

Analyse rétrospective

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

Martin Benebig

Septembre 2022



Sommaire

1. Introduction.....	5
1.1. Contexte et objectifs	5
1.2. Cyclones en Nouvelle-Calédonie	5
1.3. Phénomène de surcote.....	6
2. Méthode.....	7
2.1. Couplage courant-houle (SCHISM+SWAN).....	7
2.2. Données d'observation.....	8
2.3. Paramétrisation	9
2.3.1. Prise en compte de l'effet baromètre inverse sur les données d'observations.....	9
2.3.2. Couche cartographique du coefficient de frottement	10
2.3.3. Nouvelle formulation SWAN.....	12
2.3.4. Grille et forçages	13
2.4. Calcul de surcote	14
3. Simulations des cyclones récents.....	15
3.1. DTF Oma	15
3.2. Cyclone Uesi.....	18
3.3. DTF Gretel.....	20
3.4. DTF Lucas	22
3.5. Cyclone Niran.....	24
4. Bilan des résultats et évaluation du modèle.....	28
4.1. Hauteur significative des vagues (Hs).....	28
4.2. Surcote.....	30
4.3. Erreurs selon les stations et évènements.....	32

Liste des tableaux et figures

Tableau 1 - Synthèse des Hs MAX observées et simulées lors des évènements cycloniques .	28
Tableau 2 - Synthèse des surcotes MAX observées et simulées lors des évènements cycloniques.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3 – Classement RMSE des évènements étudiés.....	32
Tableau 4 - Classement RMSE des stations étudiées si fonctionnelles lors d'au moins 3 évènements.....	33
Figure 1 - Schéma illustrant le phénomène de surcote due aux vents, à la baisse de la pression atmosphérique et au déferlement des vagues (Météo-France).....	6
Figure 2 - Carte recensant les stations d'observations utilisées comme comparaisons aux résultats du modèle.....	8
Figure 3 - Élévation du niveau d'eau observée à la station Larégnère lors du passage de Niran. L'élévation observée (noir) a été corrigée de l'effet baromètre inverse avec ERA5 (bleu) et AROME (rouge).....	10
Figure 4 - Carte de spatialisation du coefficient de frottement Kn dans le grand lagon sud avec un zoom au large de Nouméa.....	11
Figure 5 - Comparaison des hauteurs de vagues (Hs) simulées (Kn constant et spatialisé) avec les observations ReefTEMPS aux stations Larégnère et Mbe-Kouen.....	12
Figure 6 - Comparaison des Hs simulées (nouvelle formulation physique utilisée par SWAN) avec les observations ReefTEMPS aux stations Larégnère et Mbe-Kouen.....	13
Figure 7 - Maillage de la grille globale utilisée lors des simulations et taille des mailles associées.....	14
Figure 8 - Illustration de la méthode de calcul de surcote utilisée par le SHOM.....	15
Figure 9 - Trajectoire de la DTF Oma en février 2019 (Météo-France).....	16
Figure 10 - Carte des Hs simulées lors de la seconde phase d'Oma et comparaison aux observations à Poé sur la pente externe.....	16
Figure 11 - Hs simulées VS observées dans le lagon sud aux stations Uitoé et Larégnère lors du passage d'Oma.....	17
Figure 12 - Carte des surcotes maximales simulées lors du passage d'Oma et zoom sur le lagon de Poé.....	17
Figure 13 - Comparaison des surcotes simulées et observées aux stations Larégnère (ReefTEMPS) et Poé (IFREMER).....	18
Figure 14 - Trajectoire du cyclone Uesi en février 2020 (Météo-France).....	18
Figure 15 - Carte des Hs simulées lors du passage de Uesi au plus proche de l'île et comparaison avec les observations dans le lagon et sur la pente externe à Poindimié.....	19
Figure 16 - Carte des surcotes maximales simulées et comparaison aux observations au marégraphe de Hienghène.....	19
Figure 17 - Trajectoire de la DTF Gretel en mars 2020 (Météo-France).....	20
Figure 18 - Carte des Hs simulés lors du passage au plus proche de l'île et comparaison aux observations dans le lagon de Poindimié et aux stations Nda et Redika.....	21

Figure 19 - Carte des surcotes maximales simulées lors du passage de Gretel et time series de comparaison avec les observations aux stations de Hienghène, Redika et Nda	22
Figure 20 - Trajectoire de la DTF Lucas début février 2021 et carte des Hs simulées lors du passage au plus proche du sud de la Grande Terre le 3 février	23
Figure 21 - Comparaison des Hs simulées avec les observations aux stations de Larégnère et Poindimié.....	23
Figure 22 - Carte des surcotes maximales lors du passage de Lucas et comparaison avec les observations aux stations de Goro et Larégnère	24
Figure 23 - Trajectoire du cyclone Niran en mars 2021 (Météo-France).....	25
Figure 24 - Carte des Hs simulées lors de l'arrivée du cyclone Niran au nord de la Grande Terre et comparaison aux observations aux stations de Poindimé, Moindou et au houllographe au large de Nouméa	26
Figure 25 - Carte des surcotes maximales simulées lors du passage de Niran avec un zoom sur les lagons étroits de la côte ouest.....	27
Figure 26 - Comparaison des surcotes simulées avec les observations aux stations de Moindou, Larégnère, Ouvéa et Hienghene.....	27
Figure 27 - Graphique des valeurs de Hs simulées en fonction des valeurs observées (échelle logarithmique).....	29
Figure 28 - Graphique des valeurs de surcotes simulées en fonction des valeurs observées (échelle logarithmique)	31
Figure 29 - Surcotes simulée et observée à Maré lors du passage d'Oma en février 2019.....	32

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

À partir du travail de développement réalisé par l'IRD Nouméa, et dans le cadre de la mise en place du plan Vigilance Vague-Submersion (VVS) de Météo-France, le couplage courant-houle entre le modèle hydrodynamique SCHISM et le modèle de vagues SWAN ont montré leur pertinence et robustesse dans la représentation des événements cycloniques impactant les lagons calédoniens.

Différents tests de sensibilité du modèle ont été effectués, la mise en commun des différents travaux a permis de déterminer une paramétrisation adaptée aux besoins de cette étude. Le choix des grilles, bathymétries et forçages ont également fait l'objet de revues afin d'optimiser la représentation de l'élévation marine et des hauteurs de vagues.

Dans le cadre de la demande formulée par la DIMENC, en collaboration avec l'IRD, d'« Analyse territoriale de la sensibilité du littoral de la Nouvelle-Calédonie à l'aléa submersion marine », ce rapport traite de l'analyse rétrospective d'événements cycloniques et de la qualification des simulations numériques.

La sensibilité à la bathymétrie et l'impact d'un coefficient de friction spatialisé sur les hauteurs de vagues et la surcote ont été passés en revue. Les modélisations ont été réalisées sur des événements cycloniques récents et le modèle a alors fait l'objet d'une validation par la comparaison des résultats aux observations disponibles.

L'étude de cinq événements avec différentes trajectoires, vitesses et intensités permettront de qualifier l'emploi du couplage courant-houle utilisé et de démontrer sa capacité à capturer et décomposer les processus physiques participant à l'aléa submersion.

Les forçages en entrée du modèle SCHISM seront AROME (atmosphérique), MERCATOR (océanique) et TPXO (marées). Pour le forçage aux frontières du modèle de vagues SWAN, MFWAM et WW3 (vagues) seront utilisés.

La modélisation de tous les événements sélectionnés sera effectuée sur une grille couvrant l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie, cette grille est similaire à celle utilisée en opérationnel par Météo-France. Des calculs de scores permettront de juger la pertinence de notre approche.

1.2. Cyclones en Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie possède une superficie de 18575 km² et est composée d'une île principale appelée la Grande Terre (500 km de long sur environ 50 km de large) entourée de

plusieurs îles : les îles Belep au nord, l'île des Pins au sud et les îles Loyauté (Maré, Lifou, Ouvéa et Tige) à l'est. La région est tropicale, chaude et humide, elle est soumise aux phénomènes El Niño et La Niña et les vents dominants sont les alizés. Lors de la saison chaude (été austral) s'étendant de novembre à avril, la Nouvelle-Calédonie est soumise à des « descentes » de ZCPS (Zone de Convergence du Pacifique Sud) propices au développement de systèmes cycloniques¹.

1.3. Phénomène de surcote

La surcote (décote) correspond à la différence positive (négative) entre le niveau marin observé et celui prévu par la marée astronomique. Ce phénomène est généralement dû à la présence d'une dépression météorologique, avec une élévation du niveau d'eau liée à un poids de l'atmosphère moins important. En Nouvelle-Calédonie, les surcotes les plus importantes sont observées lors d'évènements cycloniques. Outre l'effet baromètre inverse, les vents et les vagues peuvent jouer des rôles très importants. Les vents peuvent pousser les masses d'eau et conduire à une accumulation à la côte, le déferlement des vagues peut, quant à lui, apporter des quantités d'eau importantes ensuite retenues dans les lagons. Ces différentes contributions ont une importance variable selon les évènements, mais peuvent causer des dégâts importants surtout s'ils sont associés (Figure 1).

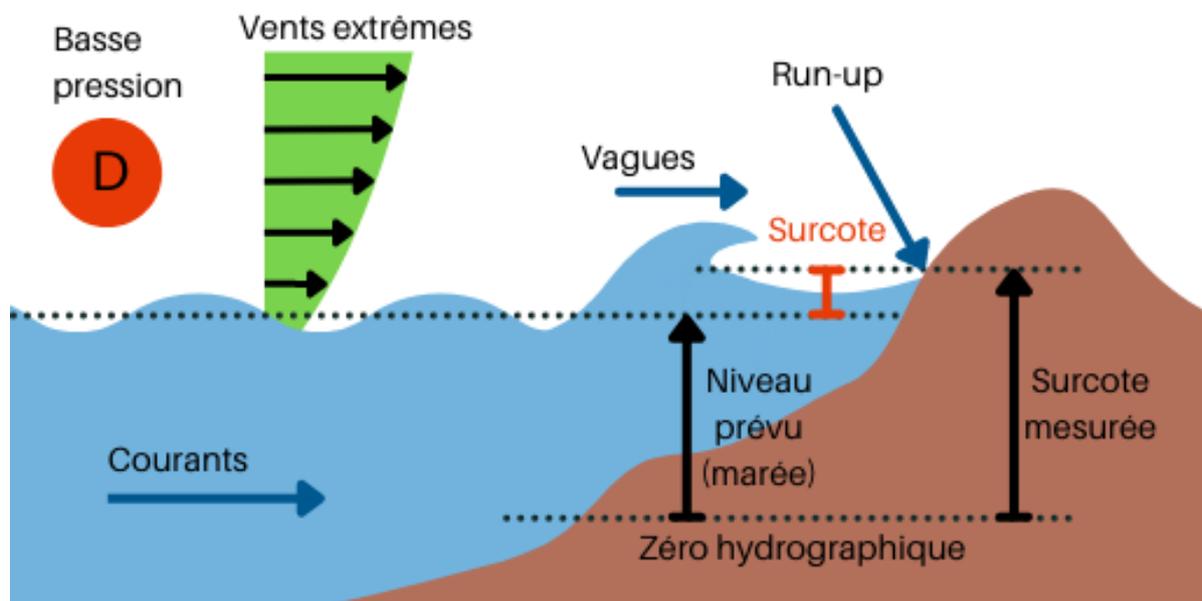


Figure 1 - Schéma illustrant le phénomène de surcote due aux vents, à la baisse de la pression atmosphérique et au déferlement des vagues (Météo-France)

¹ Christophe Point-Dumont. Adaptation d'un modèle de surcote cyclonique pour la DIRNC. Centre météorologique de la DIROI, 2017.

2. Méthode

2.1. Couplage courant-houle (SCHISM+SWAN)

Le modèle SCHISM est la nouvelle génération du modèle *Semi-Implicit Eulerian-Lagrangian Finite Element (SELFE)*² qui comporte de nombreuses améliorations : plusieurs méthodes et filtres permettant d'assurer la stabilité numérique, plusieurs choix de schéma de mélange vertical, ajout de schémas d'ordres élevés permettant de capturer la dynamique turbulente de méso-échelle³. Comme le modèle communautaire FVCOM, SCHISM propose une résolution des équations primitives de Navier-Stokes sur une grille non-structurée formée d'éléments triangulaires sur l'horizontal, conférant une grande flexibilité sur des domaines à la géométrie complexe comme les lagons. Ce modèle permet de recourir à de grands pas de temps (60 à 120 s) tout en conservant une stabilité numérique. Nous utiliserons ici une configuration 3D barotrope, une description détaillée du code et des étapes visant à son utilisation est donnée dans le manuel SCHISM⁴.

Le modèle Simulating Waves Nearshore (SWAN et sa version non-structurée UnSWAN)⁵ est particulièrement adapté aux domaines côtiers et permet la simulation de l'évolution des vagues. Le modèle utilise les conditions au large imposées aux frontières, le vent, la bathymétrie et intègre l'effet des courants et la variation de hauteur d'eau. SWAN est capable de représenter les processus suivants agissant sur la propagation des vagues : gonflement de la houle, réfraction, diffraction et réflexion par les obstacles topographiques, et ce y compris par le courant de direction opposée à la houle. Les processus de génération et de dissipation suivants sont également considérés : génération de la houle par le vent, interactions houle-houle, dissipation d'énergie par frottements au fond et par moutonnement, dissipation par déferlement consécutif aux accidents topographiques et aux courants.

Le couplage SCHISM-SWAN comprend les processus suivants :

- Le flux de quantité de mouvement injecté dans SCHISM produit par le déferlement des vagues est basé sur le concept des tensions de radiations suivant la formulation de Longuet-Higgins et Stewart⁶ ;
- L'augmentation de la rugosité apparente du fond affectant les courants au-dessus de la couche limite en suivant la paramétrisation de Grant et Madsen⁷ ;

² Yinglong Zhang et António M. Baptista. « SELFE : A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation ». In : *Ocean Modelling* 21.3-4 (2008), p. 71-96.

³ Fei Ye et al. « Third-order WENO transport scheme for simulating the baroclinic eddy ocean on an unstructured grid ». In : *Ocean Modelling* (2019).

⁴ SCHISM v5.9 Manual 2021 : http://ccrm.vims.edu/schismweb/SCHISM_v5.9-Manual.pdf

⁵ Physique et manuel d'utilisateur du modèle SWAN : <https://swanmodel.sourceforge.io/>

⁶ M. S. Longuet-Higgins et R. W. Stewart. « Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to surf beats ». In : *Journal of Fluid Mechanics* (1962).

- Le mélange de surface induit par la turbulence associée au déferlement suivant la paramétrisation de Craig et Banner⁸.

SCHISM transmet à SWAN les variations de hauteur d'eau et le courant de surface agissant sur l'évolution des vagues. Dans notre étude l'intégration dans le temps de SCHISM utilise un pas de temps de 60 s et l'appel au modèle de vagues est effectué tous les deux pas de temps.

2.2. Données d'observation

La répartition des données d'observation est inégale sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie, avec de nombreuses stations opérationnelles dans le sud-ouest près de la capitale Nouméa, et peu sur l'ensemble de la côte est. Une cartographie générale des capteurs utilisés dans cette étude est présentée à la Figure 2.

