



**HAL**  
open science

## Rapport de synthèse de l'Action 1 Aléas atmosphériques de ReNovRisk-TRANSFERTS

Hélène Vérèmes

► **To cite this version:**

Hélène Vérèmes. Rapport de synthèse de l'Action 1 Aléas atmosphériques de ReNovRisk-TRANSFERTS. [Rapport de recherche] Université de La Réunion; Région Réunion. 2020. hal-03013926

**HAL Id: hal-03013926**

**<https://hal.univ-reunion.fr/hal-03013926>**

Submitted on 19 Nov 2020

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

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

# Rapport de synthèse

## ReNovRisk-TRANSFERTS

### Action 1 : Aléas atmosphériques

Hélène Vérèmes

Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion

(UMS3365/INSU-CNRS/Université de La Réunion)

Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones

(UMR8105/CNRS/Météo-France/Université de La Réunion)

**Août 2020**





# Fiche pratique

## Acteurs et collaborateurs du projet

Coordination de l'action : LACy (Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones)

Principaux investigateurs : LACy et OSU-Réunion

- Supervision : Pierre Tulet (LACy) et Jean-Pierre Cammas (OSU-Réunion)
- Ingénieur de recherche Action 1 : Hélène Vérèmes (OSU-Réunion/LACy)
- Expertises : Christelle Barthe, Dominique Mékiès et Soline Bielli (LACy)

Prestations externes : DIROI (Météo-France)

- François Bonnardot (directeur bureau EC, Etudes Climatologies)

Collaborateurs :

- Sabine Garabedian, Idriss Fontaine et David Nortes-Martinez (CEMOI)
- Gwenaëlle Pennober, Christophe Révillion, Pascal Mouquet et Cyprien Alexandre (Espace-DEV)

## Durée

30 mois.

## Recrutement

Hélène Vérèmes (IGR) de septembre 2019 à août 2020.

---

## Plan du rapport

Fiche pratique.....	2
Contexte général.....	3
Objectifs.....	4
Rapport scientifique.....	5
Livrables.....	27
Liste des publications et communications.....	52
Références bibliographiques.....	53
Liste des acronymes.....	56

---

# Contexte général

Le projet ReNovRisk-TRANSFERTS est l'une des cinq composantes du programme de recherche ReNovRisk (Recherche Intégrée et Innovante sur les Risques Naturels) sur la prévention du risque cyclonique dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien. Cette composante s'intéresse spécifiquement à l'étude du transfert des aléas cycloniques dans les milieux naturels. Il se focalise sur les risques naturels associés aux cyclones qui atterrissent sur le territoire Réunionnais et plus spécifiquement sur la micro-Région Ouest qui concentre des moyens d'observations de l'OSU-Réunion, en prenant comme zone-atelier de travail le massif du Maïdo, la bande littorale entre Saint-Paul et Saint-Leu, le lagon d'arrière-récif et l'océan ouvert selon la position sur la côte. Son objectif général est d'analyser comment s'opèrent les transferts des aléas cycloniques entre les milieux naturels que constituent l'atmosphère, l'hydrosphère, le milieu du littoral, et l'océan ouvert.

Pour ce qui concerne le transfert de l'atmosphère vers l'hydrosphère et le littoral, les aléas atmosphériques sont alors les rafales du vent et les précipitations associées aux événements cycloniques. Pendant ces événements, ils dépendent de nombreux facteurs intrinsèques aux cyclones et d'autres facteurs par rapport à la zone d'atterrissage. Les vents cycloniques sont par nature les plus intenses dans les hauts de La Réunion, zone où l'on retrouve généralement aussi les précipitations cycloniques les plus intenses. Les verrous scientifiques associés à ces thématiques se situent aux interfaces des milieux naturels. Entre l'atmosphère et l'hydrosphère, le verrou est sur la qualité et la fréquence des données de précipitations qui sont livrées aux hydrologues pour initialiser et forcer les modèles de prévision de crue. Que ce soient les observations de pluviométrie pour les lames d'eau ou les prévisions de ces quantités par les modèles numériques, les difficultés se situent dans la validation de la qualité des données. Des problèmes de représentativité spatiale se posent sur les observations de pluviométrie, surtout dans le contexte topographique compliqué de La Réunion. Les schémas numériques de représentation des nuages tropicaux et des précipitations demandent à être validés par des observations spécifiques qui sortent du parc instrumental météorologique classique. Dans l'Action 1 (Aléas Atmosphériques), ces verrous sont attaqués par l'exploitation des instruments installés à l'Observatoire de Physique de l'Atmosphère à La Réunion et à l'aide de nouvelles méthodologies de fusion de données et d'assimilation.

Par définition, le risque cyclonique est fonction des aléas atmosphériques et océaniques mais aussi de la vulnérabilité et de l'exposition sur la population, les infrastructures et l'économie. Ces facteurs sont eux-mêmes dépendants de l'environnement, notamment de l'orographie et de l'usage des sols. On comprend dès lors que l'on ne peut calculer le risque seulement en étudiant les aléas atmosphériques et que cela nécessite une approche intégrée et multidisciplinaire. C'est pourquoi cette action s'est inscrite au cœur d'une forte transversalité avec les autres programmes de ReNovRisk, notamment IMPACTS et EROSION.

# Objectifs

Rappel synthétique des objectifs du programme:

## *[O1.1] Exploiter l'infrastructure du Maïdo pour évaluer et contraindre les modèles numériques lors de l'atterrissage des cyclones :*

Améliorer les connaissances sur les processus qui définissent la nature des précipitations tels que les propriétés des aérosols, les effets orographiques et le renforcement local de la convection et des vents, lors de l'atterrissage des cyclones tropicaux sur La Réunion, via une approche observations-modèle.

→ [L1.1] Rapport sur l'intercomparaison des profils de nuages et d'extinction des aérosols observés dans ReNovRisk-TRANSFERTS avec les simulations de cyclones tropicaux

## *[O1.2] Fusion de données et cartographie des pluies à l'échelle du territoire :*

Développer une stratégie d'exploitation d'une méthode de fusion de données de lames d'eau à partir des deux radars météorologiques de La Réunion et des données pluviométriques du réseau de stations de Météo-France afin de pouvoir évaluer le caractère exceptionnel d'événements de fortes pluies à La Réunion grâce à une base de données homogène et à haute résolution.

→ [L1.2] Cartographie horaire et à 500 m de résolution des lames d'eau sur La Réunion

## *[O1.3] Cartographie objective des risques associés aux vents cycloniques :*

Déterminer une formulation adaptée au territoire de La Réunion des seuils de dégâts écologiques et économiques en croisant les dégâts historiques observés lors des cyclones récents ou pendant la période du programme avec des cartes de vent simulé.

→ [L1.3.1] Formulation originale de traduction des niveaux de vent en risques écologiques ou économiques pour le territoire de La Réunion

→ [L1.3.2] Cartographies des risques liés au vent. Données d'entrées pour le programme RenovRisk-IMPACTS (analyse des coûts des dommages)

# Rapport scientifique

## 1. Exploitation de l'infrastructure de l'Observatoire du Maïdo pour évaluer et contraindre les modèles numériques lors de l'atterrissage des cyclones sur La Réunion

L'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion; Duflot et al., 2018) est un Site National Instrumenté de l'INSU-CNRS qui héberge un parc instrumental affilié à plusieurs Services Nationaux d'Observation (SNO) et à plusieurs grandes infrastructures nationales de recherche. L'OPAR est piloté scientifiquement par le LACy, en collaboration avec d'autres laboratoires métropolitains et belge, et opéré techniquement par l'Unité Mixte de Service (UMS) de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de La Réunion (OSU-Réunion). L'OPAR est distribué géographiquement sur 4 sites distincts (Figure 1) : le campus de l'Université de la Réunion à Saint-Denis, le site Gillot de Météo-France, le site du Port, et à l'Observatoire du Maïdo (2160 m d'altitude; Baray et al., 2013). L'Observatoire du Maïdo a été inauguré en septembre 2012. Une partie du parc instrumental qui était sur le campus universitaire a été déplacée à l'Observatoire du

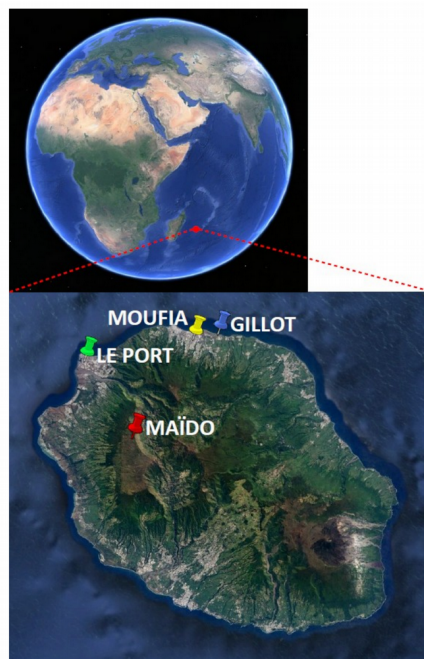


Figure 1. Localisation des quatre sites d'observations de l'OPAR (source : Duflot et al., 2018)

Maïdo, notamment les lidars pour améliorer leurs performances. L'OPAR dispose de moyens d'observation par télédétection des aérosols, notamment :

- un lidar aérosols multi longueurs d'onde : lidar UV, visible et infrarouge installé à l'Observatoire du Maïdo permettant la caractérisation des aérosols de 3 à 20 km d'altitude

- un lidar mobile UV permettant la caractérisation des aérosols du sol à 10 km d'altitude en divers endroits de l'île

- un photomètre solaire (et lunaire) CIMEL installé à Saint-Denis permettant l'évaluation de la charge totale en aérosols et de leur distribution en taille moyenne

- un photomètre solaire portable MICROTOPS II

Il dispose également d'instruments consacrés à l'étude des nuages et des précipitations, tels que :

- un radar nuage à visée verticale BASTA déployé à Saint-Denis

- un ceilomètre avec une portée de 10 km

- des disdromètres optiques et vidéo pour mesurer la granulométrie des pluies déployés sur le site de Saint-Denis

Les moyens d'observations des aérosols et du cycle de l'eau au-dessus de La Réunion de l'OPAR sont conséquents. Des développements instrumentaux supplémentaires sont envisagés dont notamment l'exploitation de la synergie lidar/radar pour obtenir des informations plus précises sur la distribution verticale des nuages et des aérosols.

Le parc instrumental actuel de l'OPAR inclut, en plus des instruments décrits ci-dessus, des instruments de mesure in situ et des systèmes de télédétection d'autres gaz traces qui offrent des perspectives d'investigation de nombreuses études sur les nuages, les aérosols et leur interaction.

Les nombreuses études de modélisation numérique et/ou basées sur les observations publiées dans la littérature ne permettent pas de statuer à coup sûr sur le rôle précis des aérosols dans la convection profonde : ils pourraient soit atténuer la convection (et les précipitations associées) (Rosenfeld et al., 2008) soit la renforcer (Fan et al., 2007). Leur rôle dans le développement et l'intensification des cyclones tropicaux n'est pas non plus tranché (Herbener et al., 2014; Wang et al., 2014). L'impact des aérosols sur l'intensité et les précipitations associées aux cyclones tropicaux dépend donc de différents facteurs : le type d'aérosols, ses caractéristiques radiatives et ses capacités CCN et/ou IN (noyaux glaçogènes), l'altitude et la localisation du panache d'aérosols, la localisation au sein du système de l'intrusion du panache... Ainsi, pour progresser dans la prévision de l'intensité des cyclones tropicaux, il est indispensable d'améliorer la physique des modèles en prenant en compte l'effet des aérosols sur la microphysique et la thermodynamique (Rosenfeld et al., 2012). Le couplage entre le schéma d'aérosols ORILAM et le schéma microphysique à 2 moments LIMA au sein du modèle Méso-NH a été réalisé au LACy. Le couplage original entre un schéma d'aérosol et un schéma microphysique à 2 moments a été réalisé dans le modèle communautaire Méso-NH afin de représenter les interactions aérosol-microphysique-dynamique dans les cyclones tropicaux. Une première évaluation de ce couplage a été réalisée sur le cyclone tropical Dumile passé à proximité de La Réunion en décembre 2012 - janvier 2013 (Hoarau et al., 2018a, 2018b). Les résultats ont montré que le système couplé reproduit bien la trajectoire et l'intensité de Dumile, avec la transition d'une dépression de mousson vers un cyclone tropical. Ces travaux sont basés uniquement sur de la simulation numérique. Des données d'observation satellite (DARDAR et Meteosat 7) ont permis de valider les résultats sur cas d'étude. L'approche observations-modélisation semble nécessaire à la généralisation de ces résultats et à leur développement, notamment pour l'amélioration de la représentativité des simulations de pluies à l'échelle de La Réunion. Grâce au parc instrumental existant, les équipes du LACy vont pouvoir développer leur travaux sur l'impact des aérosols sur l'intensification des cyclones tropicaux et les précipitations associées via cette approche observations-modélisation.

Les capacités d'observation des nuages et des aérosols de l'OPAR ont été synthétisées sur un poster et présentées au 8<sup>th</sup> EarthCARE International Science Workshop à Fukuoka (Japon) en novembre 2019. Cette communication peut être référencée comme suit :

*Vérèmes, H., V. DufLOT, G. Payen, N. Marquestaut, N. Bègue, O. Bousquet, J.-P. Cammas and colleagues from LACy, OSU-R (UMS) and LATMOS, "Profiling of aerosols and clouds in Reunion Island (21°S,55.5°E)," 8<sup>th</sup> EarthCARE International Science Workshop, Fukuoka, Japan, November 25-27, 2019.*

Le poster incluant la mention de ce travail au programme ReNovRisk est consultable dans la section livrable de ce rapport [L1.1] et sur la plate-forme en ligne HAL ([lien](#)).

## 2. Cartographie des pluies et du vent à 500 m de résolution horizontale à l'échelle du territoire

### 2.1. Fusion de données et cartographie des pluies

Il y a quelques années, une méthode de fusion de données radar et pluviométrique a été mise en place par Matthieu Plu (chercheur au LACy lors de ce développement) pour produire des données améliorées de lames d'eau. Il s'agissait initialement d'un module radar visant à corriger des données pluviométriques issues de simulations numériques. Ce travail a été adapté par François Bonnardot pour produire des lames d'eau horaires à haute résolution à partir de données pluviométriques observées (recueillies par les stations Météo-France). Si la méthode initiale utilisait les données pluviométriques comme des observations assimilées par la méthode des ondelettes et entraînait un lissage des champs, la nouvelle méthode s'appuie sur une technique de krigeage qui permet d'obtenir une plus fine résolution horizontale (Jewell & Gaussiat, 2015; Pauthier et al., 2016).

Le produit opérationnel ANTILOPE (ANalyse par spaTiaLisation hOraire des PrEcipitationS) (Laurantin, 2008) archivé par Météo-France est une estimation de la quantité de pluie à l'échelle d'un maillage de 1 km<sup>2</sup> à partir des données radar corrigées par des données pluviométriques. Le produit archivé est calculé au pas de temps 1 heure. C'est un produit des lames d'eau PANTHERE (Projet ARAMIS Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et Renouvellement) (Parent du Châtelet et al., 2005) et d'un krigeage (interpolation) des pluviomètres disponibles au moment de l'estimation (Pauthier et al., 2016). La variation de réflectivité sur une heure est analysée par pixel de 1 km<sup>2</sup> et pas de temps de 5 min. Cette variation permet d'associer automatiquement une fraction de l'heure en cours à une pluie convective (entre 0 et 60 min) et sa fraction complémentaire à une pluie stratiforme. La partie stratiforme est donc obtenue par krigeage des valeurs pluviométriques de grande échelle alors que la partie convective est obtenue par détection de cellules sur les images radar et est corrigée à l'aide des cumuls convectifs des pluviomètres situés sous ces cellules.

Pour estimer les conséquences des précipitations associées aux cyclones tropicaux, les hydrologues utilisent des modèles numériques qui nécessitent des données d'entrée à haute résolution. Les discussions avec Météo-France ont permis d'aboutir à la conclusion suivante : le produit ANTILOPE au pas de temps de horaire (voire de 15 min) et à 1 km de résolution pourrait être généré pour la période 2014-2019. Les données ANTILOPE n'ont été produites et archivées par Météo-France qu'à partir de 2016. Toutefois, la lame d'eau PANTHERE étant disponible depuis fin 2013, un rejeu des données ANTILOPE sur la période 2014-2019 était tout à fait envisageable. Dans le cadre de l'Action 1, une prestation externe, confiée à François Bonnardot (Météo-France), a permis de retraiter l'ensemble de la base de données pour la zone de La Réunion de décembre 2013 à décembre 2019. Deux jeux de données (couvrant le passage des cyclones tropicaux Berguita et Bejisa sur La Réunion) ont été mis en accès libre dans le cadre de ReNovRisk. Ces données se trouvent sur GeOsur à l'adresse suivante : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/inventaire/> (mots-clefs : ReNovRisk, ANTILOPE, cyclones tropicaux)



[L1.2]. La figure 2 montre un exemple pour le cyclone Berguitta le 18 janvier 2018 avec la lame d'eau PANTHERE à gauche et la lame d'eau ANTILOPE à droite. La sous-estimation initiale des précipitations avec les données PANTHERE (estimations radar) est presque entièrement corrigée par l'algorithme ANTILOPE.

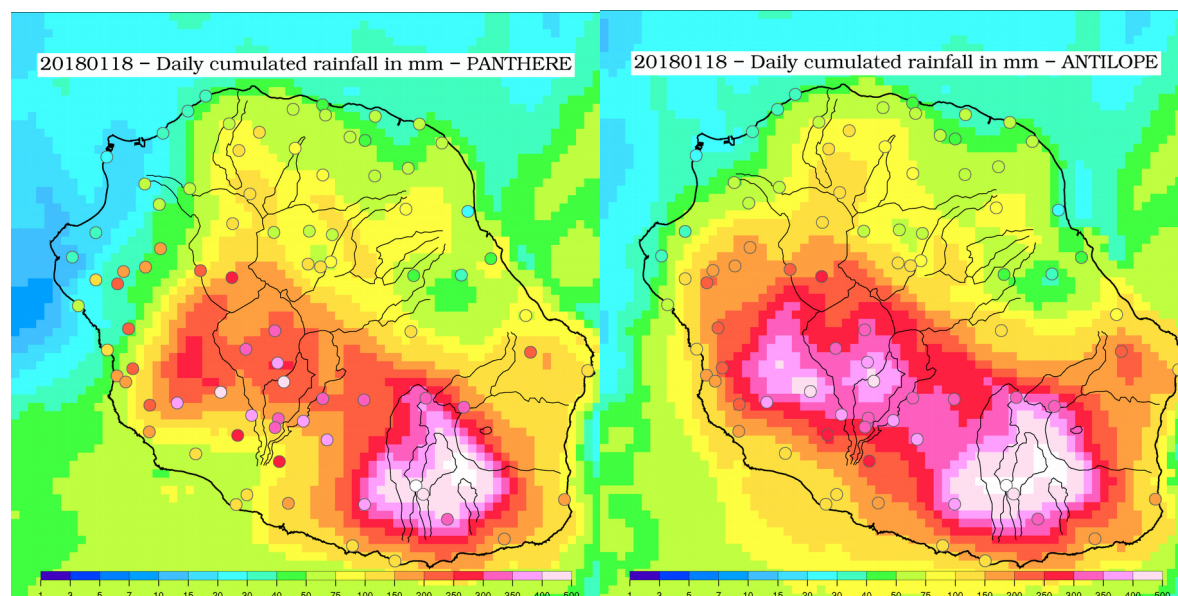


Figure 2. Précipitations cumulées journalières estimées avec les lames d'eau 15 minutes PANTHERE (à gauche) et ANTILOPE (à droite) lors de l'événement Berguitta sur La Réunion (18/01/2018) et superposées aux données des stations météorologiques du réseau de Météo-France (ronds colorés).

