

**Projet de Recherche INTERREG-V océan Indien 2014-2020**

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

## Bilan du projet

# ReNovRisk-Cyclones et Changement Climatique (RNR-C3)



**Olivier Bousquet**

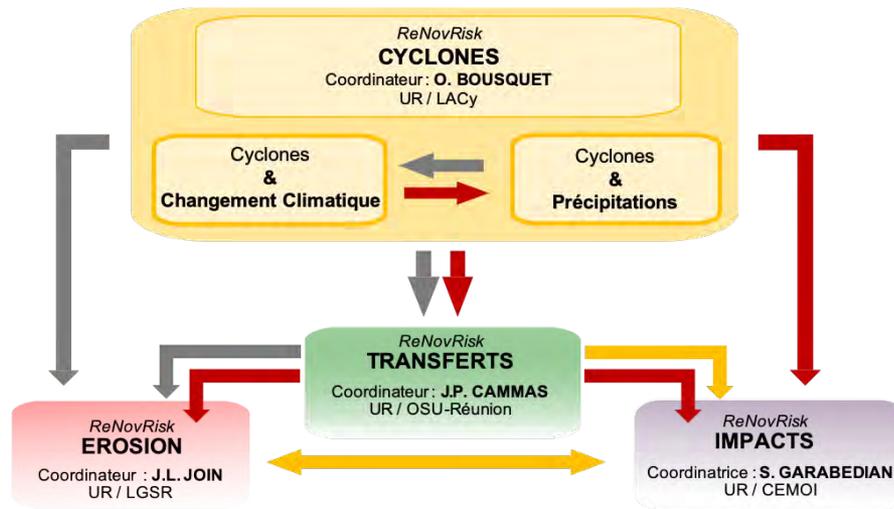
UMR 8105 LACy





# ReNovRisk

Recherche intégrée et Innovante sur les Risques Naturels



**Programme ReNovRisk Cyclones**  
**Impacts des CT sur les territoires du bassin**  
**SOOI aux horizons actuel et futur**

**Cyclones et Précipitations**  
**Cyclones et Changement Climatique**





# ReNovRisk-C3

Recherche intégrée et Innovante sur les Risques Naturels

## Quatre pays - 6 partenaires - Pilotage LACy

### France

(Réunion – Mayotte)



### Seychelles



### Madagascar



+



### Maurice





# ReNovRisk-C3

*Recherche intégrée et Innovante sur les Risques Naturels*

<b>Durée du projet:</b>	Juin 2017 – Juin 2021
<b>Activités:</b>	<b>Sept 2017 – Mars 2020</b>
<b>Budget prévisionnel</b>	922 140,10 €
<b>Budget effectif</b>	784 403,33 €
<b>Taux d'exécution des dépenses</b>	~ 85%



## Indicateurs

Indicateur	Type (Résultat / réalisation)	Unité de mesure	Valeur cible prévisionnelle / effective
CO42 : Nombre d'organisme de recherche participant à des projets de recherche transfrontalier	Réalisation	Organismes	6/6 + IST-D + IGN
IR01a – Nombre de projets de recherche collaboratifs sur des thématiques partagées au sein de la COI	Résultat	Projets / an	1
CO24 – nombre de nouveaux chercheurs dans les entités bénéficiant d'un soutien	Réalisation	ETP	5 / 5 6 Avec stagiaires
Nombre de participation à des congrès scientifiques			3 / 6
Publications scientifiques de rang A			2 / 13



## Livrables

23 livrables au total

### Tous fournis sauf:

**L18** (3.2): **Rapport** de synthèse sur l'analyse statistique de la modification du comportement des cyclones à l'échelle locale pour différents scénarii du GIEC dans la région Seychelles (Outer Islands).

- **Peu pertinent – Manque de ressources suite à la crise sanitaire**

**L20** (4.3): Organisation d'un **atelier international** sur les cyclones dans le bassin Indien sud-ouest.

- **Crise sanitaire**



## Structuration du projet

### Quatre Actions

- A1**      **Renforcement des observations à terre et en mer**
  - 3 sous-actions
  
- A2**      **Modélisation intégrée des cyclones tropicaux du bassin sud-ouest de l'océan Indien**
  - 3 sous-actions
  
- A3**      **Impact futur des cyclones tropicaux sur les îles du bassin SOOI**
  - 2 sous-actions
  
- A4**      **Coordination et valorisation**
  - 4 sous-actions



## Bilan des activités par actions

### Action 1

Renforcement des observations à terre et en mer

- A1.1 *Renforcement des observations d'humidité atmosphérique*
- A1.2 *Observation terrestre et marine de la houle*
- A1.3 *Observation satellitaire de la houle et du vent en conditions cycloniques*



## Sous-Action 1.1

### Renforcement des observations d'humidité atmosphérique

**Objectif:** Augmenter le nombre de sites observant l'humidité atmosphérique et restituant l'information en temps réel dans la sous-région, via le déploiement de récepteurs GNSS dans le bassin SOOI

- **Six** stations GNSS terrestres (**au lieu de 4 prévus initialement**) ont été installées pour mesurer en continu et en temps réel, la distribution du champ de vapeur d'eau aux échelles locale et régionale – les équipements ont été financés par l'Université de La Réunion et le CNRS dans le cadre de deux CPERs en 2017 et 2018;
- Une méthode de traitement automatisée des données a été mise en place en coopération avec l'IGN début 2019, et les données traitées distribuées via les serveurs de l'IGN;
- Données disponibles sur un serveur de l'université;
- Les résultats obtenus ont fait l'objet de trois publications dont 2 dédiées;