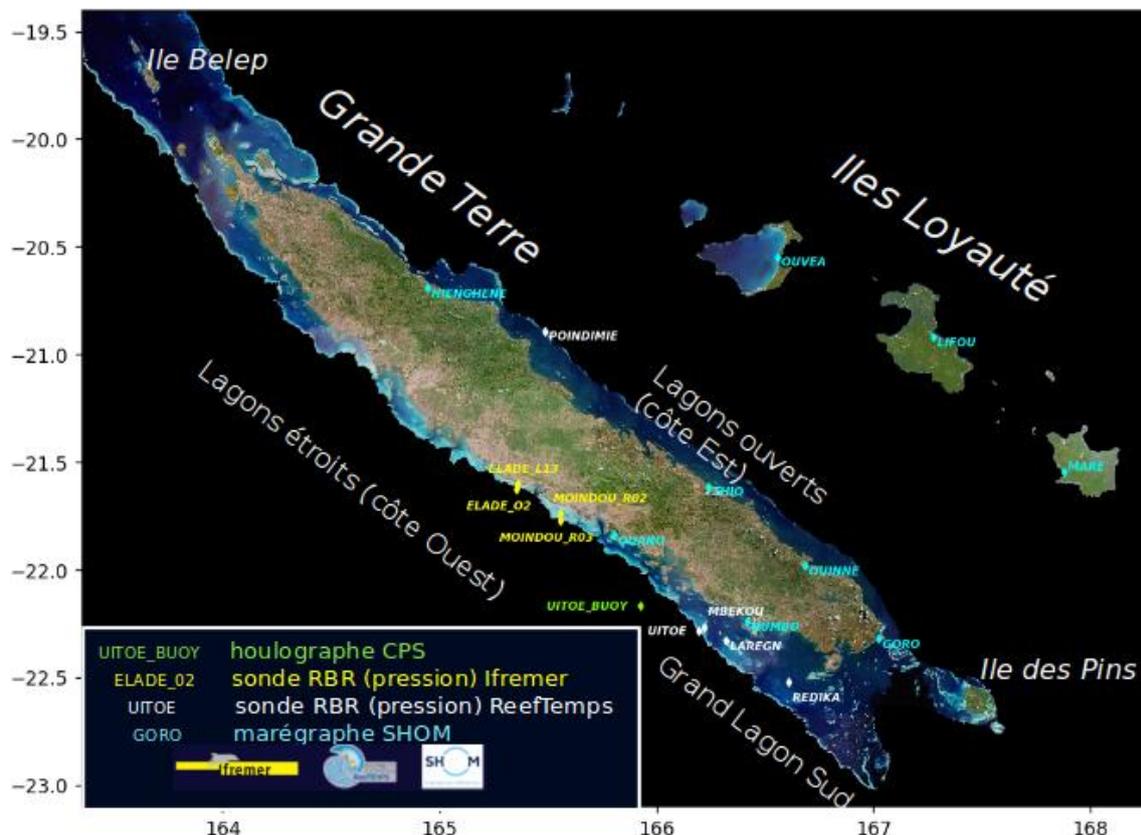


Figure 2 - Carte recensant les stations d'observations utilisées comme comparaisons aux résultats du modèle

⁷ W.D. Grant et O.S. Madsen. « Combined wave and current interaction with a rough bottom ». In : *Journal of Geophysical Research* (1979).

⁸ P. D. Craig et M. L. Banner. « Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer ». In : *Journal of physical oceanography* (1994).

À noter que les diverses maintenances, les possibles défaillances techniques et les durées des campagnes d'observation ne nous permettent d'accéder qu'à un nombre limité de données lors d'évènements particuliers.

Plusieurs organismes participent à cette collecte de données, celles-ci sont donc parfois hétérogènes. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) associé au gouvernement de la Nouvelle-Calédonie (GOUV NC) met à disposition du grand public des données marégraphiques⁹ dans le but de permettre à divers acteurs (services de l'État, entreprises, etc.) d'accéder à des données de référence décrivant l'environnement physique maritime.

Le réseau ReefTEMPS¹⁰ d'observation des eaux côtières dans la région Pacifique sud a pour but de suivre à long terme le changement climatique et ses effets sur l'état des récifs coralliens et de leurs ressources. L'IRD Nouméa alimente ce réseau en déployant des stations automatisées équipées de capteurs de température, salinité et pression (sur certaines stations) dans le lagon sud et à Poindimié. La pression permet d'extraire les hauteurs significatives de vagues (Hs) et l'élévation marine.

Enfin, des campagnes d'observations avec des capteurs autonomes de température et pression RBR sont effectuées par l'IFREMER sur des périodes et lieux ciblés. Les données de la campagne ELADE¹¹ à Poé ont été exploitées dans la réalisation de l'étude sur la DTF Oma.

Les données de l'houlographe déployé début 2021 ont été utilisées en comparaison du modèle pour l'épisode Niran (cf. section [3.5. Cyclone Niran](#))

2.3. Paramétrisation

2.3.1. Prise en compte de l'effet baromètre inverse sur les données d'observations

Les données des marégraphes (SHOM/GOUV NC) comportent uniquement l'élévation du niveau d'eau par mesure radar. Les données de pression RBR permettent, quant à elles, d'obtenir également les hauteurs de vagues (Hs) lorsqu'elles sont échantillonnées à 1 Hz. Cependant, elles ne prennent pas en compte l'élévation relative à la variation de la pression atmosphérique (effet baromètre inverse). En effet, la pression atmosphérique est ajustée par défaut à 1013,25 hPa.

Afin de prendre en compte cette composante d'élévation non-négligeable et correspondre à la méthode de simulation, une correction de la différence entre 1013,25 et la pression atmosphérique des modèles météorologiques AROME et ERA5 a été appliquée.

⁹ Portail de l'information géographique maritime et littoral du SHOM : <https://data.shom.fr>

¹⁰ Réseau d'observation des eaux côtières du Pacifique insulaire : <https://www.reeftemps.science>

¹¹ Données de la campagne ELADE réalisée par l'IFREMER à Poé : <https://www.seanoe.org/data/00651/76334>

Cette méthode a été appliquée sur toutes les stations concernées, notamment à celle de Larégnère lors du passage du cyclone Niran en mars 2021 (Figure 3). On remarque une augmentation de 20 cm après correction avec peu de différences selon le modèle utilisé. Cette correction est donc indispensable afin d'homogénéiser toutes les données utilisées et mener notre étude sur les surcotes cycloniques.

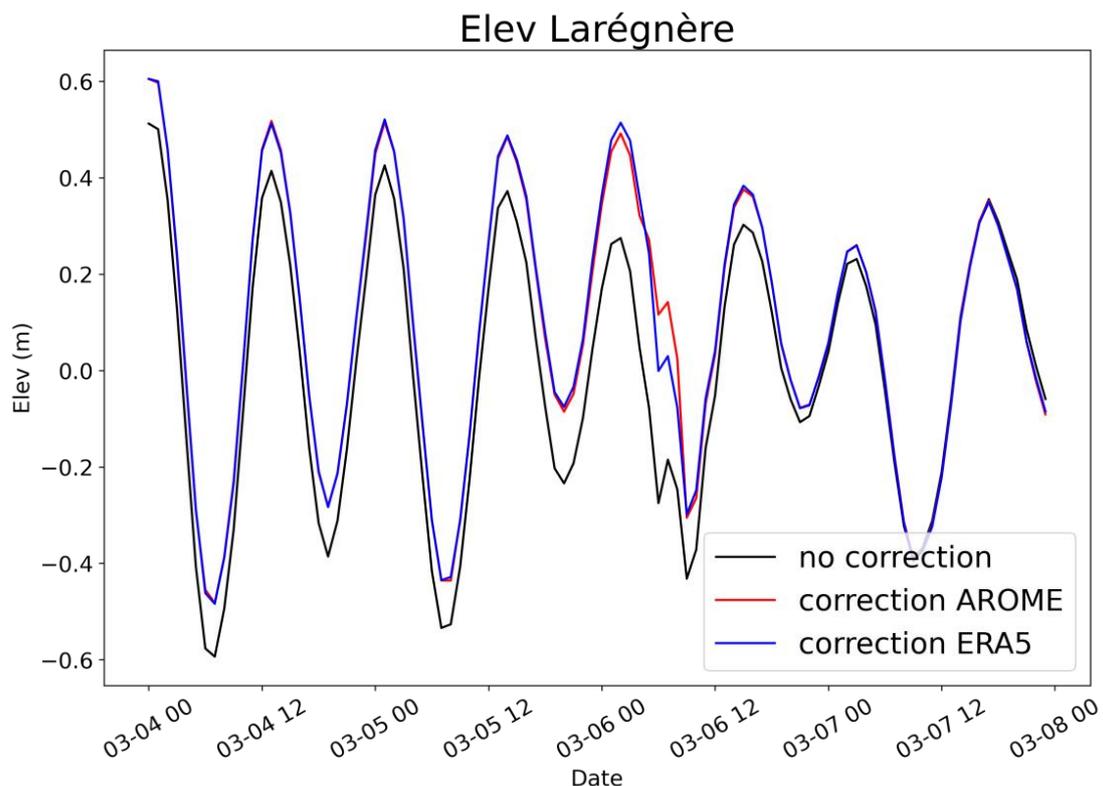


Figure 3 - Élévation du niveau d'eau observée à la station Larégnère lors du passage de Niran. L'élévation observée (noir) a été corrigée de l'effet baromètre inverse avec ERA5 (bleu) et AROME (rouge)

Le modèle AROME, avec une meilleure résolution spatiale, est privilégié s'il est disponible lors des événements étudiés.

2.3.2. Couche cartographique du coefficient de frottement

Lors des précédents résultats du modèle il est apparu une bonne représentation de la hauteur d'eau par rapport aux observations, une surestimation récurrente des hauteurs significatives de vagues (H_s) a cependant été constatée en conditions normales. La piste privilégiée est celle de la mauvaise prise en compte de la friction de fond.

Les tests de sensibilité à la spatialisation du coefficient de frottement ont été réalisés sur une grille couvrant la partie sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. Le coefficient de frottement utilisé par le modèle de vagues SWAN était auparavant uniforme sur toute la grille ($Kn = 0.05$). La carte de rugosité testée est présentée Figure 4.

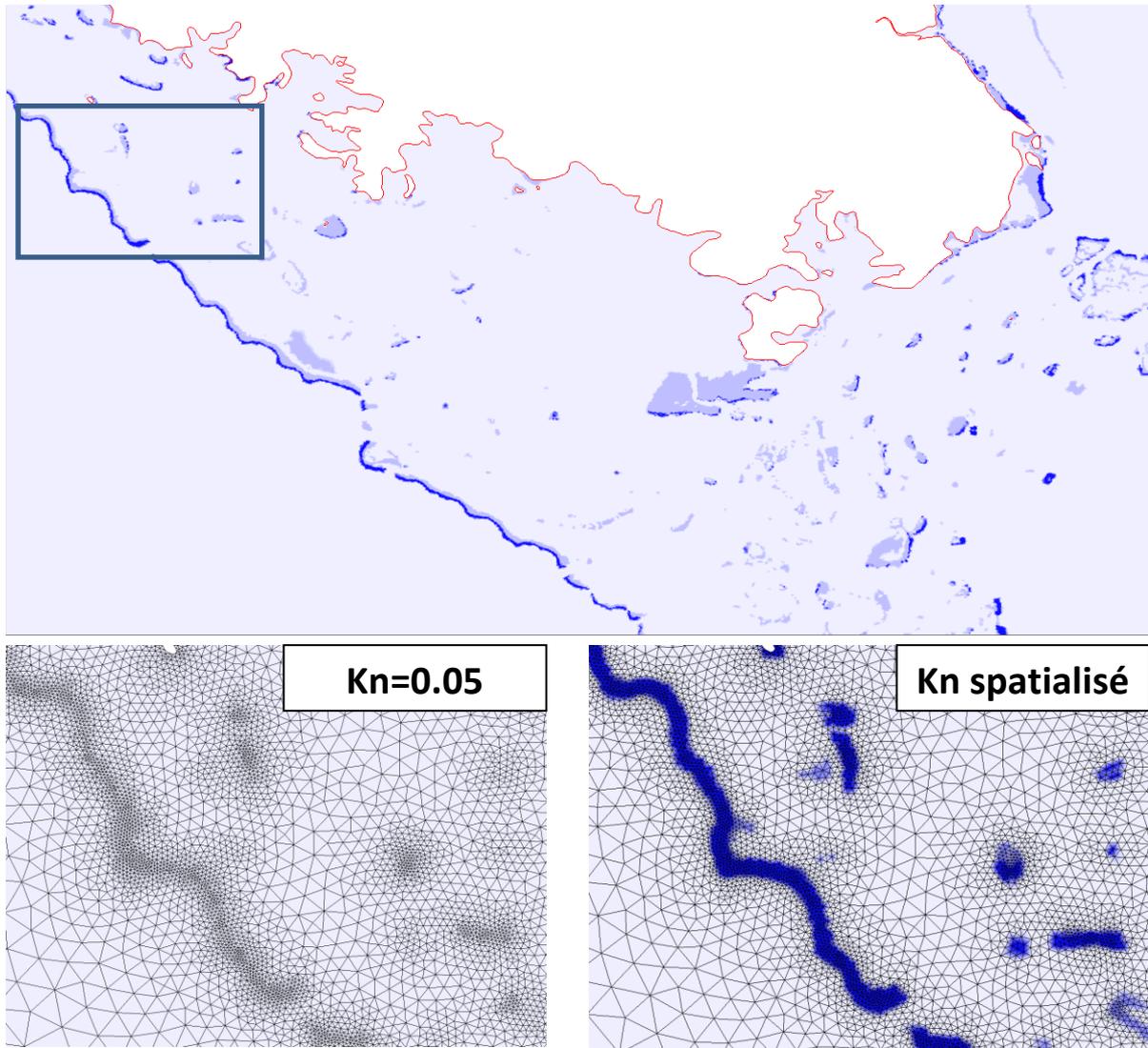


Figure 4 - Carte de spatialisation du coefficient de frottement Kn dans le grand lagon sud avec un zoom au large de Nouméa

Une comparaison des résultats de H_s selon les deux configurations (avec et sans coefficient de frottement spatialisé) a été réalisée pour l'épisode cyclonique Niran en mars 2021 aux stations de Larégnère et Mbe-Kouen dans le lagon sud (Figure 5).

On remarque que la spatialisation du coefficient de frottement permet de diminuer les hauteurs de vagues en période non-cyclonique et de se rapprocher des observations fournies par ReefTEMPS. Toutefois, l'augmentation de la valeur de frottement n'a qu'un impact limité et n'explique pas à elle seule le biais sur les Hs des simulations.