La base de données peut d'ores et déjà être exploitée par les différents collaborateurs de ReNovRisk. Ces données offrent une vue non seulement sur les pluies cycloniques mais sur l'ensemble des précipitations à La Réunion et permet ainsi d'évaluer le caractère exceptionnel des événements passés ou à venir.

## 2.2. Cartographie du vent à l'échelle des territoires du bassin sud-ouest océan Indien sur événements cycloniques via la technique dite "de bogus"

Depuis 2007, Aladin-Réunion (modèle de prévision de Météo-France à La Réunion jusqu'en 2016) assimilait un bogus de vent qui corrigeait le cyclone dans l'analyse (position, intensité, structure). Un des principaux progrès apportés à Aladin-Réunion a été de limiter les surintensités des analyses de cyclones. Se manifestant dans certaines conditions, ces surintensités trouvaient leur origine dans les relations d'équilibre entre les différentes variables météorologiques (balance non-linéaire) lors de l'assimilation du bogus. Pour être traitée numériquement, une telle balance non-linéaire devait être linéarisée autour d'un état de base. La correction permettant de limiter les surintensités de cyclones dans Aladin-Réunion a consisté à appliquer un seuil sur le champ de tourbillon de cet état de base, et à lisser spatialement la correction apportée par l'étape d'analyse. L'initialisation des cyclones tropicaux était un bogus des observations de vent de la surface à 500 hPa déduites du modèle analytique de Holland, plus la pression au centre. La sensibilité de la prévision d'intensité et de trajectoire d'un cyclone à la structure initiale du cyclone a par ailleurs été mise en évidence. Nuissier et al. (2005) et Leroux (2012) ont montré la nécessité d'enrichir les méthodes de bogus ou de pouvoir assimiler des observations

informatives sur la structure d'un cyclone.

Un travail d'optimisation de la méthode dite "de bogus" a été réalisé dans le cadre du programme SPICy (Système de Prévision des Inondations Côtières et Fluviales en contexte Cyclonique). Les contraintes pour le calcul des conditions de vent pour la prévision opérationnelle sont : la cohérence vis-à-vis des caractéristiques de position et d'intensité du phénomène, la prise en compte de l'environnement de grande échelle et des contraintes locales, ainsi qu'un temps de réponse compatible avec une utilisation opérationnelle. L'approche paramétrique de Holland ne répondait qu'à la première contrainte. C'est pourquoi une approche dynamique utilisant le modèle Méso-NH a été testée. Cette méthode fonctionne sur une fonction bogus et un couplage avec le modèle IFS du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen-Terme (CEPMMT). Les résultats des tests de sensibilité menés sur 5 cyclones historiques (Bejisa, Dumile, Felleng, Gamède et Dina) ont montré que la structure reproduite est réaliste dès lors que l'information sur le rayon de vent maximum injectée dans le bogus est pertinente. Les résultats des comparaisons entre ces champs de vent reconstitués par la méthode dite "de bogus" et les observations in situ montrent un bon accord en affinant la résolution horizontale du modèle (Figure 3).

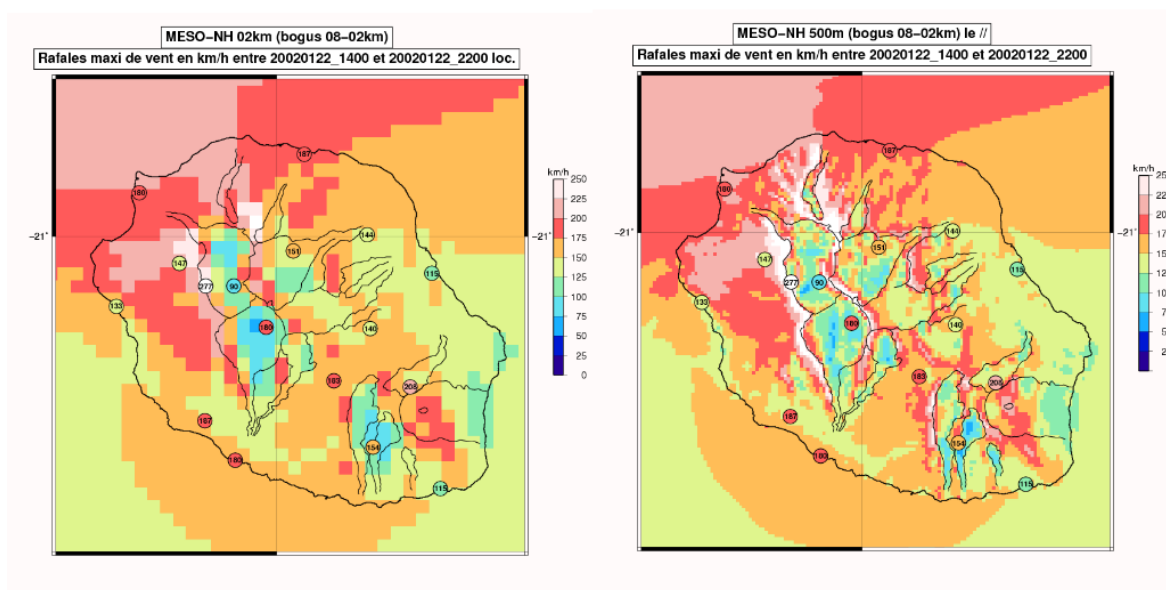


Figure 3. Champs de vent en km/h du 22 janvier 2002 à 14:00 UTC (cyclone Dina) calculés à partir de la méthode dite "de bogus" et le modèle Méso-NH à 2 km (à gauche) et 500 m (à droite) de résolution horizontale superposés aux données de stations météorologiques (cercles) issus d'une étude de sensibilité réalisée dans le cadre du programme SPICy (transmis par F. Bonnardot)

Dans le cadre de ReNovRisk-TRANSFERTS, nous avons appliqué cette méthode à la production des champs de vent utilisés dans le cadre de la cartographie objective des risques associés aux vents cycloniques (cf section 3) et comme données d'entrée du programme ReNovRisk-IMPACTS. Le modèle Méso-NH à une résolution horizontale de 500 m a été initialisé par les données CEPMMT. Le vortex initial a été filtré et réinitialisé par la méthode dite "de bogus". La figure 4 illustre l'apport de cette méthode sur un exemple, le cyclone Bejisa le 2 janvier 2014 à 18:00 UTC avec le



champ initial en haut à gauche (figure 4a) et après application de la méthode à droite (figures 4b, c et d), superposé aux observations des stations météorologiques (données Météo-France). La méthode dite “de bogus” permet de produire une donnée plus proche des observations et sur l’ensemble de La Réunion (même aux endroits où il n’y a pas de station). La descente d’échelle permet d’améliorer la précision des données en accord avec la topographie.

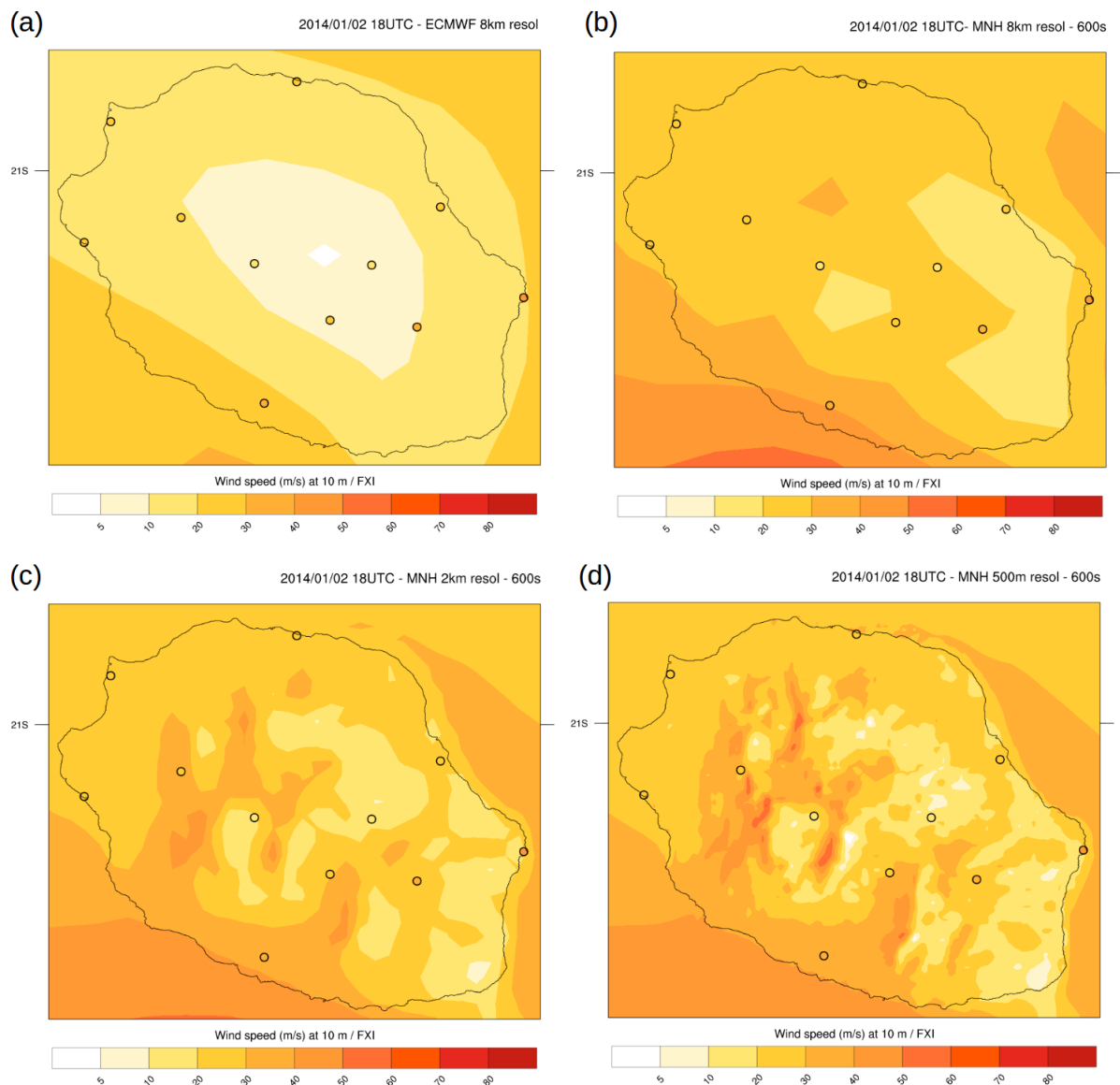


Figure 4. Champs de vent en m/s du 2 janvier 2014 à 18:00 UTC (cyclone Bejisa) pour les données ECMWF à 8 km de résolution (a) et calculés à partir de la méthode dite “de bogus” et le modèle Meso-NH à 8 km (b), 2 km (c) et 500 m (d) de résolution horizontale superposés aux données de stations météorologiques (cercles)

Les champs de vent (rafales maximales et vitesse du vent à 10 m d’altitude) au passage de 5 systèmes tropicaux sur La Réunion ou sur Madagascar ont été générés avec cette méthode. Le tableau 1 récapitule les données de vent à haute résolution produites dans le cadre du programme ReNovRisk :

Nom du cyclone	Zone	Résolution horizontale et domaine	Date(s)	Remarque(s)	URL de téléchargement
Bejisa	La Réunion	500 m 20.8-21.4°S 55.2-55.9°E	01/01/2014 00UTC - 03/01/2014 18UTC		<a href="#">lien</a>
Berguitta	La Réunion	500 m 20.8-21.4°S 55.2-55.9°E	18/01/2018 00UTC - 19/01/2018 00UTC		<a href="#">lien</a>
Dina	La Réunion	500 m 20.8-21.4°S 55.2-55.9°E	21/01/2002 00UTC - 24/01/2002 12UTC	Durée run : 900s au lieu de 600s	<a href="#">lien</a>
Ava	Madagascar	2 km 15.9-24.5°S 44.2-53.3°E	04/01/2018 00 UTC - 07/01/2018 00 UTC	Pas de filtrage et bogussing sur 6 échéances	<a href="#">lien</a>
Enawo	Madagascar	2 km 12.5-20.2°S 44.5-54°E	06/03/2017 06 UTC - 09/03/2017 00 UTC	- Durée run : 900s au lieu de 600s - Pas de filtrage et bogussing sur 6 échéances	<a href="#">lien</a>

Tableau 1. Champs de vent calculés par la méthode dite “de bogus” livrés dans le cadre de l’Action 1 de ReNovRisk-TRANSFERTS.

Ces données sont en accès libre sur GeOsur à l’adresse suivante : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/inventaire/> (mots-clefs : ReNovRisk, bogus, cyclones tropicaux). [L1.3.2]. Une note technique décrivant la paramétrisation du modèle Més0-NH, les différentes étapes nécessaires ainsi que les détails de configuration des simulations est disponible dans la section livrable de ce rapport. Le rapport est archivé sur la plateforme HAL ([lien](#)) et son DOI est 10.26171/6n33-xe98.

L’application de la méthode sur Madagascar était réalisée pour la première fois dans le cadre de ce programme afin de répondre aux besoins des collaborateurs de ReNovRisk-IMPACTS qui mènent des études sur Madagascar. La méthode dite “de bogus” se base sur les données de position du centre du système et de rayon de vent maximum (rvmax) de la base de données du CMRS (Centre Météorologique Régional Spécialisé) de La Réunion. Or lorsqu’un cyclone atterrit, au sens où le centre du système est sur terre, le système est alors dans un statut “sur terre” et il n’y a plus d’information sur le rvmax. Par conséquent, le bogussing dans Més0-NH ne peut pas être appliqué. Cela limite donc l’application de la méthode au développement d’un cyclone sur océan et au moment de l’atterrissage. Pour la production des données de vent de Ava et Enawo (Tableau 1), pour les échéances pour lesquelles le cyclone est

catégorisé “sur terre” par Météo-France, les étapes de filtrage et de bogussing (cf schéma récapitulatif des étapes d’un run Méso-NH pour appliquer la méthode dite “de bogus” sur La Réunion pour une échéance donnée de la note technique disponible dans la section livrable) ont été remplacées par une simple adaptation dynamique avec les mêmes paramétrisations. L’application du bogussing ou de la simple adaptation dynamique est précisée dans les métadonnées des fichiers netcdf disponibles en open access sur GeOsur. Les bénéfices de la méthode sont grandement diminués mais par rapport aux analyses grande échelle qui auraient pu être utilisées, cela permet tout de même de bénéficier d’une descente en résolution et donc d’un meilleur réalisme des champs de vent.

### 3. Cartographie objective des risques associés aux vents cycloniques

#### 3.1 Etat de l’art: le risque cyclonique

Pielke and Landsea (1998) ont mis en place une méthode de normalisation des dégâts induits par les ouragans aux Etats-Unis. La normalisation permet d’estimer les pertes économiques directes (dommages) découlant d’un événement historique extrême si celui-ci se produisait dans les conditions sociétales et économiques actuelles. La formule générale appliquée à 2018 par exemple est la suivante :

$$D_{2018} = D_y \times I_y \times RWPC_y \times P_{2018/y} \quad [1]$$

avec  $D_{2018}$  les dommages normalisés en 2018 (en \$US),  $D_y$  les dommages rapportés cette année-là en \$US,  $I_y$  l’ajustement à l’inflation,  $RWPC_y$  l’ajustement de la richesse réelle par habitant et  $P_{2018/y}$  l’ajustement de la population de la région. Cette étude exploite des données purement socio-économiques. Il s’agit de l’ajustement des dégâts historiques par trois facteurs : l’inflation, la richesse et la population. Un corpus d’études a découlé de leurs travaux, on notera notamment l’étude la plus récente, celle de Weinkle et al. (2018), qui normalise les dégâts liés aux ouragans entre 1900 et 2017 exploitant deux méthodes différentes. Elle montre, comme la littérature sur le sujet, qu’aucune tendance ne se dessine aux Etats-Unis sur les coûts des dommages associés aux ouragans. Cette étude pourrait difficilement être mise en place à La Réunion étant donnée qu’il n’y a pas actuellement (à notre connaissance) de base de données publique d’archivage des dommages économiques à La Réunion associés aux cyclones tropicaux. D’où l’intérêt de la mise en place du projet de recherche intégrée ReNovRisk couvrant l’étude de la structure physique des cyclones tropicaux à l’évaluation des impacts économiques dans un contexte de changement climatique.

