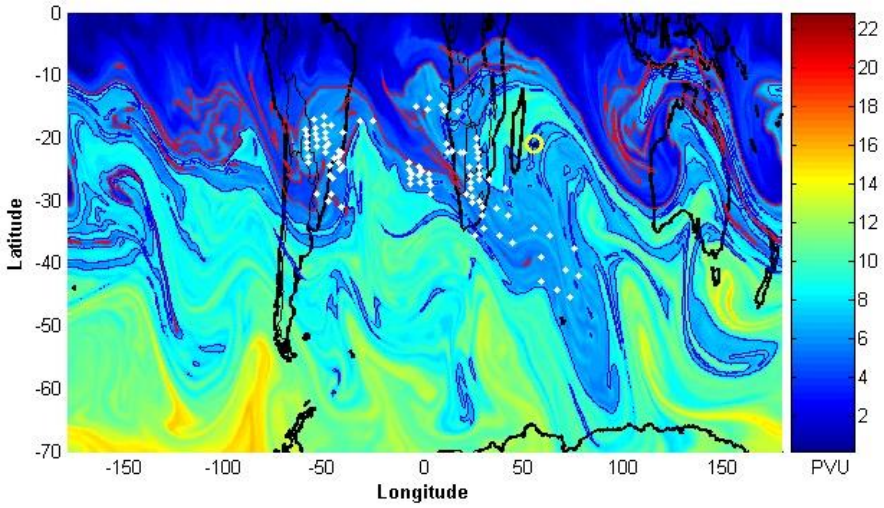

Figure 32 : Champs de PV (vorticité potentielle) advectés par le modèle MIMOSA à 400 K le 1er mai 2015. Les positions des barrières dynamiques sont calculées par le code DyBaL et indiquées en traits continus. Les points blancs indiquent la position du panache d'aérosols obtenue avec OMPS.

Pour une meilleure compréhension du transport des espèces chimiques au sein de la stratosphère, une évaluation des performances du modèle MIMOSA-chim a été réalisée par l'équipe. Cette évaluation a débuté avec l'étude de l'ozone en région tropicale au sein de l'hémisphère Sud (Figure 33). Les premiers résultats obtenus montrent une faiblesse du modèle pour des niveaux inférieurs à 500 K. Les surestimations observées au sein de ces niveaux inférieurs à 500 K peuvent s'expliquer par une surestimation possible dans les espèces réactives du chlore par MIMOSA-chim. Cependant, il est à noter que les profils d'écart relatif obtenus se comparent bien à ceux présentés dans la littérature pour d'autres modèles de chimie-transport (Brakebush et al., 2013 ; Singleton et al., 2007).

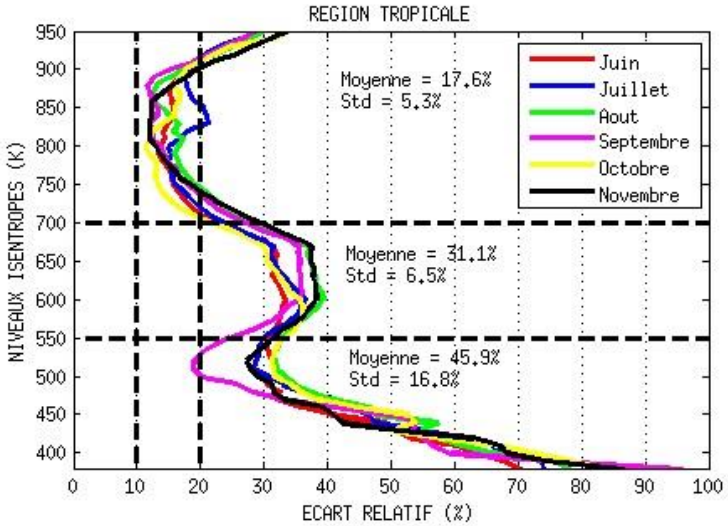

Figure 33 : Profils moyens des écarts relatifs entre MIMOSA-chim et les données radiosondages du réseau SHADOZ au cours de la période 2004-2013 au sein de la région tropicale (10-20°S).

Le LACy et le CNRM ont mis en place une thèse sur l'impact des systèmes dépressionnaires dans l'océan indien (thèse de Tahina Ramarohaly). Cette étude concerne l'analyse des anomalies et variations de la tropopause tropicale. Une analyse climatologique de la vapeur d'eau dans la stratosphère tropicale a été réalisée, ainsi qu'une étude d'anomalies observées lors des épisodes d'injections des masses d'air et de vapeur d'eau dans la basse stratosphère tropicale, notamment lors des passages des systèmes dépressionnaires dont les cyclones tropicaux dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien (Figure 34).

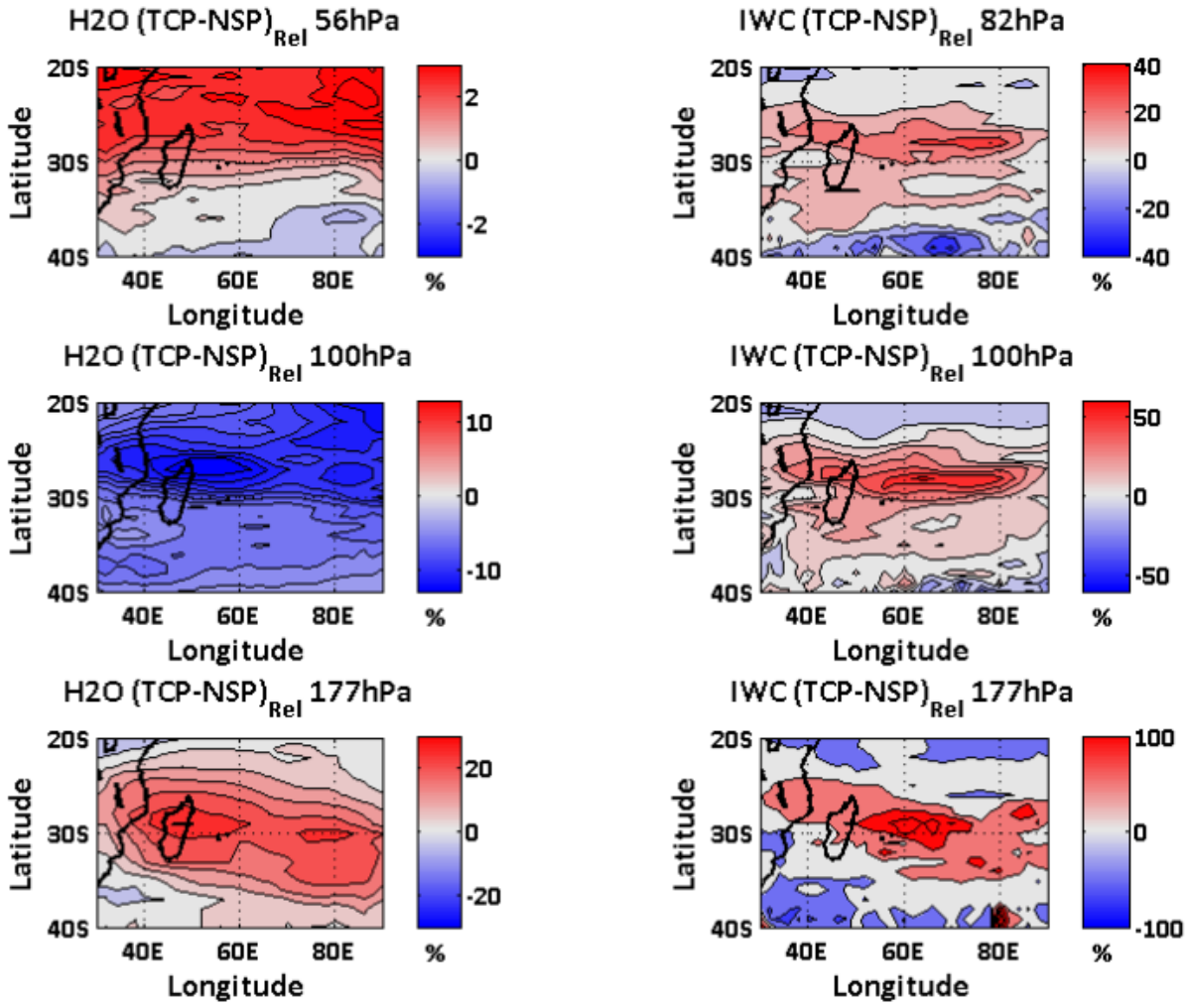

Figure 34 : Différences relatives moyennes des distributions de vapeur d'eau et de IWC, avec et sans cyclones, dans l'UT-LS, au-dessus de l'océan Indien, sur une période de 10 ans (2004 – 2013). Thèse de Tahina Ramarolahy.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Bègue, N., Vignelles, D., Berthet, G., Portafaix, T., Payen, G., Jégou, F., Renard, J. B. L. Clarisse, V. Duverger, F. Posny, J.-M. Metzger and S. Godin-Beekmann : Long-range transport of stratospheric aerosols over Southern Hemisphere following the Calbuco eruption in April 2015. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 15019-15036, 2017.

- Berthet, G., Jégou, F., Catoire, V., Krysztofiak, G., Renard, J. B., Bourassa, A. E., J.-B. Renard, A. E. Bourassa, D. A. Degenstein, C. Brogniez, M. Dorf, S. Kreycy, K. Pfeilsticker, B. Werner, F. Lefèvre, T. J. Roberts, T. Lurton, D. Vignelles, N. Bègue, Q. Bourgeois, D. Daugeron, M. Chartier, C. Robert, B. Gaubicher, and C. Guimbaud and K. Pfeilsticker : Impact of a moderate volcanic eruption on chemistry in the lower stratosphere : balloon-borne observations and model calculations. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(3), 2229-2253, 2017

4) Ondes et dynamique de la moyenne atmosphère

PARTICIPANTS

H. Bencherif, N. Bègue, T. Portafaix, R.T. Loua (LACy), N. Mbatha (UZL, Af.S), A. Hauchecorne (LATMOS), V. Sivakumar (UKZN, Af.S), L. Vaz Peres (UFOPA, Brésil), T. Mkololo (SAWS, Af.S), S.K. Sharma (PRL, Inde), E. Wolfram (CEILAP, Argentine), F. Orte (CEILAP, Argentine)

CONTEXTE

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 le lien avec :

- la troposphère, couche basse de l'atmosphère en interaction avec la biosphère et sous influence des activités anthropogéniques, et

- la thermosphère, située au sommet de l'atmosphère en contact direct avec les radiations solaires.

La moyenne atmosphère (MA) se trouve ainsi soumise à une action conjuguée du changement climatique, du fait des activités anthropogéniques, et de la variabilité naturelle. L'augmentation dans l'atmosphère des concentrations des GES induit un réchauffement global dans la troposphère et un refroidissement global dans la MA.

Cependant, contrairement à la troposphère, la MA est une région où les observations sont clairsemées ou peu résolues. Des études récentes ont démontré que la dynamique de la MA agit à la fois sur la météorologie et sur le climat dans les basses couches -troposphère- (Charlton et al., 2004). Les recherches en cours sur l'amélioration des prévisions météorologiques et des prévisions climatiques doivent avoir une représentation complète de la MA dans les modèles. Mais, cette dernière est très peu observée au-delà de l'altitude maximum des radiosondages (environ 30 km).

Nous distinguons dans ce sous-thème 2 régions d'altitude :

- la basse et moyenne stratosphère, couche allant de la tropopause jusqu'à environ 10 hPa (correspondant à l'altitude maximale des radiosondages avec ozone)

- la haute stratosphère et la mésosphère, où certains processus dynamiques, comme les ondes de gravité, s'amplifient.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les caractéristiques des mécanismes de transport et de mélange diffèrent de part et d'autre des barrières dynamiques. Aux moyennes latitudes, par exemple, c'est par le brassage intense des ondes planétaires de Rossby que s'effectue le transport méridien. Les ondes jouent un rôle essentiel dans l'établissement et le franchissement de ces barrières. Générées principalement dans la troposphère, les ondes transportent verticalement de la quantité de mouvement vers la moyenne atmosphère. En interagissant avec l'écoulement moyen, elles induisent des modifications sur les conditions d'équilibre à des échelles différentes. Pour mieux caractériser et suivre les trajectoires des masses d'air dans la stratosphère, nous utilisons une combinaison entre le modèle MIMOSA et le code DyBaL. La thèse de Lucas Vaz Peres a permis d'explorer cette combinaison en exploitant une large base de données d'observation d'ozone total au sud du Brésil (1991-2015). Ce qui a permis d'analyser l'influence du trou d'ozone Antarctique en région subtropical (Figure 35). Cette thèse est réalisée en codirection dans le cadre d'un programme de coopération franco-brésilienne.

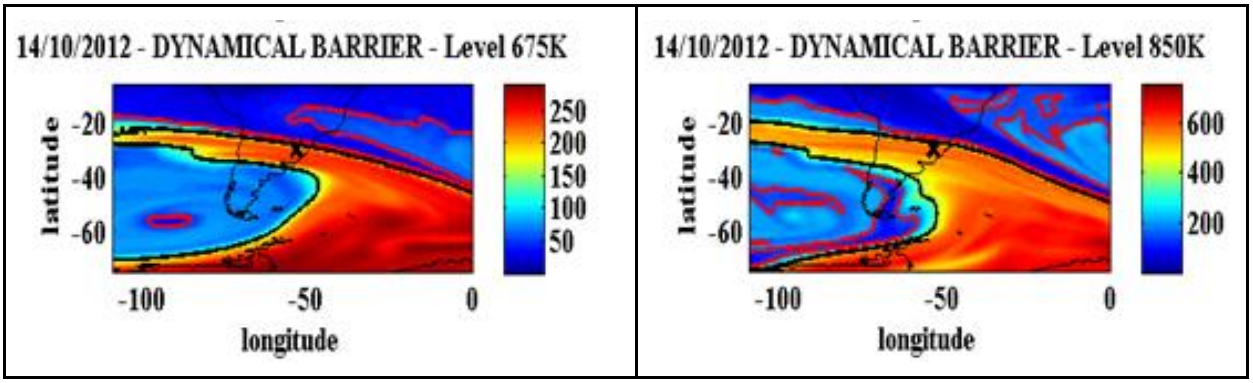

Figure 35 : Distribution des champs de PV (vorticité potentielle) advectés par le modèle MIMOSA à 675K (à gauche) et 850K (à droite), lors d'un évènement d'échanges méridien observé le 14 octobre 2012 au sud du Brésil. Les positions des barrières dynamiques sont calculées par le code DyBaL et indiquées en traits continus. Le symbole X indique la localisation du site d'observation brésilien SSO - Southern Space Observatory.

L'équipe a par ailleurs exploité les observations lidar à La Réunion (20.8°S, 55.5°E) et à Mauna Loa (19.5°N, 155.6°O), ainsi que des observations satellites (SABER) pour une étude comparative de la variabilité des inversions de température mésosphériques (ITM), en relation avec la propagation des ondes dans la MA. Cette étude est réalisée dans le cadre du programme franco-sud-africain ARSAIO. Malgré des différences géographiques, l'étude montre des similitudes entre les 2 sites dans les structures thermiques et les caractéristiques des ITM : de fortes amplitudes moyennes observées à 6 mois de décalage, en avril à La Réunion et en octobre à Mauna-Loa, supérieure à 35 K, dont les bases des couches d'inversion sont situées entre 79-80.5 km et de 76-77.5 km, respectivement (Bègue et al., 2017).

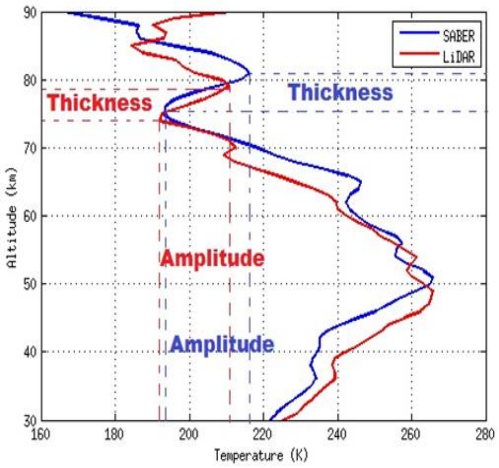

Figure 36 : Profils de température LiDAR et SABER, avec inversion mésosphérique, mesurés le 13 juin 2005. Bègue et al. (2017)

Pour une meilleure compréhension des processus dynamiques dans la MA, l'équipe a mis en place un sujet de thèse (René Tato LOUA), afin d'étudier les interactions MA-troposphère ; la troposphère étant le compartiment où est généré l'essentiel de l'activité dynamique de l'atmosphère terrestre. Les résultats préliminaires de ce travail portent sur l'analyse de la variabilité des précipitations et des températures de surface en Guinée collectées sur plus de 50 années d'observations continues (1960-2016). Ils montrent un réchauffement significatif, notamment depuis 1998, caractérisé par un cycle continu d'anomalies positives de température proches de +2°C, conjugué à des tendances négatives en précipitations sur l'ensemble du territoire de la Guinée (observé pour les 12 stations).

