

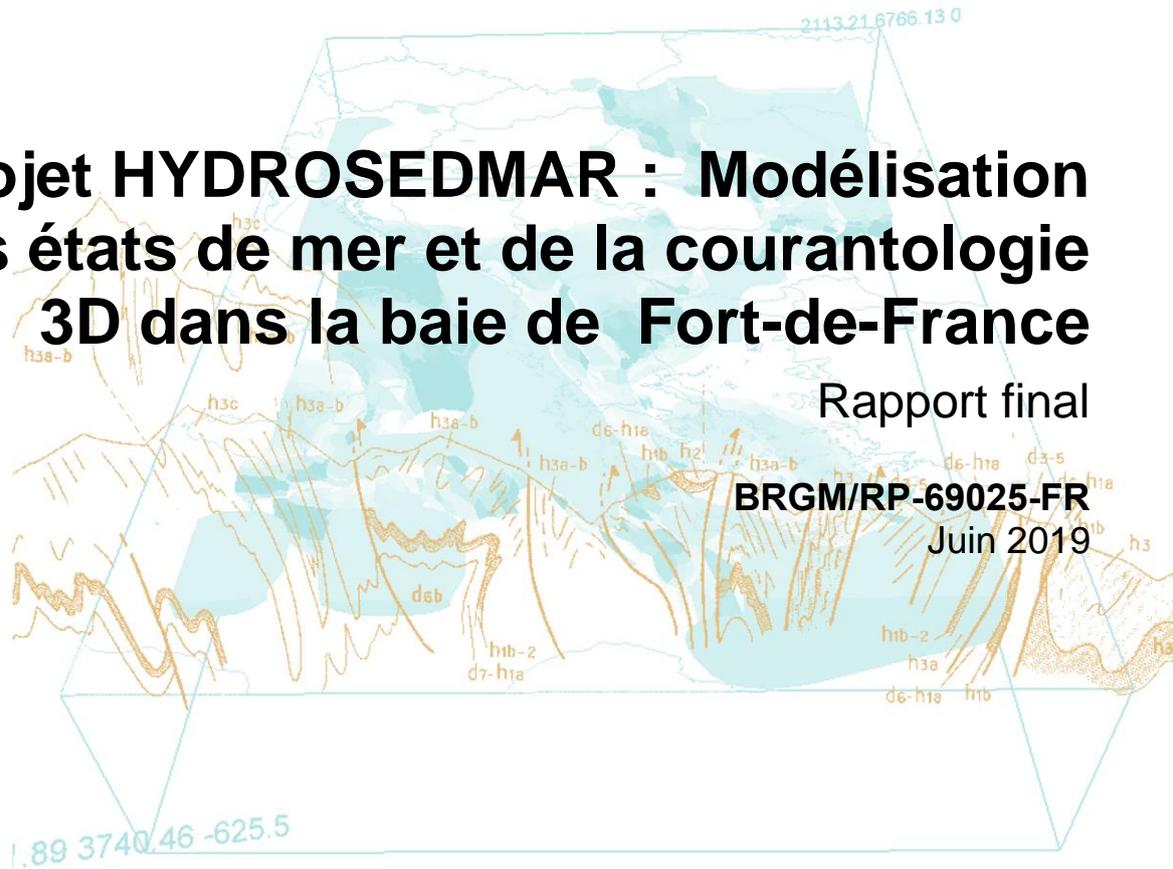


Projet HYDROSEDMAR : Modélisation des états de mer et de la courantologie 3D dans la baie de Fort-de-France

Rapport final

BRGM/RP-69025-FR

Juin 2019



Projet HYDROSEDMAR : Modélisation des états de mer et de la courantologie 3D dans la baie de Fort-de-France

BRGM/RP-69025-FR
Juin 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM

S. Lecacheux, L. Arpaia, R. Pedreros, D. Idier, J. Louisor
Avec la collaboration de
Franck Dumas (SHOM)

Vérificateur :

Nom : Yann Balouin

Fonction : Expert risques littoraux
(DAT OCCITANIE)

Date : 02/07/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Benoît Vittecoq

Fonction : Directeur Régional de
Martinique

Date : 15/07/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : modélisation, vagues, courantologie 3D, Martinique, baie de Fort-de-France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

S. LECACHEUX, L. ARPAIA, R. PEDREROS, D. IDIER, J. LOUISOR (2019) – Projet HYDROSEDMAR : Modélisation des états de mer et de la courantologie 3D dans la baie de Fort-de-France. Rapport final. BRGM/RP-69025-FR, 108 p., 73 fig., 5 tabl., 5 ann.

Synthèse

Le projet HydroSedMar s'inscrit dans le cadre des actions du contrat de baie de Fort-de-France via une convention de Recherche et Développement partagés entre la CACEM et le BRGM. Il a pour but d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie à travers trois grandes actions : (1) Acquisition et analyse de données, (2) Modélisation hydro-sédimentaire et (3) Diffusion et communication auprès des acteurs de la baie et des scientifiques.

Dans le cadre de l'action 2, la modélisation des états de mer, de la courantologie 3D et de la température et salinité sur la baie de Fort-de-France a été réalisée sur une année entière (2017) ainsi que pour trois cas cycloniques : Dean (2007), Omar (2008) et Maria (2017). Le présent rapport présente la mise en place et la validation des modélisations ainsi que l'analyse des résultats. Il est complémentaire aux rapports relatifs à la phase d'instrumentation réalisée préalablement dans le projet (Vincent 2017a ; Vincent 2017b ; Lecacheux et al., 2018).

Les modèles mis en place montrent un bon accord avec les mesures réalisées en carême et hivernage, et pendant le cyclone Maria. La base de données simulées réalisée complète les connaissances existantes sur le fonctionnement hydrodynamique de la baie. On retiendra en particulier (1) le rôle primordial du vent dans la circulation générale des courants ainsi que la présence d'ondes internes qui modifient les courants de fond (2) le fonctionnement bimodal des vagues dans la baie avec la présence simultanée de houles venues du large et de clapot généré par les vents locaux.

Les données de modélisation sont mises à disposition de la communauté scientifique et des gestionnaires de la baie. Une interface de visualisation ainsi qu'une interface de téléchargement sont accessibles via le site internet du projet (<http://hydrosedmar.brgm.fr>).

Remerciements

Les auteurs remercient Pascal Lazure (IFREMER) pour ses conseils sur la partie instrumentation et modélisation du projet, le GDR CROCO pour la mise à disposition du modèle de courantologie 3D et les membres du projet IOWAGA pour la fourniture des spectres de vagues.

Conventions

Dans tout le rapport, les heures sont exprimées en TU (temps universel) : $T_{\text{Martinique}} = TU - 4$

Les directions sont exprimées en convention nautique : direction de provenance par rapport au Nord en tournant dans le sens horaire.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE	11
1.2. OBJECTIFS ET CONTENU DU RAPPORT	12
1.3. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES EN MARTINIQUE	12
2. Mise en place des modèles.....	15
2.1. CONFIGURATIONS.....	15
2.1.1. Vagues	15
2.1.2. Hydrodynamique 3D	15
2.2. OBSERVATIONS DISPONIBLES	16
2.2.1. Bouées	16
2.2.2. Station météorologique	17
2.2.3. Campagnes HYDROSEDMAR.....	17
2.2.4. Bouées dérivantes	17
2.3. DONNEES D'ENTREE DES MODELES	18
2.3.1. Bathymétrie.....	18
2.3.2. Vent et pression	20
2.3.3. Conditions aux limites	24
2.3.4. Synthèse.....	30
3. Validation des simulations annuelles dans la baie.....	31
3.1. VAGUES.....	31
3.1.1. Périodes de carême et hivernage (hors cyclone)	31
3.1.2. Simulation pour le cyclone Maria	37
3.1.3. Synthèse.....	38
3.2. COURANTOLOGIE 3D	38
3.2.1. Périodes de carême et hivernage (hors cyclone)	38
3.2.2. Simulation pour le cyclone Maria	48
3.2.3. Synthèse.....	51
4. Analyse des résultats.....	53
4.1. ETATS DE MER	53
4.1.1. Fonctionnement général et variabilité.....	53
4.1.2. Agitation en conditions cycloniques	56
4.2. CIRCULATION DANS LA BAIE	60

4.2.1. Circulation générale et variabilité saisonnière.....	60
4.2.2. Analyse des courants sur un cycle de marée.....	61
4.2.3. Tests de sensibilité et analyse des processus régissant la circulation	66
4.2.4. Circulation en conditions cycloniques	71
5. Synthèse et conclusions	73
5.1. AGITATION.....	73
5.2. COURANTOLOGIE 3D.....	73
5.3. ACCESSIBILITE ET UTILISATION DE LA BDD.....	74
6. Bibliographie.....	75

Liste des figures

Figure 1. Localisation et périmètre de la baie de Fort-de-France définie dans le contrat de baie (2010). Source : CACEM et Essentiel Conseil (2010).	11
Figure 2. Maillage utilisé par WW3 et zoom sur la baie de Fort-de-France. La limite (littorale) du maillage est définie par l'isocontour à 2 m NGF. Les points bleus correspondent aux points de forçage des conditions aux limites du modèle.	15
Figure 3. Gauche : Carte de différentiel entre les bathymétries originale et lissée. Droite : Comparaison entre les bathymétries originale et lissée sur un transect coupant le chenal principal.	16
Figure 4. Positions des observations utilisées en entrée ou pour la validation des modélisations.	18
Figure 5. Gauche : source des données topo-bathymétriques (Rouge : LIDAR ; Bleu : Histolitt ; Vert : GEBCO). Droite : Modèle topo-bathymétrique à 10 m.	19
Figure 6. Cote des fonds marins par rapport au 0-hydrographique jusqu'à 100 m de profondeur, superposée à une visualisation du relief. MNT de taille de maille 50 m réalisé à partir des données Histolitt et Litto3D.	19
<i>Figure 7. Comparaison des données de vent et de pression du modèle CFS-V2 avec les observations de la bouée Antilles (41300) sur l'année 2017.</i>	<i>20</i>
Figure 8. Roses de direction du vent à la station du Lamentin sur l'année 2017 : Gauche : observations de la station météorologique. Droite : simulation sdu modèle CFS-V2 au point le plus proche.	21
Figure 9. Champ de vent CFS-V2 remplacé à l'intérieur de la baie de Fort-de-France par les données de la station du Lamentin (point rouge) dans la nuit et en milieu de journée le 24/09/2017.	21
Figure 10. Conditions météorologiques pendant la campagne de carême 2017 : Rouge : données du modèle CFS-V2 (cf. point d'extraction tableau 2) représentatives des conditions générales en Martinique ; Bleu : observations à la station du Lamentin.	21
Figure 11. Conditions météorologiques pendant la campagne d'hivernage 2017 : Rouge : données du modèle CFS-V2 (cf. point d'extraction tableau 2) représentatives des conditions générales en Martinique ; Bleu : observations à la station du Lamentin.	22
<i>Figure 12. Vents cycloniques de Dean (2007) et Omar (2008) fusionnés avec les données CFSR. La trajectoire des cyclones est représentée par les pointillés blancs.</i>	<i>23</i>

<i>Figure 13. Gauche : grille du modèle IOWAGA Antilles / emprise du modèle Hydrosedmar (rectangle rouge / Point d'extraction du spectre pour la Figure 14). Droite : Exemple de résultat de la propagation des vagues le 22 mars 2017 à 12h.....</i>	24
<i>Figure 14. Moyennes des densités spectrales au mois de mars 2017 (campagne de carême), septembre 2017 (campagne d'hivernage) et sur toute l'année 2017 aux bords de la grille Martinique sur le point 61,4°W / 14,6°N. Les directions indiquées sont les directions de provenance des vagues (convention nautique).</i>	25
<i>Figure 15. Haut : Hauteur significative et direction des vagues simulées pour le cyclone Dean. Bas : Comparaison des hauteurs simulées (bleu) et observées (noir) aux bouées Antilles 1 (gauche) et Sainte-Lucie (droite).</i>	25
<i>Figure 16. Haut : Hauteur significative et direction des vagues simulées pour le cyclone Omar. Bas : Comparaison des hauteurs simulées (bleu) et observées (noir) aux bouées Sainte-Lucie (gauche) et Eastern Carribean Sea (droite).....</i>	26
<i>Figure 17 : Profils de température (gauche), salinité (centre) et N2 (droit). Ligne bleue : mesure ARGO. Ligne rouge : HYCOM.....</i>	27
<i>Figure 18. Comparaison du niveau de la marée en 2014 au marégraphe de Fort-de France (1) marée prédite à partir d'observations (2) marée calculée avec TPXO7.2 au point le plus proche (3) marée simulée avec CROCO.</i>	28
<i>Figure 19. Comparaison des niveaux d'eau mesurés lors de la campagne de carême HYDROSEDMAR et modélisés avec le modèle CROCO au Point 1 (Chenal principal – cf. Figure 6) au mois de mars 2017.</i>	28
<i>Figure 20. Les 69 unités de gestion du modèle BRGM de type réservoir. Comparaison des débits calculés et observés aux exutoires des bassins versants n°34 et n° 55.</i>	29
<i>Figure 21. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone Maria) pour le Point 1 (Chenal principal – 50 m de fond).....</i>	33
<i>Figure 22. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone Maria) pour le Point 5 (Au sud du banc du Gros Ilet – 15 m de fond).</i>	34
<i>Figure 23. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone Maria) pour le Point 2 (Centre de la baie – 30 m de fond).</i>	35
<i>Figure 24. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone maria) pour le Point 3 (Cohé du lamentin – 14 m de fond).....</i>	36
<i>Figure 25. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone maria) pour le Point 4 (Baie de Génipa – 18 m de fond).....</i>	37
<i>Figure 26. Comparaison des simulations et observations pendant le cyclone Maria. Droite : hauteurs significatives et des directions simulées (bleu) et observées (noir). Droite : périodes pic simulées (bleu) et observées (noir).....</i>	37
<i>Figure 27 : Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 1. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).</i>	40
<i>Figure 28: Température (gauche) et salinite (droite) au fond au Point 1. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).....</i>	41
<i>Figure 29: Profils 3D de température et salinité au Point 1 aux mois de septembre et octobre 2017. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017b). Remarque : les mesures CTD de température et salinité ont été réalisées sur lignes différentes de mouillage mais ici les deux profils sont condensés pour une comparaison plus claire.</i>	41

Figure 30: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 5. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	42
Figure 31 : Température (gauche) et salinite (droite) au fond au Point 5. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	43
Figure 32: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 2. Gauche : CROCO. Droite : mesure Vincent et al. (2017a et 2017b).	44
Figure 33: Température (gauche) et salinite (droit) au fond, Point 2. Blue : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017 a et 2017b).	45
Figure 34: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 3. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	46
Figure 35: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 4. Gauche : CROCO. Droite : mesure de Vincent et al. (2017a et 2017b)	47
Figure 36: Température (gauche) et salinite (droit) au fond, Point 3. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b)	47
Figure 37: Température (gauche) et salinite (droit) au fond, Point 4. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b)	48
Figure 38. Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 2. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	49
Figure 39 : Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 2. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	49
Figure 40 : Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 3. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	50
Figure 41: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 4. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).	50
Figure 42. Hauteurs significatives (en m) moyennes mensuelles calculées dans la baie sur l'année 2017.	54
Figure 43. Roses directionnelles des périodes des vagues. Les roses représentent la répartition en terme de direction de provenance (orientation) et de période pic en seconde (couleurs).	55
Figure 44. Hauteur significative (m) simulées le 22 février à 0h (gauche) et le 18 août à 15h (droite).	56
Figure 45. Hauteurs significatives et direction des vagues simulées pour le cyclone Dean. La figure du haut présente la série temporelle des hauteurs significatives (et de la période en chiffres, les points correspondent aux observations de Hs) et les figures du bas montrent les champs instantanés au moment du pic simulé à la bouée Fort-de- France (désigné par un trait rouge sur la série temporelle).....	57
Figure 46. Hauteurs significatives et direction des vagues simulées pour le cyclone Maria. La figure du haut présente la série temporelle des hauteurs significatives (et de la période en chiffres) et les figures du bas montrent les champs instantanés au moment du pic simulé à la bouée Fort-de-France (désigné par un trait rouge sur la série temporelle).	58
Figure 47. Hauteurs significatives et direction des vagues simulées pour le cyclone Omar. La figure du haut présente la série temporelle des hauteurs significatives (et de la période en chiffres) et les figures du bas montrent les champs instantanés au moment du pic simulé à la bouée Fort-de-France (désigné par un trait rouge sur la série temporelle).	59
Figure 48. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (mois de Mars et Novembre, les cartes des autres mois sont en Annexe 2).	61