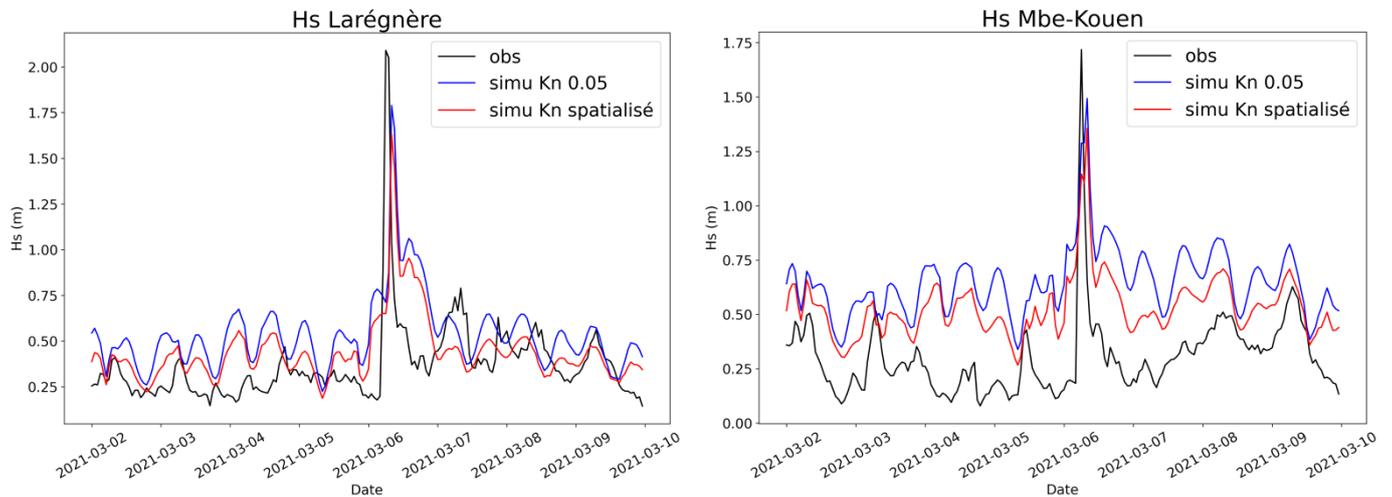


Figure 5 - Comparaison des hauteurs de vagues (Hs) simulées (Kn constant et spatialisé) avec les observations ReefTEMPS aux stations Larégnère et Mbe-Kouen

Les coefficients de rugosité retenus sont ceux les plus récurrents dans la littérature scientifique : $Kn=0.1$ sur fonds sableux, $Kn=0.5$ sur la terrasse du lagon et $Kn=2$ sur le récif.

2.3.3. Nouvelle formulation SWAN

Une autre source de ce biais pouvant également agir sur les valeurs de Hs est la physique utilisée par le modèle de vagues SWAN. Une nouvelle formulation a donc été testée, basée sur les travaux d'Alves et Banner¹².

Afin d'estimer l'éventuel apport de la nouvelle formulation physique de SWAN, la même comparaison que dans la partie précédente a été réalisée (Figure 6).

Les différences constatées sont de l'ordre 2 et n'ont pas une influence majeure. Cependant, on note qu'on se rapproche davantage des observations en période non-cyclonique avec une légère diminution des Hs et un pic plus marqué en conditions cycloniques.

¹² Alves, J. H. G. M., and M. L. Banner, 2000: A saturation-dependent dissipation source term for wind-wave modeling applications: Fetch-limited case. Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Engineering, Sydney, Australia, ASCE, 269–282.

Les différentes modifications cumulées ont permis de se rapprocher des valeurs de hauteur significative de vagues observées. Un biais récurrent de surestimation de la hauteur des vagues par le modèle est toujours présent avec ~50 % de Hs supplémentaires, contre ~100 % précédemment.

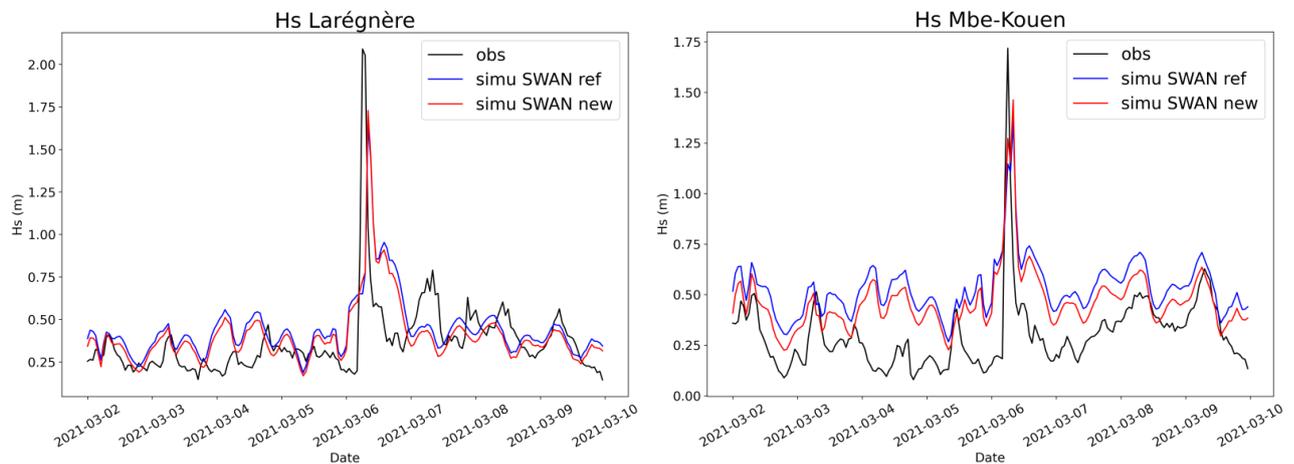


Figure 6 - Comparaison des Hs simulées (nouvelle formulation physique utilisée par SWAN) avec les observations ReefTEMPS aux stations Larégnère et Mbe-Kouen

2.3.4. Grille et forçages

Les premiers évènements étudiés ont été simulés sur des grilles partielles 3D des côtes est et ouest afin d'effectuer différents tests de sensibilité. Après validation, la présente étude est réalisée sur une grille globale couvrant l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie incluant les îles Loyauté (Figure 7).

Cette grille est similaire à celle utilisée en opérationnel chez Météo-France. La taille médiane des mailles de la grille est de 170 m allant de quelques dizaines de mètres près du récif à plusieurs centaines au large.

Les forçages utilisés proviennent de MERCATOR (océanique), AROME (météorologique), TPXO (marée) et MFWAM (vagues).

La bathymétrie provient des données satellites LandSAT8 et a fait l'objet de corrections par Jérôme Lefèvre (IRD).

La spatialisation de la rugosité et la formulation physique utilisées sont celles validées précédemment.

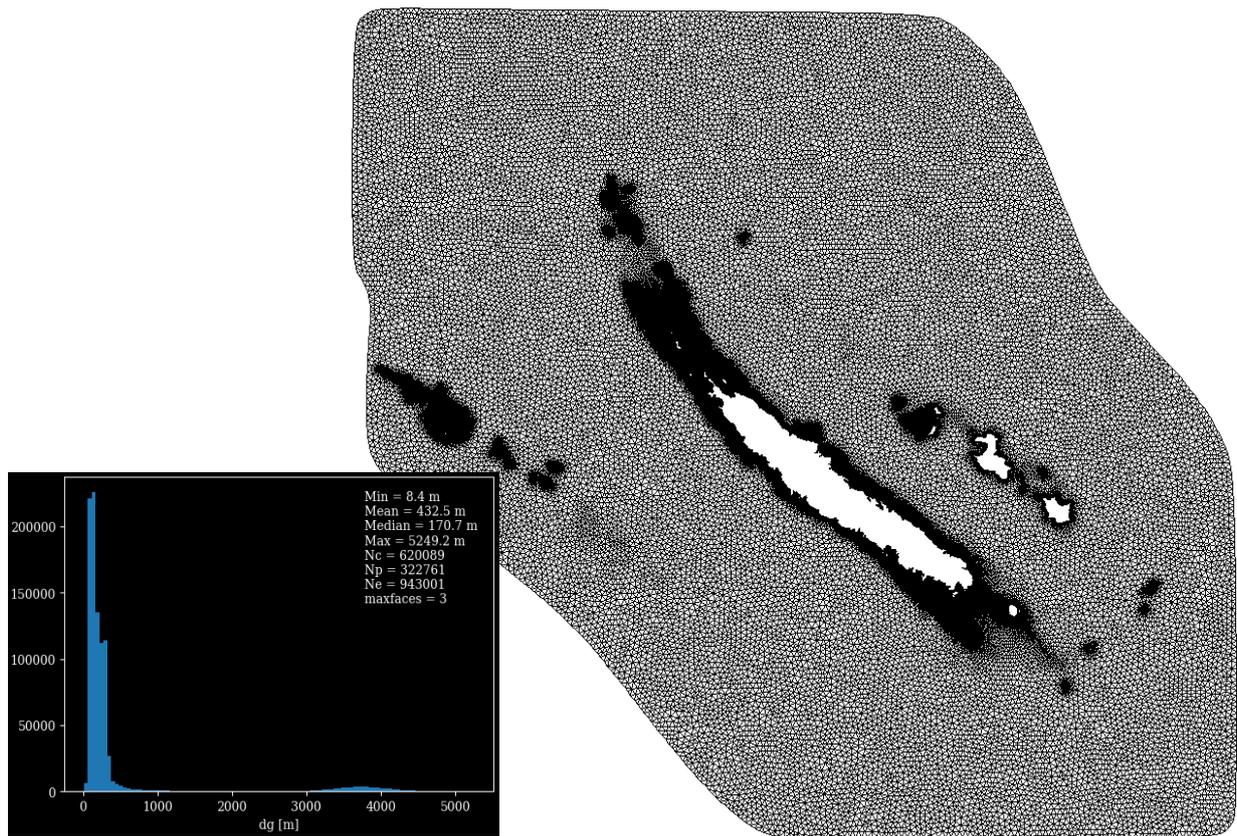


Figure 7 - Maillage de la grille globale utilisée lors des simulations et taille des mailles associées

2.4. Calcul de surcote

La surcote définie dans la section [1.3. Phénomène de surcote](#) (p. 6) peut être calculée de différentes façons. La méthode du filtre Fast Fourier Transform (FFT) applique un filtre passe-bas sur le signal afin d'exclure les fréquences de marée¹³, elle est simple à utiliser mais peut atténuer l'intensité au niveau du pic de surcote. Dans cette étude nous avons choisi de retrancher les prévisions de marée à partir des harmoniques selon la méthode décrite par le SHOM¹⁴.

¹³ Roy Walters et Cynthia Heston. « Removing tidal-period variations from time-series data using low pass filters ». In : *Physical Oceanography* 12 (1981), p. 112.

¹⁴ http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/niveaux-extremes

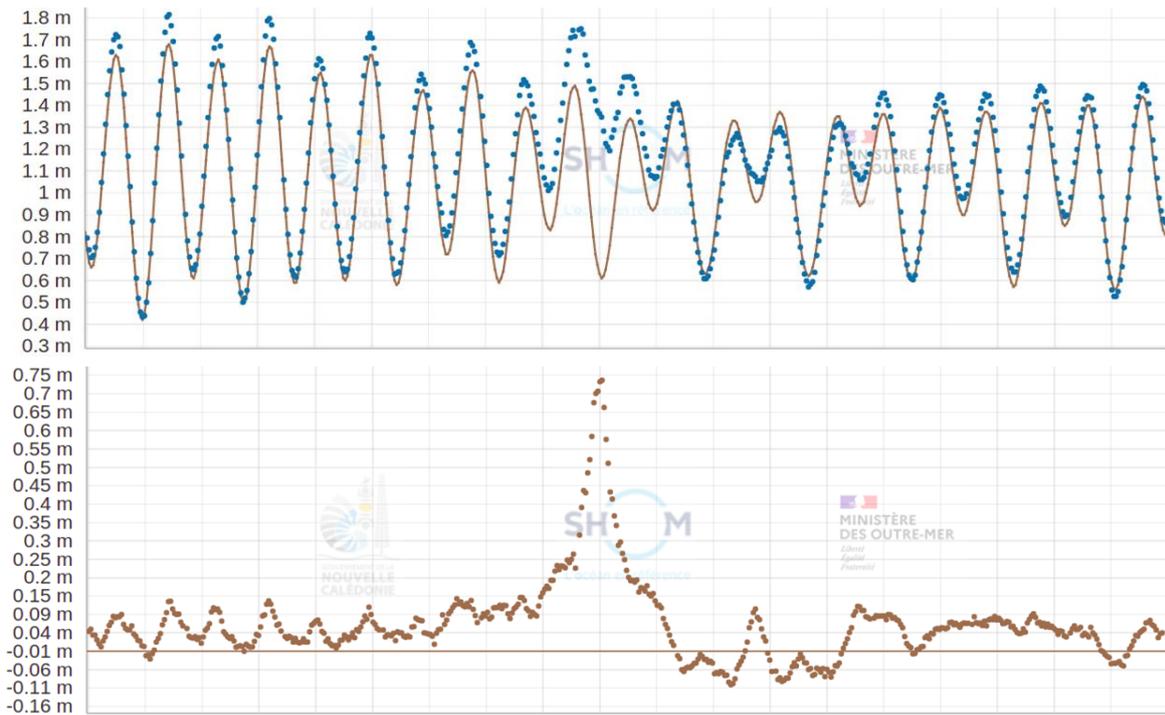


Figure 8 - Illustration de la méthode de calcul de surcote utilisée par le SHOM

3. Simulations des cyclones récents

Les résultats présentés concernent 2 paramètres :

- Les hauteurs de vagues significatives (H_s) générées
- La surcote totale incluant l'effet de pression, les vents et le déferlement des vagues

Les comparaisons des H_s et surcotes entre observations et simulations feront l'objet d'un bilan dans la dernière partie. Celles illustrées ci-dessous correspondent aux stations ayant subi avec le plus d'intensité les conséquences des différents cyclones et dépressions présentés.

3.1. DTF Oma

En février 2019, la dépression tropicale forte (DTF) Oma a connu une trajectoire atypique. D'abord en tant que cyclone tropical au nord de la Grande Terre générant des vents forts et des passages pluvieux importants, puis en DTF, elle est remontée de façon orthogonale à la côte ouest générant une forte houle sur la façade sud-ouest. Lors de ce second passage, Oma a touché le pays avec un minimum de pression à 995 hPa passant sur Nouméa et Lifou (Figure 9) et des rafales allant jusqu'à 115 km/h.

