

Analyse probabiliste de cyclones potentiellement destructeurs

*Livrable de la prestation « Analyse
territoriale de la sensibilité du littoral de
la Nouvelle-Calédonie à l'aléa
submersion marine »*

Martin Benebig

Novembre 2022



Sommaire

1. Introduction.....	4
1.1. Contexte et objectifs	4
1.2. Bases de données historiques des cyclones en Nouvelle-Calédonie	4
1.2.1. IBTrACS.....	4
1.2.2. SPEArTC.....	5
1.2.3. JTWC.....	5
2. Génération de cyclones synthétiques avec STORM.....	6
2.1. Fonctionnement	6
2.2. Validation.....	9
3. Modélisation.....	12
3.1. PaHM	12
3.2. Modèle de Holland (HM80)	12
3.3. Généralisation du modèle de Holland intégrant l'asymétrie (GAHM)	13
4. Incertitudes liées à l'usage de cyclones analytiques.....	13
4.1. Cook	14
3.2.2. Lucas.....	15
3.2.3. Niran.....	16
4. Sélections des trajectoires pertinentes.....	18

Liste des tableaux et figures

Tableau 1 - Variables en sortie de STORM	9
Figure 1 - Trajectoires et intensités des cyclones historiques IBTrACS (gauche) et synthétiques STORM 10000ans (droite)	7
Figure 2 - Schéma de fonctionnement de la génération des cyclones synthétiques avec le modèle STORM.....	8
Figure 3 – Densité de lieu de genèse des cyclones et densité d'occurrence totale de la base de données IBTrACS 1980-2018 (gauche) et du modèle SORM (droite).	10
Figure 4 - Distribution des paramètres gamma (angle d'incidence en °), delta (direction moyenne en °), Pmin (hPa) et Vmean (km/h). Les points issus des trajectoires historiques SPEArTC sont représentés en rouge, les points issus de STORM sont représentés du violet au jaune selon leur densité.	11
Figure 5 - Isotachs utilisés par la généralisation GAHM du modèle de Holland	13
Figure 6 - Vitesses des vents et Rmax issus des sources IBTrACS et JTWC (haut) lors du passage du cyclone Cook en avril 2017. Les surcotes maximales obtenues après simulation SCHISM-UnSWAN sont représentées en-dessous.	14
Figure 7 - Surcote maximale au niveau de la trace du cyclone Cook (gauche), et évolution des surcotes simulées et observée au marégraphe de Thio.	15
Figure 8 - Vitesses des vents et Rmax issus des sources IBTrACS et JTWC (haut) lors du passage de la DTF Lucas en février 2021. Les surcotes maximales obtenues après simulation SCHISM-UnSWAN sont représentées en-dessous.	15
Figure 9 - Surcote maximale à la pointe sud de la Grande Terre lors du passage de Lucas (gauche), et évolution des surcotes simulées et observée au marégraphe de Goro.	16
Figure 10 - Vitesses des vents et Rmax issus des sources IBTrACS et JTWC (haut) lors du passage du cyclone Niran en mars 2021. Les surcotes maximales obtenues après simulation SCHISM-UnSWAN sont représentées en-dessous.	17
Figure 11 - Surcotes maximales dans les lagons étroits de la côte ouest lors du passage de Niran (gauche), et évolution des surcotes simulées et observée dans le lagon de Moindou.	18

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

À partir de l'étude réalisée portant sur sept événements cycloniques récents impactant la Nouvelle-Calédonie, la méthode de modélisation et l'utilisation du couplage courant-houle SCHISM+UnSWAN ont été validés. Ce travail préalable va nous permettre d'effectuer une analyse probabiliste dans les mêmes conditions mais depuis une base de données d'événements fictifs. Le but étant de couvrir les différents événements potentiellement destructeurs grâce à la génération de l'équivalent de 10 000 années d'activité cyclonique. Cette approche statistique avec simulations fictives en conditions défavorables s'appuie sur le travail de *Bloemendaal et al.*¹

La génération des cyclones se fait à partir de la base de données IBTrACS et est décrite dans la partie 2. Génération de cyclones synthétiques avec STORM. Générer un très grand nombre de cyclones permet de s'affranchir du nombre restreint de trajectoires observées dans les bases de données IBTrACS, SPEArTC ou encore la base locale Météo-France NC comportant seulement 197 phénomènes sur la période 1977-2022. Ces bases de données ne permettent donc pas de couvrir de nombreux événements très intenses aux temps de retour importants (supérieurs à 50 ans).

Les cyclones générés dans la zone de la Nouvelle-Calédonie ne seront pas tous modélisés pour cause de capacité de calcul. Une sélection des trajectoires basée sur leur impact potentiel et leur représentativité dans le contexte lagonaire calédonien sera effectuée.

1.2. Bases de données historiques des cyclones en Nouvelle-Calédonie

1.2.1. IBTrACS

La base de données *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS) est constituée par différentes agences afin de créer une base de données globale des cyclones tropicaux. Cette centralisation a pour but d'accroître notre compréhension de la distribution, de la fréquence et de l'intensité des cyclones tropicaux à travers le monde. La *World Meteorological Organization* (WMO) rend disponible les ressources *best track* des

¹ A globally consistent local-scale assessment of future tropical cyclone risk - Nadia Bloemendaal, Hans de Moel, Andrew B. Martinez, Sanne Muis, Ivan D. Haigh, Karin van der Wiel, Reindert J. Haarsma, Philip J. Ward, Malcolm J. Roberts, Job C. M. Dullaart, Jeroen C. J. H. Aerts

différentes agences sous différents formats^{2,3}. IBTrACS est la source la plus étayée et est celle utilisée comme entrée du modèle de génération de cyclones STORM.

1.2.2. SPEArTC

La base de données cycloniques internationale nommée SPEArTC (*South Pacific Enhanced Archive of Tropical Cyclones*) est disponible à l'adresse <http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/speartc/>

Les climatologues du Service de la Météorologie et du Climat de la Nouvelle-Calédonie ont analysé les données du SPEArTC en les confrontant à des données d'observations telles que les mesures de vent et de pression présentes dans la base de données climatologiques de Météo-France, les trajectoires recensées dans la base de données cycloniques locale, les images satellite ou encore les réflectivités radar. A l'issue de cette analyse, de nombreuses corrections (import de trajectoires non répertoriées sur SPEArTC, ajout d'observations, repositionnement de points de trajectoires, etc) ont été apportées et ont abouti à l'élaboration de la base de données cycloniques en Nouvelle-Calédonie.⁴

Ce jeu de données provient de la plateforme Géorep : <https://georep-dtsi-sgt.opendata.arcgis.com/>

Cette base de données constitue une ressource très qualitative de l'activité cyclonique réelle en Nouvelle-Calédonie mais ne comporte pas d'informations sur les rayons maximums des vents générés lors de chaque cyclone, qui sont indispensables pour une modélisation avec SCHISM-UnSWAN.

1.2.3. JTWC

Le Joint Typhoon Warning Center (JTWC) est le centre de prévision des cyclones tropicaux de la US Navy et est situé au centre de prévision maritime de Pearl Harbor à Hawaii. Dans notre étude, l'intérêt d'utilisation de cette base de données vient du fait de la prise en compte des paramètres d'asymétrie le long des trajectoires cycloniques pouvant avoir une influence importante sur l'aléa submersion (<https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html?best-tracks>).

² Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: *The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376.

³ Knapp, K. R., H. J. Diamond, J. P. Kossin, M. C. Kruk, C. J. Schreck, 2018: *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4*. [indicate subset used]. NOAA National Centers for Environmental Information.