La notion de risque est définie par le GIEC comme étant fonction de l’aléa, de l’exposition et de la vulnérabilité (IPCC, 2012). Le niveau de risque peut ainsi être calculé suivant la formule suivante :

$$R = H^\alpha \times E^\beta \times V^\delta \quad [2]$$

avec  $R$  le niveau de risque intégré,  $H$  le facteur d’aléas,  $E$  l’exposition,  $V$  la

vulnérabilité et  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$  des coefficients de poids (Zhang et al., 2017). L'aléa décrit les événements météorologiques (et océanographiques) en termes de probabilité d'occurrence et d'intensité physique. L'exposition fait référence à ce qui est affecté par les catastrophes naturelles, comme les personnes et les biens. La vulnérabilité est la susceptibilité pour les biens et les personnes à subir des dommages. Nous avons pu établir un schéma commun à une partie de la littérature récente sur l'étude du risque cyclonique (Geiger et al., 2018; Hoque et al., 2018; Zhang et al., 2017, Zhang & Chen, 2019) qui est le suivant : 1) définition des critères retenus pour définir les différents facteurs influençant le risque, 2) spatialisation des données à l'aide d'un logiciel de SIG, 3) normalisation des facteurs entre eux et 4) utilisation d'une méthode AHP (Analytical Hierarchy Process; Saaty, 2008) pour donner du poids à chacun des critères/des facteurs (qui se base sur des matrices de jugements). Cela permet de produire des cartes d'aléas, de vulnérabilité et d'exposition (sous couvert de l'appel à des experts ou d'autres méthodes mathématiques qui permettront d'évaluer différents niveaux d'aléas, de vulnérabilité ou d'exposition) et à une carte de risques adaptée au(x) territoire(s) étudié(s). Ce schéma méthodologique est illustré par la figure 5 extraite de Hoque et al. (2018). Ces études nécessitent des données socio-économiques très précises et spatialisées ainsi que le déploiement de modèles mathématiques. On notera aussi que chacune de ces études présentent des spécificités. Geiger et al. (2018) utilisent un modèle simplifié de vent utilisé pour

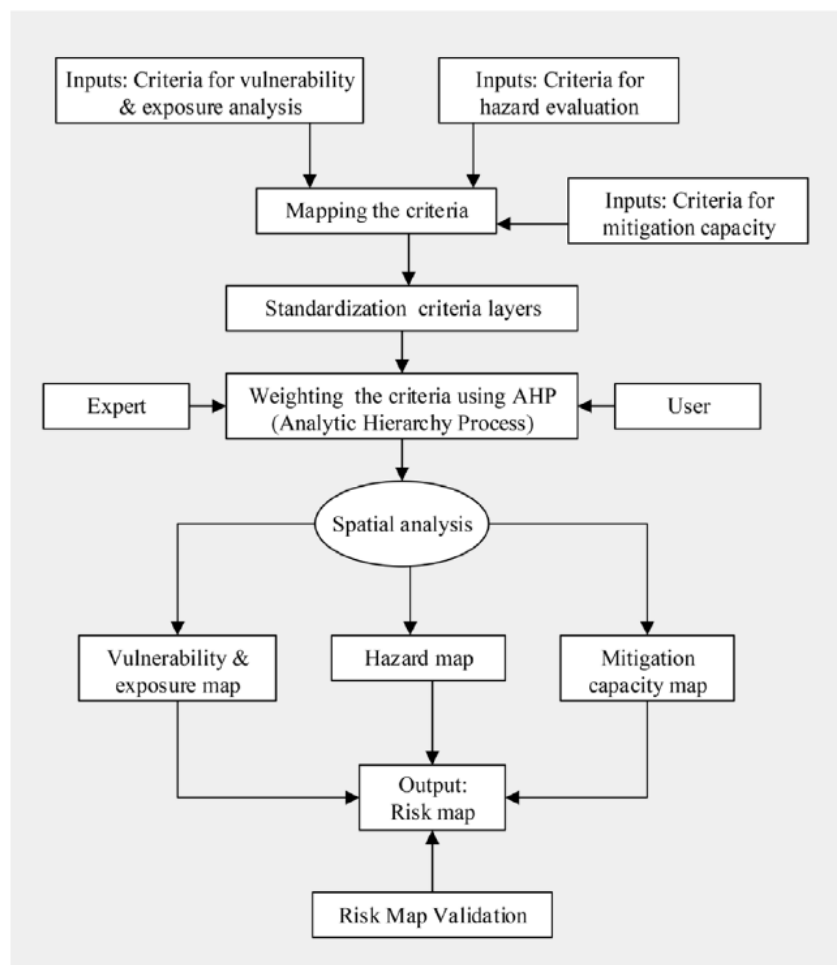


Figure 5. Organigramme de la démarche d'évaluation des risques extrait de Hoque et al. (2018)

estimer les zones exposées à des vitesses de vents supérieures à 34, 64 et 96 nœuds. La fonction de vulnérabilité est nulle si la vitesse du vent est en dessous d'un seuil défini et égale à 1 si le vent est supérieur, la fonction de risque (équation 2) est donc simplifiée alors que Hoque et al. (2018) proposent d'y ajouter un paramètre : les capacités de prévention. Ensuite, selon les études, le nombre et la nature des sous-critères diffèrent d'une étude à l'autre. Parmi les sous-critères d'aléas, on retrouve principalement la pluie, la houle, le vent et l'occurrence d'événements cycloniques. Pour l'exposition et la vulnérabilité, les sous-critères associés ne sont parfois pas dissociés en fonction du facteur (Hoque et al., 2018). Les sous-critères suivants y sont associés : densité de population, occupation des sols, topographie, proximité au passage du cyclone, proximité à la côte... Enfin certaines études ajoutent le facteur de prévention sur les sous-critères suivants : proximité aux centres d'hébergement, proximité aux infrastructures de santé, efficacité des dispositifs de prévention... Certains sous-critères associés à un critère (aléas, exposition, vulnérabilité ou prévention) peuvent l'être à un critère différent dans une autre étude. Certains (sous-)critères pris en compte dans une étude n'apparaissent parfois pas dans une autre. Il est important d'adapter la méthodologie au territoire étudié et donc le choix de ces sous-critères. C'est pourquoi cette méthode nécessite l'avis d'experts et est souvent caractérisée comme subjective.

Il existe aussi d'autres méthodologies pour aborder le calcul des risques cycloniques, on notera par exemple l'utilisation de fonctions de dommages. Strobl (2011) considère que les dommages dus à un cyclone tropical doivent varier en fonction de la puissance cubique de la vitesse du vent. Emanuel (2011) précise toutefois qu'il est probable qu'il existe un seuil en dessous duquel il est peu probable qu'il y ait des dommages physiques importants et que pour de forts vents cette probabilité doit être de 1. Un indice calculé sur une fonction de dommage a été défini en se basant sur des critères de niveaux de vent associés à l'échelle de Saffir-Simpson. Le calcul de cet indice est repris par Elliot et al. (2015) comme fonction de dommages pour calculer l'impact économique du passage des cyclones sur les régions côtières de Chine. On notera toutefois que ces études considèrent que les trois facteurs principaux d'aléas (vent, pluie et houle) sont "corrélés à la vitesse du vent et que, par conséquent, les vitesses du vent observées peuvent être utilisées comme une approximation générale des dommages potentiels dus aux tempêtes tropicales." Comme le précise Emanuel et al. (2011), ces fonctions de dommages sont donc fortement idéalisées.

Si le travail de Leroux et al. (2018) a permis d'évaluer le nombre de cyclones tropicaux étant passés sur les différents territoires de l'océan Indien, l'évaluation du risque cyclonique associé n'a pas été réalisée comme dans aucun autre article à notre connaissance. Nous n'avons relevé dans la littérature aucune étude qui définisse des fonctions de dommages associées à un ou plusieurs type(s) d'aléa(s) cyclonique(s) sur La Réunion, ni de publication sur les conséquences sur la végétation, les infrastructures ou encore l'économie suite au passage d'un ou de plusieurs cyclones tropicaux sur La Réunion. On relèvera toutefois quelques études ciblées sur les effets des cyclones tropicaux sur le trait de côte et la vulnérabilité des zones côtières associées (Mahabot et al., 2016; Duvat et al., 2016, Magnan and Duvat, 2018). L'étude du passage de plusieurs cyclones a montré que la forte houle associée à ses

cyclones tropicaux jouait un rôle important dans la dynamique des plages.

Le travail de recherche bibliographique mené dans le cadre de ce programme montre que nous ne disposons pas de publication scientifique sur le risque cyclonique à l'échelle du territoire de La Réunion. Il faut toutefois noter qu'au détour des nombreuses discussions que nous avons eu avec les interlocuteurs du monde institutionnel et de la recherche à La Réunion, nous avons constaté qu'une grande expérience sur le sujet a été emmagasinée par les scientifiques spécialistes de leur domaine (écologie, télédétection...) et les agents sur le terrain (ONF...). Des informations sur la résistance de certains types de végétation par rapport à d'autres par exemple sont connues, les espèces endémiques résistant mieux que certaines espèces importées et utilisées pour végétaliser certains littoraux (comme les cryptomérias). Les conséquences directes des cyclones tropicaux sur les forêts endémiques semblent limitées mais peuvent avoir des conséquences sur le moyen terme. Ces constatations font parfois l'objet d'actions ciblées sur le terrain accompagnées ou non de la production d'un jeu de données. Ces constats n'ont pour l'instant pas abouti à un archivage identifié ou à la publication d'étude quantitative sur le risque cyclonique à La Réunion dans le domaine écologique. Ce qu'il faut néanmoins retenir c'est qu'il y a de nombreuses expertises dans les laboratoires de recherche et dans les services d'études des risques des différentes institutions à La Réunion.

Cette étude bibliographique autour de l'établissement de cartes de risque cyclonique montre également qu'il n'est pas possible d'obtenir une carte des risques adaptée à un territoire dans sa globalité sans l'expertise de nombreux acteurs de l'environnement et du monde socio-économique. La démarche d'identification des experts et des données utilisables pour évaluer le risque montre qu'il faut voir au-delà des domaines thématiques scientifiques habituels et travailler avec une approche transdisciplinaire. Cela vient appuyer l'intérêt des différentes études entreprises dans le cadre du programme ReNovRisk. Cette démarche est un premier pas vers l'établissement d'un outil de cartographie du risque cyclonique à La Réunion. La partie suivante fait un premier état des lieux des données disponibles pour atteindre cet objectif.

### **3.2 Disponibilité des données et choix méthodologique**

La liste suivante présente de façon non exhaustive les organismes qui ont été contactés pour l'identification des données (dégâts) associées au passage d'un ou de plusieurs cyclones tropicaux à La Réunion : laboratoires de recherche (LACy, Espace-DEV, PVBMT, CIRAD), Météo-France, AGORAH, ONF Réunion, parc national, DAAF Réunion, DEAL Réunion, etc. Le tableau 2 récapitule les données qui pourraient nourrir une étude de calcul des risques associés aux cyclones tropicaux. Les données disponibles au début de ce projet sont : les observations radar vent et pluie de Météo-France, la carte d'occupation des sols de 2016 à 2018 du CIRAD (<https://dataverse.cirad.fr/>, dernier accès le 23 janvier 2020), les résultats de simulations Méso-NH réalisées pour de nombreux cyclones tropicaux. Malgré les nombreux contacts établis aux niveaux académique et institutionnel, on ne peut que constater l'absence d'une plate-forme d'échanges de données spécialisées sur les

risques cycloniques et le peu de données récoltées plus spécifiquement aux niveaux écologique ou économique sur les passages des cyclones tropicaux à La Réunion. Il s'agit néanmoins d'une volonté forte de l'AGORAH qui met en place des outils qui permettrait d'identifier ce type de données et de les moissonner pour les déposer (ou les relier) sur une même plate-forme de données autour du risque à La Réunion. Il existe effectivement des plate-formes (par exemple <http://peigeo.re>) qui ont vocation à accueillir de telles cartes et des outils de planification spatiale (<https://www.seasketch.org/>) qui s'inscrivent dans une démarche d'étude des données spatialisées autour et sur La Réunion. Il est fort probable que les données associés aux risques cycloniques à La Réunion existent en dehors du milieu académique mais leur absence d'affichage, d'archivage ou simplement d'accès en fait des données inexploitées ou sous-exploitées à l'échelle de la recherche universitaire. Jusqu'à présent l'activité cyclonique a été surveillée de très près par Météo-France, ce qui permet d'avoir aujourd'hui de nombreuses informations sur la partie aléa (cf programme ReNovRisk-CYCLONES), les aspects vulnérabilité et exposition lors du passage de cyclones tropicaux sont beaucoup plus difficiles à examiner. Il apparaît important de faire un pont sur cette thématique avec les institutions et les assurances pour nourrir les études académiques sur le sujet. Cette démarche a été entamée lors de la construction du projet ReNovRisk et reste au cœur des différents programmes de ReNovRisk. Le passage de cyclones historiques nous a montré que le risque cyclonique existe bel et bien pour La Réunion, les données à notre disposition pour réaliser une évaluation spatialisée des risques cycloniques adaptée au territoire de la Réunion sont limitées. C'est pourquoi dans la section 5 (Perspectives), nous proposons quelques pistes de données à récolter pour pouvoir envisager une étude poussée sur le sujet sans l'utilisation d'une méthode non objective telle que l'AHP. Ce type d'étude permettrait d'identifier les zones où les risques associés aux cyclones tropicaux sont les plus importants et pourraient être utilisées par les pouvoirs publics pour mettre en place des mesures supplémentaires de réduction des risques.

Type de données	Disponibilité
Topographie	SRTM 90m DEM
Trajectoire des cyclones tropicaux	Base de données best-tracks du CMRS (Météo-France, données publiques)
Champs de vent (observés)	Stations Météo-France (données archivées) Radar Météo-France (données archivées)
Champs de vent haute résolution (simulés)	Simulations numériques Méso-NH (réalisées dans le cadre de RNR-CYCLONES par le LACy) pour plusieurs cyclones tropicaux (accès par GeOsur)
Champs de vent haute résolution	Méthode dite "de bogus" (cf section 2.2, accès par GeOsur)
Lames d'eau (observées)	Radar Météo-France (données archivées)
Lames d'eau haute résolution	Méthode de fusion de données

	(cf section 2.1, accès GeOsur)
Houle (observée)	Réseau de bouées CANDHIS (données archivées)
Houle (simulée)	Simulations numériques Wave Watch 3 (à réaliser) pour plusieurs cyclones tropicaux
Occupation des sols (La Réunion)	Cartes réalisées par le CIRAD pour 2016, 2017 et 2018 (données publiques)
Seuils de résistance au vent (écologique)	Pas d'identification de données récoltées à La Réunion
Seuils de résistance au vent (économique)	Pas d'identification de données récoltées à La Réunion
Dégâts (écologiques)	Outils de détection des changements sur images satellites suite au passage des cyclones en cours dans RNR-IMPACTS
Dégâts (économiques)	Pas de base de données archivées - Contact avec les assureurs en cours dans le cadre de RNR-IMPACTS
Vulnérabilité	Pas de donnée identifiée à l'échelle de l'île de La Réunion - Travail en cours dans le cadre de RNR-IMPACTS
Exposition	Pas de donnée identifiée à l'échelle de l'île de La Réunion - Travail en cours dans le cadre de RNR-IMPACTS
Densité de population	Source Insee FiLoSoFi 2015 (disponible sur Géoportail)
Infrastructures hospitalières	Disponible sur la plate-forme <i>peigeo</i>
Centres d'hébergement	Contacteur les municipalités

Tableau 2. Disponibilité de données spatialisées associées aux aléas cycloniques, à l'exposition, à la vulnérabilité du territoire réunionnais ainsi qu'à la prévention face aux cyclones tropicaux

L'approche méthodologique initialement prévue pour le calcul des risques était de déterminer une formulation adaptée au territoire de La Réunion des seuils de dégâts écologiques et économiques en croisant les dégâts historiques observés lors des cyclones récents ou pendant la période du programme avec des cartes de vent simulé. Pour traduire des niveaux de vents en risques écologiques, il est indispensable de connaître les seuils de résistance au vent de l'environnement et des actifs soumis aux cyclones tropicaux. Il existe dans la littérature des études sur la résistance aux vents cycloniques de certains types d'occupation des sols, de végétation ou de bâtiments. On notera par exemple le rapport détaillé du Dr Calvert sur la sensibilité et la résistance des arbres aux cyclones à partir des observations associées au cyclone tropical intense Yasi à Townsville le 2 février 2011 (Calvert, 2011). Ce rapport montre notamment que différentes espèces d'arbres induisent des niveaux de risque



différents. Mais il faut préciser que l'étude de la végétation doit être liée à son environnement, la différenciation entre végétation endémique et importée par exemple sera très importante dans la capacité à résister aux événements météorologiques. Il y a dans le domaine du bâtiment certaines études sur les dommages associés aux vents cycloniques. Tamura (2005) définit le type de dommages sur les bâtiments associés à des seuils de vents. L'approche voulue dans ReNovRisk-TRANSFERTS est une approche intégrée qui doit pouvoir prendre en compte l'aspect multifactoriel du risque cyclonique. Les résultats des études citées précédemment est lié à l'environnement et même parfois l'époque auxquels ils sont rattachés et ne peuvent être utilisés comme tel pour La Réunion. Après avoir dressé le bilan des données archivées connues et de la littérature spécifique à La Réunion, nous en sommes venus à la conclusion que nous ne disposons pas de seuils de résistance aux vents cycloniques de la végétation et des infrastructures calculés pour le territoire de La Réunion. La méthodologie initiale ne peut donc pas être déployée. En revanche, un certain nombre de données socio-économiques sont disponibles pour estimer les facteurs d'exposition et de vulnérabilité à La Réunion. Il s'agit du type de démarches entreprises dans les publications utilisant la méthode AHP pour l'étude du risque cyclonique citées précédemment. Nous avons donc décidé d'étudier la faisabilité d'une première étude des risques reprenant le schéma méthodologique cité précédemment.

### **3.3 Description de la méthodologie**

La méthodologie est basée sur celle de Hoque et al. (2018) schématisée par la figure 5. Elle reprend elle-même la méthode AHP développée dans les années 70 par Thomas Saaty. Ce processus de hiérarchie analytique (AHP) est une méthode d'organisation et d'analyse de décisions complexes. Le problème qui doit être résolu est posé ainsi que toutes les solutions possibles, appelées alternatives, et les critères sur lesquels ces alternatives seront jugées. L'AHP fournit un cadre rationnel (bases mathématiques) pour une décision nécessaire en quantifiant ses critères et les options alternatives, et pour relier ces éléments à l'objectif. Cette méthode a depuis été affinée et utilisée dans des domaines variés (planification des transports, fixation des prix...). En l'état, le lien avec l'établissement d'une carte de risques ne semble pas évident. L'application de la méthode AHP à la cartographie des risques cycloniques ne conduit pas à choisir entre plusieurs options finales, mais plutôt à manipuler la matrice des critères afin de calculer un poids d'importance relative pour chaque critère. En utilisant ces poids, nous serons en mesure de déterminer une carte globale des risques qui devrait être une représentation complète et cohérente de tous ces facteurs de risque. Les critères pouvant être par exemple : "risque de vents forts", "risque d'inondations", "absence ou présence d'abris anticycloniques".... Si il est facile de dresser une carte individuelle pour chacun de ces critères, nous avons besoin de la méthode AHP pour construire une carte représentant la combinaison de tous ces facteurs de risque. Avec ce type de carte, nous pourrions répondre à ce type de question, par exemple : "quelle zone est la plus sûre pour s'abriter en cas de cyclone ?". Dans la littérature, l'approche n'a pas été de dérouler la méthode jusqu'au choix des meilleures alternatives car il s'agissait avant tout de produire une carte de risque. Elle n'était pas utilisée dans un cadre décisionnel. On pourrait toutefois imaginer utiliser cette méthode pour définir les alternatives pour diminuer les risques. Cet aspect ne sera pas abordé dans ce rapport.

Les grandes étapes pour l'application de la méthode AHP dans le développement d'un outil de cartographie du risque cyclonique à La Réunion sont les suivantes :

#### A) Définition des critères et des sous-critères

Pour reprendre l'équation [2], les quatre critères pris en compte dans l'évaluation du niveau de risque sont : les aléas, l'exposition, la vulnérabilité et la prévention. Il faut définir les sous-critères qui vont influencer sur chacun de ces facteurs/critères. Notre choix se fait en se basant sur la littérature citée dans la section 3.1 et est détaillé dans le tableau 3.

Critères	Sous-critères
Aléas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Précipitations</li> <li>● Vitesse de vent</li> <li>● Houle</li> <li>● Occurrence des événements cycloniques</li> </ul>
Exposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Topographie</li> <li>● Occupation des sols</li> </ul>
Vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Densité de population</li> <li>● Proximité à la côte</li> <li>● Proximité au centre du cyclone</li> </ul>
Prévention	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Distance aux infrastructures hospitalières</li> <li>● Distance aux centres d'hébergement</li> <li>● Système de prévention cyclonique</li> </ul>

Tableau 3. Critères et potentiels sous-critères pour l'adaptation de la méthode AHP pour l'étude des risques cycloniques à La Réunion

Comme on a pu le voir dans la littérature, les critères peuvent changer d'une étude à l'autre. Il sera temps de réévaluer la pertinence de cette liste de sous-critères au regard de l'évaluation par les experts et des résultats. Il est possible que certains sous-critères manquent, c'est pourquoi il sera important de pouvoir valider les résultats en les comparant à des observations suite au passage de cyclones tropicaux.