<i>Figure 49. Gauche : Schéma de circulation générale déduit des simulations. Courants au milieu de la colonne d'eau : Noir / Courants de surface : Gris. Droite : Schéma issu de l'étude de Castaing et al. (1986).</i>	61
Figure 50. Niveaux d'eau et courants pendant la campagne de carême (02/03/2017- 06/03/2017) au Point 1. Gauche : simulation CROCO. Droite : observations NORTEKMED. Le point noir sur la série du niveau d'eau est utilisé comme pleine mer (PM) de référence pour la Figure 52.	63
Figure 51. Niveaux d'eau et courants pendant la campagne d'hivernage (02/10/2017- 06/10/2017) au Point 1. Gauche : simulation CROCO. Droite : observations NORTEKMED. Le point noir sur la série du niveau d'eau est utilisé comme pleine mer (PM) de référence pour la Figure 53.	64
Figure 52. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) pendant la campagne de carême le 04/03/2017. P.M. est la pleine mer de référence en Figure 50.	65
Figure 53. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) pendant la campagne d'hivernage le 04/10/2017. P.M. est la pleine mer de référence en Figure 51.	65
Figure 54. Composante est-ouest du courant (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) pendant la campagne d'hivernage le 04/10/2017. Les cartes sont tracées dans un plan vertical qui coupe la baie de Fort-de-France d'ouest en est dans l'axe du chenal principal	66
Figure 55. Courants générés par un vent d'Est constant de $7 m.s^{-1}$ au bout de 4 jours de simulation.	66
Figure 56. Vitesse maximale du courant (en surface) sur un cycle de marée semi-diurne avec un marnage de 20 cm (couleurs en $m.s^{-1}$).	67
Figure 57. Influence de la marée en milieu stratifiée. Colonne de gauche : stratification typique pour la carême. Colonne de droite : stratification typique pour l'Hivernage. Première ligne : fréquence de stratification imposée comme condition initiale. Deuxième ligne : profils 3D de la vitesse du courant . Troisième et quatrième lignes : Composante u du courant dans un plan 2DV qui coupe la baie de Fort-de-France. L'intervalle de la palette de couleur va de $-0.02 m/s$ (blue) à $0.02 m/s$ (rouge).	69
Figure 58. Courants 3D et salinité (PSU) après 12 heures de calcul pour un débit moyen (gauche) et centenal (droite).	70
Figure 59. Courants simulés pendant le cyclone Maria.	72
<i>Figure 60. Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 1. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas: profils à la récupération de l'instrument.</i>	81
Figure 61. Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 2. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas: profils à la récupération de l'instrument.	82
Figure 62.: Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 3. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas: profils à la récupération de l'instrument.	83
<i>Figure 63. Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 4. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas: profils à la récupération de l'instrument.</i>	84
Figure 64. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (Janvier à Avril).	87
Figure 65. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (Mai à Août).	88
<i>Figure 66. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (Septembre à Décembre).</i>	89

Figure 67. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/03/2017).	93
Figure 68. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/03/2017).	94
Figure 69. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/03/2017).	95
Figure 70. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/10/2017).	99
<i>Figure 71. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/10/2017).</i>	<i>100</i>
Figure 72. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/10/2017).	101
Figure 73. Haut : Niveaux d'eau et courants du 3 au 7 décembre (marnage d'environ 50 cm) simulés au Point 1. Bas : Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) le 4 décembre. P.M. est la pleine mer de référence indiquée par un point noir sur la série du niveau d'eau (panel du haut)Figure 52.....	104

Liste des tableaux

Tableau 1. Disponibilité des données des bouées pour les événements considérés.....	17
Tableau 2. Coordonnées géographiques des points de comparaison des données CFS-V2 avec la bouée Antilles et la station météorologique du Lamentin.	20
Tableau 3. Sélection des bassins versants pour le calcul du débit à l'embouchure des principales rivières.....	29
Tableau 4. Synthèse des données utilisées par WW3 (vagues) et CROCO (courants 3D, température et salinité)	30
Tableau 5. Extrait du rapport Vincent, 2017a. Période de coupure des AWAC en fonction de la profondeur.....	31

Liste des annexes

Annexe 1 Comparaison des modélisations aux profils de température et salinité des campagnes Hydrosedmar.....	79
Annexe 2 Moyennes mensuelles de courants.....	85
Annexe 3 Analyse des courants sur un cycle de marée en carême	91
Annexe 4 Analyse des courants sur un cycle de marée en hivernage	97
Annexe 5 Analyse des courants sur un cycle de marée avec un marnage de 50 cm	103

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

L'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la baie de Fort-de-France fait partie des actions inscrites dans le contrat de baie de Fort-de-France (cf. Figure 1) porté par la Communauté Agglomération Centre Martinique (CACEM). Dans le cadre du volet 4 de la convention de Recherche et Développement partagés CACEM – BRGM (2012-2014), une collecte des besoins a été effectuée auprès des différents acteurs de la baie (Idier et al., 2014). Parmi les besoins identifiés figure notamment la nécessité d'améliorer les connaissances sur l'agitation, les courants, les flux sédimentaires et la turbidité, qui ont des implications sur différentes thématiques à enjeux pour la baie de Fort-de-France telles que la biodiversité, le suivi des polluants ou l'évolution du trait de côte.

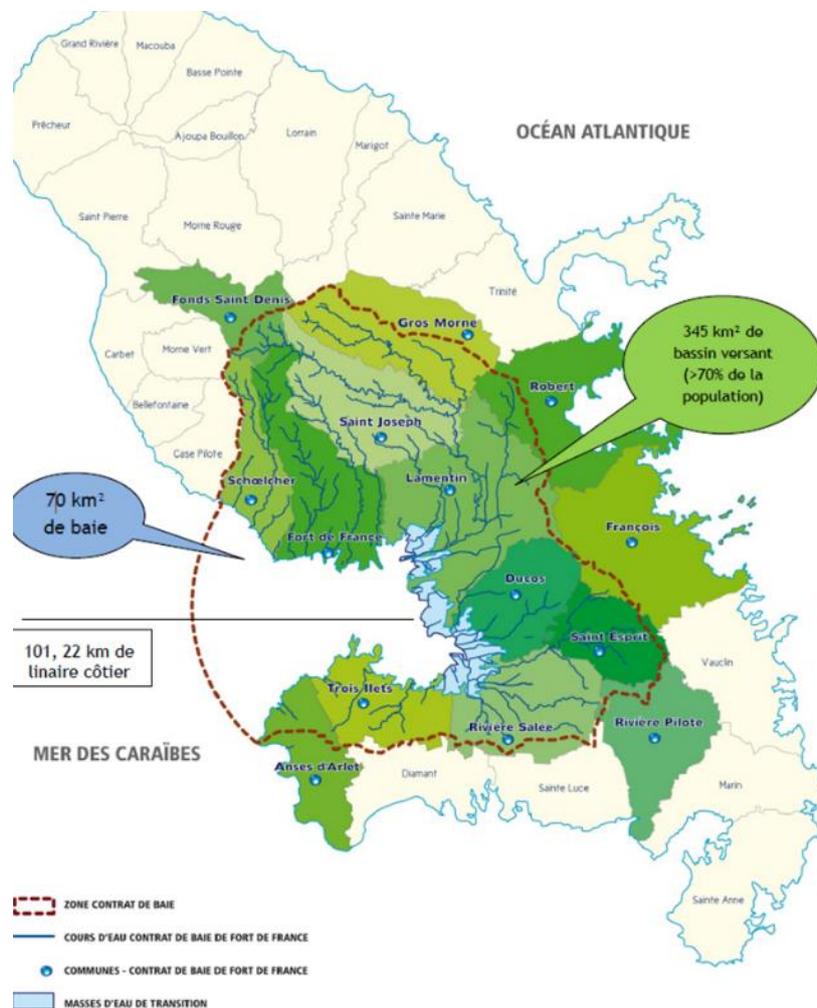


Figure 1. Localisation et périmètre de la baie de Fort-de-France définie dans le contrat de baie (2010). Source : CACEM et Essentiel Conseil (2010).

Sur la base de ces besoins, un programme général de modélisation hydro-sédimentaire, intitulé « projet HydroSedMar » a été défini dans le but d'apporter des éléments de compréhension sur le fonctionnement de la baie.

Ce projet vise à la fois à produire des données hydro-sédimentaires par acquisition et modélisation et à communiquer sur ces données auprès des acteurs de la baie, de la communauté scientifique et de la population. Il est organisé en 3 actions : (1) Acquisition et analyse de données (2) Modélisation hydro-sédimentaire (3) Diffusion et communication.

1.2. OBJECTIFS ET CONTENU DU RAPPORT

Dans le cadre de la présente convention, l'action 2 concerne la modélisation des états de mer, de la courantologie 3D et de la température et salinité sur la baie de Fort-de-France. Les travaux relatifs à la modélisation des flux de sédiments, des zones de dépôt-érosion et de la turbidité sont prévus dans une phase ultérieure. L'objectif est ici de créer une base de données sur toute l'année 2017 ainsi que sur trois cas cycloniques - Dean (2007), Omar (2008) et Maria (2017) - afin de :

- ✓ Mettre à disposition ces données pour la communauté scientifique et les gestionnaires de la baie. Une interface de visualisation ainsi qu'une interface de téléchargement sont accessibles via le site internet (<http://hydrosedmar.brgm.fr>);
- ✓ Approfondir la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de la baie : caractériser les processus contrôlant les courants et l'agitation, déterminer les principaux schémas de circulation, etc. ;
- ✓ Disposer de configurations de modèles d'état de mer et de courantologie 3D pour une phase ultérieure du projet (en dehors de la présente convention) sur l'analyse des flux de sédiments et zones de dépôt-érosion.

Ce rapport présente la mise en place et la validation des modèles d'état de mer et de courantologie 3D ainsi que l'analyse des résultats obtenus. Il se structure en quatre parties :

- ✓ Implantation des modèles : codes, configurations, données d'entrée, conditions aux limites;
- ✓ Validation des modèles implantés, notamment par comparaison avec les campagnes de mesures réalisées dans l'action 1 ([Lecacheux et al., 2018](#) ; [Vincent, 2017a](#) ; [Vincent, 2017b](#));
- ✓ Analyse des résultats;
- ✓ Synthèse et conclusion.

1.3. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES EN MARTINIQUE

Remarque : Ces informations sont notamment reprises du rapport de synthèse de l'IFREMER ([Gervais, 2014](#)) et du rapport de [Idier et al. \(2014\)](#).

La météorologie locale se caractérise par deux régimes selon Météo-France : le carême (de février à avril) et l'hivernage (de juillet à octobre). La période de carême correspond à un régime anticyclonique. Les différences de pression, bien marquées sur l'Atlantique tropical, engendrent un flux d'alizé régulier et soutenu (en force et en direction) sur les Antilles. L'alizé d'Est à Nord-Est est caractéristique : il souffle en quasi-permanence pendant le carême, avec des vents variant généralement de ~30 à ~50 km/h. La période d'hivernage correspond à un régime plus chaud et plus humide. Le vent est souvent plus faible et irrégulier par rapport à la période de carême. Pendant l'hivernage, la conjonction de certaines dépressions avec les conditions océaniques peut entraîner la formation de cyclones affectant l'Arc Antillais. Les vents les plus forts aux Antilles se rencontrent lors des cyclones ou tempêtes tropicales, qui constituent la principale menace de vents extrêmes (ex. : rafales à 260 km/h lors de Hugo en 1989 et >350 km/h lors d'Irma en 2017).

Les données de prévision des spectres de vagues au large de l'arc Antillais issues de la plateforme MARC (<http://marc.ifremer.fr/>) indiquent que deux types de vagues sont présents sur le secteur. Ordinairement, la houle dominante, générée par les Alizés provient de l'Est. La saison montrant les hauteurs de vagues les plus importantes se situe donc de décembre à février (carême). Une deuxième source de vagues provient des fronts froids et des dépressions se creusant sur le nord-ouest de l'Atlantique. Souvent moins haute mais plus longue, cette houle se mélange avec les vagues générées par les Alizés. Les observations du réseau côtier CANDHIS (<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>, bouée 97202 à Basse-Pointe) montrent que la hauteur significative des vagues (Hs) en zone côtière sur les secteurs exposés côté Atlantique se situe le plus souvent entre 1 et 2 m (70 à 75 % du temps avec une moyenne proche de 1,5 m) et dépasse occasionnellement 2 m (10 % du temps), et exceptionnellement 3 m (0.2% du temps). En dehors des franges côtières situées dans les canaux (passage entre deux îles) et encore soumises à la houle atlantique, les côtes caraïbes (sous le vent) sont beaucoup plus calmes. En dehors des cyclones, le régime d'agitation moyen est faible sur ces côtes (Hsmoy < à 0.3 m). L'agitation provient essentiellement de la houle d'Est réfractée conjuguée à la mer de vent.

Au niveau du marégraphe de Fort-de-France, le niveau moyen de la mer se caractérise par des fluctuations saisonnières. En effet, l'analyse des niveaux moyens journaliers (données SONEL¹), montre de manière récurrente une période de bas niveau (plus ou moins durant le carême) et une période de niveau plus haut, avec des différences entre ces deux périodes de l'ordre de 10 à 15 cm. La marée en Martinique est mixte et varie entre un type diurne (dominant) à semi-diurne (soit deux marées marquées par jour ; *SHOM, 2013*). Le marnage moyen varie entre 0.2 et 0.3 m sur la côte caraïbe, mais peut atteindre 0,5 à 0,7 m d'amplitude.

La baie se caractérise par une structure tridimensionnelle des courants. Castaing et al. (1986) ont mis en évidence à partir de mesures in-situ que le vent local (alizé) engendrait des courants de surface orientés vers l'Ouest, tandis que la marée avait des composantes entrantes et sortantes. Ainsi, à un instant donné, les courants au fond et en surface peuvent être opposés. Les ordres de grandeurs de ces courants sont estimés à plusieurs dizaines de centimètres par secondes (près de la surface et du fond). Ces grandeurs caractérisent la situation générale en période d'alizés. Au large de la baie de Fort-de-France, on peut noter aussi l'existence d'un courant persistant lié à la circulation océanique à large échelle, connu sous le nom de courant des Caraïbes et caractérisé par des fluctuations (plusieurs dizaines de jours et saisonnières). Ces courants sont aussi de l'ordre de quelques dizaines de centimètres par seconde. Au large de la baie, ils remontent globalement vers le Nord-Ouest (*Lazure et al., 1996*). *Gervais (2014)* souligne que, étant donnée la configuration de la Martinique, entourée de hauts fonds, et les stratifications thermo-halines marquées au large, il est possible que cette zone soit soumise à des ondes ou marées internes : lorsque le courant de marée rencontre une pente topographique forte, il génère une composante verticale qui oscille à la fréquence de la marée et dont la vitesse varie de manière importante le long de la pente. Si la stratification de l'océan est importante, c.a.d. qu'il comporte des masses d'eau aux propriétés thermo-halines différentes qui ne se mélangent pas, ces variations peuvent induire une circulation de marée interne suivant les masses d'eau de même densité.