⁴ <https://data.opendatasoft.com/explore/dataset/base-de-donnees-cycloniques0%40nouvelle-caledonie/information/>

2. Génération de cyclones synthétiques avec STORM

L'algorithme *Synthetic Tropical cyclOne geneRation Model* (STORM) permet de générer l'équivalent de 10 000 ans de trajectoires synthétiques de cyclones présentant des caractéristiques statistiques très proches des cyclones observés. Nous utiliserons ce modèle uniquement sous des conditions climatiques actuelles, l'impact du changement climatique sur l'intensité des cyclones dans le bassin Pacifique sud n'ayant pas été démontré de manière significative. Cependant, il sera question de leurs conséquences dans un contexte de montée des eaux.

2.1. Fonctionnement

En entrée de l'algorithme STORM, on utilise les cyclones issus de la base de données IBTrACS sur la période 1980-2018. Ces données sont disponibles pour les différents bassins cycloniques et les sorties de STORM se font séparément pour chacun d'entre eux, nous utiliserons donc uniquement les données du pacifique sud (source USA).

Les vitesses de vent en entrées sont toutes converties en vent moyen 10 minutes (U10 ; en m/s). Seuls les pas de temps avec U10 supérieur à 18 m/s (35 kt) sont conservés, ce qui correspond à la classification de cyclone de catégorie 1. Le modèle nécessite des données environnementales avec les champs MSLP (*Mean Sea Level Pressure*) et SST (*Sea Surface Temperature*) extraits depuis les données ERA-5 fournies par ECMWF.

En plus des champs MSLP et SST, les données d'entrées sont donc les coordonnées géographiques, U10 (m/s), la pression (hPa), Rmax (km), le mois et l'année. Le modèle STORM va ensuite échantillonner le nombre d'événements suivant une distribution de Poisson, le mois de genèse de chaque évènement suit la probabilité observée dans les données IBTrACS.

La localisation initiale des cyclones est comptée dans des boîtes 5°*5° et assignée au centre, ces points sont ensuite interpolés dans une grille 1°*1°. Enfin, la localisation initiale pour STORM est assignée de façon aléatoire dans la cellule 1°*1° avec une résolution 0.1°. Les changements en longitudes et latitudes de l'œil du cyclone sont extraits d'IBTrACS pour chaque pas de temps et sont ensuite groupés par section de 5° de latitude. Le déplacement en sortie utilise des formules de régression issues des travaux de James et Mason⁵.

Les valeurs de pression et vitesse du vent sont assignées à chaque pas de temps moyennant la relation empirique vent-pression WPR :

⁵ James, M. K. & Mason, L. B. *Synthetic Tropical Cyclone Database*. *J Waterw Port C Div* 131, 181–192, [\(https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:4\(181\)\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:4(181)) (2005).

$$V_t = \alpha * (P_{env} - P_t)^b$$

avec V_t et P_t sont respectivement U_{max} et P_{min} à chaque pas de temps. P_{env} correspond à la pression MSLP mensuelle moyenne d'ERA-5.

Les valeurs de R_{max} sont quant à elles choisies de façon aléatoire pour 3 catégories de pression ($P > 960$, $960 > P > 920$, $P < 920$ hPa).

À noter qu'afin d'éviter que l'intensité des cyclones ne devienne trop importante, celle-ci est contrainte par l'intensité maximale potentielle mensuelle (MPI) qui correspond à une mesure théorique pour une localisation donnée, dépendant de facteurs environnementaux et des conditions atmosphériques.⁶

Les cyclones synthétiques sont ensuite générés 10 fois sur 1000 ans dans des conditions climatiques actuelles avec une série de programmes python. Les trajectoires ainsi obtenues sont présentées à Figure 1

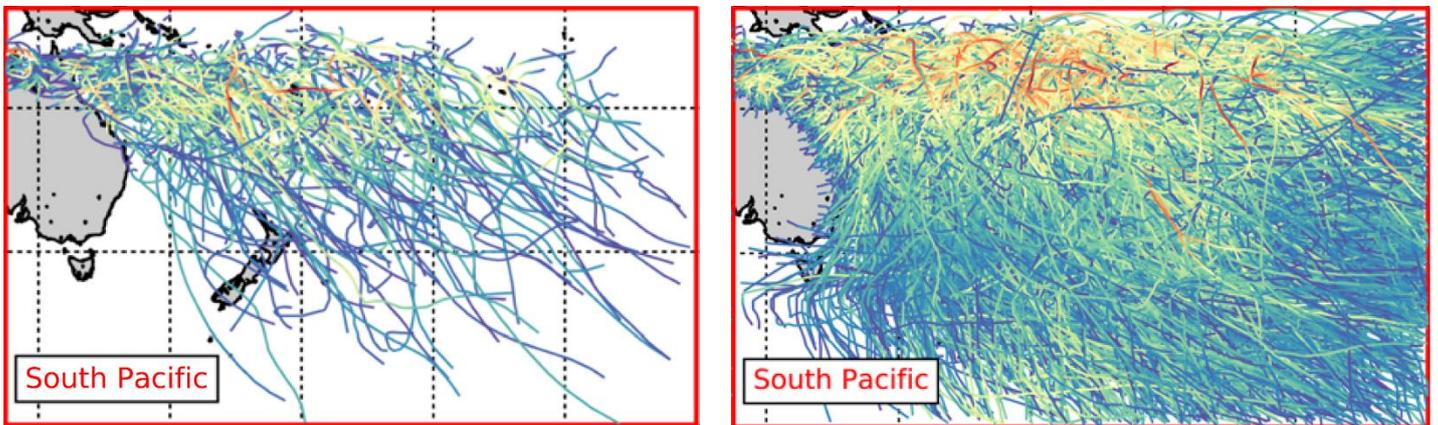


Figure 1 - Trajectoires et intensités des cyclones historiques IBTrACS (gauche) et synthétiques STORM 10000ans (droite)

L'ensemble de la procédure de génération permettant de constituer la base de données de cyclones synthétiques STORM est schématisée Figure 2.

Les fichiers issus de STORM comprennent 13 sorties et sont données avec un pas de temps de 3 heures (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

⁶ Nadia Bloemendaal, Ivan D. Haigh, Hans de Moel, Sanne Muis, Reindert J. Haarsma & Jeroen C. J. H. Aerts. Generation of a global synthetic tropical cyclone hazard dataset using STORM (2020).