#### B) Méthode de comparaison par paires

Après avoir défini ces critères et sous-critères, il faut comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau hiérarchique. L'importance relative est déterminée par l'échelle suivante :

Jugement	Valeur numérique
Extrêmement plus important	9
De très fortement à extrêmement plus important	8

Très fortement plus important	7
De très fortement à fortement plus important	6
Fortement plus important	5
De modérément à fortement plus important	4
Modérément plus important	3
D'importance équivalente à modérément plus important	2
D'importance équivalente	1

Tableau 4. Échelle d'importance relative adaptée de Saaty (2008)

Les comparaisons binaires sont réalisées par des experts du domaine de façon à produire des matrices de comparaison des paires. Voici une illustration très simple de la création d'une matrice de comparaison pour deux critères A et B. Si A est modérément plus important que B, la valeur numérique correspondante est 3 relativement à A et  $\frac{1}{3}$  relativement à B. On obtient alors :

	A	B
A	1	3
B	$\frac{1}{3}$	1

La matrice sera d'autant plus grande qu'il y aura de critères. Dans le cadre de notre étude, il y a deux niveaux hiérarchiques et 5 matrices de comparaison. La première évaluera l'importance relative des aléas, de l'exposition, de la vulnérabilité et de la prévention. Il y aura également un matrice de comparaison pour chacun de ces critères qui comparera l'importance relative des sous-critères. Les sous-critères d'une même cellule de la colonne de droite du Tableau 3 seront comparés entre eux pour leur influence sur le critère correspondant de la colonne de gauche.

#### C) Pondération des critères

Les priorités (poids) seront calculées de la façon suivante pour chaque matrice : 1) sommation des colonnes, 2) division de chaque cellule par la somme de la colonne correspondante et 3) moyenne de chaque ligne. Cette moyenne représente la valeur du poids associé au (sous-)critère de la ligne correspondante. Selon les études, la méthode mathématique pour calculer ces poids peut varier et donner des résultats légèrement différents.

#### D) Calcul d'un indice de cohérence

Un ratio est calculé à partir des valeurs propres de la matrice pour vérifier le degré de cohérence des jugements fournis par les experts. Si ce ratio est supérieur à 0.1, le

niveau est considéré comme trop incohérent.

#### E) Spatialisation des données

Les données permettant de quantifier les sous-critères définis à l'étape A ont été identifiées dans la section 3.2 (Tableau 2). Les données pour le critère "aléas" seraient : les champs de vent issus de la méthode dite "de bogus", les lames d'eau ANTILOPE, des données de houle issues de simulation Wave Watch 3 à réaliser pour cette étude et les données de best-tracks du CMRS qui permettent de calculer l'occurrence d'événements cycloniques; pour le critère "exposition" : SRTM pour la topographie et la carte d'occupation des sols du CIRAD; pour le critère vulnérabilité : les données de l'INSEE pour la densité de population, les best-tracks pour localiser la trajectoire du système et le SRTM pour définir la distance à la côte; pour la prévention : la plate-forme *peigeo* peut fournir les emplacements des hôpitaux, les informations sur les centres d'hébergement doivent être récoltées auprès des municipalités et les systèmes de prévention auprès de la préfecture. La grande majorité de ces données sont disponibles à l'échelle de La Réunion avec une résolution d'au moins 1 km<sup>2</sup>. Certaines informations demanderont un travail de cartographie (centres hébergements, distances...) pour obtenir une information à la résolution kilométrique. Il est important de choisir un format de données commun, nous proposons le format netcdf. Pour pouvoir être combinées par la suite, elles devront être interpolées sur une grille régulière.

#### F) Normalisation des données

Pour pouvoir être combinées, les données sont normalisées suivant l'équation suivante :

$$p = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad [3]$$

où  $p$  est la valeur normalisée,  $\min$  et  $\max$  représente les valeurs minimum et maximum pour chaque jeu de données et  $x$  la valeur.

#### G) Cartographie des risques

Les données spatialisées et normalisées correspondant aux sous-critères doivent être combinées en respectant la pondération établie par les experts et la méthode AHP. Le risque peut ainsi être calculé suivant l'équation [2] pour chaque point de grille afin de produire une carte sur La Réunion.

#### H) Validation des résultats

Même si la méthode ne prend en compte les résultats seulement s'il y a convergence des avis des experts, il est important de comparer les résultats à des observations pour évaluer l'apport de cette méthode.

L'application de cette méthode dans la mise en place d'un outil de cartographie

du risque cyclonique à La Réunion passe par le développement d'un code. Le rôle de ce code est de permettre la lecture des fichiers d'entrée (dans un format standard), le calcul des critères de poids (selon la méthode AHP) et le ratio de cohérence, le calcul matriciel pour la normalisation des données et la combinaison des cartes et enfin la production d'une carte de risque. La spécificité de ce code est l'application de la méthode AHP. Il existe déjà des modules codés en python reprenant cette méthode et permettant ainsi de calculer le poids des critères et des sous-critères à partir de l'évaluation des experts. Il faut avoir en tête que la méthode AHP peut être utilisée dans de nombreux domaines. Il s'agira donc d'adapter la méthode et ce module à l'étude du risque cyclonique. L'autre spécificité de cet outil est la combinaison de cartes, car il faut traiter une donnée spatialisée. Sous python, on pourra utiliser un outil de sauvegarde et de relecture d'objets matriciels ainsi qu'un interpréteur de calcul matriciel qui faciliteront les calculs et donc la combinaison des cartes. Ce code python devrait permettre de lire les données citées ci-dessus et de les traiter afin de produire des cartes de niveaux d'aléas, d'exposition, de vulnérabilité, de prévention et surtout une carte du risque cyclonique à l'échelle du territoire. Nous nous proposons de tester cet outil sur un ou deux cas d'étude.

### 3.4 Choix des cas d'étude

Par définition, on considère qu'un cyclone tropical a atterri (caractérisé comme "landfall cyclone" dans la littérature) lorsque le centre du cyclone croise la côte (NHC, 2019). L'étude de Weinkle et al. (2012) a dressé un état des lieux des cyclones ayant atterri sur les terres à l'échelle globale. Pour l'hémisphère sud, la période couverte est 1970-2010. Les résultats montrent que dans le bassin sud-ouest océan Indien (SOOI), Madagascar et la côte africaine sont majoritairement touchées. En revanche, en se basant sur cette définition, aucun cyclone tropical ne peut être considéré comme ayant atterri sur l'île de La Réunion ou encore sur l'île Maurice. On notera aussi, sur cette étude, que pour l'analyse des résultats les deux bassins de l'hémisphère sud sont traités et considérés comme une seule catégorie ("SH") alors que chaque bassin de l'hémisphère nord est différencié. L'étude de Leroux et al. (2018), se focalisant sur le bassin SOOI et allant jusqu'en 2016 arrive à la même conclusion sur l'absence de "landfall cyclone" sur La Réunion. En revanche, cette étude ne s'arrête pas sur cette définition d'atterrissage et différencie les cyclones tropicaux comme relevant de deux catégories : "impact direct" (répondant à la définition de "landfall cyclone" du NHC) ou "menaces" (le centre du cyclone passe à moins de 100 km de la côte). S'il n'y a pas de tempête au stade de cyclone tropical ayant touché directement La Réunion, il y a eu 3 menaces entre 1999 et 2016 (Leroux et al., 2018). Ces études se sont focalisées sur le passage des cyclones sur ou à moins de 100 km des terres, de nombreux exemples dans le SOOI ont cependant montré qu'un cyclone tropical dont le centre était passé à une plus grande distance pouvait avoir impacté économiquement et/ou écologiquement les territoires. Parmi eux, on peut citer Gamède en 2007 ou encore Dumile en 2012 sur La Réunion. L'étude de Leroux et al. (2018) prend aussi en considération des systèmes cycloniques à des stades moins intenses que cyclone tropical. On dénote aussi historiquement des systèmes n'ayant pas atteint le stade de cyclone tropical mais ayant fait des dommages conséquents. En 2018, Berguitta au stade de forte tempête tropicale passe à côté de La Réunion et entraîne d'importantes inondations à La Réunion.

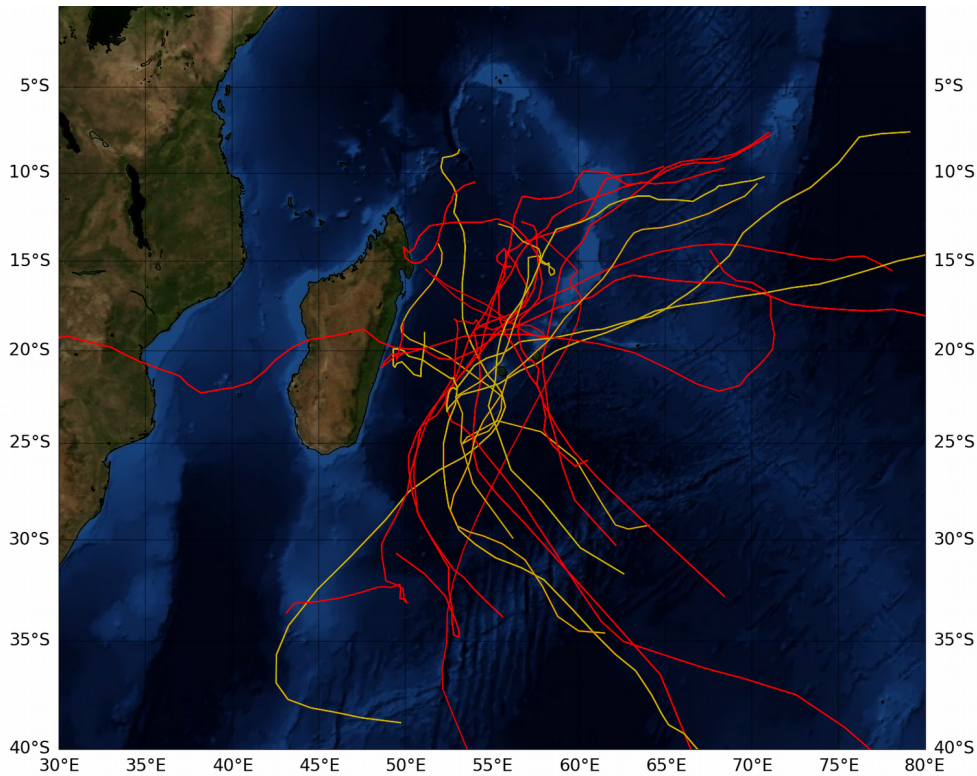


Figure 6. Trajectoires des cyclones tropicaux dont le centre est passé à moins de 250 km de La Réunion au stade de tempête ou de cyclone entre 1992 et 2016. En rouge, ceux dont le centre est passé entre 100 et 250 km et, en jaune, ceux dont le centre est passé à moins de 100 km. Données : Best-tracks CMRS Réunion.

Dans le cadre de l'action 1 de ReNovRisk-TRANSFERTS se focalisant sur La Réunion et des collaborations avec ReNovRisk-IMPACTS qui étudie à la fois La Réunion et Madagascar, nous avons interrogé la base de données CMRS (Centre Météorologique Régional Spécialisé) de La Réunion entre 1970-2016 (détails sur ces données Météo-France disponible dans Leroux et al. 2018) afin d'identifier les systèmes cycloniques (a minima forte tempête tropicale) étant passés directement sur les territoires ou dont le centre se situait à moins de 250 km des côtes. La figure 6 présente la trajectoire des systèmes cycloniques dont le centre est passé à moins de 250 km de La Réunion (au stade de tempête ou de cyclone, selon les critères du CMRS de la Réunion) entre 1992 et 2016. On comptabilise 7 systèmes (dont 5 au stade de cyclone) dont le centre est passé à moins de 100 km de La Réunion, mais aucun ayant formellement atterri. L'utilisation de la méthode dite "de bogus" est d'autant plus pertinente pour La Réunion car lorsque le cyclone est à un stade suffisamment important, les informations sur la position du centre du système et sur le rayon de vent maximum sont disponibles permettant l'application de la méthode dite "de bogus" et donc la production de champs de vent à haute résolution. On peut voir sur la figure 6 qu'il y a un nombre non négligeable de systèmes étant passés à proximité de La Réunion. On constate que si les cyclones tropicaux arrivent principalement par le nord, ils passent parfois directement par le sud. Leur passage à proximité de La Réunion se fait aussi bien par l'est, que par l'ouest. On peut donc

s'attendre à ce que les risques présentés soient répartis différemment sur l'île en fonction de la trajectoire car il y a une grande variété de trajectoires. C'est pourquoi il est important de pouvoir produire une information spatialisée. Le territoire étant relativement petit et complexe (présence de ravines...), il faut des données à haute résolution spatiale. C'est pourquoi les développements présentés dans la section 2 étaient importants. La figure 6 qui illustre les données archivées au CMRS montre une surveillance importante et longue de l'activité cyclonique dans le bassin ce qui offre un large choix de cas d'étude potentiels.

A terme, il faudra évaluer l'outil pour différents types de cyclones car comme le montrent les statistiques ci-dessus, certains passent à l'ouest, d'autres à l'est. La base de données montre aussi que certains présentent des vents très intenses là où d'autres seront caractérisés par leurs fortes précipitations. Pour tester cet outil, nous proposons d'étudier les cyclones Bejisa (décembre 2013) et Berguitta (janvier 2018). Ce sont des cyclones importants étudiés dans le cadre de travaux sur l'exposition et la vulnérabilité dans le cadre de ReNovRisk-IMPACTS, ces travaux pourraient donc être complémentaires.

### **3.5 Discussion**

L'état des lieux des données disponibles sur les dommages associés au passage des cyclones tropicaux à La Réunion a montré que la quantité de données à disposition n'était pas suffisante à l'heure actuelle pour répondre à l'objectif initial du développement d'un outil de cartographie objective. En revanche, il existe suffisamment de données sur les aléas cycloniques et de données socio-économiques générales sur La Réunion pour envisager l'utilisation de la méthode AHP. Cette méthodologie issue du domaine des Sciences Humaines et Sociales a été utilisée avec succès dans la littérature pour produire des cartes de risques cycloniques. Nous proposons donc de tester cette méthode en mettant en place un outil informatique de cartographie du risque cyclonique à La Réunion basée sur la méthode AHP. En plus des données objectives citées ci-dessus, cette méthode fait appel à un panel d'experts qui doit évaluer individuellement l'importance de la contribution des données les unes par rapport aux autres sur le calcul du risque. Si cette méthode n'est donc pas complètement objective, la méthode AHP propose des calculs mathématiques qui vérifient la convergence des avis des experts et donc la fiabilité des résultats. Les résultats de ces cartes de risques devront aussi être validés en les comparant à des observations après le passage des cyclones.

Dans le temps imparti au projet, nous avons réalisé une étude préliminaire de la faisabilité du développement de cet outil. La demande de financement portait initialement sur un recrutement de 2 ans mais il a été réduit au cours de la procédure. La finalisation de cette étude (notamment le développement algorithmique, le test et la validation de l'outil) pourrait être envisagée dans la continuité du programme ReNovRisk ou sur des appels à projet pluridisciplinaire tel que l'AAP de la fédération OMNCG (Université de la Réunion).

## 4. Conclusions

Dans le cadre de ReNovRisk-TRANSFERTS, des méthodes ont été mises en place pour produire des données météorologiques à haute résolution lors du passage des cyclones tropicaux à proximité ou sur l'île de La Réunion. Concernant le vent, la méthode dite "de bogus" a été déployée pour le programme ReNovRisk et permet la production de champs de vent à 500 m de résolution sur La Réunion au passage des cyclones tropicaux. Concernant les précipitations, une base de données de lames d'eau, ANTILOPE, a été spécialement produite pour La Réunion et couvre la période de décembre 2013 à décembre 2019 (par pas de 15 minutes et avec une résolution spatiale de 1 km<sup>2</sup>). Ces données de précipitations ne ciblent pas seulement les événements cycloniques, elles permettent d'en évaluer le caractère exceptionnel. Ces données seront exploitées par les autres programmes de ReNovRisk comme données d'entrée pour des modèles hydrologiques et des modèles économétriques.

Nous n'avons identifié aucune archive sur les dégâts écologiques ou économiques associés au passage de cyclones historiques, ni l'existence d'un outil de cartographie du risque cyclonique à La Réunion. Aucune donnée clef en main sur l'exposition ou la vulnérabilité n'a été identifiée. L'état des lieux des données spatialisées sur La Réunion a mis en évidence : l'accès à des données météorologiques et océanographiques lors du passage des cyclones tropicaux. La plate-forme *peigeo* et d'autres portails institutionnels fournissent des données socio-économiques spatialisées (mais non spécifiques aux cyclones tropicaux). En sachant qu'au sein de la communauté réunionnaise, il y a de nombreux experts sur le risque cyclonique dans des domaines divers (écologie, économie, météorologie, hydrologie...), l'utilisation d'un outil de cartographie du risque cyclonique basé sur la méthode AHP est envisageable. La faisabilité d'un tel outil a été étudiée dans le cadre de ce projet. L'identification de certains outils de programmation et la disponibilité des données d'entrée nécessaires, nous laisse penser que le développement d'un tel outil est pertinent. Les cartes produites avec cet outil pourront ensuite être comparées aux résultats des autres programmes de ReNovRisk (notamment ReNovRisk-IMPACTS) sur la détection des changements suite au passage des cyclones tropicaux à partir de chaînes de traitement d'images satellites ou encore l'estimation de l'exposition et de la vulnérabilité à partir de données socio-économiques fines sur des régions spécifiques de La Réunion.

Les données produites dans le cadre de ReNovRisk-TRANSFERTS ont été mises en open access sur la plate-forme GeOsuR et les méthodologies employées sont documentées dans ce rapport et dans une note technique, rendus accessibles grâce à la plate-forme HAL.

Ces résultats n'auraient pas été possibles sans une animation transverse des différents programmes de ReNovRisk. Ces résultats sont le fruit d'échanges de données et d'expertises entre les collaborateurs (cités au tout début de ce rapport) issus des domaines suivants : météorologie, climatologie, économie, environnement, télédétection, informatique... Ils ont fait émerger des discussions sur la sémantique indispensable au travail collaboratif et la rédaction d'un article pluridisciplinaire de présentation générale de ReNovRisk (Tulet et al., en préparation). Cette approche



intégrée a aussi permis la rédaction d'un article transdisciplinaire sur l'impact des cyclones tropicaux à Madagascar sous l'approche démographique (Fontaine et al., en préparation). Cette dynamique multi-laboratoire est à maintenir à l'avenir pour pousser les investigations sur le risque cyclonique à La Réunion.