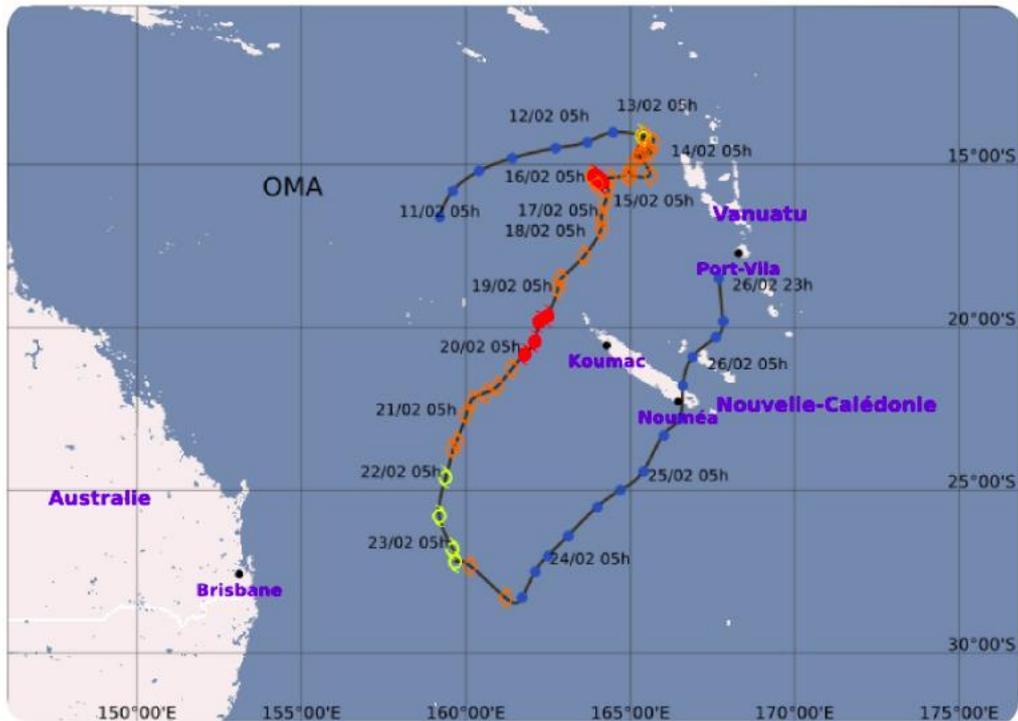


Figure 9 - Trajectoire de la DTF Oma en février 2019 (Météo-France)

Les lagons de la côte ouest plus étroits que ceux de la côte est sont davantage sensibles à ce type d'évènements, notamment avec le phénomène de montée des eaux piégées dans le lagon pouvant causer des inondations (phénomène d'ensachage).

Avec des vagues jusqu'à 7 m au large de la côte ouest, les vagues simulées ont été comparées aux données de l'IFREMER (campagne ELADE) sur la pente externe du lagon de Poé. On constate que le premier passage au nord de l'île n'a eu que peu d'impact sur la hauteur des vagues.

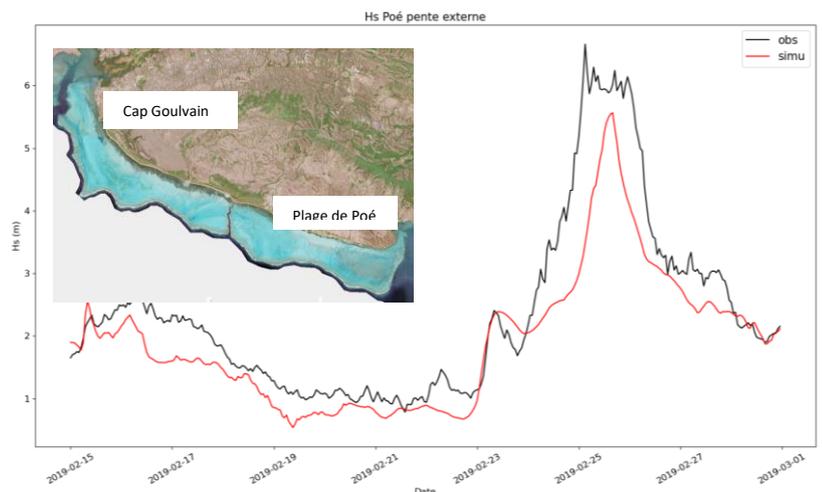
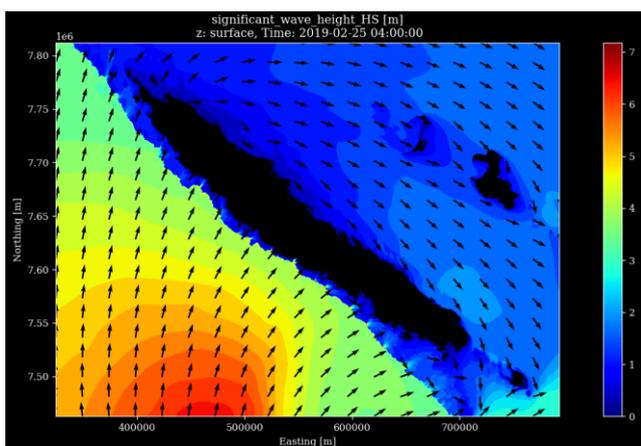


Figure 10 - Carte des Hs simulées lors de la seconde phase d'Oma et comparaison aux observations à Poé sur la pente externe

Lors de la seconde phase, jusqu'à 6,5 m de hauteurs de vagues ont été recensées à l'extérieur du lagon avec une bonne correspondance du modèle qui prédit les mêmes tendances et intensités, seule la durée du pic est sous-estimée (Figure 10).

Dans le lagon sud, des vagues de 3 m et 1,5 m ont été mesurées respectivement à Uitoé et Larégnère. Le modèle a tendance à surestimer les vagues d'une vingtaine de cm en conditions normales (Figure 11).

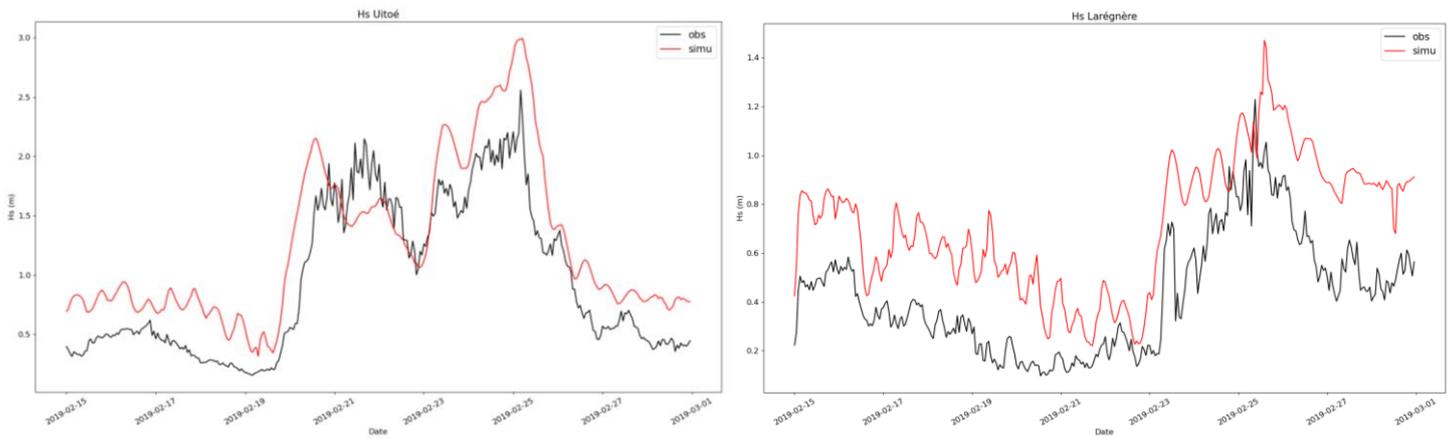


Figure 11 - Hs simulées VS observées dans le lagon sud aux stations Uitoé et Larégnère lors du passage d'Oma

D'après la carte des surcotes maximales simulées, le lagon de Poé a été le plus touché de la côte ouest (Figure 12). Au nord-est, seul le lagon aux abords de la commune de Hienghene était instrumenté. Les résultats du modèle sont satisfaisants sur ces deux sites lors de cet épisode.

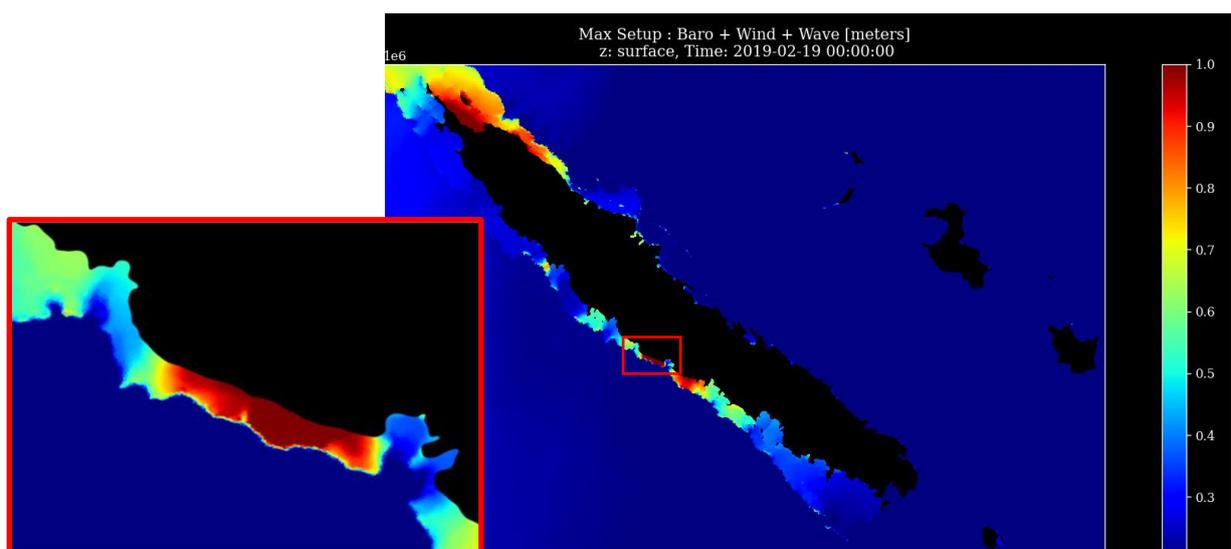


Figure 12 - Carte des surcotes maximales simulées lors du passage d'Oma et zoom sur le lagon de Poé

Au sud et aux îles Loyauté peu impactées, les surcotes ne dépassent pas les 25 cm (Figure 13). Les simulations minorent la modulation par la marée et les données d'observations sont assez bruitées à Ouinné et Maré.

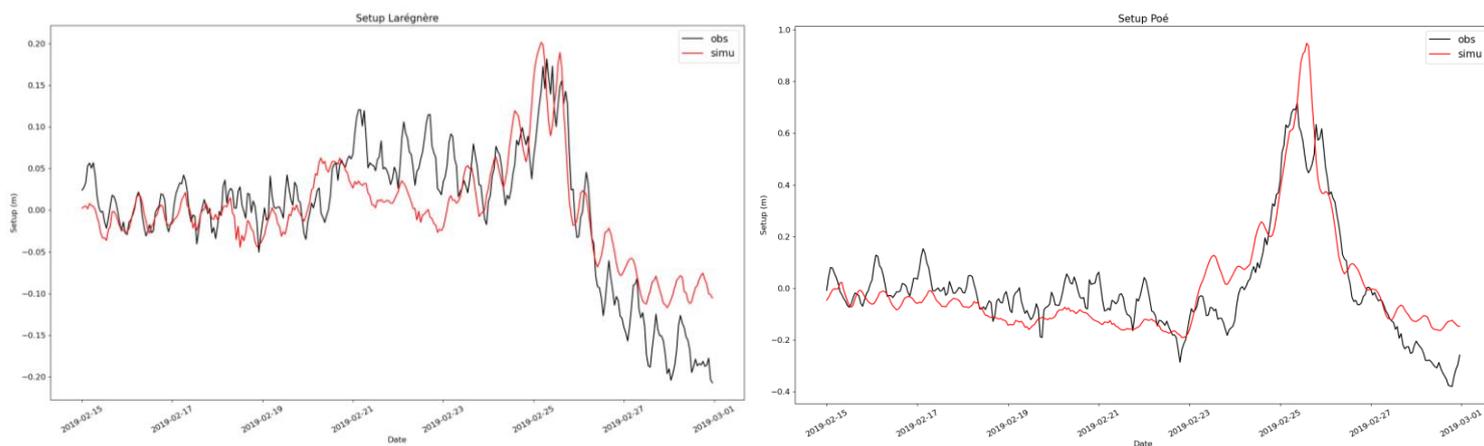


Figure 13 - Comparaison des surcotes simulées et observées aux stations Larégnère (ReefTEMPS) et Poé (IFREMER)

3.2. Cyclone Uesi

En février 2020, le cyclone Uesi a connu une trajectoire assez semblable à la première phase d'Oma. Avec une pression en son centre estimée à 965 hPa lors de son passage au plus près du nord de la Grande Terre, Uesi a généré des vents forts (jusqu'à 85 km/h de vent moyen à Poingam) et des précipitations importantes sur le nord du pays.

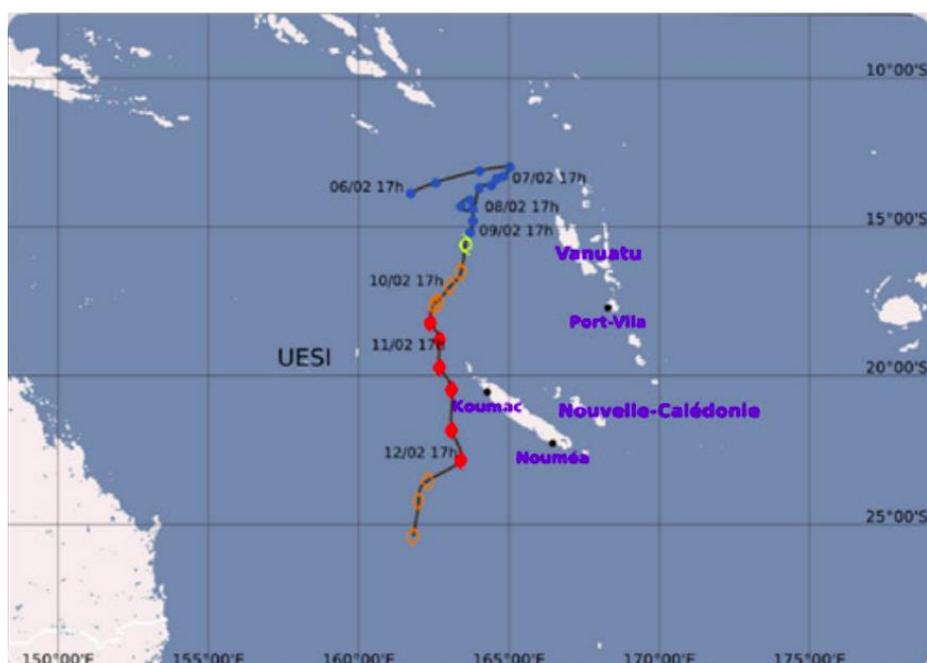


Figure 14 - Trajectoire du cyclone Uesi en février 2020 (Météo-France)

La zone instrumentée la plus impactée a été le nord de la côte est avec les stations RBR à Poindimié (ReefTEMPS) et le marégraphe de Hienghene (SHOM/GOUV NC) où ont été relevées les valeurs de Hs et de surcotes les plus importantes.