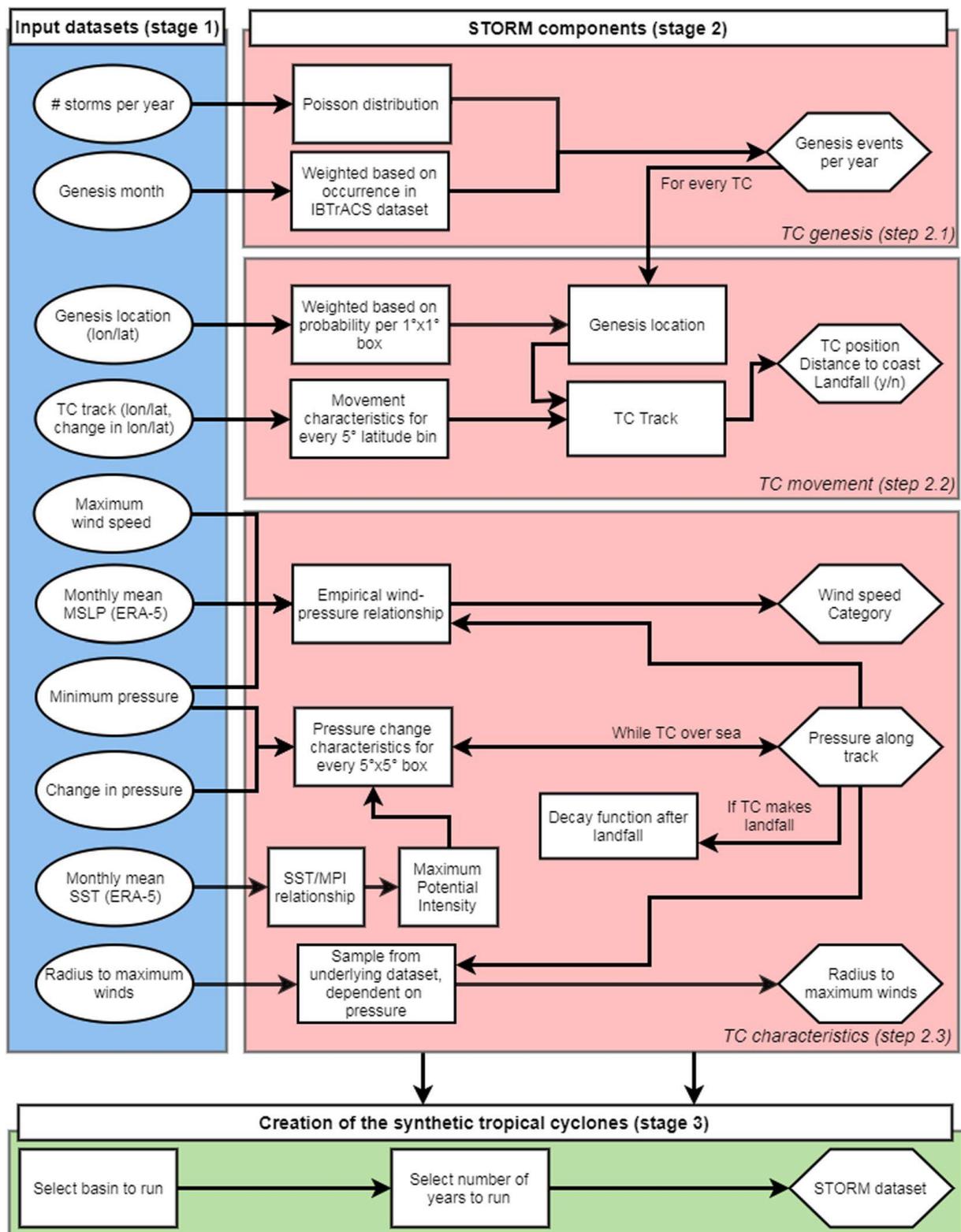


Figure 2 - Schéma de fonctionnement de la génération des cyclones synthétiques avec le modèle STORM

Entry	Variable name	Unit	Notes on variable
1	Year	—	Starts at 0
2	Month	—	
3	TC number	—	For every year; starts at 0.
4	Time step	3-hourly	For every TC; starts at 0.
5	Basin ID	—	0 = EP, 1 = NA, 2 = NI, 3 = SI, 4 = SP, 5 = WP
6	Latitude	Deg	Position of the eye.
7	Longitude	Deg	Position of the eye. Ranges from 0-360°, with prime meridian at Greenwich.
8	Minimum pressure	hPa	
9	Maximum wind speed	m/s	
10	Radius to maximum winds	km	
11	Category	—	On the Saffir-Simpson scale ¹⁹
12	Landfall	—	0 = no landfall, 1 = landfall
13	Distance to land	km	

Tableau 1 - Variables en sortie de STORM

2.2. Validation

Les caractéristiques des cyclones générés par STORM ont fait l'objet d'une validation par Bloemendaal et al.⁶ Cette validation est limitée par le faible nombre d'évènements historiques et la méthode de génération des cyclones comporte des biais.

Lorsque l'on compare les lieux de genèse et d'occurrence totale des cyclones aux abords de la Nouvelle-Calédonie, on remarque un léger décalage vers le sud avec STORM. La base de données IBTrACS met en évidence 2 pôles distincts là où STORM semble les concentrer. La Figure 1 montre également des effets de bords rendant incertaine l'utilisation de STORM dans des zones proche des limites du bassin pacifique sud.

Malgré ses limites et comme le montre *Bloemendaal et al.*, STORM donne une bonne représentation de l'activité cyclonique en matière de localisation, d'occurrence et d'intensité.

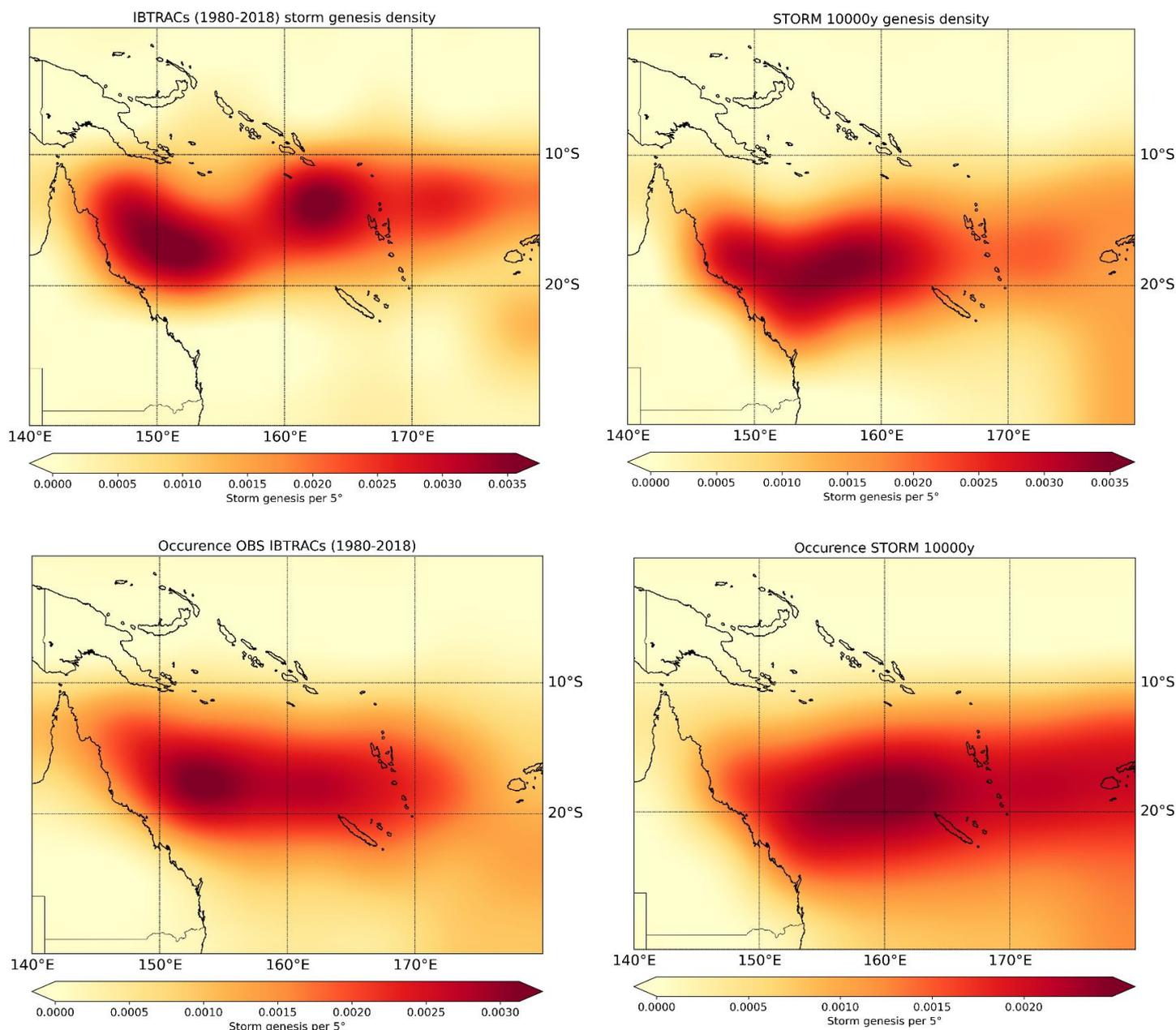


Figure 3 – Densité de lieu de genèse des cyclones et densité d'occurrence totale de la base de données IBTrACS 1980-2018 (gauche) et du modèle STORM (droite).