## **5. Perspectives**

Le constat est le manque de données sur les dommages induits par le passage des cyclones à proximité ou sur La Réunion, qu'il s'agisse de données économiques ou écologiques. Des études de terrain menées par le milieu académique et les diverses institutions tournées vers l'environnement à La Réunion apporteraient des informations clés sur les dégâts associés aux cyclones tropicaux. Des conventions entre les assurances et le milieu académique permettraient d'avoir des informations sur les dégâts économiques. Nous suggérons fortement que lors des journées de restitution du programme ReNovRisk soient engagées des discussions entre les acteurs académiques du programme et les institutions ainsi que des acteurs clés du domaine privé pour l'utilisation d'outils de centralisation des données associées au risque cyclonique à La Réunion. Ces données doivent être référencées, archivées et rendues accessibles. Ce type de base de données permettrait la mise en place de nouvelles études de cartographie objective du risque cyclonique à La Réunion. La multiplication des sources de données permettrait de préciser les résultats en ciblant différents types d'utilisateurs dans la prévention du risque. L'évaluation des risques est importante pour la prévention, la mise à l'abri de la population et des biens est l'élément clé et elle concerne de nombreux domaines (bâtiment, agriculture, tourisme, assurance, écologie...).

## **Remerciements**

Tous les collaborateurs du projet pour leur accompagnement technique ou scientifique. Marie-Dominique Leroux pour son aide sur l'analyse de la base de données CMRS de Météo-France. Dominique Strasberg pour son expertise scientifique sur les potentiels impacts écologiques associés au passage des cyclones tropicaux sur La Réunion. Emmanuel Cordier pour son expertise sur les données de houle à La Réunion.

# Livrables

## L1.1 Présentation synthétique des capacités de l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère) à mesurer les aérosols et les nuages à La Réunion

Ce poster est disponible sur la plate-forme en ligne HAL ([lien](#)).

**8<sup>th</sup> International EarthCARE Science Workshop**  
25-27 November 2018, FIAKUJKA

### PROFILING OF AEROSOLS AND CLOUDS IN REUNION ISLAND (21°S, 55.5°E)

Hélène Vérémes<sup>1,2\*</sup>, Valentin Duffot<sup>1,2</sup>, Nelson Bègue<sup>1</sup>, Guillaume Payen<sup>2</sup>, Nicolas Marquestaut<sup>2</sup>, Olivier Bousquet<sup>1</sup>, Jean-Pierre Cammas<sup>1,2</sup>, Alain Hauchecorne<sup>1</sup>, Sergey Khaykin<sup>2</sup> and colleagues from LACy<sup>3</sup>, UMS<sup>3</sup> and LATMOS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMRS103, CNRS, Université de La Réunion, Meteorologie, Saint-Denis, La Réunion, France, <sup>2</sup>Observatoire des Sciences de l'Univers de La Réunion, UMS3305, Saint-Denis de la Réunion, France, <sup>3</sup>Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales-IPSL, UMR 8150, UVSQ Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS, Guyancourt, France.


\*Email: helene.veremes@univ-reunion.fr

---

#### ATMOSPHERIC PHYSICS OBSERVATORY OF REUNION ISLAND

**• Presentation**

The Atmospheric Observatory of Reunion Island is a permanent station for long term atmospheric observations. It is composed of a high altitude facility (the Maïdo Observatory, Buryat et al., 2013) and coastal sites of measurement in the north of the island.



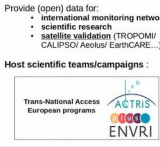
**• Objectives**

Be a permanent station for long term atmospheric observations: dynamics and chemistry of the low and middle atmospheres in the context of climate change in the Southern Hemisphere

Provide (open) data for:

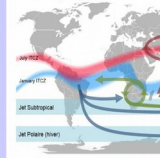
- International monitoring networks (IRI)
- scientific research
- satellite validation (TROPOMI, CALIPSO, Aeolus, EarthCARE...)

Host scientific teams/campaigns:



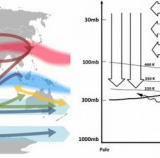
#### CONTEXT

**• Free troposphere**



- Austral biomass burning season
- Long-range transport
- Active volcano
- Cyclone-tropical storms
- Heavy rainfall

**• Tropical tropopause layer**



- Stratosphere-troposphere exchanges (STE)
- Cirrus clouds
- Volcanoes (long-range)
- Deep convection
- Cyclones

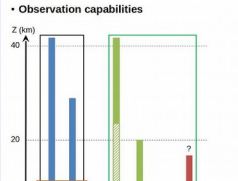
---

#### PROFILING OF AEROSOLS

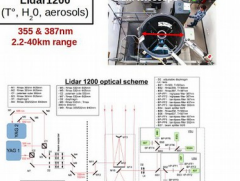
Reunion Island is located in a « clean » area, i.e. the AOD is low, but, during the biomass burning season in the Southern Hemisphere, the AOD doubles. The Indian Ocean region is a difficult area for satellite sensing, it is necessary to make ground-based observations.

**• Observation capabilities**

**Lidar1200** (T<sub>a</sub>, H<sub>2</sub>O, aerosols)  
355 & 387nm  
2.2-40km range




**LIOST** (O<sub>3</sub>, aerosols) 532 (L & R), 607 & 1064nm  
6-40(20)km range



**• LOAC (Light Optical Aerosols Counter)**

LOAC flights at Reunion Island since 2014:




LEFE SATORI project (N. Bègue): LOAC soundings collocated with CALIPSO

#### PROFILING OF CLOUDS


There are on average 9.3 systems/year and 4.7 cyclones/year in the southwest Indian Ocean. Reunion Island holds several world records for precipitation.

**• Observation capabilities**


**MARLEY** Mobile Aerosol Raman Lidar for Tropospheric survey  
Leosphere ALS450 + Raman N<sub>2</sub> channel  
Full overlap at ~150m / fully automated



**Radar BASTA**



**Ceiliometer**



**Doppler radar 95GHz**  
12.5, 25, 100 and 200m modes  
6-12km range

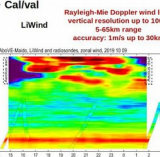
**Campbell CS135**  
905nm  
5m resolution  
10km range

Collocated with: AERONET sunphotometer and BASTA cloud radar

#### TRACE GASES AND WIND OBSERVATION CAPABILITIES

**• Cal/val**

**Rayleigh-Mie Doppler wind lidar**  
Vertical resolution up to 300m  
accuracy: 1m/s up to 300m



**AEOLUS cal/val campaign at the Maïdo Observatory: 16 September to 11 October 2019**

**• Overview**

Maïdo Observatory	Unit	Code	LOAC sondes
Lidar O3S	FTIR	ORIS	LOAC sondes
Lidar O3T	Scatterometer	M30 sondes - O <sub>3</sub> , ECC	
Lidar L200	GPS		
Wind lidar	Aethalometer		
IR radiometer	Chemical filters		
GC	GC		
GNSS	New analyzer		
UV camera	O <sub>3</sub> analyzer		UV spectrometer
IR Ray	SO <sub>2</sub> analyzer		
WVIRAN antenna	Picarro 4 gases	SAOZ	Mini SAOZ
Influenced station	Picarro water isotopes	CIBEL	BASTA radar
CO2S	Automated collection		
Pressure station	Visible camera	MARLEY	Doppler radar
Collocated sondes	CH <sub>4</sub> sondes	Micro HPS	Metasonic station
ORIS	MAX-OASIS	Picarro 3 gases	

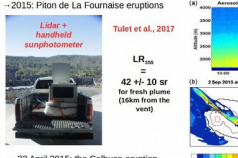
---

#### 2015: Piton de La Fournaise eruptions

Tulet et al., 2017

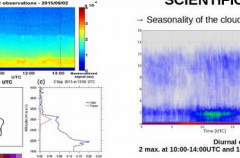
LR<sub>100</sub> = 42 ± 10 sr for fresh plume (15km from the vent)

22 April 2015: the Calbuco eruption



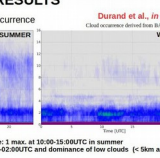
Bègue et al., 2017

Transient behavior of the aerosol layers (Reunion Island, May-July 2015) reflects inhomogeneous spatio-temporal distribution of the plume (controlled by the localization of the dynamical barriers)



#### SCIENTIFIC RESULTS

Seasonality of the cloud occurrence

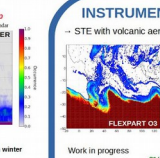


Durand et al., in prep

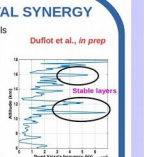
Cloud occurrence derived from CALIPSO

2 max. at 10:00-14:00UTC and 16:00-20:00UTC and dominance of low clouds (< 5km a.s.l) in winter

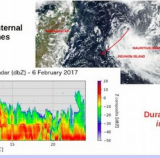
Observations of the tropical storm CARLOS



Sampling of external and internal bands of tropical cyclones



Reflectivity from BASTA cloud radar (B&Z - 6 February 2017)



Durand et al., in prep

---

#### SUMMARY AND FUTURE DIRECTIONS

##### Atmospheric Physics Observatory of Reunion Island:

- Great capabilities for aerosols and clouds profiling (see new papers pointing out in our measurements)
- Working on the use of (brand new) multi-lidar signals for aerosols characterization
- Contribution objectives within EarthCARE:
  - Routine Multi-lidar observations for aerosols characterization in a sparsely documented region:
    - 532 (L & R) + 1064 → CALIPSO v4; 355-387 → Aeolus & EarthCARE
    - Measuring the visible and UV channels operating simultaneously can also contribute to evaluate the effect of the wavelength change between CALIPSO (visible) and EarthCARE (UV).
  - CALIPSO/EarthCARE collocated LOAC soundings
  - Routine BASTA measurements
  - Radiar/lidar synergy

#### REFERENCES

Buryat et al. (2013). Mobile observatory in new high altitude station facility at Reunion Island (21°S, 55°E) for long term atmospheric ozone sensing and photo measurements. *AMT*, 6, 3085-3097

Bègue et al. (2017). Long range transport of atmospheric aerosols in the Southern Hemisphere following the 2015 Calbuco eruption. *ACP*, 17, 2425-2436

Tulet et al. (2017). First results of the Reunion Island Troposphere STRAP 2015 experiment: radiative cooling tracing of volcanic gas and aerosol plume. *ACP*, 17, 5285-5310

The lidar data can be found at the CNRS Observatoire de l'Atmosphère de La Réunion web portal: <http://univ-reunion.fr/>. Please contact us at [univ-reunion@univ-reunion.fr](mailto:univ-reunion@univ-reunion.fr) to obtain data described here if requested.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the European Commission (the Reunion Island, CNRS, and University of La Réunion) for their support and contribution in the construction phase of the research infrastructure OPAR. OPAR is primarily funded by the CNRS (IPSL) and University of La Réunion and supported by CNRS (Observatoire des Sciences de l'Univers de La Réunion, UMS3305), the National Geographic Society (Dr. Charles Frankignoul and Louis Mallet, who are strongly involved in the ongoing data observations of the station by the International Geosphere-Biosphere Programme, the French Government (IPSL-UMR 8150), the French National Centre for Scientific Research (CNRS), the French Government (IPSL-UMR 8150), the University of La Réunion, the National Centre for Scientific Research (CNRS), the French Government (IPSL-UMR 8150), the University of La Réunion, the National Centre for Scientific Research (CNRS), the French Government (IPSL-UMR 8150), and the French Government (IPSL-UMR 8150).

## L1.2 Fourniture de données en accès libre : lames d'eau à La Réunion

Fiche pratique

Produit ANTILOPE (source Météo-France)

Couverture temporelle : déc. 2013 - déc. 2019

Couverture spatiale : La Réunion

Résolution spatiale : 1 km<sup>2</sup>

Résolution temporelle : 15 min

Accès ouvert aux données :

- Jeu de données sur Bejisa : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/inventaire/> (mots-clefs : ReNovRisk, précipitations, ANTILOPE, cyclones tropicaux, Bejisa), téléchargeable à l'adresse suivante : [http://geosur.univ-reunion.fr/thredds/fileServer/Open-Access/antilope/bejisa/ANTILOPE\\_15MN\\_CLIM\\_BEJISA.nc](http://geosur.univ-reunion.fr/thredds/fileServer/Open-Access/antilope/bejisa/ANTILOPE_15MN_CLIM_BEJISA.nc)
- Jeu de données sur Berguitta : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/inventaire/> (mots-clefs : ReNovRisk, précipitations, ANTILOPE, cyclones tropicaux, Berguitta), téléchargeable à l'adresse suivante : [http://geosur.univ-reunion.fr/thredds/fileServer/Open-Access/antilope/berguitta/ANTILOPE\\_15MN\\_CLIM\\_BERGUITTA.nc](http://geosur.univ-reunion.fr/thredds/fileServer/Open-Access/antilope/berguitta/ANTILOPE_15MN_CLIM_BERGUITTA.nc)

Contact : francois.bonnardot@meteo.fr

### L1.3.1 Outil de cartographie des risques associés aux cyclones tropicaux pour La Réunion

Ce travail préliminaire à la mise en place d'un outil de cartographie est décrit dans ce rapport qui est disponible sur la plate-forme en ligne HAL.

### L1.3.2 Fourniture de données en accès libre : production de champs de vent associés à l'atterrissage des cyclones tropicaux sur La Réunion. Note technique de la méthode dite "de bogus"

Ces données ont été produites pour différents systèmes tropicaux du bassin sud-ouest océan Indien et sont en accès libre sur GeOsur à l'adresse suivante : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/inventaire/> (mots-clefs : ReNovRisk, bogus, cyclones tropicaux).



## Application de la méthode dite “ de bogus ” dans le programme ReNovRisk-TRANSFERTS

Hélène Vérèmes

► **To cite this version:**

Hélène Vérèmes. Application de la méthode dite “ de bogus ” dans le programme ReNovRisk-TRANSFERTS. [Rapport Technique] Université de La Réunion; Région Réunion. 2020. hal-02956116

**HAL Id: hal-02956116**

**<https://hal.univ-reunion.fr/hal-02956116>**

Submitted on 5 Oct 2020

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

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

---

## Note technique

### Application de la méthode dite « de bogus » dans le programme ReNovRisk-TRANSFERTS

---

Hélène Vérèmes  
Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion  
(UMS3365/INSU-CNRS/Université de La Réunion)  
Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones  
(UMR8105/CNRS/Météo-France/Université de La Réunion)  
Contact : helene.veremes@univ-reunion.fr

Date de rédaction : août 2020  
DOI : 10.26171/6n33-xe98





## Cadre et objectifs

L'un des livrables du projet ReNovRisk-TRANSFERTS est la production de champs de vent haute résolution des cyclones tropicaux à l'approche de La Réunion afin de servir de données d'entrée à des études sur la cartographie des risques liés au vent. Cette note technique décrit l'application de la méthode dite « de bogus » avec le modèle Més0-NH pour la production de ces données.

## Présentation de la méthode dite « de bogus »

Depuis 2007, Aladin-Réunion (modèle de prévision de Météo-France à La Réunion jusqu'en 2016) assimilait un bogus de vent qui corrigeait le cyclone dans l'analyse (position, intensité, structure). L'initialisation des cyclones tropicaux était réalisée via un bogus des observations de vent depuis la surface jusqu'à 500 hPa déduites du modèle analytique de Holland, un facteur d'atténuation est appliqué avec l'altitude. La sensibilité de la prévision d'intensité et de trajectoire d'un cyclone à la structure initiale du cyclone a par ailleurs été mise en évidence. Nuissier et al. (2005) et Leroux (2012) ont montré la nécessité d'enrichir les méthodes de bogus ou de pouvoir assimiler des observations informatives sur la structure d'un cyclone. Une méthode dite « de bogus » a été mise en place dans le cadre du programme SPICy (Système de Prévision des Inondations Côtières et fluviales en contexte Cyclonique) non pas pour initialiser le système dans le cadre d'une simulation numérique "longue" mais seulement d'une adaptation dynamique rapide. Les contraintes pour le calcul des conditions de vent pour la prévision opérationnelle sont : la cohérence vis-à-vis des caractéristiques de position et d'intensité du phénomène, la prise en compte de l'environnement de grande échelle et des contraintes locales, ainsi qu'un temps de réponse compatible avec une utilisation opérationnelle. L'approche paramétrique de Holland ne répondait qu'à la première contrainte. C'est pourquoi une approche dynamique utilisant le modèle Més0-NH a été testée. Cette méthode fonctionne sur une fonction bogus et un couplage avec le modèle IFS du centre européen. Les résultats des tests de sensibilité menés sur 5 cyclones historiques (Bejisa, Dumile, Felleng, Gamède et Dina) ont montré que la structure reproduite est réaliste dès lors que l'information sur le rayon des vents maximum injectée dans le bogus est pertinente. Les résultats des comparaisons entre ces champs de vent reconstitués par la méthode dite « de bogus » et les observations in situ montrent un bon accord en affinant la résolution horizontale du modèle.