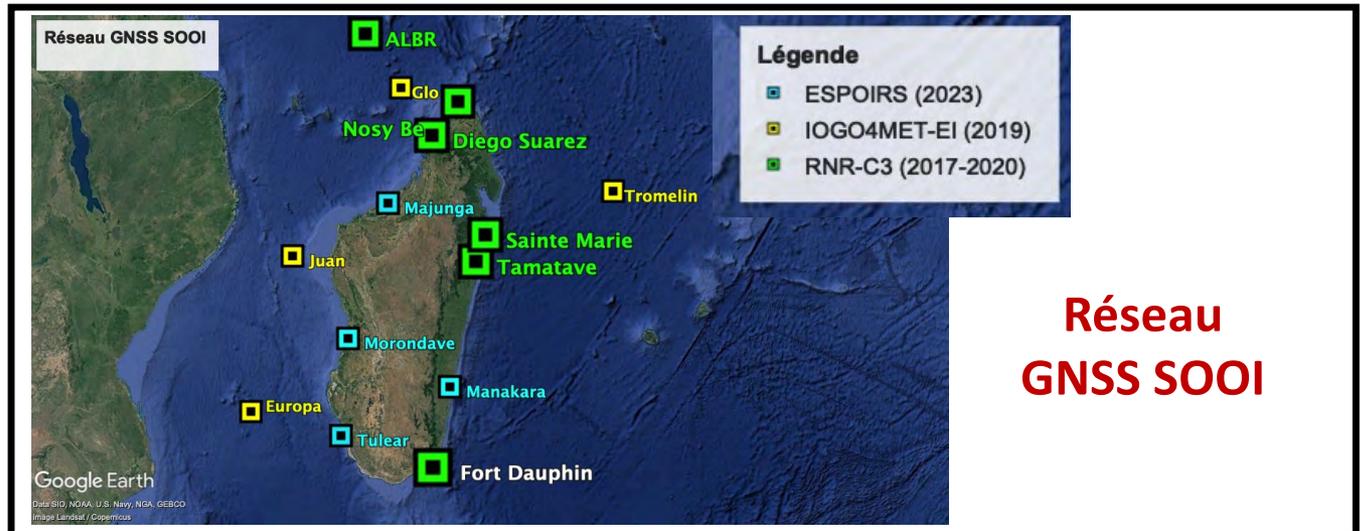
# ReNovRisk-C3

Recherche intégrée et Innovante sur les Risques Naturels

Action 1

SA 1.1

Réseau GNSS dans l'océan Indien



**Réseau  
GNSS SOOI**

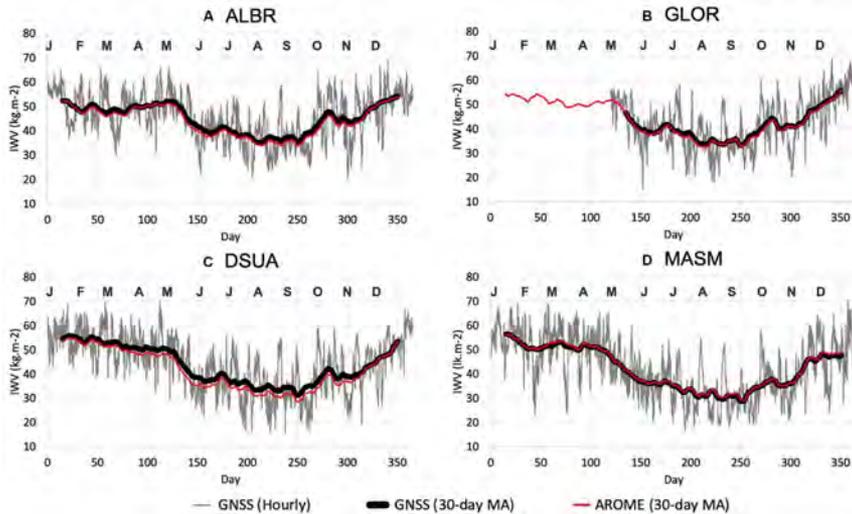




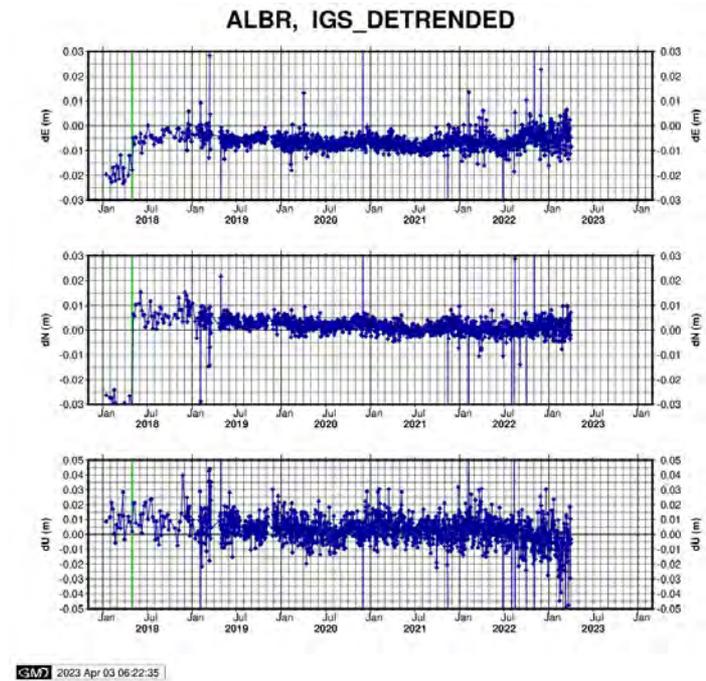
## SA1.1 «Renforcement des observations d'humidité atmosphérique»



## Exemples d'applications



Evolution du cycle saisonnier de la vapeur d'eau en 2019 - *Bousquet et al. (2020)*



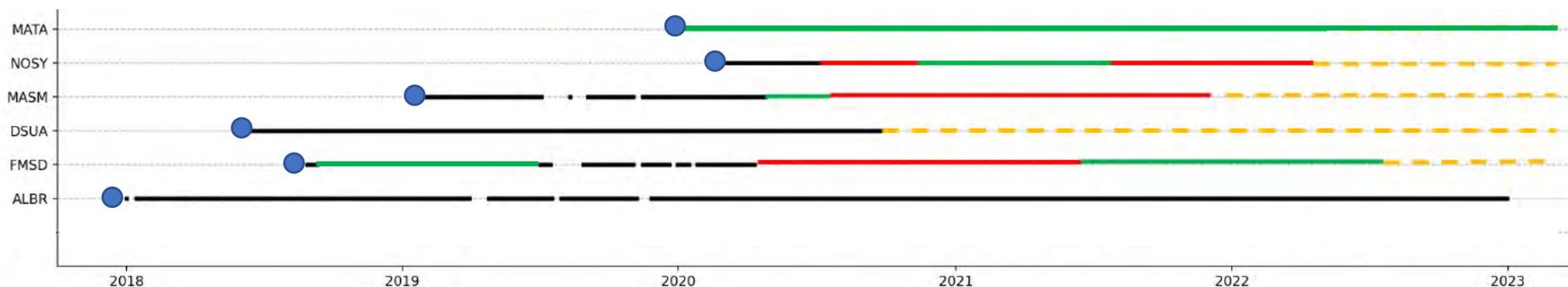
Mouvements de l'atoll d'Aldabra (2018-2023)



## SA1.1 «Renforcement des observations d'humidité atmosphérique»

### Problèmes rencontrés

- ❖ **Activité chronophage**
- ❖ **Quelques pannes (cables endommagés, problèmes de configuration, pannes de pc concentrateurs)**
- ❖ **Impossibilité d'accéder aux sites et aux instruments à partir de février 2020**
  - Arrêt progressif des transmissions et de certaines stations à partir de mars 2020 (Covid)
  - Toutes les stations malgaches ont été remises en service entre décembre 2021 et mai 2022 (ESPOIRS)
  - Les transmissions seront toutes remises en route à partir de mai 2023 (ESPOIRS)





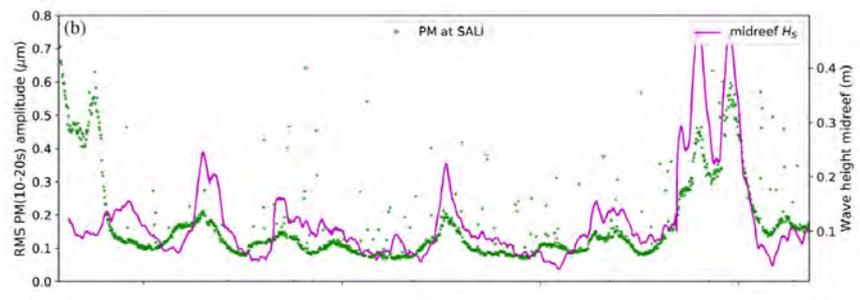
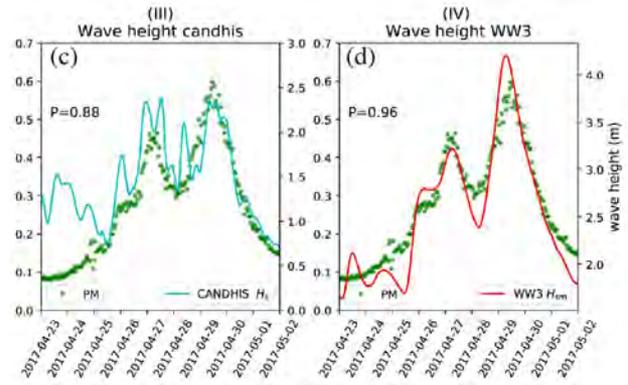
## Sous-Action 1.2

### Observation de la houle

**Objectif:** Préciser la signature de la houle et l'état de l'océan sur les territoires ciblés

### 1. Mesures terrestres

Les mesures terrestres de la houle consistant à analyser le bruit micro-sismique enregistré par des sismomètres terrestres ont été exploitées dans le cadre du CDD IGR d' **E. RINDRAHARISANO** (coop MOI et IOGA)



Comparaisons entre des mesures de houle à La Réunion par un sismomètre (vert foncé), un marégraphe (bleu, rose) et le modèle de vagues WW3 (rouge) lors d'un épisode de houle australe (gauche) et de la tempête Fernando (droite) en 2017 (Rindiharisanoa et al. 2021)

- Les résultats obtenus ont fait l'objet de trois publications dont 2 dédiées
- Cette sous-action a permis la réalisation d'un stage de master et d'une mobilité à La Réunion pour un étudiant et un chercheur de IOGA



## **Sous-Action 1.2**

### **Observation de la houle**

**Objectif:** Préciser la signature de la houle et l'état de l'océan sur les territoires ciblés

### **2. Mesures à la mer**

**- Mesures in-situ dans le lagon de La Réunion (Coop OSU-R / TSMOI)**

D'autres travaux, non prévus initialement, ont été implémentés dans le cadre du premier avenant suite à l'annulation de la prestation de service CLS

- Mesures par drones sous-marins (Glider, Coop. CNRS)**
- Mesures par drone aérien (Boréal, Coop. CNRM)**
- Mesures par tortues marines (Coop Kelonia / CEDTM)**



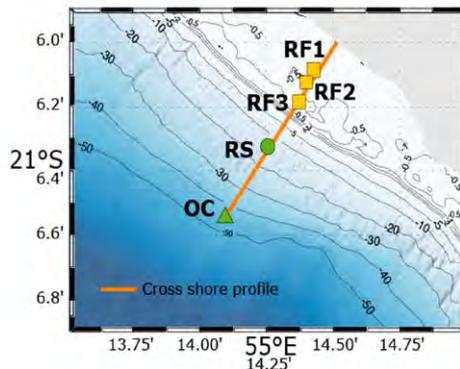
## Sous-Action 1.2 Observation de la houle

**Objectif:** Préciser la signature de la houle et l'état de l'océan sur les territoires ciblés

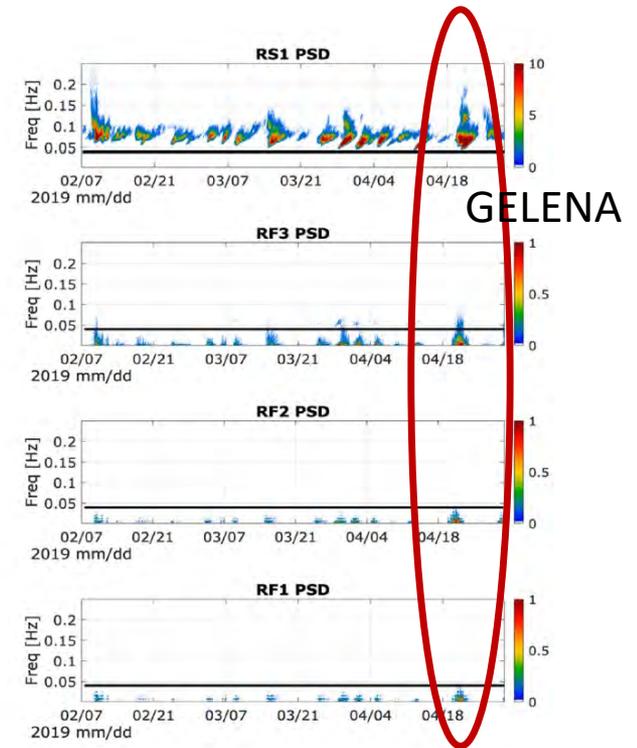
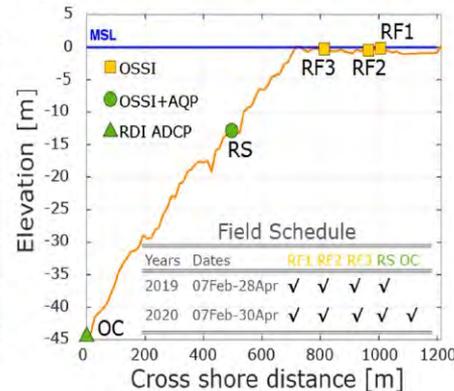
### 1. Mesures in-situ dans le lagon de La Réunion

Etude du rôle protecteur de la barrière récifale de La Réunion lors d'épisodes de forte houle

#### b) STUDY AREA



#### c) CROSS SHORE PROFILE



Mesures de houle sur la période février – avril 2019

Bousquet et al. (2021)

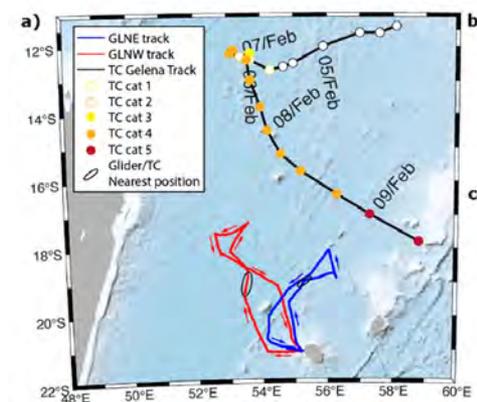
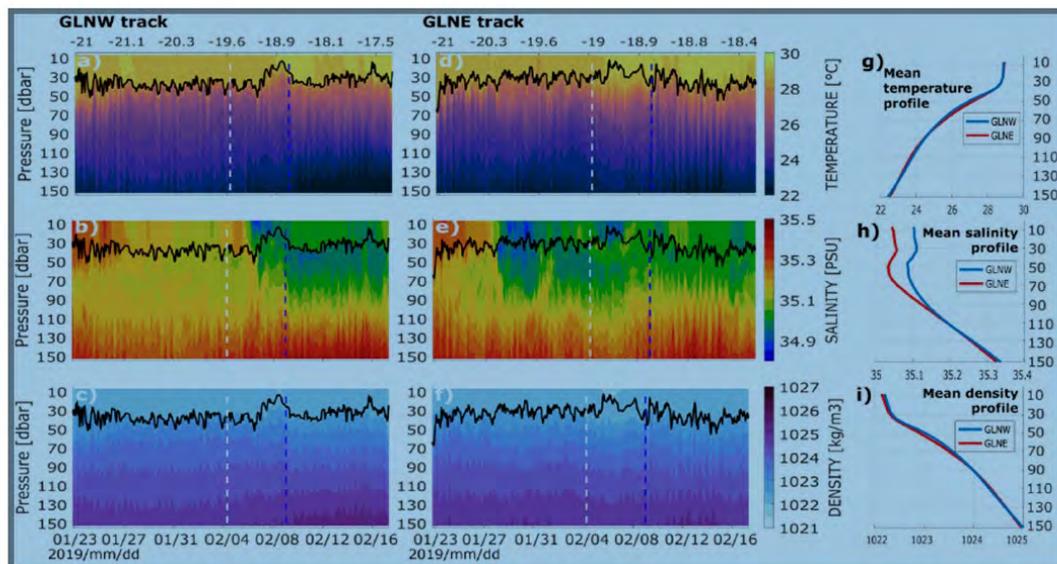


## Sous-Action 1.2 Observation de la houle

**Objectif:** Préciser la signature de la houle et l'état de l'océan sur les territoires ciblés

### 2. Mesures par drones sous-marins (jan-mars 2019)

=> [Reportage France-TV](#)





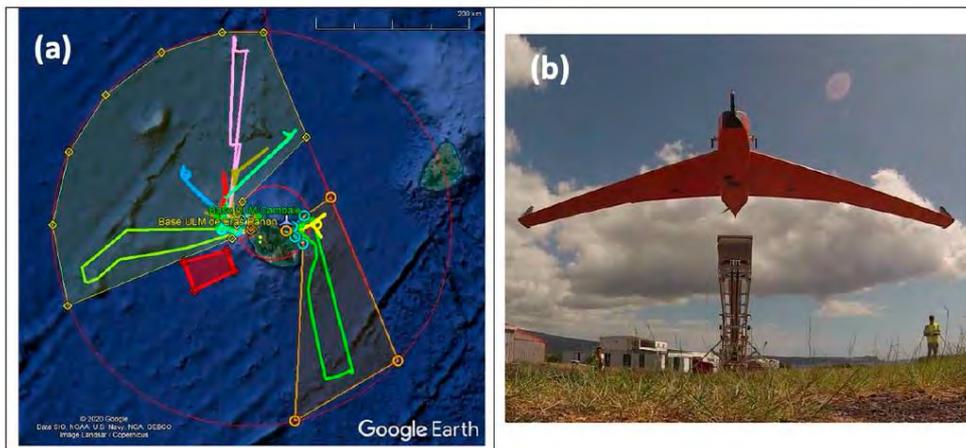
## Sous-Action 1.2

### Observation de la houle

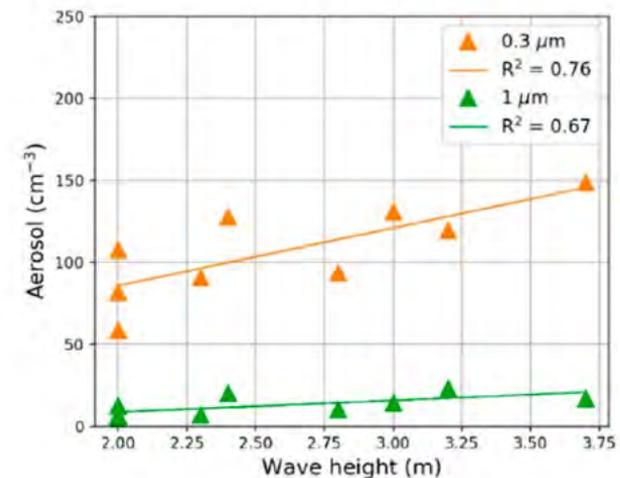
**Objectif:** Préciser la signature de la houle et l'état de l'océan sur les territoires ciblés

### 3. Mesures par drone aérien

Mesurer la houle et la concentration en sels marin au voisinage de La Réunion



12 vols réalisés à partir de La Réunion (Bras Panon et Cambaie) en février et mars 2019 (Bousquet et al. 2021)



Comparaison des mesures de houle et de concentration en sel marins pendant les 2 mois de campagne



## Sous-Action 1.2

### Observation de la houle

**Objectif:** Préciser la signature de la houle et l'état de l'océan sur les territoires ciblés

#### 4. Mesures par tortues marines

Evaluation de la capacité des tortues marines à collecter des observations océanographiques au voisinage des cyclones tropicaux



(a) 23 April 2019 – TC Kenneth



(b) 15 March 2020 – TC Herold



Les tortues marines Brice dans le cyclone Kenneth et India et Tom dans le cyclone Herold

Bousquet et al. 2020, 2021

(c) SST India 13-19 March 2020



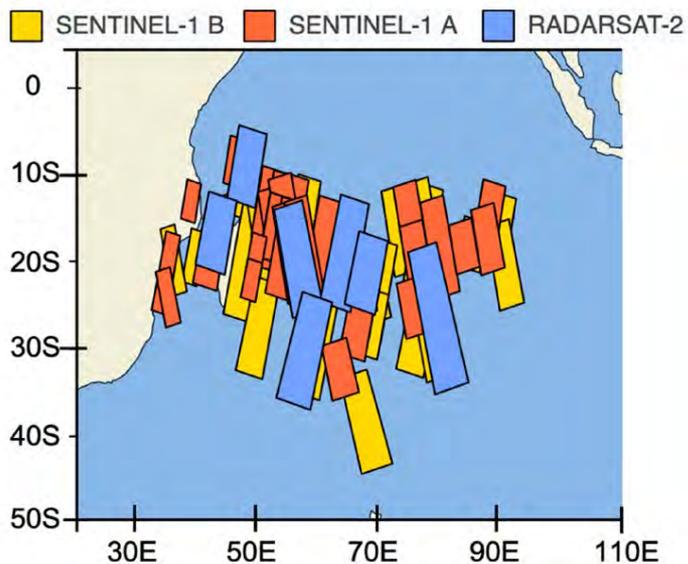
12 animaux équipés entre janvier 2019 et juin 2020 dans le cadre de RNR-C3



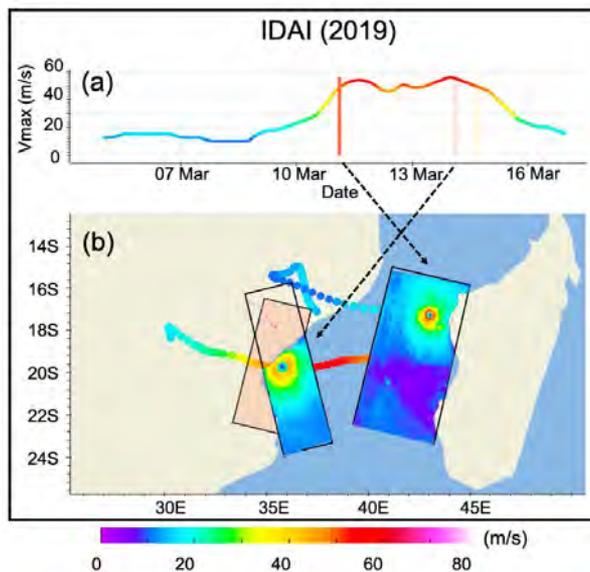
## Sous-Action 1.3

### Observation satellitaire de la houle en conditions cycloniques

**Objectif:** Collecter des observations de vents cycloniques à partir des radars spatiaux SAR (Synthetic Aperture Radar) déployés à bord de RADARSAT-2 et Sentinel 1A-B (UE, Copernicus).



150 acquisitions réalisées entre 2017 et 2021 en collaboration avec IFREMER et l'ESA



Vents SAR dans le cyclone IDAI (2019)  
**Bousquet et al. 2021**



Pérénisation et extension du programme à tous les bassins cycloniques dans le cadre du programme CYMS de l'ESA  
<https://www.esa-cyms.org>



## Bilan des activités par actions

### Action 2

#### Modélisation intégrée des cyclones tropicaux du bassin SOOI

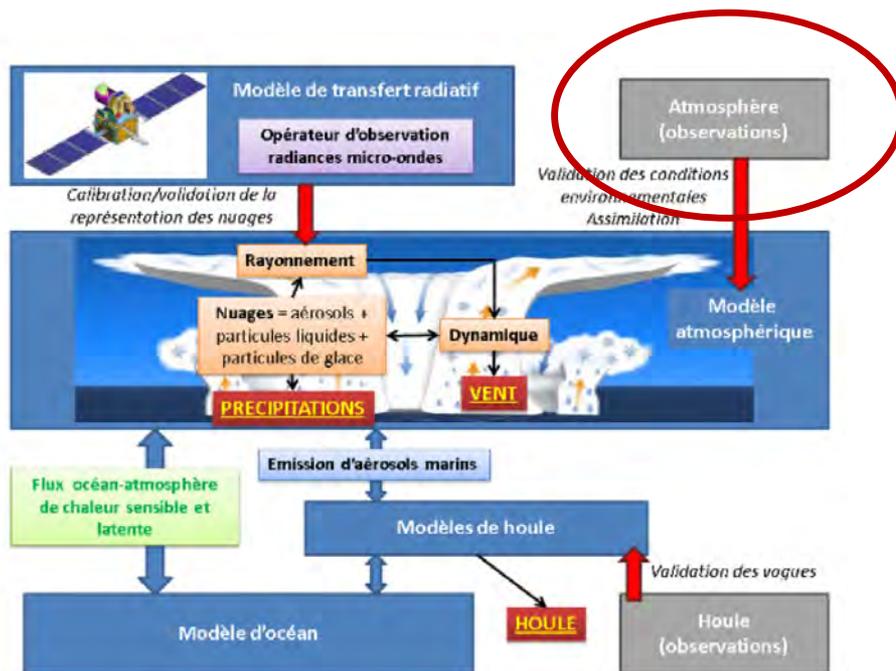
- A2.1 *Développement d'un système d'analyse météorologique à haute résolution spatiale*
- A2.2 *Paramétrisations physiques*
- A2.3 *Simulations numériques à haute-résolution*



## Sous-Action 2.1

### Développement d'un système d'analyse météorologique à haute résolution spatiale

**Objectif:** Réaliser les développements nécessaires à l'obtention d'analyses atmosphériques à haute résolution spatio-temporelle pour initialiser les modèles de cyclones utilisés dans le projet.



Développement et implémentation d'un module d'assimilation de données dans le modèle AROME Océan Indien [Bousquet et al. \(2019\)](#)

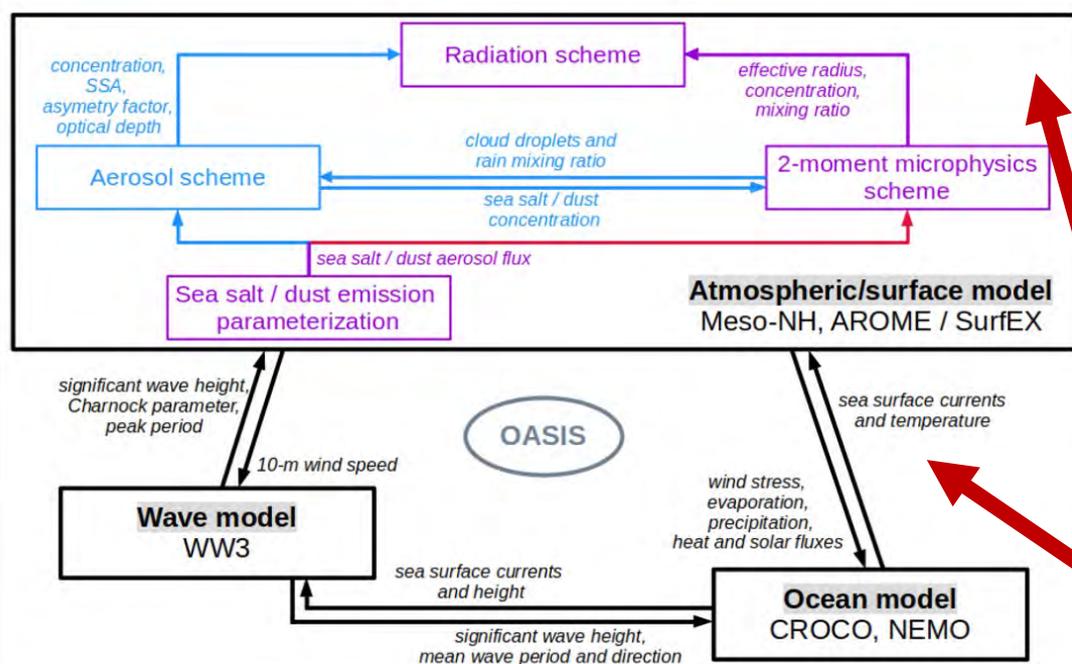
Module notamment utilisé pour assimiler les données SAR dans le modèle AROME [Duong et al. \(2021\)](#)



## Sous-Action 2.2

### Paramétrisations

**Objectif:** Formaliser un couplage océan-atmosphère-vagues dans les modèles numériques de cyclones et adapter les paramétrisations physiques existantes au contexte cyclonique



Plusieurs configurations de modèle intégré ont été développées

(Barthe et al. 2021, Bielli et al. 2021)

Evaluation et implémentation de nouvelles paramétrisations microphysiques (CDD IGR M. Claeys)

Evaluation de nouvelles paramétrisations des échanges (flux) OA (CDD IGR J. Pianezze)



## Sous-Action 2.3

### Simulations numériques

**Objectif:** Évaluer les performances des modèles OAV développés dans le cadre du projet via des simulations couplées de cas de cyclones tropicaux ayant affecté les territoires du bassin SOOI

- ⇒ **Des simulations numériques couplées à haute résolution spatiale (2 km et 500 m) ont été réalisées pour une dizaine de cyclones parmi lesquels :**
  - Bejisa (2014, impact en termes de pluie, vent et houle sur La Réunion)
  - Berguitta (2018) analyse du champ de houle autour de l'île Maurice
  - Fantala (2018, évaluation du vent, de la pluie et de la houle sur l'atoll des Farquhar)
  - Idai (2019, microphysique nuageuse)
- ⇒ **Les jeux de données numériques issus de ces simulations, disponibles au format netcdf, ont été mis à disposition sur le serveur ftp de l'OSU-R.**
- ⇒ **Une demi douzaine de publications directement ou indirectement basées sur l'exploitation de ces simulations**

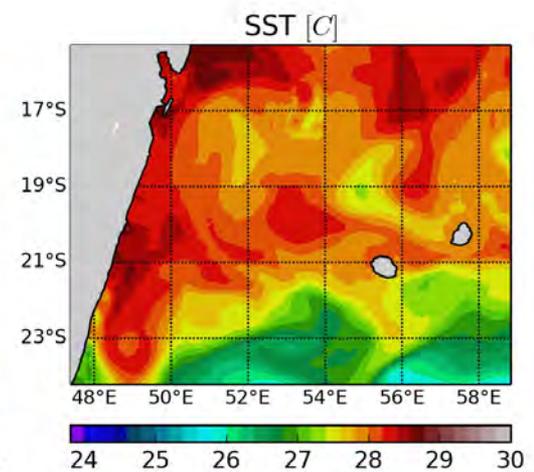
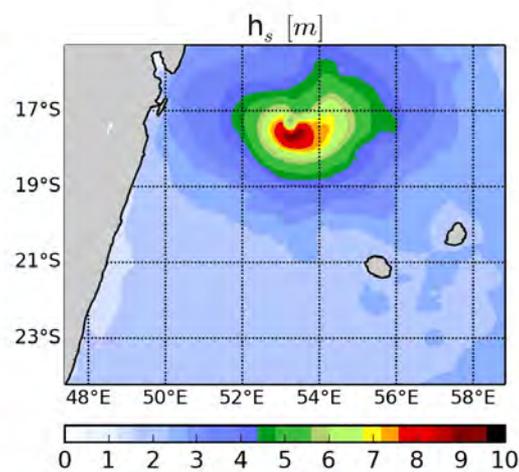
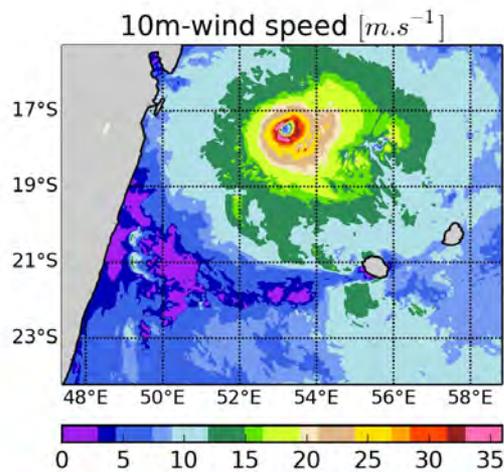


## Sous-Action 2.3

### Simulations numériques

Cas du cyclone BEJISA (2014) – simulation de 42 heures initialisée le 1<sup>er</sup> jan à 00 UTC

Bejisa : 01-01-2014 06:00  
MNH <-> WW3 <-> CROCO





## Sous-Action 2.3

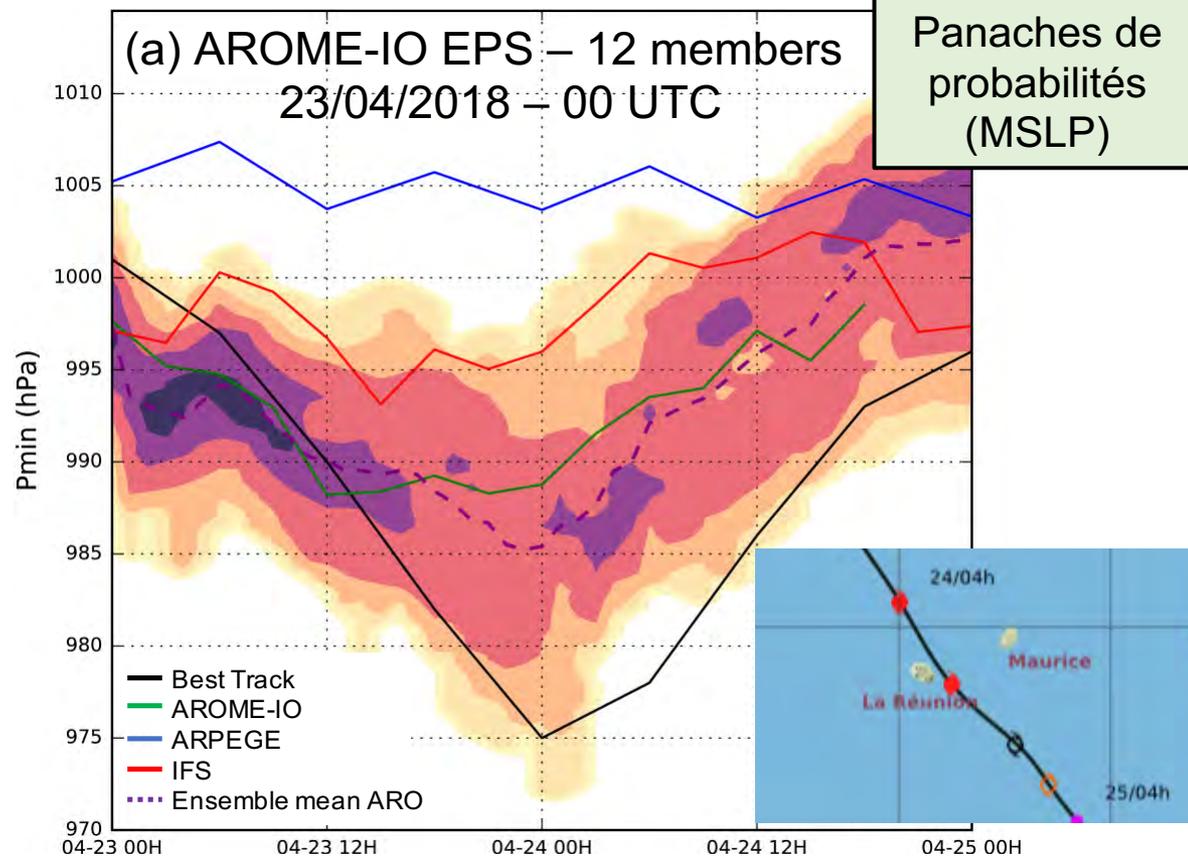
### Simulations numériques

#### Prévision d'Ensemble

Passage d'une prévision **déterministe** (basée sur une seule réalisation) à une prévision **probabiliste** (basée sur plusieurs réalisations d'une même prévision)

#### CT FAKIR

La Réunion (04/2018)





## Bilan des activités par actions

### Action 3

#### Impact futur des cyclones tropicaux sur les îles du bassin SOOI

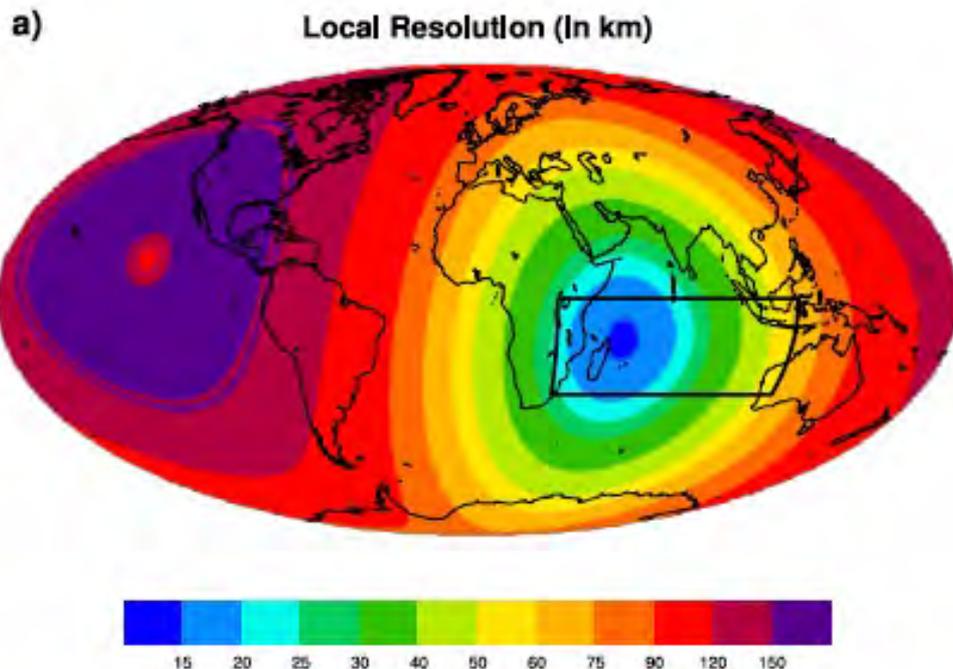
- A3.1 *Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle régionale*
- A3.2 *Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle locale*



## Sous-Action 3.1

### Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle régionale

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



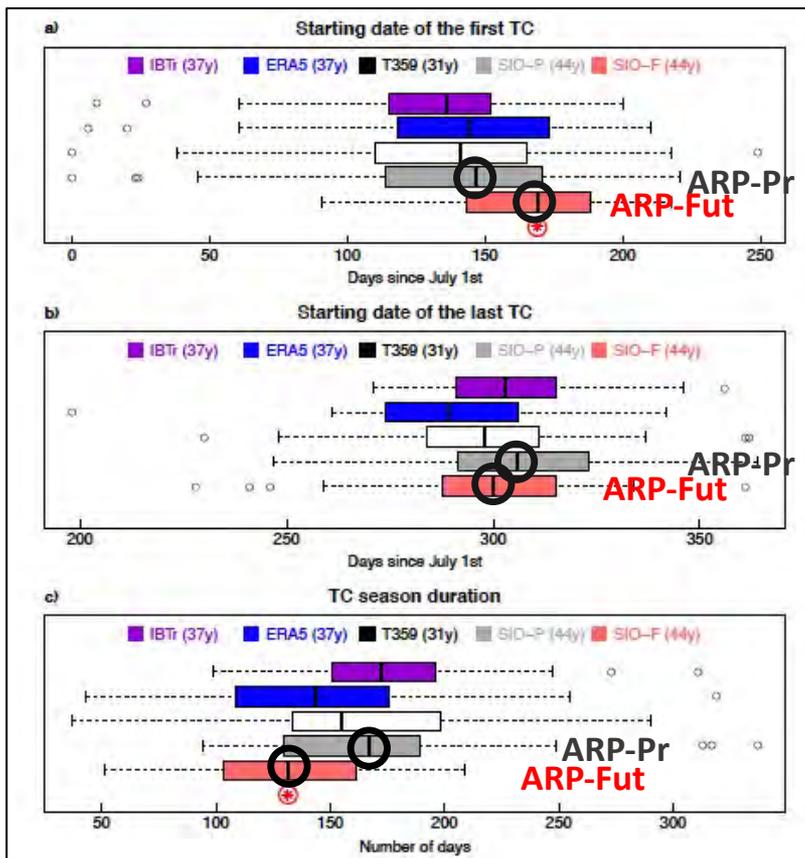
Réalisation de simulations climatiques à haute résolution dédiées au projet à partir du modèle ARPEGE-Climat configuré en maille variable sur les périodes 1971–2014 et 2051–2094 (**mobilité J. Cattiaux et CDD IGR de C.L. Tsai**)

**Cattiaux et al. 2020**

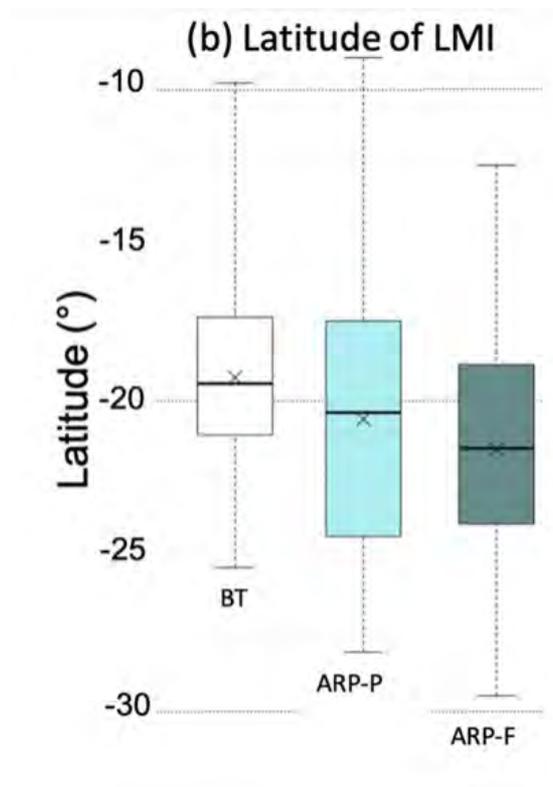


## Sous-Action 3.1

### Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle régionale



Diminution d'environ un mois de la durée de la saison cyclonique aux alentours de 2070

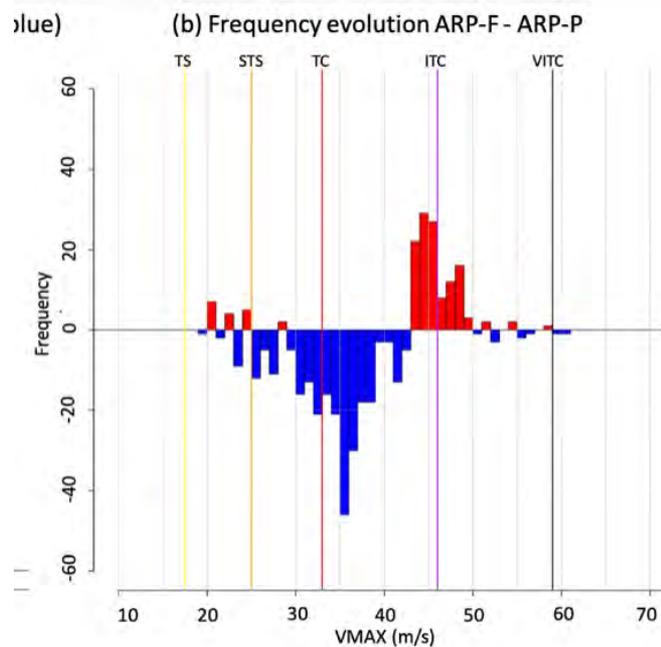


Maximum d'intensité atteint par les cyclones décalé vers le sud (plus proche de La Réunion)



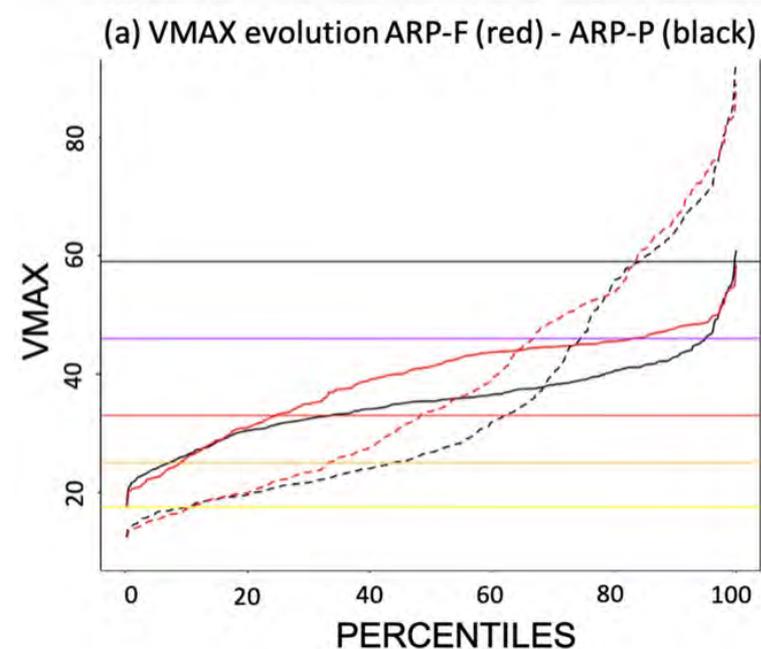
## Sous-Action 3.1

### Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle régionale



#### Evolution en fréquence

- CT moins fréquents
- CTI plus fréquents



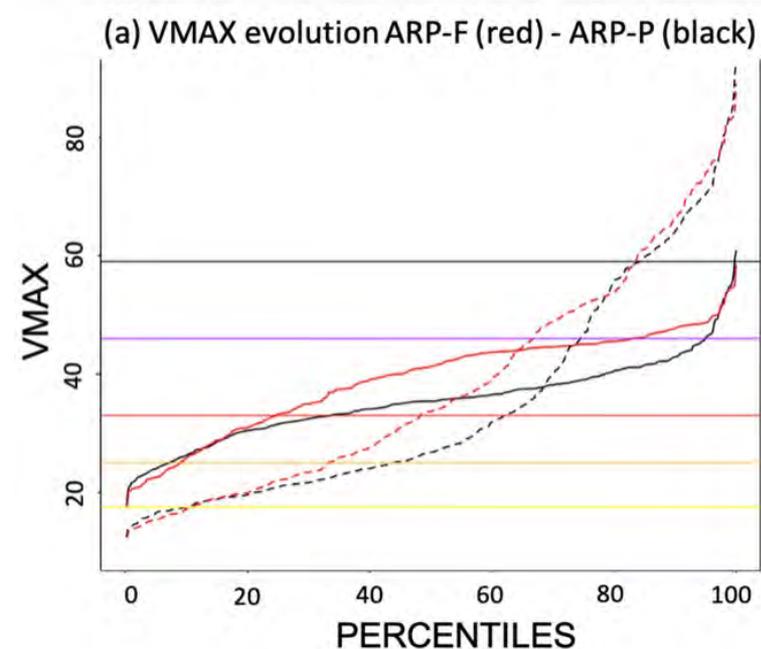
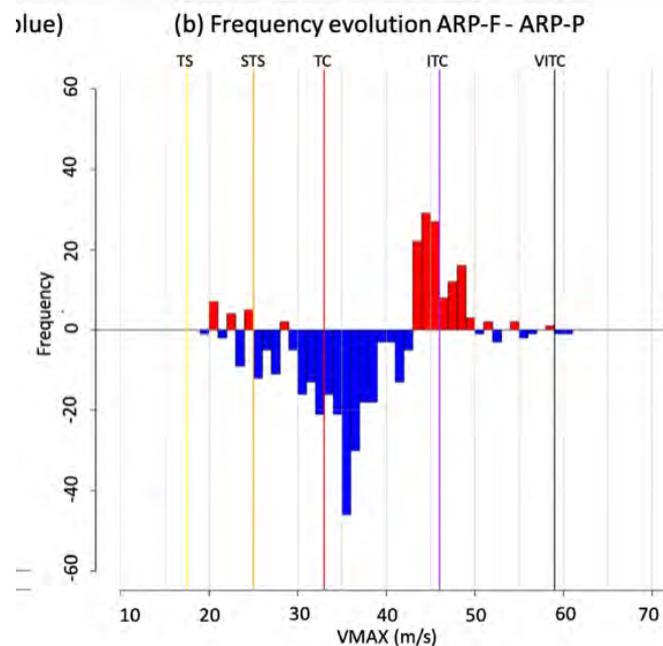
#### Evolution en intensité

- Augmentation globale de l'intensité de tous les systèmes



## Sous-Action 3.1

### Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle régionale



Augmentation significative du risque cyclonique à La Réunion avec des cyclones plus intenses et atteignant leur maximum d'intensité plus près des Mascareignes qu'aujourd'hui (Barthe et al. 2021, Cattiaux et al. 2019)

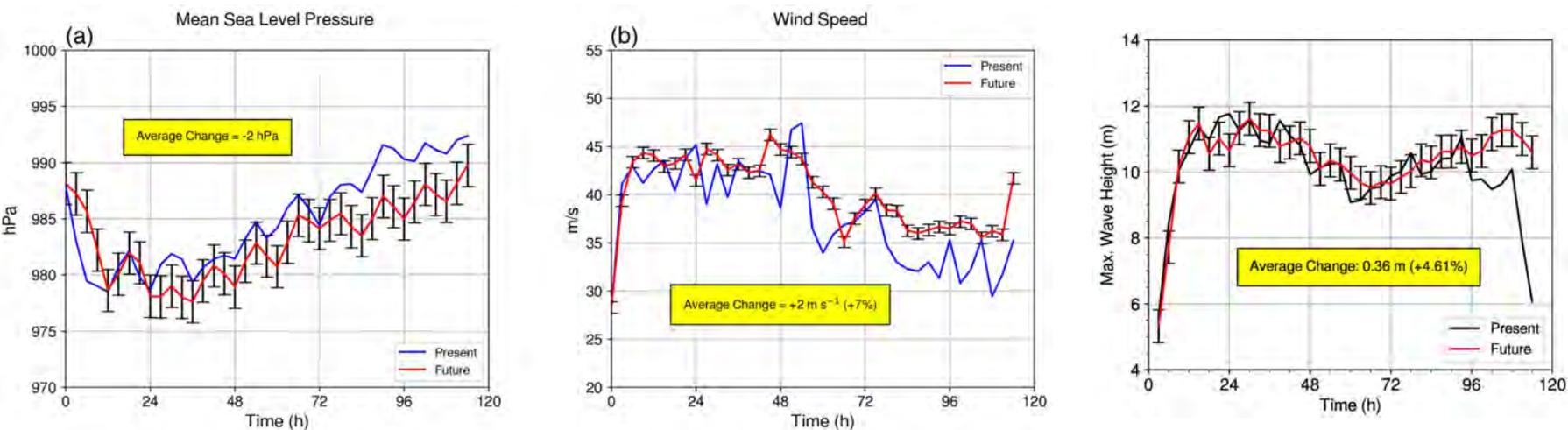


## Sous-Action 3.2

### Évolution de l'activité cyclonique à l'échelle locale

**Objectif:** Évaluer l'impact du changement climatique sur la structure et l'intensité des cyclones du futur au moyen des modèles OVA développés dans le cadre du projet.

- Mise au point d'une approche originale permettant de simuler les cyclones du futur à haute résolution à partir des modèles OVA développés dans le cadre du projet (**CDD IGR C. Thompson**);
- Application au cas du cyclone Bejisa (2014) – **Thompson et al. 2021**





## Bilan des activités par actions

### Action 4

#### Coordination et valorisation

- A4.1 *Gestion et pilotage du projet*
  - Création d'une comité scientifique regroupant l'ensemble des partenaires qui s'est réuni pour la première fois en juillet 2018 lors de la réunion de lancement (elle-même suivie d'un mini-workshop);
  - Recrutement d'une gestionnaire à mi-temps (50% C3 / 50% CP) en janvier 2018 pour assurer la gestion administrative du projet.



## Bilan des activités par actions

### Action 4

#### Coordination et valorisation

- A4.2 *Réalisation d'un film sur les cyclone tropicaux*
  - *Tournage et réalisation DUN (Université de La Réunion)*
- A4.3 *Organisation d'un workshop scientifique à La Réunion*



## Bilan des activités par actions

### Action 4

#### Coordination et valorisation

- A4.4 *Valorisation des travaux scientifiques*
  - **13 publications** dans des revues scientifiques internationales de rang A ;
  - **Une édition spéciale de la revue Atmosphère**, dédiée au cyclones de l'océan Indien et intégrant 8 articles en lien direct avec le projet a été publiée en 2021 ;
  - **6 présentations** lors de 5 conférences internationales



## **BILAN GLOBAL**

- 1/ **Projet médiatiquement très porteur**, régulièrement mis en avant par l'UE et la Région Réunion dans le cadre du programme Interreg OI 2014-2020;
- 2/ **Coopération internationale soutenue** (et réelle) avec l'ensemble des partenaires;
- 3/ **Mise en oeuvre de travaux et d'outils novateurs et uniques** autour de l'observation et de la modélisation des cyclones;
- 4/ Développement de **nouveaux outils de prévision** des cyclones au bénéfice du CMRS
- 5/ **Important volet formation** (renforcement des capacités)
  - **Deux stages de master2**, dont 1 destiné à un étudiant malgache de IOGA
  - Organisation de **trois formations** en climatologie et en prévision à destination des chercheurs et prévisionnistes du SMA
  - Recrutement et formation de **5 IGR**
- 6/ Poursuite des activités initiées dans RNR-C3 à travers de **nouveaux projets INTERREG** (STORM-IO et ESPOIRS)



## FILM

- **Projet ReNovRisk-Cyclones dans sa globalité (C3 et CP)**
- **Réalisation DUN (DAMAN)**
- **Prises d'images effectuées entre novembre 2017 et janvier 2020 dans 5 pays: France (Toulouse, Mayotte, Réunion), Madagascar (Tamatave, Diego Suarez), Mozambique (Maputo), Seychelles (Aldabra), Maurice (Rodrigues) - plusieurs séquences prévues initialement n'ont pu être réalisées suite à la fermeture des frontières.**
- **Illustration des principales activités menées dans le cadre du projet, notamment dans le domaine de l'observation**
- **Mise en avant de la coopération régionale**