Une autre comparaison portant sur la trajectoire, la vitesse de translation et la pression minimale a été effectuée entre les cyclones STORM générés et la base de données SPEArTC sur la période 1977-2021.

Les données SPEArTC sont évidemment assez proches de la base IBTrACS utilisée en entrée du modèle STORM, mais sont celles les plus proches des observations grâce aux différentes corrections appliquées.

La trajectoire est prise en compte à travers l'angle d'incidence (gamma en °) et la direction (delta en °). Cette comparaison s'effectue sur les points passant dans un rayon de 4° (~450 km) autour de la Nouvelle-Calédonie.

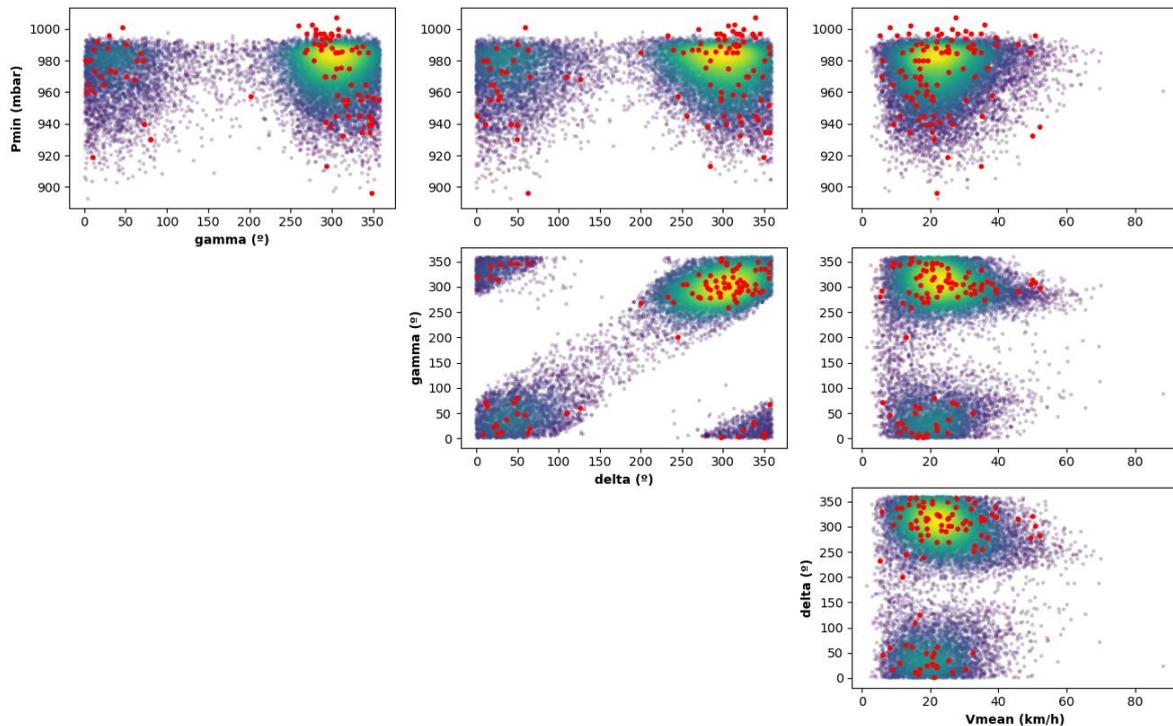


Figure 4 - Distribution des paramètres gamma (angle d'incidence en °), delta (direction moyenne en °), Pmin (hPa) et Vmean (km/h). Les points issus des trajectoires historiques SPEArTC sont représentés en rouge, les points issus de STORM sont représentés du violet au jaune selon leur densité.

Dans les 2 jeux de données, on constate qu'une incidence du secteur sud-est/sud-ouest est quasi-impossible. Dans les données STORM, les dépressions tropicales faibles et fortes ne sont pas représentées à cause du filtre $V_{max} > 18$ m/s appliqué, d'où l'absence de points pour les pressions proches de 1000 hPa.

De façon globale, les caractéristiques de la population STORM sont peu éloignées de celles historiques issues de SPEArTC.

Le grand nombre d'évènements générés avec cet outil sont donc adaptés à notre objectif de quantification de l'aléa submersion en Nouvelle-Calédonie.

3. Modélisation

3.1. PaHM

Afin de réaliser des simulations « *storm-surge* », nous avons besoin d'un modèle de vent paramétrique performant. L'outil *Parametric Hurricane Modeling System* (PaHM) permet de restituer la trajectoire de cyclones synthétiques et de modéliser le système atmosphérique associé dans un contexte d'application lagonaire. PaHM peut aussi être utilisé seul afin de connaître les champs de vents générés par les cyclones. Il est développé par le *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), son système est basé sur le modèle de Holland (section 3.2. Modèle de Holland (HM80)). PaHM sort des champs atmosphériques pouvant forcer un modèle couplé courant-houle tel que SCHISM/UnSWAN, son code source est accessible à l'adresse <https://github.com/noaaocs-modeling/PaHM>.

Une fois PaHM raccordé à notre couplage, nous avons réalisé des simulations à partir de trajectoires synthétiques de cyclones historiques afin de comparer les sources JTWC et IBTrACS. Pour cela, les données doivent contenir les coordonnées géographiques, la pression, le vent max et le Rmax. Ces tests permettent de quantifier l'incertitude liée aux données d'entrée avant de réaliser les simulations de cyclones fictifs générés par STORM.

3.2. Modèle de Holland (HM80)

Le modèle de Holland⁷ est basé sur l'équation du gradient de vent, exprimant la balance entre gradient de pression, force centripète et force de Coriolis. Il introduit un facteur B du profil de pression :

$$B = \frac{\rho_{air} \cdot e V_{max}^2}{P_n - P_c}$$

$$P(r) = P_c + (P_n - P_c) \cdot e^{-(R_{max}/r)^B}$$

$$V_g(r) = \sqrt{V_{max}^2 \cdot \left(\frac{R_{max}}{r}\right)^B \cdot e^{1-(R_{max}/r)^B} + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \frac{rf}{2}$$

Afin d'obtenir les fonctions radiales pour le vent et la pression, 3 paramètres suffisent : P_{centre} , V_{max} et R_{max} (distance au centre de l'isotach V_{max}).

⁷ Greg J. Holland. *An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes*. *Monthly Weather Review*, 108:1212-1218, 1980.

3.3. Généralisation du modèle de Holland intégrant l'asymétrie (GAHM)

PaHM utilise également l'extension de HM80 GAHM (*Generalized Asymmetric Vortex Holland*)⁸. GAHM permet d'introduire la déformation (asymétrie) du champ de vent à travers la détermination de multiples isotachs avec une distance au centre variable par secteur. Cette déformation est supportée dans le système PaHM-SCHISM-UnSWAN. Elle est utilisée dans les données JTWC et parfois dans les données expertisées par Météo-France. Cependant, cette déformation n'est pas prise en compte dans les bases de données IBTrACS et SpearTC.