## Modèle

Le modèle utilisé est le modèle Més0-NH version 5.3-1 (téléchargeable [ici](#)). La documentation est disponible à l'adresse suivante : <http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh53/BooksAndGuides>. Le modèle tourne en version USER. Le fichier ini\_cpl.f90 des sources MASTER a été modifié ainsi :

```
Modification du fichier : ini_cpl.f90, ajout l. 378 :  
IF ( ZDIST == 0. ) THEN
```

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```
ZDIST=6*3600.  
END IF
```

## Données d'entrée

La simulation numérique nécessite les fichiers suivants en entrée :

### → Fichiers de surface

- SAND\_HWSD\_MOY.dir ([lien de téléchargement](#))
- SAND\_HWSD\_MOY.hdr ([lien de téléchargement](#))
- gtopo30.dir ([lien de téléchargement](#))
- gtopo30.hdr ([lien de téléchargement](#))
- ECOCLIMAP\_v2.0.dir ([lien de téléchargement](#))
- ECOCLIMAP\_v2.0.hdr ([lien de téléchargement](#))
- CLAY\_HWSD\_MOY.dir ([lien de téléchargement](#))
- CLAY\_HWSD\_MOY.hdr ([lien de téléchargement](#))

### → Données best-tracks (évolution des caractéristiques des cyclones tropicaux le long de leur trajectoire)

- Nom : FicTRAJ  
Paramètres : date (sous la forme yyymmddhh, respectivement année, mois, jour, heure UTC), latitude, longitude, vent max et rayon de vent max  
Format : texte, pas d'en-tête, une ligne par date, séparateur ';', NaN = -999  
Source : best-tracks CMRS Météo-France

Exemple (extrait du fichier de trajectoire du cyclone Enawo) :

```
2017030200;62.79;-11.01;20;-999  
2017030206;61.37;-11.44;20;-999  
2017030212;60.06;-11.8;20;-999  
2017030218;58.87;-12.15;22;-999  
2017030300;57.96;-12.43;25;-999  
2017030306;57.09;-12.65;30;-999  
2017030312;56.61;-12.78;32;-999  
2017030318;56.42;-13.02;38; 37  
2017030400;56.49;-13.24;42;26  
2017030406;56.89;-13.44;45;22  
[...]
```

### → Données du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen-Terme (CEPMMT)

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

- Nom : ecmwf.OD.yyyymmdd.hh  
 Format : GRIB  
 Champs de surface : orographie, masque terre/mer, température de surface et humidité, température et humidité dans le sol (sur 4 niveaux de profondeur)  
 Champs de niveaux modèle : pression de surface, U,V, T,Q, orographie au 1<sup>er</sup> niveau  
 Champs de niveaux modèle dans l'hémisphère sud : traitement spécial pour l'extraction d'une zone limitée

Exemple de requête MARS pour extraire les champs du 2 mars 2017 sur le domaine (5°N-45°S;30°E-90°E) sur le serveur du CEPMMT :

<pre># #SurFaCE fields: Orography, Land/Sea mask # RETRIEVE, CLASS=OD, STREAM=OPER, EXPVER=1, TYPE=AN, LEVTYPE=SFC, LEVELIST=OFF, REPRES=GG, DATE=20170302, TIME=00, TARGET=ecmwf.OD.20170302.00 .00, FORMAT=P, AREA=5./30./-45./90., GRID=.1/.1, PARAM=Z/LSM/SLT # # SurFaCe fields: # RETRIEVE, CLASS=OD, STREAM=OPER, EXPVER=1, TYPE=AN, LEVTYPE=SFC, LEVELIST=OFF, REPRES=GG, DATE=20170302, TIME=00, STEP=00, TARGET=ecmwf.OD.20170302.00 .00, FORMAT=P, AREA=5./30./-45./90., GRID=.1/.1,</pre>	<pre>PARAM=139/141/170/183/236/ 39/40/41/42/148 # # Model Levels fields: surface pressure, U,V,T (and Q) # RETRIEVE, CLASS=OD, STREAM=OPER, EXPVER=1, TYPE=AN, LEVTYPE=ML, LEVELIST=ALL, REPRES=SH, RESOL=AUTO, DATE=20170302, TIME=00, STEP=00, TARGET=ecmwf.OD.20170302.00 .00.GG, FORMAT=P, AREA=G, GRID=O1280, PARAM=LNSP/U/V/T # # Model Levels field: Q # RETRIEVE, CLASS=OD, STREAM=OPER, EXPVER=1, TYPE=AN, LEVTYPE=ML, LEVELIST=ALL, REPRES=GG, DATE=20170302, TIME=00, STEP=00,</pre>	<pre>TARGET=ecmwf.OD.20170302.00 .00, AREA=5./30./-45./90., GRID=.1/.1, FORMAT=P, PARAM=Q # # Model Levels field: orography at 1st level # RETRIEVE, CLASS=OD, STREAM=OPER, EXPVER=1, TYPE=AN, LEVTYPE=ML, LEVELIST=1, REPRES=SH, RESOL=AUTO, DATE=20170302, TIME=00, TARGET=ecmwf.OD.20170302.00 .00.GG, FORMAT=P, AREA=G, GRID=O1280, PARAM=Z # # Model Levels fields in SH: special treatment for limited area extraction # READ, SOURCE=ecmwf.OD.20170302.00 .00.GG, AREA=5./30./-45./90., GRID=.1/.1, TARGET=ecmwf.OD.20170302.00 .00</pre>
---	---	--



## Étapes de simulation : namelists MésO-NH

Le schéma ci-dessous récapitule les fichiers d'entrée et de sortie, les différentes étapes MésO-NH et les liens entre elles pour produire un champ de vent sur La Réunion calculé par la méthode dite « de bogus » à 2 km et 500 m de résolution horizontale à partir de champs ECMWF décrits dans la partie précédente et pour une échéance horaire donnée sous la forme année (yyyy) mois (mm) jour (dd) et heure UTC (hh).

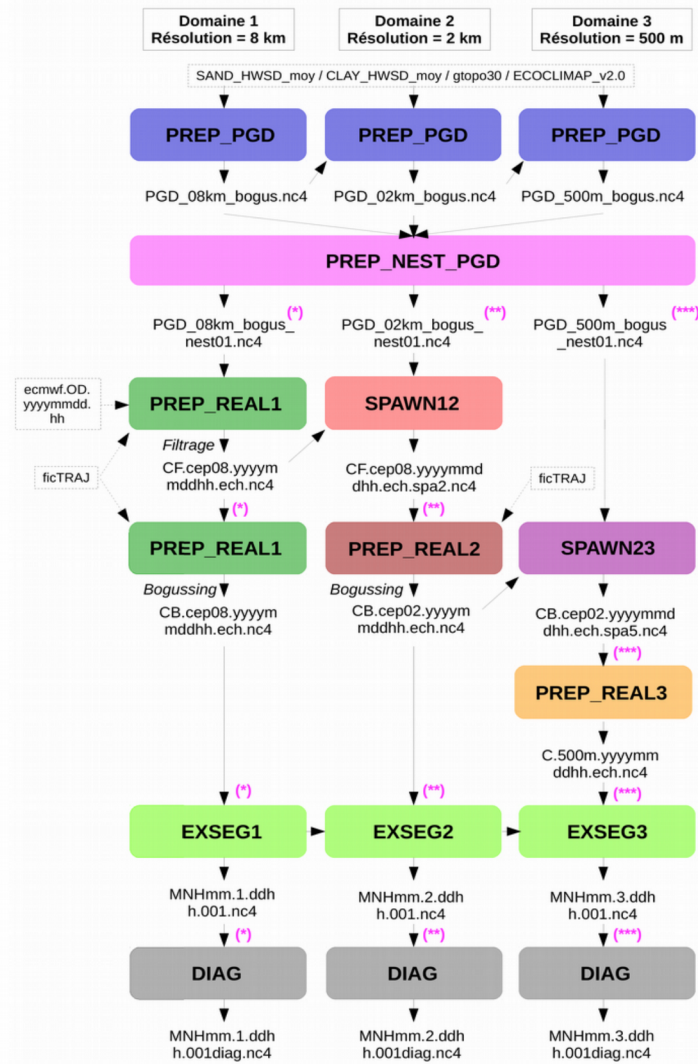


Schéma récapitulatif des étapes d'un run MésO-NH pour appliquer la méthode dite "de bogus" sur La Réunion pour une échéance donnée

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

Le détail des namelists pour chaque étape représentée ci-dessus est donné dans les sous-parties suivantes.

## 1. Préparation des fichiers physiographiques (PREP\_PGD)

Les fichiers physiographiques sont moyennés ou interpolés sur la grille Méso-NH par le programme PREP\_PGD (cf namelists ci-dessous). Le programme est lancé 3 fois (afin de produire un PGD pour chaque domaine). Il est nécessaire que les fichiers de surface (cités précédemment) se trouvent dans le répertoire où le programme est lancé. Si ce n'est pas le cas, créer un ou plusieurs liens vers les répertoires où se trouvent ces fichiers de surface.

### NAMELISTS

Consigne : Remplacer xlat et xlon par les coordonnées du centre du domaine et imax et jmax par le nombre de points du domaine.

PRE\_PGD1.nam – Domaine 1 (8 km de résolution)

```
&NAM_CONFIO                                NIMAX=imax,
      LCDF4=T,                                NJMAX=jmax,
      LLFIOUT=F,                              XDX=8000.,
      LLFIREAD=F /                            XDY=8000. /
&NAM_PGDFILE                                &NAM_COVER
      CPGDFILE='PGD_08km_bogus',             YCOVER='ECOCLIMAP_v2.0',
      NHALO=0 /                               YCOVERFILETYPE='DIRECT' /
&NAM_PGD_GRID                               &NAM_ZS
      CGRID='CONF PROJ' /                    YZS='gtopo30',
&NAM_CONF_PROJ                              YZSFILETYPE='DIRECT' /
      XLAT0=xlat,                             &NAM_ISBA
      XLON0=xlon,                             YCLAY='CLAY_HWSD_MOY',
      XRPK=0.,                               YCLAYFILETYPE='DIRECT',
      XBETA=0. /                             YSAND='SAND_HWSD_MOY',
&NAM_CONF_PROJ_GRID                         YSANDFILETYPE='DIRECT' /
      XLATCEN=xlat,                          &NAM_SEABATHY
      XLONCEN=xlon,                          XUNIF_SEABATHY= 300.0 /
```

Fichiers de sortie :  
[PGD\\_08km\\_bogus.nc4](#)  
[PGD\\_08km\\_bogus.des](#)

Consigne : Remplacer io et iy par les coordonnées du point en bas à gauche du domaine 2 dans le domaine 1 et is et ys par le nombre de points de grille que le domaine 2 aura dans le domaine 1.

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

PRE\_PGD1.nam – Domaine 2 (2 km de résolution)

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_PGD_GRID
  YINIFILE='PGD_08km_bogus',
  YINIFILETYPE='MESONH' /
&NAM_PGDFILE
  CPGDFILE='PGD_02km_bogus' /
&NAM_PGD_GRID
  CGRID='CONF PROJ' /
&NAM_CONF_PROJ /
&NAM_CONF_PROJ_GRID /
&NAM_INIFILE_CONF_PROJ
  IXOR=io,
  IYOR=iy,
  IXSIZE=is,
  IYSIZE=ys,
  IDXRATIO=4,
  IDYRATIO=4 /
&NAM_COVER
  YCOVER='ECOCLIMAP_v2.0',
  YCOVERFILETYPE='DIRECT' /
&NAM_ZS
  YZS='gtopo30',
  YZSFILETYPE='DIRECT' /
&NAM_SEABATHY
  XUNIF_SEABATHY= 300.0 /
&NAM_ISBA
  YCLAY='CLAY_HWSD_MOY',
  YCLAYFILETYPE='DIRECT',
  YSAND='SAND_HWSD_MOY',
  YSANDFILETYPE='DIRECT' /
```

Fichiers de sortie :  
[PGD\\_02km\\_bogus.nc4](#)  
[PGD\\_02km\\_bogus.des](#)

Consigne : Remplacer io et iy par les coordonnées du point en bas à gauche du domaine 3 dans le domaine 2 et is et ys par le nombre de points de grille que le domaine 3 aura dans le domaine 2.

PRE\_PGD1.nam – Domaine 3 (500 m de résolution)

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_PGD_GRID
  YINIFILE='PGD_02km_bogus',
  YINIFILETYPE='MESONH' /
&NAM_PGDFILE
  CPGDFILE='PGD_500m_bogus',
  NHALO=0 /
&NAM_PGD_GRID
  CGRID='CONF PROJ' /
&NAM_CONF_PROJ /
&NAM_CONF_PROJ_GRID /
&NAM_INIFILE_CONF_PROJ
  IXOR=io,
  IYOR=iy,
  IXSIZE=is,
  IYSIZE=ys,
  IDXRATIO=4,
  IDYRATIO=4 /
&NAM_COVER
  YCOVER='ECOCLIMAP_v2.0',
  YCOVERFILETYPE='DIRECT' /
&NAM_ZS
  YZS='gtopo30',
  YZSFILETYPE='DIRECT' /
&NAM_SEABATHY
  XUNIF_SEABATHY= 300.0 /
&NAM_ISBA
  YCLAY='CLAY_HWSD_MOY',
  YCLAYFILETYPE='DIRECT',
  YSAND='SAND_HWSD_MOY',
  YSANDFILETYPE='DIRECT' /
```

Fichiers de sortie :  
[PGD\\_500m\\_bogus.nc4](#)  
[PGD\\_500m\\_bogus.des](#)

## 2. Initialisation des fichiers PGD pour le *gridnesting* (PREP\_NEST\_PGD)

Pour faire fonctionner les modèles avec la technique du *gridnesting*, il faut remplir une condition relative à l'orographie. Une telle condition n'est pas automatiquement satisfaite, le programme PREP\_NEST\_PGD effectue des post-traitements sur les orographies d'un maximum de 8 fichiers PGD qui seront utilisés pour créer des fichiers d'initialisation pour chaque domaine. Il modifie l'orographie d'un domaine père à partir de la moyenne de l'orographie de son (ses) domaine(s) fils. Le modèle Méso-NH travaillera avec des résolutions différentes selon les domaines qui fonctionnent simultanément et s'échangent leurs informations en temps réel. Il est nécessaire que [les fichiers pgd créés à l'étape précédente](#) se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

*NAMELIST*

PRE\_NEST\_PGD1.nam

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_PGD1
  YPGD1 = 'PGD_08km_bogus' /
&NAM_PGD2
  YPGD2 = 'PGD_02km_bogus',
  IDAD = 1 /
&NAM_PGD3
  YPGD3 = 'PGD_500m_bogus',
  IDAD = 2 /
&NAM_NEST_PGD
  YNEST = '01' /
```

Fichiers de sortie :

```
PGD_08km_bogus.nest01.nc4
PGD_08km_bogus.nest01.des
PGD_02km_bogus.nest01.nc4
PGD_02km_bogus.nest01.des
PGD_500m_bogus.nest01.nc4
PGD_500m_bogus.nest01.des
```

## 3. Préparation des fichiers d'initialisation du domaine 1 (PREP\_REAL1)

Le programme PREP\_REAL\_CASE effectue le changement d'orographie et de grille verticale en interpolant horizontalement et verticalement pour un fichier GRIB ou seulement verticalement pour un fichier MESO-NH. Le programme est lancé deux fois : la



Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

première fois pour filtrer le bogus pré-existant dans les analyses et une seconde fois pour introduire le nouveau bogus. La méthode dite « de bogus » réside dans l'activation de ces paramètres. Il est nécessaire que **les fichiers pgd nestés du domaine à 8 km** créés à l'étape précédente se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

Pour le domaine à 8 km de résolution, les paramètres activés dans la namelist ci-dessous entraînent le filtrage du vortex et son remplacement par un bogus de vent. Le filtrage du vortex est appliqué sur les champs GRIB atmosphériques d'entrée lorsqu'ils se trouvent dans la grille horizontale du fichier PGD et dans la grille verticale du fichier GRIB. Les champs GRIB atmosphériques d'entrée filtrés sont les deux composantes horizontales du vent, la température absolue, l'humidité et la pression de surface réduite au niveau du sol. Les champs initiaux sont alors remplacés par leur partie environnementale : champ total moins partie perturbations dues aux cyclones tropicaux. Le bogussing consiste en un vortex symétrique ajouté à la partie atmosphérique d'entrée du champ MESO-NH. Le vent tangentiel est calculé à partir d'une formulation analytique (Holland, 1980 ; la projection Mercator doit être utilisée pour respecter les hypothèses du modèle). Ensuite, le champ de masse équilibré est déduit de la relation du vent thermique. Le bogus des deux composantes horizontales du vent et la température potentielle est ajouté aux champs (filtrés) initiaux. Les détails concernant les différents flags de la namelist NAM\_HURR\_CONF sont dans le manuel d'utilisateur de Méso-NH version 5.3 (téléchargeable [ici](#)).

*NAMELISTS*

Consignes : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire. Remplacer latitude et longitude par les coordonnées données par le fichier de trajectoire correspondant à yyyyymmddhh ou pointer ces valeurs directement vers le fichier de trajectoire s'il est présent dans le répertoire où le script est lancé.

PRE\_REAL1.nam – Filtrage

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_FILE_NAMES
  HATMFILE ='ecmwf.OD.yyyymmdd.hh',
  HATMFILETYPE='GRIBEX',
  HPGDFILE ='PGD_08km_bogus.nest01',
  CINIFILE='CF.cep08.yyyymmddhh.ech' /
&NAM_REAL_CONF
  CPRESOPT = 'CREST',
  NVERB=5 /
&NAM_VER_GRID
  LTHINSHELL=T,
  NKMAX=40,
  YZGRID_TYPE='FUNCTN',
  ZDZGRD=10.,
  ZDZTOP=2000.,
  ZZMAX_STRGRD=3500.,
  ZSTRGRD=17.,
  ZSTRTOP=17. /
&NAM_HURR_CONF
  LFILTERING=T,
  CFILTERING='UVTP',
  NK=50,
  XLAMBDA=0.9,
  XLATGUESS=latitude,
  XLONGUESS=longitude,
```

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```
XBOXWIND=180.,
XRADGUESS=1200.,
NPHIL=24,
NDIAG_FILT=0,
LBOGUSSING=F /
&NAM_AERO_CONF /
```

```
&NAM_BLANK /
&NAM_PREP_SURF_ATM /
&NAM_PREP_SEAFLUX /
&NAM_PREP_WATFLUX /
&NAM_PREP_TEB /
&NAM_PREP_ISBA /
```

Fichiers de sortie :

**CF.cep08.yyyymmddhh.ech.nc4**  
**CF.cep08.yyyymmddhh.ech.des**

Consignes : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire. Remplacer latitude et longitude par les coordonnées et rmax et vmax par les valeurs données par le fichier de trajectoire correspondant à yyyymmddhh ou pointer ces valeurs directement vers le fichier de trajectoire s'il est présent dans le répertoire où le script est lancé. Le bogussing ne peut fonctionner que si les coordonnées du centre du cyclone sont incluses dans les limites du domaine.

PRE\_REAL1.nam – Bogus

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_FILE_NAMES
  HATMFILE='CF.cep08.yyyymmddhh.ech',
  HATMFILETYPE='MESONH',
  HPGDFILE='PGD_08km_bogus.nest01',
  CINIFILE='CB.cep08.yyyymmddhh.ech' /
&NAM_REAL_CONF
  CPRESOPT='CRESI',
  NVERB=5 /
&NAM_VER_GRID /
&NAM_HURR_CONF
  LFILTERING=F,
  NK=50,
  XLAMBDA=0.9,
  XBOXWIND=180.,
  XRADGUESS=1200.,
  NPHIL=24,
  NDIAG_FILT=0,
  LBOGUSSING=T,
```

```
XLATBOG=latitude,
XLONBOG=longitude,
XVTMAXSURF=vmax,
XRADWINDSURF=rmax,
XB_0=1.65,
XANGCONV0=12.,
XANGCONV1000=3.,
XANGCONV2000=0.,
CDADATMFILE='CF.cep08.yyyymmddhh.ech',
CDADBOGFILE='CF.cep08.yyyymmddhh.ech' /
&NAM_AERO_CONF /
&NAM_BLANK /
&NAM_PREP_SURF_ATM
  CFILE='CF.cep08.yyyymmddhh.ech',
  CFILETYPE='MESONH',
  CFILEPGD='PGD_08km_bogus.nest01',
  CFILEPGDTYPE='MESONH' /
&NAM_PREP_SEAFLUX /
&NAM_PREP_WATFLUX /
&NAM_PREP_TEB /
&NAM_PREP_ISBA /
```

Fichiers de sortie :

**CB.cep08.yyyymmddhh.ech.nc4**  
**CB.cep08.yyyymmddhh.ech.des**

#### 4. Etape de *spawning* entre les domaines 1 et 2 (SPAWN12)

Le programme de spawning effectue l'interpolation horizontale d'un fichier MESO-NH vers un autre (respectivement fichier 1 et fichier 2). La grille du fichier 2 doit être exactement incluse dans la grille du fichier 1. Le fichier 2 peut être utilisé directement pour une exécution du modèle, mais il contient des champs de surface lissés (notamment l'orographie). Il est possible de faire fonctionner le modèle avec les deux fichiers avec interaction de quadrillage, car une procédure itérative assure la condition de quadrillage sur les orographies. Les domaines à 8 km et à 2 km sont spawnés. Il est nécessaire que **les fichiers pgd nestés des domaines à 8 et 2 km** et **les fichiers issus du prep\_real du domaine à 8 km** créés précédemment se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

*NAMELIST*

Consigne : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire.

SPAWN1.nam

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_GRID2_SPA /
&NAM_LUNIT2_SPA
  CINIFILE = "CF.cep08.yyyymmddhh.ech",
  CINIFILEPGD = "PGD_08km_bogus.nest01",
  YDOMAIN = "PGD_02km_bogus.nest01",
  YSPAFILE = 'CF.cep08.yyyymmddhh.ech.spa2' /
&NAM_SPAWN_SURF LSPAWN_SURF=T /
&NAM_BLANK /
```

Fichiers de sortie :

**CF.cep08.yyyymmddhh.ech.spa2.nc4**  
**CF.cep08.yyyymmddhh.ech.spa2.des**

#### 5. Préparation des fichiers d'initialisation du domaine 2 (PREP\_REAL2)

L'étape de PREP\_REAL\_CASE est appliquée au domaine à 2 km de résolution. Seul le paramètre de bogussing est activé pour ce domaine. Il est nécessaire que **les fichiers pgd nestés du domaine à 2 km** ainsi que **les fichiers issus de l'étape de spawning** se trouvent

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

#### NAMELISTS

Note : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire. Remplacer latitude et longitude par les coordonnées et rmax et vmax par les valeurs données par le fichier de trajectoire correspondant à yyyyymmddhh ou pointer ces valeurs directement vers le fichier de trajectoire s'il est présent dans le répertoire où le script est lancé. Le bogussing ne peut fonctionner que si les coordonnées du centre du cyclone sont incluses dans les limites du domaine.