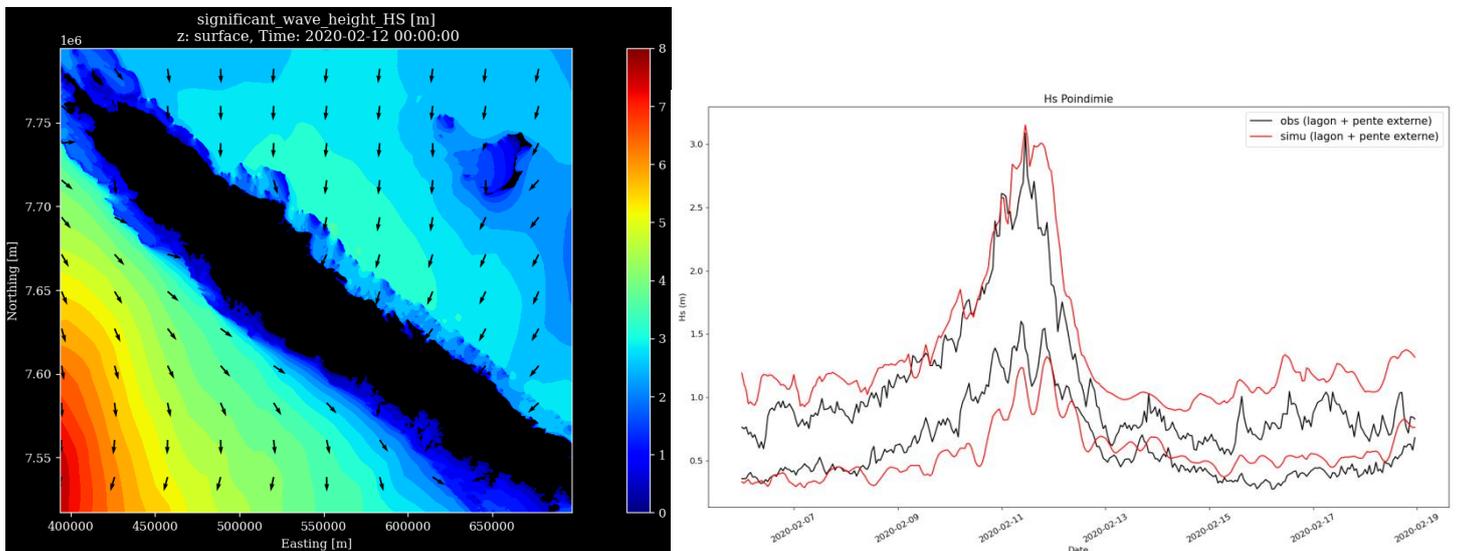


Figure 15 - Carte des Hs simulées lors du passage de Uesi au plus proche de l'île et comparaison avec les observations dans le lagon et sur la pente externe à Poindimié

On recense à Poindimié 1 m de vagues dans le lagon et jusqu'à 3 m à l'extérieur, les simulations sont très proches des observations en durée et intensité (Figure 15).

Ce cyclone n'a pas causé d'importantes surcotes, la plus significative ayant été relevée à Hienghene avec 35 cm bien captés par le modèle (Figure 16). Des surcotes plafonnant à environ 10 cm ont été observées aux marégraphes de Thio et Numbo, ainsi qu'aux stations RBR de Nda et Redika.

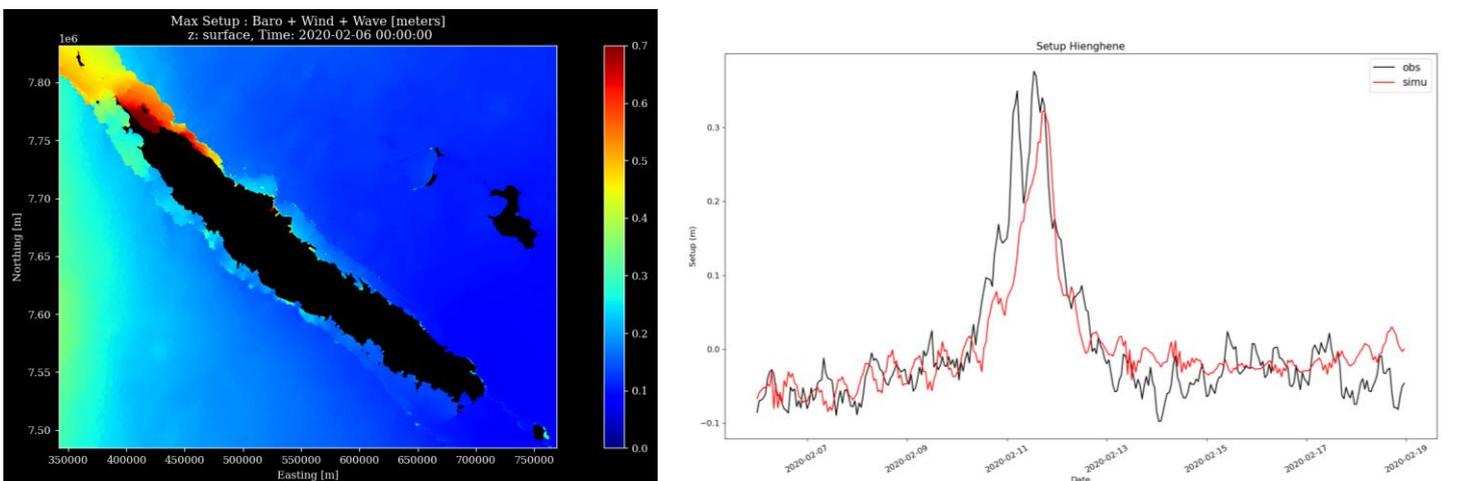


Figure 16 - Carte des surcotes maximales simulées et comparaison aux observations au marégraphe de Hienghène

3.3. DTF Gretel

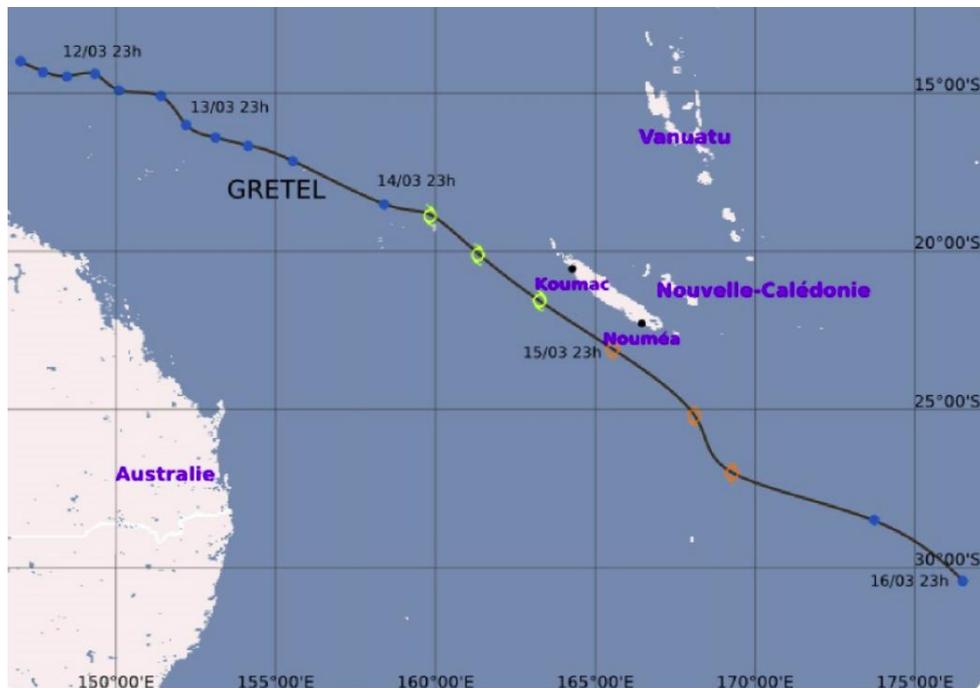


Figure 17 - Trajectoire de la DTF Gretel en mars 2020 (Météo-France)

La DTF Gretel a longé la côte ouest de la Grande Terre en mars 2020, un mois après Uesi. Sous forme de dépression tropicale modérée (DTM) lors de son passage au nord du pays elle s'est intensifiée en DTF une fois au sud. Avec des précipitations modérées et des vents moyens allant jusqu'à 90 km/h mesurés à Nessadiou, Gretel n'a pas causé de dégât notable malgré son passage relativement proche de la Grande Terre.

On note toutefois des hauteurs de vagues importantes recensées dans le lagon sud.

Sur cet évènement, des données d'observations de Hs sont disponibles dans le lagon de Poindimié et dans le lagon sud à Nda et Redika. À Poindimié, la tendance est bien représentée par le modèle avec cependant un déficit de 25 cm au pic pour environ 1,5 m de vagues. À Nda et Redika, une surestimation en conditions normales est constatée comme lors d'études antérieures. Les vagues atteignent jusqu'à 2,5 m à Nda, ce qui est assez exceptionnel à cette station (Figure 18).

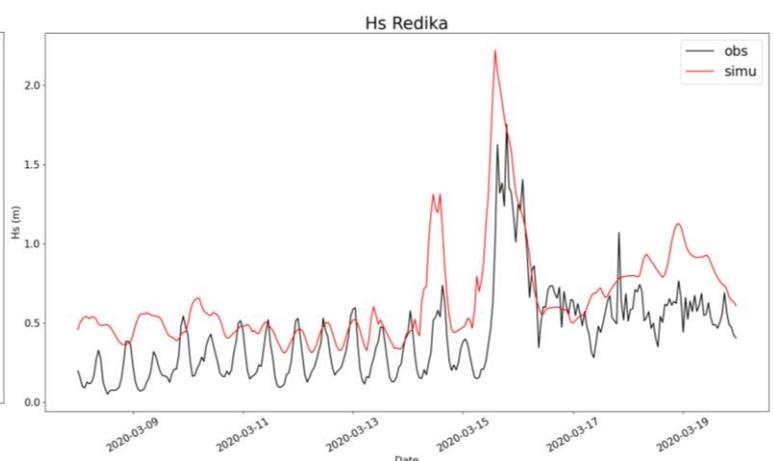
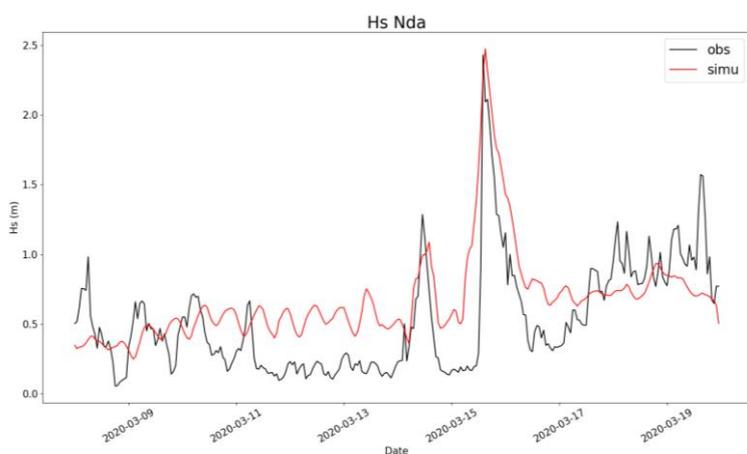
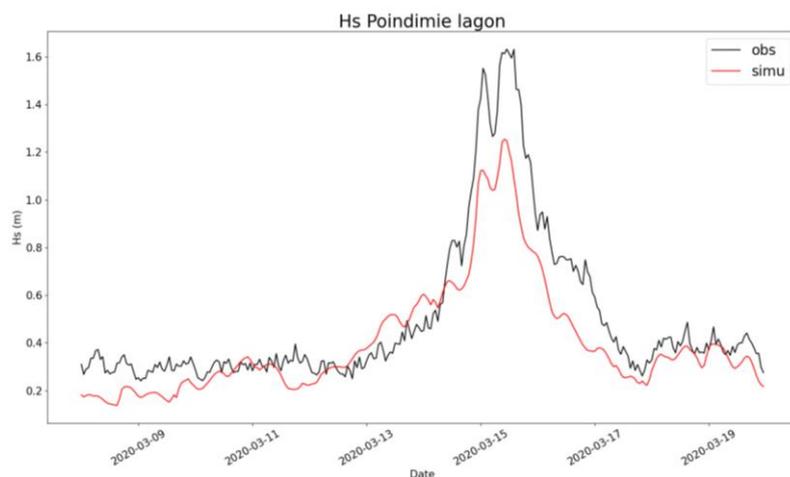
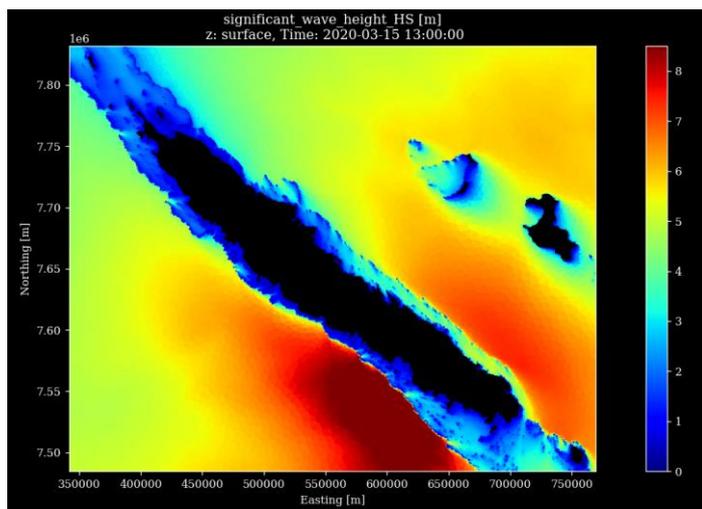


Figure 18 - Carte des Hs simulés lors du passage au plus proche de l'île et comparaison aux observations dans le lagon de Poindimié et aux stations Nda et Redika

De façon surprenante, la surcote observée la plus importante est celle au marégraphe de Hienghene avec une sous-estimation du modèle de 25 cm. Il apparaît que la mauvaise appréciation des hauteurs de vagues au nord-est du pays cause une sous-estimation d'une partie de la surcote due au déferlement.

Aux autres stations disponibles, le modèle représente mieux les variations et intensités notamment dans le lagon ouvert du sud moins sujet aux surcotes importantes que les lagons étroits. À l'est, on constate une mauvaise capture de la décote ayant succédé au pic au niveau de la station de Hienghene (Figure 19).