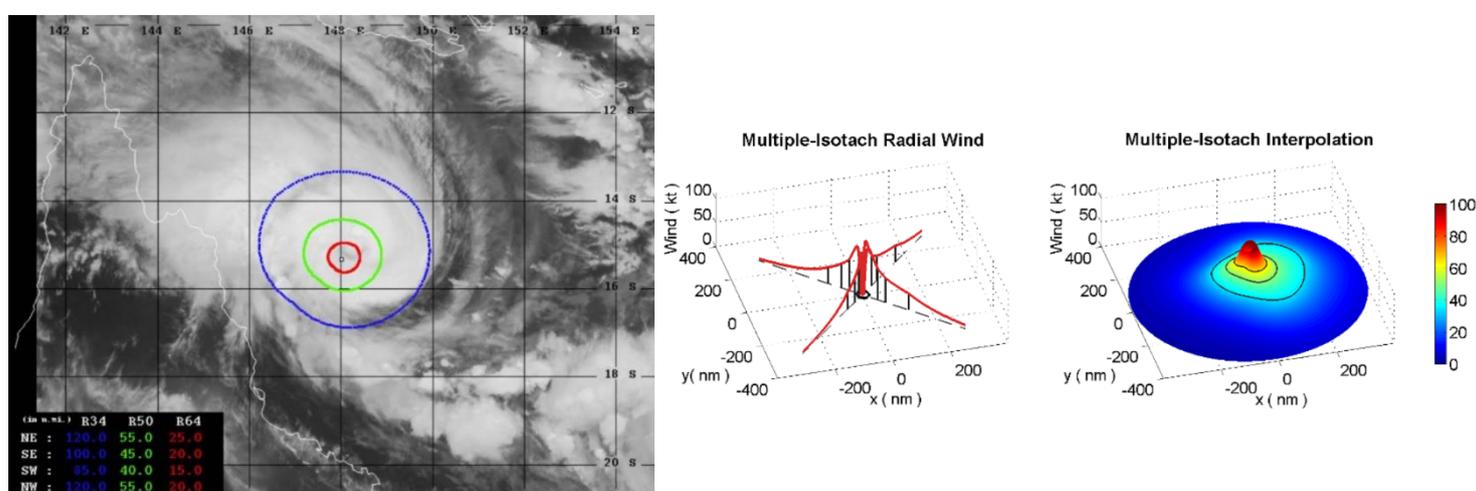


Figure 5 - Isotachs utilisés par la généralisation GAHM du modèle de Holland

4. Incertitudes liées à l'usage de cyclones analytiques

Afin de quantifier les incertitudes sur l'utilisation de trajectoires synthétiques, 3 événements ont été étudiés :

- Cook (avril 2017)
- Lucas (février 2021)
- Niran (mars 2021)

Les réponses en surcotes ont été comparées pour les sources de données IBTrACS (NOAA/WMO) et JTWC lors des 3 événements.

Les données JTWC intègrent le paramètre d'asymétrie issu de GAHM.

⁸ Jie Gao. *On the Surface Wind Stress for Storm Surge Modeling*. PhD thesis, The University of North Carolina, Chapel Hill, NC, 2018.

4.1. Cook

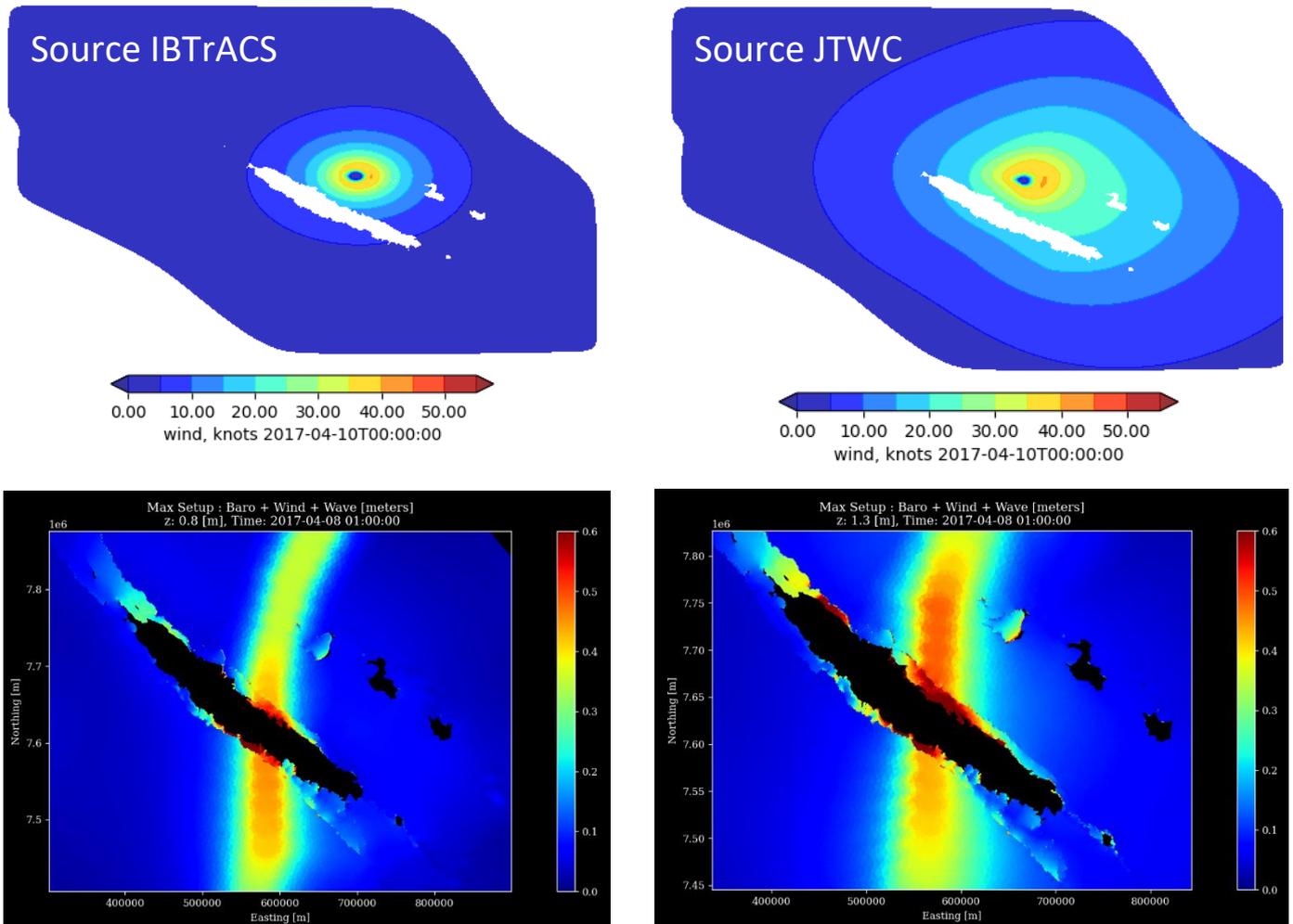


Figure 6 - Vitesses des vents et Rmax issus des sources IBTrACS et JTWC (haut) lors du passage du cyclone Cook en avril 2017. Les surcotes maximales obtenues après simulation SCHISM-UnSWAN sont représentées en-dessous.

Le paramètre d'asymétrie, introduit dans les données JTWC, augmente le champ d'application des vents. Cela induit des surcotes légèrement plus importantes près de la trace du cyclone mais surtout des zones concernées plus étendues.

Un des sites observés touché par le cyclone Cook en avril 2017 fut Thio. Nous avons comparé sur ce site les surcotes simulées selon les forçages (analytiques ou AROME+WW3) avec les observations.

La commune de Thio se trouve proche de la trace du cyclone et le Rmax a eu peu d'influence sur la surcote simulée, les différentes simulations surestiment globalement la surcote.