#### PRE\_REAL1.nam – Bogus

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_FILE_NAMES
  HATMFILE ='CF.cep08.yyyymmddhh.ech.
spa2',
  HATMFILETYPE='MESONH',
  HPGDFILE ='PGD_02km_bogus.nest01',
  CINIFILE='CB.02km.yyyymmddhh.ech' /
&NAM_REAL_CONF
  CPRESOPT = 'CREST',
  NVERB=5 /
&NAM_VER_GRID
  LTHINSHELL=T,
  NKMAX=40,
  YZGRID_TYPE='FUNCTN',
  ZDZGRD=10.,
  ZDZTOP=2000.,
  ZZMAX_STRGRD=3500.,
  ZSTRGRD=17.,
  ZSTRTOP=17. /
&NAM_HURR_CONF LFILTERING=F,
  LBOGUSSING=T,
  XLATBOG=latitude,
  XLONBOG=longitude,
  XVTMAXSURF=vmax,
  XRADWINDSURF=rmax,
  XB_0=1.65,
  XANGCONV0=12.,
  XANGCONV1000=3.,
  XANGCONV2000=0.,
  CDATMFILE='CF.cep08.yyyymmddhh.ech',
  CDADBOGFILE='CB.cep08.yyyymmddhh.ech' /
&NAM_AERO_CONF /
&NAM_BLANK /
&NAM_PREP_SEAFLUX /
&NAM_PREP_WATFLUX /
&NAM_PREP_TEB /
&NAM_PREP_ISBA /
```

Fichiers de sortie :

**CB.cep02.yyyymmddhh.ech.nc4**  
**CB.cep02.yyyymmddhh.ech.des**

## 6. Etape de *spawning* entre les domaines 2 et 3 (SPAWN23)

Le domaine à 2 km de résolution et celui à 500 m sont spawnés. Il est nécessaire que **les fichiers pgd nestés des domaines à 2 km et 500 m** et les fichiers issus du prep\_real du domaine à 2 km créés précédemment se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.



Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

Consigne : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire.

SPAWN1.nam

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_GRID2_SPA /
&NAM_LUNIT2_SPA
  CINIFILE = "CB.02km.yyyymmddhh.ech",
  CINIFILEPGD = "PGD_02km_bogus.nest01",
  YDOMAIN = "PGD_500m_bogus.nest01",
  YSPAFILE = 'CB.cep02.yyyymmddhh.ech.spa5' /
&NAM_SPAWN_SURF
  LSPAWN_SURF=T /
&NAM_BLANK /
```

Fichiers de sortie :

CB.cep02.yyyymmddhh.ech.spa5.nc4  
CB.cep02.yyyymmddhh.ech.spa5.des

## 7. Préparation des fichiers d'initialisation du domaine 3 (PREP\_REAL3)

L'étape de PREP\_REAL\_CASE est appliquée au domaine à 500 m de résolution. Le domaine à 2 km initialise le domaine à 500 m, il n'est pas nécessaire d'activer le filtrage ou le bogussing. Il est nécessaire que **les fichiers pgd nestés du domaine à 500 m** ainsi que **les fichiers issus de l'étape de spawning** se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

*NAMELIST*

Consigne : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire.

PRE\_REAL1.nam

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_FILE_NAMES
  HATMFILE = 'CB.cep02.yyyymmddhh.ech.
spa5',
  HATMFILETYPE='MESONH',
  HPGDFILE = 'PGD_500m_bogus.nest01',
  CINIFILE='C.500m.yyyymmddhh.ech' /
&NAM_REAL_CONF CPRESOPT = 'CRESI',
  NVERB=5 /
&NAM_VER_GRID
  LTHINSHELL=T,
```

12/21

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```
NKMAX=40,
YZGRID_TYPE='FUNCTN',
ZDZGRD=10.,
ZDZTOP=2000.,
ZZMAX_STRGRD=3500.,
ZSTRGRD=17.,
ZSTRTOP=17. /
&NAM_PREP_SURF_ATM

NHALO_PREP=16 /
&NAM_AERO_CONF /
&NAM_BLANK /
&NAM_PREP_SEAFLUX /
&NAM_PREP_WATFLUX /
&NAM_PREP_TEB /
&NAM_PREP_ISBA /
```

Fichiers de sortie :

**C.500m.yyyymmddhh.ech.nc4**  
**C.500m.yyyymmddhh.ech.des**

## 8. Lancement du modèle (MODEL)

L'utilisateur de Méso-NH spécifie certains paramètres libres de l'exécution en fixant leurs nouvelles valeurs dans les namelists du fichier EXSEG\$n.nam. Ici il y a 3 domaines, chaque domaine a besoin de son propre fichier MESO-NH pour être initialisé et son propre fichier EXSEG\$n.nam pour fixer les paramètres libres (à noter que beaucoup des paramètres libres dépendent de la maille et varient donc en fonction du numéro de modèle), notamment la paramétrisation du solveur de pression, la relaxation horizontale et la convection profonde. La durée de la simulation est fixée à 600 secondes. Les tests de sensibilité pour des sorties entre 100 et 900 s ont mené au choix de cette durée qui représentait le meilleur compromis entre l'objectif initial d'un simple ré-ajustement dynamique du vortex et la mise en évidence de l'effet du relief. Les fichiers d'entrée sont lus par le programme afin de réaliser l'initialisation du modèle Méso-NH avec un modèle à grande échelle (ici le CEPMMT). Il est nécessaire que **les fichiers pgd nestés des trois domaines**, les fichiers issus du prep\_real des domaines à **8 km, 2 km et 500 m** créés précédemment se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

NAMELISTS

Consigne : Remplacer yyyy par l'année, mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire.

EXSEG1.nam

```
&NAM_CONFIO
  LCD4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_LUNITn
  CINIFILE = "CB.cep08.yyyymmddhh.ech",
  CINIFILEPGD = "PGD_08km_bogus.nest01",
  CCPLFILE(1) = "CBB.cep08.yyyymmddhh.ech" /

&NAM_CONFn
  LUSERV = T,
  LUSECI = T,
  NSV_USER = 0 /
&NAM_CONFZ
  MPI_BUFFER_SIZE=40,
  NZ_VERB=0 /
&NAM_DYNn
```

13/21

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```

XTSTEP = 10.,
CPRESOPT = "CRESI",
LITRADJ=T,
LHORELAX_UVWTH = F,
LHORELAX_RV = T,
LHORELAX_SV = F,
LVE_RELAX = T,
NRIMX = 5,
NRIMY = 5,
XRIMKMAX = 0.001,
XT4DIFU = 3000. /

&NAM_ADVn
  CUVW_ADV_SCHEME = 'WENO_K',
  NWENO_ORDER=5,
  CTEMP_SCHEME='RK53',
  CMET_ADV_SCHEME = 'PPM_01',
  CSV_ADV_SCHEME = 'PPM_01' /

&NAM_PARAMn
  CTURB = 'TKEL'
  CRAD = 'ECMW',
  CCLOUD = 'ICE3',
  CDCONV = 'KAFR',
  CSCONV = 'EDKF' /

&NAM_PARAM_KAFRn
  XDTCNV = 400.,
  NICE = 1,
  LREFRESH_ALL = T,
  LDOWN = T /

&NAM_PARAM_MFSHALLn /
&NAM_PARAM_RADn
  XDTRAD = 1800.,
  XDTRAD_CLONLY = 1800.,
  LCLEAR_SKY=.FALSE. /

&NAM_NUDGINGn
  LNUDGING=F,
  XTNUDGING=21600 /

&NAM_SEAFLUXn
  CSEA_FLUX = 'ECUME',
  CSEA_ALB = 'TA96',
  LPROGSST = F,
  NTIME_COUPLING = 600 /

&NAM_ISBAn /
&NAM_CH_CONTROLn /
&NAM_CH_SURFh /
&NAM_CH_SEAFLUXn /
&NAM_CH_WATFLUXn /

&NAM_CH_ISBAn /
&NAM_CH_TEBn /
&NAM_DIAG_SURF_ATMn /
&NAM_DIAG_SURFh /
&NAM_DIAG_ISBAn /
&NAM_DIAG_TEBn /
&NAM_LBCn
  CLBCX = 2*"OPEN",
  CLBCY = 2*"OPEN",
  XCPHASE = 20. /

&NAM_TURBn
  CTURBLEN = "BL89",
  CTURBDIM = "1DIM",
  LSUBG_COND = T /

&NAM_CH_MNHcn
  LUSECHEM = F /

&NAM_CH_ORILAM /
&NAM_DUST /
&NAM_SERIESn /
&NAM_CH_SOLVERn /
&NAM_CONF
  CCONF = "START",
  NMODEL = 3,
  LFLAT=F,
  CSPLIT='BSPLITTING',
  NHALO=3,
  NVERB = 1,
  CEXP = "MNHmm",
  CSEG = "Jddhh" /

&NAM_DYN
  XSEGLEN = 600.,
  LNUMDIFU = F,
  LNUMDIFTH = F,
  LNUMDIFSV = F,
  XALKTOP = 0.01,
  XALZBOT = 19000. /

&NAM_NESTING
  NDAD(2) = 1,
  NDTRATIO(2) = 4,
  XWAY(2) = 2.,
  NDAD(3) = 2,
  NDTRATIO(3) = 4,
  XWAY(3) = 2. /

&NAM_FMOUT
  XFMOUT(1,1) = 600. /

```

Fichiers de sortie :  
 MNHmm.1.Jddhh.001.nc4  
 MNHmm.1.Jddhh.001.des

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

EXSEG2.nam

```

&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_LUNITn
  CINIFILE = "CB.02km.yyyymmddhh.ech",
  CINIFILEPGD = "PGD_02km_bogus.nest01" /
&NAM_CONFn
  LUSERV = T,
  LUSECI = T,
  NSV_USER = 0 /
&NAM_CONFZ
  MPI_BUFFER_SIZE=400,
  NZ_VERB=5 /
&NAM_DYNn
  CPRESOPT = "ZRESI",
  LITRADJ=T,
  LHORELAX_UVWTH = F,
  LHORELAX_RV = F,
  LHORELAX_SV = F,
  LVE_RELAX = T,
  NRIMX = 5,
  NRIMY = 5,
  XRIMKMAX = 0.001,
  XT4DIFU = 3000. /
&NAM_ADVn
  CUVW_ADV_SCHEME = 'WENO_K',
  NWENO_ORDER=5,
  CTEMP_SCHEME='RK53',
  CMET_ADV_SCHEME = 'PPM_01',
  CSV_ADV_SCHEME = 'PPM_01' /
&NAM_PARAMn
  CTURB = 'TKEL',
  CRAD = 'ECMW',
  CLOUD = 'ICE3',
  CDCONV = 'NONE',
  CSCONV = 'EDKF' /
&NAM_PARAM_KAFRn
  XDTCNV = 400.,
  NICE = 1,
  LREFRESH_ALL = T,
  LDOWN = T /
&NAM_PARAM_MFSHALLn /
&NAM_PARAM_RADn
  XDTRAD = 1800.,
  XDTRAD_CLONLY = 1800.,
  LCLEAR_SKY=.FALSE. /
&NAM_NUDGINGn
  LNUDGING=F,
  XTNUDGING=21600 /
&NAM_SEAFLUXn
  CSEA_FLUX = 'ECUME',
  CSEA_ALB = 'TA96',
  LPROGSST = F,
  NTIME_COUPLING = 600 /
&NAM_ISBAn /
&NAM_CH_CONTROLn /
&NAM_CH_SURFn /
&NAM_CH_SEAFLUXn /
&NAM_CH_WATFLUXn /
&NAM_CH_ISBAn /
&NAM_CH_TEBn /
&NAM_DIAG_SURF_ATMn /
&NAM_DIAG_SURFn /
&NAM_DIAG_ISBAn /
&NAM_DIAG_TEBn /
&NAM_LBCn
  CLBCX = 2*"OPEN",
  CLBCY = 2*"OPEN",
  XCPHASE = 20. /
&NAM_TURBn
  CTURBLEN = "BL89",
  CTURBDIM = "1DIM",
  LSUBG_COND = T /
&NAM_CH_MNHCn
  LUSECHEM = F /
&NAM_SERIESn /
&NAM_CH_SOLVERn /

```

Fichiers de sortie :

[MNHmm.2.ddhh.001d.nc4](#)

[MNHmm.2.ddhh.001.des](#)

EXSEG3.nam

```

&NAM_CONFIO
  LCDF4=T,
  LLFIOUT=F,
  LLFIREAD=F /
&NAM_LUNITn
  CINIFILE = "C.500m.yyyymmddhh.ech",
  CINIFILEPGD = "PGD_500m_bogus.nest01" /
&NAM_CONFn
  LUSERV = T,
  LUSECI = T,

```



## Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```
NSV_USER = 0 /
&NAM_CONFZ
MPI_BUFFER_SIZE=400,
NZ_VERB=5 /
&NAM_DYNn
CPRESOPT = "ZRESI",
LITRADJ=T,
LHORELAX_UVWTH = F,
LHORELAX_RV = F,
LHORELAX_SV = F,
LVE_RELAX = T,
NRIMX = 5,
NRIMY = 5,
XRIMKMAX = 0.001,
XT4DIFU = 3000. /
&NAM_ADVn
CUVW_ADV_SCHEME = 'WENO_K',
NWENO_ORDER=5,
CTEMP_SCHEME='RK53',
CMET_ADV_SCHEME = 'PPM_01',
CSV_ADV_SCHEME = 'PPM_01' /
&NAM_PARAMn
CTURB = 'TKEL',
CRAD = 'ECMW',
CLOUD = 'ICE3',
CDCONV = 'NONE',
CSCONV = 'EDKF' /
&NAM_PARAM_KAFRn
XDTCONV = 400.,
NICE = 1,
LREFRESH_ALL = T,
LDOWN = T /
&NAM_PARAM_MFSHALLn /
&NAM_PARAM_RADn

XDTRAD = 1800.,
XDTRAD_CLONLY = 1800.,
LCLEAR_SKY=.FALSE. /
&NAM_NUDGINGn
LNUDGING=F,
XTNUDGING=21600 /
&NAM_SEAFLUXn
CSEA_FLUX = 'ECUME',
CSEA_ALB = 'TA96',
LPROGSST = F,
NTIME_COUPLING = 600 /
&NAM_ISBAn /
&NAM_CH_CONTROLn /
&NAM_CH_SURFfn /
&NAM_CH_SEAFLUXn /
&NAM_CH_WATFLUXn /
&NAM_CH_ISBAn /
&NAM_CH_TEBn /
&NAM_DIAG_SURF_ATMn /
&NAM_DIAG_SURFfn /
&NAM_DIAG_ISBAn /
&NAM_DIAG_TEBn /
&NAM_LBCn
CLBCX = 2*"OPEN",
CLBCY = 2*"OPEN",
XCPHASE = 20. /
&NAM_TURBn
CTURBLEN = "BL89",
CTURBDIM = "1DIM",
LSUBG_COND = T /
&NAM_CH_MNHCn
LUSECHEM = F /
&NAM_SERIESn /
&NAM_CH_SOLVERn /
```

Fichiers de sortie :

[MNHmm.1.ddhh.001.nc4](#)

[MNHmm.1.ddhh.001.des](#)

## 9. Sortie des variables diagnostiques (DIAG)

Après l'exécution du modèle, les quantités utiles peuvent être diagnostiquées à partir des variables pronostiques contenues dans les fichiers de sauvegarde synchrones. Elle est réalisée par le programme DIAG qui calcule les variables diagnostiques. Il est nécessaire que [les fichiers de sorties du modèle](#) créés à l'étape précédente se trouvent dans le répertoire où la simulation est lancée. Si ce n'est pas le cas, créer des liens vers les répertoires où se trouvent les fichiers.

*NAMELISTS*

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

Consigne : Remplacer mm par le mois, dd par le jour et hh par l'heure correspondant à l'échéance ciblée dans le fichier de trajectoire.

