



INTERREG-V OCEAN INDIEN 2014-2020

Projet de Recherche

RENOVRISK-CYCLONES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Axe-1 OT-1 OS-01a - Action I-3 TF



Livrable 23

Rapport final

Olivier Bousquet - UMR 8105

Juin 2021

Ce livrable est associé à la sous-action 4.1 intitulée :

Gestion et pilotage du projet

Il consiste en un rapport décrivant le bilan général du projet

1. Objectifs et structuration du projet

1.1 Objectifs

Le projet de recherche ReNovRisk-C3 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 futur. 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.

ReNovRisk-C3 propose ainsi de développer une dynamique de coopération régionale et internationale basée sur l'établissement de collaborations étroites entre les territoires partenaires de la zone SOOI (Madagascar, Seychelles, Maurice, Mayotte) et les équipes de l'Université de La Réunion et de Météo-France (DIROI).

Ce projet collaboratif vise également à développer une recherche d'excellence dans le domaine de la modélisation et la prévision des cyclones tropicaux en renforçant, et en structurant, la coopération territoriale entre les pays du bassin SOOI soumis à l'aléa cyclonique. Il repose notamment sur un large partage des données, des observations et des expériences.

1.2 Structuration du projet

RenovRisk-C3 s'articule autour de quatre actions complémentaires s'inscrivant dans une dynamique de coopération internationale visant à structurer la communauté scientifique régionale. Les principaux objectifs sont :

i/ le renforcement des moyens d'observation de l'atmosphère et de l'océan dans le bassin SOOI à travers le déploiement de nouveaux instruments de mesure pérennes ;

ii/ le développement d'outils de prévision numérique spécifiquement dédiés aux cyclones du bassin sud-ouest de l'océan Indien et de leurs impacts ;

iii/ l'évaluation des conséquences du changement climatique sur l'activité cyclonique à l'échelle du bassin sud-ouest de l'océan Indien (modifications de trajectoires, d'intensité et de structure des météores à différents horizons temporels, zones de cyclogenèse, ressource en eau), et des principales îles de la région;

iv/ la mise en place d'actions de formation et de communication visant à favoriser la mise en place de stratégies d'adaptation et de résilience à l'aléa cyclonique dans un contexte de changement climatique.

2. Modifications notables

Les modifications s'étant avérées nécessaires afin de mener à bien les objectifs du projet sont décrites ci-après. **Toutes ces modifications ont été réalisées après accord du service instructeur.**

2.1 Avenants

Le projet a fait l'objet d'un avenant en juin 2018 suite à la modification de la prestation de service « imagerie satellitaire » prévue dans le cadre de l'action 1.3. De nouvelles actions se substituant à l'action initiale ont été engagées afin de renforcer les mesures océaniques et atmosphériques de l'action 1 du projet (utilisation de drones sous-marins pour qualifier et échantillonner la couche de mélange océanique en conditions cycloniques lors de la saison 2018-2019, utilisation d'un drone aérien pour échantillonner l'environnement atmosphérique des cyclones lors de la saison 2018-2019, utilisation de tortues marines pour échantillonner les propriétés thermiques de l'océan...).

Le projet a également fait l'objet d'un second avenant visant à prolonger sa durée en raison de la pandémie de Covid19.

2.2 Budget

Le projet ANR CARAVELE a permis d'accéder à des mesures SAR supplémentaires à moindre coût, ce qui a permis de réaffecter une partie du budget initialement prévu dans le cadre de la prestation de service « imagerie satellitaire » (sous-action 1.3) pour de nouvelles activités :

- Déploiement de deux drones sous-marins pendant la saison cyclonique 2018-2019 (mise en œuvre CNRS)
- Déploiement du drone aérien Boréal pendant la saison cyclonique 2018-2019 (mise en œuvre Météo-France et Boréal SAS)
- Démarrage d'une nouvelle activité visant à évaluer la capacité des tortues marines à échantillonner les propriétés de l'océan, notamment au voisinage des cyclones tropicaux (mise en œuvre Kelonia).

Ces nouvelles activités ont notamment permis de compléter les mesures expérimentales prévues pendant la saison cyclonique 2018-2018 dans le cadre du programme RNR-CP.

Des ajustements ont par ailleurs également été réalisés tout le long du projet pour réaffecter certains reliquats au sein de chaque action.

2.3 Ressources humaines

Si un étudiant du IOGA a bien effectué un stage de fin d'études (Master 2) de 3 mois au sein du LGSR (Action 1.2), il a cependant été impossible de planifier les autres stages pour des raisons de calendrier, puis de pandémie.

2.4 Formations

La formation en climatologie destinée aux chercheurs du SMA (Action 2), initialement prévue à La Réunion, a été organisée à Maurice dans le cadre de l'atelier "SWIOCOF 2018" organisé par la DIROI, l'AFD et la COI. La formation a été effectuée par les chercheurs de la division d'études climatologiques de la DIROI, comme prévu initialement.

Cette modification a permis de donner plus de visibilité au projet *RNR-C3* et de renforcer la collaboration régionale (le SWIOCOF accueillant des stagiaires de l'ensemble des pays de la COI). 2 autres agents du SMA ont également participé au SWIOCOF 2019, à Maurice en sept/oct 2019. Une formation en modélisation / prévision numérique, à laquelle ont participé deux prévisionnistes du SMA, a également été organisée par le CMRS cyclones.

2.5 Livrables

Malgré tous les efforts mis en œuvre pour pallier les conséquences de la pandémie de COVID19 sur le bon déroulement du projet, deux des 23 livrables prévus n'ont pu être rendus :

L18 : Rapport de synthèse sur l'analyse statistique de la modification du comportement des cyclones (trajectoire, intensité, structure) et des anomalies de précipitations à l'échelle locale pour différents scénarii du GIEC dans la région Seychelles (Outer Islands).

⇒ Si la première partie de ce travail, consistant à simuler le cyclone tropical très intense Fantala, ayant affecté les îles extérieures des Seychelles (Outer Islands) a été réalisée (voir livrable 6), les conséquences de la pandémie de COVID sur les conditions de travail ne nous ont pas permis de finaliser ce travail. Plutôt que de réaliser cette étude coûte que coûte, la région en question n'ayant été affectée que par un seul cyclone au cours de 7 dernières années, la priorité a été mise sur la valorisation des travaux similaires portant sur l'île de La Réunion à travers, notamment, la rédaction d'une publication scientifique (voir livrable 12).

L20 : Organisation d'un atelier international à La Réunion sur les cyclones dans le bassin Indien sud-ouest

⇒ Impossibilité d'organiser cet atelier en raison de la fermeture des frontières et des conditions d'accès drastiques à l'île de La Réunion jusqu'à la mi-2021.

3. Bilan global

Malgré l'impact de la pandémie de SarsCov2 sur le déroulement du projet à partir de février 2020, les résultats obtenus dans *ReNovRisk C3* ont généré des avancées significatives dans le domaine de l'observation et de la prévision des cyclones tropicaux dans le bassin SOOI et ont, dans l'ensemble, largement permis d'atteindre les objectifs du projet.

- Le renforcement du réseau de stations GNSS dans le bassin s'est avéré être un atout important dans l'optique d'étudier les propriétés la distribution spatio-temporelle du champ de vapeur d'eau dans la région. L'exploitation des données a notamment fait l'objet de nombreuses publications scientifiques.
- Les campagnes expérimentales réalisées lors de l'été austral 2019 à partir de La Réunion ont permis d'échantillonner l'environnement dans lequel se sont développés plusieurs cyclones majeurs de la saison 2018-2019 et conduits à l'obtention d'un jeu de données jusqu'alors unique dans cette région.
- Afin de favoriser la montée en compétence des scientifiques de la région SOOI dans le domaine de la prévision des cyclones, le projet a organisé une formation en prévision cyclonique au CMRS cyclones de La Réunion pour deux agents du SMA et a permis la participation de quatre autres agents du SMA aux ateliers sur la prévision saisonnière (SWIOCOF) organisés en 2018 et 2019 par la COI, l'AFD et

la DIROI à Maurice.

- ReNovRisk-C3 a permis de recruter de 5 jeunes chercheurs IGR, dont une jeune chercheuse malgache, et d'accueillir un stagiaire de master originaire de Madagascar (IOGA) - notons que les IGR recrutés dans le cadre du projet ont par la suite été embauchés immédiatement dans des organismes de recherche internationaux (USA et Japon) pour deux d'entre eux, ainsi qu'à Météo-France, au LGSR (UR) et à Mercator-Océan les autres. L'un des CDD recrutés dans le cadre de RNR-C3 a ensuite réussi le concours d'entrée au CNRS.
- Si le projet est aujourd'hui terminé, l'exploitation des observations et des outils développés dans le cadre de *RNR-C3* se poursuivra pendant de nombreuses années par les chercheurs français et étrangers spécialisés dans l'étude des cyclones tropicaux. Les liens générés par le projet ont également permis de renforcer certains partenariats régionaux à travers de nouveaux projets INTERREG (cf. ESPOIRS et STORM-IO). Le projet a également donné lieu à treize publications scientifiques, dont certaines ont été publiées dans une édition spéciale du journal *Atmosphère* sur les cyclones tropicaux de l'océan indien (éditée par le porteur de projet à la demande du journal), ainsi qu'à une demi-douzaine de présentations lors de conférences internationales.
- L'ensemble des données collectées dans le cadre de ce projet (ainsi que du projet CP) sont stockées sur un serveur pérenne de l'université de La Réunion à l'adresse suivante : <ftp://renovrisk-gnss@tramontane.univ-reunion.fr:21>

4. Bilan détaillé par actions et sous-actions

4.1 Action 1 : Renforcement des observations à terre et en mer

4.1.1 Sous-action 1.1 - Renforcement des observations d'humidité atmosphérique

Objectifs :

Augmenter le nombre de sites observant l'humidité atmosphérique et restituant l'information en temps réel dans la région via le déploiement de nouveaux récepteurs GNSS dans le bassin SOOI.

Résultats :

Six stations ont été installées dans le cadre de *RNR-C3* (*figure 1*) :

1/ ALDABRA (Seychelles), en novembre 2017 – Base vie de la fondation Aldabra (SIF) – Transmission via le réseau Internet Satellite de la SIF

2/ DIEGO SUAREZ (Madagascar), en juillet 2018 – Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana (IST-D) – Transmission via le réseau Internet câblé de l'IST-D

3/ FORT-DAUPHIN (Madagascar), en septembre 2018 - Toit de l'hôtel Kaleta –

Transmission via le réseau cellulaire TELMA (4G).

4/ Sainte-Marie (Madagascar), en janvier 2019 – Toit de l'hôtel Soanambo - Transmission via le réseau Internet câblé de l'hôtel

5/ Nosy Be (Madagascar), en aout 2019 – Centre National de Recherche Océanographiques (CNRO) - Transmission via le réseau cellulaire TELMA (4G).

6/ Tamatave (Madagascar), en janvier 2020 - Aéroport international de Toamasina - Transmission via le réseau cellulaire TELMA (4G).

Notons que trois autres stations ont également été installées sur les îles Éparses dans le cadre du programme TAAF IOGA4MET-EI.

Les 6 stations installées dans le cadre de *RNR-C3* ont été configurées pour transmettre leurs données au pas de temps horaire par Internet filaire ou 4G, selon les sites. Les données brutes ont été archivées localement et transmises à l'IGN, qui en assurait le traitement. Les données traitées par l'IGN ont ensuite été archivées sur le serveur de données du projet jusqu'en mars 2021, ainsi que sur la base de données météorologiques de Météo-France afin de faciliter leur assimilation dans les modèles météorologiques. Les données sont désormais stockées sur un serveur pérenne de l'OSU-R.

Les données collectées ont été exploitées dans 3 articles scientifiques publiés en 2020 (Bousquet et al. 2020, Lees et al. 2020) et 2021 (Bousquet et al. 2021), et également mises à disposition de l'IPGP (Nosy Be) dans le cadre du suivi de la crise sismo-volcanique de Mayotte.



Figure 1 : Photographies des 5 stations GNSS installées dans le cadre du projet RNR-C3. De gauche à droite / bas en haut : Aldabra (SIF), Diego Suarez (IST-D), Sainte-Marie (Soanembo), Fort-Dauphin (Kaleta), Nosy Be (CNRO) et Tamatave (aéroport).

Problèmes rencontrés :

- ⇒ Cette sous-action a initialement pris du retard du fait d'une épidémie de peste à Madagascar au cours du deuxième semestre 2017, elle-même suivie d'une longue période de troubles sociaux. Ces événements imprévus ont eu pour conséquence de limiter l'accès à l'île de juin 2017 à Aout 2018.
- ⇒ La station de Nosy Be, initialement installée dans les locaux du Centre National de Recherche Océanographiques (CNRO) courant 2019, a dû être déplacée suite à la fermeture inopinée du centre quelques mois plus tard.
- ⇒ La pandémie de Covid 19 nous a empêché de nous rendre sur les lieux d'installation à partir de février 2020. Les frontières malgaches ont été ainsi fermées jusqu'en décembre 2020 et les moyens d'accès à Madagascar et de déplacement à l'intérieur du pays sont restés très limités jusqu'à la fin de l'année 2021. Ces événements ont eu

des conséquences sur nos capacités et acquérir et à transmettre les données sur l'ensemble des sites expérimentaux malgaches à partir de février 2020. Les abonnements internet locaux n'ont pu être renouvelés et il n'a pas été possible de se rendre sur place pour les réactiver.

- ⇒ Plusieurs missions de maintenance ont été nécessaires afin de mettre à jour les logiciels des récepteurs GNSS, mais aussi de réparer des matériels tombés en panne ou endommagés, ce qui a parfois conduit à de longues périodes d'inactivité. Les dysfonctionnements ont cependant été résolus à distance lorsque cela était possible (exemple de la station d'Aldabra).

Livrables

L5 : Rapport ou article scientifique sur le déploiement de 6 nouvelles stations GPS à Madagascar et Aldabra - **Rendu**

4.1.2 Sous-action 1.2 - Observation terrestre et marine de la houle

Objectifs :

Préciser la signature de la houle et les risques de submersion associés sur les territoires ciblés en combinant différentes observations quantitatives locales de la houle océanique australe et cyclonique. Les mesures obtenues serviront également à valider les simulations numériques réalisées dans le cadre du projet.

Résultats :

- **Mesures marines de la houle**

Une radiale côtière et littorale a été équipée afin de mesurer la houle incidente à la côte le long de sa propagation, depuis le large vers la côte. Cette radiale se situe sur la côte ouest de La Réunion, au niveau du récif frangeant de La Saline Les Bains au lieu-dit de Trou d'Eau (figure 2).

Deux déploiements ont été réalisés, le premier en fin d'hiver austral 2018 et le second à l'été austral 2019 parallèlement à la réalisation de la campagne expérimentale du programme *RNR-CP* (Fig. 2). L'analyse de ces observations a été décrite dans un article scientifique publié en 2021 (Bousquet et al. 2021).

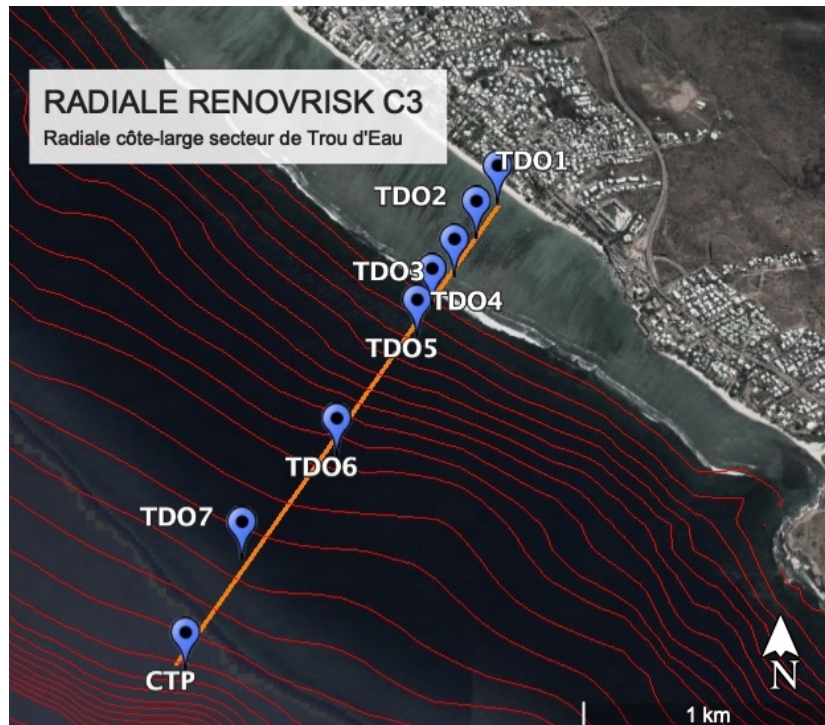


Figure 2 : Radiale de Trou d'Eau équipée dans le cadre du programme RNR-C3 pour étudier les processus de propagation des vagues côte-large et au travers du récif.

- **Mesures terrestres de la houle**

Les mesures terrestres de la houle consistant à analyser le bruit micro-sismique enregistré par des sismomètres, contiennent des informations sur la houle du large et incidente à la côte. Mme Elisa RINDRAHARISANOVA, qui a été recrutée dès mai 2018 pour travailler sur l'exploitation de ces mesures terrestres et océaniques, a mis en place des fonctions de transfert permettant de passer de la houle déduite des enregistrements micro-sismique à la houle observée en mer. L'analyse de ces données a été incluse dans trois publications scientifiques (Rindraharisanoa et al. 2021, 2012, Bousquet et al. 2021).

- **Mesures en mer**

Une demande de soutien à la Division Technique de l'INSU CNRS, parc des Gliders à la Seyne-Sur-Mer (France métropolitaine), a été effectuée pour le déploiement de 2 drones sous-marins entre La Réunion et Tromelin. L'objectif de ce déploiement était d'étudier la colonne d'eau en condition pré-cyclonique, pendant ou après un cyclone tropical en mesurant la température, la salinité, l'oxygène dissout la chlorophylle-a et la turbidité. Les enregistrements, réalisés entre mi-janvier et mi-mars 2019, ont été réalisés en continu entre 0 et 1000 mètres de profondeur ou 0 et 300m de profondeur, le long de la trajectoire du drone. Les deux systèmes ont notamment intercepté le cyclone Gelena au NE de La Réunion (Fig. 3).

Les données issues des Gliders ont été analysés et incluses dans l'article de synthèse publié en 2021 (Bousquet et al. 2021).

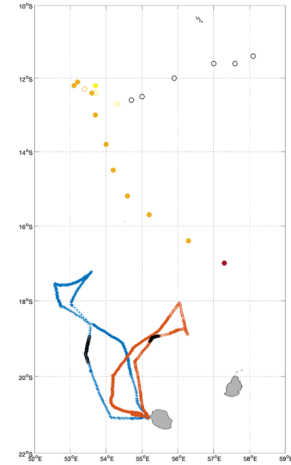


Figure 3 : L'un des deux gliders du projet lors de sa mise à l'eau à La Réunion. Trajectoire et position des 2 gliders / cyclone Gelena

A la suite du premier avenant, une nouvelle activité visant à évaluer la capacité des tortues marines à échantillonner l'environnement océanique au voisinage des cyclones tropicaux a également été mise en œuvre en collaboration avec Kelonia. Une vingtaine d'animaux ont été équipés de balises Argos environnementales, permettant d'étudier la variabilité saisonnière de l'océan Indien tropical et d'échantillonner l'environnement des cyclones Kenneth en 2019 et Herold en 2020.

Les résultats très encourageants obtenus lors de ces premiers tests ont conduit au démarrage d'un nouveau projet INTERREG-V OI dédié, STORM-IO, qui a démarré en juin 2021. Les données collectées pendant RNR-C3 ont fait l'objet de deux publications en 2020 (Bousquet et al. 2020) et 2021 (Bousquet et al. 2021).

Problèmes rencontrés :

RAS

Livrables:

L8 : Séries temporelles et climatologie des mesures physiques de houle (capteurs de pression, de température, courantomètre, stations sismologiques), mises en ligne sur un serveur de l'Université et rapport (article scientifique) décrivant les données acquises - **Rendu**

4.1.3 Sous-action 1.3 - Observation satellitaire de la houle et du vent en conditions cycloniques

Objectifs :

Accéder aux observations des radars spatiaux déployés à bord des missions RADARSAT-2 et Sentinel-1A en temps quasi réel.

Résultats :

Près de 150 acquisitions ont été réalisées dans une vingtaine de cyclones (Fig. 4).

Toutes les données collectées sont accessibles via la plateforme « online » CYCLOBS administrée par IFREMER (<http://cyclobs.ifremer.fr>)

Les activités réalisées pendant RNR-C3 ont contribué fortement à la mise en œuvre du programme d'acquisition pérenne CYMMS, géré par IFREMER et l'ESA, qui a été étendu à tous les bassins cycloniques de la planète.

Les données collectées ont été exploitées dans 3 articles scientifiques publiés en 2021 (Bousquet et al. 2021, Barthe et al. 2021, Duong et al. 2021).

Problèmes rencontrés :

La modification du projet (cf. avenant n° 1) a eu des répercussions sur l'avancement de cette action, même si cinq cyclones avaient néanmoins pu être échantillonnés lors de la saison cyclonique 2017–2018 par les satellites SENTINEL 1A et RADARSAT2. Les saisons suivantes se sont, en revanche, parfaitement déroulées, puisque près de 150 acquisitions ont été réalisées au sein de 20 systèmes différents.

Les algorithmes de restitution de la houle n'ont pu être développés par nos partenaires et font l'objet de nombreuses études au sein de la communauté internationale. Une fois validés, ces derniers pourront néanmoins être appliqués aux données collectées pendant C3.

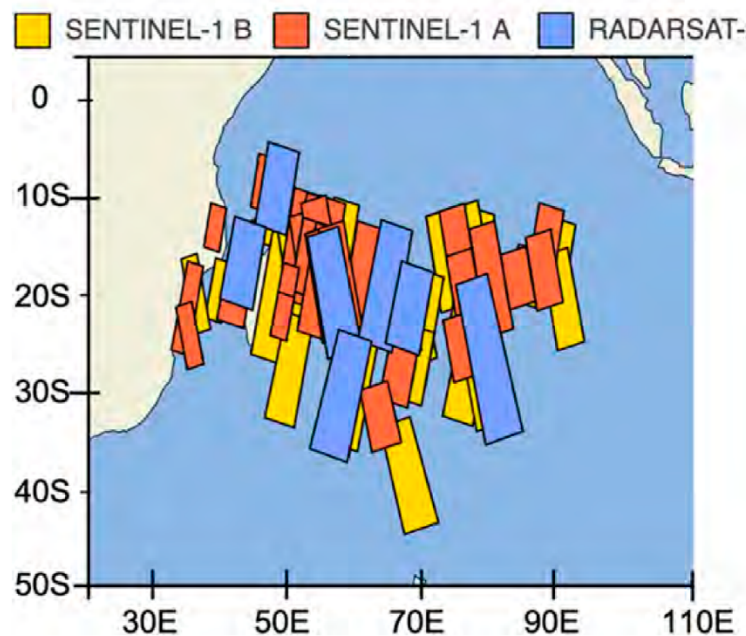


Figure 4 : Répartition des acquisitions réalisées entre 2018 et 2021

Livrables :

L1 : Déploiement d'une plateforme de diffusion des données SAR accessible à l'ensemble des partenaires du projet et rapport sur la production automatisée de cartes de vent et de houle à haute résolution spatiale - **Rendu**

L14 : Catalogue des images et données SAR collectées dans le cadre du projet ReNovRisk-C3 - **Rendu**

4.2 Action 2 : Modélisation intégrée des cyclones tropicaux du bassin sud-ouest de l'océan Indien

4.2.1 Sous-action 2.1 - Développement d'un système d'analyse météorologique à haute résolution spatiale

Objectifs :

Réaliser les développements nécessaires à l'obtention d'analyses atmosphériques à haute résolution spatio-temporelle à partir desquelles pourra être initialisé le modèle de cyclone Océan-Vagues-Atmosphère utilisé dans le projet.

Résultats :

- Ce système a été implémenté dans le modèle AROME océan Indien dès 2020 et est toujours pleinement fonctionnel.
- Ce développement a été utilisé pour trois publications publiées en 2020 (Bousquet et al. 2020) et 2021 (Barthe et al. 2021, Duong et al. 2021).

Problèmes rencontrés :

RAS

Livrables :

L2 : Rapport de synthèse sur l'apport de nouvelles observations sur la prévision numérique des cyclones - **Rendu**

4.2.2 Sous-action 2.2 - Paramétrisations physiques

Objectifs :

Adapter les paramétrisations physiques existantes au contexte cyclonique tout en formalisant le couplage océan-atmosphère dans le modèle numérique de cyclones OVA.

Résultats :

- Un système de modèle couplé océan-vagues-atmosphère (OVA) a été développé et utilisé avec succès pour modéliser différents cyclones tropicaux dans le bassin Indien sud-ouest (Bejisa, Berguitta, Enawo, Fantala...).
- Un travail spécifique a été réalisé sur les flux à l'interface océan-atmosphère : étude bibliographique sur les paramétrisations de ces flux, en particulier par vent fort, et implémentation de plusieurs paramétrisations dans le modèle Meso-NH/Surfex, évaluées sur le cas du cyclone tropical Fantala en 2016 (Fig. 5).
- Différentes formes de cristaux de glace ont été intégrées dans le schéma microphysique LIMA, lui-même intégré au sein du modèle Meso-NH (composante atmosphérique du modèle OVA), pour mieux représenter la structure nuageuse des cyclones tropicaux et, en particulier, leur couverture cirriforme. L'ajout de différentes formes de cristaux de glace a été réalisé au cours de la 1^{ère} année, mais des améliorations importantes (ajout de nouvelles formes, changement de forme des cristaux) ont été faites au cours de la 2^{ème} année du programme suite à une première évaluation du schéma via des observations (figure 6).
- Deux publications en lien direct avec ces activités ont été publiés en 2021 (Barthe et al. 2021, Bielli et al. 2021).

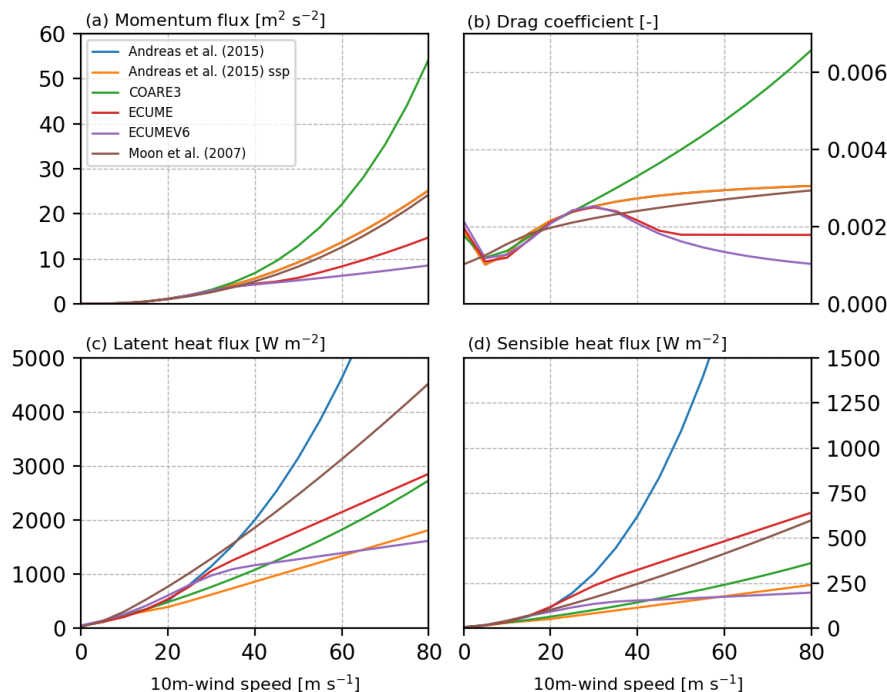


Figure 5 : (a) Flux de moment, (b) coefficient de traînée, (c) flux de chaleur latente et (d) flux de chaleur sensible pour différentes forces de vent, et pour différentes paramétrisations des flux océan-atmosphère.

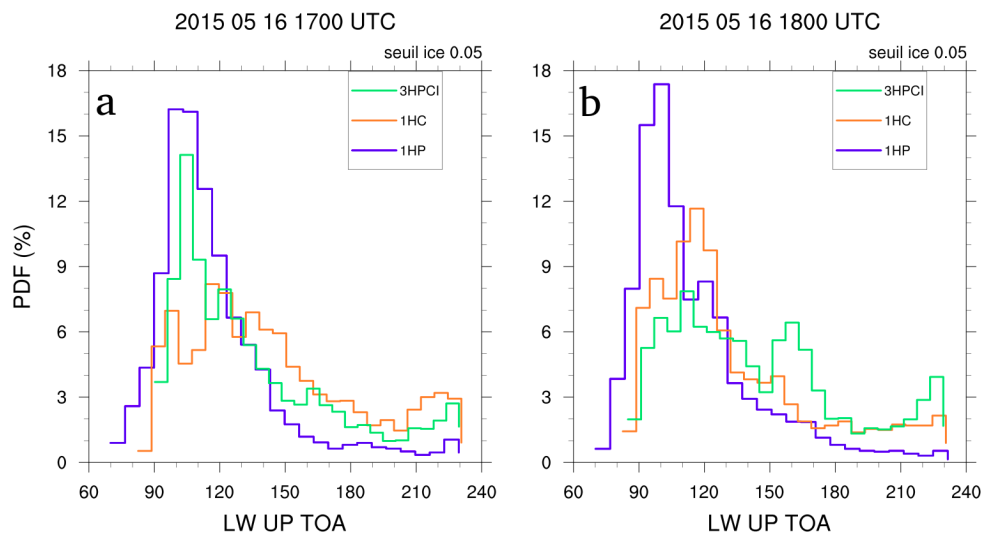


Figure 6 : Fréquence d'occurrence des flux sortants infrarouge (LW) au sommet de l'atmosphère à 17 UTC (gauche) et à 18 UTC (droite) pour une simulation avec une seule forme de cristaux assimilés à des plaquettes (1HP, en bleu), pour une simulation avec une seule forme de cristaux assimilés à des colonnes (1HC, en orange), et pour une simulation avec trois formes de cristaux (plaquettes, colonnes et irréguliers) (3HPCI, en vert). 25 bins répartis entre 70 et 230 $W m^{-2}$ sont utilisés.

Problèmes rencontrés :

RAS

Livrables :

L2 : Rapport de synthèse sur l'apport de nouvelles observations sur la prévision numérique des cyclones - **Rendu**

L15 : Rapport de synthèse sur la représentation des interactions aérosols – nuages– rayonnement - **Rendu**

4.2.3 Sous-action 2.2 - Simulations numériques à haute-résolution

Objectif :

Évaluer les performances du modèle OVA via des simulations couplées de cas de cyclones tropicaux ayant affecté La Réunion, Maurice, Les Seychelles et Madagascar

Résultats :

Plusieurs simulations numériques couplées à haute résolution spatiale (2 km et 500 m) ont été réalisées. Nous nous sommes focalisés plus particulièrement sur le cyclone tropical Bejisa pour l'impact en termes de pluie, vent et houle sur La Réunion, sur les cyclones

Bejisa et Berguitta, pour analyser le champ de houle autour de l'île Maurice (Fig. 7), et sur le cyclone Fantala pour évaluer le vent, la pluie et la houle sur l'atoll des Farquhar.

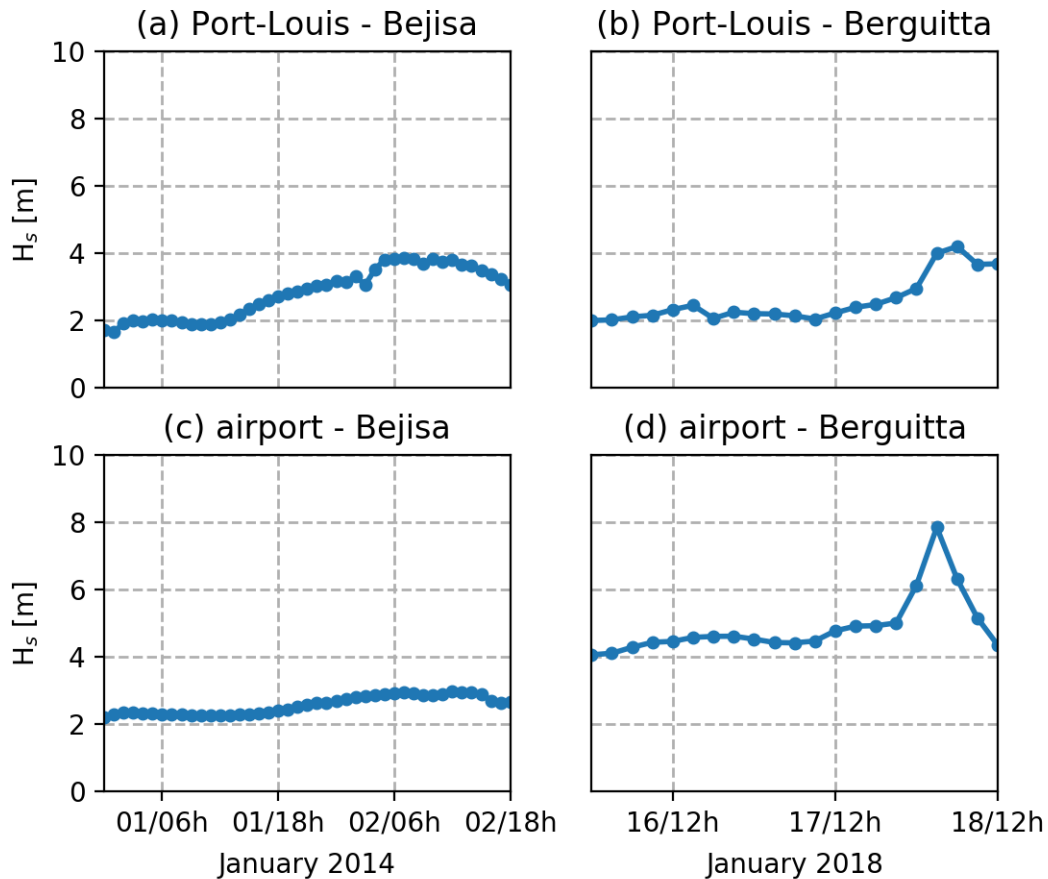


Figure 7 : évolution de la hauteur significative des vagues (H_s) pour un site océanique proche de Port Louis (haut) et pour un site océanique proche de l'aéroport de Maurice (bas), dans le cas des cyclones tropicaux Bejisa (gauche) et Berguitta (droite). On note l'impact différencié en fonction de la trajectoire du cyclone, de la distance au cyclone, et du site géographique.

Problèmes rencontrés :

RAS

Livrables :

L3 : Jeux de données de vents, de précipitation et de houle et rapport de synthèse sur les simulations à haute résolution pour un cas de cyclone modélisé à haute résolution sur l'île de La Réunion - **Rendu**

L6 : Jeux de données de vents, de précipitation et de houle et rapport de synthèse sur les simulations à haute résolution pour un cas de cyclone modélisé à haute résolution sur les Seychelles (outer islands) - **Rendu**

L10 : Jeux de données de houle et rapport de synthèse pour un cas de cyclone modélisé à haute résolution sur Maurice - **Rendu**

L16 : Rapport sur l'analyse des modèles de houle, depuis l'échelle du bassin jusqu'à l'échelle locale avec les observations directes de terrain (sismologiques, pression de fond de mer, bouées) - **Rendu**

4.3 Action 3 : Évolution de l'activité cyclonique

4.3.1 Sous-action 3.1 - Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle régionale

Objectifs :

Évaluer l'impact du changement climatique sur la fréquence, la distribution et, dans une moindre mesure, l'intensité des cyclones tropicaux dans le bassin SOOI pour les trois principaux scénarii d'évolution du GIEC.

Résultats :

Une simulation climatique à haute résolution spatiale (10-15 km sur le bassin SOOI) a été réalisée par Météo-France spécifiquement pour ce projet. Les données ont été exploitées en parallèle de simulations françaises du programme CMIP6 (GIEC) afin d'évaluer l'impact potentiel du réchauffement climatique sur l'activité cyclonique globale dans le bassin SOOI. Un article scientifique portant sur l'analyse de ces simulations a été publié en 2020 (Cattiaux et al. 2020).

Une analyse plus approfondie a ensuite été réalisée afin d'évaluer les changements d'intensité associés dans le bassin. Les résultats de cette deuxième étude ont également été publiés en 2021 (Barthe et al. 2021).

Dans l'ensemble, ces simulations indiquent :

- Une diminution de la durée de la saison cyclonique d'environ 1 mois à l'horizon 2070 ;
- Une très légère diminution de la fréquence des systèmes dépressionnaires faibles (tempêtes), conjuguée à une légère augmentation de leur intensité ;
- Une augmentation significative de l'intensité des systèmes dépressionnaires modérés et intenses (cyclone et cyclone tropical intense), les cyclones modérés (CT) étant moins fréquents, mais les systèmes intenses plus fréquents (CTI).
- Peu d'évolution concernant l'intensité et la fréquence des systèmes les plus intenses (CTTI).

Globalement, ces travaux suggèrent une augmentation du risque cyclonique à La Réunion avec une saison cyclonique plus courte (donc plus de systèmes concentrés sur une période moins longue) et une augmentation de l'intensité des systèmes modérés à forts.

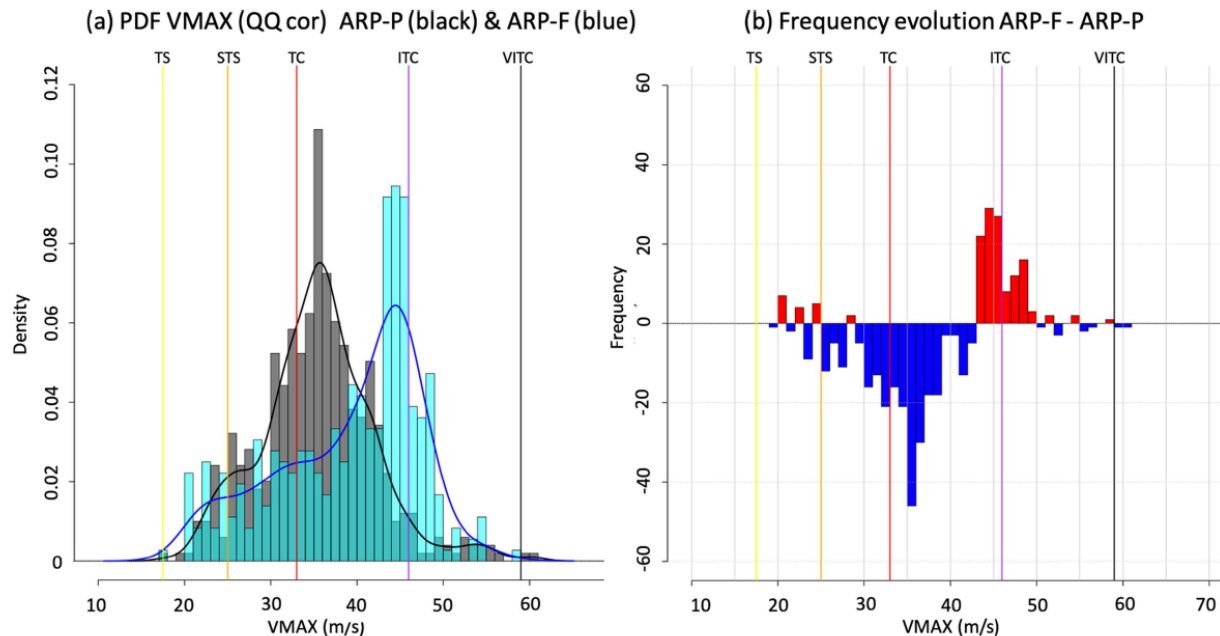


Figure 9 : Distribution et fréquence des cyclones et tempêtes sur la période 2051-2094 par rapport à la période de référence 1971-2014. D'après Barthe et al. 2021.

Difficultés rencontrées :

La réorganisation qui a suivi la pandémie de Covid au sein de la DIROI ne nous a pas permis de bénéficier des ressources suffisantes pour mener à bien entièrement les travaux prévus concernant le cas spécifique de Madagascar.

Livrables :

L7 : Rapport sur les scénarii d'évolution de l'activité cyclonique sur l'île de Madagascar - **Rendu**

L11 : Rapport (article scientifique) de synthèse sur l'analyse statistique de la modification du comportement des cyclones (trajectoire, intensité, structure) et des anomalies de précipitations à l'échelle régionale pour différents scénarii du GIEC - **Rendu**

4.3.2 Sous-action 3.2 - Évolution de l'impact cyclonique à l'échelle locale

Objectifs :

Évaluer l'impact du changement climatique sur la structure et l'intensité des cyclones du futur

Résultats :

Afin de générer des conditions environnementales modifiées par le changement climatique, un protocole expérimental visant à utiliser des anomalies (température de l'atmosphère et de la mer, humidité...) à partir des modèles climatiques de grande échelle pour modifier les paramètres présents a été conçue et validée. Une série de simulations couplées d'un cyclone « du futur », basée sur un système typique de La Réunion (Bejisa) ont ensuite été réalisées une fois le protocole expérimental validé.

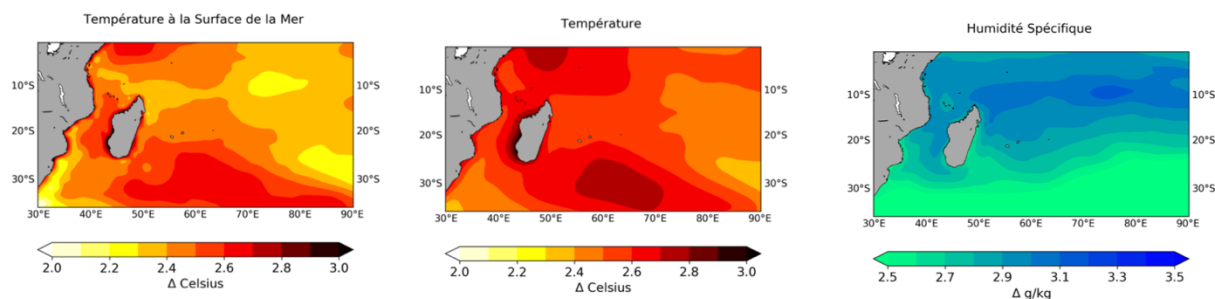


Figure 9 : Anomalies de la température à la surface de la mer (haut), de la température à 1000 hPa (milieu) et de l'humidité spécifique à 1000 hPa. Ces anomalies sont calculées pour la période 2070-2100 à partir du modèle CNRM-CM5, dans le cas du scénario RCP 8.5. La période de référence pour le temps présent est 1976-2005. On note une augmentation significative de la température de la surface de la mer et des basses couches de l'atmosphère, mais aussi de l'humidité dans les basses couches, pour l'ensemble du bassin Indien sud-ouest.

Le travaux menés à partir de cyclones de type Bejisa ont fait l'objet d'une publication en 2021 (Thompson et al. 2021).

Difficultés rencontrées :

La réorganisation qui a suivi la pandémie de Covid au sein de la DIROI ne nous a pas permis de bénéficier des ressources suffisantes pour mener à bien entièrement les travaux prévus concernant le cas spécifique des Seychelles.

Livrables :

L12 : Rapport de synthèse sur l'analyse statistique de la modification du comportement des cyclones (trajectoire, intensité, structure) et des anomalies de précipitations à l'échelle locale pour différents scénarii du GIEC incluant notamment : cartes de vent, houle et précipitations pour des cyclones atterrissant ou passant à proximité de La Réunion - **Rendu**

L18 : Rapport de synthèse sur l'analyse statistique de la modification du comportement des cyclones (trajectoire, intensité, structure) et des anomalies de précipitations à l'échelle locale pour différents scénarii du GIEC dans la région Seychelles (Outer Islands) - **Non Rendu**

La première partie de ce travail, consistant à simuler le cyclone tropical très intense Fantala ayant affecté les îles extérieures des Seychelles (Outer Islands) a été réalisée (voir livrable 6).

Les conséquences de la pandémie de COVID sur les conditions de travail ne nous ont cependant pas permis de finaliser cette étude.

4.4 Action 4 Coordination et valorisation

4.4.1 Sous-action 4.2 Gestion et pilotage du projet

Objectifs :

Mettre en place un comité de suivi international (CSI) assurant la coopération et la mise en œuvre commune du projet.

Résultats :

Un comité de pilotage formé des responsables de tous les partenaires a été constitué au démarrage du projet. Ce comité s'est réuni une fois à La Réunion au mois de juillet 2018. Un workshop scientifique et des visites de site (observatoire du Maïdo, CMRS) ont été organisés à cette occasion.

Problèmes rencontrés :

La première réunion du comité, prévue en février 2018, a été repoussée en raison de l'activité cyclonique en cours dans le bassin, et de son impact potentiel sur les liaisons aériennes depuis et vers La Réunion.

La seconde réunion du CSI, prévue en 2020 a été annulée en raison des conséquences de la crise sanitaire sur les conditions d'accès à La Réunion (visas, vaccins).

Livrables :

L4 : Rapport annuel - **Rendu**

L13 : Rapport annuel - **Rendu**

L23 : Rapport Final - **Rendu**

4.4.2 Sous-action 4.2 : Réalisation d'un film sur les cyclones tropicaux

Objectifs :

Réalisation d'un film sur les cyclones tropicaux et l'aléa cyclonique dans le bassin sud-ouest Indien.

Résultats :

De nombreuses heures de prises de vues ont été réalisées tout au long du projet, notamment aux Seychelles, à Madagascar, à La Réunion, à Maurice et au Mozambique. Une équipe de tournage s'est également rendue à Toulouse afin de filmer les supercalculateurs de Météo-France et du CNRS et réaliser des interviews de spécialistes français dans le domaine du changement climatique et de la prévision numérique des cyclones.

Problèmes rencontrés :

Une mission de tournage a été réalisée à Rodrigues quelques jours après le passage du cyclone Joaninha qui a en partie dévasté l'île. Au cours de cette mission le responsable du tournage a été victime d'un infarctus et a dû être rapatrié à La Réunion, ce qui explique le retard pris dans l'avancement du film.

Livrables :

L19 : Film documentaire (52') sur le risque cyclonique dans le bassin Indien sud-ouest - **Rendu**

4.4.3 Sous-action 4.3 : Organisation d'un workshop scientifique à La Réunion

Objectifs :

Organisation d'une conférence régionale sur les cyclones tropicaux à Saint-Denis.

Résultats :

Cette sous-action a été annulée du fait de la crise sanitaire.

Livrables :

L20 : Organisation d'un atelier international à La Réunion sur les cyclones dans le bassin Indien sud-ouest - **Non Rendu**

4.4.3 Sous-action 4.3 : Valorisation des travaux scientifiques

Objectifs :

Diffuser et valoriser les résultats du projet

Résultats :

13 articles scientifiques ont été publiés dans des journaux de rang A (voir L22) ;

Le projet a fait l'objet de 6 présentations lors de 5 conférences internationales (voir L21) ;

Plusieurs reportages ont été réalisés à La Réunion, notamment par France TV, Euronews et TF1

Problèmes rencontrés :

RAS

Livrables :

L21 : Compilation des actes et supports des présentations effectuées dans des conférences internationales - **Rendu**

L22 : Recueil de publications - **Rendu**