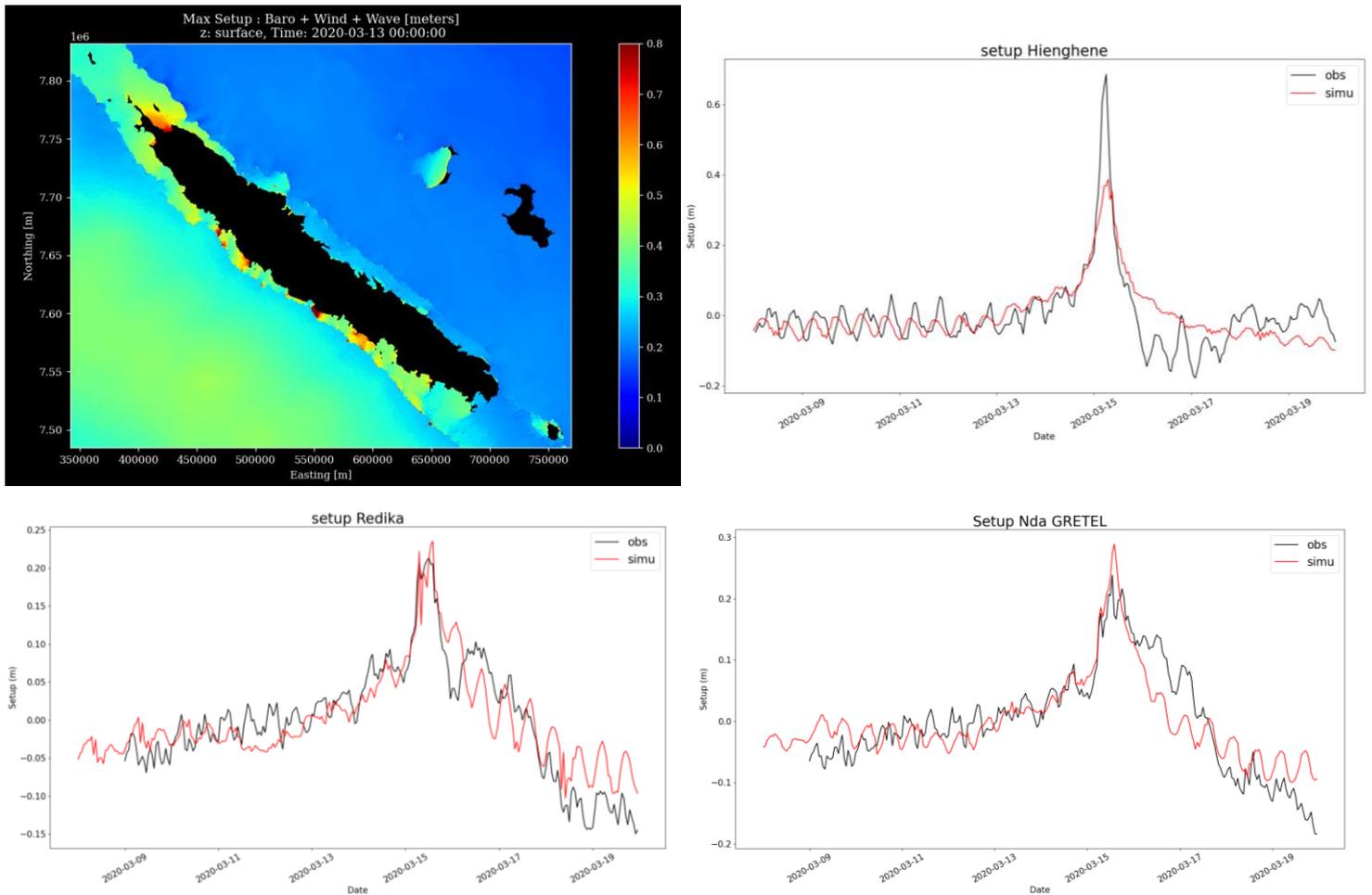


Figure 19 - Carte des surcotes maximales simulées lors du passage de Gretel et time series de comparaison avec les observations aux stations de Hienghène, Redika et Nda

3.4. DTF Lucas

La dépression Lucas est passée aux abords de la Nouvelle-Calédonie début février 2021. Son pic d'intensité est atteint plus tôt lorsqu'elle est encore au nord, la dépression décroît légèrement lors de son arrivée sur les îles Loyauté causant de fortes pluies sur Ouvéa. Lucas va ensuite stagner au sud de la Grande Terre avant de s'éloigner. Ce comportement proche d'une dépression de mousson avec une période de stagnation marquée a causé un déferlement important et continu à l'intérieur du lagon sud ouvert et à la pointe sud.

La carte des Hs simulés le 3 février prévoit des vagues jusqu'à 8 m au large de la pointe sud (Figure 20).

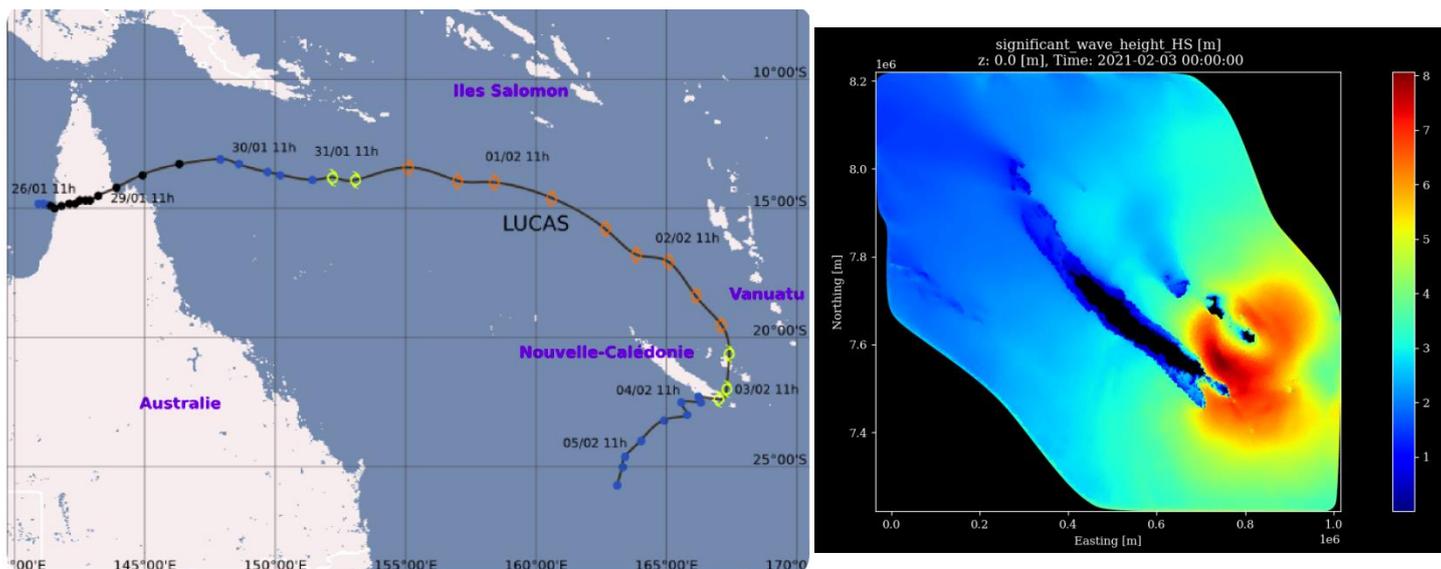


Figure 20 - Trajectoire de la DTF Lucas début février 2021 et carte des Hs simulées lors du passage au plus proche du sud de la Grande Terre le 3 février

Les seules observations de Hs sont celles des stations de Poindimié et Larégnère. Jusqu'à 2 m de vagues sont observées au large de Poindimié, commune assez éloignée du passage de Lucas et peu impactée à l'intérieur du lagon. Au niveau de Larégnère, le modèle surestime les vagues avant l'arrivée de la dépression mais donne une bonne tendance au pic (Figure 21).

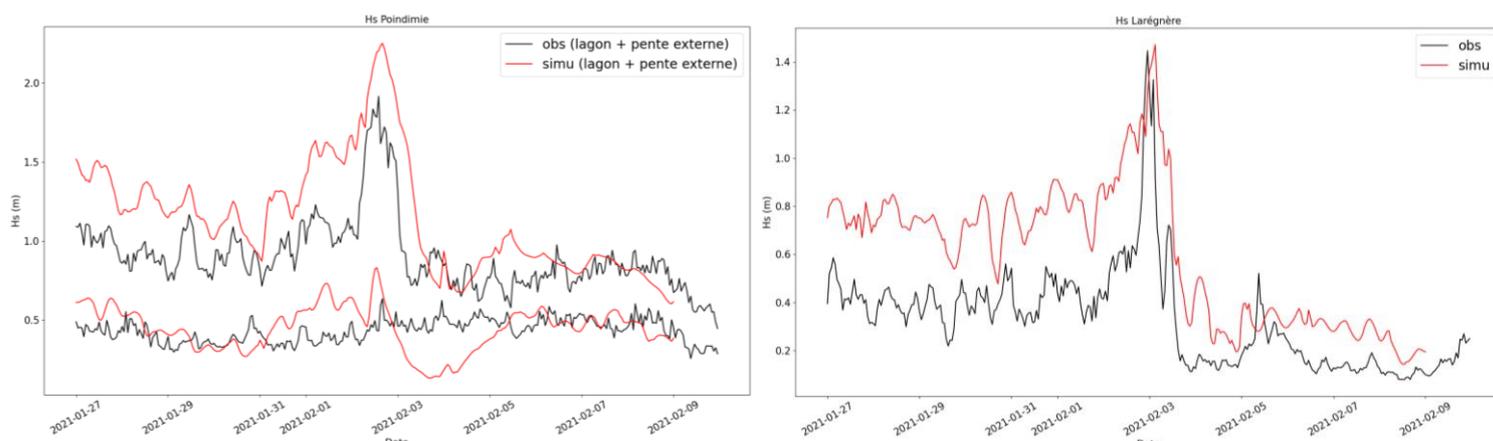


Figure 21 - Comparaison des Hs simulées avec les observations aux stations de Larégnère et Poindimié

La carte des surcotes maximales montrent la pénétration de la houle dans le grand lagon ouvert du sud, mais également la réponse importante des lagons étroits due à la poursuite vers le sud de la dépression après sa stagnation et l'apport de la houle sur le milieu de la côte ouest. Au marégraphe présent à Goro, la surcote atteint 50 cm légèrement sous-estimé par le modèle. La surcote intervient au moment d'une marée haute, ce qui amplifie l'importance du phénomène pour les populations présentes. À Larégnère la simulation

correspond aux observations avec environ 25 cm de surcote. À Ouinne et sur les îles, le modèle ne parvient cependant pas à capter l'intensité de cette surcote très brève, notamment à Maré où un pic de 60 cm a été observé.

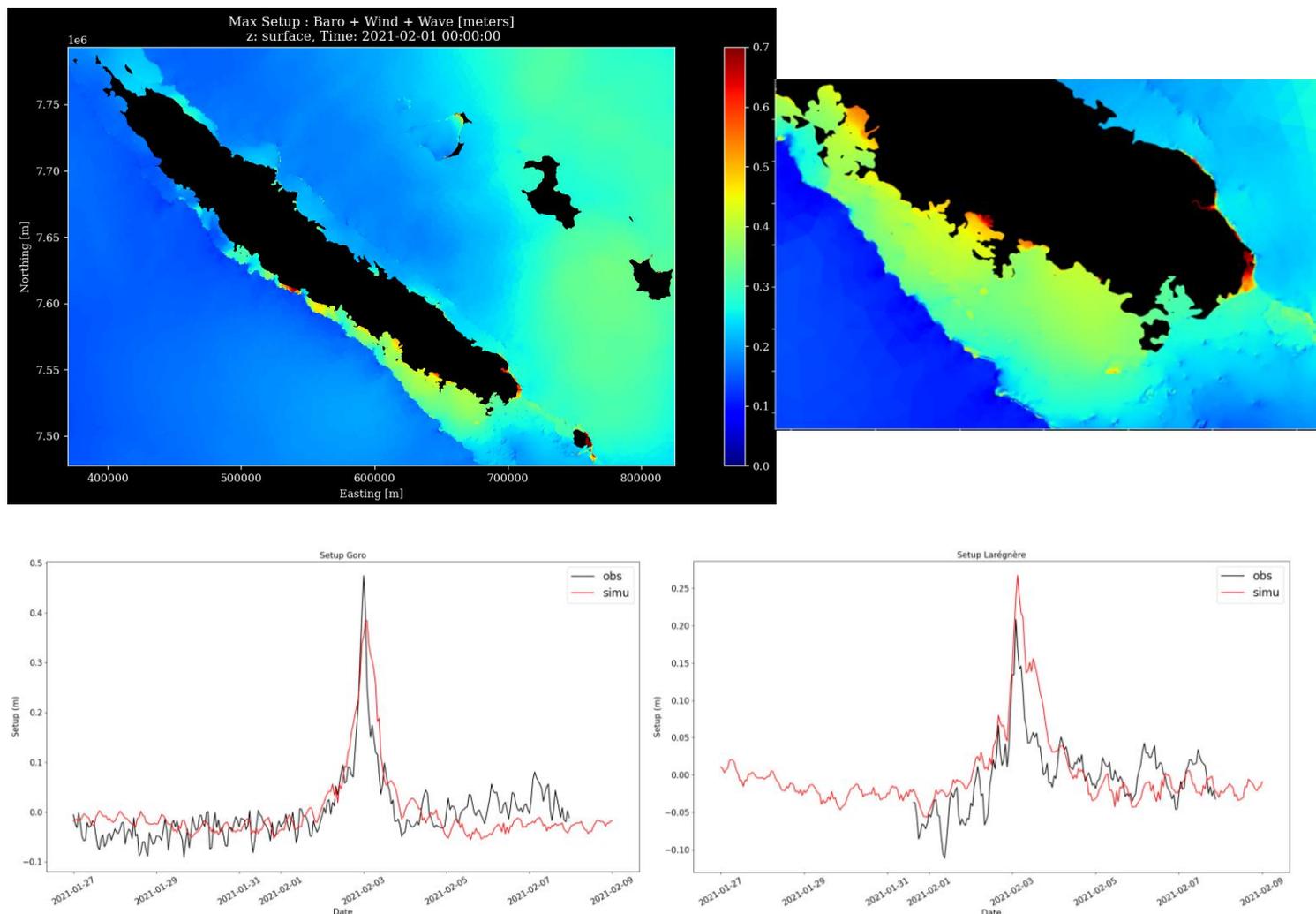


Figure 22 - Carte des surcotes maximales lors du passage de Lucas et comparaison avec les observations aux stations de Goro et Larégnère

3.5. Cyclone Niran

Un mois après Lucas, le cyclone Niran, d'une forte intensité, a touché la Nouvelle-Calédonie en mars 2021 en longeant la côte ouest du nord au sud. Lors de son arrivée au nord de l'île, la pression en son centre descend à 930 hPa générant des vents moyens allant jusqu'à 200 km/h et des rafales à 285 km/h. Niran va ensuite baisser en intensité avant d'être rétrogradé en catégorie 3 une fois au sud de l'île.



Figure 23 - Trajectoire du cyclone Niran en mars 2021 (Météo-France)

Comme on le voit sur les cartes de Hs simulées (Figure 24), ce cyclone a généré des vagues allant jusqu'à 12 m à son arrivée au nord. Au large de Uitoé, l'houllographe déployé à cette occasion par la CPS a mesuré des vagues d'environ 7 m. Le modèle a simulé plus de 8 m au niveau de cette station mais n'a pas capturé le second pic observé à 4,5 m.

Au large de Poindimié, jusqu'à 5 m de vagues ont été observées et simulées, 1,5 m à l'intérieur du lagon, le nord de la côte est donc également subi un déferlement important.

Dans le lagon étroit de Moindou, un pic très bref à 1,2 m a été observé, et comme aux stations ReefTEMPS du lagon sud une surestimation d'environ 20 cm est constatée en conditions normales.

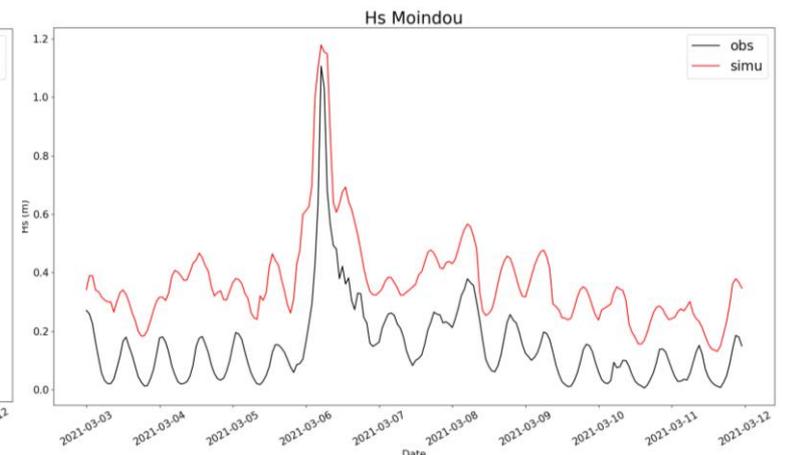
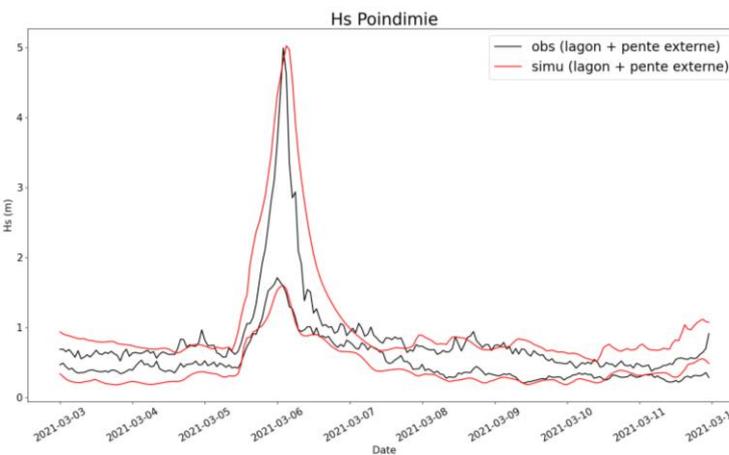
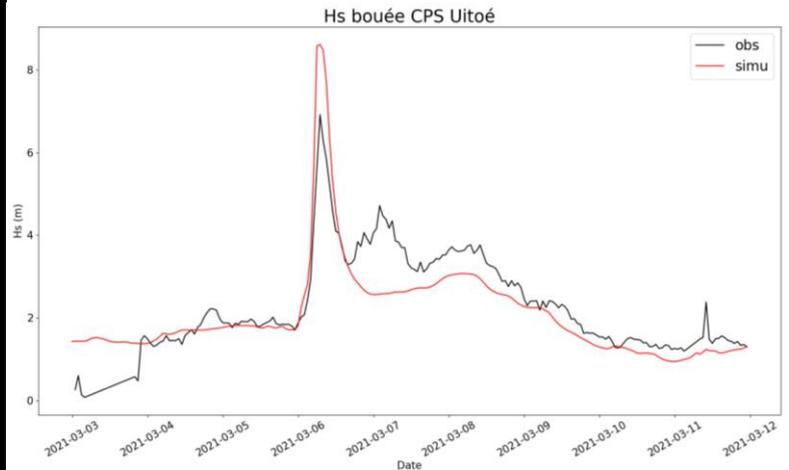
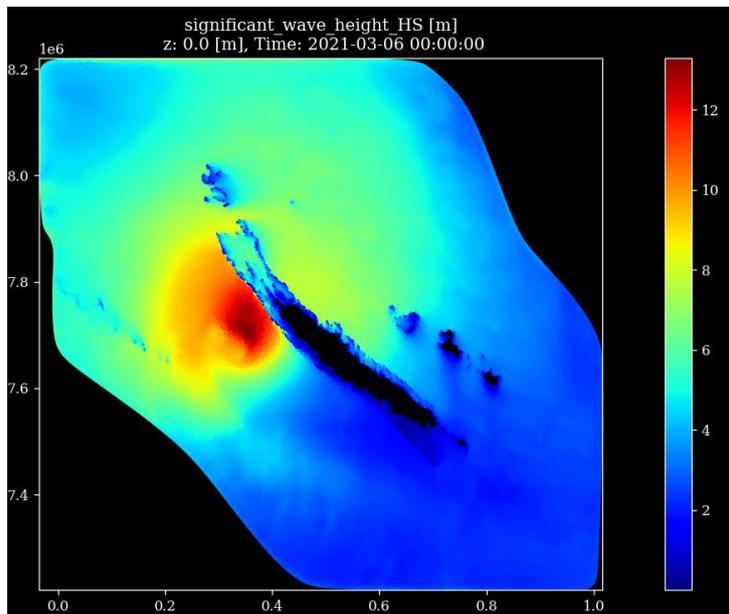


Figure 24 - Carte des Hs simulées lors de l'arrivée du cyclone Niran au nord de la Grande Terre et comparaison aux observations aux stations de Poindimé, Moindou et au houlographe au large de Nouméa

La carte des surcotes maximales (Figure 25) fait apparaître la trajectoire simulée du cyclone et montre sa vitesse importante (les sauts sont dus à l'échantillonnage des sorties toutes les heures). Il apparaît que les surcotes ont été particulièrement importantes dans les lagons étroits de la côte ouest (Oundjo, Poé, Moindou, etc.).

Sur cet évènement, les surcotes simulées sont fidèles à celles observées. La plus importante est observée à Moindou où l'augmentation d'élévation atteint plus d'1 m, la modulation par la marée est assez bien représentée. C'est également le cas dans le grand lagon sud aux stations Larégnère et Mbe-Kouen où les surcotes atteignent 50 cm.

Les surcotes à Thio et Ouinne sont assez similaires et moins importantes avec 30 cm observés et une surestimation de 10 cm à Thio par le modèle. Cette surestimation est également présente au capteur RBR de Poindimié et au marégraphe de Hienghene où le modèle prédit une surcote de 75 cm contre seulement 50 cm observés (Figure 26). À toutes les stations de la côte est, la décote observée après le pic n'est pas du tout capturée par le modèle. C'est également le cas à Ouvéa où la surcote est relativement importante avec un maximum à 50 cm.

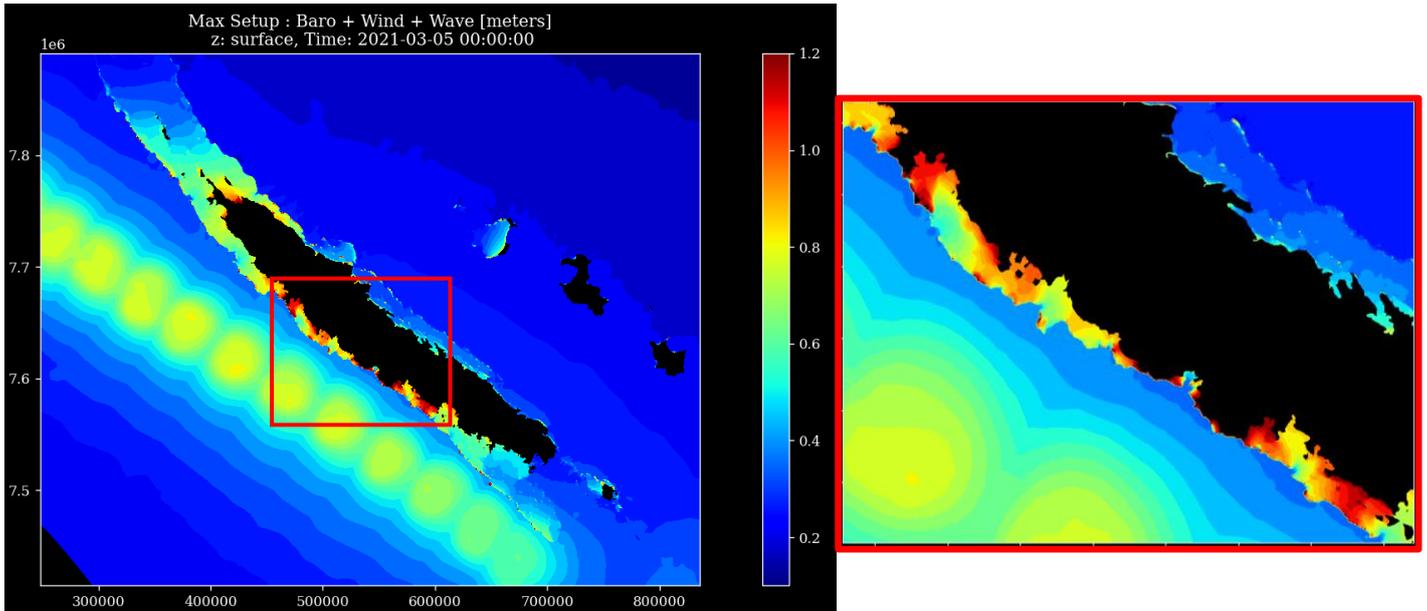


Figure 25 - Carte des surcotes maximales simulées lors du passage de Niran avec un zoom sur les lagons étroits de la côte ouest

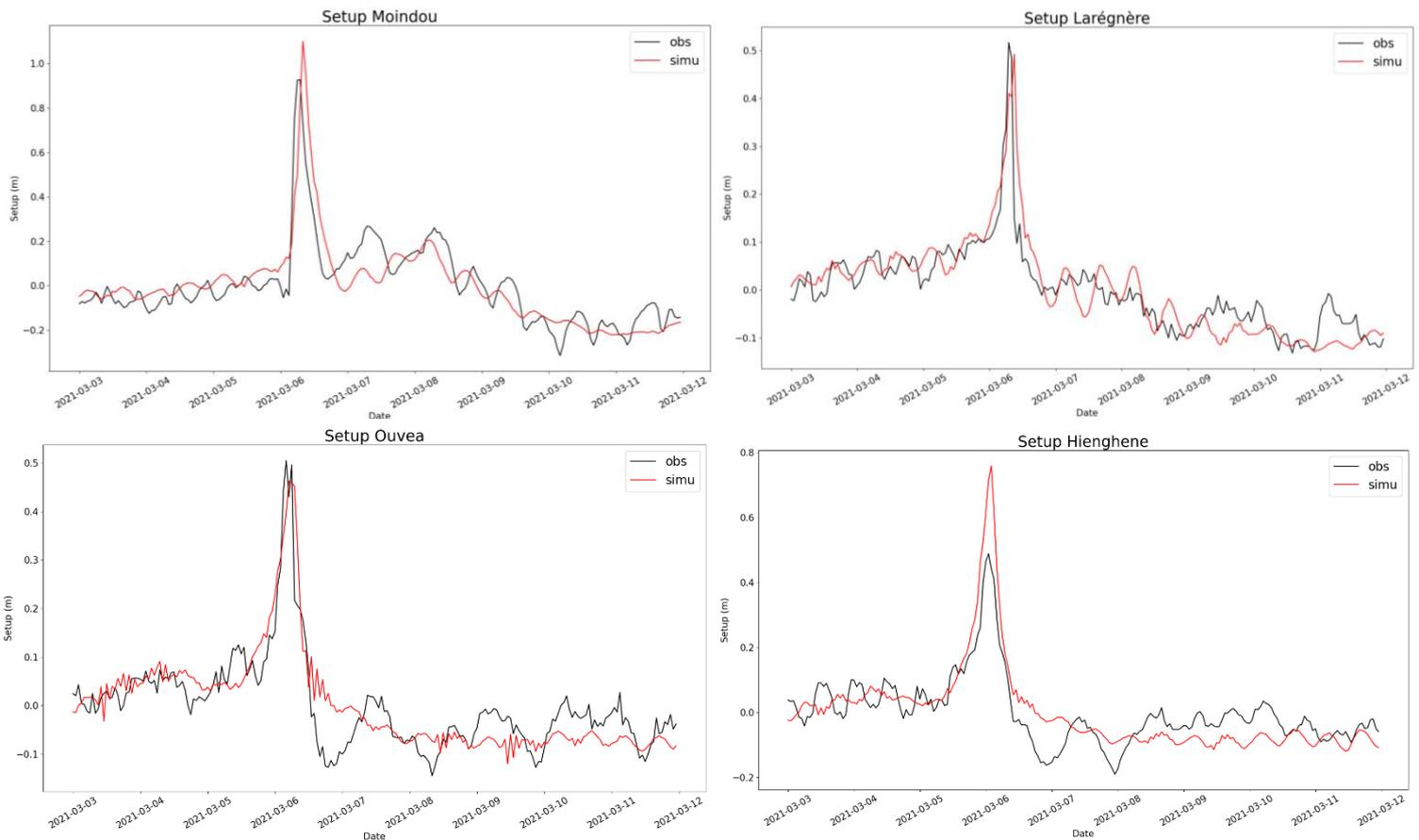


Figure 26 - Comparaison des surcotes simulées avec les observations aux stations de Moindou, Larégnère, Ouvéa et Hienghène

4. Bilan des résultats et évaluation du modèle

Les données présentées dans la partie 3. Simulations des cyclones récents sont ici synthétisées dans le but d'évaluer la capacité du modèle à représenter le déferlement des vagues et les surcotes cycloniques.

4.1. Hauteur significative des vagues (Hs)

Le Tableau 1 indique toutes les données de Hs disponibles lors des cinq évènements Oma, Uesi, Gretel, Lucas et Niran. Les maximums sont comparés aux résultats du modèle aux points interpolés grâce aux coordonnées des stations. Les stations situées hors des lagons sont surlignées en jaune.

Dates	Évènement	Lieu observé	Hs observé (cm)	Hs simulé (cm)
15/02/2019 – 01/03/2019	OMA	Poé	72	77
		Poé ext	666	557
		Larègnère	123	147
		Uitoé	256	299
06/02/2020 - 13/02/2020	UESI	Poindimié	160	132
		Poindimié ext	309	315
12/03/2020 - 17/03/2020	GRETEL	Nda	243	247
		Redika	175	222
		Poindimié	163	125
30/01/2021 – 08/02/2021	LUCAS	Larègnère	145	147
		Poindimié	64	83
		Poindimié ext	192	225
03/03/2021 – 10/03/2021	NIRAN	Moindou	111	118
		Moindou ext	687	621
		Mbe-Kouen	172	165
		Larègnère	209	162
		Uitoé bouée CPS	692	862
		Poindimié	171	160
		Poindimié ext	499	502

Tableau 1 - Synthèse des Hs MAX observées et simulées lors des évènements cycloniques

L'erreur n'étant pas de même nature dans les lagons et à l'extérieur, une *Root Mean Square Error (RMSE)* a été calculée uniquement avec les stations situées à l'intérieur des lagons. L'erreur à l'extérieur est davantage dépendante du forçage et est par nature plus importante au vu des valeurs élevées.

$$RMSE_{Hs\ MAX\ lagons} = 25.27$$

L'erreur moyenne atteint donc environ 25 cm dans les lagons pour des hauteurs de vagues de 1 à 2 m, ce qui est satisfaisant. Cependant, comme présenté dans le rapport précédent, une surestimation du modèle de 15 à 20 cm est régulièrement constatée en période non-cyclonique.

La Figure 27 représente la correspondance entre les valeurs de Hs MAX observées et simulées à échelle logarithmique, permettant d'inclure les stations à l'extérieur des lagons et de relativiser les erreurs par rapport aux valeurs mesurées.

On constate que les simulations sont à parts égales supérieures et inférieures aux observations, aucun biais récurrent n'est constaté. Il n'y a pas de tendance à la surestimation des maximums malgré celle présente en conditions normales.

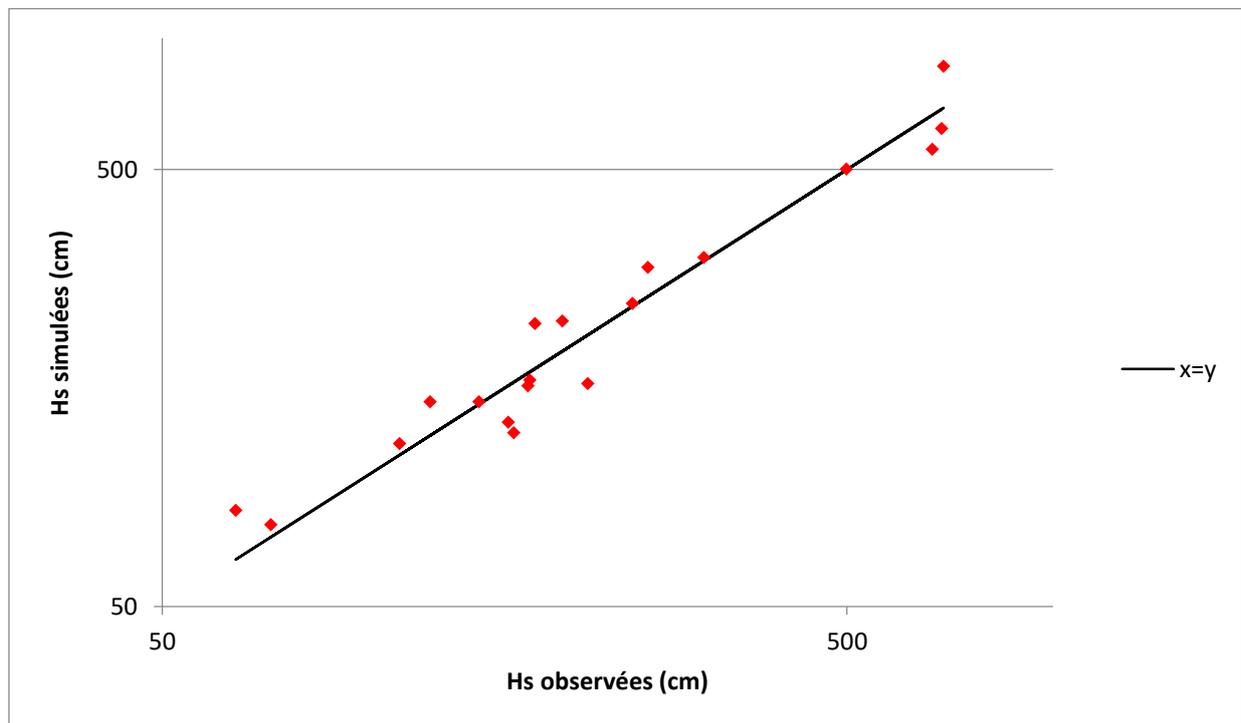


Figure 27 - Graphique des valeurs de Hs simulées en fonction des valeurs observées (échelle logarithmique)

4.2. Surcote

Les valeurs maximales de surcotes observées et simulées à toutes les stations opérationnelles pendant les cinq événements cycloniques étudiés sont recensées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Nous atteignons donc 41 valeurs comparées, ce qui permet une quantification robuste de l'erreur induite par le modèle en conditions cycloniques.

Dates	Évènement	Lieu observé	Surcote max observée (cm)	Surcote max simulée (cm)
15/02/2019 – 01/03/2019	OMA	Poé	72	98
		Laregnere	18	20
		Ouinne	27	6
		Hienghene	44	60
		Lifou	9	5
		Mare	24	5
06/02/2020 - 13/02/2020	UESI	Nda	13	8
		Redika	10	7
		Poindimie	17	16
		Thio	7	7
		Ouinne	16	5
		Hienghene	38	32
		Numbo	18	18
		Lifou	10	5
Maré	10	4		
12/03/2020 - 17/03/2020	GRETEL	Nda	24	29
		Redika	21	24
		Poindimie	33	30
		Thio	23	25
		Lifou	18	15
		Ouinne	22	23
		Ouvéa	28	35
		Maré	30	22
Hienghene	69	39		
30/01/2021 – 08/02/2021	LUCAS	Goro	47	38
		Lifou	31	19
		Ouinne	34	18
		Ouvéa	29	14
		Thio	18	17
		Laregnere	21	27
		Hienghene	19	12
		Poindimie	12	11
03/03/2021 – 10/03/2021	NIRAN	Moindou	93	111
		Mbe-Kouen	54	47
		Laregnere	52	49
		Uitoe	36	39
		Thio	30	43
		Ouinne	36	32
		Ouvea	50	46
		Hienghene	49	76
		Poindimie	32	52

L'erreur moyenne *RMSE* (*Root Mean Square Error*) est calculée sur l'ensemble des stations présentées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{modél,i})^2}{n}}$$

$$RMSE_{surcote\ MAX} = 11.68$$

Comme pour les Hs, la Figure 28 représente la comparaison des valeurs de surcotes à échelle logarithmique. À noter que pour les calculs de surcotes, les courbes sont moyennées à zéro afin de gommer l'influence des références d'élévation du niveau marin utilisées. Cette méthode induit une incertitude d'une dizaine de centimètres mais nous considérons qu'avec le grand nombre de cas étudiés, l'influence de cette correction est négligeable dans l'erreur totale. En moyenne, le modèle sous-estime la surcote maximale d'à peine 1,3 cm. Il n'y a donc pas de réel biais récurrent induit par le modèle. Toutefois, on observe une sous-estimation du modèle pour les surcotes maximales les moins importantes, celle-ci s'explique en partie par des données d'observation parfois bruitées avec des oscillations plus importantes. Les résultats sont en revanche proches pour les surcotes maximales élevées où l'influence des oscillations liées à la marée est moins prédominante. De façon globale, la correspondance entre le modèle et les observations est très satisfaisante, et ce notamment pour les surcotes importantes à surveiller.

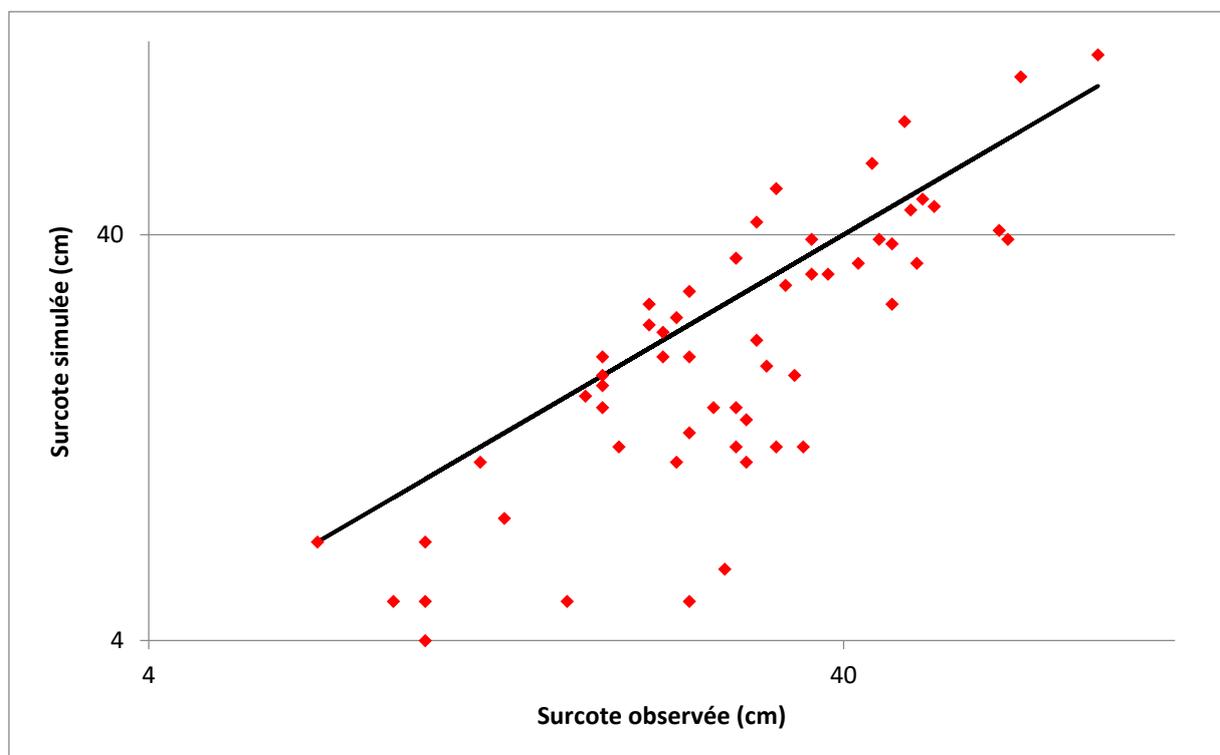


Figure 28 - Graphique des valeurs de surcotes simulées en fonction des valeurs observées (échelle logarithmique)

4.3. Erreurs selon les stations et évènements

Afin de déterminer les évènements les mieux représentés, un classement selon le calcul RMSE a été effectué (Tableau 2). Ce calcul concerne uniquement les surcotes maximales car les données de vagues sont insuffisantes pour être significatives sur chaque évènement distinct. De même, nous présentons l'erreur RMSE par station lorsque celle-ci a été utilisée lors d'au moins trois évènements (Tableau 2).

Dates	Évènement	RMSE
06/02/2020 - 13/02/2020	UESI	5,30199124
30/01/2021 – 08/02/2021	LUCAS	9,956153876
12/03/2020 - 17/03/2020	GRETEL	10,90361816
03/03/2021 – 10/03/2021	NIRAN	13,82831234
15/02/2019 – 01/03/2019	OMA	17,09775814

Tableau 2 – Classement RMSE des évènements étudiés

L'évènement avec la meilleure correspondance entre simulations et observations est le cyclone Uesi où les surcotes ont été les plus faibles. Logiquement, Gretel, Lucas et Niran sont proches des 10 cm d'erreur quadratique moyenne avec une erreur légèrement plus importante lors de Niran où certaines surcotes maximales ont dépassé le mètre. En revanche, la DTF Oma, et sa trajectoire atypique, semble avoir été plus difficile à capturer, notamment à Maré où la sous-estimation du modèle atteint 19 cm (Figure 29).

Le marégraphe de Maré fait l'objet d'interrogations concernant la temporalité des prévisions de marée, car une fois retirées, les oscillations restent très importantes.

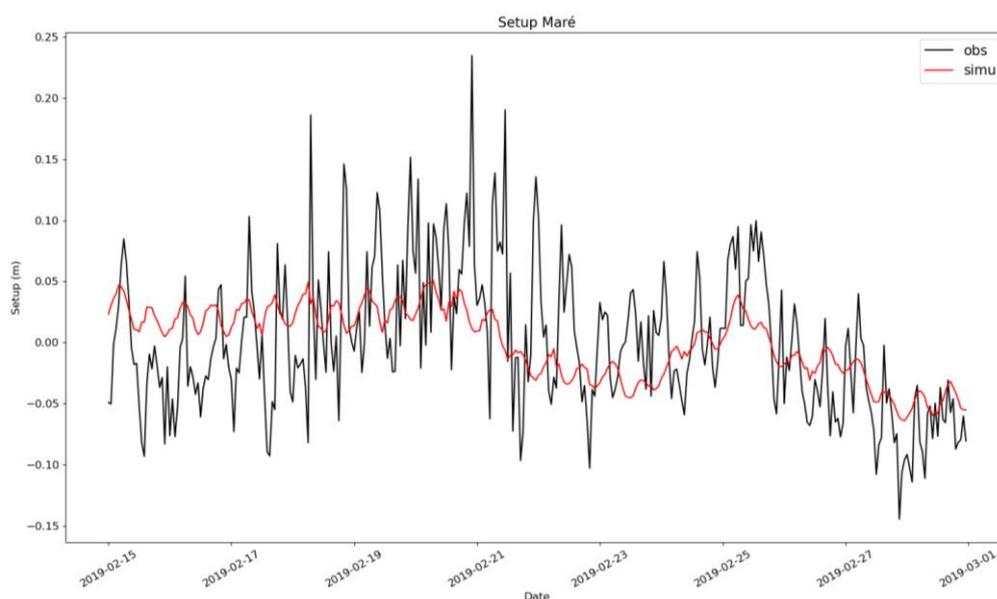


Figure 29 - Surcotes simulée et observée à Maré lors du passage d'Oma en février 2019

Le modèle obtient les meilleurs résultats au niveau de la sonde de pression RBR de Larégnère ainsi qu'au marégraphe de Thio, Lifou et Ouvéa avec moins de 10 cm d'erreur. L'erreur reste satisfaisante à Maré et est en grande partie due à l'erreur mesurée lors du passage d'Oma. Les marégraphes de Hienghene et Ouinné ont la particularité de se situer dans des embouchures avec des effets locaux difficiles à prendre en compte.

Lieu observé	Nbr d'observations	RMSE _{station}
Larégnère	3	4,04
Thio	4	6,60
Lifou	4	6,96
Ouvéa	3	9,83
Poindimié	4	10,14
Maré	3	12,40
Ouinné	5	12,92
Hienghene	5	19,85

Tableau 3 - Classement RMSE des stations étudiées si fonctionnelles lors d'au moins 3 évènements

Avec une incertitude d'environ 10 cm sur les surcotes observées, le modèle est très performant dans leur modélisation et a montré sa capacité à bien représenter des évènements cycloniques avec diverses configurations et intensités.

La prise en compte du déferlement des vagues par le couplage courant-houle SCHISM+SWAN assure des prévisions plus fiables que les modèles utilisés jusqu'ici. Cela va nous permettre d'étendre ces simulations à un plus large panel de cyclones passés, mais aussi de prévenir le risque submersion pour des évènements potentiels.

Références bibliographiques

- 1 - Christophe Point-Dumont. Adaptation d'un modèle de surcote cyclonique pour la DIRNC. Centre météorologique de la DIROI, 2017.
- 2 - Yinglong Zhang et António M. Baptista. « SELFE : A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation ». In : Ocean Modelling 21.3-4 (2008), p. 71-96.
- 3 - Fei Ye et al. « Third-order WENO transport scheme for simulating the baroclinic eddying ocean on an unstructured grid ». In : Ocean Modelling (2019).
- 4 - SCHISM v5.9 Manual 2021 : http://ccrm.vims.edu/schismweb/SCHISM_v5.9-Manual.pdf
- 5 - Physique et manuel d'utilisateur du modèle SWAN : <https://swanmodel.sourceforge.io/>
- 6 - M. S. Longuet-Higgins et R. W. Stewart. « Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to surf beats ». In : Journal of Fluid Mechanics (1962).
- 7 - W.D. Grant et O.S. Madsen. « Combined wave and current interaction with a rough bottom ». In : Journal of Geophysical Research (1979).
- 8 - P. D. Craig et M. L. Banner. « Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer ». In : Journal of physical oceanography (1994).
- 9 - Portail de l'information géographique maritime et littoral du SHOM : <https://data.shom.fr>
- 10 - Réseau d'observation des eaux côtières du Pacifique insulaire : <https://www.reeftemps.science>
- 11 - Données de la campagne ELADE réalisée par l'IFREMER à Poé : <https://www.seanoe.org/data/00651/76334>
- 12 - Alves, J. H. G. M., and M. L. Banner, 2000: A saturation-dependent dissipation source term for wind-wave modeling applications: Fetch-limited case. Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Engineering, Sydney, Australia, ASCE, 269–282.
- 13 - Roy Walters et Cynthia Heston. « Removing tidal-period variations from time-series data using low pass filters ». In : Physical Oceanography 12 (1981), p. 112.
- 14 - http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/niveaux-extremes