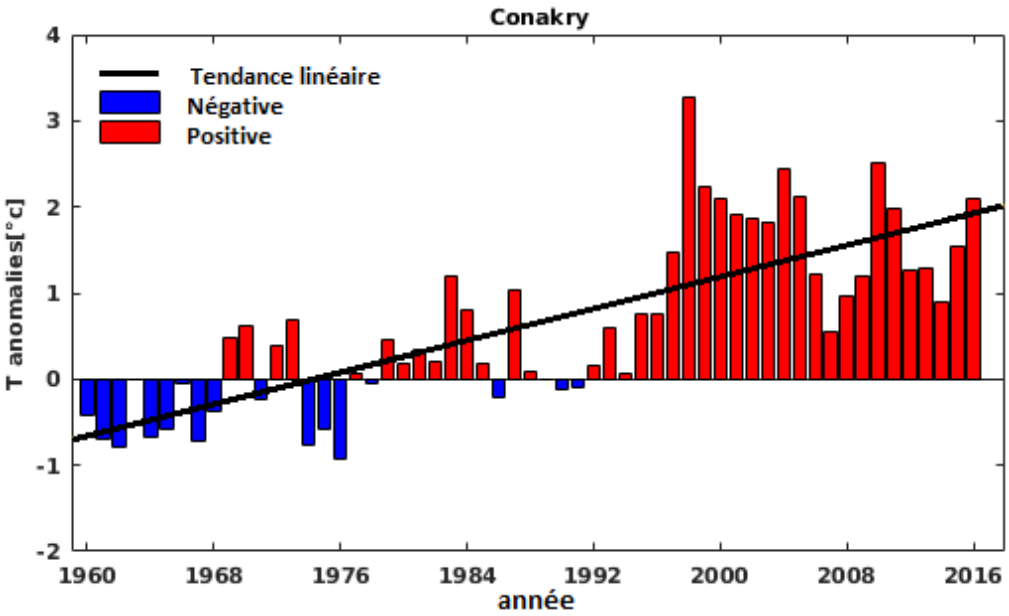

Figure 37 : Anomalies et tendance de températures (en degrés Celsius) observées à Conakry entre 1960 et 2016. (Thèse de R.T. Loua)

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Venturini, M. S., Bageston, J. V., Caetano, N. R., Peres, L. V., Bencherif, H., and Schuch, N. J.: Mesopause region temperature variability and its trend in southern Brazil, *Ann. Geophys*., 36, 301-310, https://doi.org/10.5194/angeo-36-301-2018, 2018.

- Bègue N., Mbatha N., Bencherif H., Loua R. T., Sivakumar V., and Leblanc T. : Statistical analysis of the mesospheric inversion layers over two symmetrical tropical sites : Réunion (20.8°S, 55.5°E) and Mauna Loa (19.5°N, 155.6°W), *Ann. Geophys*., 35, 1177-1194, https://doi.org/10.5194/angeo-35-1177-2017, 2017.

- Loua, R.T., M. Beavogui, H. Bencherif, A.B. Barry, Z. Bamba, and C.A. Mazodier, Climatology of Guinea: Study of Climate Variability in N'zerekore, *J. of Agri. Sc. and Techno. A*, 7, 215-233, doi : 10.17265/2161-6256/2017.04.001, 2017.

- Sharma, S., P. Kumar, R. Vaishnav, C. Jethva, and H. Bencherif, Evaluation of Inter-Hemispheric Characteristics of the Tropopause–Stratopause–Mesopause Over Sub-Tropical Regions, *Pure Appl. Geophys*., DOI 10.1007/s00024-017-1706-8, 2017.

- Sharma, S., P. Kumar, C. Jethva, R. Vaishnav, and H. Bencherif, Investigations of the middle atmospheric thermal structure and oscillations over sub-tropical regions in the Northern and Southern Hemispheres, *Clim. Dyn*., DOI 10.1007/s00382-016-3293-2, 2016.

5) Variabilité de l'ozone et des rayonnements UV dans Océan Indien

PARTICIPANTS

T. Portafaix, H. Bencherif, N. Bègue, O. Delage, J.M. Cadet, K. Lamy (LACy), S. Godin-Bekmann, A. Pazmino (LATMOS), C. Brogniez (LOA, Lille), L. Vaz Peres (UFOPA, Brésil), C. Wright (SA-MRC, Af.S)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Le protocole de Montréal en 1987 a permis la régulation des rejets de substances destructrices d'ozone (ODS) dans l'atmosphère et ainsi de contrôler progressivement la destruction de l'ozone stratosphérique. De nombreux signes de '*recovery*' 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 (GES) laissent incertaine l'évolution future de l'ozone, et donc du rayonnement UV en surface. Plusieurs auteurs ont montré que l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère provoque une accélération de la circulation de Brewer-Dobson (Rind et al., 1990 ; Lin and Fu, 2013). L'ozone est transporté plus rapidement des tropiques vers les pôles, induisant une augmentation de la colonne totale d'ozone aux moyennes latitudes et une diminution aux tropiques. Le

rayonnement UV (RUV) à la surface, fortement dépendant de l'ozone, devrait donc augmenter aux tropiques (Hegglin and Shepherd, 2009, Butler et al., 2016), dans des régions où les expositions naturelles sont déjà critiques.

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

A) Mesures et variabilité de l'ozone stratosphérique par lidar DIAL

L'équipe Stratosphère est impliquée directement dans les mesures d'ozone à La Réunion, en assurant la responsabilité scientifique du lidar DIAL ozone stratosphérique installé à l'observatoire du Maïdo depuis 2013 (Baray et al., 2013). Cet instrument a été engagé dans la campagne internationale MORGANE (mai 2015) qui a permis de confirmer sa labellisation dans le réseau NDACC (Portafaix et al., 2015). Cet instrument fait aujourd'hui partie des rares instruments de mesure de ce type sous les tropiques, et ces mesures ont été utilisées dans plusieurs articles d'inter-comparaisons ou d'études de dérives satellitaires (Fernandez et al., 2016 ; Hubert et al., 2016).

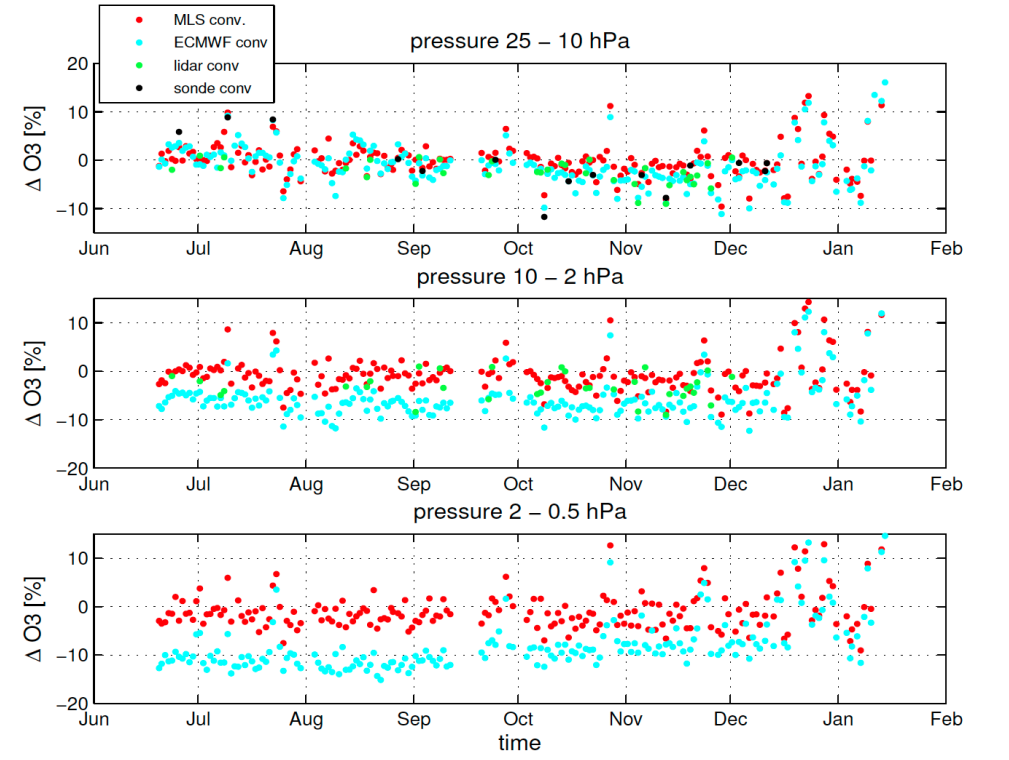

Figure 38 : Comparaisons du lidar avec les mesures du radiomètre micro-onde GROMOS-C (Fernandez et al., 2016). Les premières études de variabilité de l'ozone, à partir des mesures lidar, sont en cours, la longueur de la série lidar devenant suffisante (plus de 260 profils entre 2013 et 2017).

B) Mesures, variabilité et tendance de l'ozone total

Un spectromètre UV-visible SAOZ est installé à l'université de La Réunion depuis 1993, ce qui en fait une des plus longues séries de mesures sol de l'OPAR. L'équipe Stratosphère du LACy est co-responsable de cet instrument. Ces données, ainsi que d'autres mesures sur d'autres stations tropicales, ont permis de réaliser des études de variabilité et de tendance de la colonne d'ozone total à La Réunion et aux tropiques (Toihir et al., 2018). Elles ont également permis de définir des méthodes de comparaison et de biais entre des mesures d'origines différentes (satellites, autres instruments au sol), afin d'obtenir des séries homogènes de très grande longueur, ouvrant sur des études de tendances plus précises (Pastel et al., 2014 ; Toihir et al., 2015 ; Vaz Peres et al., 2017).

Les études de tendances ont été réalisées à partir du modèle de régression multilinéaire Trend-Run, mais récemment une nouvelle méthode a été développée, basée sur la décomposition modale empirique (EMD) s'apparentant à la décomposition en ondelettes et permettant de traiter des séries non linéaires et non stationnaires.

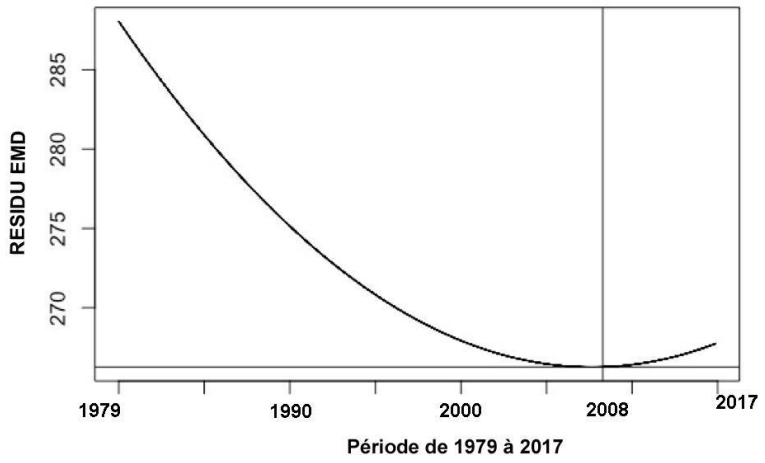

Figure 39 : Tendance globale de l'ozone total à La Réunion à partir de la méthode EMD, illustrant le début de rétablissement de l'ozone (recovery) vers 2008.

C) Mesure et variabilité des Rayonnements UV (RUV)

Le LACy est co-responsable scientifique d'un spectro-radiomètre UV Bentham, sis sur le campus du Moufia (Brogniez et al. 2016). Il effectue des mesures du rayonnement UV spectral en routine depuis 2009. La période (2014-2018) a vu la création du réseau régional UV-Indien de mesure des RUV et de nébulosité à partir de spectromètres large bande calibrés et de caméras imageur de ciel. Sept stations sont prévues, dans cinq pays de l'océan Indien (Voir *Bilan du LACy en observation Atmosphérique*).

Actuellement quatre stations sont opérationnelles. L'objectif est l'observation sur le long terme des RUV, de la colonne d'ozone total et de la fraction nuageuse, pour la validation des satellites et des modèles.

Les premiers instruments de ce réseau font partie d'un programme de validation satellitaire du CNES pour les satellites TROPOMI à bord de Sentinel-5 Precursor (ESA) et de la nouvelle version des produits UV des instruments GOME-2 à bord de Metop-A et de Metop-B (ESA). Les premières études à partir des données du réseau UV-Indien et du spectro-radiomètre Bentham ont permis de définir des méthodes pertinentes de filtrage en ciel clair (Lamy et al., 2018a), de réaliser les premières climatologies sur certains sites de l'océan Indien (Cadet et al., 2017), de calculer les facteurs d'amplification radiative pour l'ozone (RAF radiative amplification factor) et de définir les paramétrisations locales adaptées à chaque site pour le modèle de transfert radiatif 1D TUV. Les sorties de ce modèle ont été validées à La Réunion grâce aux mesures sol du réseau (Lamy et al. 2018a).

Enfin, l'indice ultraviolet (UVi) au midi solaire a été calculé à partir des champs d'ozone, de température et d'aérosols simulés durant la première phase de l'exercice d'inter-comparaison des modèles de chimie-climat (CCMI-1), couplée au modèle TUV. Nous avons observé une augmentation de 6 à 8% des indices UV (UVi) et une diminution de 4 % des colonnes d'ozone total (TOZ), dans la ceinture tropicale entre la période cible 2090-2100 et la période de référence 1960-1970, pour un scénario RCP 6 et en fixant l'évolution des GES (fGHG - Figure 40).

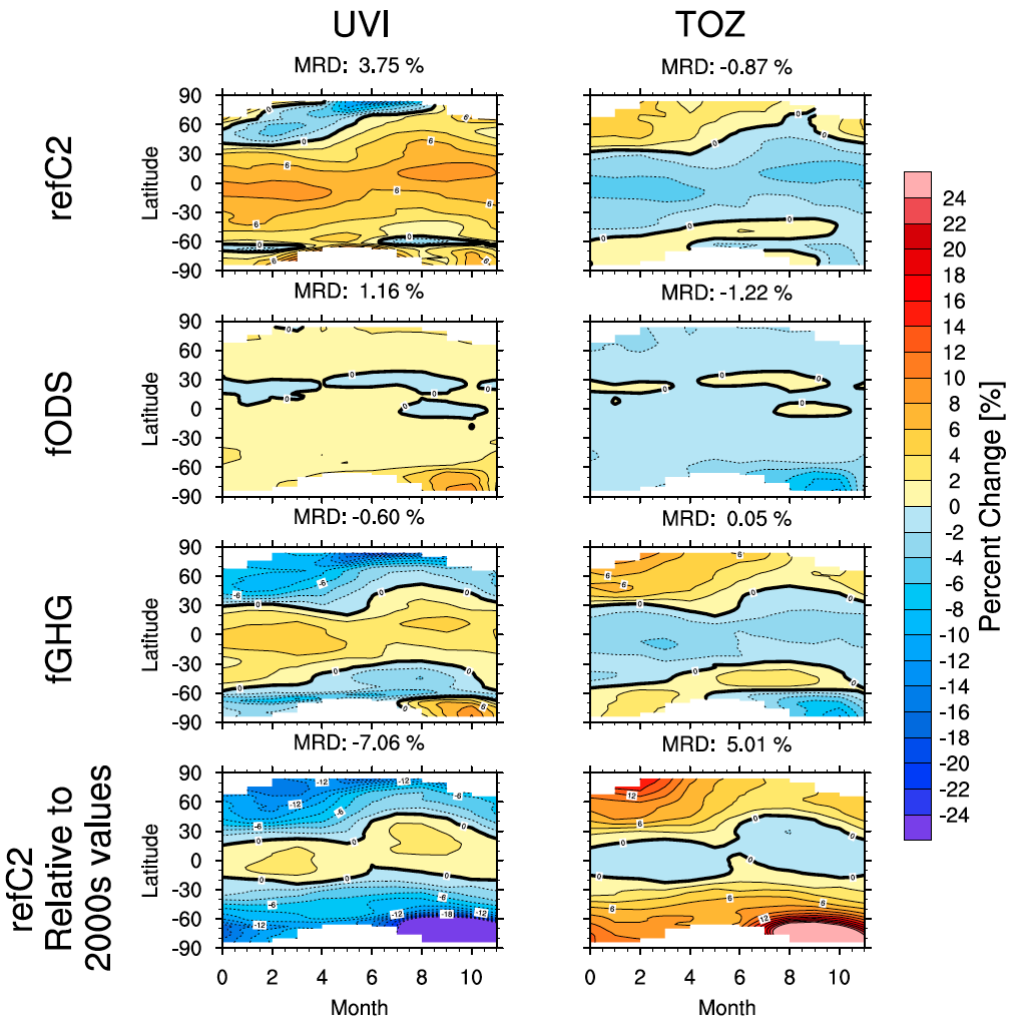

Figure 40 : Variation relative globale des UVi et des TOZ à la fin du 21eme siècle (d'après Lamy et al., 2018b soumis)

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Cadet J.M., H. Bencherif, C.Y. Wright, T. Portafaix, K. Ncongwane and G.J.R. Coetzee, Comparison of ground-based and satellite-derived solar ultraviolet radiation levels at six South Africa sites, Int. J. Environ. Res. Public Health, 14, 1384 ; doi : 10.3390/ijerph14111384, 2017.

- Fernandez, S., R. Rüfenacht, N. Kämpfer, T. Portafaix, F. Posny, and G. Payen, Results from the validation campaign of the ozone radiometer GROMOS-C at the NDACC station of La Réunion Island, Atmos. Chem. Phys., 16, 7531–7543, 2016.

- 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, doi : 10.5194/amt-9-2497-2016, 2016.

- Lamy K., Portafaix T., Brogniez C., Godin-Beekmann S., Bencherif H., Morel B., Pazmino A., Metzger J. M., Auriol F., Deroo C., Duflot 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, doi.org/10.5194/acp-18-227-2018, 2018.

- Toihir A.M., T. Portafaix, V. Sivakumar, H. Bencherif, A. Pazmiño, N. Bègue, Variability and trend of ozone over the southern tropics and subtropics, Ann. Geophys., 2018.

- Vaz Peres, L., Bencherif, H., Mbatha, N., Passaglia Schuch, A., Toihir, 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, doi : 10.5194/angeo-35-25-2017, 2017

V - Les thématiques transverses

1) Interaction aérosols-nuages

PARTICIPANTS

C. Barthe, S. Bielli, P. Tulet, T. Hoarau, J. Pianezze, H. Vérèmes (LACy)

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

En impactant les bilans radiatif et thermodynamique de la Terre, l'aérosol atmosphérique a des effets importants sur l'évolution du climat. Les effets radiatifs directs sont ceux basés sur l'interaction du rayonnement avec le champ d'aérosols. Les aérosols affectent aussi le bilan radiatif par une voie indirecte car ces particules nucléent les gouttelettes et cristaux primaires qui, à travers leurs formes, leurs masses et leurs contenus en eau, déterminent les propriétés radiatives et précipitantes d'un nuage. Ainsi, si le nombre de noyaux de condensation augmente pour un contenu en eau liquide constant, le nombre de gouttelettes formées augmente mais leur diamètre effectif diminue. On a donc une limitation de l'efficacité de coalescence qui modifie largement le cycle de vie du nuage. Cependant, ces effets doivent être nuancés, en particulier pour les nuages fortement précipitants en raison des interactions

complexes dynamique - microphysique. Actuellement, les nombreuses études numériques ou basées sur les observations ne permettent pas de statuer à coup sûr sur le rôle précis des aérosols dans la convection profonde : ils pourraient soit atténuer la convection et les précipitations (Rosenfeld, 2000 ; Khain et Pokrovsky, 2004 ; Rosenfeld et al., 2008) soit les renforcer (Lin et al., 2006 ; van den Heever et al., 2006 ; Fan et al., 2007 ; Khain et al., 2008). Leur rôle dans le développement et l'intensification des cyclones tropicaux n'est pas non plus tranché.

L'impact des aérosols sur l'intensité et les précipitations associées aux cyclones tropicaux dépend donc de différents facteurs : le type d'aérosols, ses caractéristiques radiatives et ses capacités CCN et/ou IN (Ice Nuclei ou noyaux glaçogènes), l'altitude et la localisation du panache, la localisation de l'intrusion du panache (bandes précipitantes ou mur de l'œil)... Ainsi, pour progresser dans la prévision de l'intensité des cyclones tropicaux, il est indispensable d'améliorer la physique des modèles en prenant en compte l'effet des aérosols sur la microphysique et la thermodynamique.

Le couplage entre le schéma d'aérosols ORILAM et le schéma microphysique à 2 moments LIMA au sein du modèle Meso-NH a été réalisé dans le cadre de la thèse de Thomas Hoarau (2014-2018). Cette étude s'étend aux systèmes précipitants non cycloniques dans le cadre du post-doc de Hélène Vérèmes (projet RAPTOR). Ces études sont menées à l'interface entre les équipes Cyclones et Troposphère.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Le couplage original entre un schéma d'aérosol et un schéma microphysique à 2 moments a été réalisé dans le modèle communautaire Meso-NH afin de représenter les interactions aérosol-microphysique-dynamique dans les cyclones tropicaux. Une première évaluation de ce couplage a été réalisé sur le cyclone tropical Dumile passé à proximité de La Réunion en décembre 2012 - janvier 2013. On montre que le système couplé reproduit bien la trajectoire et l'intensité de Dumile, avec la transition d'une dépression de mousson vers un cyclone tropical. Le contenu en glace est en bon accord avec le produit DARDAR. Des analyses de sensibilité ont permis de montrer que l'utilisation d'un schéma microphysique à 1 moment produit un système plus intense et plus symétrique dont la trajectoire est décalée à l'ouest. Dans la simulation couplée aérosol-microphysique, les aérosols marins, la principale source de CCN, sont produits préférentiellement dans les régions de forts vents et de vagues, ce qui renforce les asymétries convectives par rapport à la simulation utilisant le schéma microphysique à 1 moment. Si un schéma microphysique à 2 moments sans émission de sels marins est utilisé, Dumile s'affaiblit de façon spectaculaire après 24 heures de simulation. Cet affaiblissement est lié à la consommation et au lessivage des CCN interstitiels dans le coeur du système (Figure 41). Il est donc primordial de prendre en compte de façon explicite l'émission de sels marins associée aux vents forts et aux vagues pour la simulation des cyclones tropicaux, phénomène à relativement longue durée de vie et qui génère ses propres CCNs.

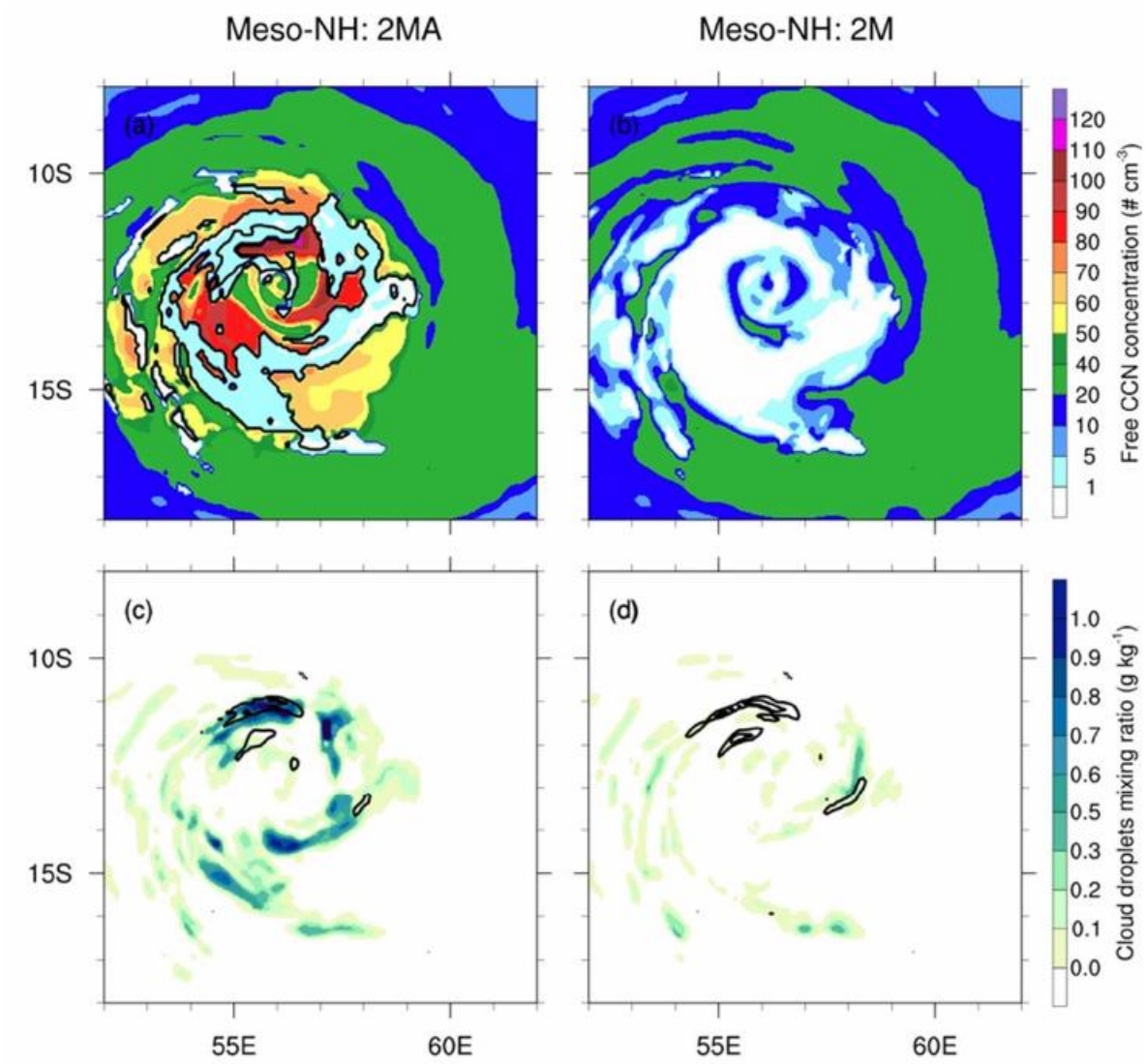

Figure 41 : 1ère ligne : concentration en nombre (cm-3) des CCN interstitiels (couleurs) et activés (isolignes noires à 50 cm-3) associés aux aérosols marins. 2ème ligne : rapport de mélange (g kg-1) de l'eau nuageuse (couleurs) et de la pluie (isolignes noires à 0.5 et 1 g kg-1). Les coupes horizontales sont réalisées à 2000 m d'altitude le 1er janvier à 12 UTC pour les simulations utilisant le couplage aérosol-microphysique avec (gauche) et sans (droite) émission de sels marins.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Pianezze, J., C. Barthe, S. Bielli, P. Tulet, S. Jullien, G. Cambon, O. Bousquet, M. Claeys, and E. Cordier, 2018 : A new coupled ocean-waves-atmosphere model designed for tropical storm studies: example of Tropical Cyclone Bejisa (2013-2014) in the south-west Indian ocean. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10, doi : 10.1002/2017MS001177.

- Hoarau, T., C. Barthe, P. Tulet, M. Claeys, J.-P. Pinty, O. Bousquet, J. Delanoë, and B. Vié, Impact of the generation and activation of sea salt aerosols on the evolution of Tropical Cyclone Dumile. Soumis à J. Geophys. Res. Atmos., en révision.

2) Coopérations régionales Océan Indien et hémisphère sud

PARTICIPANTS

H. Bencherif, O. Bousquet, P. Tulet, T. Portafaix (LACy)

A) Coopération hémisphère sud

Depuis 2010, l'équipe Stratosphère du LACy développe et porte des collaborations de recherche et de formation par la recherche dans la zone océan Indien, et plus largement dans l'hémisphère sud, avec l'Afrique du Sud, l'Australie, le Brésil et l'Argentine et des pays de la COI (Commission de l'Océan Indien).

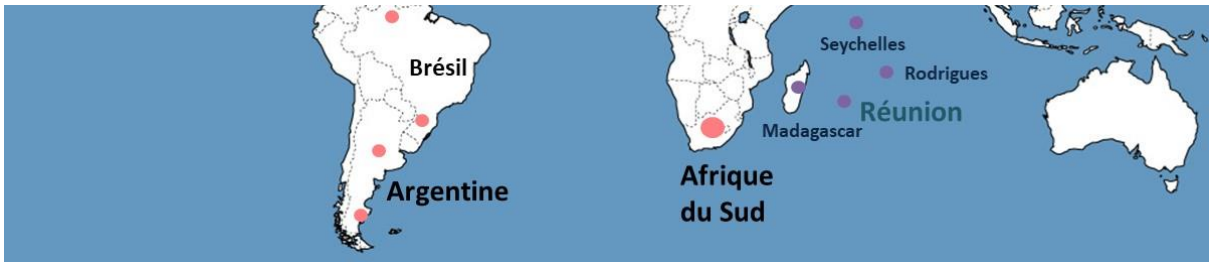

Figure 42 : Réseau de collaborations internationales dans l'hémisphère sud.

L'axe de coopération avec l'Afrique du Sud est le plus ancien et le plus soutenu. Il s'est notamment développé dans le cadre du GDRI ARSAIO (*Atmospheric Research in Southern Africa and Indian Ocean*), de 2010 à 2017.

Le GDRI ARSAIO est un réseau franco-sud-africain qui rassemble 4 partenaires français et 5 partenaires sud-africains et qui a pour objectifs de développer des échanges scientifiques autour d'action de recherches communes tout en impliquant des jeunes chercheurs (niveaux Master et Doctorat). Côté français, le GDRI est coordonné par le LACy, et côté sud-africain, il est coordonné par l'University of KwaZulu-Natal.

Les activités ARSAIO sont organisées selon 4 actions de recherches animées conjointement par des chercheurs français et sud-africains :

- Impact of anthropogenic pollution in Southern Africa on Climate Change and Health.
- Transport and deposition of mineral dust in western southern Africa.
- Stratosphere-troposphere interactions: variability and composition change and radiations UV.

Le GDRI ARSAIO a été mis en place pour 4 années (2010-2013) par l'INSU-CNRS et la NRF (*National Research Foundation*). Il a été renouvelé pour la période 2014-2017. Les actions de coopérations ont permis d'impulser plusieurs autres projets bilatéraux (PHC-Protea) et actions de recherches communes, des échanges scientifiques, des co-encadrements d'étudiants en thèses et en master, des publications scientifiques communes, ainsi que des écoles d'été.

Pour élargir son réseau de recherche et d'observation dans l'hémisphère sud, l'équipe Stratosphère du LACy développe des partenariats de recherche avec le Brésil et l'Argentine :

projet **MESO/COFECUB**	Modélisation et prédiction des effets du trou d'ozone Antarctique, *financé dans le cadre de l'AAP CAPES-COFECUB 2016*	2017-2020
projet **ECOS-Sud**	Transport de l'Ozone au-dessus de l'Argentine et dans l'HS *financé dans le cadre de l'AAP ECOS Sud (France – Argentine) 2016*	2017-2019

La collaboration avec le Brésil a démarré il y a environ 4 ans, sous forme d'une thèse en codirection Brésil-France. Cette collaboration s'est renforcée avec la mise en place du programme MESO (*Modélisation et prédiction des Effets Secondaires du trou d'Ozone antarctique*) dans le cadre de l'appel à projets CAPES COFECUB et 2 nouvelles thèses.

Quant à la collaboration avec l'Argentine, elle remonte à 2012, notamment dans le cadre des activités du réseau NDACC.

Le programme de Recherche ReNovRisk, et plus particulièrement ses composantes internationales ReNovRisk-C3 et ReNovRisk-CP, toutes deux portées par le LACy, constitue également un moyen de renforcer significativement la collaboration régionale à l'échelle du bassin SOOI. Ces deux programmes, conduits en partenariat avec le Service Météorologique des Seychelles (SMA), l'Université de Madagascar (IOGA), L'Institut Océanographique de Maurice (MOI), l'Université mozambicaine Eduardo Mondlane (UEM) et le service Météorologique du Mozambique (INAM), intègrent ainsi de nombreuses actions visant à renforcer la coopération régionale et internationale autour de l'aléa cyclonique. On pourra notamment citer la mise en place de programmes de formations et d'échanges d'expertise autour des outils numériques, des moyens d'observations, et de la prévision des cyclones, mais aussi de comités visant à accélérer (ou ajuster) rapidement le déploiement de stratégies d'adaptation et de résilience à l'aléa cyclonique via la mise en place de politiques publiques d'aménagement adaptées aux risques, présents et futurs, encourus par les territoires.

B) Formation par la recherche

Dans le contexte géographique de l'Université de La Réunion, université française dans l'Océan Indien, certaines activités de rayonnement et de formation, notamment par la recherche, sont tournées vers les pays du bassin « *sud-ouest de l'Océan Indien* », principalement avec l'Afrique du Sud, puis Madagascar, île Maurice et les îles des Comores. Le LACy a significativement contribué à la formation par la recherche autour de 3 types d'activités : montage et responsabilité pédagogique de Masters, direction d'école doctorales et organisation d'écoles thématiques.

MONTAGE ET RESPONSABILITÉ PÉDAGOGIQUE DE MASTERS

Durant la période 2012-2015, le LACy a assuré la direction pédagogique du master Géosphère composé de 4 spécialités, dont les spécialités Atmosphère et Télédétection et Risques Naturels (TRN). Ces dernières étaient adossées au LACy. La spécialité TRN a été mise en place en articulation avec l'installation de la station SEAS-OI (*Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite pour l'Océan Indien*) à St-Pierre, plateforme de réception d'imagerie satellite dans l'Océan Indien (images satellites optiques radar haute résolution) et pôle de compétence en télédétection et géomatique. Elle a fonctionné durant la période 2012-2015, avec des enseignements dispensés successivement à Madagascar, à La Réunion et en Afrique du Sud.

Dans le contrat en cours, 2015-2019, le LACy assure la responsabilité pédagogique du parcours atmosphère au sein du nouveau Master RNET (*Ressources et risques Naturels des Environnements Tropicaux*). 6 E-C du LACy (sur 9) participent aux enseignements du Master RNET.

ECOLE DOCTORALE RÉGIONALE RAMI

Durant la période 2013-2018, avec le soutien de l'AUF (*agence universitaire de la francophonie*), le LACy a initié et porté un projet d'Ecole Doctorale Régionale (EDR) sur le thème « *observations environnementales et Risques nAturels en Milieu Insulaire* » – RAMI.

L'EDR RAMI a vu le jour en 2013 en complémentarité avec le master international TRN. Les deux projets, master TRN et EDR RAMI, sont en résonnance avec la stratégie de l'université de La Réunion en termes de rayonnement international et d'ouverture sur son environnement géographique, ainsi qu'avec la stratégie de l'AUF pour créer, dans l'Océan Indien, des filières de formation et des réseaux de collaboration thématiques.

L'EDR RAMI est adossée à un consortium de 7 universités, avec un budget annuel moyen de 70.000 € destiné à accompagner une cohorte de doctorants originaires des pays de la zone Océan Indien (Madagascar, Réunion, Afrique du Sud, Comores, Maurice) le long de leurs thèses.

ORGANISATION D'ÉCOLES THÉMATIQUES

En cohérence avec ses activités et collaborations de recherche, le GDRI ARSAIO a permis au LACy d'organiser et co-organiser annuellement, à La Réunion et en Afrique du Sud,

des écoles thématiques sur le thème « Télédétection et applications à l'observation de l'atmosphère ». Cela se présente sous forme de cours théoriques et ateliers de formation pratique en instrumentation ou en programmation (outils numériques) destinés à des jeunes chercheurs (Master et PhD ou équivalent).

En plus du soutien de l'université de La Réunion (particulièrement celui du Pôle Recherche et celui de la Direction des Relations Internationales), cette activité a mobilisé des financements de plusieurs organismes et agences :

- Agence sud-africaine de la recherche, NRF (*National Research Foundation*)
- Bureau Océan Indien de l'AUF (*Agence Universitaire de la Francophonie*)
- Centre sud-africain des lasers, NLC (*National Laser Centre*)
- CNRS, via le GDRI ARSAIO (*Atmospheric Research in Southern Africa and Indian Ocean*)
- Coopération Française, SCAC, ambassade de France à Madagascar
- Coopération Française, SCAC, ambassade de France en Afrique du Sud
- GAW (Global Atmosphère Watch) de l'OMM
- Programmes ACCLIMAT et Risques de la COI (*Commission de l'Océan Indien*)
- Projet SPARC (*Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate*) du programme WCRP

Ce qui a permis d'organiser 6 écoles thématiques de 2012 à 2017 :

- Décembre 2012 à l'University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud
- Décembre 2013 à l'University of KwaZulu-Natal, Durban, Afrique du Sud
- Décembre 2014 à l'University of Pretoria, Pretoria, Afrique du Sud
- Septembre 2015 à l'University of KwaZulu-Natal, Durban, Afrique du Sud
- Décembre 2016 à l'Université de La Réunion, LACy et OPAR, La Réunion, France
- - Septembre 2017 à l'University of KwaZulu-Natal, Durban, Afrique du Sud

FORMATION EN PRÉVISION CYCLONIQUE

Le LACy contribue activement aux actions de formation à destination des prévisionnistes de la zone Océan Indien qui sont organisées régulièrement par l'Organisation Météorologique Mondiale et le CMRS Cyclone de La Réunion. Lors des deux dernières éditions, organisées en 2014 et 2017, les agents du LACy ont ainsi dispensé plusieurs formations dans le domaine de la prévision numérique du temps et de la modélisation des cyclones tropicaux à une vingtaine de stagiaires venus d'une douzaine de pays situés dans la zone de responsabilité du CMRS.

VI - Le bilan du LACy en observation atmosphérique

PARTICIPANTS

V. Duflot, O. Bousquet, T. Portafaix, J-P Cammas, S. Evan, F. Posny (LACy), S. Godin-Beekmann (LATMOS)

Le LACy travaille étroitement avec l'UMS3365 de l'OSU-R dans le développement du parc instrumental de l'OPAR. Celui-ci a connu une augmentation très importante sur la période considérée, passant de 22 instruments en 2013 à 55 en 2018 (cf. Tableau 1). En particulier, outre les instruments de télédétection déjà déployés début 2013, l'OPAR s'est doté durant cette période d'un ensemble cohérent d'instruments de mesure in-situ (analyseurs gaz traces et aérosols, en particulier au Maïdo), et d'étude de la microphysique nuageuse. On pourra notamment mentionner le radar nuage BASTA-Réunion (95 GHz), déployé au Moufia, qui permet d'échantillonner avec une précision inégalée les propriétés microphysiques (réflectivité et vitesse de chute des hydrométéores) des nuages tropicaux (Fig. 43), mais aussi des disdromètres (optique et vidéo) permettant de caractériser précisément les propriétés des précipitations tropicales (taille, forme, densité).

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Nombre d'instruments	22	35	41	44	52	55

Tableau 1 – Évolution du parc instrumental de l'OPAR.

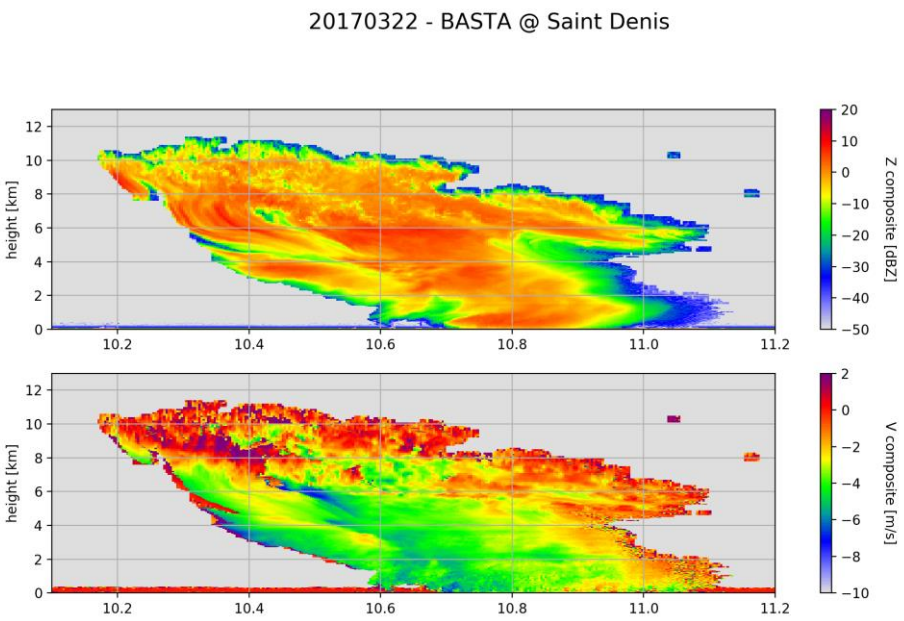

Figure 43 : Séries temporelles de profils verticaux de réflectivité (haut) et de vitesses verticales (bas) dans un nuage faiblement précipitant observé par le radar basta le 22 mars 2017 entre 10 et 11:30 TU.

Il est à noter que, sur l'ensemble du parc instrumental de l'OPAR, les deux tiers des instruments ont un PI ou co-PI du LACy qui joue ainsi un rôle prépondérant dans les labellisations de ces instruments au sein des réseaux et des SNO, dans la recherche des financements pour le fonctionnement, la maintenance et la jouvence des instruments, de même que dans leur évolution. À l'acquisition de nouveaux instruments s'est ainsi ajoutée l'amélioration des instruments existants : les lidars du Maïdo et le lidar mobile aérosols ont ainsi été équipés de nouvelles voies d'émission/réception permettant une caractérisation plus complète des aérosols détectés. Les lidars vapeur d'eau (Vérèmes et al., 2017) et ozone troposphérique (Duflot et al., 2017) du Maïdo ont été labellisés au sein du NDACC en février 2017 grâce, notamment, à la campagne MORGANE (Maïdo ObservatoRy Gaz and Aerosols NDACC Experiment, 2015) réalisé à la station du Maïdo.

En particulier, la labellisation du lidar vapeur d'eau a nécessité un fort investissement du LACy et de l'UMS 3365. Après de premières mesures effectuées sur le campus universitaire avec un lidar Raman vapeur d'eau (Hoareau et al., 2012), l'observatoire du Maïdo a été doté en 2013 d'un lidar Raman vapeur d'eau (Lidar1200) plus puissant et dimensionné pour produire des profils de rapport de mélange de vapeur atteignant l'UTLS tropicale, avec pour objectif d'intégrer cet instrument dans le réseau international du NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) et de GRUAN (GCOS Reference Upper-Air Network). Les profils lidar de vapeur d'eau ont pu être comparés à des profils obtenus par les sondes Vaisala RS92, les sondes Modem M10 et des sondes CFH dans le cadre de la campagne de mesure MORGANE (Maïdo ObservatoRy Gaz and Aerosols NDACC Experiment, 2015) réalisée au Maïdo. Toutes ces sondes ont montré un bon accord avec le lidar dans la troposphère. Les comparaisons individuelles et moyennes des profils lidar et CFH ont montré un bon accord sur tout le profil jusque dans l'UTLS. La capacité du lidar à mesurer des quantités de quelques ppmv dans la basse stratosphère est démontrée pour une intégration de 48 heures de données,

une résolution de 1,3 km et une erreur inférieure à 0,8 ppmv et 22 % jusqu'à 22 km (Fig. 44), ce qui est une performance unique au monde.

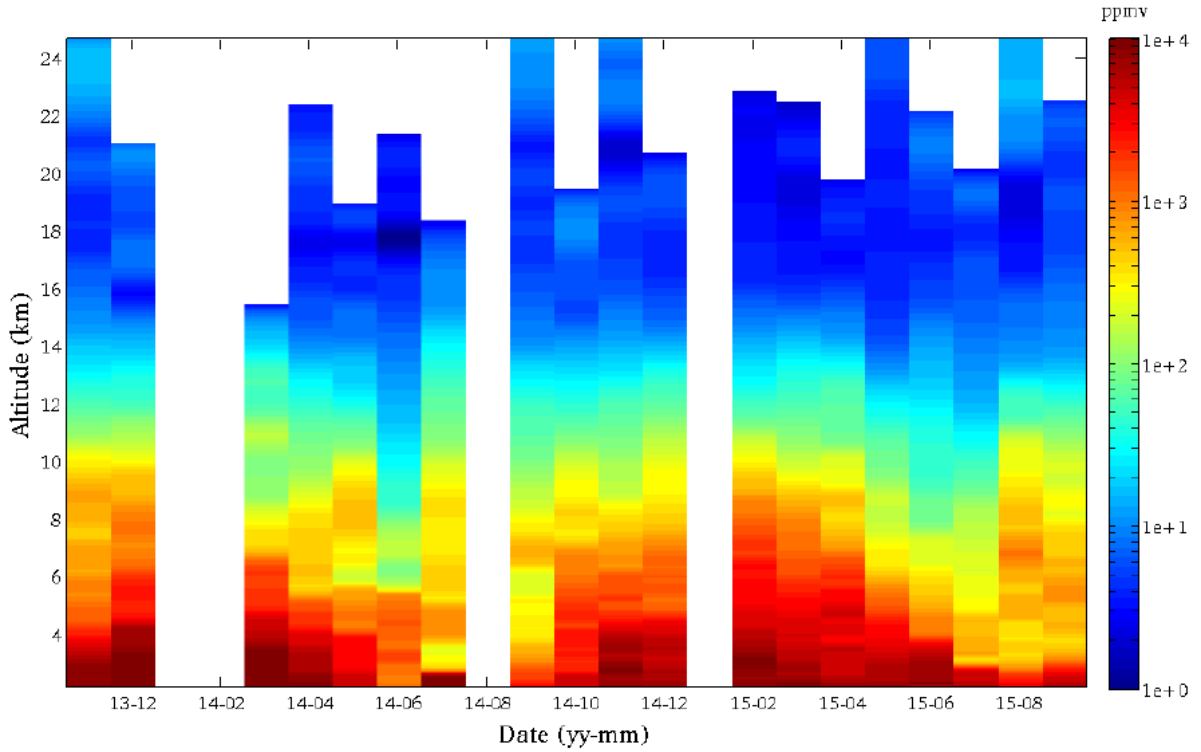

Figure 44 : Série temporelle des profils mensuels du rapport de mélange vapeur d'eau du Lidar1200 de Novembre 2013 à Octobre 2015. Des sessions de 8 heures minimum de mesures sont intégrées pour construire un profil mensuel et les profils pour lesquels une erreur totale est supérieure à 80% sont rejetés. Le seuil d'intégration a été réduit à 6 heures pour décembre 2013, mars 2014 et février 2015. L'abscisse indique le mois et l'année du profil. (Vérèmes et al., 2017).

Inscrit dans un effort de labellisation du lidar Raman vapeur d'eau dans le réseau international NDACC, le travail mené sur le protocole de détermination du coefficient du lidar vapeur d'eau et de la validation des données a pour objectif final la mise à disposition des données au pôle national de données et services AERIS et dans la base de données NDACC à l'international.

Ce sont aujourd'hui 50% des observations de l'OPAR qui sont labellisées au sein de réseaux internationaux et des SNO.

Le LACy est également impliqué dans la calibration et la validation d'observations satellite (CALIPSO v4, TROPOMI, GOME-2, EarthCARE). Depuis un an, le LACy copilote par ailleurs avec l'ESA, l'IFREMER et la DIROI un projet expérimental (SHOC V2) de 2 ans (2018-2020) visant à échantillonner, à la demande, les cyclones du bassin SOOI à partir des radars à synthèse d'ouverture déployés sur les satellites SENTINEL 1A et 3A du programme Copernicus. L'acquisition d'images SAR, basée sur les prévisions à 5 jours du CMRS Cyclones de La Réunion, a d'ores et déjà permis d'échantillonner l'ensemble des systèmes dépressionnaires tropicaux du bassin SOOI lors de la saison cyclonique 2017-2018 et d'évaluer, avec une précision inédite, leur intensité (Fig. 45). L'apport de ces nouvelles observations dans les domaines de la prévision "temps réel" d'intensité et de la prévision numérique (via l'assimilation de ces observations dans AROME Indien - projet TOSCA soumis en avril 2018),

fait l'objet de plusieurs études qui pourraient conduire à la pérennisation de ces mesures dans le cadre des différents programme COPERNICUS.

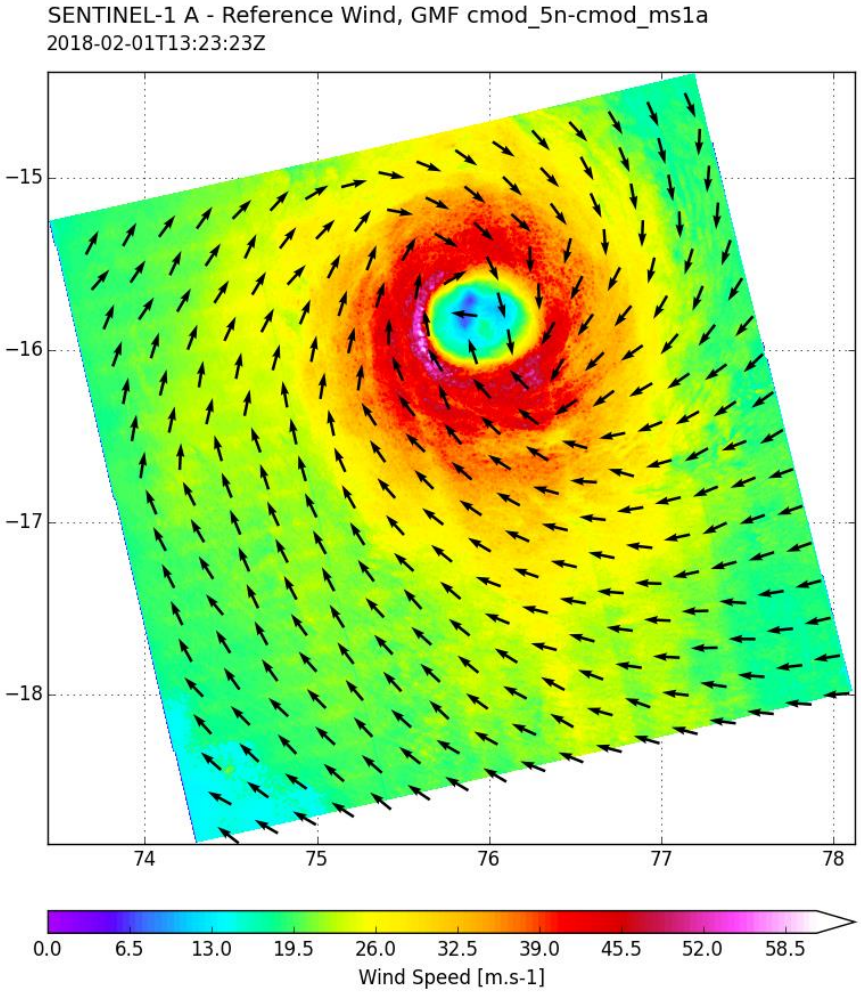

Figure 45 : Champ de vent cyclonique à l'interface océan-atmosphère issu de l'analyse des données SAR du satellite SENTINEL 1A pendant le cyclone tropical CEBILE, le 02 février 2018. A l'inverse des diffusiomètres, dont les mesures sont techniquement limitées à des vents inférieurs de 35 m/s, les mesures SAR ne sont pas seuillés et permettent de mesurer précisément l'intensité de n'importe quel cyclone. Une première campagne test, réalisée en 2017 sur l'Atlantique Nord, a ainsi permis de mesurer des vents de près de 84 m/s dans le cyclone tropical IRMA.

De plus, 18 campagnes de mesures ont été conduites par le LACy et l'OSU-R entre janvier 2013 et juin 2018 (Tableau 2). Outre la matière première à la conduite d'étude de processus physico-chimiques et/ou à la validation d'observations en vue d'une intégration dans un réseau d'observation, ces campagnes ont fait intervenir et ont renforcer des collaborations nationales et internationales contribuant au rayonnement scientifique du LACy.

Période	Campagne	Objectifs	Participants	Financement	Réseau / Base de données
03/2013	MALICCA-1	Validation technique du lidar température et vapeur d'eau	LACy, LATMOS, UMS-OSU-R	UMS/OSU-R, LATMOS	OPAR, NDACC, AERIS
11/2013	MALICCA-2	Validation technique du lidar température et vapeur d'eau	LACy, LATMOS, UMS-OSU-R	UMS/OSU-R, LATMOS	OPAR, NDACC, AERIS
04/2014	PRECLOUD	Etude de la microphysique des nuages	LACy, CNRM, UMS-OSU-R	LACy, CNRM	OPAR
05/2014	FARCE-1	Forest – AeRosols – Clouds intEractions at Réunion	LACy, LSCE, PVBMT, UMS-OSU-R	LSCE, LACy, UMS/OSU-R, Fédération OMNCG	OPAR
11/2014	GRUAN-1	Intercomparaison lidar vapeur d'eau et sonde CFH	LACy, UMS-OSU-R, DWD	EU FP7 TNA ACTRIS	OPAR, NDACC-GRUAN, AERIS
02/2015-11/2015	STRAP	Composition et évolution du panache du Piton de la Fournaise	LACy, OVPF, LaMP, INGV, UMS-OSU-R	ANR	OPAR
03/2015	BIOMAIDO	Etudes des aérosols biogéniques et de la microphysique des nuages	LACy, LaMP, CNRM, NOAA USA	LACy, LaMP, CNRM, NOAA USA, Fédération OMNCG	OPAR
04/2015	FARCE-2	Forest – AeRosols – Clouds intEractions at Réunion	LACy, PVBMT, LaMP, CNRM, NOAA USA, UMS-OSU-R	Fédération OMNCG, OSU-R, LACy LaMP, CNRM, NOAA USA	OPAR
05/2015	MORGANE	Labellisation NDACC des lidars de l'OPAR	LACy, UMS-OSU-R, NASA/GSFC, NASA/JPL, LATMOS/OVSQ, LaMP	NASA, OSU-R, LATMOS/OVSQ	OPAR, NDACC, AERIS
05/2015	GRUAN-2	Etude de l'UTLS tropicale et contribution à GRUAN	DWD, LACy, UMS-OSU-R	H2020 INFRA TNA ACTRIS-2, OSU-R	OPAR, NDACC-GRUAN, AERIS
01/2016	HAIC-CFH	Etude de l'UTLS tropicale et contribution à GRUAN	LACy, UMS-OSU-R	H2020 INFRA TNA ACTRIS-2, OSU-R	OPAR, NDACC-GRUAN, AERIS
03/2016	AERO MARINE	Profils aérosols avec sonde POPS sur drones et ballons	LACy, NOAA, UMS-OSU-R	OSU-R, TNA ACTRIS	OPAR
04/2016	FARCE-3	Forest – AeRosols – Clouds intEractions at Réunion	LACy, PVBMT/OSU-R, UMS-OSUR	Fédération OMNCG, OSU-R, LACy	OPAR
06/2016	ARISE	Etude de la dynamique de la moyenne atmosphère	LACy, UMS-OSU-R, ONERA, LATMOS, CEA	OSU-R, ONERA, LATMOS, CEA	OPAR, NDACC, AERIS
06/2016-12/2017	CLEVER-1 et CLEVER-2	Cloud Layer, tempErature inVersion and vEgetation in La Réunion	LACy, PVBMT/OSU-R, UMS-OSU-R	Fédération OMNCG, OSU-R	OPAR
05/2017	LIDAR AEROSOLS MAIDO	Ajout voies aérosols multi-λ	LACy, UMS-OSU-R, LATMOS	LACy, UMS-OSU-R, LATMOS	OPAR
05/2017	GRUAN-3	Etude de l'UTLS tropicale et contribution à GRUAN	DWD, LACy, UMS-OSU-R	H2020 INFRA TNA ACTRIS-2, OSU-R	OPAR, NDACC-GRUAN, AERIS
02-04/2018	OCTAVE	Source et variabilité des O-COV et des aérosols marins et biogéniques	LACy, UMS-OSU-R, ILTS, IASB, IGE, LaMP, LSCE, U. Helsinki, U. Boulder	BRAIN-BE, LACy, OSU-R, H2020 INFRA TNA ACTRIS-2, labo partenaires	OCTAVE

Tableau 2 – Campagnes LACy/OPAR de 01/2013 à 06/2018.

Depuis 2014, des mesures CFH sous ballon météorologique ont été développées dans le cadre d'une collaboration avec le réseau GRUAN (GCOS Reference Upper Air Network). GRUAN est un réseau mondial soutenu par l'OMM qui vise à produire des mesures de référence pour l'estimation de la vapeur d'eau atmosphérique. Le capteur CFH (Cryogenic Frospoint Hygrometer) est un instrument sous ballon météorologique qui fournit des mesures précises de vapeur d'eau de la surface jusqu'à ~25 km (Vömel et al., 2007, 2016). 16 lâchers CFH ont été effectués sur la période 2014-2017 pendant différentes campagnes présentées dans le Tableau 2. Les équipes du SIRTA et de MODEM ont commencé en 2013 à travailler sur l'amélioration des mesures de température et d'humidité avec la sonde M10 aux moyennes latitudes. En partenariat avec le SIRTA et MODEM, l'ensemble des mesures de vapeur d'eau M10 et CFH

de La Réunion (le lâcher des 2 sondes est souvent coordonné) sur la période 2013-2017 permettra de poursuivre l'amélioration de l'algorithme de traitement des mesures de vapeur d'eau par les radiosondes M10 en milieu tropical.

Dans le cadre du programme OCTAVE, une campagne intensive de mesure a été conduite par le LACy à La Réunion de fin février à mi-mai 2018. Cette campagne intensive a impliqué le LACy et 18 personnes venant du LaMP, de l'université d'Helsinki (Finlande), de l'université du Colorado à Boulder (USA) et de l'université d'Hokkaido (Japon). A l'observatoire du Maïdo, des mesures de COV par cartouches, de formaldéhyde par un instrument AEROLASER, un spectromètre CE-DOAS (glyoxal, NO2), 2 Api-TOF (mesures chimiques des vapeurs précurseurs des nouvelles particules) ainsi que des mesures sur filtres ont été installés pour caractériser, en complément des instruments existants à l'observatoire, les interactions entre COV et formation de nouvelles particules et notamment le rôle joué par les halogènes. De plus, des mesures par cartouches et un PTR-MS ont été placés dans un camion en collaboration avec le laboratoire ATMO REUNION pour mesurer les concentrations de COV à proximité des sources océaniques (site près de la mer) et biogéniques (site de la forêt de Bélouve) sur un mois.

Dans le cadre de l'ANR STRAP (N°CE03 2014), une campagne d'observation a été conduite par le LACy et l'OVPF[31] sur l'ensemble de l'année 2015 sur le Piton de la Fournaise. Cette année particulièrement active (85 jours d'éruption) a permis un rapprochement entre les volcanologues et les physiciens de l'atmosphère autour de la problématique des panaches volcaniques.

Deux éruptions majeures en mai et en août-octobre 2015 ont été documentées par des mesures ULM, lidar, DOAS et in-situ via des prélèvements de lave et des mesures de dioxyde de soufre dans différents secteurs de l'île, dont l'observatoire du Maïdo. Des simulations FLEXPART de trajectoire et de diffusion du panache ont été effectuées sur l'ensemble des périodes d'activité du volcan. Ces simulations temps réels ont aidé à améliorer le dispositif de campagne et les plans de vol de l'ULM. Les mesures effectuées sont nombreuses et plusieurs situations de panaches ont été bien documentées à la fois par des mesures ULM (SO_2, particules fines), par lidar aérosols (extinction) et sur l'observatoire du Maïdo. Près de 10000 profils LIDAR effectués entre le 18 mai et le 19 octobre 2015 sont exploitables. 18 vols par ULM ont été effectués entre le 19 mai et le 18 septembre 2015.

La base de donnée STRAP a été déployée sur le serveur de l'OSU-R (GeOSUR).

Également deux productions audiovisuelles ont été produites présentant la campagne et l'instrumentation déployée. Un court métrage de 13 minutes (Français et Anglais) largement diffusé, notamment à l'EGU et sur le TIV-AV PORTAL (doi 10.5446/30633). Un film de 45 minutes finalisé en Juin 2018 sur l'ensemble du programme, incluant la campagne STRAP 2016 sur l'Etna et le Stromboli.

Enfin dans le cadre du programme ReNovRisk-CP, le LACy est en charge de l'organisation d'une campagne expérimentale centrée sur l'étude des cyclones du bassin SOOI. Cette campagne de 3 mois, qui se déroulera lors de la saison cyclonique 2018-2019, permettra le déploiement d'un dispositif expérimental sans précédent dans cette région qui compte parmi la

31 Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise

moins étudiée de la planète. On citera notamment la réalisation de radiosondages intensifs à Madagascar, au Mozambique et à Mayotte, mais aussi le déploiement d'un ensemble de plateformes instrumentées autonomes visant à échantillonner les propriétés de l'océan et de l'atmosphère en conditions cycloniques qui viendront s'ajouter aux moyens d'observations de l'OPAR. Des planeurs sous-marins (gliders), lancés à partir de La Réunion, permettront ainsi d'étudier les propriétés de la couche de mélange océanique dans la région des Mascareignes, tandis que le drone longue portée Boréal permettra d'échantillonner les propriétés de l'atmosphère (flux turbulents, concentration en aérosols) au voisinage des cyclones tropicaux. Ces mesures seront par ailleurs complétées par des mesures originales issues d'animaux marins (tortues, oiseaux), instrumentés en collaboration avec l'UMR ENTROPIE et le centre d'étude des tortues marine de La Réunion (Kelonia).

Le LACy contribue par ailleurs, via les programmes de recherche ReNovRisk, IOGA4MET-Eparses et UV-Indien, au renforcement des réseaux d'observation pérennes et au développement des systèmes d'instrumentation fixe dans l'océan Indien. Ces stations s'appuient sur de nombreuses collaborations scientifiques et techniques avec les Universités, les organismes de recherche ou les organismes météorologiques nationaux de la région Sud Ouest Océan Indien (SOOI) et le LACy se positionne clairement comme leader des mesures atmosphériques dans cette région :

Six stations GNSS doivent ainsi être déployées sur les îles du bassin SOOI (Aldabra, Sainte-Marie, Tromelin, Glorieuses, Madagascar) d'ici décembre 2018, dans le cadre des programmes ReNovRisk-Cyclones et IOGA4MET-EPARSES. Les stations d'Aldabra et de Fort-Dauphin (Madagascar) ont déjà été installées en 2017 - pour surveiller la distribution spatio-temporelle du champ de vapeur d'eau à l'échelle régionale et fournir des données de délais zénithaux directement assimilables par les principaux modèles globaux et régionaux de prévision du temps (AROME INDIEN, ARPEGE, IFS,...). Ces nouveaux points de mesure viendront compléter les 6 stations existantes du réseau IGS, permettant ainsi d'évaluer à terme l'impact du changement climatique sur le champ de vapeur d'eau et d'améliorer sensiblement les prévisions météorologiques dans cette région.

Dans le cadre du projet UV-Indien, le LACy pilote également 5 stations de mesures spectrométriques et radiomètriques (Seychelles, 3 stations à Madagascar, Rodrigues), et le réseau devrait se développer rapidement vers les Comores et le Mozambique. Les instruments déployés concernent la mesure de l'ozone total par spectrométrie UV-visible, et des rayonnements UV erythémal par radiométrie large bande et enfin de la nébulosité par caméra imageur de ciel.

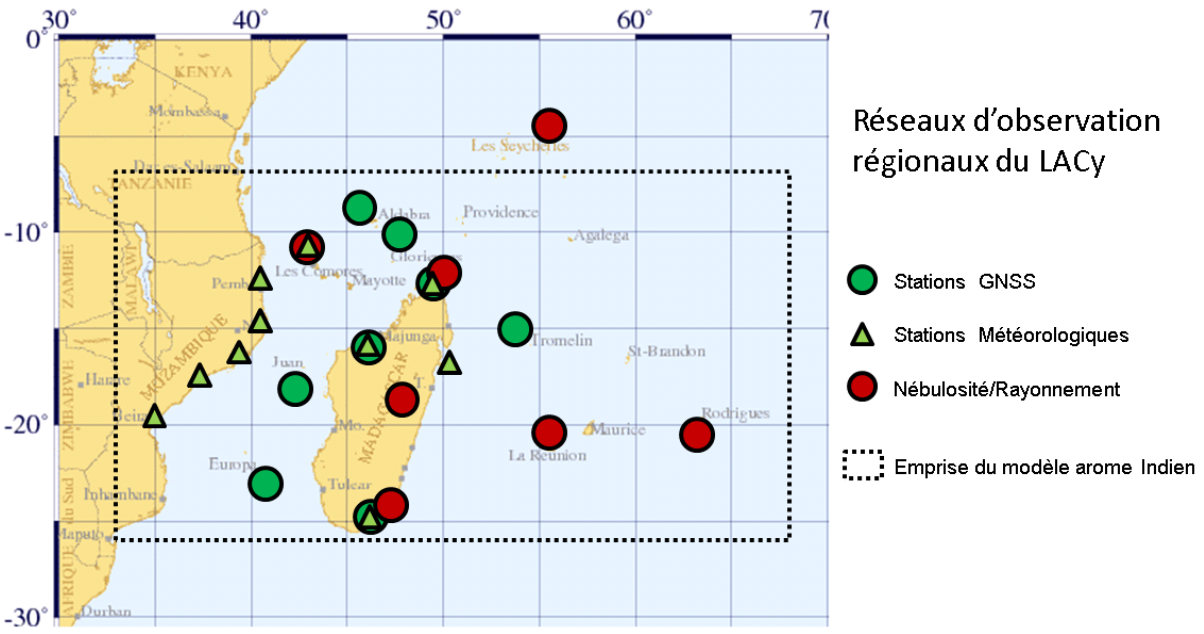

Figure 46 : Vue d'ensemble des réseaux d'observation déployés par le LACy dans la zone SOOI. Les ronds et triangles verts indiquent l'emplacement des stations GNSS et des stations météorologiques déployées en 2017 et 2018 dans le cadre des programmes ReNovRisk-C3/CP et IOGA4MET. Les ronds rouges indiquent l'emplacement des stations déployées dans le cadre des programmes UV-INDIEN et SECU-OI.

Il faut noter que ces stations ne sont pas intégrées à l'OPAR et sont gérées techniquement et scientifiquement directement par les personnels du LACy et des organismes partenaires (hors station Réunion). Seules les données sont hébergées sur les bases de l'OSU-R.

En plus des systèmes instrumentaux, ces réseaux sont l'occasion de nombreux échanges scientifiques (co-encadrement de thèse, échanges d'étudiants, partages de savoir faire) avec les organismes de recherche de la zone SOOI.

Tableau des instruments par station -
Réseaux d'observation SOOI GNSS/ReNovRisk /IOGA4MET et UV-Indien

Pays	Station	Instrument	Paramètre	Réseau	Mise en service
Réunion	St Denis/Moufia	SAOZ	03	UV-Indien	09/1993
		K&Z UVE	UVi	UV-Indien	10/2016
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	12/2016
		Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	10/2017
	Maïdo	Mini-SAOZ	03	UV-Indien	Prévue 2018

		K&Z UVE	UVi	UV-Indien	Prévue 2018
Madagascar	Antananarivo	K&Z UVE	UVi	UV-Indien	10/2016
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	Prévue 2018
	Diego-Suarez	K&Z UVE	UVi	UV-Indien	05/2018
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	Prévue 2018
		GNSS	H20	RenovRisk	05/2018
		Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	05/2018
	Fort Dauphin	K&Z UVE	UVi	UV-Indien	Prévue 2018
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	Prévue 2018
		GNSS	H20	RenovRisk	09/2017
		Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	09/2017
	Mahajunga	GNSS	H20	RenovRisk	Prévue 2018
		Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
	Tamatave	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
	Sainte-Marie	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
		GNSS	H20	RenovRisk	Prévue 2018
Rodrigues	Plaine Corail	K&Z UVE	UVi	UV-Indien	05/2017
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	Prévue 2018
Seychelles	Mahé	K&Z UVE	UVi	UV-Indien	05/2017
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	Prévue 2018
		Mini-SAOZ	O3	UV-Indien	09/2017
	Aldabra	GNSS	H20	RenovRisk	10/2017
Comores	Moroni	K&Z UVE	UVi	UV-Indien	Prévue 2018
		All-Sky Reuni	Ind. Nébu.	UV-Indien	Prévue 2019
		Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2019

		Mini-SAOZ	O3	UV-Indien	Prévue 2019
Iles Eparses	Europa	GNSS	H20	IOGA4MET	Prévue 2018
	Juan de Nova	GNSS	H20	IOGA4MET	Prévue 2018
		K&Z UVE	UVi	UV-Indien	Prévue 2019
	Glorieuses	GNSS	H20	IOGA4MET	Prévue 2018
	Tromelin	GNSS	H20	IOGA4MET	Prévue 2018
Mozambique	Pemba	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
	Beira	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
	Quelimane	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
	Nacala	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018
	Nampula	Station Météo	P,T,U,Précip	RenovRisk	Prévue 2018

Enfin le Lacy s'est également fortement impliqué dans le développement d'outils et de méthodes d'analyse visant à exploiter les capacités Doppler et polarimétriques des radars opérationnels de Météo-France. Ces travaux, réalisés en grande partie dans le cadre de la thèse de J.-F. Ribaud (co-direction LACy), ont notamment permis de développer de nouvelles méthodes de restitution et de compositage multi-radar des données de types d'hydrométéores au sein des nuages précipitants observés par radar polarimétriques. Les résultats obtenus pendant cette thèse ouvrent de nouvelles perspectives pour l'exploitation à des fins opérationnelles et recherche des données collectées par ces instruments, que se soit pour évaluer les performances des schémas microphysiques des modèles Meso-NH et Arome ou pour mieux comprendre les interactions complexes entre processus dynamiques et microphysiques au sein des systèmes précipitants.

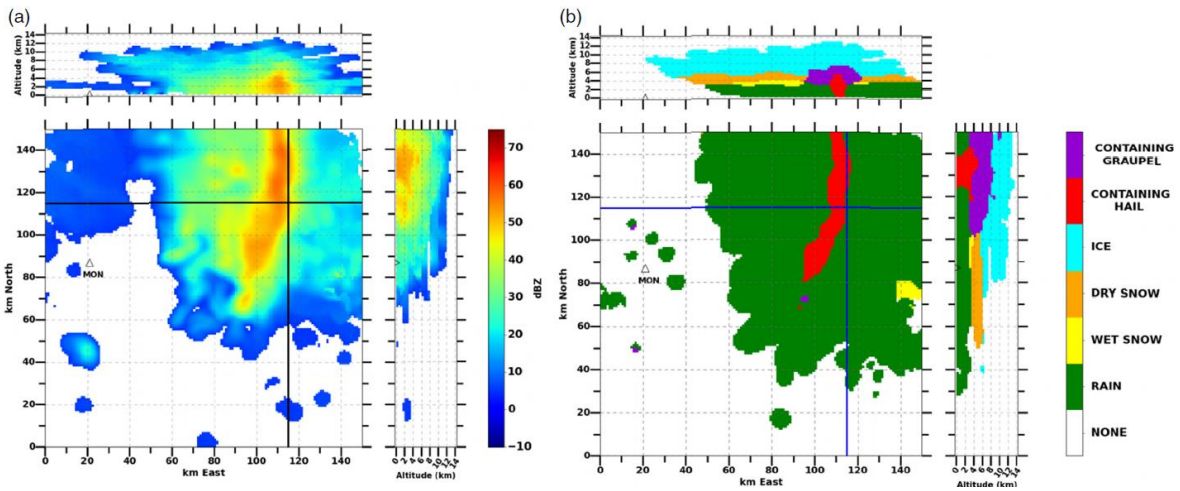

Figure 47 : Coupes horizontale (2 km amsl) et verticales de réflectivité (gauche) et de type d'hydrométéores (droite), déduites d'observations collectées pendant HyMeX par les radars de Nîmes et de Montclar dans une ligne de grains. D'après Ribaud et al. 2016.

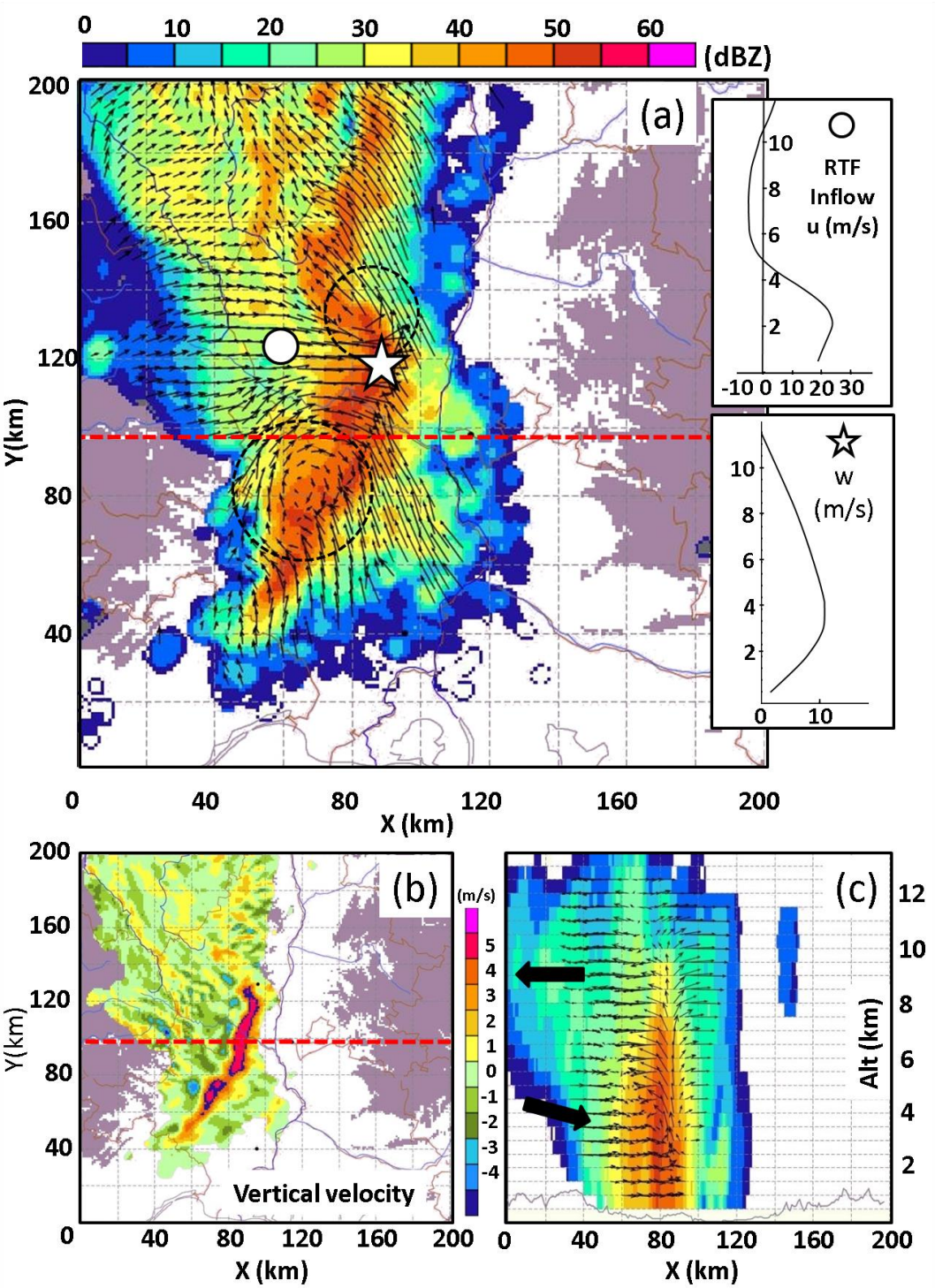

Figure 48 : Coupes horizontales et verticales de vent et de réflectivité dans un système de type ligne de grains observées pendant HyMeX déduites de l'analyse des données collectées simultanément par 6 radars Doppler du réseau ARAMIS. D'après Bousquet et al. 2015.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Duflot V., J.-L. Baray, G. Payen, N. Marquestaut, F. Posny, J.-M. Metzger, B. Langerock, C. Vigouroux, J. Hadji-Lazaro, T. Portafaix, M. De Mazière, P.-F. Coheur,

C. Clerbaux, and J.-P. Cammas, 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, 2017.

- Vérèmes, H., Payen, G., Keckhut, P., Duflot, V., Baray, J.-L., Cammas, J.-P., Leclair De Bellevue, J., Evan, S., Posny, F., Gabarrot, F., Metzger, J.-M., Marquestaut, N., Meier, S., Vömel, H., and Dirksen, R.: A Raman lidar at Maïdo Observatory (Reunion Island) to measure water vapor in the troposphere and lower stratosphere : calibration and validation, Atmos. Meas. Tech. Discuss., https://doi.org/10.5194/amt-2017-32, in review, 2017.

- Ribaud J-F, O. Bousquet, S. Coquillat, H. Al-Sakka, D. Lambert, V. Ducrocq and E. Fontaine, 2016 : Evaluation and application of hydrometeor classification algorithm outputs inferred from multi-frequency dual-polarimetric radar observations collected during HyMeX. Q. J. R. Meterolol. Soc. 142, 95-107, DOI:10.1002/qj.2589.

- Bousquet O., J. Delanoë and S. Bielli, 2016 : Evaluation of 3D wind observations inferred from the analysis of airborne and ground-based radars during HyMeX SOP-1. Q. J. R. Meterolol. Soc. 142, 86-94. doi : 10.1002/qj.2710

- Bousquet O. and co-authors, 2015 : Multi-frequency radar observations collected during the field phase of HyMeX. Bull. Americ. Meteorol. Soc. 96, pp. 267-282. doi : 10.1175/BAMS-D-13-00076.1

VII - Le bilan du LACy en modélisation numérique

1) AROME

PARTICIPANTS

D. Barbary, S. Bielli, O. Bousquet, Q.-P. Duong, J. Durand (LACy), G. Faure, T. Montmerle et P. Brousseau (CNRM) ; E. Durand (MERCATOR-Océan)

Le déploiement par Météo-France du modèle opérationnel AROME-INDIEN en mars 2016 marque l'aboutissement de près de 6 années de travail. Au cours de cette période les chercheurs du LACy ont interagit étroitement avec les prévisionnistes du CMRS Cyclones de La Réunion et les chercheurs du CNRM pour définir un outil capable de répondre aussi efficacement que possible aux besoins de Météo-France en matière de prévision cyclonique.
Un travail important a tout d'abord été réalisé pour définir l'emprise du modèle la mieux adaptée aux besoins des prévisionnistes du CMRS La Réunion, tout en minimisant les ressources informatiques nécessaires à l'élaboration et la diffusion des prévisions. Près d'une dizaine de configurations ont ainsi été développées et évaluées entre 2012 et 2016 avant d'obtenir un consensus satisfaisant en termes de coût / bénéfice et de performances. AROME-

INDIEN reste néanmoins, de part son emprise (~ 3000 km x 2000 km) et sa résolution (2.5 km), le plus étendu et le plus coûteux de tous les modèles AROME déterministes utilisés à Météo-France.

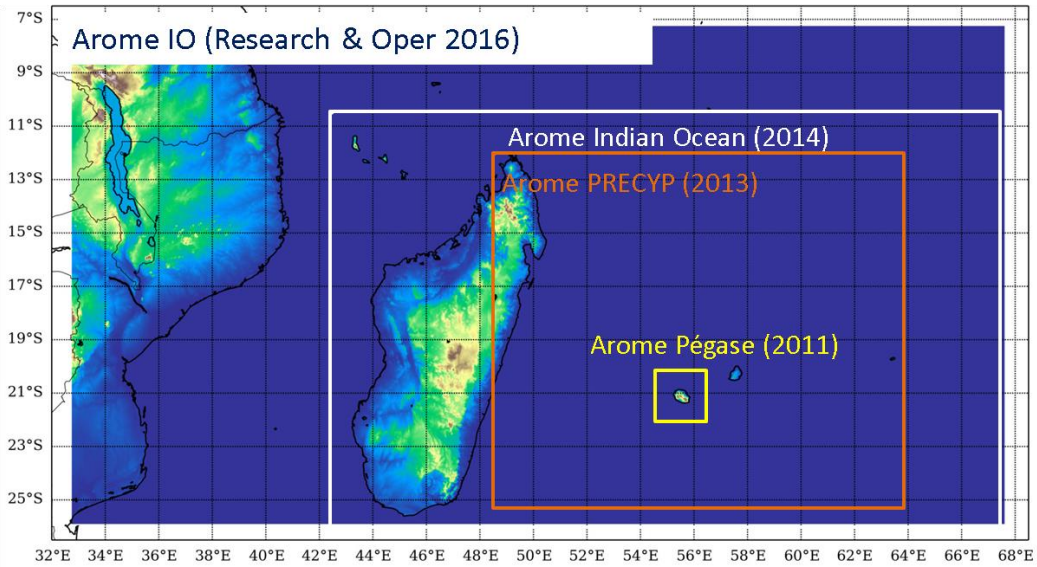

Figure 49 : Domaines des configurations du modèle AROME INDIEN développées au LACy jusqu'à son passage en opérationnel en 2016. 4 configurations ont été développées pour la plupart des domaines : CMO 1D / Assimilation 3DVAR / CMO1D + Assimilation 3DVAR / Adaptation dynamique.

De nombreux développements visant à l'obtention d'analyses atmosphériques à haute résolution spatio-temporelle (2.5 km, 3 heures) dans AROME-INDIEN ont également été menés au sein de l'équipe Cyclones depuis 2013. La prévision d'intensité et de structure des cyclones est, en effet, en grande partie tributaire de notre capacité à représenter correctement le système dépressionnaire à l'instant initial dans le modèle numérique d'atmosphère. Améliorer l'état initial du modèle nécessite d'assimiler des observations représentatives de l'état de l'atmosphère (et du cyclone) à un instant donné et, en particulier, des observations permettant de contraindre la position, la structure et l'intensité du système dépressionnaire tropical (e.g., radiances satellitaires, données issues de radars météorologiques, mesures GPS). Une caractérisation affinée de la structure initiale du vortex dans l'analyse permet ainsi de mieux représenter l'évolution du cyclone au sein de son environnement, et donc de mieux prévoir son cycle de vie et ses impacts.

La première étape de ce travail a consisté à implémenter le module d'assimilation 3D-VAR du modèle AROME métropolitain dans les différentes versions "recherche" du modèle AROME-INDIEN développées au LACy, puis à adapter ce module au contexte tropical via le calcul et l'évaluation de plusieurs matrices de covariance des erreurs de l'ébauche spécifiques à la région SOOI. Les configurations 3D-VAR du modèle 'AROME INDIEN ont été évaluées sur un nombre significatif de systèmes dépressionnaires tropicaux allant des tempêtes modérées aux cyclones très intenses. Ces études, réalisées en collaboration avec le CNRM ont permis de mettre en évidence l'apport significatif de l'assimilation de données à moyenne échelle pour la prévision cyclonique (Figure 50 et 51). Un groupe de travail regroupant les chercheurs du

LACy et du CNRM a été récemment mis en place afin de pérenniser cette collaboration. Ces échanges permettront d'évaluer l'apport de nouveaux types d'observations (radiances nuageuses, données issues de radar à synthèse d'ouverture…) pour la prévision des cyclones du bassin SOOI, mais aussi du bassin Atlantique Nord, avec le modèle AROME-ANTILLES.

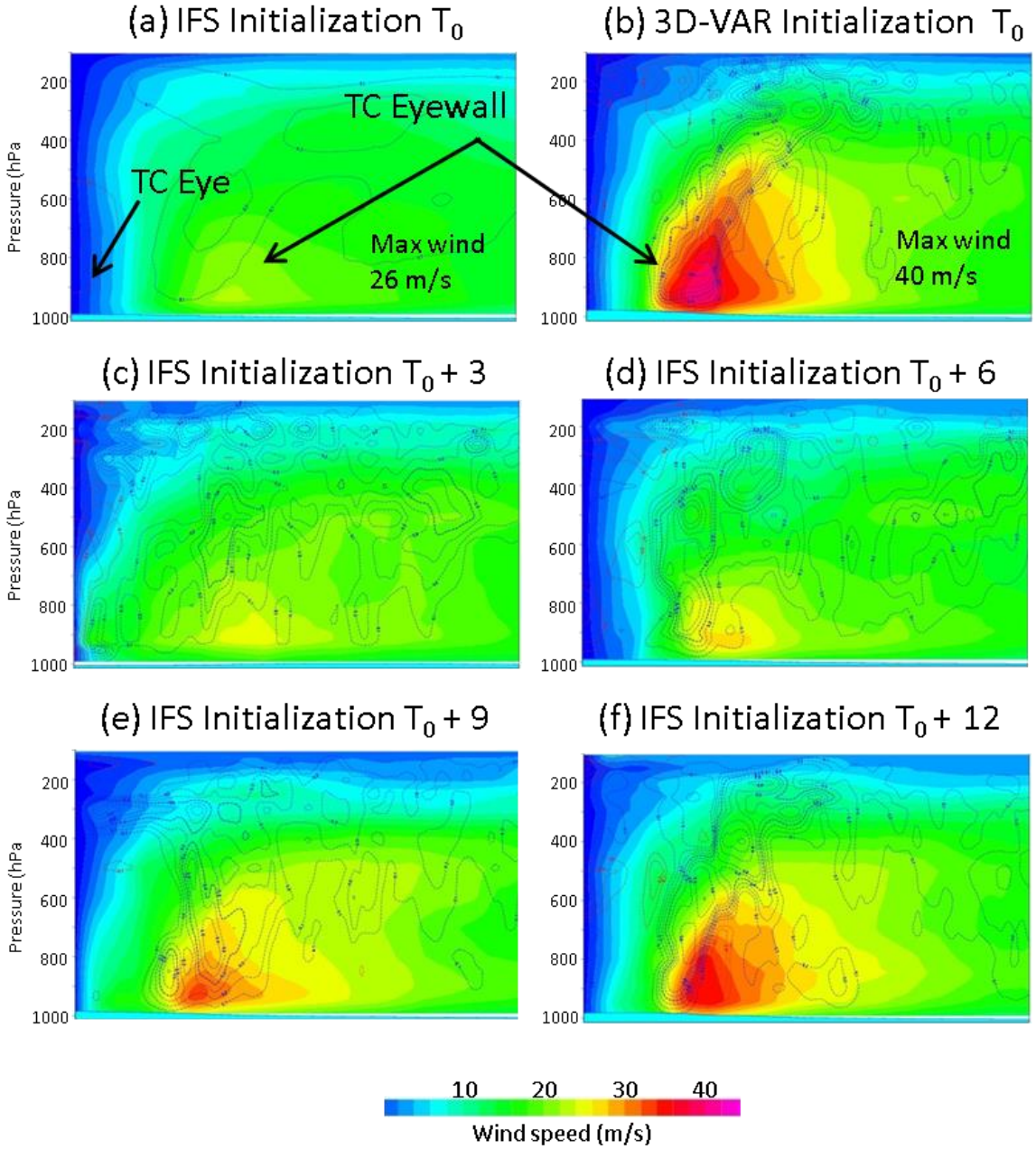

Figure 50 : Impact de l'assimilation de données à moyenne échelle sur la structure d'un cyclone à l'instant initial. Moyenne azimutale du vent tangentiel dans le cyclone tropical Bejisa le 01 jan 2014 à 00 UTC. ***(a)*** *initialisation à partir d'IFS.* ***(b)*** *initialisation AROME 3DVAR.* ***(c-f)*** *prévision à 3, 6, 9 et 12 heures à partir d'une initialisation IFS. On montre ainsi qu'un spinup de 12 heures est nécessaire pour reconstituer la structure du cyclone obtenue via le système d'assimilation 3DVAR.*

Une approche simplifiée de la représentation du couplage océanique a également été développée afin de prendre en compte les interactions océan-atmosphère dans le modèle opérationnel AROME-INDIEN. Ces développements, menés en collaboration avec

MERCATOR-OCEAN, ont permis d'évaluer l'apport d'un système couplé océan-atmosphère pour la prévision opérationnelle de l'intensité des cyclones. Le travail réalisé visait plus particulièrement à représenter les interactions océan-atmosphère par l'intermédiaire du modèle simplifié de couche de mélange océanique (CMO) 1D implémenté dans le module de surface SURFEX. La collaboration fructueuse avec MERCATOR a permis la mise en place d'une filière d'alimentation temps réel des champs océaniques requis par le modèle puis, dans un deuxième temps, le développement d'une configuration régionale du modèle NEMO sur l'océan Indien qui sera par la suite couplée avec le modèle Méso-NH. L'évaluation du couplage 1D dans AROME INDIEN a porté sur près d'une quinzaine de systèmes dépressionnaires entre 2014 et 2016. Les résultats ont montré que la prise en compte, même simplifiée, des interactions océan-atmosphère dans le modèle permettait d'améliorer considérablement les prévisions d'intensité, à tel point que ce développement a été implémenté dans toutes les versions opérationnelles ultramarines d'AROME en octobre 2017.

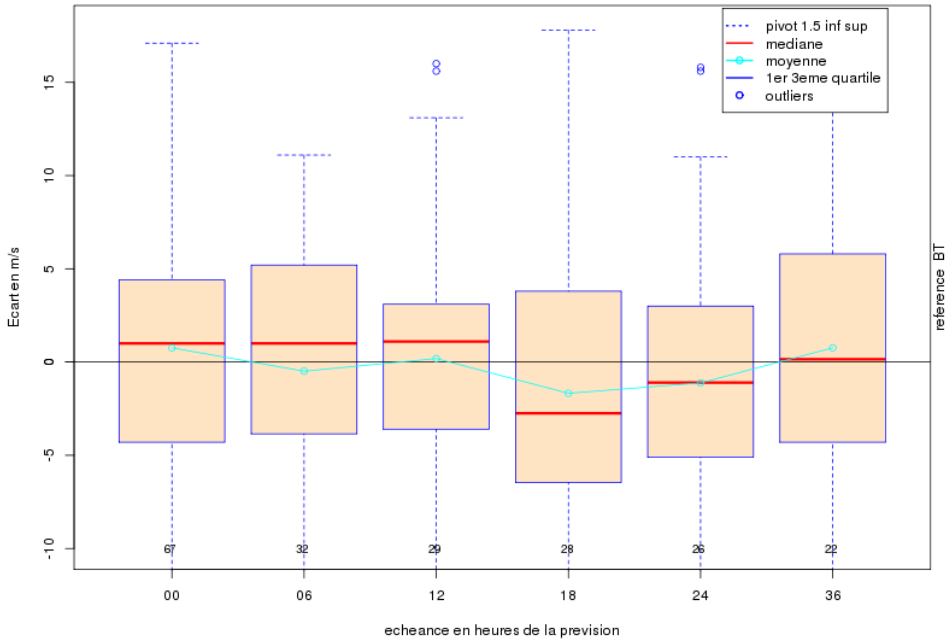

Figure 51 : Erreur de prévision sur l'intensité en fonction de l'échéance de prévision pour l'ensemble des systèmes tropicaux de la saison 2015-2016 simulés par le modèle AROME Indien en version couplée.

En parallèle de ces développements, un important travail a également été entrepris afin d'évaluer les prévisions du modèle AROME INDIEN sur La Réunion. On notera plus particulièrement la réalisation d'une "climatologie" des nuages et des précipitations simulés par le modèle entre les mois de novembre 2015 et novembre 2016, évaluée à partir des mesures collectées par le radar basta et les radars opérationnels de Météo-France. Une comparaison avec les données du radar nuage basta sur cette période (Figure 52) montre notamment que le modèle tend à sous-estimer significativement l'altitude et la proportion de nuages bas, et à surestimer significativement la proportion, l'altitude et l'extension verticale, des cirrus et autres nuages d'altitude se développant dans la partie nord de l'île.

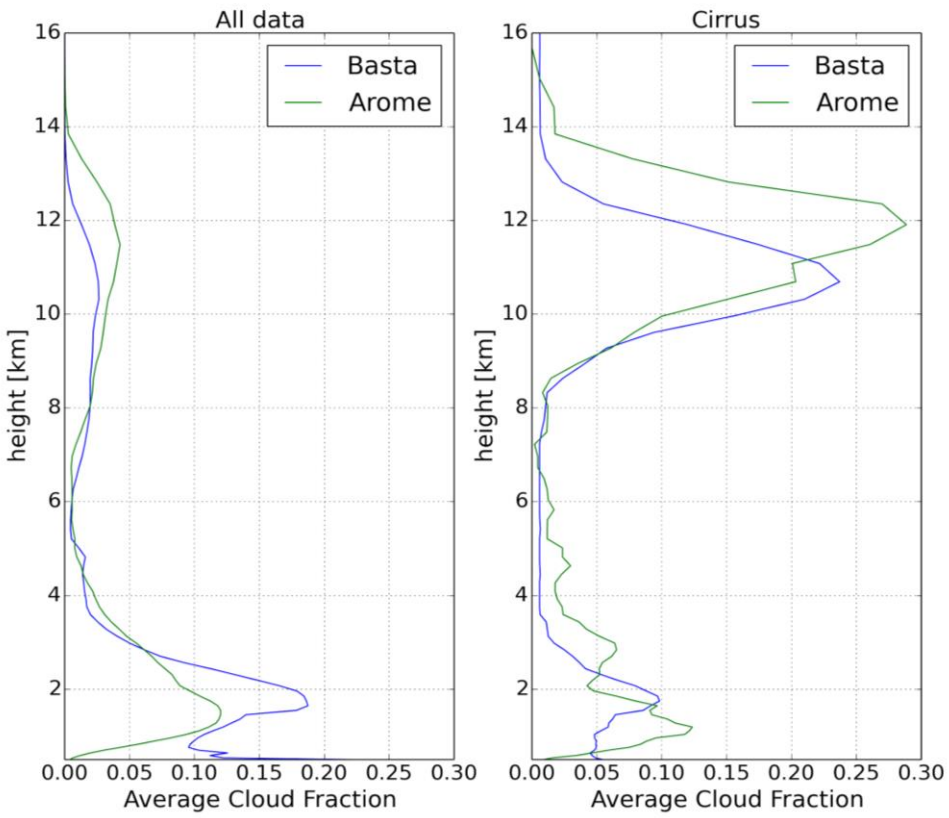

Figure 52 : distribution verticale moyenne de la fraction nuageuse prévue par le modèle AROME INDIEN et observée par le radar basta entre les mois de novembre 2015 et octobre 2016. Panneaux de gauche/droite: moyenne annuelle / cas particulier des cirrus.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Bousquet O., D. Barbary, S. Bielli, T. Montmerle, G. Faure, P. Brousseau and Q.-P. Duong, 2018: AROME-IO : A New Tool for High Resolution Modeling of Tropical Cyclones in the SW Indian Ocean. Submitted to Atmos. Sci. Lett.

- Durand J., O. Bousquet, S. Bielli and J. Delanoë, 2018 : A climatology of clouds and precipitation over Reunion Island inferred from radar observations and high-resolution model data. Submitted to AMTD

2) Meso-NH

PARTICIPANTS PRINCIPAUX

C. Barthe, S. Bielli, J. Durand, T. Hoarau, J. Pianezze, P. Tulet (LACy), J. Escobar, J.-P. Pinty, M. Leriche (LA), C. Lac, B. Vié (CNRM)

Les équipes Cyclones et Troposphère du LACy participent activement aux développements du modèle communautaire français Meso-NH (http://mesonh.aero.obs-mip.fr/), labellisé par l'INSU.

A) Modélisation des systèmes dépressionnaires tropicaux

Afin de mieux représenter la trajectoire, l'intensité et la structure des cyclones tropicaux dans les simulations numériques, deux développements majeurs ont été conduits. Tout d'abord, le couplage entre un modèle d'océan (CROCO, NEMO), un modèle de vagues (WW3) et Méso-NH/Surfex a été réalisé (Figure 53) dans le cadre de l'ANR DiMe. Le couplage avec un modèle d'océan est crucial puisque l'océan est le carburant du cyclone tropical, c'est-à-dire sa source de chaleur et d'humidité. Quant aux vagues, non seulement, le couplage en ligne avec un modèle de vagues permet la restitution du champ de houle, l'un des risques cycloniques, mais il permet aussi de mieux décrire l'émission de sels marins par les vents forts et les vagues. Or ces sels marins sont l'une des principales sources de noyaux de condensation pour les systèmes convectifs se développant en milieu maritime loin des sources de pollution. En parallèle, le couplage entre un modèle d'aérosols (ORILAM) et un schéma microphysique à 2 moments (LIMA) a été réalisé (projet LEFE LIMA-TROPIC) afin de fournir à chaque pas de temps au schéma microphysique un champ de CCN et d'IFN réaliste et cohérent avec les champs dynamiques et thermodynamiques.

L'ensemble de ces développements est réalisé dans la version 5-3-0 de Meso-NH, et en étroite collaboration avec le LOPS pour le couplage océan-vagues-atmosphère, et avec le LA et le CNRM pour les développements liés au cycle de vie des nuages.

A noter que le couplage entre le schéma microphysique LIMA et le schéma d'électrisation des nuages et d'éclairs (CELLS) a aussi été réalisé et doit être validé.

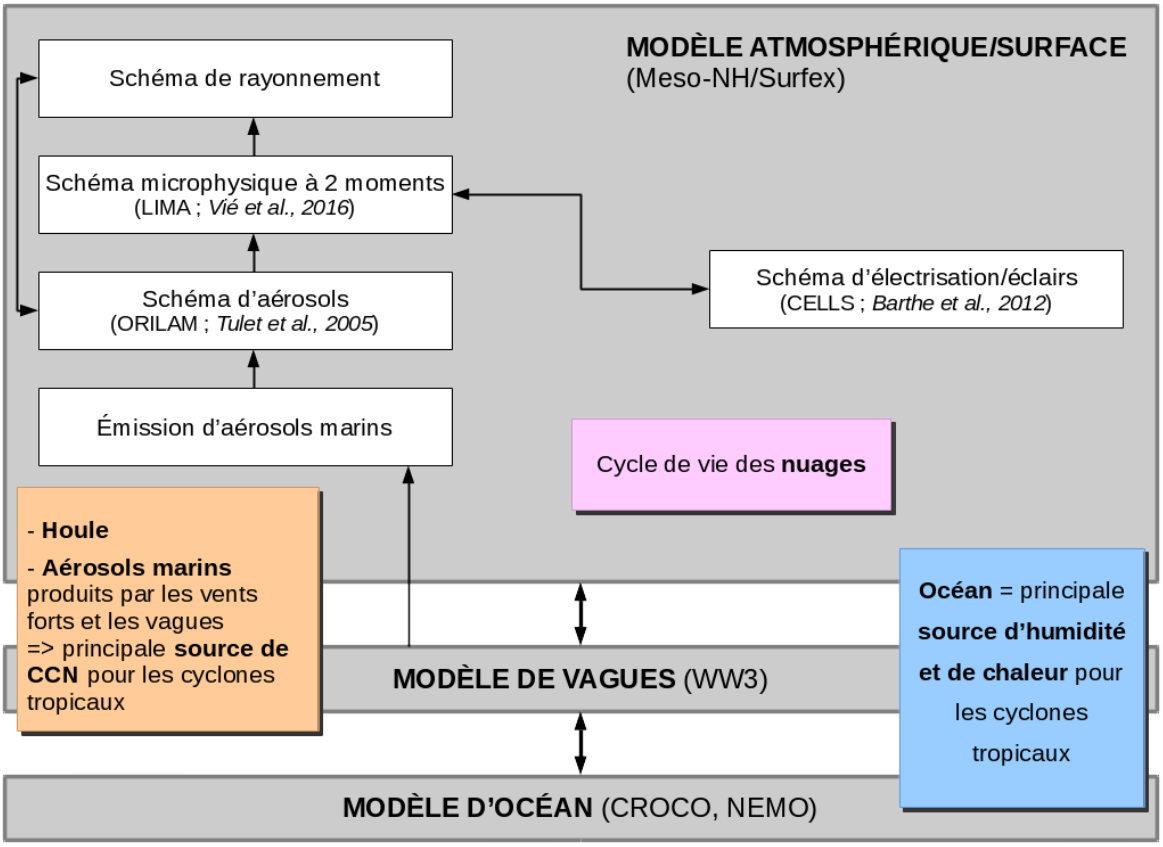

Figure 53 : schéma de principe du couplage océan-vagues-atmosphère et aérosols-microphysique-électricité réalisé à partir du modèle Meso-NH au LACy.

B) Amélioration de la microphysique dans le modèle Meso-NH

Nous participons au développement du schéma microphysique LIMA (Liquid-Ice Multiple Aerosols) sur deux aspects primordiaux pour la simulation des systèmes dépressionnaires tropicaux. Tout d'abord, les mesures in-situ dans les nuages maritimes tropicaux montrent que les concentrations en noyaux glaçogènes sont de plusieurs ordres de grandeur inférieures aux concentrations en glace observées. En prenant en compte dans le schéma microphysique LIMA le processus de rupture collisionnelle de la glace, on montre que si on augmente le nombre de débris produits lors des collisions entre particules de glace avec une structure plus ou moins fragile, les précipitations cumulées sont significativement diminuées. D'autre part, on conclut que ce processus est efficace même pour de très faibles concentrations en noyaux glaçogènes, mais suffisantes pour initier la phase froide et permettre au processus de multiplication des cristaux de glace de s'exprimer. Une première simulation a été réalisée sur un orage de la campagne STERAO aux USA (Hoarau et al., 2017). Dans le cadre de la thèse de T. Hoarau, ce développement a été intégré à la simulation du cyclone tropical Dumile. Les résultats sont en cours d'analyse.

Les cristaux de glace sont présents dans les nuages dans une grande diversité de formes qui dépendent à la fois de la température et de l'humidité. La forme des cristaux intervient à la fois dans les processus de déposition/sublimation à travers le calcul de la capacitance et dans la

vitesse limite de chute, et conditionne aussi les propriétés optiques (albédo de simple diffusion, coefficient d'extinction, facteur d'asymétrie) et l'agrégation des cristaux. Dans le cadre du post-doc de M. Claeys (programme ReNovRisk), on implémente dans Meso-NH la possibilité d'utiliser comme variables pronostiques la concentration de différentes formes de cristaux de glace (colonnes, plaquettes, dendrites, formes irrégulières) afin de mieux prendre en compte la diversité des hydrométéores glacés. Cela permettra aussi de mieux représenter la couverture cirriforme en altitude, source froide de la machine thermique cyclone.

C) Modélisation des COVB / couplage MEGAN dans SURFEx

Dans le cadre des études des composés organiques volatils d'origine biogéniques (FARCE, BIO-MAIDO, OCTAVE), le LACy a introduit la version 2.1 du schéma d'émission de COVB MEGAN (Guenther et al., 2013) dans le modèle de surface communautaire SURFEx (https://www.umr-cnrm.fr/surfex/) commun à AROME et MesoNH. Ce travail a nécessité une cartographie haute résolution des LAI et des coefficients d'efficacité pour l'émissions des COVB sur La Réunion. Ce portage a nécessité un travail de réorganisation du code pour l'intégrer au schéma ISBA et le rendre en-ligne. Les premières études d'émissions en-ligne de COVB avec MesoNH ont pu être réalisées sur l'europe du sud pendant la campagne CHARMEx (coopération avec le LA) et sur La Réunion (pré-BIO-MAIDO). MEGAN v2.1 va intégrer la version 9 officielle de SURFEx.

D) Modélisation des panaches volcaniques

Dans le cadre des programmes LEFE MoPaV et OMNCG ALEAVOLC, un code d'émission volcaniques de composés primaires (évent) et secondaires (brûlage végétation et entrée de la lave en mer) a été introduit dans MesoNH. Ce code fonctionnant sur le modèle de feux FOREFIRE a permis d'étudier les différents types de convection et les propriétés chimiques et de dispersion/dépôt des panaches volcaniques lors de l'éruption d'avril 2007.

Dans le cadre de l'ANR STRAP, deux nouveaux schémas de nucléation (Vehkamaki et al., 2002 et Määttänen et al., 2018) ont été introduit dans MesoNH pour mieux caractériser la nucléation binaire H_2SO_4-H_2O pour les fortes concentrations caractéristiques de l'environnement des panaches volcaniques.

Ces paramétrisations vont intégrer la version 485 du modèle communautaire MesoNH.

PUBLICATIONS RÉCENTES

- Voldoire A., B. Decharme, J. Pianezze, C. Lebeaupin Brossier, F. Sevault, L. Seyfried, V. Garnier, S. Bielli, S. Valcke, A. Alias, M. Accensi, F. Ardhuin, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, S. Faroux, H. Giordani, F. Léger, P. Marsaleix, R. Rainaud, J.-L. Redelsperger, E. Richard, and S. Riette, 2017 : SURFEX v8.0 interface with OASIS3-MCT to couple atmosphere with hydrology, ocean, waves and sea-ice models, from coastal to global scales. Geosci. Model Dev., 10, 4207-4227, https://doi.org/10.5194/gmd-10-4207-2017.

- Hoarau, T., J.-P. Pinty, and C. Barthe, 2017 : A representation of the crystal ice collisional break-up process in the two-moment microphysical scheme LIMA v1.0 of Meso-NH. Geosci. Model Dev. Discuss., https://doi.org/10.5194/gmd-2017-287, en révision.

- Pianezze, J., C. Barthe, S. Bielli, P. Tulet, S. Jullien, G. Cambon, O. Bousquet, M. Claeys, and E. Cordier, 2018 : A new coupled ocean-waves-atmosphere model designed for tropical storm studies : example of Tropical Cyclone Bejisa (2013-2014) in the south-west Indian ocean. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10, doi:10.1002/2017MS001177.

- Durand, J., Tulet P., Leriche M., Bielli S., Villeneuve N., DiMuro A. and Fillipi J.-B. : Modeling the lava heat flux during severe effusive volcanic eruption: a important impact on surface air quality. J. Geophys. Res., 119, 20,11729-11742, 2014.

- Lac, C., J.-P. Chaboureau, V. Masson, J.-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumond, F. Auguste, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bieilli, F. Bosseur, O. Caumont, J.-M. Cohard, J. Colin, F. Couvreux, J. Cuxart, G. Delautier, T. Dauhut, V. Ducrocq, J.-B. Filippi, D. Gazen, O. Geoffroy, F. Gheusi, R. Honnert, J.-P. Lafore, C. Lebeaupin Brossier, Q. Libois, T. Lunet, C. Mari, T. Maric, P. Mascart, M. Mogé, G. Molinié, O. Nuissier, F. Pantillon, P. Peyrillé, J. Pergaud, E. Perraud, J. Pianezze, J.-L. Redelsperger, D. Ricard, E. Richard, S. Riette, Q. Rodier, R. Schoetter, L. Seyfried, J. Stein, K. Suhre, O. Thouron, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, F. Visentin, V. Vionnet, and P. Wautelet, 2018 : Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications, Geosci. Model Dev. Discuss., https://doi.org/10.5194/gmd-2017-297, en révision.

- Hoarau, T., C. Barthe, P. Tulet, M. Claeys, J.-P. Pinty, O. Bousquet, J. Delanoë, and B. Vié, Impact of the generation and activation of sea salt aerosols on the evolution of Tropical Cyclone Dumile. Soumis à J. Geophys. Res. Atmos., en révision.

- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A. : The SURFEX v7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, Geosci. Model Dev., 6, 929-960, https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013, 2013.

3) FLEXPART

PARTICIPANTS

J. Brioude, S. Evan, B. Verreyken (LACy)

A) Outils de prévision pour optimiser la stratégie de mesures de l'OPAR : FOOT (FLEXPART cOnvective Outflow prediction Tool)

L'outil de prévision FOOT a été développé dans le cadre du programme LEFE VAPEURDO. Dans le cadre de ce projet, l'outil de prévision mis en place est basé sur l'utilisation du modèle Lagrangien de dispersion atmosphérique FLEXPART couplé aux données météorologiques de prévision de l'ECMWF. Chaque jour les trajectoires de FLEXPART et les cartes de température de brillance dans le canal infrarouge du satellite METEOSAT 7 (METEOSAT 8 depuis avril 2017) sont utilisées pour déterminer l'origine convective des masses d'air mesurées au-dessus de l'observatoire du Maïdo. Cet outil est disponible sur internet (https://geosur.univ-reunion.fr/foot).

Son utilisation permet de mieux coordonner le lâcher des sondes CFH (et autres instruments sous ballon) lorsqu'un épisode convectif se produit sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien. Ceci permet d'optimiser la retombée scientifique de ces mesures compte-tenu du coût des instruments (~3 k€) qui ne sont pas récupérés car perdus en mer lors de l'éclatement du ballon en haute altitude (30 km).

B) Modélisation Lagrangienne à mésoéchelle : couplage FLEXPART-AROME

Une analyse Lagrangienne sur des mesures de concentration de gaz et d'aérosols à l'aide d'un modèle Lagrangien dispersif tel que FLEXPART permet de :

- caractériser le transport et le mélange atmosphérique subi,
- caractériser l'origine géographique et
- quantifier l'impact des sources.

FLEXPART utilise les champs météorologiques des sorties d'un modèle Eulérien tel que l'ECMWF pour calculer le transport atmosphérique résolu, et paramétriser des phénomènes sous-maille qui agissent sur le transport (*e.g.* turbulence).

Une analyse Lagrangienne des mesures continues de gaz et d'aérosol faites à l'observatoire du Maïdo n'est pas envisageable à l'heure actuelle, car la résolution spatiale des analyses de l'ECMWF (~ 12 km) ne permet pas de résoudre les phénomènes mésoéchelle influençant le transport atmosphérique au niveau de l'observatoire du Maïdo, notamment au niveau des pentes du pic du Maïdo.

Le développement du couplage entre FLEXPART et AROME vise à coupler FLEXPART aux sorties du modèle opérationnel AROME Océan indien, disponible à une résolution de 2,5 x 2,5 km^2. Dans le cadre de la thèse de Bert Verreyken, le travail de couplage entre FLEXPART et AROME a débuté depuis juin 2017. Le traitement du mouvement turbulent dans FLEXPART a été modifié pour utiliser les champs de sortie d'énergie cinétique turbulente, et utiliser l'approche Lagrangienne de Thomson et al. (1997). Une fois ce couplage effectué,

FLEXPART-AROME pourra être testé sur les observations de la campagne intensive d'OCTAVE et plus largement être utilisé par les services de Météo-France qui exploitent AROME.

VIII - Références bibliographiques

Baray J.-L., S. Baldy, R. D. Diab, and J.-P. Cammas : Dynamical study of a tropical cut-off low over South-Africa, and its impact on tropospheric ozone. Atmospheric Environment, Vol. 37, pp 1475-1488, doi :10.1016/S1352-2310(02)00999-8, 2003.

Baray, J.-L., Courcoux, Y., Keckhut, P., Portafaix, T., Tulet, P., Cammas, J.-P., Hauchecorne, A., Godin Beekmann, S., De Mazière, M., Hermans, C., Desmet, F., Sellegri, K., Colomb, A., Ramonet, M., Sciare, J., Vuillemin, C., Hoareau, C., Dionisi, D., Duflot, V., Vérèmes, H., Porteneuve, J., Gabarrot, F., Gaudo, T., Metzger, J.-M., Payen, G., Leclair de Bellevue, J., Barthe, C., Posny, F., Ricaud, P., Abchiche, A., and Delmas, R.: 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, https://doi.org/10.5194/amt-6-2865-2013, 2013.

Brakebusch, M., Randall, C. E., Kinnison, D. E., Tilmes, S., Santee, M. L. et Manney, G. L., Evaluation of whole atmosphere community climate model simulations of ozone during Arctic winter 2004–2005. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, *118*(6), 2673-2688, 2013.

Bekki, S, On the possible role of aircraft-generated soot in the middle latitude ozone depletion. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, *102*(D9), 10751-10758, 1997.

Bony S., B. Stevens, D.M.W. Frierson, C. Jakob, M. Kageyama, R. Pincus, et al. , Clouds, circulation and climate sensitivity. Nature Geoscience, 64(2), 10-12, 2015.

Clain G., J. L. Baray, R. Delmas, R. Diab, J. Leclair de Bellevue, P. Keckhut, F. Posny, J.-M. Metzger, and J.-P. Cammas, Tropospheric ozone climatology at two Southern Hemisphere tropical/subtropical sites, (Reunion Island and Irene, South Africa) from ozonesondes, LIDAR, and in situ aircraft measurements. Atmos. Chem. Phys., 9, 1723-1734, 2009.

Clain G., J.-L. Baray, R. Delmas, P. Keckhut, J.-P. Cammas, A lagrangian approach to analyse the tropospheric ozone climatology in the tropics : Climatology of stratosphere–troposphere exchange at Reunion Island. Atmos. Env., 44, 968-975, 2010.

Fan, J., R. Zhang, G. Li, et W.-K. Tao, Effects of aerosols and relative humidity on cumulus clouds. J. Geophys. Res., 112 (D14204), doi :10.1029/2006JD008136, 2007.

Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B. et Pfister, L., Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of geophysics*, *33*(4), 403-439, 1995.

Khain, A., N. BenMoshe, et A. Pokrovsky, 2008 : Factors determining the impact of aerosols on surface precipitation from clouds : An attempt at classification. J. Atmos. Sci., 65, 1721–1748, doi :10.1175/2007JAS2515.1.

Khain, A. P. et A. Pokrovsky, 2004 : Simulation of effects of atmospheric aerosols on deep turbulent convective clouds using a spectral microphysics mixed-phase cumulus cloud model. Part II : Sensitivity study. J. Atmos. Sci., 61, 2983–3001, doi :10.1175/JAS-3281.1.

Lesouëf, D, F. Gheusi, R. Delmas, J. Escobar. Numerical simulations of local circulations and pollution transport over Reunion Island. Annales Geophysicae, 2011, 29 (1), pp.53-69. <10.5194/angeo-29-53-2011>.

Guilpart, E., F. Vimeux, S. Evan, J. Brioude, J.-M. Metzger, C. Barthe, C. Risi, and O. Cattani. The isotopic composition of near-surface water vapor at the Maïdo observatory (Reunion Island, southwestern Indian Ocean) documents the controls of the humidity of the subtropical troposphere. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 2017, 122 (18), pp.9628 - 9650. 〈10.1002/2017JD026791〉.

Lin, J. C., T. Matsui, R. A. Pielke Sr., et C. Kummerow, Effects of biomass burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin : A satellite-based empirical study. J. Geophys. Res., 111 (D19204), doi :10.1029/2005JD006884, 2006.

Määttänen, A., Merikanto, J., Henschel, H., Duplissy, J., Makkonen, R., Ortega, I. K., & Vehkamäki, H. New parameterizations for neutral and ion-induced sulfuric acid-water particle formation in nucleation and kinetic regimes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1269–1296. https://doi.org/10.1002/2017JD027429, 2018.

Murphy, S. M., Sorooshian, A., Kroll, J. H., Ng, N. L., Chhabra, P., Tong, C et Seinfeld, J. H, Secondary aerosol formation from atmospheric reactions of aliphatic amines. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *7*(9), 2313-2337, 2007.

Renard, J. B., Berthet, G., Salazar, V., Catoire, V., Tagger, M., Gaubicher, B. et Robert, C., In situ detection of aerosol layers in the middle stratosphere. *Geophysical Research Letters*, *37*(20), 2010.

Rosenfeld, D., Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. Science, 287, 1793–1796, doi :10.1126/science.287.5459.1793, 2000.

Rosenfeld, D., U. Lohmann, G. B. Raga, C. D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell, et M. O. Andreae, Flood or drought : How do aerosols affect precipitation ? Science, 321, 1309–1313, doi :10.1126/science.1160606, 2008.

Seidel D. J., Q. Fu, W.J. Randel and T.J. Reichler (2007), Widening of the tropical belt in a changing climate. Nature Geoscience 64(2), 10-12.

Sherwood, S. C., R. Roca, T. M. Weckwerth, and N. G. Andronova (2010), Tropospheric water vapor, convection, and climate, *Rev. Geophys.*, 48, RG2001, doi:10.1029/2009RG000301.

Singleton, C. S., Randall, C. E., Harvey, V. L., Chipperfield, M. P., Feng, W., Manney, G. L et McElroy, C. T, Quantifying Arctic ozone loss during the 2004–2005 winter using satellite observations and a chemical transport model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*(D7), 2007.

Solomon S, Rosenlof KH, Portmann RW, Daniel JS, Davis SM, Sanford TJ, Plattner GK., Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming, Science. 2010 Mar 5;327(5970) : 1219-23. doi : 10.1126/science.1182488.

Van den Heever, S. C., G. G. Carrio, W. R. Cotton, P. J. DeMott, et A. J. Prenni, Impact of nucleating aerosol on Florida storms, part 1 : Mesoscale simulations. J. Atmos. Sci., 63, 1752–1775, doi :10.1175/JAS3713.1, 2006.

Vehkamäki, H., M. Kulmala, I. Napari, K. E. J. Lehtinen, C. Timmreck, M. Noppel, and A. Laaksonen, An improved parameterization for sulfuric acid–water nucleation rates for tropospheric and stratospheric conditions, *J. Geophys. Res.*, 107(D22), 4622, doi :10.1029/2002JD002184, 2002.

Vernier, J. P., Thomason, L. W., Pommereau, J. P., Bourassa, A., Pelon, J., Garnier, A. et Vargas, F., Major influence of tropical volcanic eruptions on the stratospheric aerosol layer during the last decade. *Geophysical Research Letters*, *38*(12), 2011.

Vömel H, David DE, Smith K., Accuracy of tropospheric and stratospheric water vapor measurements by the cryogenic frost point hygrometer : Instrumental details and observations. J Geophys Res. 2007;112:8305. doi: 10.1029/2006JD007224.

Whiteman, D. N., Demoz, B., Di Girolamo, P., Comer, J., Veselovskii, I., Evans, K., Wang, Z., Cadirola, M., Rush, K., Schwemmer, G, Gentry, B. Melfi, S. H., Mielke, B., Venable, D., and Van Hove, T. : Raman Lidar Measurements during the International H2O Project. Part I : Instrumentation and Analysis Techniques, J. Atmos. Oceanic Technol., vol. 23, no. 2, 157–169, 2006.