DIAG1.nam – Domaine à 8 km résolution

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4 = .TRUE.,
  LLFIREAD = .FALSE.,
  LLFIOUT = .FALSE. /
&NAM_DIAG_FILE
  YINIFILE(1) = 'MNHmm.1.ddhh.001',
  YINIFILEPGD(1) = 'PGD_08km_bogus.nest01',
  YSUFFIX = 'diag' /
&NAM_DIAG
  CISO='PREVTK',
  LVAR_RS=T,
  LVAR_LS=F,
  LMSLP=T /
&NAM_DIAG_SURFn /
&NAM_DIAG_SURF_ATMn /
```

Fichiers de sortie :  
MNHmm.1.ddhh.001diag.nc4  
MNHmm.1.ddhh.001diag.des

DIAG1.nam – Domaine à 2 km résolution

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4 = .TRUE.,
  LLFIREAD = .FALSE.,
  LLFIOUT = .FALSE. /
&NAM_DIAG_FILE
  YINIFILE(1) = 'MNHmm.2.ddhh.001',
  YINIFILEPGD(1) = 'PGD_02km_bogus.nest01',
  YSUFFIX = 'diag' /
&NAM_DIAG
  CISO='PREVTK',
  LVAR_RS=T,
  LVAR_LS=F,
  LMSLP=T /
&NAM_DIAG_SURFn /
&NAM_DIAG_SURF_ATMn /
```

Fichiers de sortie :  
MNHmm.2.ddhh.001diag.nc4  
MNHmm.2.ddhh.001diag.des

DIAG1.nam – Domaine à 500 m résolution

```
&NAM_CONFIO
  LCDF4 = .TRUE.,
```

Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```
LLFIREAD = .FALSE.,  
LLFIOUT = .FALSE. /  
&NAM_DIAG_FILE  
  YINIFILE(1) = 'MNHmm.3.ddhh.001',  
  YINIFILEPGD(1) = 'PGD_500m_bogus.nest01',  
  YSUFFIX = 'diag' /  
&NAM_DIAG  
  CISO='PREVTK',  
  LVAR_RS=T,  
  LVAR_LS=F,  
  LMSLP=T /  
&NAM_DIAG_SURFm /  
&NAM_DIAG_SURF_ATMn /
```

Fichiers de sortie :  
MNHmm.3.ddhh.001diag.nc4  
MNHmm.3.ddhh.001diag.des

## Formatage des fichiers

Le script bash ci-dessous propose de produire un fichier au format netcdf contenant des paramètres ciblés issus des fichiers de sortie de l'étape 9 (DIAG), de concaténer plusieurs échéances (les étapes 3 à 9 doivent être lancées pour chaque échéance) tout en y incluant un certain nombre de méta-données. Ce script doit se trouver dans le dossier contenant tous les fichiers netcdf individuels (si ce n'est pas le cas modifier la ligne `dirin=./`).

Consignes : Voici les principales informations à modifier avant d'utiliser le script :

- NumDom indique le numéro du domaine (1, 2 ou 3)
- yyyy et mm doivent être remplacés par l'année et le mois au cours duquel le système est étudié
- dd1 par le jour de la première échéance, dd2 par le jour de la seconde échéance...
- hh1 par l'heure correspondant à la première échéance ciblée dans le fichier de trajectoire, hh2 à la seconde...
- NameOfTropicalCyclone permettra de préciser le nom du système représenté
- Resol doit être remplacé par la résolution (8km, 2km ou 500m)
- (gridpointsMax-2) doit être remplacé par le nombre de point de grille en fonction de la latitude ou de la longitude maximum moins 2 pour exclure un point de grille sur le contour du domaine
- Creationyyyy, Creationmm, Creationdd correspondent respectivement à l'année, au mois et au jour de la création du fichier final
- Name et Surname doivent être remplacés par les nom et prénom du créateur du fichier s'il possède une adresse mail université de La Réunion, sinon modifier le format de l'adresse mail



Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

Script create\_nc\_for\_rnvrisk.sh

```
#!/bin/bash
# NOM : create_nc_for_rnvrisk.sh
# DESCRIPTION : Scripts to add time and
coordinates variables to netcdf nc4
#          output files from MNH for ReNovRisk
#####
#####
#####
Files
# Domaine 1 pour le domaine pere et 2 ou 3 pour le
domaine fils
dom=NumDom
# Ref
ref='MNHmm'
# Segments
dates='Jdd1hh1 Jdd2hh2 Jdd3hh3'
# Echeances
hours='001'
# Time increment in seconds
t0=0 # first time
dt=21600 # time increment
# Which variables do you want to treat?
# 10m wind gust and orography 10m zonal
component of wind 10m meridional component
variables="ZS FF10MAX UM10 VM10"
# input file location
dirin=./
# output file location (make sure the directory
exist :) )
dirout=./
outfilev10="NameOfTropicalCyclone_bogus_RNR_uv
ff10_Resol.nc4"

#####
#####
#####

for day in $dates
do
  for hour in $hours
  do
    # Lecture du fichier contenant les latitudes et
    longitudes
    file=${ref}.${dom}.${day}.${hour}diag.nc4
    echo $file
    for i in $variables
    do
      echo $i "variable"
      ncks -h -A -v $i $file tempo.nc
    done
    echo LON

ncks -h -A -v LON $file tempo.nc
echo LAT
ncks -h -A -v LAT $file tempo.nc
# add unit informations for coordinate variables
echo add units to LAT
ncatted -h -O -a units,LAT,c,c,degree_north tempo.nc
echo add units to LON
ncatted -h -O -a units,LON,c,c,degree_east tempo.nc
# Add coordinates informations
for i in $variables
do
  echo $i add coordinates
  ncatted -h -O -a coordinates,$i,c,c,"LON LAT"
  tempo.nc
done
# Create time variable
cat > create_time.nco << EOF
defdim("time",1);
time@longname="time";
time@units="seconds since yyyy-mm-dd1 hh1UTC";
time[time]=$t0;
ZS[Y,X]=ZS;
FF10MAX[time,Y,X]=FF10MAX;
UM10[time,Y,X]=UM10;
VM10[time,Y,X]=VM10;
ZS@longname="orography";
ZS@units="m";
FF10MAX@longname="wind gusts at 10m";
FF10MAX@units="m/s";
FF10MAX@GRID=1;
UM10@longname="10m zonal wind";
UM10@units="m/s";
UM10@GRID=1;
VM10@longname="10m meridional wind";
VM10@units="m/s";
VM10@GRID=1;
ZS@coordinates="LON LAT";
ZS@GRID=4;
FF10MAX@coordinates="LON LAT";
UM10@coordinates="LON LAT";
VM10@coordinates="LON LAT";
EOF

ncap2 -O -h -S create_time.nco tempo.nc tempo.nc
# create record variable
ncks -h -O --mk_rec_dmn time tempo.nc tempo.nc
mv tempo.nc ${file}_${dt}
echo $file
t0=`expr $t0 + $dt`
done
done
###
```

## Note technique – Application de la méthode dite « de bogus » (ReNovRisk - TRANSFERTS)

```
ncrcat -h ${ref}.${dom}.?????.*.nc4_${dt}
tempo_out.nc
rm ${ref}.${dom}.?????.*.nc4_${dt}
### extract a subdomain
ncks -h -O -d X,1,(gridpointsMax-2) -d Y,1,
(gridpointsMax-2) -v
LON,LAT,ZS,FF10MAX,UM10,VM10 tempo_out.nc
$outfilev10
rm tempo_out.nc

ncatted -h -a title,global,a,c,'Tropical cyclone
NameOfTropicalCyclone landfall wind fields retrieved
with bogus method' $outfilev10
ncatted -h -a source,global,a,c,'Meso-NH simulation
with bogussing activated - Model version: 5.3.1 -
600s run - Initial files: 6-h ECMWF operational
analysis - Gridnesting with 3 domains (8 km, 2 km
and 500 m resolution, dad and son domains
respectively) - Horizontal resolution: Resol'
$outfilev10
ncatted -h -a comments,global,a,c,'Meso-Nh uses a C-
grid in the Arakawa convention , both on the
horizontal and on the vertical. Attributes GRID 1:
mass points, GRID 4 : w points. For more details, see
appendix D of Meso-NH users guide MASDEV5-3.'
$outfilev10
ncatted -h -a credits,global,a,c,'Deliverable of RNR-
Transferts project (funded by FEDER, Region
Reunion and Universite de La Reunion)' $outfilev10
ncatted -h -a created,global,a,c,'Creationdd-
Creationmm-Creationyyyy' $outfilev10
ncatted -h -a institution,global,a,c,'LACy' $outfilev10
ncatted -h -a location,global,a,c,'LACy, Saint-Denis de
La Reunion, France' $outfilev10
ncatted -h -a
contact,global,a,c,'Name.Surname@univ-reunion.fr'
$outfilev10
```

Fichiers de sortie :

**NameOfTropicalCyclone\_bogus\_RNR\_uvff10\_Resol.nc4**

## Ressources numériques

### *Ressources de calcul*

Le serveur de calcul utilisé est la machine Beaufix (supercalculateur Météo-France). Pour estimation, une échéance pour faire tourner les 3 domaines en gridnesting pour le cyclone tropical Berguitta est d'environ 2 heures temps CPU (sur 1 noeud de 64 Go de RAM et 4 processeurs).

### *Stockage*

Les fichiers créés dans le cadre du projet ReNovRisk pour les cyclones tropicaux Berguitta, Bejisa et Dina (domaine 20.8-21.4°S / 55.2-55.9°E à 500 m de résolution horizontale) font respectivement 2.7, 5.8 et 7.1 Mo pour 5, 12 et 15 échéances temporelles.

### *Open access*

Les données créées par la méthode dite « de bogus » dans le cadre du projet ReNovRisk-TRANSFERTS sont en open access sur la plateforme GEOSUR (<https://geosur.univ-reunion.fr/web/>), mots clefs : ReNovRisk - bogus - cyclones tropicaux).

## Références bibliographiques

Holland, G. J., 1980 : An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Month. Wea. Rev.*, 108, 1212-1218.

Leroux, M.-D., 2012 : Intensification rapide des cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan Indien : dynamique interne et influences externes. *Thèse de doctorat*, Discipline Physique de l'Atmosphère, Université de La Réunion, France, 262 pp. [Disponible sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00787099>]

Nuissier, O., R. F. Rogers, and F. Roux, 2005 : A numerical simulation of Hurricane Bret on 22-23 August 1999 initialized with airborne Doppler radar and dropsonde data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 155-194.

## Crédits

Les simulations numériques ont été réalisées sur la machine Beaufix du supercalculateur de Météo-France. La base de données de best-tracks du CMRS est produite par Météo-France. Ce travail est un livrable du programme ReNovRisk-TRANSFERTS financé par l'Europe via le FEDER INTERREG.

## Remerciements

Les remerciements sont adressés à François Bonnardot à l'initiative du développement de la méthode dite « de bogus » pour son expertise, à Christelle Barthe et à Soline Bielli pour leur implication dans l'adaptation de la méthode dans le cadre de ce projet.

# Liste des publications et communications

Voici la liste des publications et communications issues du travail réalisé dans le cadre de l'Action 1 (Aléas atmosphériques) de ReNovRisk-TRANSFERTS et de ses collaborations.

## 1. Communications

[C1] Vérèmes, H. “Le risque régional et le risque cyclone,” Conférence-débat sur les enjeux du Changement Climatique, Agence Française de Développement, La Réunion, 18 septembre 2019.

[C2] Vérèmes H., V. Duflot, G. Payen, N. Marquestaut, N. Bègue, O. Bousquet, J.-P. Cammas and colleagues from LACy, OSU-R (UMS) and LATMOS, “Profiling of aerosols and clouds in Reunion Island (21°S,55.5°E),” 8<sup>TH</sup> EarthCARE International Science Workshop, Fukuoka, Japan, November 25-27, 2019.

## 2. Publications pluridisciplinaires

[P1] Tulet P., B. Aunay, G. Barruol, C. Barthe, R. Belon, S. Bielli, F. Bonnardot, O. Bousquet, J.-P. Cammas, J. Cattiaux, I. Fontaine, F. R. Fontaine, F. Gabarrot, S. Garabedian, J.-L. Join, F. Jouvenot, D. Nortes-Martinez, D. Mékiès, P. Mouquet, G. Payen, G. Pennober, J. Pianezze, C. Rault, C. Revillion, C. Thompson, H. Vérèmes: ReNovRisk : A multidisciplinary programme to study cyclonic risks in the South West Indian Ocean, *to be submitted*.

[P2] Fontaine I., S. Garabedian, D. Nortes-Martinez, and H. Vérèmes: Tropical Cyclones and Fertility : New Evidence from Madagascar, *to be submitted*.

## 3. Rapports

[R1] Hélène Vérèmes. Application de la méthode dite « de bogus » dans le programme ReNovRisk-TRANSFERTS. [Rapport Technique] Université de La Réunion; Région Réunion. 2020. <[hal-02956116](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02956116)> <[DOI:10.26171/6n33-xe98](https://doi.org/10.26171/6n33-xe98)>

# Références bibliographiques

- Baray et al. (2013). Maïdo observatory: a new high-altitude station facility at Reunion Island (21° S, 55° E) for long-term atmospheric remote sensing and in situ measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(10), 2865–2877. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2865-2013>
- Calvert (2011). An assessment of tree susceptibility and resistance to cyclones – with particular reference to Severe Tropical Cyclone Yasi in Townsville on 2nd February 2011. Greening Australia Report.
- Duvat et al. (2016). Assessing the impacts of and resilience to Tropical Cyclone Bejisa, Reunion Island (Indian Ocean). *Natural Hazards*, 83(1), 601–640. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2338-5>
- Duflot et al. (2018). L'Observatoire de physique de l'atmosphère de La Réunion : sentinelle climatique de l'hémisphère Sud. *La Météorologie*, 103, 38-49. <https://doi.org/10.4267/2042/68786>
- Elliott et al. (2015). The local impact of typhoons on economic activity in China: A view from outer space. *Journal of Urban Economics*, 88, 50–66. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2015.05.001>
- Emanuel (2011). Global warming effects on US hurricane damage. *Weather, Climate, and Society*, 3, 261–268. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-11-00007.1>
- Fan et al. (2007). Effects of aerosols and relative humidity on cumulus clouds. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, no. D14, D14204. <https://doi.org/10.1029/2006JD008136>
- Geiger et al. (2018). A global historical data set of tropical cyclone exposure (TCE-DAT). *Earth System Science Data*, 10(1), 185–194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-185-2018>
- Herbener et al. (2014). Aerosol Indirect Effects on Idealized Tropical Cyclone Dynamics. *Journal of Atmospheric Science*, vol. 71, no. 6, 2040–2055. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0202.1>
- Hoarau et al. (2018). Impact of the generation and activation of sea salt aerosols on the evolution of tropical cyclone Dumile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 8813–8831. <https://doi.org/10.1029/2017JD028125>
- Hoarau et al. (2018). A representation of the collisional ice break-up process in the two-moment microphysics LIMA v1.0 scheme of Meso-NH. *Geoscientific Model Development*, 11, 4269–4289. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4269-2018>, 2018.
- Hoque et al. (2018). Assessing tropical cyclone risks using geospatial techniques. *Applied Geography*, 98, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.004>
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance ClimateChange Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of theIntergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker,D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen,M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK,and New York, NY, USA, 582 pp.
- Jewell and Gaussiat (2015). An assessment of kriging-based rain-gauge–radar merging techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(691), 2300–2313. <https://doi.org/10.1002/qj.2522>
- Laurantin (2008). Antilope: Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data. *Proc. Int.*

*Symp. on Weather Radar and Hydrology Conf. 2008*, Grenoble, France, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), 2–8.

Leroux (2012). Intensification rapide des cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan Indien : dynamique interne et influences externes. Thèse de doctorat, Discipline Physique de l'Atmosphère, Université de La Réunion, France, 262 pp. [Disponible sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00787099>]

Leroux et al. (2018). A Climatology of Southwest Indian Ocean Tropical Systems: Their Number, Tracks, Impacts, Sizes, Empirical Maximum Potential Intensity, and Intensity Changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(4), 1021–1041. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0094.1>

Magnan and Duvat (2018). Unavoidable solutions for coastal adaptation in Reunion Island (Indian Ocean). *Environmental Science & Policy*, 89, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.09.002>

Mahabot et al. (2016). Effect of Tropical Cyclones on Short-Term Evolution of Carbonate Sandy Beaches on Reunion Island, Indian Ocean. *Journal of Coastal Research*, 839–853. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00031.1>

NHC, cited 2019: Glossary of NHC terms. [Available online at <https://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml>]

Nuissier et al. (2005). A numerical simulation of Hurricane Bret on 22-23 August 1999 initialized with airborne Doppler radar and dropsonde data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 155-194. <https://doi.org/10.1256/qj.02.233>

Parent du Châtelet (2005). The PANTHERE Project and the Evolution of the French Operational Radar Network and Products : Rain-estimation, Doppler winds, and Dual-Polarisation (Le projet PANTHERE). 32<sup>nd</sup> *American Meteorological Society Radar Conference*, Albuquerque, NM, 2005 (<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/96217.pdf>, last accessed 2 July 2020).

Pauthier et al. (2016). Mesoscale and local scale evaluations of quantitative precipitation estimates by weather radar products during a heavy rainfall event. *Advances in Meteorology*, vol. 2016, Article ID 6089319, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2016/6089319>

Pielke and Landsea (1998). Normalized Hurricane Damages in the United States: 1925-1995. *Weather and Forecasting*, 13, 621-631. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013%3C0621:NHDITU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%3C0621:NHDITU%3E2.0.CO;2)

Rosenfeld et al. (2008). Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation?. *Science*, vol. 321, no. 5894, pp. 1309–1313. <https://doi.org/10.1126/science.1160606>

Rosenfeld et al. (2012). Aerosol Effects on Microstructure and Intensity of Tropical Cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(7), 987–1001. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00147.1>

Saaty, (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Science*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Strobl (2011). The economic growth impact of hurricanes: evidence from U.S. coastal counties. *Review of Economics and Statistics*, 93, 575–589.

Tamura (2005). Extreme winds and damage assessment, Lecture Note, Croucher Advanced Study Institute on “State-of-the-art Wind Tunnel Modelling and Data Analysis Techniques for Infrastructure and Civil Engineering Applications”, The Hong-Kong University of Science and Technology, 7-8 December 2005, 1-45.



Wang et al. (2014). Asian pollution climatically modulates mid-latitude cyclones following hierarchical modelling and observational analysis. *Nature Communications*, 5, 3098. <https://doi.org/10.1038/ncomms4098>

Weinkle et al. (2012). Historical Global Tropical Cyclone and falls. *Journal of Climate*, 25(13), 4729–4735. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00719.1>

Weinkle *et al.* (2018). Normalized hurricane damage in the continental United States 1900–2017. *Nature Sustainability*, 1, 808–813. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0165-2>

Zhang and Chen (2019). Risk Assessment of Flood Disaster Induced by Typhoon Rainstorms in Guangdong Province, China. *Sustainability*, 11(10), 2738. <https://doi.org/10.3390/su11102738>

Zhang et al. (2017). Risk assessment of typhoon disaster for the Yangtze River Delta of China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1362040>

# Liste des acronymes

AAP : Appel A Projets  
AGORAH : AGence pour l'Observation de la Réunion, l'Aménagement et l'Habitat  
AHP : Analytic Hierarchy Process  
ANTILOPE : ANalyse par spaTiaLisation hOraire des PrEcipitationS  
CANDHIS : Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ  
CCN : Cloud Condensation Nuclei  
CEMOI : Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien  
CEPMMT : Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen-Terme  
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement  
CMRS : Centre Météorologique Spécialisé  
CNRS : Centre Nationale de la Recherche Scientifique  
DAAF : Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt  
DEAL : Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement  
DEM : Digital Elevation Model  
EC : Etudes Climatologies  
HAL : Hyper Articles en Ligne  
IGR : InGénieur de Recherche  
IFS : Integrated Forecasting System  
IN : Ice Nuclei  
INSU : Institut National des Sciences de l'Univers  
LACy : Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones  
LGSR : Laboratoire GéoSciences Réunion  
OMNCG : Observatoires des Milieux Naturels et des Changements Globaux  
ONF : Office National des Forêts  
OPAR : Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion  
OSU-R : Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion  
PANTHERE : Projet ARAMIS Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et Renouvellement  
PVMBT : Peuplement Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical  
ReNovRisk : Recherche intégrée et inNOVante sur les Risques naturels  
RNR : ReNovRisk  
SIG : Système d'Information Géographique  
SNO : Services Nationaux d'Observation  
SOOI : Sud-Ouest Océan Indien  
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission