



Projet PRECYP

Prévision et analyse des Cyclones pour la prévention des risques à La Réunion

Rapport final – juin 2014 –

Travail réalisé par le Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy, CNRS / Météo-France / Université de La Réunion) et ses partenaires :

- les services de prévision et de climatologie de Météo-France à La Réunion,
- le Centre National de Recherches Météorologiques, Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique (CNRS / Météo-France),
- le service de prévision marine de Météo-France,
- le Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS / Université de Toulouse),

Avec le soutien de la Fondation MAIF



Table des matières

1 Objectifs de PRECYP	
1.1 Contexte	5
1.2 Objectifs généraux du projet	5
2 Bilan scientifique	7
2.1 Tâche 1	7
2.1.1 Préparation des observations globales	7
2.1.2 Préparation des observations à La Réunion	7
2.1.3 Préparation des outils numériques	12
2.2 Tâche 2	14
2.2.1 Etude du lien entre structures d'altitude et intensification	14
2.2.2 Modélisation des phases d'intensification	17
2.2.3 Anticipation de l'intensification par détection de l'activité électrique	20
2.3 Tâche 3	22
2.3.1 Etude du rôle des ondes de gravité pour la formation des bandes précipitantes	22
2.3.2 Validation des simulations de structures précipitantes	23
2.4 Tâche 4	27
2.4.1 Validation des précipitations prévues sur le relief à La Réunion	27
2.4.2 Spatialisation des précipitations en temps différé à La Réunion	29
2.4.3 Validation des structures de vent fort	31
2.4.4 Validation de la houle cyclonique et de la surcote	32
3 Autres éléments de bilan	34
3.1 Bilan financier	34
3.2 Bilan des ressources en personnel	34
3.3 Valorisation du projet	35
4 Conclusions	40

Objectifs de PRECYP

1.1 Contexte

Les cyclones tropicaux sont, avec les séismes, la catastrophe naturelle la plus dévastatrice au monde. Les cyclones majeurs peuvent encore aujourd'hui ruiner des régions entières (cf. cyclones Katrina en 2005 ou plus récemment Haiyan en 2013) et faire de nombreuses victimes. Leur cycle de vie complet part du stade de dépression tropicale (vent soutenu sur 10 minutes $V > 50$ km/h), puis tempête ($V > 62$ km/h) avant d'atteindre le stade le plus intense de cyclone ($V > 120$ km/h, mais pouvant dépasser 200 km/h). On regroupe ces différents stades sous le terme générique de « système dépressionnaire tropical ».

La plupart des territoires français habités situés sous les tropiques sont sujets à l'aléa cyclonique. Dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) ces derniers comprennent le département de La Réunion (800 000 habitants) et le département de Mayotte (190 000 habitants). Si ces deux îles sont fortement exposées à l'aléa cyclonique, les impacts n'y sont pas identiques du fait de leur position et de leur géographie très différentes. Le projet PRECYP aborde les cyclones dans l'ensemble du bassin, mais il se concentre plus spécifiquement sur La Réunion pour ce qui concerne leurs impacts (vents, pluies et houle). Les surcotes, enjeu majeur à Mayotte, sont aussi abordées.

Les effets cycloniques à La Réunion se déclinent principalement en trois types :

- les effets du vents (destruction d'infrastructures, arrachage de toiture, ...) ;
- les effets des précipitations (inondations, débordement de ravines, ruissellement urbain, éboulements, destruction de ponts par transport solide dans les ravines, ...) ;
- les effets de l'état de la mer (houle cyclonique et mer du vent).

A La Réunion, la question de l'observation et de la prévision des précipitations est particulièrement cruciale, et ce pour plusieurs raisons : le territoire détient la plupart des records mondiaux de précipitation pour les cumuls allant de 12 h à 15 jours ; les pluies intenses sont essentiellement liées à des systèmes dépressionnaires tropicaux (même si de fortes pluies peuvent parfois être générées localement) ; le relief très accidenté de l'île contribue à la formation des précipitations et à leur renforcement. Observer finement et prévoir la répartition spatiale des précipitations est donc un enjeu majeur, auquel les outils opérationnels actuels ne permettent pas de répondre parfaitement.

1.2 Objectifs généraux du projet

PRECYP est un projet de recherche financé par la Fondation MAIF entre mars 2011 et juillet 2014. L'ambition du projet est d'améliorer la prévision et l'analyse des risques associés aux systèmes dépressionnaires tropicaux du sud-ouest de l'Océan Indien et à La Réunion, en se concentrant plus particulièrement sur la représentation de l'aléa cyclonique et de ses impacts. PRECYP a notamment pour objectifs l'acquisition de nouvelles connaissances concernant l'aléa cyclonique dans ce bassin peu étudié, et le développement de nouveaux outils d'observation et de modélisation. Les principaux aspects abordés sont :

- l'intensité du système dépressionnaire, caractérisée par la force maximale des vents,
- les précipitations au cœur du système et dans ses bandes périphériques,
- l'état de la mer lié à un système cyclonique (vagues et marée de tempête).

Les recherches visent à préparer des outils pour :

- mieux anticiper l'aléa cyclonique pour mieux gérer la crise ; l'amélioration des prévisions de vent et de précipitation sur La Réunion doit permettre d'obtenir une information plus précise des zones exposées,
- mieux analyser l'évènement cyclonique après la crise pour identifier les zones à risque et pour aider à la déclaration de l'état de catastrophe naturelle.

Le projet PRECYP s'appuie sur les moyens de divers organismes. Il est porté par le Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (Unité Mixte de Recherche 8105 CNRS/Météo- France/Université de La Réunion), en partenariat avec :

- les services de prévision et de climatologie de Météo-France à La Réunion,
- le Centre National de Recherches Météorologiques à Toulouse,
- le service de prévision marine de Météo-France à Toulouse,
- le Laboratoire d'Aérodynamique à Toulouse.

Bilan scientifique

Le bilan scientifique ci-après détaille les différents travaux qui ont été effectués depuis 2011 en insistant sur les principaux résultats. La structure du rapport reprend l'organisation par tâche, tel que le projet a été soumis. De plus amples détails sont disponibles dans les rapports annuels intermédiaires.

2.1 Tâche 1

L'objectif de cette tâche visait à préparer les données d'observation et les configurations des modèles numériques utilisés dans le projet.

2.1.1 Préparation des observations globales

L'accès aux bases de données satellitaires internationales a été préparé dès 2011, ainsi que l'accès à la base de détection d'activité électrique WWLLN dont le réseau a été renforcée par l'installation d'une nouvelle antenne de réception à l'observatoire du Maïdo. L'objectif d'accéder aux données du satellite franco-indien Megha-Tropiques, qui constituait théoriquement un moyen d'enrichir substantiellement l'observation de la structure interne des cyclones tropicaux, n'a, en revanche, pas été atteint. En effet, le radiomètre imageur Madras a été déclaré officiellement hors service en 2013 et les quelques données disponibles n'ont jamais été distribuées aux chercheurs. Seules quelques observations du capteur SAPHIR, diffusées au début de l'année 2014, ont pu être exploitées dans le cadre du projet.

2.1.2 Préparation des observations à La Réunion

Le renforcement du dispositif d'observation des précipitations à La Réunion a permis d'améliorer sensiblement la compréhension des processus pilotant la formation des systèmes précipitants et de leurs impacts. Un deuxième radar opérationnel en bande S a été installé dans le cadre de la mise en place d'une Cellule de Veille Hydrologique (projet commun entre Météo-France et la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, DEAL. Parallèlement l'OSU-Réunion a financé l'acquisition et le déploiement d'un disdromètre et d'un profileur de vent UHF à l'aéroport international de Gillot. Les données de ces instruments (**Fig. 1**) ont été exploitées tout au long du projet pour étudier les propriétés des précipitations à La Réunion.

Radars bande S

De nombreuses études ont été menées dans PRECYP pour évaluer et améliorer la qualité de la mesure radar à La Réunion. Parmi celles-ci on pourra notamment citer les travaux sur la calibration de la lame d'eau radar du Colorado au moyen d'une matrice de coefficients correcteurs établie en spatialisant le rapport entre la lame d'eau radar et la mesure par les pluviomètres (Bouchet 2012). La méthode proposée a permis d'améliorer sensiblement l'estimation des quantités de précipitations au pas de temps mensuel (**Fig. 2**). Ces travaux ont également mis en évidence un effet saisonnier

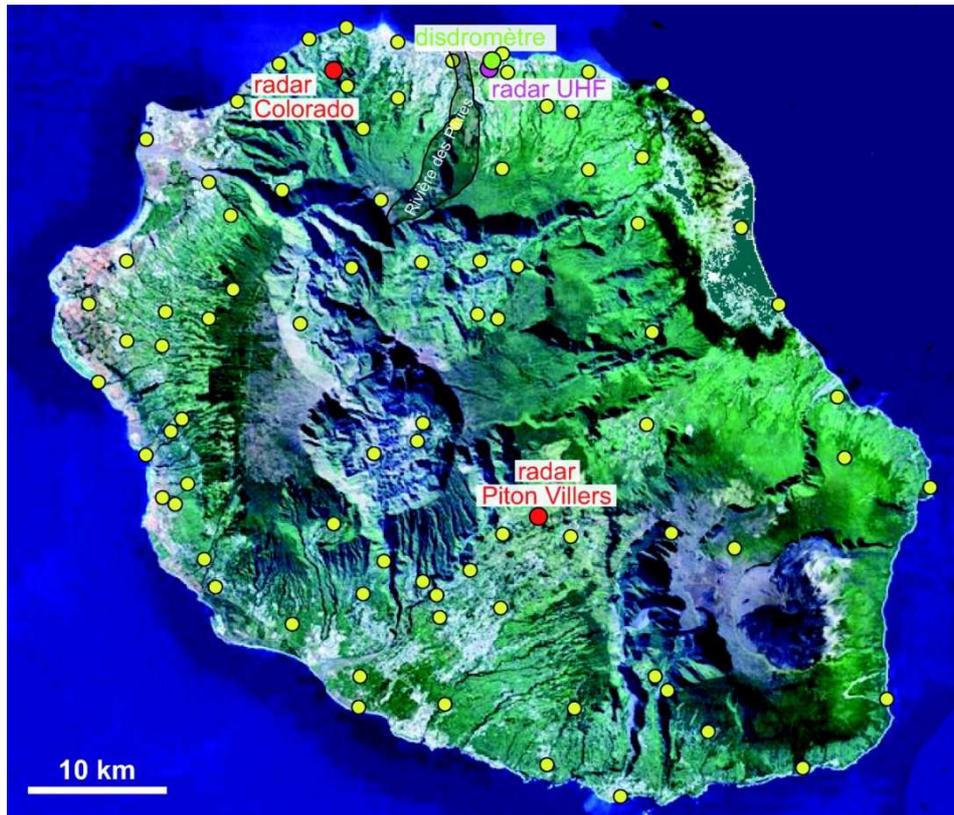


FIGURE 1 : Dispositif d'observation des précipitations à La Réunion au début 2013. En jaune : les pluviomètres disponibles, en rouge : les deux radars en bande S de Météo-France, en rose : le radar UHF, en vert : le disdromètre.

assez important pour les zones partiellement masquées (**Fig. 3**). Il a ainsi été observé que la présence d'une inversion à basse altitude pendant l'hiver austral empêchait le développement vertical des nuages et pouvait induire une sous-estimation des cumuls de pluie lorsque l'altitude de la mesure radar dépassait un certain niveau. Ces résultats ont par la suite été confirmés par l'analyse détaillée des données du radar UHF (voir ci-après).

- ⇒ **La méthode de calibration mensuelle développée et testée dans le cadre de PRECYP a été implémentée de manière opérationnelle.**
- ⇒ **Les modes d'exploitation des radars sont en passe d'être revus afin de tenir compte de l'effet saisonnier lié à la structure verticale des précipitations.**

Si la mise en service du nouveau radar de Piton Villers par Météo-France au début de l'année 2013 vise avant tout à améliorer la qualité de la lame d'eau à La Réunion, ce nouveau capteur permet également d'augmenter significativement la couverture des systèmes précipitants se développant au voisinage de l'île. Dans cette optique, un important travail a été réalisé sur les procédures d'archivage, d'analyse et de visualisation des données collectées par les deux radars réunionnais. De nouveaux outils permettant d'accéder à la structure tridimensionnelle des systèmes précipitants passant au voisinage de l'île ont été développés et mis à disposition des prévisionnistes. Le passage du cyclone Bėjisa à quelques dizaines de kilomètres de l'île en janvier 2014 a permis d'évaluer l'intérêt de ces outils pour le suivi et la prévision des cyclones en temps réel (**Figs. 4 et 5**), mais également pour le calcul des « best-track » archivées dans les bases de données de l'OMM.

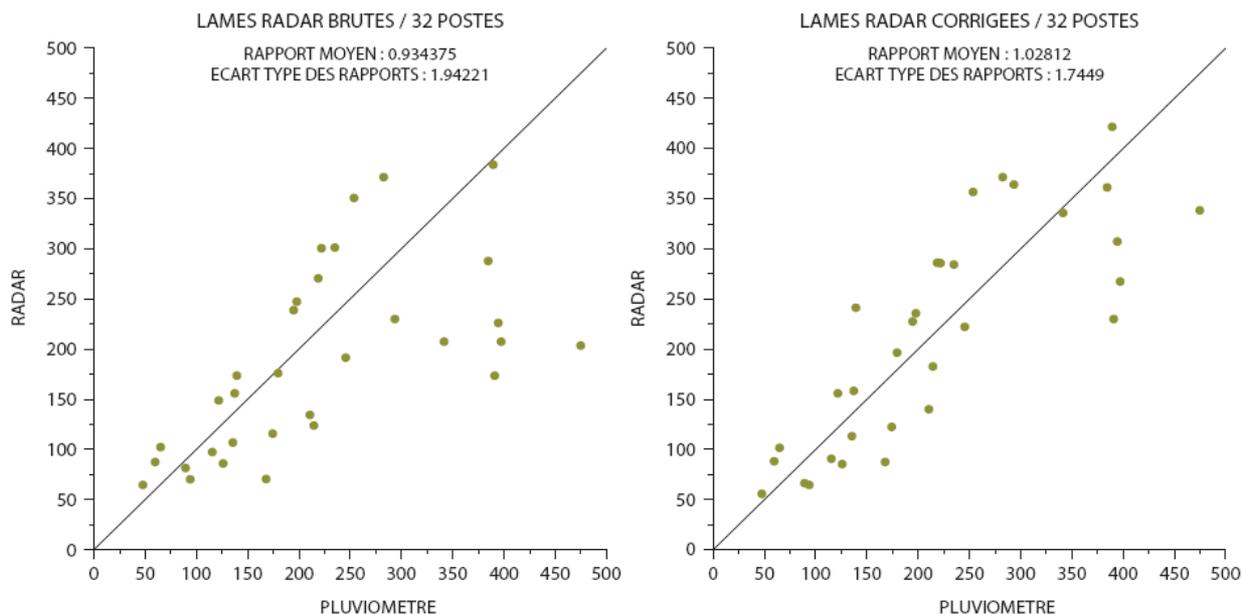


FIGURE 2 : Nuages de points comparant les estimations des cumuls mensuels de précipitation par le radar En bande S du Colorado (ordonnée) et ceux mesurés par les pluviomètres (abscisse) pour la lame d'eau brute (panneau de gauche) et après calibration (panneau de droite), sur le mois de janvier 2013.

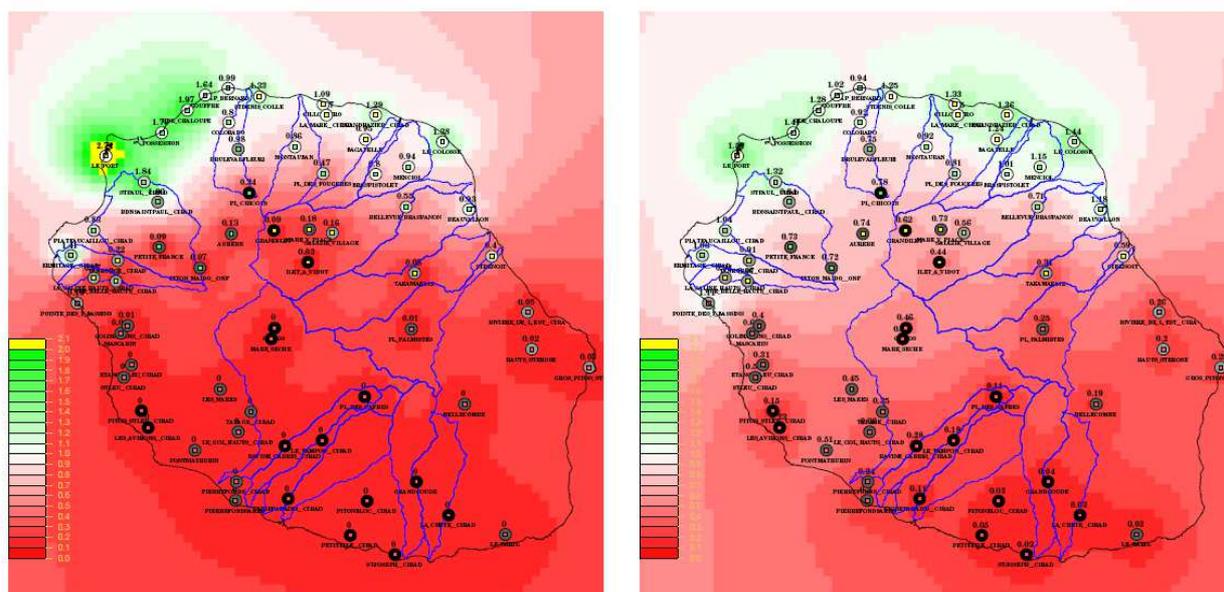


FIGURE 3 : Rapport spatialisé entre la lame d'eau estimée par le radar du Colorado et les mesures par pluviomètre, en hiver (panneau de gauche) et en été (panneau de droite).

Disdromètre

Un disdromètre « Parsivel-2 » financé par l'OSU-Réunion a été livré en 2012, mais ce dernier n'a malheureusement jamais pu être utilisé dans le cadre de PRECYP. Après un premier problème de connectique, ayant nécessité le retour de l'instrument en métropole, des problèmes d'acquisition prévenant l'enregistrement des données collectées par le capteur sont apparus. Afin de palier ces difficultés, qui non pu être résolues malgré l'intervention de plusieurs techniciens de l'OSU-R, une demande de financement visant à acquérir une station d'acquisition dédiée a été soumise à la fédération OMNCG (OSU-R). en avril 2014

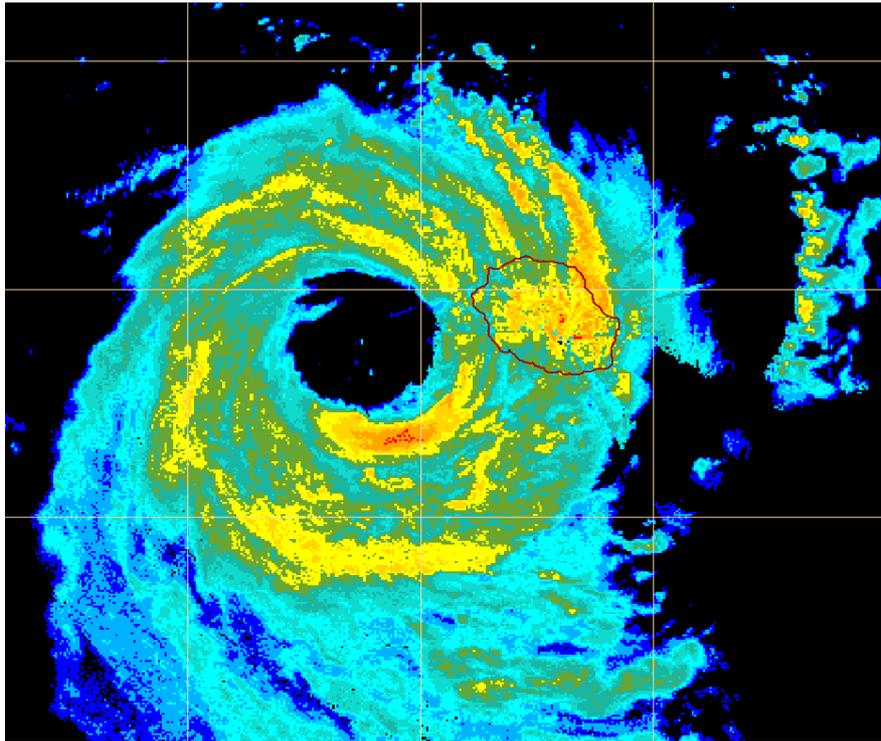


FIGURE 4 : Image composite de réflectivité radar du cyclone tropical Bejisa, obtenue à partir des radars de Piton Villers et du Colorado lors de son passage au plus près de l'île, le 2 janvier 2014 à 11 :20 UTC

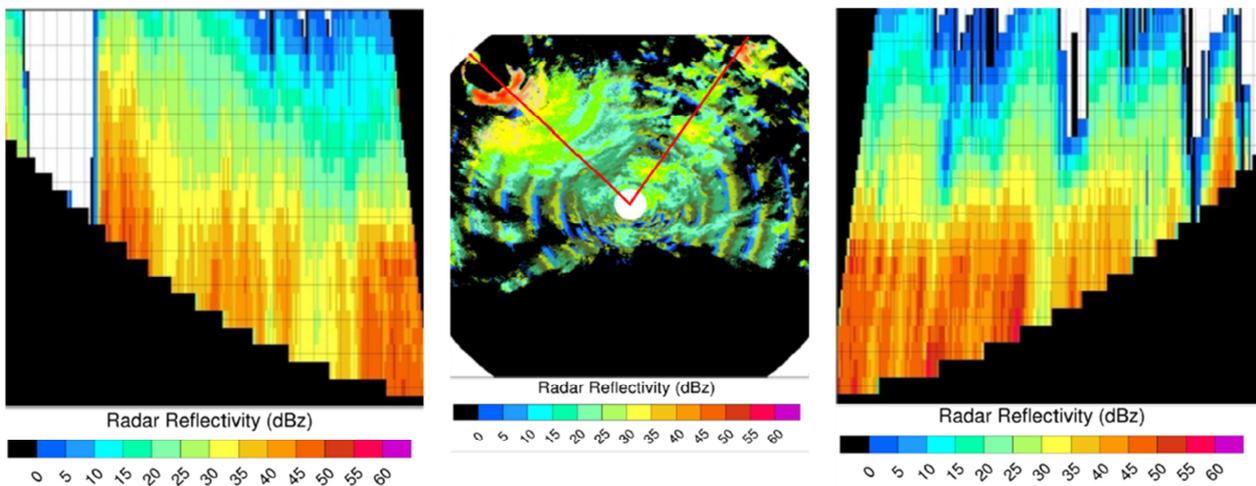


FIGURE 5 : Coupes verticales de réflectivité 3D à travers l'œil du cyclone tropical Bejisa (panneau de gauche) et le long d'une bande précipitante (panneau de droite), obtenues à partir du radar du Colorado, le 1 janvier 2014 à 19 UTC. La position des plans de coupe est indiquée sur la figure centrale.

Radar UHF

Le radar profileur UHF du LACy a été installé début 2009 à l'aéroport de Gillot. Avant son arrêt – le radar a subi une panne importante en janvier 2013 qui n'a pu être réparée - ce capteur fournissait des profils verticaux de vent et de réflectivité jusqu'à 12 km d'altitude à la résolution de 300m. Il permettait également de déterminer, sous certaines hypothèses, le taux de précipitation, la vitesse verticale et certaines propriétés microphysiques de la pluie, toutes les 15 minutes.

Les données collectées par cet instrument pendant une année complète (mai 2009 - avril 2010) ont été exploitées afin d'étudier certaines propriétés microphysiques des précipitations et d'établir une climatologie de la distribution verticale des précipitations à La Réunion.

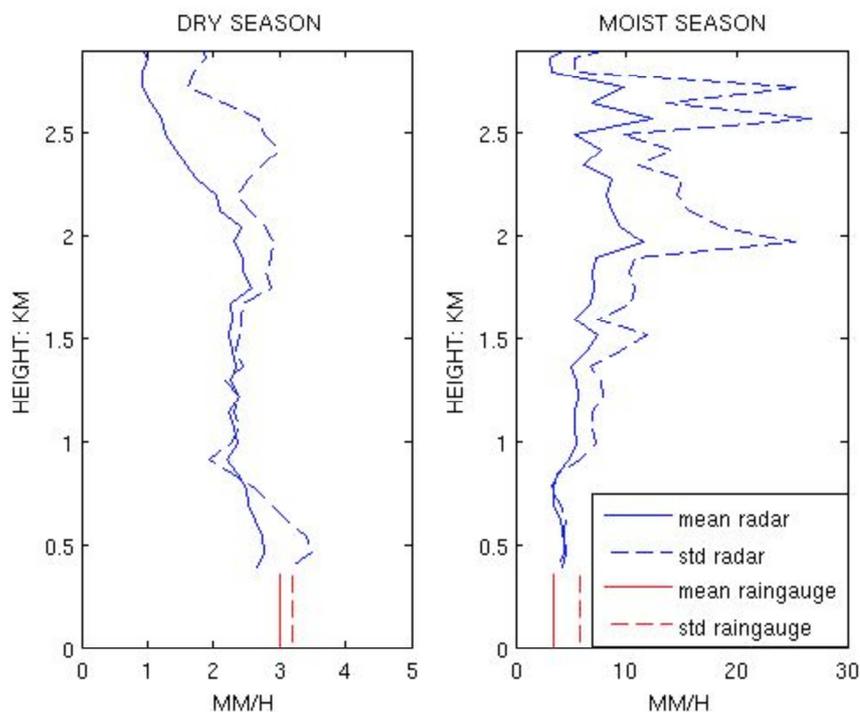


FIGURE 6 : Profils verticaux moyens (trait plein) et écart-type (pointillés) des cumuls de précipitation horaires (en mm.h^{-1}), en saisons sèche (panneau de gauche) et humide (panneau de droite).

Les résultats de cette étude montrent que pendant la saison sèche, le taux de précipitation moyen est d'environ $2,5 \text{ mmh}^{-1}$ dans les deux premiers kilomètres de la troposphère, avant de diminuer ensuite progressivement avec l'altitude (**Fig. 6**). La variabilité est relativement faible, bien que globalement supérieure à la valeur moyenne sur toute la colonne. La diminution du taux de pluie avec l'altitude est corroborée par les mesures de surface qui montrent des taux de pluie plus élevés au sol qu'à la plus basse altitude mesurée par le radar. Ce résultat est relativement surprenant car on s'attend intuitivement à une augmentation progressive du taux de pluie avec l'altitude en raison de l'évaporation en basses couches, supposée plus importante en saison sèche. L'étude des profils de vent associés (non montrés) suggère que la structure verticale du taux de pluie est pilotée par l'inversion de la couche d'alizés (située vers 2.5 km), qui a pour effet d'interdire le développement vertical des nuages convectifs au delà de 3km. Il apparaît également que lors de certains épisodes d'alizés, les pluies restent systématiquement cantonnées en dessous de 2000m d'altitude. Dans ces situations, les faisceaux des radars de Piton Villers et du Colorado passe très rapidement au dessus des précipitations, induisant une sous-estimation parfois très importante des cumuls de pluie notamment dans les régions partiellement masquées (cf. **Fig. 3**).

Pendant la saison humide, le taux de pluie est supérieur à tous les niveaux et augmente régulièrement avec la hauteur pour atteindre 10 mmh^{-1} à 2 km d'altitude. Des différences marquées existent également en termes de durée de l'événement, les précipitations persistant plus longtemps (jusqu'à 8 heures) pendant la saison humide que pendant la saison sèche. La variabilité est également plus élevée et peut atteindre jusqu'à 25 mmh^{-1} à 2 et à 3 km d'altitude. On note également que l'inversion des alizés est moins brutale et se produit à un niveau plus élevé que pendant la saison sèche (non montré).

Une estimation des flux d'énergie cinétique de la pluie a également été obtenue à partir du jeu d'observations disponible. L'analyse des données a montré que l'effet des précipitations sur l'érosion des sols était principalement lié aux flux horizontaux (ruissellement), ceux-ci étant globalement supérieurs d'un ordre de grandeur aux flux verticaux (effet « splash »). Ces résultats constituent une étape fondamentale dans l'optique de quantifier plus précisément l'impact des précipitations sur l'érosion des sols. Cette problématique est particulièrement importante en régions tropicales où l'abondance des précipitations a tendance à modifier considérablement le paysage.

⇒ **Cette étude a permis d'établir une climatologie robuste de la structure verticale des précipitations à La Réunion et d'estimer plus précisément l'impact des précipitations sur l'érosion des sols dans le bassin versant de la Rivière des Pluies.**

⇒ **Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Atmospheric Measurement Techniques* (Rechou et al. 2014).**

2.1.3 Préparation des outils numériques

Le modèle le plus fin actuellement disponible dans la zone Océan-Indien est Aladin-Réunion. Il couvre la quasi-totalité bassin SOOI à la résolution de 8 km sur 70 niveaux verticaux. Pour représenter correctement le cycle de vie des cyclones tropicaux et leurs impacts à l'échelle de La Réunion, il est néanmoins nécessaire de descendre à des résolutions plus fines pour résoudre explicitement la convection nuageuse. Dans cette optique, diverses configurations des modèles à haute résolution Arome et Mésos-NH ont été développées au cours du projet.

AROME

Le modèle Arome est opérationnel sur la France métropolitaine depuis 2008 à la résolution de 2,5 km. Capable de résoudre explicitement la convection, et doté d'un système d'assimilation 3D-Var, ce modèle a permis un saut sans précédent pour la prévision des précipitations à courte échéance, notamment grâce à l'assimilation des données issues des radars météorologiques.

Plusieurs configurations du modèle Arome ont été déployées et testées sur la zone Océan Indien (**Fig. 7**). Il s'agit des modèles Arome-Pégase, développé dans le cadre du projet éponyme d'EDF, Arome-PRECYP et Arome-Indien. Le premier modèle, qui tourne aujourd'hui en opérationnel, prend comme conditions initiales et comme conditions aux limites les analyses et prévisions opérationnelles d'Aladin-Réunion. Les deux autres configurations, développées spécifiquement pour le projet, sont équipées de leur propre système d'assimilation 3D-VAR. Le domaine d'Arome-PRECYP a été défini afin d'étudier les épisodes fortement précipitants sur La Réunion et les cyclones tropicaux passant à proximité de l'île. Arome-Indien est un prototype/démonstrateur du futur modèle opérationnel de Météo-France qui est amené à remplacer Aladin-Réunion à l'horizon 2016.

Les configurations d'Arome avec assimilation d'observations développées dans le cadre de PRECYP doivent permettre de mieux définir l'état initial du modèle. Ces travaux sont donc fondamentaux dans l'optique d'améliorer les prévisions opérationnelles, mais également afin d'initialiser et de forcer des simulations numériques à plus haute résolution réalisées avec le modèle Meso-NH. L'intérêt de ces configurations pour l'analyse et la prévision des cyclones a été évaluée tout au long du projet sur plusieurs systèmes parmi lesquels les cyclones Ivan, Dumile, Felleng et, plus récemment, Hellen et Bejisa.

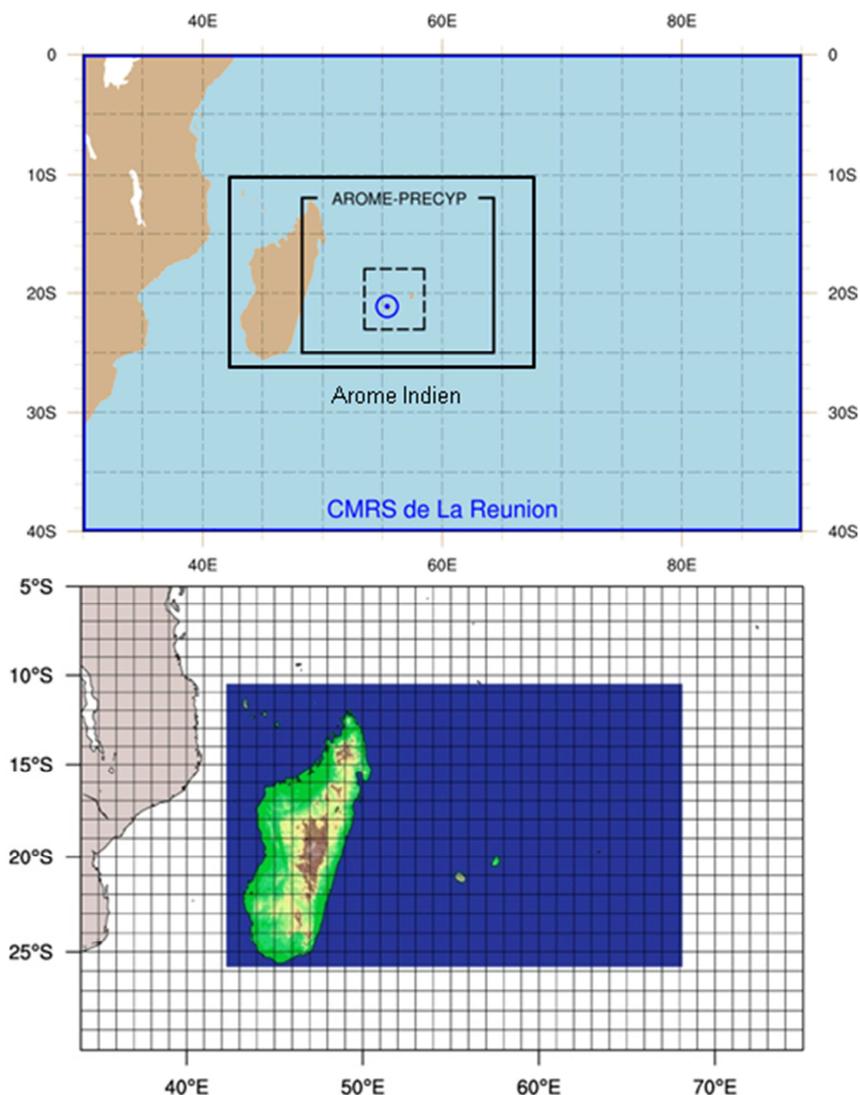


FIGURE 7 : Les différentes configurations Arome développées et utilisées dans le cadre du projet PRECYP. Panneau du haut : Domaines Arome Pégase (pointillés), Arome PRECYP et Arome Indien. Panneau du bas : Vue détaillée du domaine couvert par Arome-Indien

⇒ **Les travaux réalisés dans le cadre de PRECYP ont contribué à la réalisation d'un démonstrateur du modèle opérationnel Arome Indien qui est appelé à prendre la suite du modèle Aladin-Réunion en 2016.**

MESO-NH

Méso-NH est un modèle de recherche couvrant une large gamme de résolution. Les domaines et sous-domaines sont définis par l'utilisateur, avec la possibilité de les imbriquer. Les conditions initiales et les conditions aux limites sont spécifiées par un autre modèle (Aladin-Réunion ou Arome par exemple). Meso-NH est non-hydrostatique et bénéficie d'un ensemble de paramétrisations différentes des processus sous-maille.

Le modèle Méso-NH n'avait jusqu'à présent jamais été utilisé pour simuler des précipitations sur l'île de la Réunion. Il a donc été nécessaire d'évaluer dans un premier temps sa capacité à reproduire l'intensité et la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur cette île au relief

tourmenté. Différentes configurations, caractérisées par des résolutions horizontale allant de 32 km à 500 m ont été testées et de nombreux diagnostics ont été mis en place ou adaptés pour faciliter l'exploitation des futures simulations et la comparaison avec les données disponibles (satellite, radar, radar profileur, pluviomètres).

Le code CELLS simulant l'activité électrique a été optimisé et intégré dans la distribution officielle du modèle (Barthe et al. 2012). Une simulation de l'activité électrique dans un cyclone tropical idéalisé a été réalisée et a montré le potentiel du système couplé Meso-NH-CELLS pour simuler de façon réaliste l'activité électrique sporadique des systèmes dépressionnaires tropicaux. De nouveaux schémas microphysique permettant de mieux représenter la complexité des processus de formation des gouttelettes de pluie dans les nuages ont également été implémentés dans le modèle.

- ⇒ **L'implémentation du schéma électrique CELLS dans Meso-NH a permis de simuler pour la première fois un orage électrisé sur terrain complexe à partir d'analyses météo.**
- ⇒ **Le développement de CELLS a fait l'objet d'un article dans la revue *Geoscience Model Development*.**
- ⇒ **Les nouveaux schémas microphysiques implémentés dans Meso-NH vont permettre d'étudier l'effet de la microphysique sur l'intensification des cyclones ainsi que de tester, et d'optimiser, le schéma opérationnel qui sera utilisé pour la prévision des précipitations cycloniques avec Arome Indien.**

2.2 Tâche 2

Cette tâche concerne l'intensification des cyclones tropicaux, et en particulier les phases **d'intensification rapide** qui restent, aujourd'hui encore, très difficiles à prévoir. Nos activités visent à progresser dans la compréhension et la modélisation numérique de ces processus en étudiant plus spécifiquement les mécanismes intervenant dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien.

2.2.1 Définition d'un seuil d'intensification rapide dans le bassin SOOI

L'intensification rapide (RI) d'un cyclone tropical est définie internationalement par la climatologie des ouragans de l'Atlantique Nord et des typhons du Pacifique Nord-Est, deux bassins pour lesquels existent des vols de reconnaissance. Cette climatologie, établie par Kaplan et al. (2010)¹, définit statistiquement l'intensification rapide comme un renforcement des vents maximaux soutenus d'au moins 30 nœuds ($15,4 \text{ m.s}^{-1}$) sur une période de 24 heures. Ce seuil de 30 nœuds correspond au 94^{ème} (resp. 92^{ème}) percentile de tous les changements d'intensité observés sur 24 h dans les systèmes tropicaux évoluant sur mer dans l'Atlantique Nord (resp. le Pacifique Nord-Est) de 1989 à 2006, au stade minimum de dépression. Ce calcul n'a, en revanche, jamais été réalisé dans le sud-ouest de l'océan Indien (SOOI) où une intensification est considérée comme rapide par les prévisionnistes dès lors qu'elle excède le taux climatologique moyen de 1 nombre de Dvorak T (ou CI) par période de 24 heures (Dvorak 1975)².

Chaque bassin cyclonique présentant ses caractéristiques propres, il nous est apparu crucial de mettre en évidence les caractéristiques climatologiques du sud-ouest de l'océan Indien afin de situer

¹ Kaplan, J., M. DeMaria, and J.A. Knaff, 2010: A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, **25**, 220-241.

² Dvorak, V.F., 1975: "Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery" *Mon. Wea. Rev.*, **103**, pp.420-430

ce bassin relativement aux autres en terme de seuil d'intensification rapide. Dans cette optique, et pour la première fois, une étude de ce type a été réalisée dans le cadre du projet PRECYP. Une méthodologie statistique basée sur Kaplan et al. (2010) a été appliquée aux 177 systèmes tropicaux qui se sont formés dans le bassin entre 1999 et 2014. Cette période de 15 ans a été retenue car la base de données du Centre Météorologique Régional Spécialisé (CMRS) de la Réunion, qui s'étend de 1981 à 2014, est incomplète avant 1999 (arrivée de Meteosat 5, 1er satellite géostationnaire dans le bassin).

Ces travaux ont permis de définir l'IR sur de bassin SOOI comme une variation d'intensité strictement supérieure à 13.9 m/s sur 24 heures (95ème percentile de la distribution des changements de la vitesse maximale du vent sur 24 heures). Cette valeur est inférieure de 10% au seuil d'intensification de 15,4 m/s jusqu'ici utilisé. La base de données permet de façon équivalente de définir une intensification rapide dans ce bassin comme une baisse de pression supérieure à 25 hPa en 24 heures.

L'analyse des données montre également que 75.7% (resp. 12.5%) des systèmes qui parviennent au stade maximal de cyclone (resp. tempête) connaissent au moins une phase d'intensification rapide (sur 24 heures) dans leur cycle de vie. Le tracé des phases d'intensification rapide des différentes catégories de systèmes (dépression, tempête, cyclone) dans le bassin a également permis de géolocaliser les zones privilégiées pour l'intensification rapide des systèmes tropicaux (**Fig. 8**)

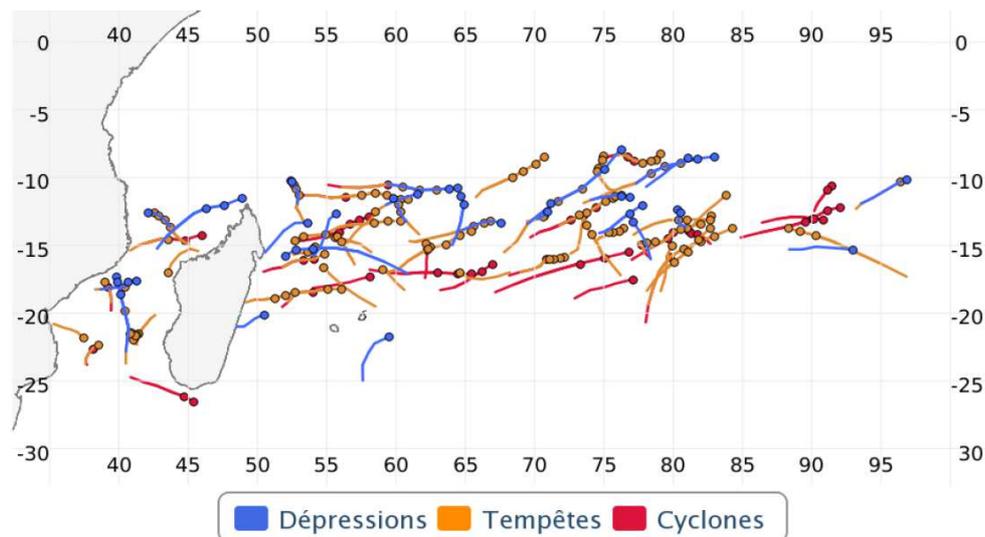


FIGURE 8 : Zones privilégiées d'intensification rapide pour chaque catégorie de systèmes (dépression, tempête, cyclone) du bassin SOOI.

⇒ **La définition d'un seuil d'intensification rapide spécifique au bassin SOOI va aider les prévisionnistes et les chercheurs à quantifier l'aspect « explosif » d'un système tropical dans ce bassin.**

2.2.2 Etude du lien entre structures d'altitude et intensification

Dans le sud-ouest de l'Océan Indien, il a été observé que certaines phases d'intensification rapide d'un cyclone étaient liées à la présence d'un thalweg d'altitude d'origine extra-tropicale. Le travail de thèse de Marie-Dominique Leroux sur le cyclone Dora (2007) a permis mieux comprendre les interactions entre un thalweg originaire des latitudes moyennes et un cyclone tropical.

La modélisation de Dora avec le modèle Aladin-Réunion a ainsi permis de reproduire correctement les deux phases d'intensification du système, et d'établir un lien entre l'intensification du système et les interactions thalweg- cyclone (Leroux et al. 2012). L'analyse plus poussée des simulations numériques a permis de proposer un schéma conceptuel résumant les différents d'interaction (Fig. 10).

Dans un premier temps, du tourbillon potentiel provenant du thalweg alimente directement le cœur du cyclone en haute et moyenne troposphère, contribuant à son intensification sur la verticale. Le thalweg force ensuite une accélération des vents à l'extérieur du cyclone qui a pour effet de générer un mur de l'œil secondaire. Ce changement de structure induit une nouvelle intensification du cyclone par contraction du mur externe et dissipation du mur interne initial.

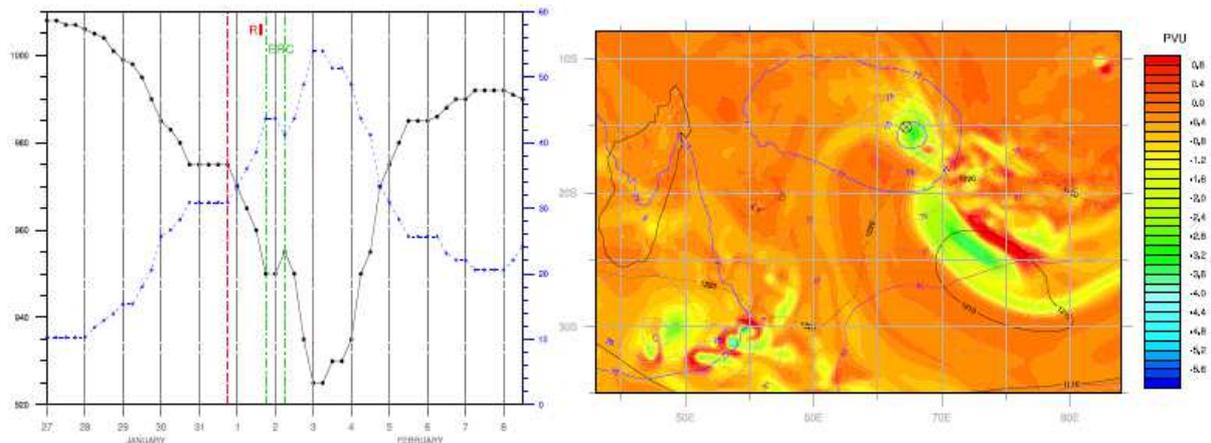


FIGURE 9 : Panneau de gauche : évolution de l'intensité du cyclone tropical Dora (bleu : vent maximal en $m.s^{-1}$, noir : pression réduite au niveau de la mer). Sont indiquées les phases d'intensification rapide (RI) et de cycle de remplacement du mur de l'œil (ERC). Panneau de droite : champ de tourbillon potentiel (couleur) indiquant le thalweg d'altitude à proximité du cyclone (isolignes bleues) le 1^{er} février 2007 à 6 TU.

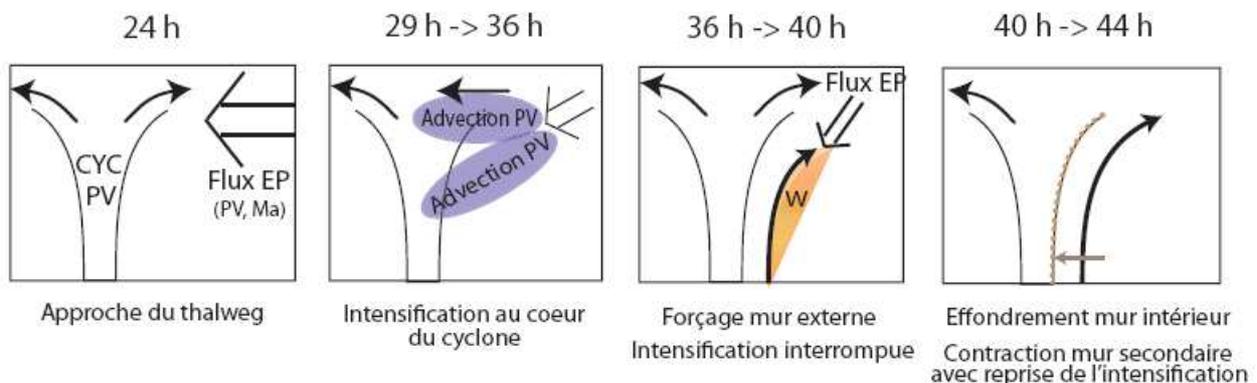


FIGURE 10 : Schéma conceptuel résumant les phases clés de l'interaction de Dora avec un thalweg d'altitude. CYC représente le vortex cyclonique défini initialement par du tourbillon potentiel (PV) en basse et en moyenne troposphère ; le mur de l'œil est matérialisé par deux surfaces d'égal moment angulaire (Ma) ; l'apparition d'un mur secondaire externe est renforcée en couleur orange ; la divergence d'altitude est schématisée par deux flèches sortantes. Le thalweg est représenté par le flux radial moyen qu'il impose permettant l'advection de tourbillon potentiel jusqu'au cœur du cyclone, par le forçage dynamique (vitesses verticales w), ainsi que par l'activité ondulatoire (flux EP) correspondant à des flux asymétriques de moment angulaire et de tourbillon potentiel.

Cette étude a été complétée au moyen de 98 expériences de sensibilité dans lesquelles la position et l'intensité initiale du vortex cyclonique ont été modifiées (sans toucher au thalweg) pour évaluer leur importance sur l'intensification ultérieure du cyclone. Les résultats ont montré qu'un vortex plus fort à l'instant initial s'intensifiait davantage grâce à un renforcement de l'advection de tourbillon cyclonique depuis le thalweg vers le cyclone en moyenne troposphère.

- ⇒ Les travaux sur le cyclone Dora ont permis d'expliciter les mécanismes de l'interaction entre un cyclone et un thalweg d'altitude ainsi que l'importance de la géométrie initiale d'interaction dans le processus d'intensification rapide.
- ⇒ Ces travaux ont fait l'objet d'articles dans les revues *Monthly Weather Review* (Leroux et al. 2013a) et *Journal of Atmospheric Sciences* (Leroux et al. 2013b).

2.2.3 Modélisation des phases d'intensification

Les travaux réalisés tout au long du projet ont globalement montré la capacité des modèles numériques à haute résolution à modéliser les différentes phases d'intensification d'un cyclone tropical. PRECYP a permis d'évaluer, en particulier, l'intérêt et les limites actuelles du modèle Arome pour simuler l'intensité et la structure des cyclones tropicaux.

Les premières évaluations ont été réalisées sur le cas du cyclone Ivan (2008) en faisant varier de nombreux paramètres (pas de temps, paramétrisations physiques, résolution, domaine, ...) afin de mieux appréhender le comportement du modèle en conditions tropicales – on rappelle qu'Arome n'avait, avant le projet PRECYP, jamais été utilisé en régions tropicales. Ces simulations ont été systématiquement comparées aux simulations obtenues avec le modèle Méso-NH, utilisé dans des configurations quasiment identiques (résolution, paramétrisations). Ces études ont montré qu'Arome utilisé à 4 km de résolution ne permettait pas de représenter correctement la structure du cyclone et que cette résolution n'était, de fait, pas pertinente pour la prévision cyclonique. Une maille de 2,5 km est apparue bien plus adaptée, même si à cette résolution, aussi bien Arome que Méso-NH ont tendance à produire un cyclone trop intense et trop compact (**Fig. 11**). Il a également été noté que les prévisions d'intensité étaient très sensibles à la paramétrisation des flux océan-atmosphère. Ce constat nous a amené à envisager la possibilité d'introduire un couplage avec les couches superficielles de l'océan afin de mieux simuler l'évolution de l'intensité et de la structure du cyclone. Les résultats préliminaires obtenus sur Ivan ont clairement confirmé cette tendance (**Fig. 11**).

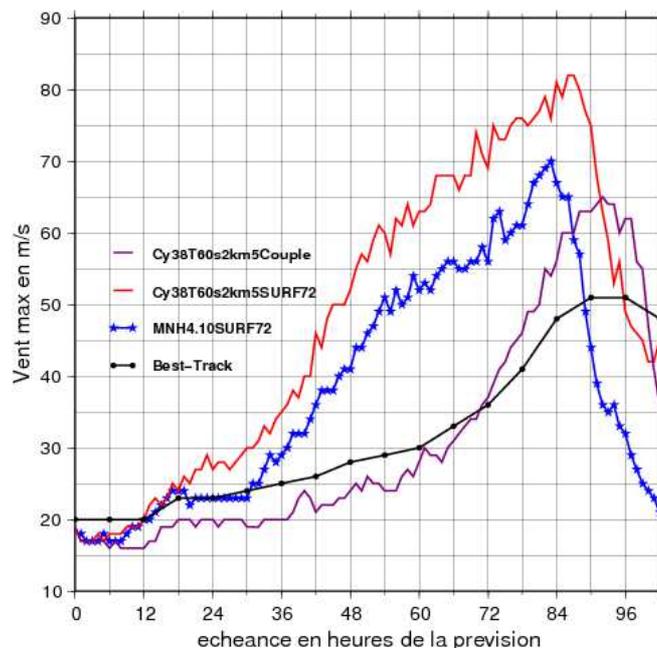


FIGURE 11 : Intensité simulée du cyclone tropical Ivan (vent maximal à 10 m d'altitude) pour les modèles Meso-NH (courbe bleue) et Arome (courbes rouge et pourpre) à 2,5 km de résolution. Pour une même résolution, les réglages des modèles sont identiques (mêmes niveaux verticaux, mêmes paramétrisations physiques). La courbe pourpre indique les résultats obtenus en activant en plus le couplage avec les couches superficielles de l'océan. La référence (BestTrack du CMRS La Réunion) est indiquée en noir.

Dans la deuxième partie du projet les travaux se sont portés sur le développement de configurations Arome à 2.5 km équipées d'un système d'assimilation de données visant à mieux définir les conditions initiales du modèle. La première configuration (AROME-PRECYP) a été testé sur le cas du cyclone Dumile (2013) qui était jusqu'à Bejisa le seul système pour lequel nous disposions de données radar potentiellement assimilables. De nombreuses simulations ont été réalisées pour évaluer l'apport de l'assimilation de ces données sur l'analyse et la prévision (cf. 2.3.2). Si les données radar sont potentiellement très bénéfiques pour améliorer la structure du cyclone, il est également nécessaire d'avoir recours à d'autres types de données pour contraindre efficacement la représentation initiale du vortex lorsque les systèmes sont éloignés des terres. Dans ce cas, les satellites micro-onde qui sont les seuls instruments capables d'observer la structure interne des cyclones depuis l'espace, sont incontournables.

Le satellite Mégha-Tropiques, lancé en 2011, est dédié à l'observation des régions tropicales et peut observer un cyclone jusqu'à 6 fois dans une même journée (au lieu d'une seule fois pour un satellite classique en orbite « héliosynchrone »). Son sondeur micro-ondes à 6 canaux (SAPHIR) permet d'obtenir des informations sur la microphysique nuageuse à l'intérieur des cyclones, là où les observations infra-rouges (plus classiques) sont limitées au sommet des nuages. A ce jour les systèmes d'assimilation opérationnels ne sont cependant pas capables d'exploiter les observations micro-ondes en ciel nuageux/pluvieux, d'où une perte capitale d'information sur la structure interne des cyclones. Une première étape, essentielle dans l'optique de pouvoir assimiler un jour ce type de données, consiste à développer un opérateur d'observation permettant de passer de l'espace des variables du modèle (température, humidité, etc.) à l'espace des observations.

Dans cette optique, une première étude a été réalisée en 2014, dans le cadre de la thèse de J. Guerbette. L'opérateur d'observation utilisé repose sur le modèle de transfert radiatif RTTOV et a été testé sur Bejisa alors que le système était situé à 250 km au nord-ouest de l'île de la Réunion le 1^{er} janvier 2014 à 19h TU. La **Figure 12** montre une comparaison entre les températures de brillance observées (par SAPHIR) et simulées (par RTTOV) à partir d'une prévision opérationnelle à 6h d'échéance du modèle ALADIN. Il apparaît que le cyclone est relativement bien localisé, mais que la structure interne de l'œil est mal caractérisée. Ces différences peuvent s'expliquer à la fois par les performances encore limitées du modèle de transfert radiatif, ainsi que par les défauts du schéma microphysique implémenté dans le modèle ALADIN.

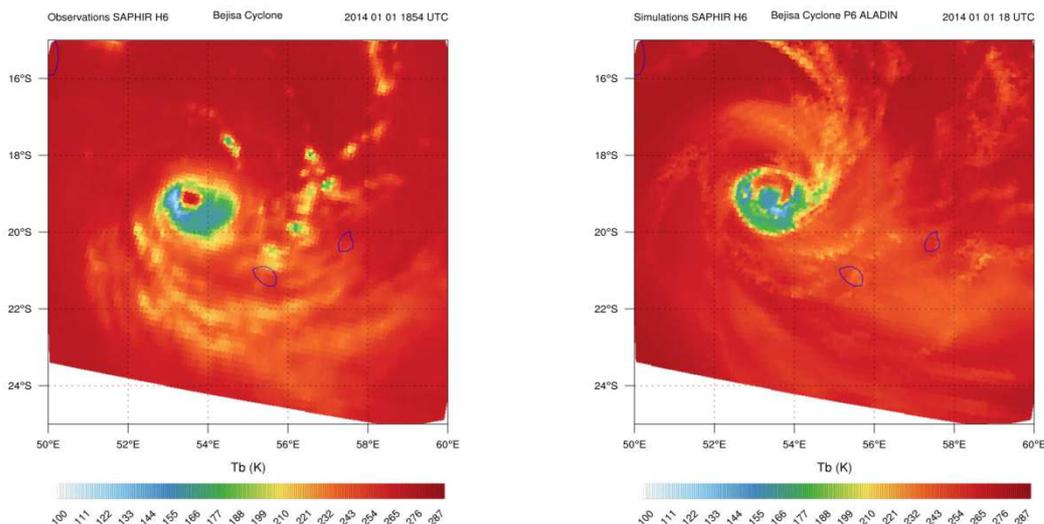


FIGURE 12: *Bejisa, le 1er janvier 2014 vers 19h TU, observé par le canal 6 de SAPHIR (panneau de gauche) et simulé par le modèle de transfert radiatif RTTOV à partir des prévisions 6h du modèle ALADIN-Réunion (panneau de droite).*

La poursuite de cette étude permettra d'améliorer l'algorithme RTTOV et la représentation des précipitations (schéma microphysique) dans les modèles ALADIN et surtout AROME. Une fois les observations micro-ondes simulées de façon satisfaisante, les données SAPHIR pourront alors être potentiellement assimilées dans AROME pour améliorer la représentation initiale et la prévision future de la structure et, *a fortiori*, de l'intensité des cyclones tropicaux.

Le cyclone Bejisa a également été utilisé pour évaluer les performances du modèle Arome sur des cyclones particulièrement intenses. Même s'il n'a, jusqu'à présent, pas été possible de prévoir correctement l'ensemble du cycle de vie de ce système particulièrement atypique, les premiers résultats ont montré qu'Arome était parfaitement capable de creuser explosivement un cyclone à courte échéance. Cette capacité se retrouve notamment dans les caractéristiques des champs analysés, Arome étant ainsi le seul modèle numérique capable de reproduire un taux d'intensification assez proche de la réalité lors de la phase d'intensification rapide de Bejisa (**Fig. 13**).

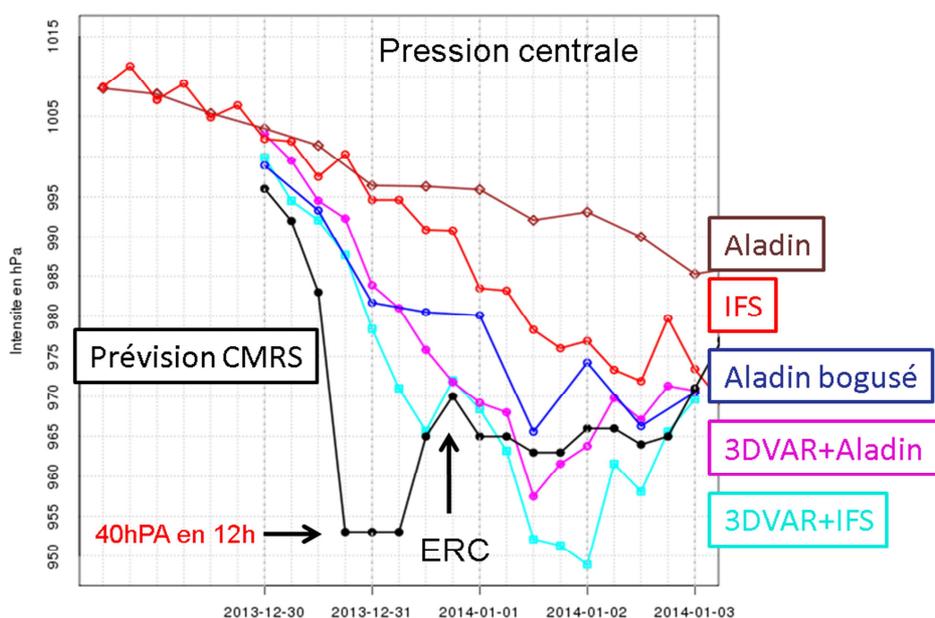


FIGURE 13 : Pression centrale du cyclone Bejisa (2014) analysée par différents modèles. La courbe noire (référence) correspond à l'analyse opérationnelle fournie par le CMRS de La Réunion. Le cyclone est associé à une période d'intensification rapide, caractérisée par une chute de la pression centrale de 40 hPa en 12 heures, suivie d'un cycle de remplacement du mur de l'œil (ERC). Parmi les différents modèles considérés, seules les configurations Arome (3DVAR) fournissent un taux d'intensification proche de la référence.

- ⇒ Les études menées dans le cadre de PRECYP ont contribué à définir les caractéristiques du modèle opérationnel Arome appelé à remplacer Aladin-Réunion à l'horizon 2016. Les résultats obtenus montrent également que la mise en œuvre d'un couplage avec l'océan est vraisemblablement nécessaire pour prévoir correctement l'intensité des cyclones.
- ⇒ Les développements en modélisation ont conduit à la publication d'un article dans la revue *Nonlinear Processes in Geophysics* (Plu 2013).
- ⇒ Le système d'assimilation 3D-VAR développé et testé dans les configurations Arome-PRECYP et Arome-INDIEN servira de référence pour l'ensemble des modèles Arome-Outremer.

⇒ Les travaux en cours sur l'instrument SAPHIR pourront être généralisés aux autres observations micro-ondes disponibles (capteurs SSMIS, AMSU-B, TMI, etc.), afin d'augmenter la couverture spatiale et temporelle des observations cycloniques.

2.2.4 Anticipation de l'intensification par détection de l'activité électrique

Les études réalisées dans le cadre de la thèse de C. Bovalo ont permis de caractériser précisément l'activité électrique dans le bassin SOOI et d'étudier plus particulièrement les liens entre l'activité électrique et l'intensification des cyclones et tempêtes.

Une première étude sur le système Gelane, réalisée à partir des données éclairs du WWLLN et des données position et intensité issues des best-tracks du CMRS La Réunion, a montré une forte activité électrique avant une intensification du cyclone jusqu'au stade de cyclone tropical intense (Fig. 14).

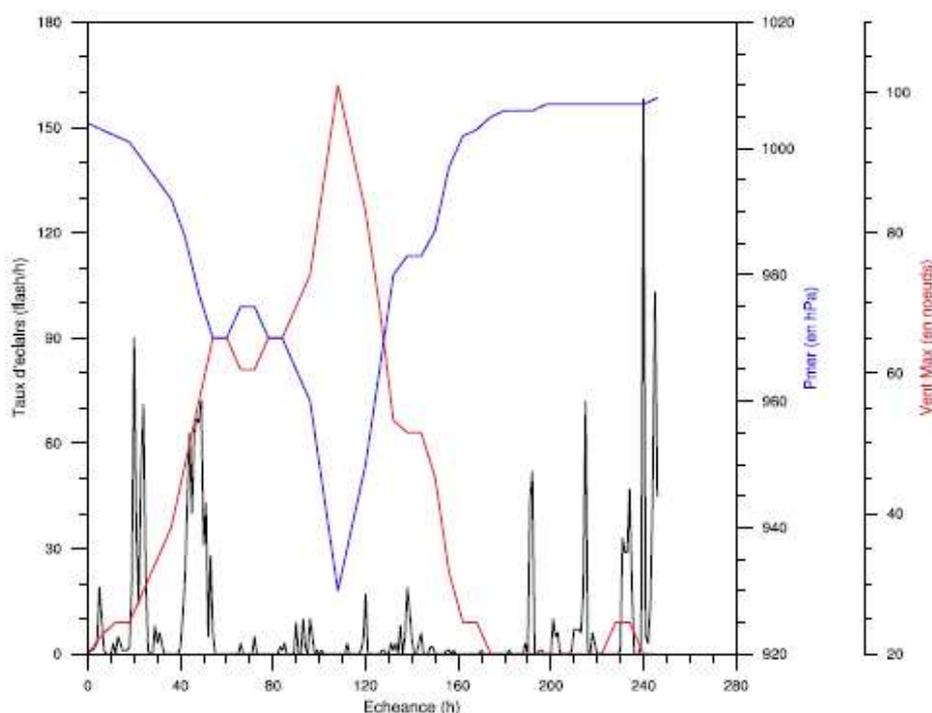


FIGURE 14 : Evolution temporelle du nombre d'éclairs par heure (courbe noire) superposé à la pression minimale au niveau de la mer (hPa, courbe bleue) et au vent maximum (en noeuds, courbe rouge) pour le cyclone tropical intense Gelane.

Le lien entre activité électrique et intensification des cyclones a ensuite été généralisé à tous les systèmes répertoriés sur la période 2005 - 2013. Contrairement aux études précédentes, notre approche ne s'est pas concentrée sur les cas spectaculaires (i.e., caractérisés par une activité électrique hors norme), mais a intégré tous les types de systèmes (de la dépression au cyclone tropical très intense), dans toutes les configurations (système sur mer, atterrissage, passage près des côtes). Au total l'étude a porté sur un ensemble de 70 tempêtes et cyclones tropicaux. Etant donnée la configuration du bassin, celui-ci a été divisé en 3 régions : l'océan ouvert, la zone à moins de 400 km des côtes est de Madagascar, et le Canal du Mozambique (on s'attend, en effet, à une structure et un comportement électrique différent lorsque le cyclone tropical est sous l'influence des terres). Un autre point original de cette étude concerne le découpage du cyclone en trois régions distinctes. Le rayon de vent maximum (RMW pour *radius of maximum wind*) et le rayon de la dernière isobare fermée (ROCI pour *radius of the outermost closed isobar*) ont été extraits des best-tracks du CMRS

de La Réunion, permettant de définir précisément la région du mur de l'œil comme la région entre le centre du système et $1,5 \times \text{RMW}$. Les bandes précipitantes internes ($1,5 \times \text{RMW} - 3 \times \text{RMW}$) et externes ($3 \times \text{RMW} - \text{ROCI}$) ont été également considérées séparément ; les bandes internes étant supposées être influencées par la dynamique du mur de l'œil.

L'analyse des relations entre l'activité électrique et les changements d'intensité sur océan ouvert montre que la proportion de périodes avec activité électrique est supérieure durant les phases d'intensification rapide des cyclones tropicaux. Lorsque le système est au stade de tempête tropicale, l'activité électrique dans les bandes externes augmente dès 18h avant une période d'intensification rapide. On montre également que l'activité électrique détectée par le WWLLN est principalement localisée dans le mur de l'œil et décroît lorsque l'on s'éloigne du centre du système. Lorsque les systèmes sont à proximité des terres, la distribution de l'activité électrique diminue dans le mur de l'œil (**fig. 15-1**).

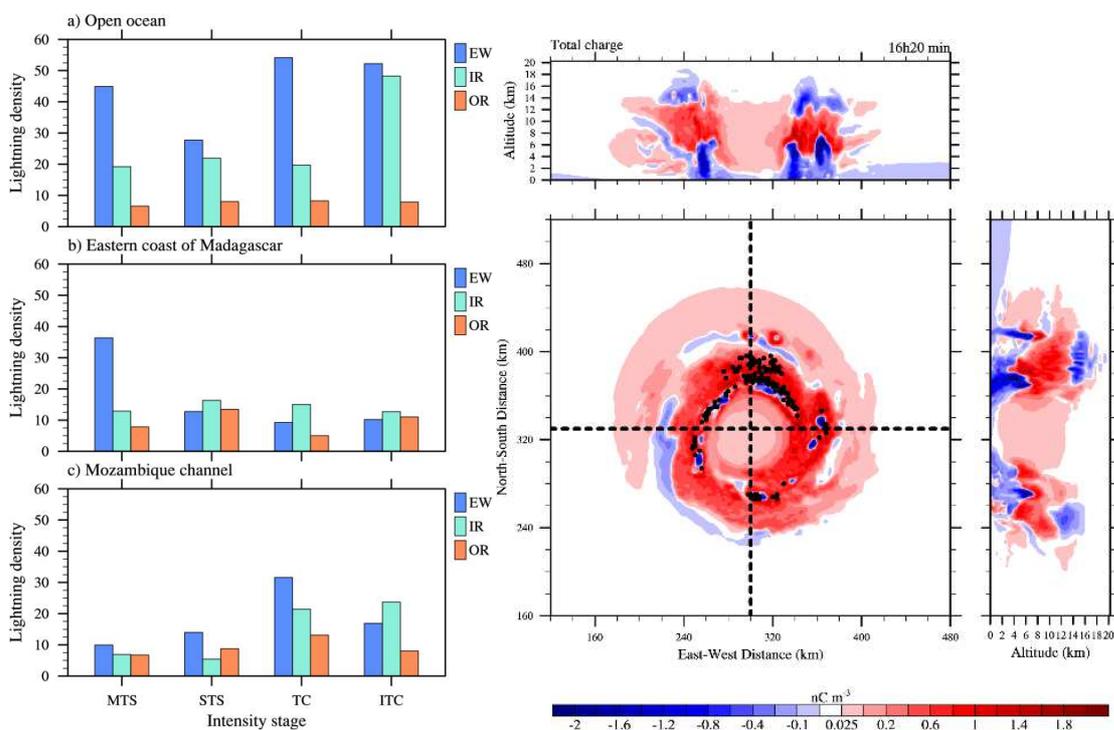


FIGURE 15 : 1- (panneau de gauche) distribution de l'activité électrique détectée par le WWLLN (a) sur océan ouvert, (b) à proximité de la côte est de Madagascar, et (c) dans le Canal du Mozambique. 2- (panneau de droite) : Simulation de l'activité électrique dans un cyclone tropical idéalisé avec le modèle Méso-NH.

Pendant sa thèse, C. Bovalo a également mis au point une simulation de cyclone tropical idéalisé et électrisé. L'objectif de ce travail est d'étudier la répartition spatiale des charges électriques en lien avec les hydrométéores, ainsi que les processus physiques en jeu dans le mur de l'œil. Le schéma électrique a été introduit après 15 h de simulation et pendant 18 h. Les premiers résultats montrent que le taux d'éclairs simulé par le système couplé Meso-NH-CELLS pour ce cyclone tropical à un stade mature est réaliste à la fois du point de vue de l'ordre de grandeur (le taux d'éclairs ne dépasse pas 100 fl. min^{-1} sur toute la durée de la simulation) et de l'intermittence du taux d'éclairs (**fig. 15-2**). Cette étude devra être poursuivie afin de comprendre l'électrification des différentes régions du cyclone et les raisons de la sporadicité de l'activité électrique.

- ⇒ Ces travaux ont fait l'objet de publications dans les revues *Journal of Geophysical Research* (Bovalo et al. 2014) et *Natural Hazards and Earth System Sciences* (Bovalo et al. 2012)
- ⇒ Une première climatologie de l'activité électrique en lien avec les systèmes dépressionnaires tropicaux a été réalisée. Ces résultats pourront servir à l'élaboration d'une carte de risque liés aux éclairs dans le bassin.

2.3 Tâche 3

2.3.1 Etude du rôle des ondes de gravité pour la formation des bandes précipitantes

L'atterrissage du cyclone tropical intense Ivan sur Madagascar y a généré des vents estimés à plus de 230km/h en pointe. Ce cas a été exploité pour étudier la génération d'ondes de gravité (OG) en altitude dans le cadre de la thèse de C. Ibrahim. Le modèle Meso-NH, initialisé par les champs Aladin-Réunion, a permis de réaliser une simulation réaliste d'Ivan durant les phases d'intensification du système et d'atterrissage sur Madagascar. Les résultats du modèle révèlent l'existence d'OG de longueurs d'onde horizontales (resp. verticales) comprises entre 32 et 2000 km (resp. 1.5 et 3.3 km, **Fig. 16**). Ces travaux ont également exploité un ensemble de données issues d'observations (satellite, radiosondage, occultation radio GPS) et de modèle (analyses du CEP).

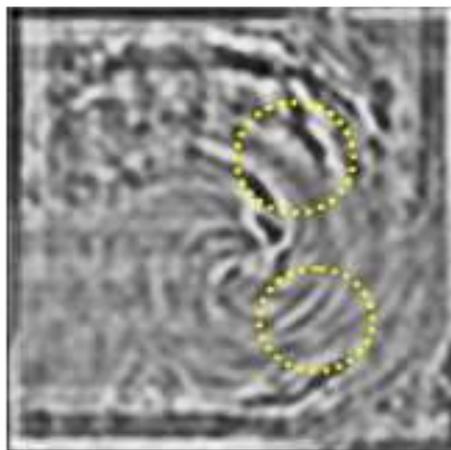


FIGURE 16 : Champ horizontal de perturbations de pression à 20 km d'altitude au voisinage du cyclone Ivan, valide le 16 Février 2008 à 12:00 UTC pour des longueurs d'onde horizontales inférieures à 200km. Les cercles jaunes indiquent la présence d'ondes de gravité.

Une première climatologie des OG produites dans les cyclones tropicaux du bassin SOOI a également été réalisée à partir de sept ans de données du CEPMMT (2006-2013). Les résultats préliminaires indiquent que les ondes de gravité de méso-échelle sont essentiellement générées dans les structures asymétriques observées lors des phases d'intensification. Il semble que ces ondes de gravité, qui se propagent vers l'est avec des longueurs d'ondes horizontales comprises entre 450 et 650 km, tendent par ailleurs à limiter l'intensification des cyclones en évacuant l'énergie (**Fig. 17**).

- ⇒ Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Atmospheric, Chemistry and Physics* (Chane-Ming et al. 2014).
- ⇒ L'étude sur le cyclone Ivan a globalement montré la capacité du modèle de recherche français Meso-NH à représenter de façon réaliste l'excitation des ondes de gravité par les cyclones tropicaux et les différents processus liés à leur propagation.

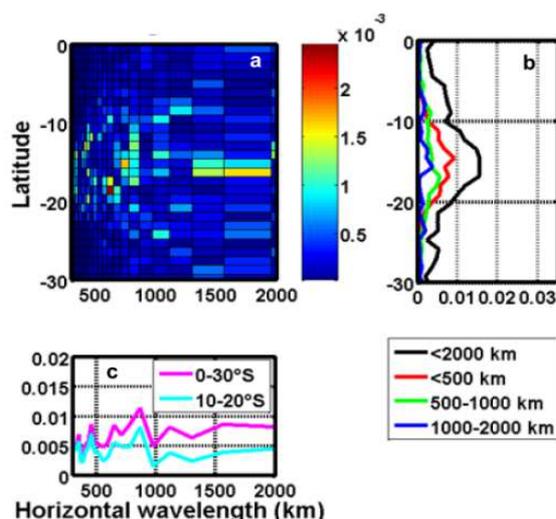


FIGURE 17: Ondes de gravité stratosphériques produites par le cyclone Ivan le 16 février 2008 dans le modèle ECMWF.

2.3.2 Validation des simulations de structures précipitantes

- Les simulations de cyclones réalisées à partir de la configuration 3DVAR AROME-PRECYP ont permis de tirer des enseignements quand à l'apport de la haute résolution sur la simulation des structures précipitantes.

AROME-PRECYP a ainsi été plus particulièrement testé sur le cas du cyclone Dumile (janvier 2013), qui est passé au plus près de La Réunion le 3 janvier en y générant des précipitations importantes. Deux cycles d'assimilation ont tourné, la seule différence étant l'assimilation ou non des données du radar du Colorado. Pour chaque cycle, trois prévisions longues ont été réalisées, partant d'instantanés initiaux différents : le 2 à 00h TU et à 12h TU et le 3 à 00h TU.

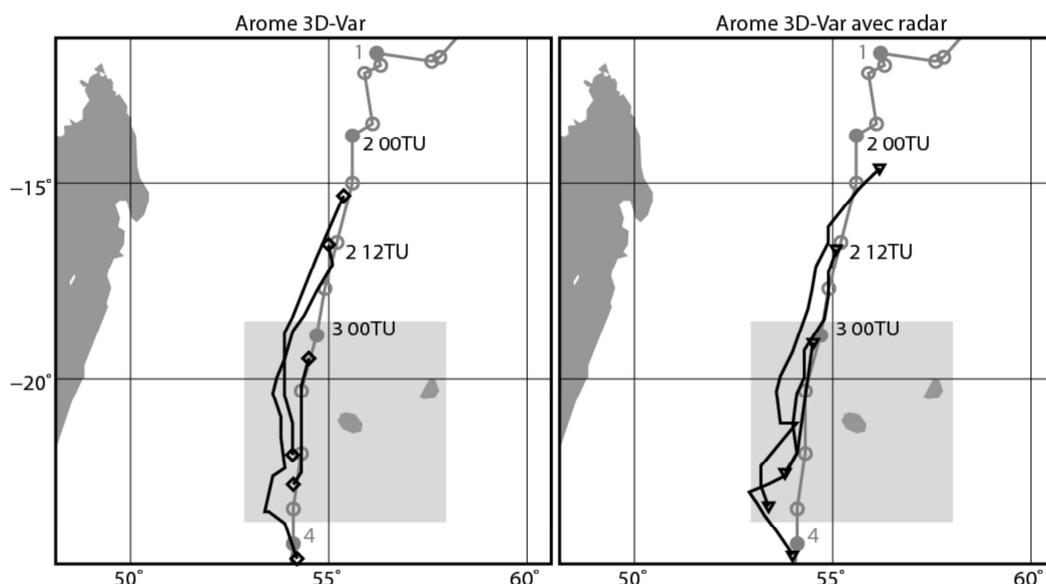


FIGURE 18 : Trajectoire observée du cyclone Dumile (trait gris) et prévisions Arome partant des différents instants initiaux simulés (2 à 00h et 12 h TU, et 3 à 00h TU), avec (à droite) ou sans (à gauche) assimilation de données radar. Le carré gris figure la zone des données radar du Colorado.

Si la trajectoire semble bien simulée par le modèle (**Fig. 18**), l'intensité du cyclone est en revanche largement sous-estimée par l'ensemble des prévisions Arome : au lieu d'une tempête se muant en cyclone, le modèle montre en fait une large dépression évoluant en tempête (**Fig. 19**). Ce défaut de représentation de la structure et de l'intensité de Dumile a des conséquences importantes sur les cumuls de pluie prévus à La Réunion (**Fig. 20**). Lors des 24 premières heures de la prévision du 2 à 12h TU, l'expérience avec assimilation radar surestime largement les cumuls de pluie. La **Figure 19** montre ainsi une bande précipitante touchant La Réunion, qui n'est pas présente dans les observations. Aux échéances allant de 24h à 48h, l'expérience avec assimilation de données radar prévoit des cumuls de pluie réalistes, alors que celle sans assimilation les surestime beaucoup. La trajectoire est également plus proche de la référence dans l'expérience avec assimilation (**Fig. 18**). A cet instant, la structure générale du cyclone est bien vue par la première configuration, et beaucoup moins bien par la seconde.

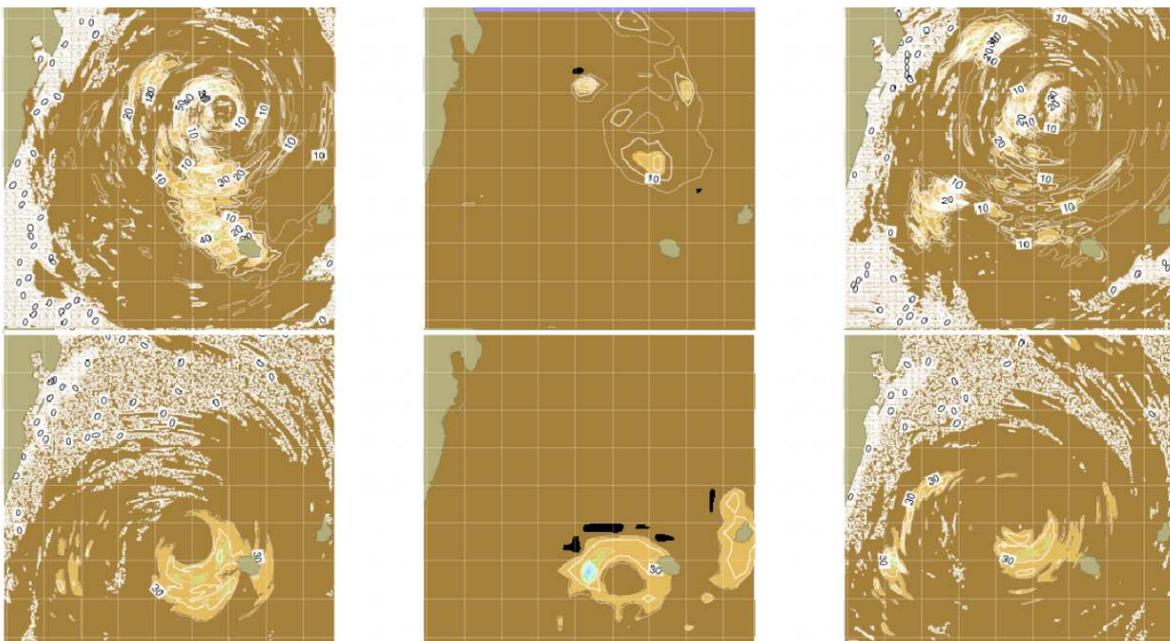


FIGURE 19 : Valeurs de pluies cumulées (mm) en 3h entre le 2 à 15h TU et le 2 à 18h TU (en haut) et entre le 3 à 09h TU et le 3 à 12h TU (en bas) pour la prévision Arome partant du 2 à 12h TU avec assimilation de données radar (panneau de gauche), sans assimilation de données radar (panneau de droite) et par le produit satellitaire TMPA 3B42 (panneau central). L'estimation satellitaire permet d'évaluer la structure des précipitations, mais ses valeurs ne doivent pas être acceptées précisément.

Il semble donc que les cumuls prévus par Arome à courte échéance soient avant tout liés à la représentation de la structure et de l'intensité de la dépression (un cyclone plus intense est en général plus compact et voit ses précipitations se rapprocher de son centre).

⇒ **L'assimilation des données radar est bénéfique quand la structure du cyclone est correcte, mais elle ne permet pas, à elle seule, de corriger la distribution des précipitations qui touchent La Réunion.**

De nouvelles simulations de Dumile avec AROME-INDIEN sont en cours afin de confirmer ou infirmer les résultats précédents. Des études portant sur le cyclone Bejisa ont également été initiées afin d'évaluer les performances de cette nouvelle configuration sur un cas plus intense. La complexité, la position, et le taux d'intensification hors norme de ce système rendent néanmoins sa simulation délicate et ce quel que soit le modèle utilisé (AROME, Mésos-NH). Si l'intensité et la

structure analysée du modèle semblent réalistes (Figs. 12 et 21), il n'a, pour l'instant, pas été possible de simuler correctement le cycle de vie de ce cyclone au-delà de 48 heures.

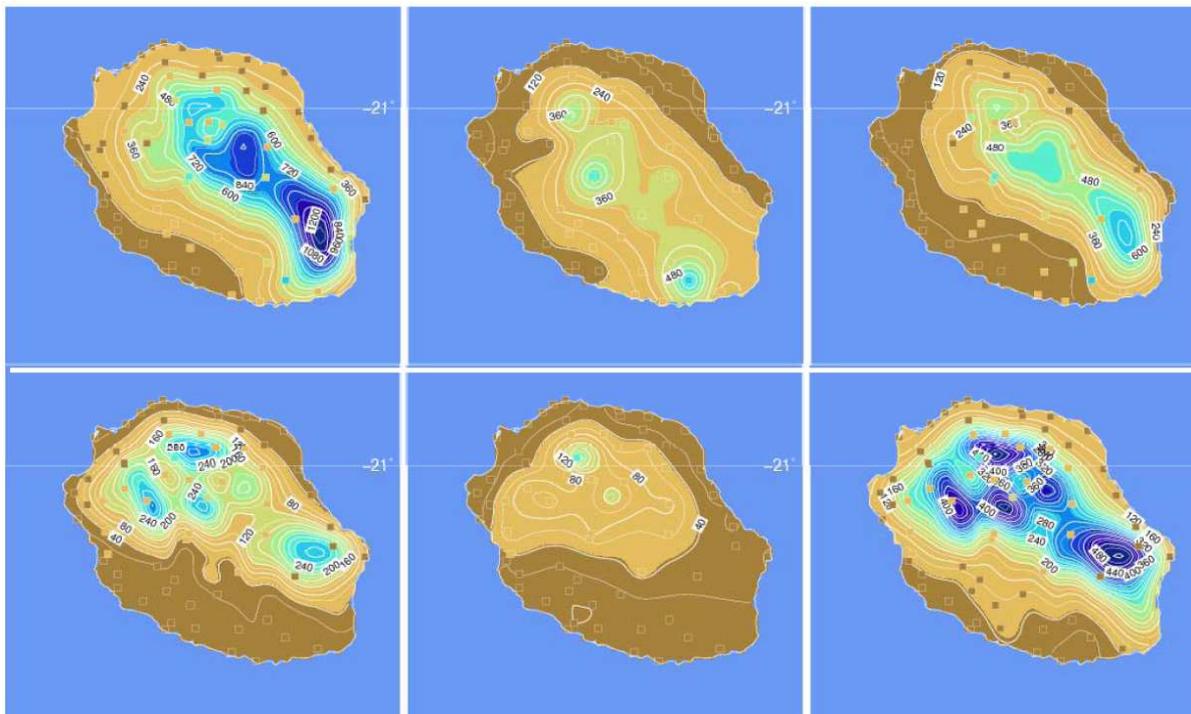


FIGURE 20: Valeurs de pluies cumulées (mm) en 24h entre le 2 à 12h TU et le 3 à 12h TU (en haut) et entre le 3 à 12h TU et le 4 à 12h TU (en bas) pour la prévision Arome partant du 2 à 12h TU avec assimilation de données radar (à gauche), sans assimilation de données radar (à droite) et par les pluviomètres krigés (au milieu). Sur chaque panneau, les stations des pluviomètres sont indiqués par des carrés, dont la couleur correspond à la valeur du cumule de pluie.

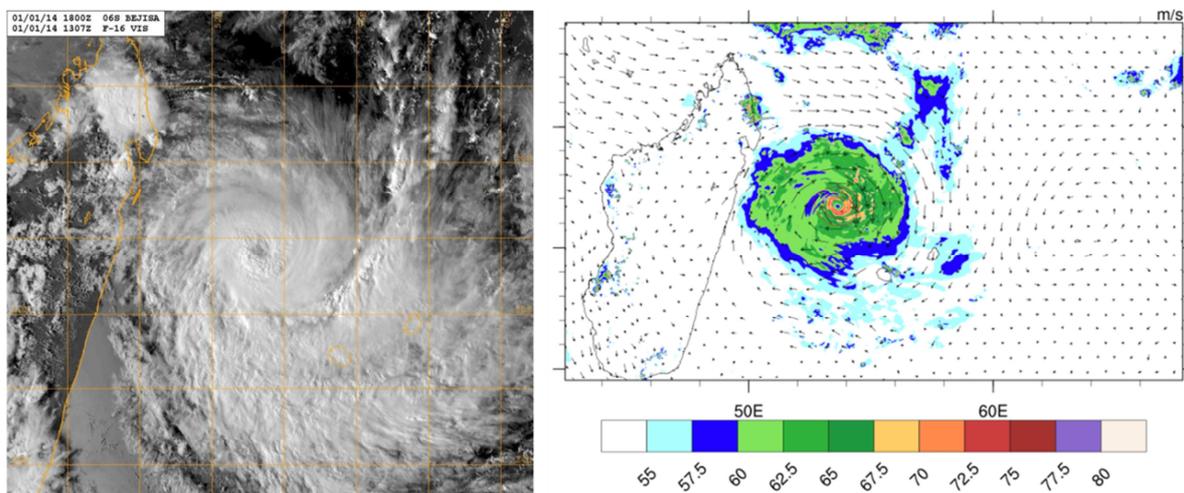


FIGURE 21 : Le cyclone tropical Bejisa. Panneau de gauche : contenu intégré en vapeur d'eau et champ de vent à 850 hPa analysé par AROME-INDIEN, valides le 01 janvier 2014 à 18 TU. Panneau de droite : Le cyclone observé par satellite à la même heure.

- Une première évaluation de l'impact d'un schéma microphysique à 2 moments sur la structure et l'intensité d'un cyclone tropical a été menée dans un cadre idéalisé - le cadre idéalisé permet de s'affranchir de l'impact de l'environnement et de se concentrer sur l'influence de la microphysique.

Les schémas microphysiques choisis pour cette inter-comparaison sont :

- ICE3 : un schéma à 1 moment qui prédit le rapport de mélange de 6 espèces (vapeur d'eau, eau nuageuse, pluie, glace nuageuse, neige et graupel). Ce schéma est aussi implémenté dans le modèle opérationnel AROME.
- C3R5 : un schéma à 2 moments qui prédit le rapport de mélange des mêmes 6 espèces et la concentration en nombre de l'eau nuageuse, de la pluie et de la glace primaire. Il s'agit du schéma ICE3 qui a été étendu à 2 moments.

L'analyse des résultats montre que le schéma microphysique impacte à la fois l'intensité (avec un écart maximal de 43 km h^{-1} sur le vent dans les basses couches à 15 h entre les simulations avec ICE3 et C3R5), mais aussi les précipitations. En effet, on observe que le schéma ICE3 produit des noyaux de précipitation plus intenses que C3R5 (écart $> 200 \text{ mm}$) et déplacés dans le sens cyclonique (**Fig. 22**).

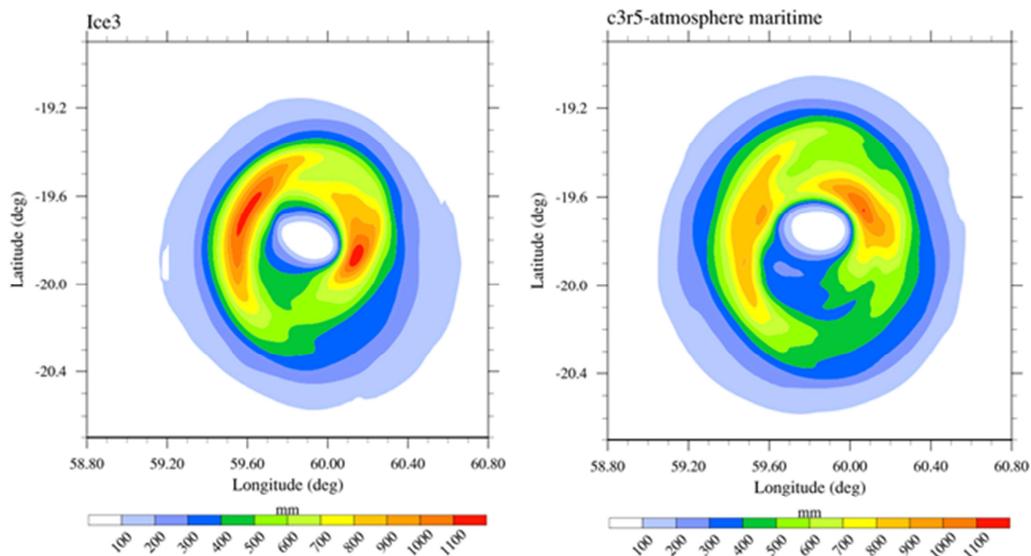


FIGURE 22 : Précipitations accumulées (mm) sur les 36h de simulation pour les cyclones modélisés avec ICE3 (panneau de gauche), et C3R5 (panneau de droite).

La modification de structure et d'intensité du système est principalement due à des différences dans le taux d'évaporation de la pluie à basse altitude et de sublimation/déposition en moyenne et haute troposphères. On observe également qu'une augmentation de déposition de vapeur sur la glace, en libérant de la chaleur latente, augmente la flottabilité de l'air et donc les ascendances. La microphysique impacte donc la circulation secondaire qui à son tour rétroagit sur la circulation primaire (tangentielle) du système. Cette première étude illustre l'impact significatif de la microphysique sur l'intensité et les potentiels dégâts associés aux cyclones tropicaux (vent, pluies). L'impact des aérosols devra aussi être évalué, et des simulations de cyclones observés devront être réalisées afin de comparer les résultats du modèle aux observations disponibles.

- Plusieurs simulations du cyclone tropical Dumile ont été également réalisées avec le modèle Méso-NH à différentes résolutions spatiales.

Les résultats préliminaires montrent que le cyclone est globalement bien reproduit par le modèle aux résolutions de 8 km et 2 km, et ce aussi bien en termes de trajectoire que d'intensité (**Fig. 23**). La structure du champ de précipitation simulé semble également en bon accord avec les

observations radar (**Fig. 24**). Même si ces résultats doivent encore être analysés plus précisément, il semblerait que nous disposions d'une simulation d'un réalisme exceptionnel qui pourra être exploitée pour évaluer plus précisément le comportement du modèle AROME et tester l'apport de schémas microphysiques à 2 moments en conditions réelles.

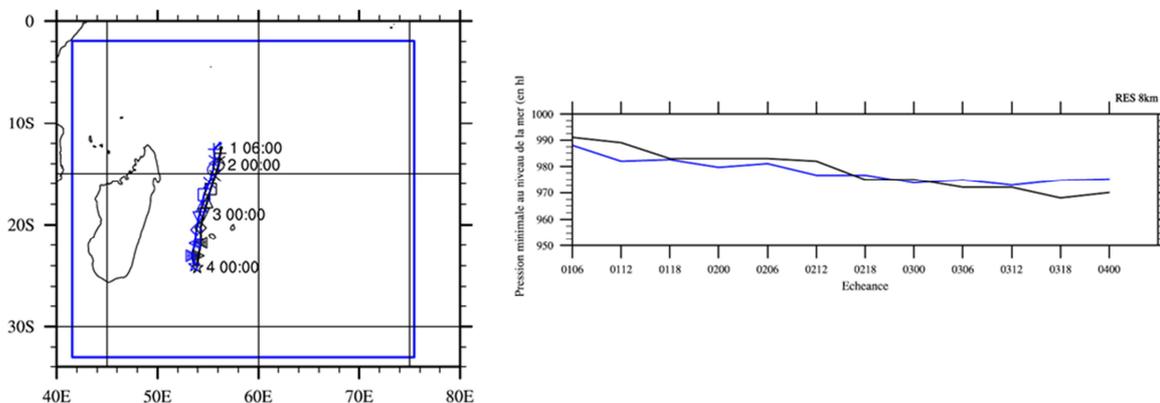


FIGURE 23 : Trajectoire (gauche) et pression minimale au niveau de la mer (droite) de Dumile. Les courbes noires et bleues représentent la best-track et les résultats de la simulation Meso-NH, respectivement.

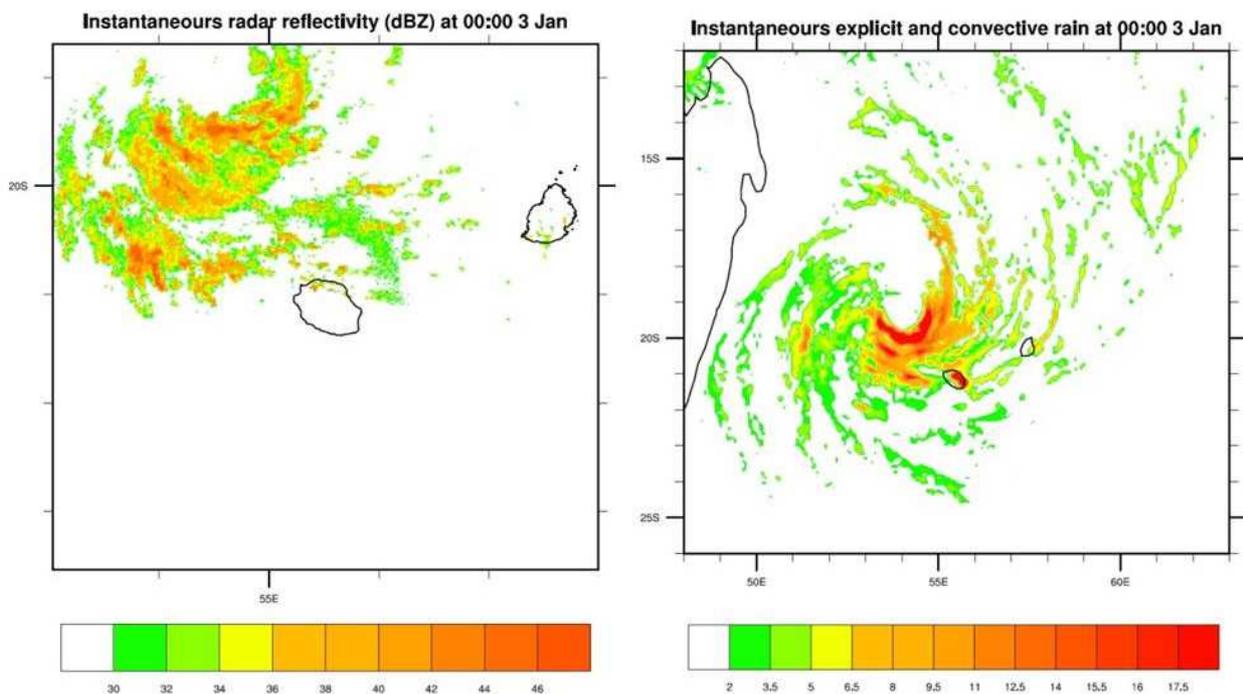


FIGURE 24 : Réflectivités radar observées (panneau de gauche) et précipitations instantanées modélisées (panneau de droite) le 3 janvier 2013 à 00 UTC.

2.4 Tâche 4

2.4.1 Validation des précipitations prévues sur le relief à La Réunion

Un objectif majeur du projet est d'améliorer la spatialisation des précipitations sur l'île de La Réunion pendant les événements sévères. A cet égard, un cas particulier a été plus particulièrement

étudié. Il s'agit de l'évènement fortement précipitant du 27 au 30 janvier 2011, pendant lequel les pluies ont localement dépassé 1 m et ont généré de nombreux dégâts (débordement de ravines, dégradation de routes, éboulements). Cet épisode était lié à la présence dans la zone d'un minimum dépressionnaire au sein duquel circulaient des masses nuageuses très humides et instables. Les cumuls de précipitations les plus élevés ont été localisés dans le nord-est et le nord-ouest de l'île (**Fig. 25**). Le maximum de précipitations sur les quatre jours a été enregistré à la Plaine des Chicots (1013 mm), la Plaine des Fougères (1076 mm) et Takamaka (932 mm). Cet épisode a été simulé avec le modèle Meso-NH couplé aux analyses Aladin-Réunion toutes les 6 heures. Ce travail, initié dans le cadre du stage de Master de N. Bigjee, a ensuite été poursuivi dans le cadre du post-doctorat de N. Yu.

Cette étude a montré qu'il était globalement impossible de représenter correctement la distribution spatio-temporelle et l'intensité des précipitations sur une île telle que La Réunion avec une résolution horizontale 4 km. A cette résolution, on ne distingue en effet que deux principaux sommets dépassant 2000 m d'altitude (**Fig. 26**) : le Piton de la Fournaise (2632 m), et le massif du Grand Benare (2896 m). Le Piton des Neiges, le sommet le plus haut de l'île, culmine à environ 2000 m d'altitude (contre 3070 m). Il faut descendre à 1 km de résolution pour distinguer les principaux pitons, les cirques et voir apparaître les bassins versants.

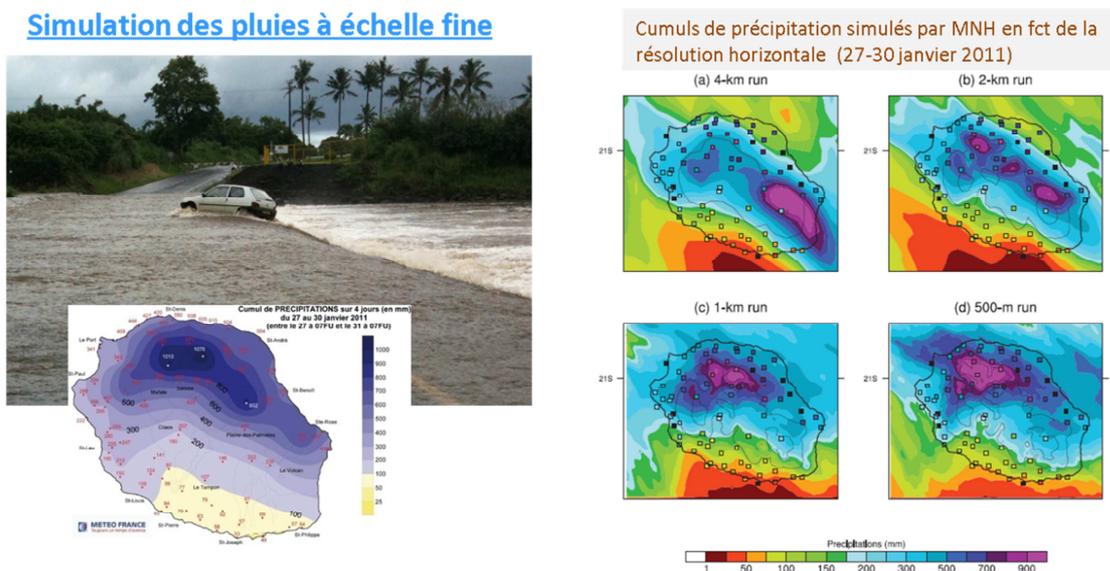


FIGURE 25 : Cumul de précipitations (mm) du 27 au 30 janvier 2011 observé (panneau gauche) et simulé (panneau de droite) par le modèle Mésos-NH à la résolution de (a) 4-km, (b) 2-km, (c) 1-km et (d) 500m.

Ces travaux ont également permis d'évaluer plus précisément la sensibilité de la prévision à la représentation du relief dans un modèle numérique. L'ensemble de simulations, réalisées à 4, 2, 1 et 0.5 km de résolution avec le modèle Mésos-NH, a ainsi révélé que les performances du modèle augmentaient significativement avec l'augmentation de la résolution jusqu'à 1 km, pour se stabiliser par la suite. On a également montré que seules les simulations à plus haute résolution (1km et 500m) permettaient de représenter correctement les plages froides sous-orage et les circulations locales qui pilotent la formation et la distribution des précipitations sur et au voisinage de l'île.

⇒ **Ces résultats suggèrent qu'un modèle opérationnel dédié à la prévision du temps sensible à La Réunion devra nécessairement utiliser des résolutions de 1km, voir 500m, afin de représenter correctement l'intensité et la distribution des précipitations à La Réunion.**

⇒ Cette étude a été publiée dans la revue *Natural Hazards and Earth System Sciences* (Yu et al. 2014).

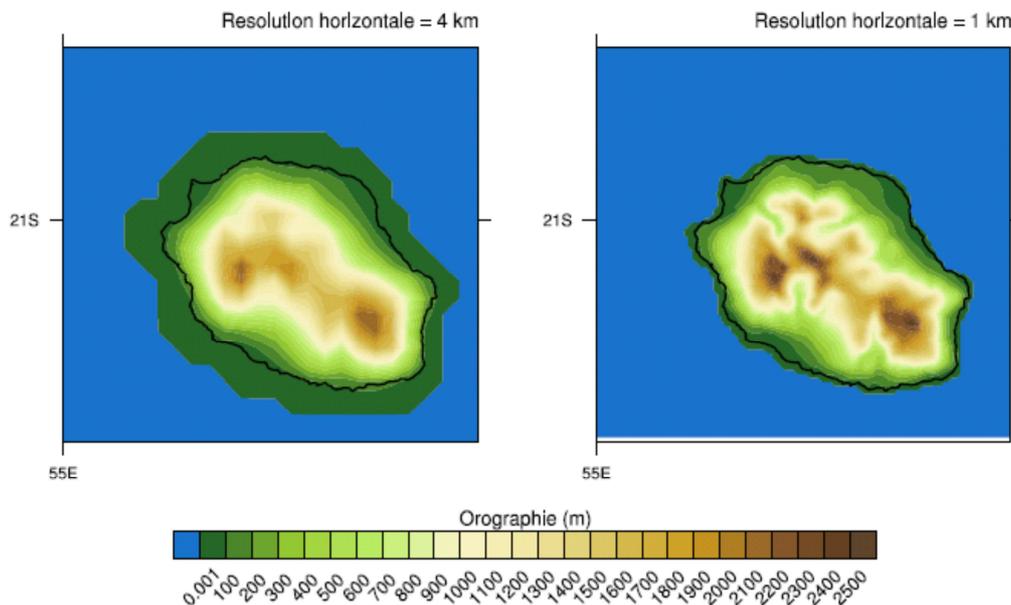


FIGURE 26 : Orographie de la Réunion à la résolution de 4 km (panneau de gauche) et de 1 km (panneau de droite).

2.4.2 Spatialisation des précipitations en temps différé à La Réunion

L'objectif poursuivi visait à combiner des données de différentes sources pour améliorer la spatialisation des précipitations sur l'île de La Réunion.

Dans cette optique, une méthode basée sur les techniques d'assimilation utilisées dans les modèles numériques de prévision du temps a été développée pour améliorer l'estimation de la distribution spatio-temporelle des précipitations lors des épisodes de pluies intenses. Cette méthode, qui doit permettre de fusionner les données de lames d'eau (radar, modèle) et de pluviomètres, a été évaluée dans une version simplifiée (radar / pluviomètre) par le bureau d'étude climatologique de Météo-France Réunion pendant la saison des pluies 2013-2014. L'échantillon de référence s'étend sur une période de 87 jours, incluant notamment l'épisode cyclonique Bejisa, et permet de couvrir un large panel de situations.

Les résultats obtenus montrent une amélioration significative de la distribution des précipitations par rapport à la lame d'eau radar d'origine, notamment dans les zones montagneuses (« hauts », volcan), moins bien couvertes par les radars (**Fig. 27**).

Une méthode d'évaluation objective de l'apport de la méthode, basée sur le calcul de scores, a également été développée. Les scores obtenus montrent une diminution sensible de la dispersion et une diminution sensible du biais radar/pluvio (**Fig. 28**). Une évaluation subjective a également permis de vérifier que la méthode ne générerait pas de structures aberrantes ou irréalistes.

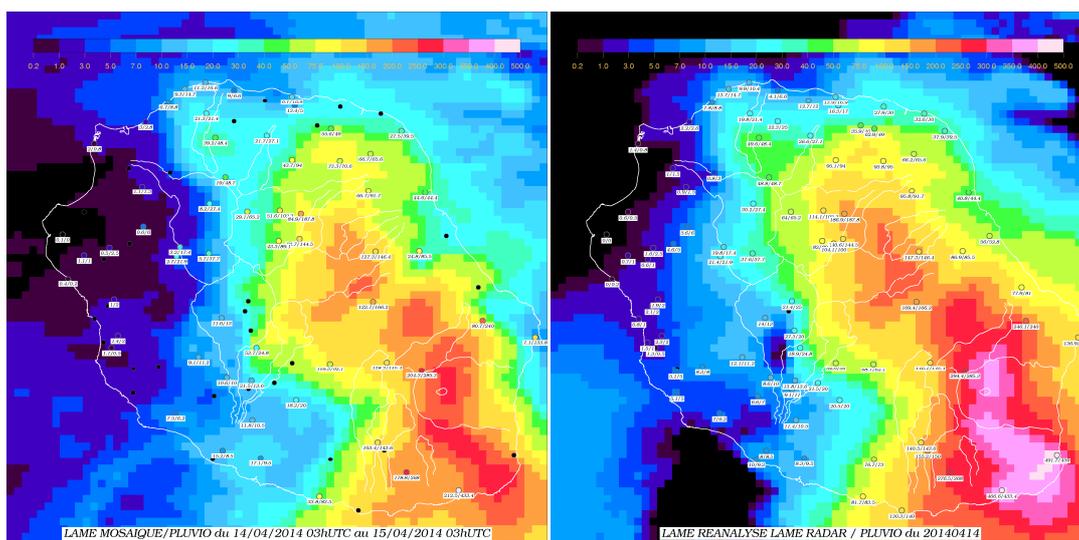


FIGURE 27: Exemple d'application de la méthode de fusion de données radar/pluvio sur l'épisode précipitant du 4 avril 2014 à La Réunion. Les images montrent la lame d'eau radar quotidienne avant (panneau de gauche) et après (panneau de droite) application de l'algorithme. Les carrés correspondent aux mesures fournies par les pluviomètres qui font office de référence.

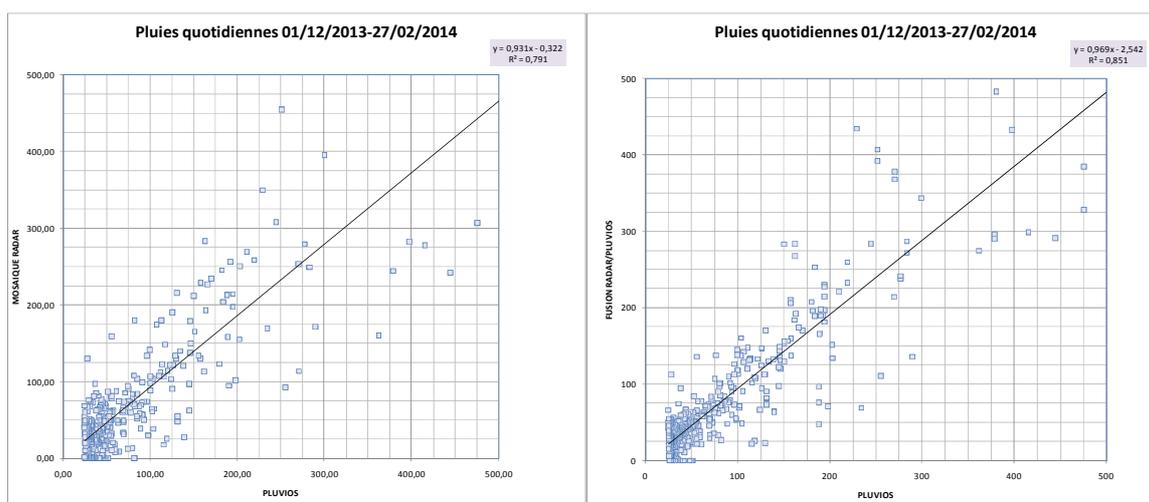


FIGURE 28: Diagramme de dispersion des cumuls quotidiens de précipitations estimés par radars et pluviomètres avant (panneau de gauche) et après (panneau de droite) application de la méthode de fusion, sur une période de 3 mois. Un tirage aléatoire permet de sélectionner, puis d'exclure de l'analyse, 20% des stations pluviométriques disponibles. Les scores sont calculés à partir des pluviomètres non utilisés afin d'évaluer objectivement les performances de la méthode.

L'algorithme permet de traiter une journée complète de lames d'eau horaires en moins d'une minute et est donc facilement opérable en routine. Une production quotidienne expérimentale a d'ailleurs été mise en place depuis avril 2014 pour évaluer la méthode dans un cadre opérationnel.

⇒ **La méthode de correction proposée pourrait potentiellement être utilisée pour l'expertise à posteriori des situations de forte pluie et s'avérer ainsi très utile dans la rédaction des rapports CATNAT.**

2.4.3 Validation des structures de vent fort

Le passage de Dumile à proximité de La Réunion en 2013 a permis d'évaluer l'apport de la configuration Arome-Pégase à 2,5 km de résolution (en adaptation dynamique depuis des analyses Aladin-Réunion) pour la prévision des vents cycloniques. La comparaison entre les sorties Arome et Aladin montre que les effets locaux sont globalement mieux représentés dans Arome à 2,5 km que dans Aladin-Réunion à 8 km (**Fig. 29**). On remarque, en particulier, l'existence de zones d'effet Venturi, visibles dans les champs Arome au centre de l'île, ainsi que des effets au large matérialisés par des accélérations ou décélérations du vent.

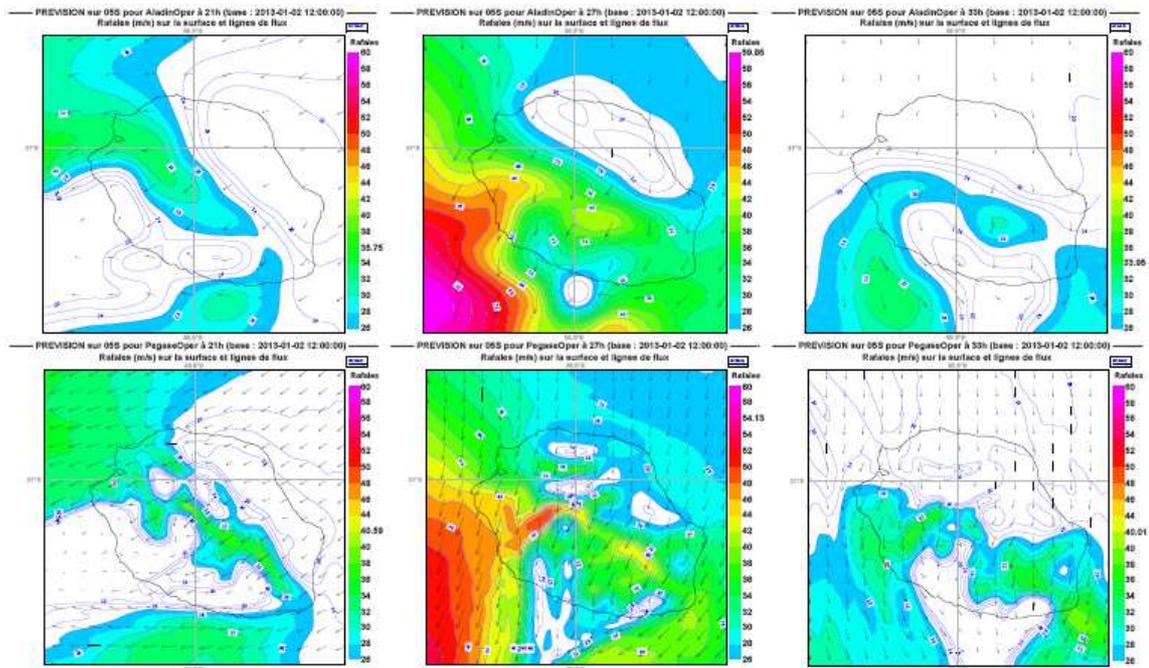


FIGURE 29 : Simulation des rafales de vent pour Aladin-Réunion (haut) et Arome-Pégase (bas) à trois échéances de prévisions (de gauche à droite) associées au passage du cyclone Dumile au plus près de La Réunion. Les deux simulations partent du même état initial, qui est une analyse Aladin-Réunion.

La configuration d'Arome pour Pegase, qui a été pérennisée en 2013 à la demande des prévisionnistes, simule maintenant en routine l'évolution de l'atmosphère autour de La Réunion deux fois par jour. D'après les prévisionnistes, l'apport du modèle est indéniable pour les précipitations locales et les vents sur La Réunion. En particulier, le cycle diurne de l'ennuagement et des précipitations semble correct et apporte une nette valeur ajoutée par rapport aux modèles opérationnels disponibles. Les études menées ont néanmoins montré qu'Arome-Pegase semble assez peu performant pour prévoir la localisation et les cumuls des précipitations associées aux systèmes convectifs advectés sur l'île. Si ce modèle propose une adaptation d'Aladin-Réunion au relief de La Réunion (distribution et intensité des vents, rafales, précipitations orographiques), il n'apporte ainsi pas de véritable scénario alternatif dans la dynamique du cyclone tropical.

- ⇒ **la finesse de la représentation du relief est essentielle pour bien représenter la distribution des rafales de vent.**
- ⇒ **L'augmentation de la résolution ne permet pas d'améliorer, à elle seule, la dynamique du cyclone tropical.**

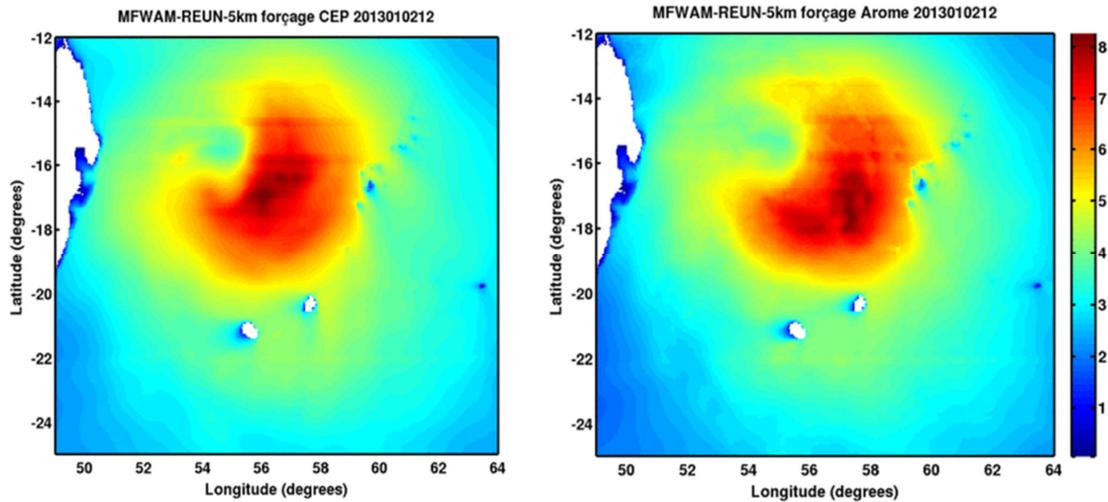


FIGURE 31: Hauteurs de vague prévues par le modèle opérationnel MF-WAM lors du passage du cyclone Dumile au Nord de La Réunion le 2 jan. 2012 à 12 TU en utilisant le modèle du CEP (panneau de gauche) ou Arome (panneau de droite) pour le forçage atmosphérique.

Ces travaux ont montré que l'utilisation des champs de vent Arome à plus haute résolution spatiale avait un impact significatif sur la structure du champ de houle cyclonique prévu. La **Figure 31** montre les champs de houle prévus par le modèle WAM lors du passage de Dumile au nord de La Réunion. Lorsque WAM est forcé par Arome on observe la présence de structures de plus petite échelle autour du mur de l'œil, ainsi qu'une extension plus importante de la zone de forte houle (> 7m) par rapport aux prévisions opérationnelles, forcées par le modèle du CEP. La zone calme (œil) est également moins compacte et le maximum de houle semble rejeté au-delà du mur de l'œil, aux alentours de 57.5°E (contre 56.5° E avec le modèle du CEP).

Ces prévisions ont été évaluées au moyen de bouées et de mesures obtenues par le satellite Jason lors de son passage au-dessus de Dumile (**Fig. 32**). On observe globalement un bon accord entre les observations (courbe rouge) et les prévisions, quel que soit le modèle atmosphérique forceur. La prévision WAM-CEP (courbe noire) semble légèrement plus proche des observations aux latitudes les plus élevées mais on note, en revanche, que la prévision WAM-AROME (courbe bleue) est plus réaliste au voisinage du cyclone.

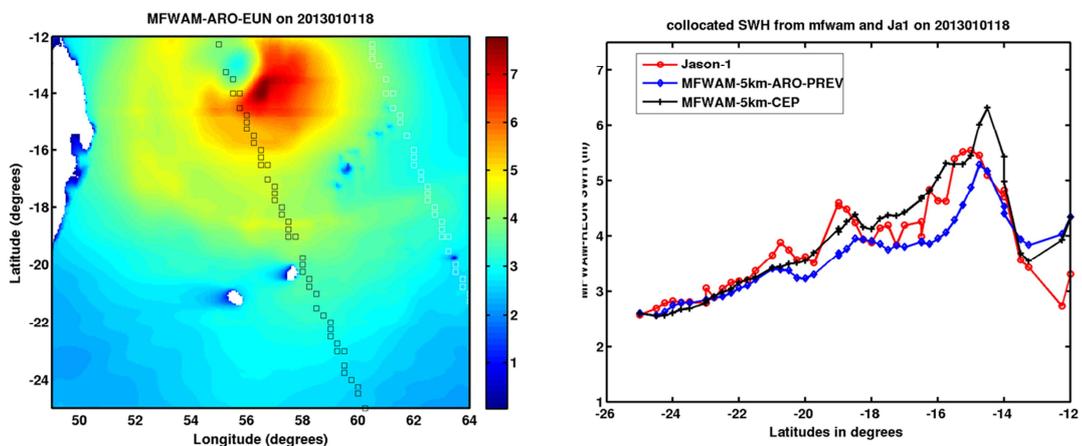


FIGURE 32 : Panneau de droite : Hauteurs de vague observées pendant Dumile par le satellite Jason (courbe rouge) et simulées le long de la fauchée du satellite en utilisant le modèle du CEP (courbe noire) ou Arome (courbe bleue) pour le forçage atmosphérique. Panneau de gauche : Champ de houle prévu par le modèle opérationnel MF-WAM forcé par Arome et position du satellite Jason le premier janvier à 18 TU.

Autres éléments de bilan

3.1 Bilan financier

Bilan des dépenses effectuées année par année :

	2011	2012	2013-2014	
Serveur informatique	6 200 €			
PC acquisition	469 €			
Frais inscription ISTP9		450 €		
Mission Métropole (M. PLU)			1 484 €	
Mission EMS (N. YU)			2 983 €	
Salaire post-doctorant (N. YU)			48 275 €	
Total projet	6 669 €	450 €	52 742 €	59 861 €

3.2 Bilan des ressources en personnel

Une vingtaine de chercheurs permanents ont été impliqués à différents degrés dans le projet PRECYP.

Trois doctorants, dirigés au LACy, ont contribué au projet :

Nom	Date	Sujet
C. IBRAHIM	Thèse soutenue en Oct 2011	Activités des ondes tropicales en relation avec la convection du bassin Océan Indien
M.-D. LEROUX	Thèse soutenue en Dec 2012	Intensification rapide des cyclones tropicaux du sud-ouest de l'Océan Indien: Dynamique interne et influences externes
C. BOVALO	Thèse soutenue en Oct 2013	Activité électrique et variations d'intensité des systèmes convectifs tropicaux dans le SO de l'Océan Indien

Six stagiaires, dirigés au LACy, ont contribué au projet :

Nom	Date	Formation	Sujet
T. Hoarau	6 mois, 2014	Master 2 Université de Montpellier	Microphysique – modélisation Més0-NH
C. Roettger	2 mois, 2014	Master 1 Université de Toulouse	Processus d'intensification des cyclones
J. Guerbette	2 mois, 2014	Doctorant 2ème année Université de Toulouse	Observations Satellite
N. Bigjee	5 mois, 2011	Master 2 Université de Toulouse	Estimation et spatialisation des précipitations à La Réunion
A. Piron	5 mois, 2011	Master 2 Université de Toulouse	Modélisation à haute résolution des changements d'intensité des cyclones tropicaux avec Arome
A. Bouchet	3 mois, 2012	INSA 4 ^{ème} année	Spatialisation et correction des lames d'eau Panthere

3.3 Valorisation du projet

9 articles ont été publiés dans des revues internationales à haut comité de lecture :

- 1) 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) Bovalo, C., C. Barthe, N. Bègue and N. Yu, 2014: Lightning activity within tropical cyclones in the South-West Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, à paraître
- 3) Rechou, A., N. 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.*
- 4) Chane Ming, F., Ibrahim, C., Barthe, C., Jolivet, S., Keckhut, P., Liou, Y.-A., and Kuleshov, Y., 2014: Observation and a numerical study of gravity waves during tropical cyclone Ivan (2008), *Atmos. Chem. Phys.*
- 5) Plu, M., 2013: A variational formulation for translation and assimilation of coherent structures, *Nonlin. Processes Geophys.*, 20, 793-801, doi:10.5194/npg-20-793-2013.
- 6) 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.
- 7) 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.

- 8) Barthe, C., M. Chong, J.-P. Pinty, C. Bovalo and J. Escobar, 2012. CELLS v1.0: updated and parallelized version of an electrical scheme to simulate multiple electrified clouds and flashes over large domains, *Geosci. Model Dev.*, 5, 167-184.
- 9) Bovalo, C., C. Barthe and N. Bègue, 2012. A lightning climatology of the South West Indian Ocean, *Natural Hazards Earth System Science*, 12, 2659–2670.

5 articles supplémentaires sont en préparation :

- 1) Plu, M. and F. Bonnardot, 2014: Fusion of data for precipitation estimation over a tropical mountainous island. En préparation pour *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*
- 2) Yu N., C. Bovalo, C. Barthe, O. Bousquet, D. Mekies and M. D. Leroux, 2014: Observation and numerical modeling of the asymmetric structure of tropical cyclone Dumile, en préparation pour *J. Adv. Model. Earth Sys.*
- 3) Bousquet O., C. Barthe, M. Plu et co-auteurs : Le projet PRECYP : Etude des cyclones dans le bassin sud-ouest de l'océan indien. En préparation pour *La Météorologie*
- 4) Bousquet O., D. Mekies, S. Bielli, M-D Leroux, D. Barbary, C. Barthe, R. Lee, G. Faure, T. Montmerle, M. Plu and P. Brousseau: A new operational convection-permitting NWP system for tropical cyclone forecasting in the SW Indian Ocean. En préparation pour *Geophys. Res Lett.*
- 5) Leroux, M.-D., M. Plu, F. Roux, 2014. On the sensitivity of TC intensification under upper-level trough forcing. En préparation pour *Mon. Wea. Rev.*

Les résultats du projet PRECYP ont été présentés dans 15 conférences internationales

- 1) Faure G., O. Bousquet, S. Bielli, D. Barbary, P. Chambon, 2014: Météo-France next generation NWP systems for tropical overseas territories. *World Weather Open Science Forum*, Montreal, Canada.
- 2) Leroux, M.-D., M. Plu, F. Roux, 2014. On the sensitivity of TC intensification under upper-level trough forcing, *31th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 31 March–4 April 2014, San Diego, California, Amer. Meteor. Soc.
- 3) Bovalo, C., and C. Barthe, Lightning activity in tropical cyclones in the South-West Indian Ocean. *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, 15-20 June 2014, Norman, OK, USA.
- 4) Bovalo, C., C. Barthe, J.-P. Pinty, and M. Chong, Potential of cloud-resolving model parameters to be used as proxies for the total flash rate. *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, 15-20 June 2014, Norman, OK, USA.
- 5) Pinty, J.-P., M. Chong, and C. Barthe, Simulation of some electrical effects on cloud microphysics: modeling and HyMeX SOP1 (2012) testbed. *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, 15-20 June 2014, Norman, OK, USA.

- 6) Davidson, N. E., C. M. Hankinson, M. Reeder, and M.-D. Leroux, 2014. Influence of Amplifying Rossby Waves on Tropical Cyclone Intensity, Structure Change and Rainfall, *31th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 31 March–4 April 2014, San Diego, California, Amer. Meteor. Soc.
- 7) Chane-Ming, F., P. Keckhut and Y. Kuleshov, 2014: Characteristics of Gravity Waves during Tropical Cyclone Events in ECMWF Analyses. *SPARC (Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate) Conference 2014*, Quennstown, NZ.
- 8) Bousquet O., D.Mekies, S. Bielli, M.-D. Leroux, D. Barbary, C. Barthe, R. Lee-Ah-Siem, T. Montmerle, G. Faure, P. Brousseau and M. Plu, 2014: A new operational convection-permitting NWP system for tropical cyclone forecasting in the SW Indian Ocean, *31th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 31 March–4 April 2014, San Diego, California, Amer. Meteor. Soc.
- 9) Yu, N., C. Barthe, and M. Plu, 2013: Sensibility of rainfall simulation to model horizontal grid spacing: impact of complex terrain and shallow convection parameterization. *13th EMS Annual Meeting and 11th European Conference on Applications of Meteorology*, 9-13 Sept. 2013, Reading, United Kingdom.
- 10) Bovalo, C., and C. Barthe, 2012. Lightning activity in the South West Indian Ocean, *2012 AGU Fall Meeting*, 3-7 décembre 2012, San Francisco, Californie.
- 11) Réchou, A., and B. Campistron, 2012. One-year Analysis of rain and rain erosivity in a Tropical volcanic island from UHF wind profiler measurements, *9th International Symposium on Tropospheric Profiling*, 3-7 septembre 2012, L'Aquila, Italie.
- 12) Leroux, M.-D., 2012. Interaction between a mid-latitude upper-level trough and tropical cyclone Dora (2007) over the southwestern Indian ocean. *30th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 15-20 avril 2012, Ponte Vedra Beach, Floride.
- 13) Bousquet, O., P. Tabary and M. Plu, 2012. Properties of mesoscale and orographic convective systems in La Réunion Island from newly installed operational S-band Doppler polarimetric radars, *10th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 23-27 avril 2012, Nouméa, Nouvelle Calédonie, France.
- 14) Campistron, B. and A. Réchou, 2012. Rain Kinetic Energy Measurement with a UHF Wind Profiler: Application to Soil Erosion Survey of a Volcanic Tropical Island, *13th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radars (MST13)*, 19-23 mars 2012, Kuhlungsborn, Germany.
- 15) Plu, M., D. Barbary, C. Barthe, N. Bigjee, F. Bonnardot, C. Bovalo, F. Chane-Ming, C. Ibrahim, M.-D. Leroux, D. Mékies, H. Quetelard, A. Réchou, F. Roux, 2012. Research activities at La Réunion regarding the intensification of tropical cyclones and their impacts, *10th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 23-27 avril 2012, Nouméa, Nouvelle Calédonie, France.
- 16) Bovalo, C., C. Barthe, J.-P. Pinty, M. Chong, W. Deierling, and M. C. Barth, Can some dynamical and microphysical parameters be used as proxies for the total flash rate ? A modeling study. *14th International Conference on Atmospheric Electricity*, 8-12 août 2011, Rio de Janeiro, Brésil.

Thèses et rapports depuis le début du projet

- 1) Hoarau T., 2014: Evaluation d'un schéma microphysique à 2 moments pour la représentation de la convection et des précipitations à La Réunion. *Master 2 Océan Atmosphère Surfaces Continentales*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- 2) Roettger C., 2014 : Climatologie de l'intensification rapide des cyclones du sud-ouest de l'océan Indien, *Master 1 Atmosphère Océan Continent*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- 3) Bovalo C., 2013: Activité électrique et changement d'intensité des systèmes convectifs tropicaux dans le sud-ouest de l'Océan Indien : Observation et modélisation. *Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion*, 175 pp.
- 4) Leroux, M.-D., 2012 : Intensification rapide des cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan Indien : dynamique interne et influences externes. *Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion*, France, 262 pp. [Disponible sur <http://tel.archivesouvertes.fr/tel-00787099>]
- 5) Bouchet, A., 2012. Spatialisation et correction des lames d'eau Panthere, *Stage de 4e année de l'INSA Rennes*, France.
- 6) Ibrahim, C., 2011. Activité des ondes tropicales en relation avec la convection du bassin Océan Indien, *Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion*.
- 7) Nadya Bigjee, 2011. Estimation et spatialisation des précipitations sur l'île de la Réunion à partir des observations radar et du modèle Meso-NH, *Master 2 Océan Atmosphère Surfaces Continentales*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- 8) Piron Anne, 2011. Modélisation à haute résolution des changements d'intensité des cyclones tropicaux avec AROME, *Master 2 Océan Atmosphère Surfaces Continentales*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Développement des collaborations

Les travaux sur les impacts précipitants à La Réunion se déclinent en collaboration avec le Laboratoire Géosciences de La Réunion, qui développe des travaux en hydrologie. Nous pilotons, au sein de l'OSU-Réunion, le projet ERORUN qui vise à développer des outils de suivi hydrométéorologique dans un bassin-versant de la Rivière des Pluies, à La Réunion. Les travaux initiés dans le cadre du projet PRECYP seront poursuivis dans le cadre de nouveaux projets collaboratifs de grande ampleur qui participeront pleinement au développement de la recherche dans ce bassin versant unique dans tout l'hémisphère sud.

Les travaux de recherche sur les précipitations contribueront au développement des outils opérationnels de la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de La Réunion, récemment mise en place par Météo-France et la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL).

Diffusion des connaissances

La page web du projet est en ligne à l'adresse :

<http://lacy.univ-reunion.fr/activites/programmes-de-recherche/precyp-maif/>

Conclusion

Qu'il s'agisse de l'étude des mécanismes à l'origine des changements d'intensité des cyclones tropicaux, de l'exploitation de nouveaux systèmes d'observation à La Réunion, ou de la préparation et de l'évaluation des modèles numériques de recherche et de prévision cyclonique, le bilan général du projet PRECYP s'avère très positif :

- i) La compréhension des mécanismes d'intensification des cyclones a fortement progressé et des liens probants entre intensification des cyclones et activité électrique ont été mis en évidence.
- ii) Les systèmes d'observations locaux ont été renforcés, permettant d'améliorer significativement les estimations de précipitation sur l'île et d'établir, pour la première fois, une climatologie détaillée des pluies à La Réunion.
- iii) Un démonstrateur du futur modèle de prévision opérationnel à haute résolution, Arome Indien, a été développé, et de nouvelles paramétrisations, mieux adaptées aux conditions tropicales, ont été implémentées dans le modèle de recherche français Méso-NH.

Avec 9 articles publiés dans des revues scientifiques internationales à haut comité de lecture, plus d'une quinzaine de communications dans des conférences internationales et cinq articles soumis ou en préparation, le bilan scientifique du projet est également très satisfaisant.

Enfin, et ce sont peut être ici les points les plus importants, l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de PRECYP ont permis :

- i) De formuler des recommandations qui influenceront fortement le futur de la prévision numérique opérationnelle dans l'Océan Indien et en Outremer.
- ii) De mettre un important coup de projecteur à l'international sur l'un des bassins cycloniques les moins étudiés au monde.