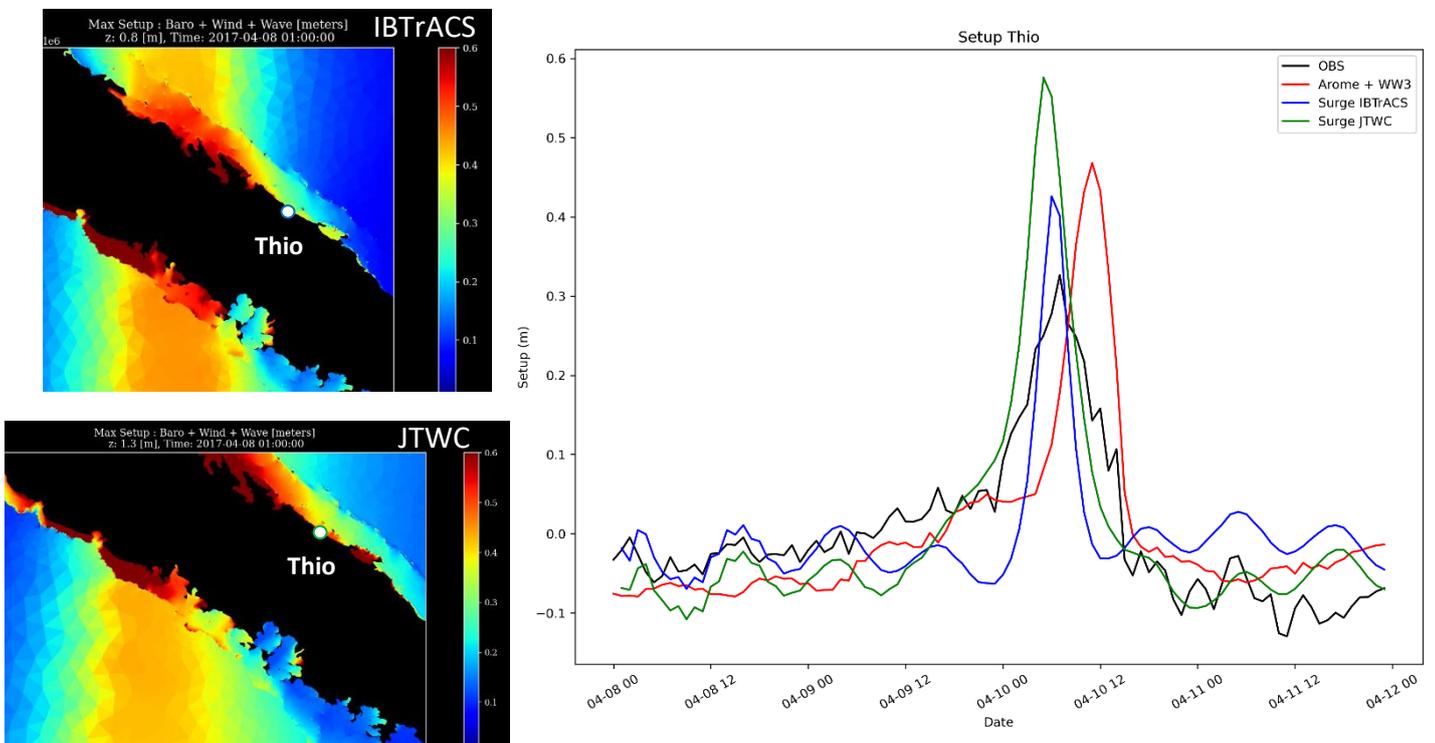


Figure 7 - Surcote maximale au niveau de la trace du cyclone Cook (gauche), et évolution des surcotes simulées et observée au marégraphe de Thio.

3.2.2. Lucas

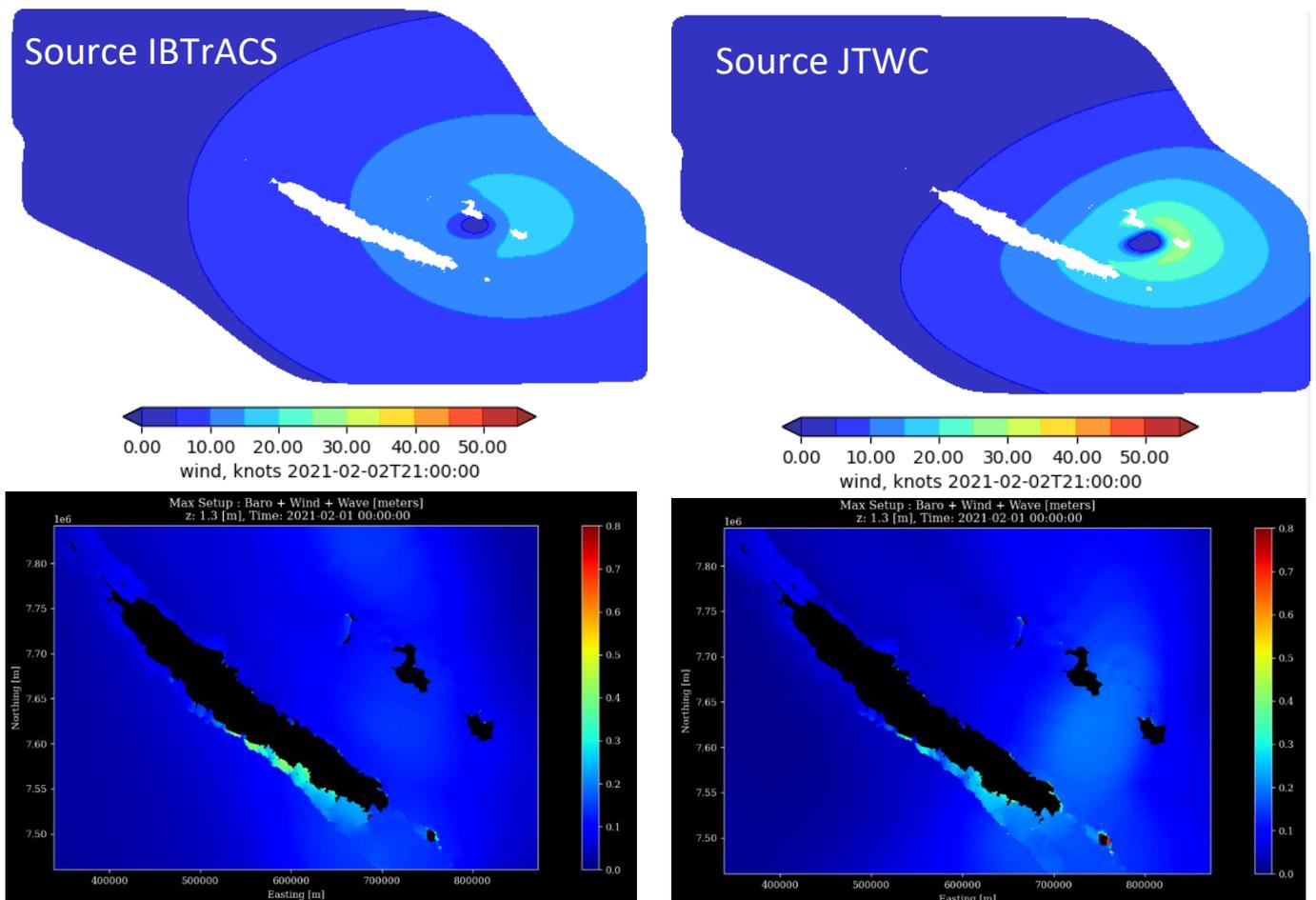


Figure 8 - Vitesses des vents et R_{max} issus des sources IBTrACS et JTWC (haut) lors du passage de la DTF Lucas en février 2021. Les surcotes maximales obtenues après simulation SCHISM-UnSWAN sont représentées en-dessous.

Dans le cas de la DTF Lucas, on remarque que la surcote liée à sa trace est plus marquée avec les données JTWC. Le déferlement semble lui davantage toucher les lagons étroits de la côte ouest avec les données IBTrACS.

Le site de Goro à la pointe sud de la Grande Terre a été instrumenté durant cette période par le SHOM. Les observations du marégraphe ont pu être comparées aux modélisations. Au niveau de cette station, la surcote est assez « molle » avec IBTrACS avec une différence d'un facteur 4 par rapport aux observations. Les résultats sont meilleurs avec JTWC, cette surcote pilotée par le déferlement semble toutefois encore sous-estimée mais se rapproche de celle obtenue avec le forçage classique AROME+MFWAM.

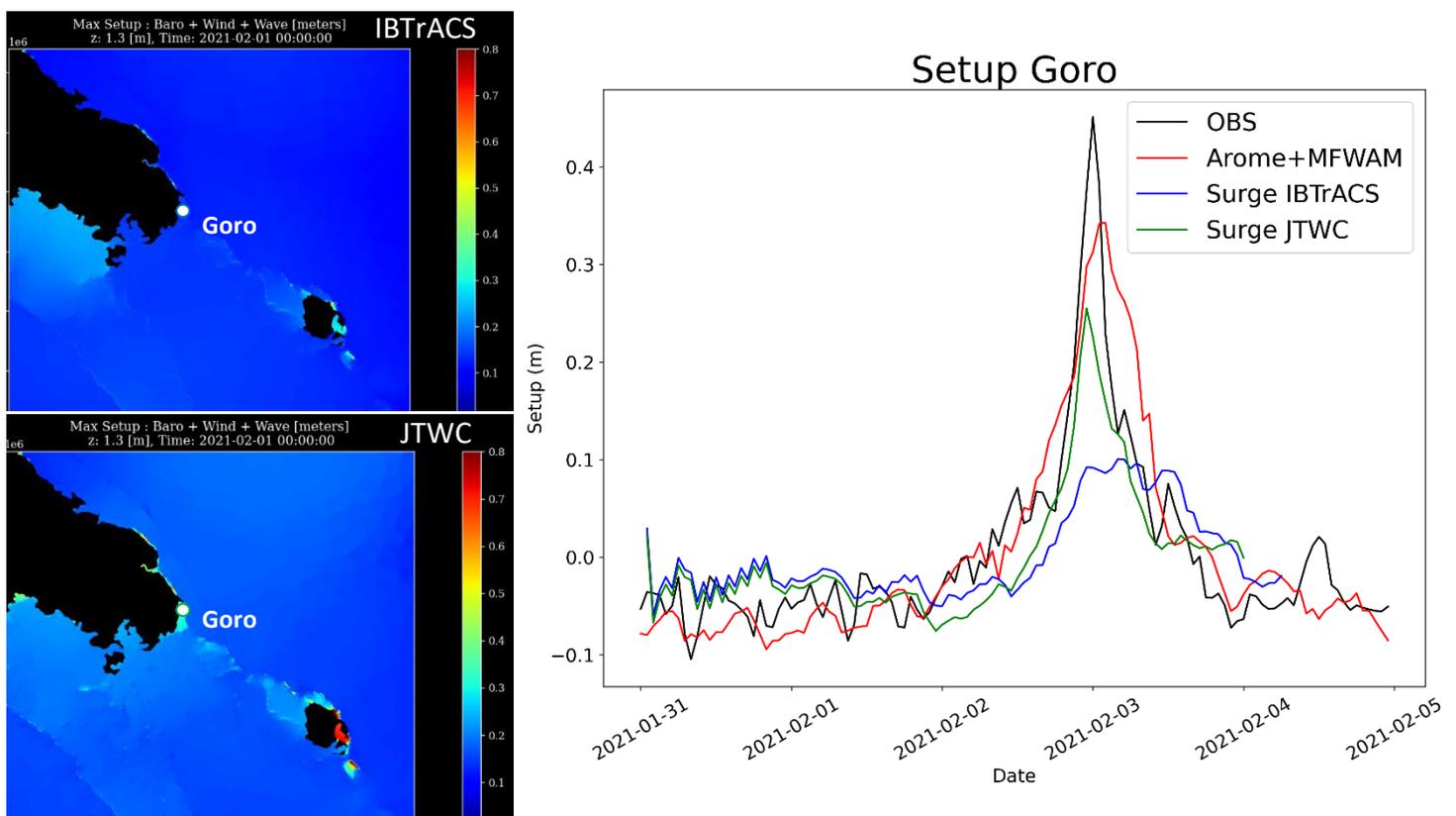


Figure 9 - Surcote maximale à la pointe sud de la Grande Terre lors du passage de Lucas (gauche), et évolution des surcotes simulées et observée au marégraphe de Goro.

3.2.3. Niran

Le dernier cas d'étude concerne le cyclone Niran ayant eu lieu 1 mois après Lucas. Ce cyclone intense a fortement impacté les lagons étroits côte ouest, des sondes de pression RBR étaient alors déployées dans le lagon de Moindou par l'IFREMER.

Lors du passage de ce cyclone au plus près des côtes, on constate un rayon max de 5 milles nautiques (mn) donné par les 2 bases de données. La paramètre d'asymétrie présent avec JTWC incluant 3 isotachs étend cependant largement la zone d'influence des vents générés.

Concernant les surcotes maximales simulées depuis les trajectoires fournies par IBTrACS et JTWC, la faible portée du Rmax fourni par IBTrACS provoque des surcotes bien plus faibles que les données JTWC où plus de 120 cm sont simulées dans plusieurs lagons le long de la côte ouest.

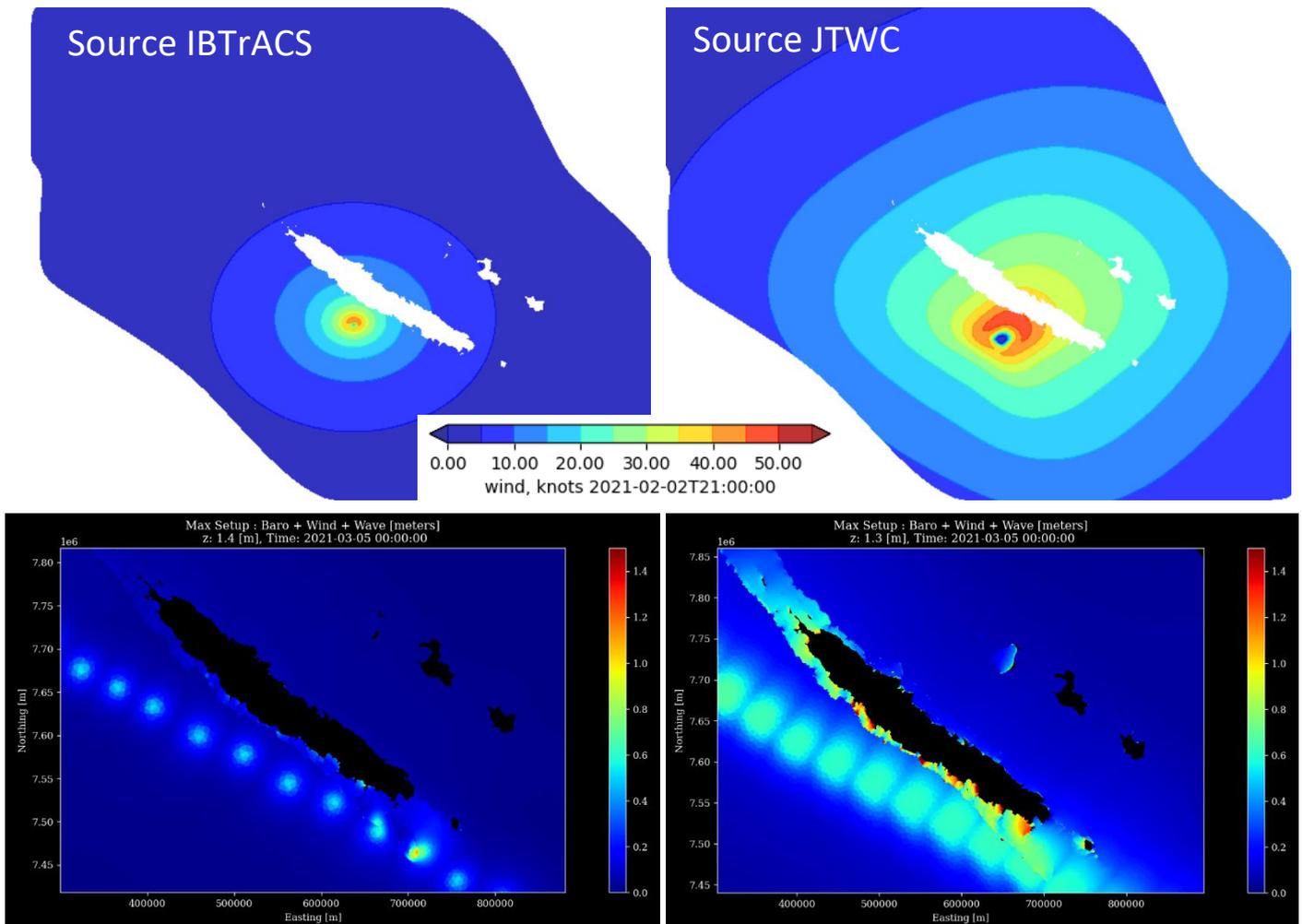


Figure 10 - Vitesses des vents et Rmax issus des sources IBTrACS et JTWC (haut) lors du passage du cyclone Niran en mars 2021. Les surcotes maximales obtenues après simulation SCHISM-UnSWAN sont représentées en-dessous.

La sous-estimation de la surcote par la simulation réalisée à partir d'IBTrACS se confirme lors de la comparaison avec les observations au niveau de la station à l'intérieur du lagon de Moindou. En effet, on trouve environ 20 cm avec IBTrACS tandis que JTWC donne des résultats proches des valeurs observées avec près d'1m de surcote.

Cela confirme la très grande sensibilité des lagons étroits comme celui de Moindou aux caractéristiques des trajectoires cycloniques. Globalement, les Rmax fournis par IBTrACS semblent donc irréalistes, et cela est particulièrement marquant lors de trajectoires cycloniques longeant la côte avec un rayon lié à Vmax atteignant les terres.

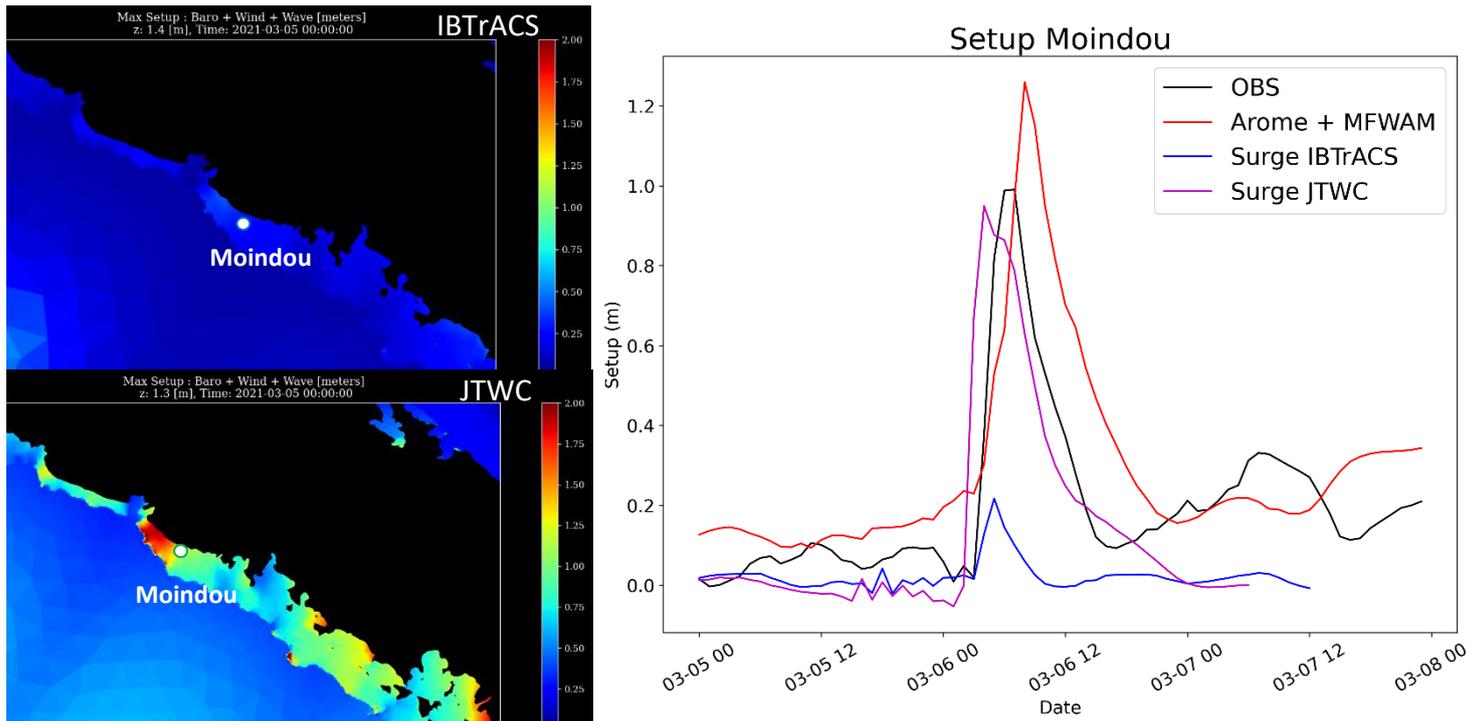


Figure 11 - Surcotes maximales dans les lagons étroits de la côte ouest lors du passage de Niran (gauche), et évolution des surcotes simulées et observée dans le lagon de Moindou.

4. Sélections des trajectoires pertinentes

L'intérêt de générer des milliers de cyclones impactant la Nouvelle-Calédonie est d'établir un échantillon représentatif des différentes configurations cycloniques possibles pouvant impacter la côte de façon significative. Avec la base de données historique, nous disposons d'un échantillon de faible taille avec moins de 100 cyclones dont ceux qui ne rentrent pas dans la catégorie cyclonique. Cela implique des portions de littoraux peu ou pas du tout visités, la quasi-absence de cyclones extrêmes et de faible récurrence (temps de retour important), et un nombre insuffisant d'évènements nécessaire à l'estimation de la récurrence de l'aléa. Avec l'équivalent de 10 000 ans d'activité cyclonique, STORM permet de générer environ 14400 cyclones, soit une multiplication par 200 de l'échantillon historique.

Une fois cela effectué, il nous est impossible de simuler l'ensemble des évènements avec notre couplage courant-houle au vu de notre capacité de calcul. Deux approches sont donc possibles :

- Aléa pour les évènements peu probables associés à des dégâts majeurs (catégorie 4 et 5 par exemple)
- Approche probabiliste par modélisation hybride, déterministe et statistique