¹ SONEL : Système d'Observation des Niveaux des Eaux Littorales (www.sonel.org)

2. Mise en place des modèles

2.1. CONFIGURATIONS

2.1.1. Vagues

La modélisation des vagues est réalisée avec le code Wavewatch 3 ([Tolman 2014](#)), dénommé ci-après WW3, qui résout l'équation de conservation de la densité d'action des vagues suivant des grilles de calcul structurées (différences finies) ou non structurées (éléments finis). WW3 est capable de reproduire les différents processus liés aux vagues depuis le large jusqu'au rivage comme la génération par le vent, la propagation dans l'espace (réfraction, interactions avec les courants, ...) et la dissipation (frottement au fond, déferlement, etc...).

La contrainte principale pour cette étude est de prendre en compte simultanément la propagation et la pénétration dans la baie des houles longues venant du large ainsi que la génération de mer de vent localement à l'intérieur la baie. Aussi, WW3 est utilisé avec un maillage non structuré d'une résolution de 5 km au large et jusqu'à environ 200 m en zone côtière sur l'ensemble de la Martinique (Figure 1). Dans la baie de Fort-de-France, le maillage est raffiné avec des éléments d'environ 100 m de résolution à l'entrée de la baie et jusqu'à 50 m de résolution en fond de baie. Cela représente 53 627 nœuds et 104 206 éléments (triangles). Le modèle est paramétré suivant la configuration décrite par [Ardhuin et al. \(2010\)](#), le spectre des vagues étant discrétisé en 24 directions (pas de 15°) et en 36 fréquences (correspondant à des périodes de vagues allant de 0.95 à 26 secondes) afin de capturer les houles, la mer de vent et le clapot. Il est forcé sur toute la grille par le vent à 10 m d'altitude et aux limites par les spectres de vagues (paragraphe 2.3 et 2.3.3).

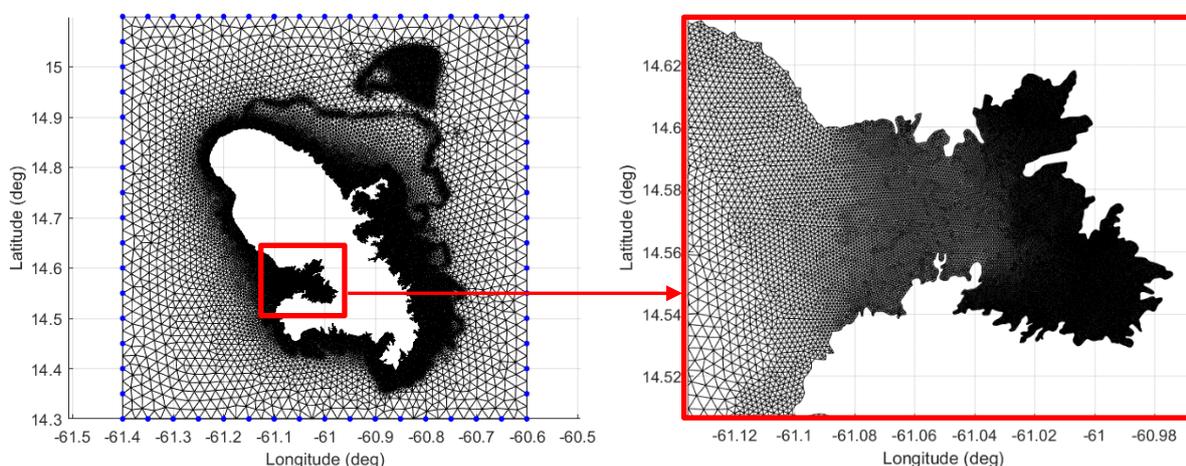


Figure 2. Maillage utilisé par WW3 et zoom sur la baie de Fort-de-France. La limite (littorale) du maillage est définie par l'isocontour à 2 m NGF. Les points bleus correspondent aux points de forçage des conditions aux limites du modèle.

2.1.2. Hydrodynamique 3D

La modélisation de la circulation océanique est réalisée avec le modèle océanique 3D à surface libre CROCO (<https://www.croco-ocean.org>). Les équations primitives sont résolues avec l'hypothèse de Boussinesq et l'approximation hydrostatique. Les variables calculées sont le courant, la température, la salinité et le niveau d'eau. La densité de l'eau est calculée à partir de

la température/salinité avec une loi d'état non-linéaire (*Shchpetkin and McWilliams, 2008*). La solution numérique est calculée avec un algorithme de type *split-explicit* sur une grille structurée Arakawa-C (*Shchpetkin and McWilliams, 2005*). Les conditions aux limites sont imposées à l'aide d'une condition mixte dite de radiation-nudging (*Marchesiello et al., 2001*). Les paramétrisations utilisées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- ✓ Le calcul du transport horizontal utilise des schémas d'advection d'ordre trois avec *upwinding* ;
- ✓ La description de l'interface air-mer est basée sur la paramétrisation de *Fairall et al. (1996)* ;
- ✓ Pour le mélange horizontal, la formulation classique de *Smagorinsky (1963)* est utilisée ;
- ✓ Pour le mélange vertical, le modèle utilise les équations de *Warner et al. (2005)*.
- ✓ Pour la friction, une loi de friction logarithmique est utilisée.

Le domaine de calcul est composé d'une grille mère à une résolution de 200 m et d'une grille fille emboîtée sur la baie d'une résolution de 50 m et composée de 12 932 040 points (les emprises des grilles mère et fille correspondent à celles de la Figure 2). Les deux grilles communiquent dans les deux sens grâce à la technique de *two-way nesting* (*Debreu et al., 2012*). Pour la discrétisation verticale, CROCO utilise la coordonnée sigma généralisée (*Shchpetkin and McWilliams, 2005*). Ici, nous nous avons discrétisée la dimension verticale en 40 niveaux répartis entre la surface et fond. Cette configuration assure une bonne stabilité numérique (avec un pas de temps barocline raisonnable compris entre 30 et 40 s) tout en conservant des temps de calcul raisonnables pour la constitution de la base de données sur un an.

L'utilisation de coordonnées verticales de type sigma peut engendrer l'apparition d'oscillations numériques en présence de forts gradients bathymétriques (*Shchpetkin and McWilliams, 2003*). Aussi, afin de limiter ces perturbations qui peuvent rendre instable la simulation, la bathymétrie a été lissée comme recommandé par *Penven et al. (2008)*. La Figure 3 présente la différence entre la bathymétrie originale et la bathymétrie après l'étape de lissage utilisée dans CROCO.

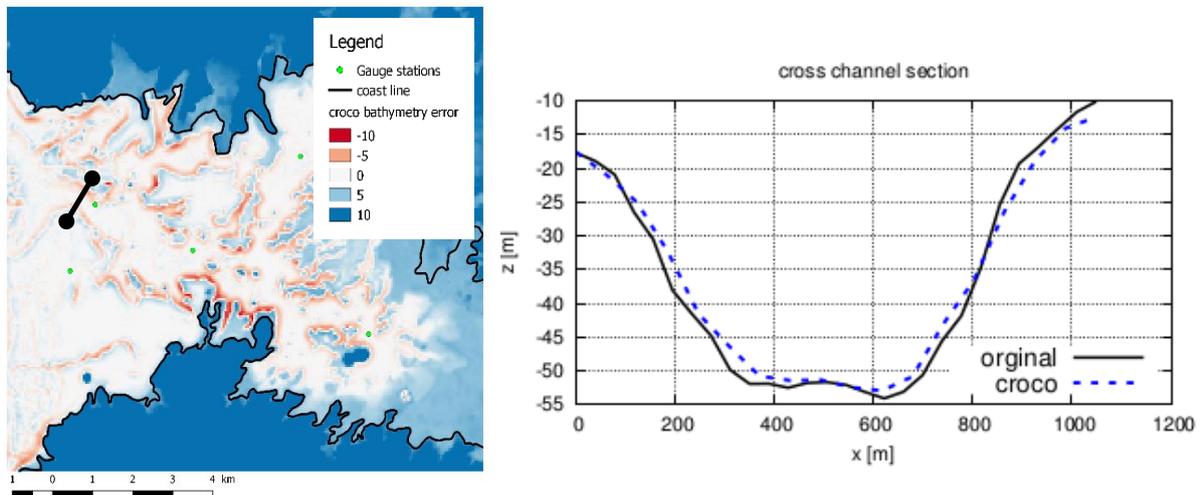


Figure 3. Gauche : Carte de différentiel entre les bathymétries originale et lissée. Droite : Comparaison entre les bathymétries originale et lissée sur un transect coupant le chenal principal.

2.2. OBSERVATIONS DISPONIBLES

2.2.1. Bouées

Les bouées utilisées pour valider les données d'entrée et les résultats des simulations de vagues Hydrosedmar sont les suivantes (cf. localisation Figure 4) :

- Les données de vagues (Hs, Tp, Dp) des bouées opérées et diffusées par le NDBC (National Data Buoy Center, NOAA, <https://www.ndbc.noaa.gov/>) :
 - Station « Eastern Caribbean Sea » n°42059 (15.252°N / 67.483°W): à partir d'avril 2007.
- Les données de vagues (Hs, Tp, Dp), mais aussi de vent (intensité et direction) et pression atmosphérique des bouées opérées et diffusées par Météo-France sur le portail des données publiques (<https://donneespubliques.meteofrance.fr/>) :
 - Bouée Antilles 1 n° 41100 (15.50°N / 57.90°W)
 - Bouée Antilles n°41300 (15.85°N / 57.47°W)
- Les données de vagues (Hs, Tp, Dp) des bouées du réseau CANDHIS diffusées par le CETMEF (<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>) :
 - Bouée Sainte-Lucie n°97205 (14.1763°N / 60.9345°W): à partir de juin 2007.
 - Bouée Basse-Pointe n°97202 (14.8904°N / 61.1146°W): à partir de janvier 1999.
 - Bouée Fort-de-France n° 97204 (14.5481°N / 61.0971°W): à partir de novembre 2001.

Tableau 1. Disponibilité des données des bouées pour les événements considérés.

Période	Antilles1 (41100)	Antilles (41300)	Caribbean Sea (42096)	Sainte- Lucie	Basse-Pointe	Fort-de-France
DEAN	X		X	X		X
OMAR	X		X	X		
2017		X	X	X	X	

2.2.2. Station météorologique

Les données de vent, pression et pluie de la station Météo-France du Lamentin (14.5833°N / 60.9833°W) ont été utilisées pour valider les données météorologiques en entrée des modèles et comme forçage pour le vent local à l'intérieur de la baie (cf. localisation Figure 4).

2.2.3. Campagnes HYDROSEDMAR

Dans le cadre de l'action 1 du projet, deux campagnes de mesures ont été réalisées par la société NORTEKMED afin de collecter des données représentatives en période de carême (du 22/02/2017 au 04/04/2017) et d'hivernage (du 13/09/2017 au 18/10/2017). Ces campagnes ont fait l'objet de rapports spécifiques de la société NORTEKMED qui décrivent de manière exhaustive les opérations de pose et de dépose, l'instrumentation, le contrôle qualité et le post-traitement des mesures, et une description des résultats (*Vincent, 2017a ; Vincent, 2017b*).

Les variables suivantes ont été mesurées en cinq points de la baie (cf. localisation Figure 4) :

- ✓ De manière continue : hauteur d'eau, courants sur la tranche d'eau, vagues (hauteur, période et direction), température-salinité-turbidité au fond.
- ✓ De manière ponctuelle au moment de la pose et de la relève des capteurs : concentration de matière en suspension et température-salinité-turbidité sur la tranche d'eau, nature du fond et des sédiments.

Ces données sont utilisées pour valider les modélisations de vagues, courants, température et salinité dans la baie.

2.2.4. Bouées dérivantes

Les bouées dérivantes ARGO, localisées sur la Figure 4, ont été utilisées afin de valider les données de stratification en entrée du modèle CROCO (<http://www.ifremer.fr/co-argoFloats/float?ptfCode=6902713>).

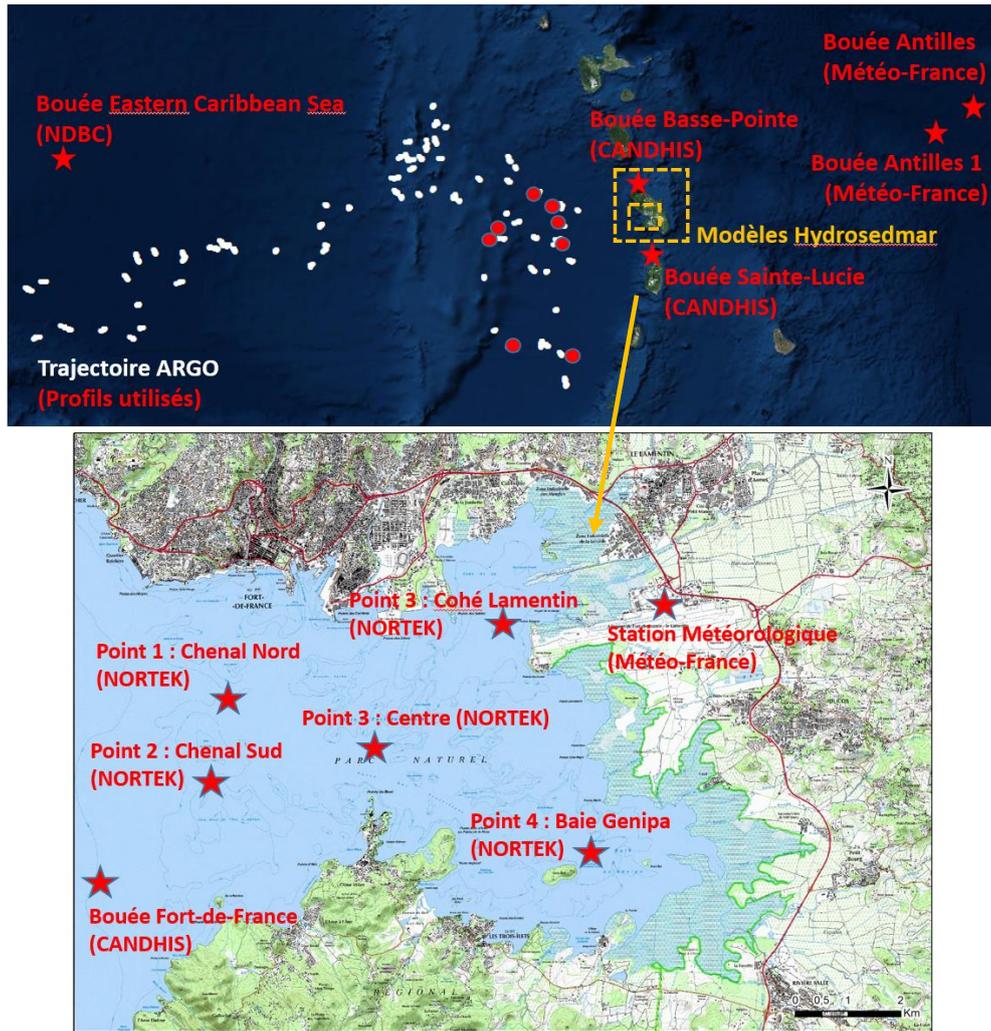


Figure 4. Positions des observations utilisées en entrée ou pour la validation des modélisations.

2.3. DONNEES D'ENTREE DES MODELES

2.3.1. Bathymétrie

Les différentes sources de données topo-bathymétriques exploitées sont :

- ✓ Données topo-bathymétriques Litto3D ©IGN-SHOM, établies essentiellement à partir de levés LiDAR aéroportés. Ces données ont été utilisées sous la forme de dalles (1 km x 1 km) de résolution 1 m. Les traitements apportés aux levés LiDAR par l'IGN et le SHOM permettent d'aboutir à un MNT (modèle numérique de terrain) continu à l'interface terre-mer, avec une précision verticale de l'ordre de 40 à 50 cm pour la bathymétrie qui se prolonge jusqu'à une profondeur maximale de 30 m ;
- ✓ Données du SHOM : Les sondes HISTOLITT constituent un produit numérique organisé en dalles de 1° x 1° contenant les sondes bathymétriques réalisées (et qualifiées) par le SHOM. La résolution spatiale maximale de ces sondes est de l'ordre de 25 m près de la côte. D'une façon générale la densité de ces données est bonne pour des profondeurs allant de 10 m jusqu'en bordure du plateau insulaire ;

- ✓ GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). Ces grilles sont extraites de la grille de la base mondiale GEBCO_08 construite à partir de pixels de 30 arc-secondes d'intervalle. Les grilles fournies par GEBCO résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitaire.

En compilant les données disponibles, un modèle topo-bathymétrique à une résolution de l'ordre de 10 m autour de la Martinique a été conçu. Pour cela, les données les plus fines (LiDAR Litto3D) ont été extraites à 10 m de résolution et assemblées. Les lacunes bathymétriques dans ces données ont ensuite été comblées grâce aux données Histolitt du SHOM (là où elles étaient suffisamment denses), puis par les données de la base GEBCO. La source des données topo-bathymétriques utilisées ainsi que le MNT sont présentés Figure 5 et Figure 6.

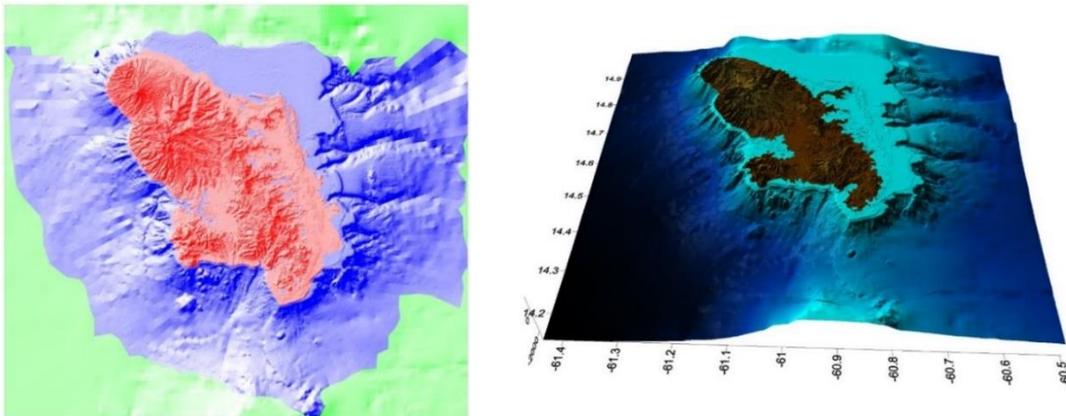


Figure 5. Gauche : source des données topo-bathymétriques (Rouge : LIDAR ; Bleu : Histolitt ; Vert : GEBCO). Droite : Modèle topo-bathymétrique à 10 m.

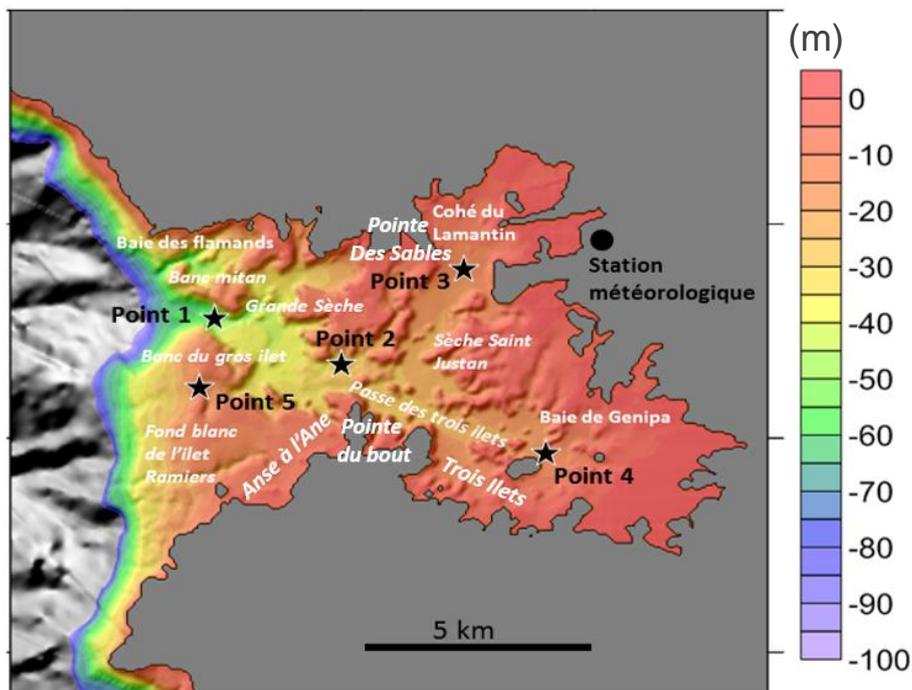


Figure 6. Cote des fonds marins par rapport au 0-hydrographique jusqu'à 100 m de profondeur, superposée à une visualisation du relief. MNT de taille de maille 50 m réalisé à partir des données Histolitt et Litto3D.

2.3.2. Vent et pression

Modélisation annuelle (année 2017)

Les données de vent et de pression utilisées pour forcer les modèles WW3 et CROCO sont issues de la ré-analyse CFS-V2 (Climate Forecast System, NOAA, [Saha et al., 2010](#)). Les données sont disponibles toutes les heures à une résolution de 0.2 °.

Tableau 2. Coordonnées géographiques des points de comparaison des données CFS-V2 avec la bouée Antilles et la station météorologique du Lamentin.

Point de mesure/ simulation	Latitude WGS84	Longitude WGS84
Station météo Aéroport	14° 35.700' N	60° 59.700' W
CFS-V2 « Aéroport »	14° 36.000' N	60° 57.000' W
Bouée Antilles	15° 51' N	57° 28.2' W
CFS-V2 « Antilles »	15° 48' N	57° 24' W

La comparaison des données de vent et de pression du modèle CFS-V2 avec les données de la bouée Antilles sur toute l'année 2017 (cf. Figure 7) montre une très bonne adéquation avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,85 pour les deux variables. Cela montre la très bonne qualité de ces données en haute mer. Plus localement, la comparaison des données CFS-V2 aux enregistrements de la station de l'aéroport du Lamentin sur la même année (cf. Figure 8, Figure 10, Figure 11) montre une bonne corrélation pour les données de pression mais plus de disparités concernant l'intensité et la direction du vent. En effet, la résolution du modèle CFS-V2 ne permet pas de représenter correctement le relief de la Martinique, l'intensité du vent est légèrement surestimée dans la baie et les variations journalières liées aux cycles jour / nuit sont atténuées.

Aussi, afin de représenter au mieux les vents et notamment les cycles jour/nuit à l'intérieur de la baie, les données CFS-V2 sont ré-interpolées à 0.05° puis sont remplacées sur 4 points de la baie par les observations à la station du Lamentin (cf. exemple Figure 9).

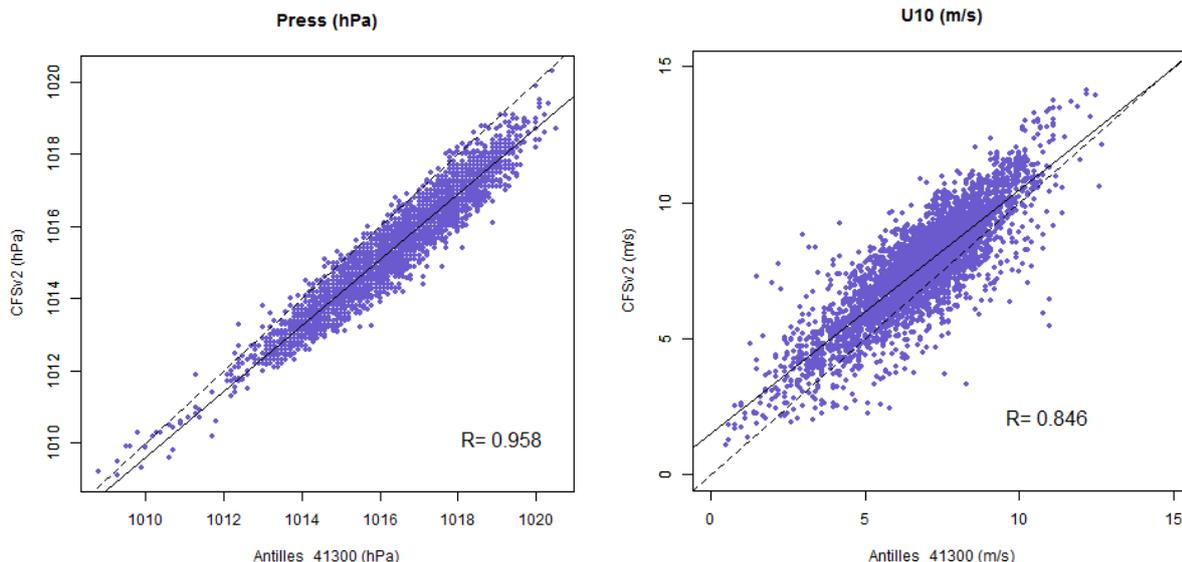


Figure 7. Comparaison des données de vent et de pression du modèle CFS-V2 avec les observations de la bouée Antilles (41300) sur l'année 2017.

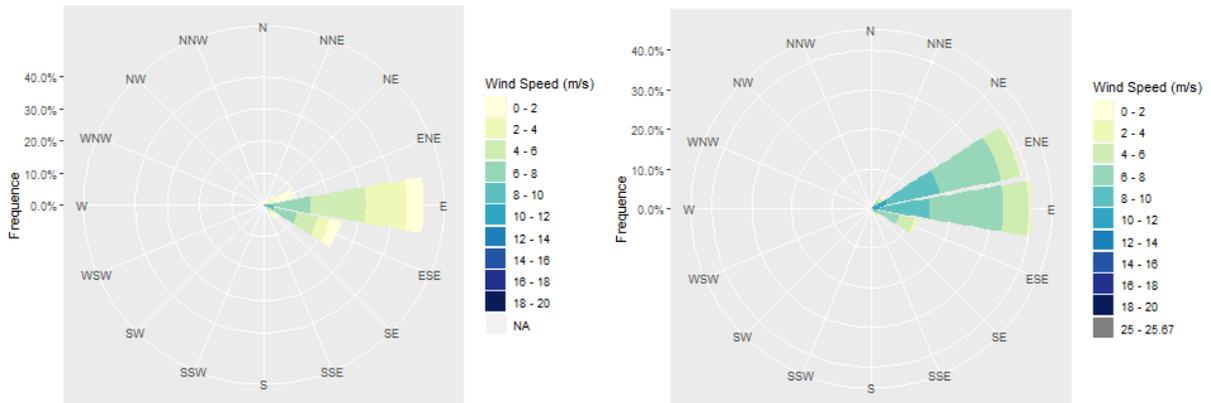


Figure 8. Roses de direction du vent à la station du lamentin sur l'année 2017 : Gauche : observations de la station météorologique. Droite : simulation sdu modèle CFS-V2 au point le plus proche.

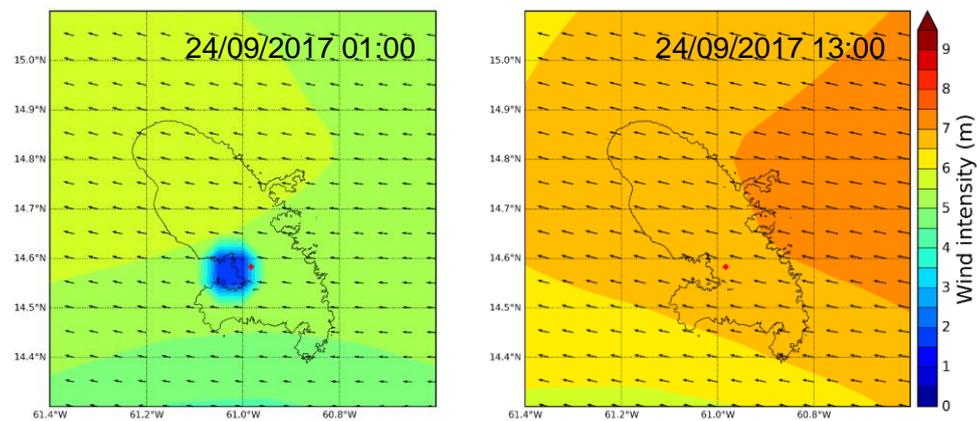


Figure 9. Champ de vent CFS-V2 remplacé à l'intérieur de la baie de Fort-de-France par les données de la station du Lamentin (point rouge) dans la nuit et en milieu de journée le 24/09/2017.

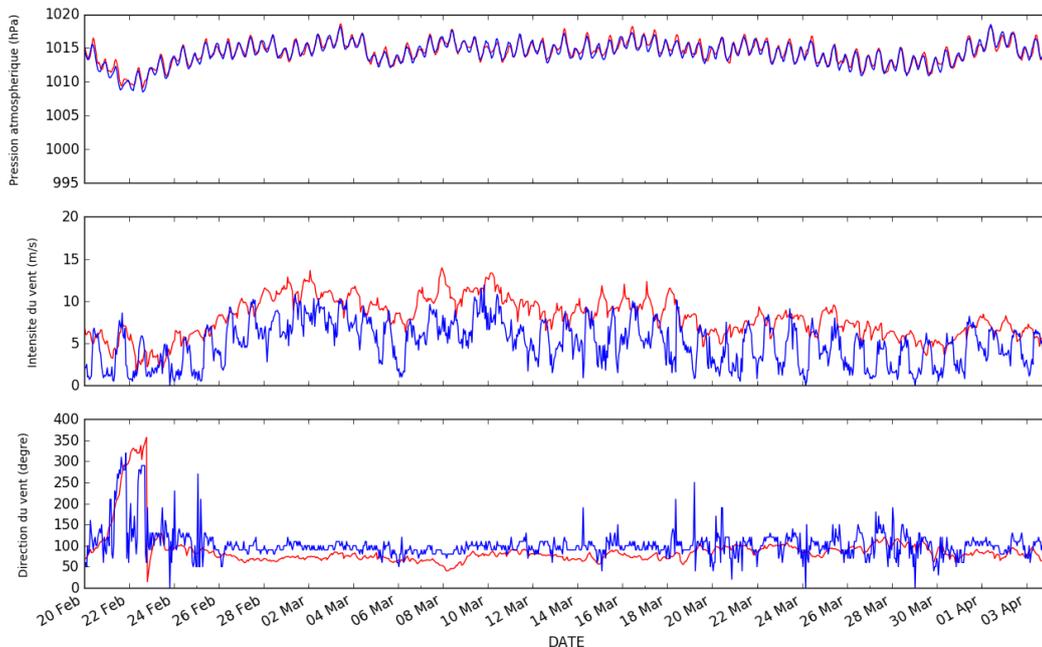


Figure 10. Conditions météorologiques pendant la campagne de carême 2017 : Rouge : données du modèle CFS-V2 (cf. point d'extraction tableau 2) représentatives des conditions générales en Martinique ; Bleu : observations à la station du Lamentin.

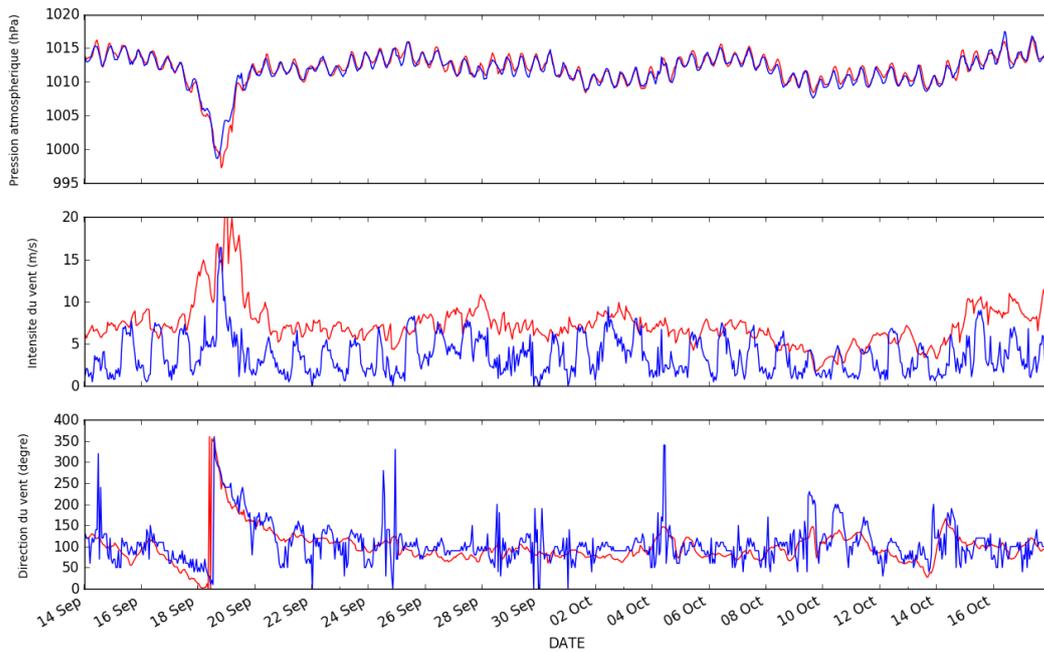


Figure 11. Conditions météorologiques pendant la campagne d'hivernage 2017 : Rouge : données du modèle CFS-V2 (cf. point d'extraction tableau 2) représentatives des conditions générales en Martinique ; Bleu : observations à la station du Lamentin.

Cas cycloniques (Dean et Omar)

Concernant les cas de Dean (2007) et Omar (2008), la résolution des modèles globaux ne permet pas de représenter finement la structure et l'intensité des champs de vent cycloniques. Les données de vent et de pression sont donc reconstituées sur une grille de résolution 0.1° à partir des données IBTRAKS en utilisant une version modifiée du modèle paramétrique de [Holland \(1980\)](#) permettant d'introduire une asymétrie grâce aux rayons d'extension des vents. IBTRAKS ([Knapp, 2010](#)) est un produit fourni par la NOAA qui a réalisé une compilation des best-tracks issus de différentes agences. Il s'agit de la base de données historiques la plus complète qui contient, pour chaque cyclone, les paramètres de toutes les agences ayant effectué des observations : trajectoire, intensité maximale, pression centrale, pression environnante, rayon des vents maximums, et rayons d'extension des vents à R_{34kt} , R_{50kt} et R_{64kt} (si disponibles). L'inter-comparaison des différentes sources de données ayant montré que celles-ci étaient très comparables, les données du NHC (National Hurricane Center, NOAA) ont été utilisées pour cette étude car elles fournissaient le plus grand nombre de paramètres.

La formule de Holland (1980) permet de calculer le profil de la vitesse radiale du vent de gradient (V_r) ainsi que la pression de surface (P) selon la distance r à l'œil avec les eq. (1) et (2). Le paramètre B représente la forme générale du profil. Il est calculé avec la relation entre V_m et P_c .

$$V_r = \sqrt{B \frac{(P_n - P_c)}{\rho_a} \times \left(\frac{R_m}{r}\right)^B \times \exp\left(-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right) + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}} \quad \Rightarrow \quad B \approx \frac{V_m^2 \rho_a e}{(P_n - P_c)} \quad (1)$$

$$P(r) = (P_n - P_c) \times \exp\left(-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right) + P_c \quad (2)$$

Où f est la force de Coriolis, ρ_a la densité de l'air ($\sim 1.15 \text{ kg.m}^{-3}$), V_m la vitesse maximale, R_m le rayon de vent maximum, P_c la pression au centre du cyclone et P_n la pression environnementale.

Pour chaque cyclone, les paramètres sont tout d'abord interpolés toutes les demi-heures et le profil de la vitesse radiale est calculé avec la formule de Holland (1980) et ajusté en recalculant le rayon des vents maximums entre chaque rayon d'extension de vent. Pour cela, on utilise la méthode de [Xie et al. \(2006\)](#) consistant à calculer le nouveau rayon dans chaque cadran (NE, SE, SO, NO) avec l'équation 1 puis comme une fonction de θ (position autour de l'œil du cyclone) par recherche d'une fonction polynomiale. Le rayon de vent maximum devient donc fonction de r et de θ . La direction du vent est finalement ajustée grâce aux formules de [Bretschneider \(1972\)](#).

Une fois le profil ajusté, les vents sont convertis en vents de surface et moyennés sur 10 minutes avant d'être fusionnés aux vents du modèle CFSR ([Saha et al., 2010](#)) pour les vitesses inférieures à 10 m.s^{-1} permettant ainsi de représenter les vents à grande échelle autour du champ de vent cyclonique (cf. Figure 12).

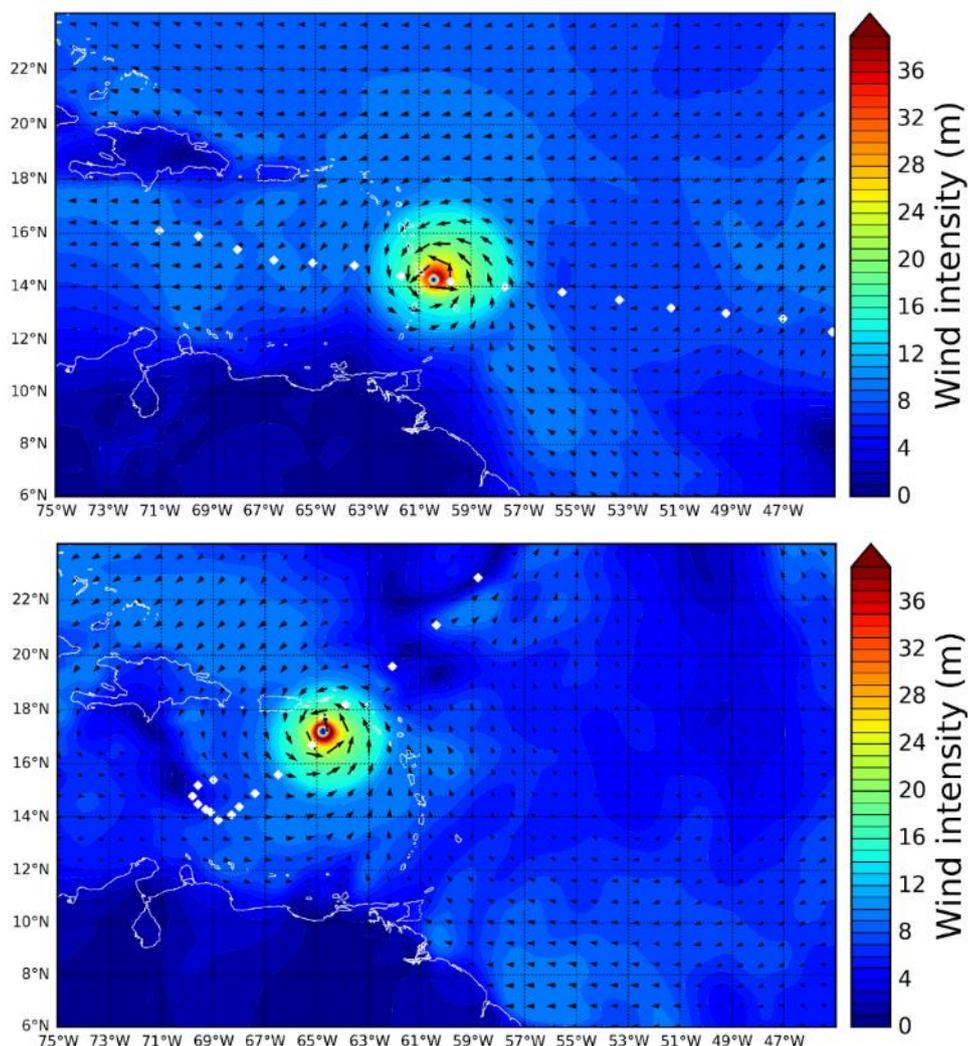


Figure 12. Vents cycloniques de Dean (2007) et Omar (2008) fusionnés avec les données CFSR. La trajectoire des cyclones est représentée par les pointillés blancs.

Pour le cyclone Maria, qui fait partie de l'année calendaire simulée (2017), la qualité des données CFS-V2 pour ce cyclone a été jugée suffisante pour ne pas reconstituer des champs de vent paramétriques supplémentaires.

2.3.3. Conditions aux limites

Vagues pour la modélisation sur l'année 2017

Afin de prendre en compte les houles générées au-delà de l'emprise de la simulation, le modèle WW3 est forcé aux bords du domaine par les spectres directionnels de vagues. Des tests de sensibilité ont en effet montré que l'utilisation de paramètres (Hs, Tp, Dp) décrivant les vagues les plus énergétiques du spectre n'était pas satisfaisante car elle conduisait à une sous-estimation des hauteurs de vagues pénétrant dans la baie. Afin de reconstituer les spectres de vagues sur le bord du domaine de simulation Hydrosedmar (cf. emprise Figure 4) sur toute l'année 2017, la base de données IOWAGA (<http://www.ifremer.fr/iowaga/>) est utilisée. Les spectres de la grille globale sont extraits sur l'année 2017 et utilisés pour propager les vagues sur le domaine de la grille Antilles (cf. emprise et exemple de résultat Figure 13) en imposant également le vent issu du modèle CFS-V2. Les spectres sont ainsi récupérés sur le bord du domaine de calcul.

L'analyse des spectres obtenus sur le bord ouest (ex. Figure 14) et de leur partition montre en effet l'existence de plusieurs types de vagues :

- ✓ Des houles d'Est qui ont contourné la Martinique par le Nord pour prendre une direction en provenance du Nord-Est. La hauteur significative et la période pic moyennes associées à cette partition sont respectivement d'environ 40 cm et 10 s.
- ✓ Des houles d'Est qui ont contourné la Martinique par le Sud pour prendre une direction en provenance du Sud-Est. La hauteur significative et la période pic moyennes associées à cette partition sont respectivement d'environ 50 cm et 8 s.
- ✓ Des houles de Nord-Ouest, très peu énergétiques, provenant des fronts froids et des dépressions se creusant sur le nord-ouest de l'Atlantique qui rentrent directement dans la baie. La hauteur significative et la période pic moyennes associées à cette partition sont respectivement d'environ 30 cm et 10 s.

Les vagues qui rentrent dans la baie sont donc issues de la rencontre de ces différents régimes et la résultante peut être variable selon la période de l'année ou à l'échelle d'une journée.

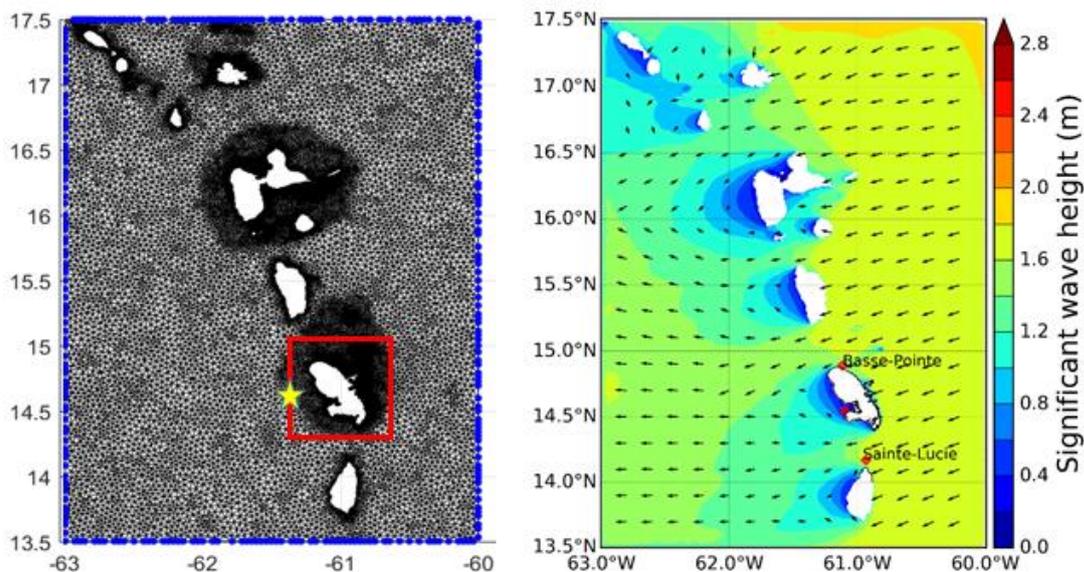


Figure 13. Gauche : grille du modèle IOWAGA Antilles / emprise du modèle Hydrosedmar (rectangle rouge / Point d'extraction du spectre pour la Figure 14). Droite : Exemple de résultat de la propagation des vagues le 22 mars 2017 à 12h.

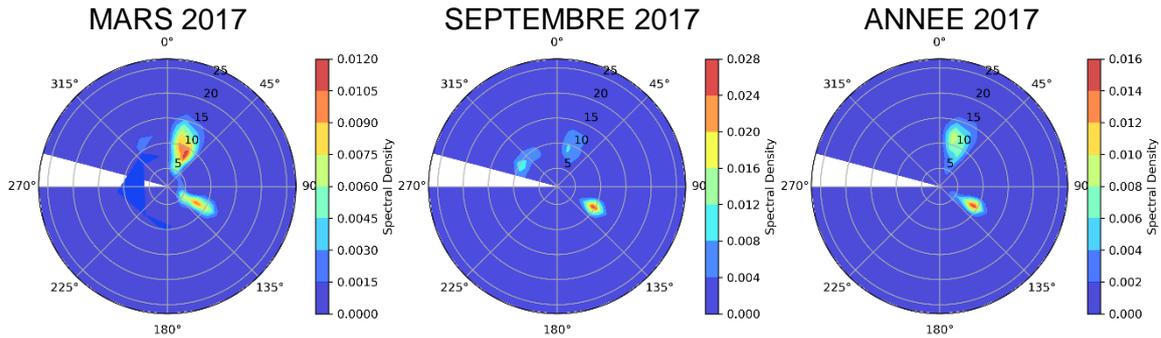


Figure 14. Moyennes des densités spectrales au mois de mars 2017 (campagne de carême), septembre 2017 (campagne d'hivernage) et sur toute l'année 2017 aux bords de la grille Martinique sur le point 61,4°W / 14,6°N. Les directions indiquées sont les directions de provenance des vagues (convention nautique).

Vagues pour la modélisation des cyclones Dean et Omar

Concernant les conditions cycloniques, les spectres de vagues aux bords du domaine sont calculés à partir des champs de vent paramétriques (cf. 2.3.2) en utilisant le modèle WW3 sur une emprise couvrant un large domaine autour de l'arc Antillais mise en place pour les besoins du projet. La grille utilisée est régulière (0,1°) et utilise les mêmes paramétrisations que la grille Martinique (cf. 2.1.1). La comparaison aux bouées Antilles, Sainte-Lucie et Eastern Caribbean Sea (cf. Figure 15 et Figure 16) montre des résultats très satisfaisants tant sur les hauteurs significatives que sur les périodes pic avec un erreur au pic inférieure à 10%.

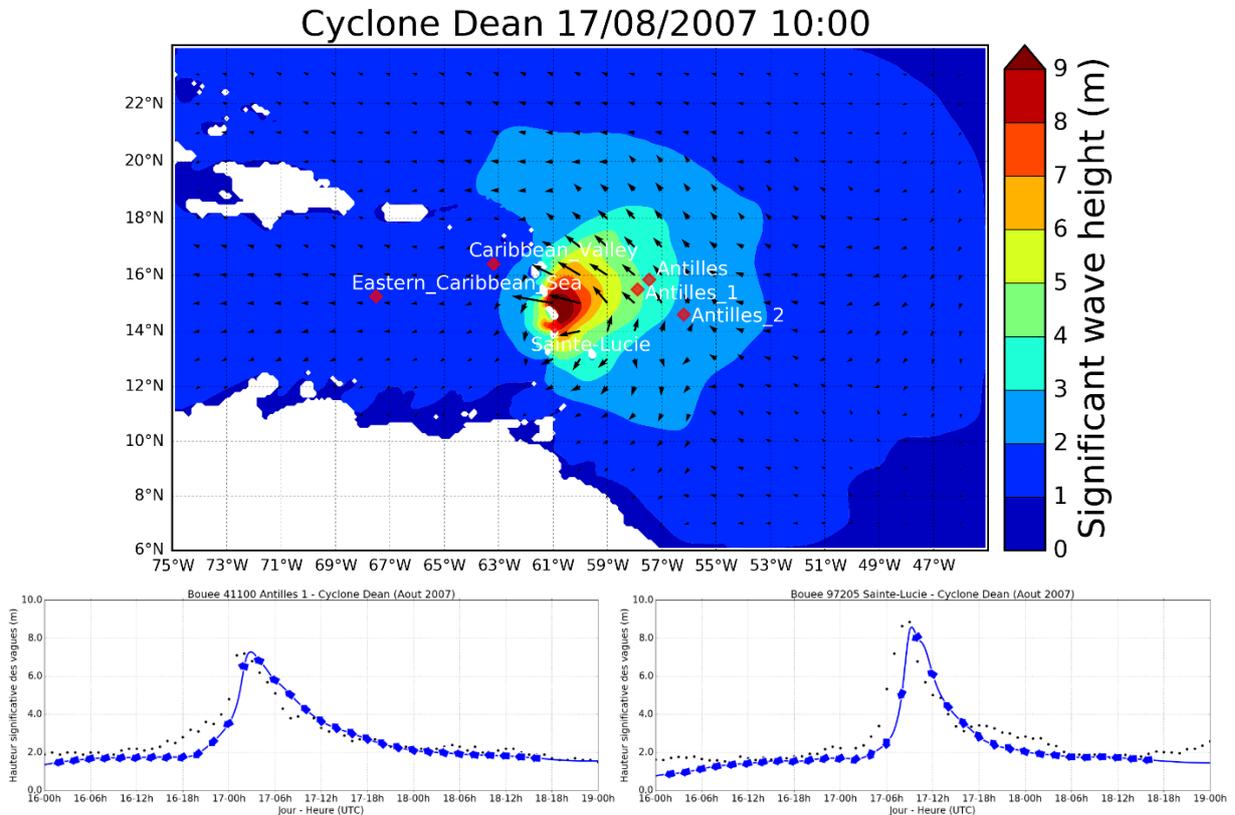


Figure 15. Haut : Hauteur significative et direction des vagues simulées pour le cyclone Dean. Bas : Comparaison des hauteurs simulées (bleu) et observées (noir) aux bouées Antilles 1 (gauche) et Sainte-Lucie (droite).

Cyclone Omar 16/10/2008 10:00

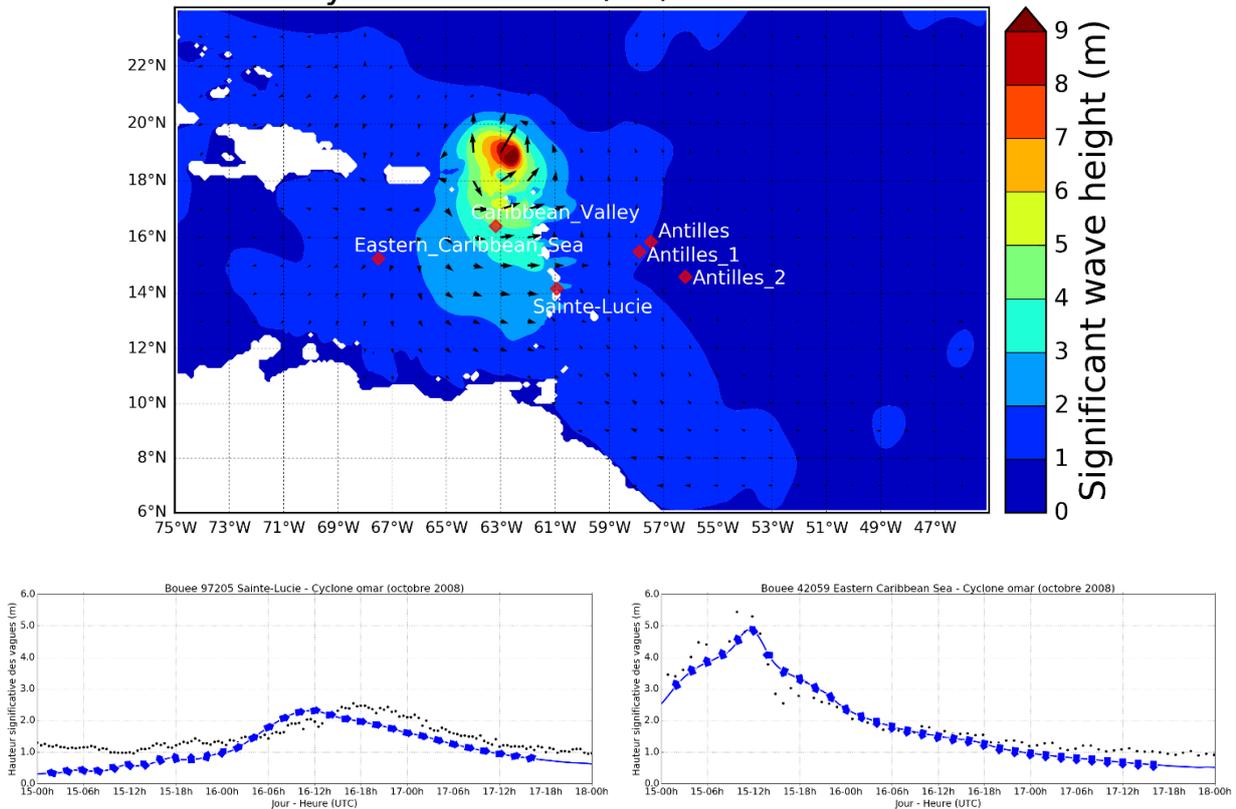


Figure 16. Haut : Hauteur significative et direction des vagues simulées pour le cyclone Omar. Bas : Comparaison des hauteurs simulées (bleu) et observées (noir) aux bouées Sainte-Lucie (gauche) et Eastern Caribbean Sea (droite)

Courants, température, salinité

Pour forcer les paramètres de température, salinité et de courant aux bords de la grille de calcul (permettant de prendre en compte les effets de circulations à plus grand échelle), plusieurs bases de données sont disponibles : (1) le modèle global GOFs (basé sur le code de calcul HYCOM (Bleck et al., 2002) avec assimilation de données basée sur NCODA, pour plus de détails, voir <https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis>) ayant une résolution temporelle journalière et une résolution spatiale d'environ $1/12^\circ$; (2) le modèle régionale NCOM-AMSEAS (NOAA) de résolution temporelle tri-horaire et spatiale de $1/30^\circ$. Le modèle NCOM-AMSEAS est donc mieux résolu mais des comparaisons avec des bouées ARGO ainsi que des tests préliminaires de simulation dans la baie ont montré que NCOM-AMSEAS présente une salinité de surface sous-estimée de 1 à 2 PSU. Les données GOFs ont donc été privilégiées.

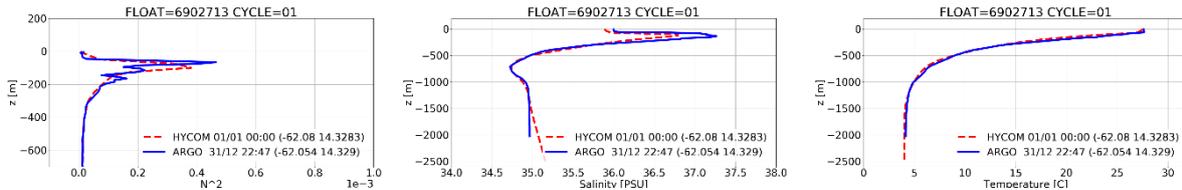
Les profils GOFs sont comparés avec les profils mesurés par le système de bouées flottant du projet ARGO (cf. 2.2.4). La Figure 17 montre la comparaison entre les données GOFs et les observations de la bouée n°6902713. Les paramètres comparés sont la température, la salinité et la fréquence de Brunt-Vaisala², nommée N , permettant de caractériser la stratification, c'est-à-dire la présence de masses d'eau aux propriétés différentes et qui ne se mélangent pas sur la

² Il s'agit de la fréquence à laquelle une parcelle de fluide oscille dans un milieu stratifié.

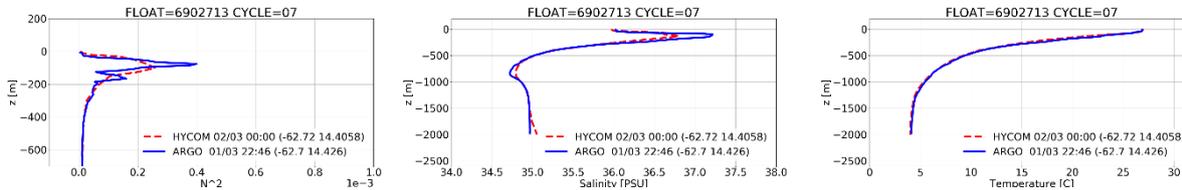
Elle est calculée: $N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz}}$, avec ρ_0 , la densité calculées à partir de la température et la salinité avec la loi d'état non-linéaire de Shchepetkin and McWilliams (2010).

colonne d'eau. Le pic de N^2 permet de distinguer la position de la thermocline définie comme la limite entre les eaux de surface, plus chaudes, et les eaux profondes, plus froides. Si GOFS représente bien le profil de température, le pic du profil de salinité est quant à lui légèrement moins marqué, ce qui explique une stratification un peu sous-estimée par GOFS sur presque tous les cycles d'immersion de la bouée. La Figure 17 permet également d'apprécier les variations annuelles importantes de la stratification. En hivernage (mois de juillet et septembre), la thermocline est très marquée et peu profonde (<100 m). En carême (mois de janvier et mars) on observe l'érosion progressive de la thermocline avec une démarcation moins nette et une profondeur plus importante (< 100 m). La sous-estimation de la stratification (température) par GOFS est donc particulièrement marquée en hivernage.

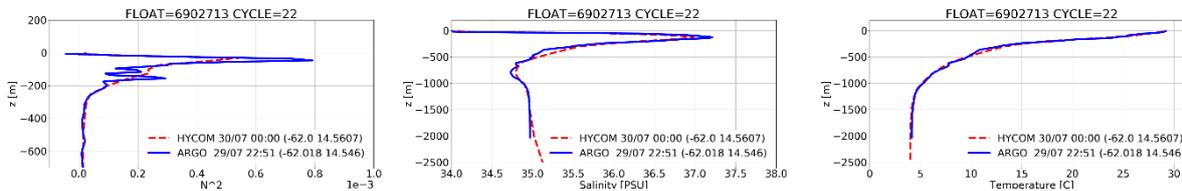
JANVIER



MARS



JUILLET



SEPTEMBRE

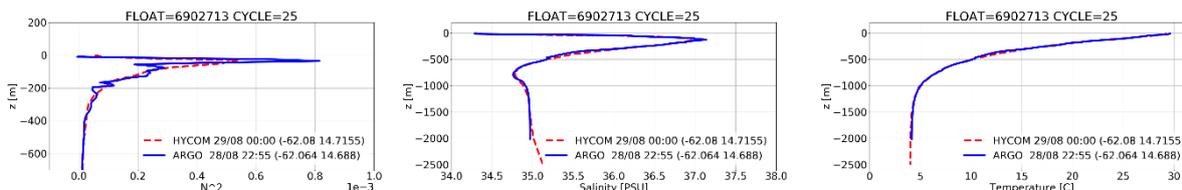


Figure 17 : Profils de température (gauche), salinité (centre) et N^2 (droit). Ligne bleue : mesure ARGO. Ligne rouge : HYCOM.

Marée et niveau marin

La marée n'étant pas prise en compte dans les niveaux d'eau issus de GOFS, le signal de la marée issue du modèle global TPXO7.2 (Egbert and Erofeeva, 2002) est rajouté au niveau d'eau fourni par GOFS. Le signal de marée est recomposé avec une série de Fourier classique à l'aide de la boîte à outil CROCOTOOLS (cf. équation 3, Penven et al., 2008) :

$$\zeta(x_\partial, t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (3)$$

Avec x_∂ , la position du point, A_n et ϕ_n , les coefficients d'amplitude et de phase.

La série est tronquée à N=10 harmoniques (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm) et A_n et ϕ_n modifiés pour prendre en compte les corrections nodales. La précision du modèle CROCO en

matière de reproduction des niveaux d'eau est évaluée en comparant, sur l'année 2014, le niveau d'eau simulé par le modèle forcé par le signal de marée seule et la marée prédite au marégraphe de Fort-de-France par SHOMAR. Sur la Figure 18, la marée simulée (pointillés violets) et la marée prédite (trait plein noir) sont comparées à la marée TPXO7.2 (trait plein rouge) recomposée au point de la grille le plus proche du marégraphe. Le signal du modèle CROCO est en phase avec les observations et les données de forçage TPXO7.2 malgré un marnage légèrement amplifié (entre 5-10 cm). Sur la Figure 19, la validation du niveau d'eau total de la simulation CROCO (avec marée, forçage météo et conditions aux limites) est effectuée par comparaison aux mesures réalisées au Point 1 pendant la campagne Hydrosedmar de carême. La légère amplification du marnage reste visible certains jours mais les variations du niveau d'eau sont globalement bien reproduites.

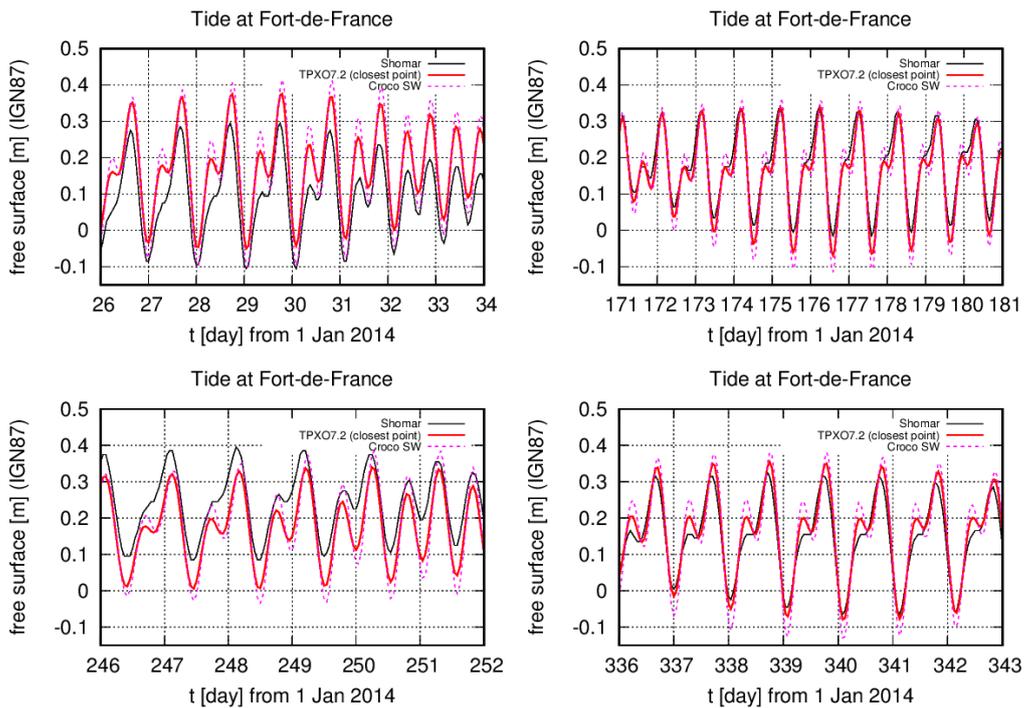


Figure 18. Comparaison du niveau de la marée en 2014 au marégraphe de Fort-de France (1) marée prédite à partir d'observations (2) marée calculée avec TPXO7.2 au point le plus proche (3) marée simulée avec CROCO.

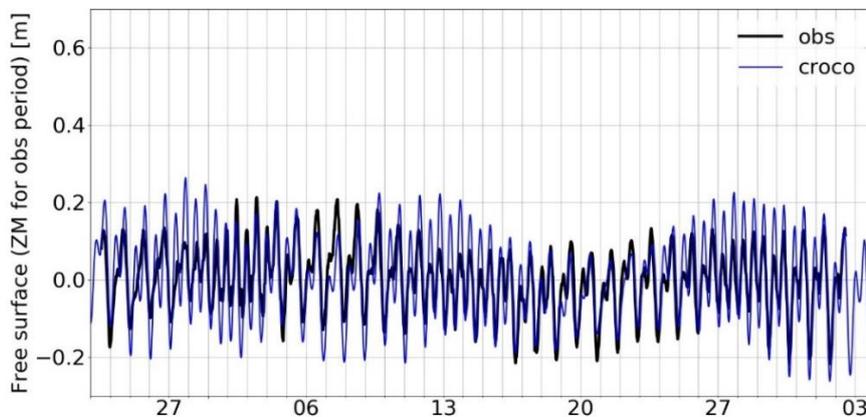


Figure 19. Comparaison des niveaux d'eau mesurés lors de la campagne de carême HYDROSEDMAR et modélisés avec le modèle CROCO au Point 1 (Chenal principal – cf. Figure 6) au mois de mars 2017.

Débits des principales rivières

Afin de prendre en compte les apports hydriques des principales rivières débouchant dans la baie de Fort-de-France, des données de [Lanini et al. \(2019\)](#) ont été utilisées. Il s'agit de données d'une modélisation de type réservoirs mise en œuvre pour estimer les volumes d'eau disponibles dans les cours d'eau et les aquifères de Martinique et reposant en grande partie sur une méthodologie développée par le BRGM ([Vittecoq et al., 2007](#)). La Martinique a été découpée en 69 unités de gestion cohérentes, définies d'une part à partir des bassins versants topographiques des cours d'eau, et d'autre part des données disponibles concernant les prélèvements ou les mesures de débits (cf. Figure 20). Les flux de ruissellement et d'infiltration calculés en utilisant les données journalières de pluie et d'ETP sur la période 1991 -2017 sur des mailles de 1 km² sont agrégés à l'échelle des unités de gestion. Ils constituent des entrées pour la seconde partie du modèle de réservoirs qui calcule les débits journaliers à l'exutoire de chaque unité de gestion, ainsi que le niveau piézométrique (supposé uniforme) dans chaque unité. Les modélisations ont été calées sur des observations de débits (disponibles pour 21 unités de gestion) et de niveaux piézométriques (disponibles pour 13 unités de gestion). Dans le cadre de cette étude, 5 bassins versants ont été utilisés pour calculer les débits journaliers des principales rivières se jetant dans la baie : Rivière Monsieur, Rivière Madame, La Lézarde, Rivière Salée (cf. Tableau 3). Parmi les bassins dont l'exutoire se situe autour de la baie de Fort-de-France, seuls les bassins 34 et 55 sont instrumentés en mesure de débit. Sur la période 2012-2017, la RMSE normalisée³ est de 7.2% pour le bassin 34 et de 5% pour le 55.

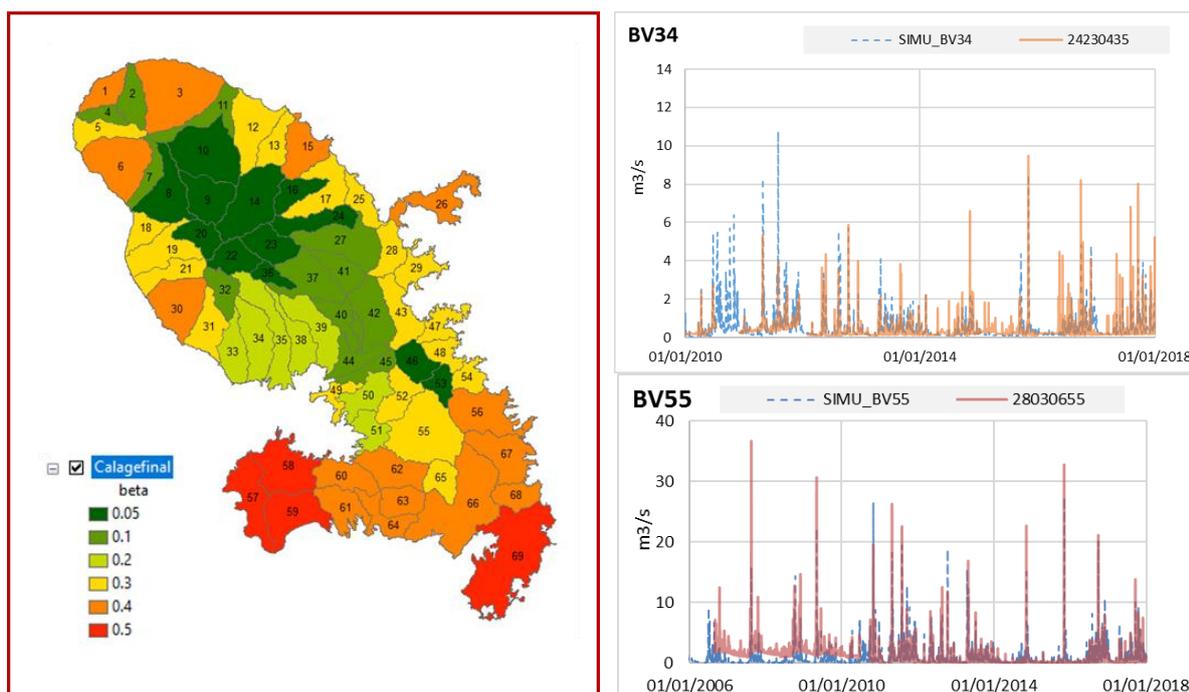


Figure 20. Les 69 unités de gestion du modèle BRGM de type réservoir. Comparaison des débits calculés et observés aux exutoires des bassins versants n°34 et n° 55.

Tableau 3. Sélection des bassins versants pour le calcul du débit à l'embouchure des principales rivières.

Embouchure	Rivière Madame	Rivière Monsieur	La Lézarde	Rivière Salée
Bassin versant	34	35	44	55+62

³ RMSE : Root Mean Square Error : racine carrée de la moyenne des écarts (entre observation et simulation) au carré. Normalisée par la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale des observations sur la période.

2.3.4. Synthèse

Le tableau suivant résume les données utilisées par les modèles WW3 et CROCO :

Tableau 4. Synthèse des données utilisées par WW3 (vagues) et CROCO (courants 3D, température et salinité)

DONNEES	WW3	CROCO
Bathymétrie	X	X
Données météorologiques sur 2017 (CFS-V2 + station du Lamentin)	X	X
Vents cycloniques paramétriques pour les cyclones Dean et Omar	X	
Spectres de vagues IOWAGA du modèle Global	X	
Données océanographiques (température, salinité, courant, niveau marin) issues de GOFS		X
Signal de marée TPXO7.2		X
Débit des rivières issus du modèle de Lanini et al. (2019)		X

3. Validation des simulations annuelles dans la baie

3.1. VAGUES

3.1.1. Périodes de carême et hivernage (hors cyclone)

La comparaison des simulations aux cinq points de mesure NORTEKMED (cf. Figure 6) pour les campagnes de carême et d'hivernage est présentée ci-dessous (Figure 21 à Figure 25).

Pour des états de mer aussi peu énergétiques que ceux rencontrés dans la baie de Fort-de-France, la comparaison entre modélisations et observations est délicate du fait de la limite :

- ✓ des modèles à simuler correctement les vagues très courtes de type clapot ayant une période de quelques secondes. Dans cette étude, le modèle WW3 est configuré pour calculer le spectre d'énergie des vagues pour des périodes allant de 0.95 s à 28 s de manière homogène sur le domaine de calcul (quelque-soit la profondeur) ;
- ✓ de la mesure instrumentale du clapot et de la mer du vent pour des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres, notamment en ce qui concerne le spectre directionnel. Les AWAC mesurent, par exemple, le spectre d'énergie des vagues sur les gammes de période variables en fonction de la profondeur d'immersion de l'instrument indiquées Tableau 5. Les périodes de coupure pour le spectre unidirectionnel (servant au calcul de H_s et T_p) sont assez similaires à celle de WW3 (entre 0.9 s et 1.2 s). En revanche, les périodes de coupure pour le spectre directionnel (servant au calcul de D_p) se situent entre 3 s et 4 s. Les spectres directionnels des AWAC ne représentent donc pas les mers de vent les plus courtes et le clapot qui sont fortement présents sur notre site d'étude.

En conséquence, dans la suite du rapport, les hauteurs significatives et les périodes pic mesurées et simulées sont comparées directement. En revanche, les directions sont comparées par le tracé des spectres directionnels et non par l'intermédiaire des paramètres pic ou des roses directionnelles. A noter que le spectre directionnel mesurés avec les AWAC ne représente pas l'intégralité de la mer de vent ou le clapot en provenance de l'Est, donc seules les directions de provenance des houles rentrantes dans la baie peuvent être comparées.

Tableau 5. Extrait du rapport Vincent, 2017a. Période de coupure des AWAC en fonction de la profondeur.

Profondeur (m)	Période de coupure pour H_{m0}	Période de coupure pour Dir
5	0.5 s	1.5 s
20	0.9 s	3.1 s
60	1.5 s	4.2 s
100	2 s	5.0 s

A l'entrée de la baie :

- ✓ La comparaison des hauteurs significatives simulées avec les observations au Point 5 (au sud du banc du Gros ilet, Figure 22) est très correcte avec un biais inférieur à 5 cm pour des valeurs entre 20 cm et 60 cm. Les modulations liées aux variations des conditions météorologiques sont également fidèlement reproduites (surtout visibles sur la campagne de carême pendant laquelle les conditions météorologiques ont été plus intenses et variables). Les périodes pic les plus représentées sont de l'ordre de 2 s dans les deux jeux de données.

Les spectres directionnels indiquent également une répartition des périodes et directions comparable concernant les houles rentrantes (entre 10 s et 15 s - provenant majoritairement du Nord-Ouest).

- ✓ Sur le Point 1 en revanche (Chenal principal, Figure 21) les hauteurs significatives simulées sont inférieures à celles observées (40-60 cm) avec un biais d'environ 20 cm sur les deux campagnes. La visualisation des spectres directionnels indique que les mesures sur ce point sont très bruitées, ce qui peut fausser le calcul de la hauteur significative qui montre une forte sensibilité à la fréquence de coupure utilisée. La grande profondeur du point de mesure (50 m) est une possible explication. Les périodes pic sont quant à elles très comparables (~2 s). Sur les spectres, les houles du large sont comparables (environ 10 s – de provenance Ouest-Nord-Ouest ou Ouest-Sud-Ouest).

Au centre de la baie sur le Point 2 (Figure 23), les hauteurs significatives sont également bien reproduites par le modèle avec une représentation fidèle des variations liées aux conditions météorologiques (surtout visible sur la campagne de carême pendant laquelle les conditions météorologiques ont été plus intenses et variables) et aux cycles jour/nuit. Un léger biais d'environ 5 cm est constaté sur les deux campagnes pour des hauteurs significatives variant de 20 cm à 40 cm. Concernant les périodes, dans les observations comme dans les simulations, la période pic majoritaire est d'environ 2 s pendant la campagne de carême. Pendant la campagne d'hivernage, les périodes pic issues des mesures sont très bruitées et difficilement comparables aux simulations.

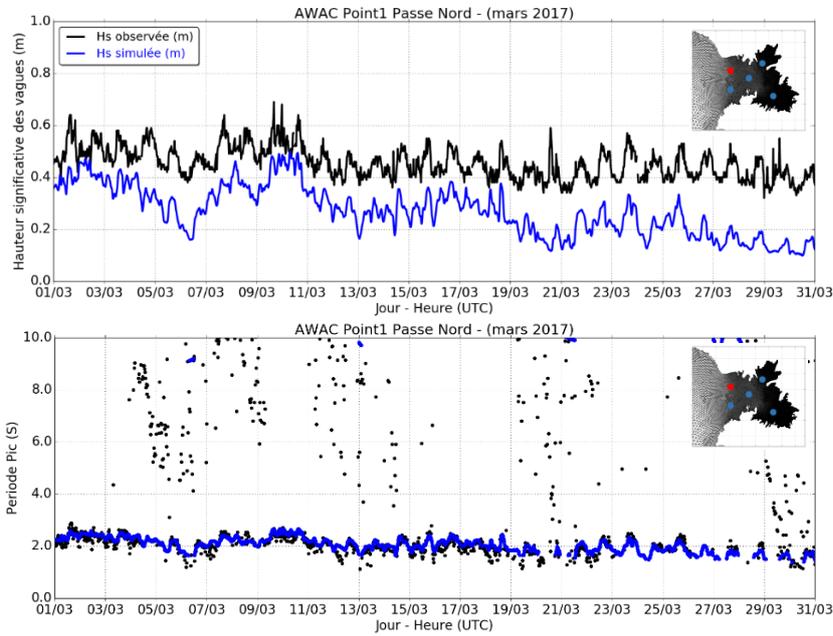
En fond de baie :

- ✓ Sur le Point 3 (cf. Figure 24), les observations sur la période de carême ne semblent pas exploitables car les mesures semblent suggérer que les mers de vent n'ont pas été correctement enregistrées. En effet, les hauteurs significatives ne dépassent pas les 10 cm, sans modulation journalière, et les périodes pic calculées sont toutes au-dessus de 2 s. Sur la période d'hivernage, observations et simulations montrent toutes deux des cycles jour-nuit marqués avec des hauteurs significatives du clapot entre 10 cm et 20 cm et des périodes pic d'environ 1 s à 2 s.
- ✓ Dans la baie de Génipa au Point 4 (Figure 25), les simulations reproduisent très fidèlement les paramètres mesurés par l'AWAC. Il s'agit principalement du clapot (période pic < 2 s), presque nul la nuit et atteignant une dizaine de centimètres en journée. A noter que dans cette partie de la baie, les houles longues ne se propagent quasiment pas.

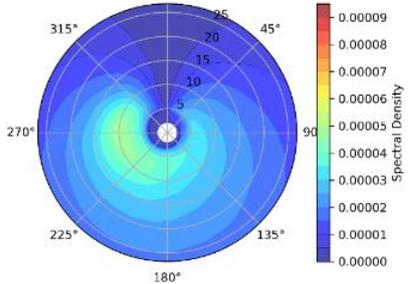
Remarque :

En cas d'utilisation des observations, il faut garder à l'esprit que les directions pic étant calculées à partir du spectre directionnel (ne représentant pas les mers de vent et le clapot à cause de la période de coupure plus haute), celles-ci vont indiquer quasi-systématiquement la direction des houles venant du large et se propageant dans la baie (c.a.d. de provenance WNW ou WSW) même si la composante la plus énergétique du spectre reste la mer de vent comme indiqué dans les simulations.

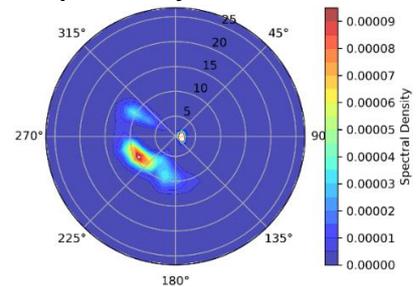
POINT 1 – CHENAL NORD - CAREME (du 1^{er} au 31 mars 2017)



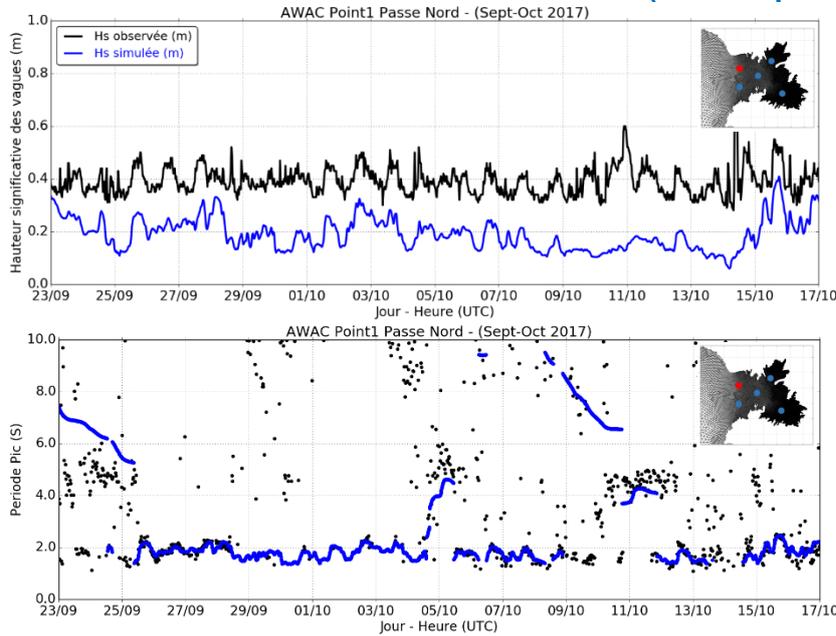
Spectre moyen observé



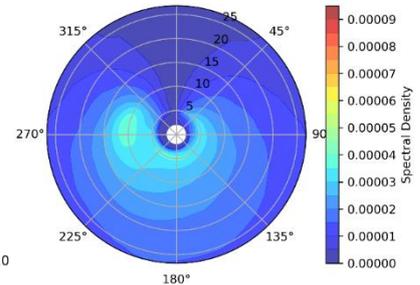
Spectre moyen simulé



POINT 1 – CHENAL NORD - HIVERNAGE (du 23 septembre du 17 octobre 2017)



Spectre moyen observé



Spectre moyen simulé

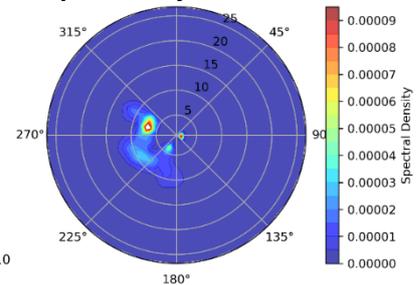
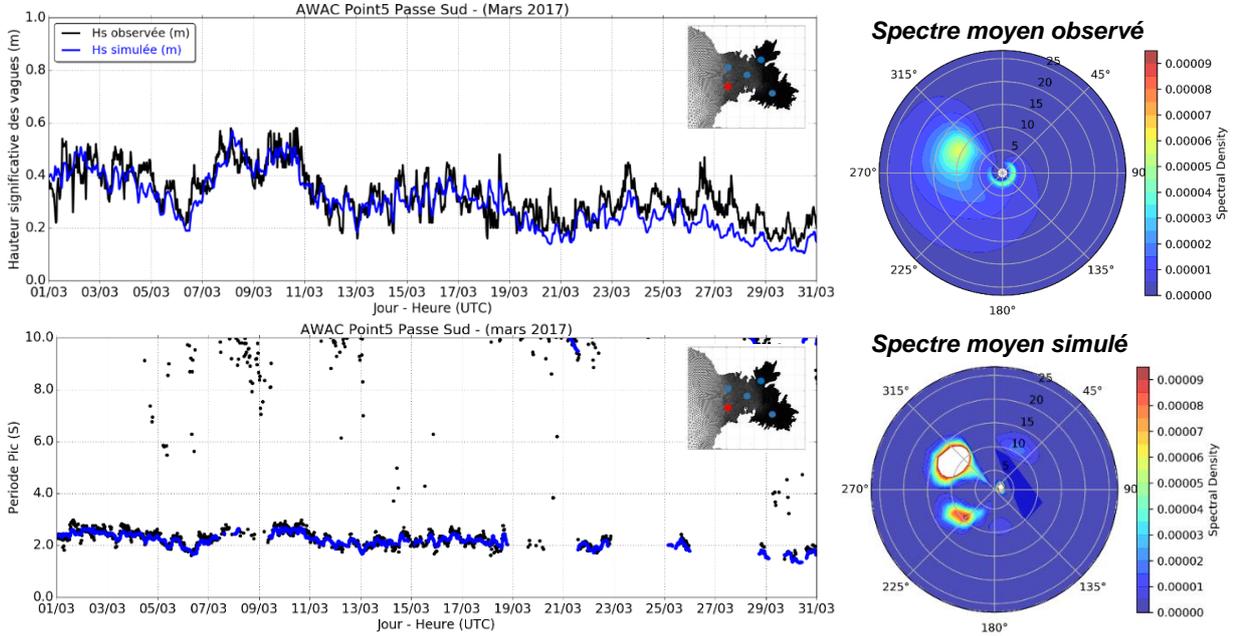


Figure 21. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone Maria) pour le Point 1 (Chenal principal – 50 m de fond).

POINT 5 – CHENAL SUD - CAREME (du 1^{er} au 31 mars 2017)



POINT 5 – CHENAL SUD - HIVERNAGE (du 23 septembre du 17 octobre 2017)

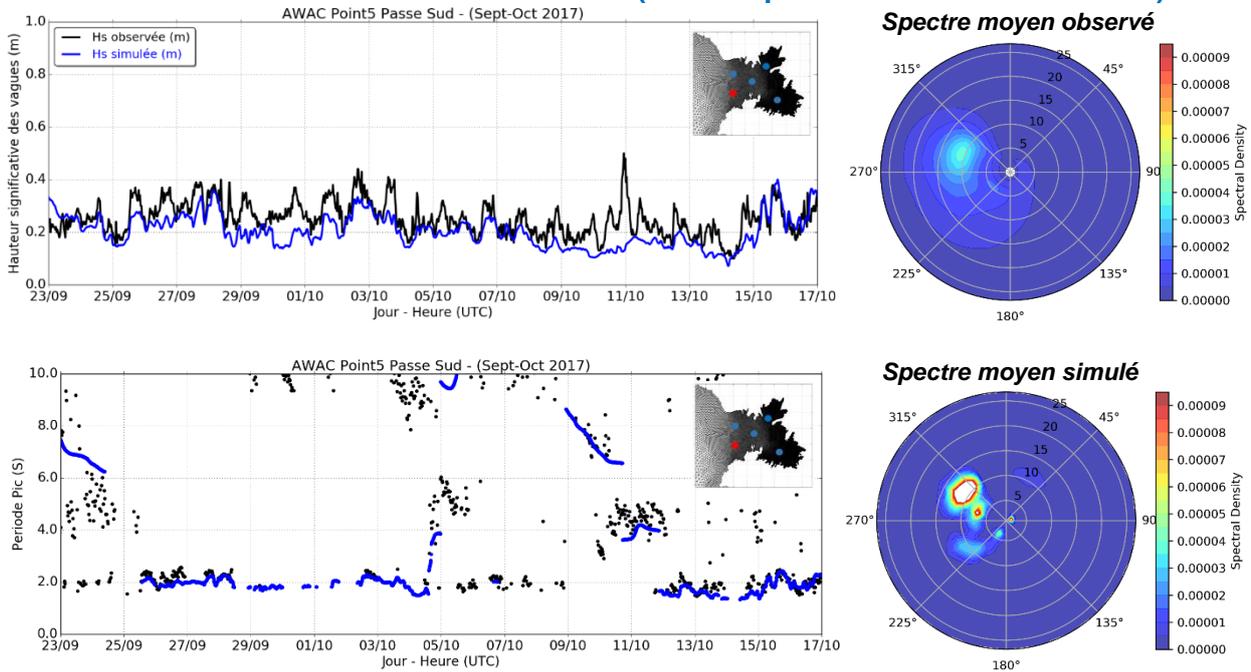


Figure 22. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone Maria) pour le Point 5 (Au sud du banc du Gros Ilet – 15 m de fond).

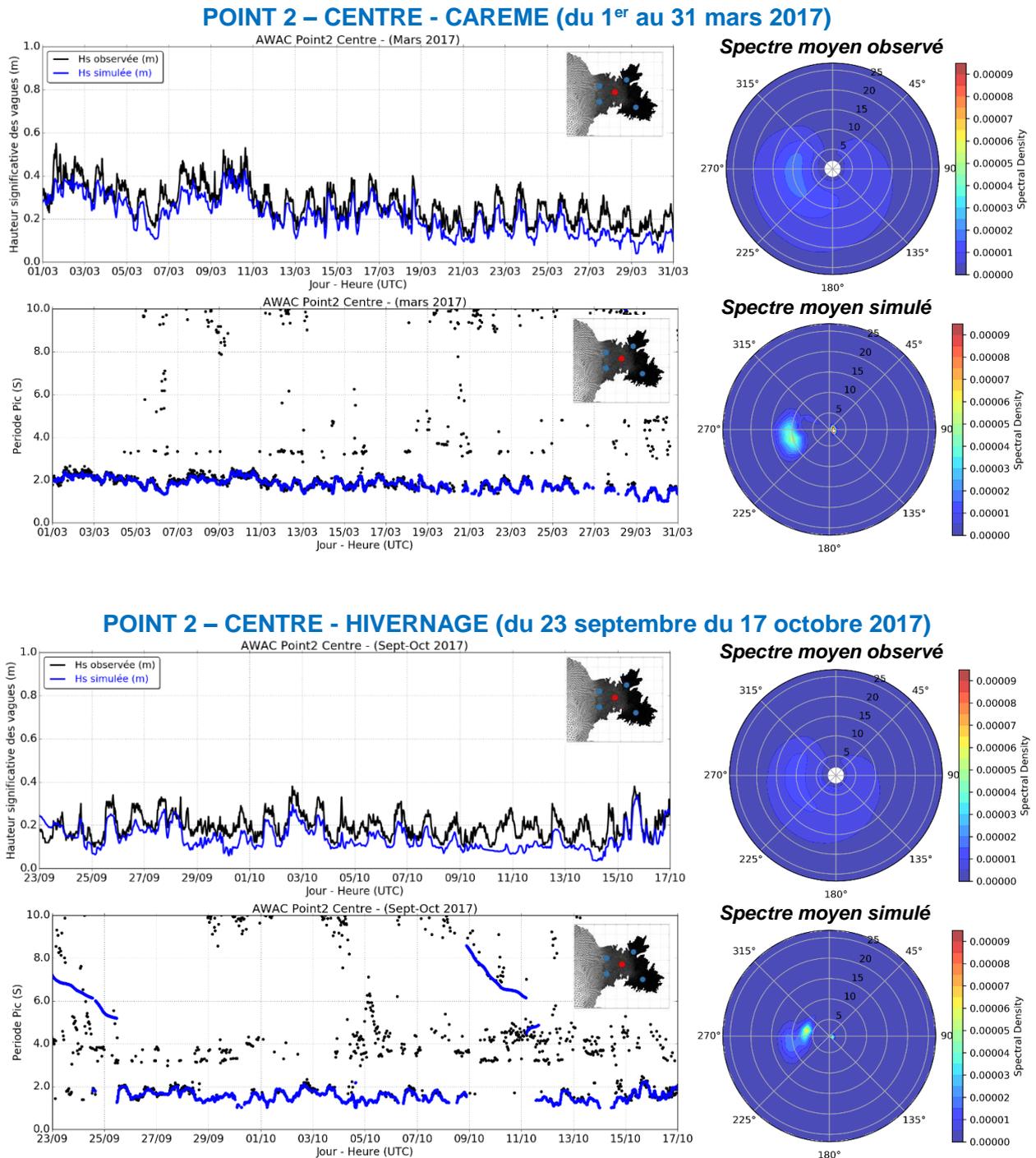
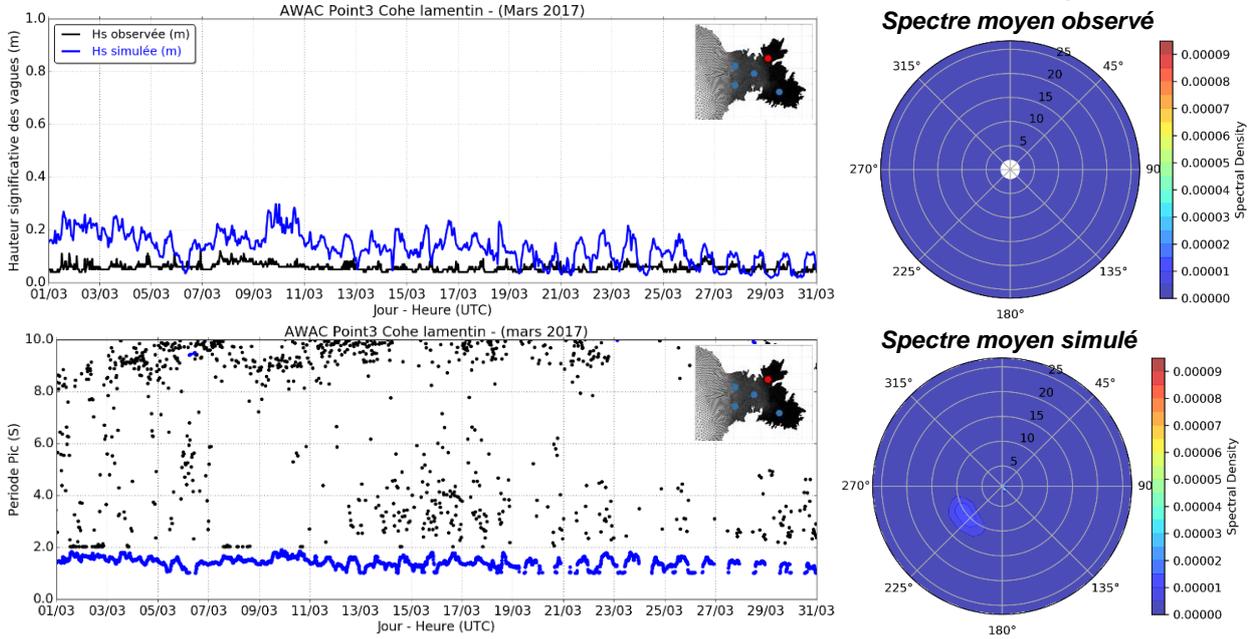


Figure 23. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone Maria) pour le Point 2 (Centre de la baie – 30 m de fond).

POINT 3 – COHE LAMENTIN - CAREME (du 1^{er} au 31 mars 2017)



POINT 3 – COHE LAMENTIN - HIVERNAGE (du 23 septembre du 17 octobre 2017)

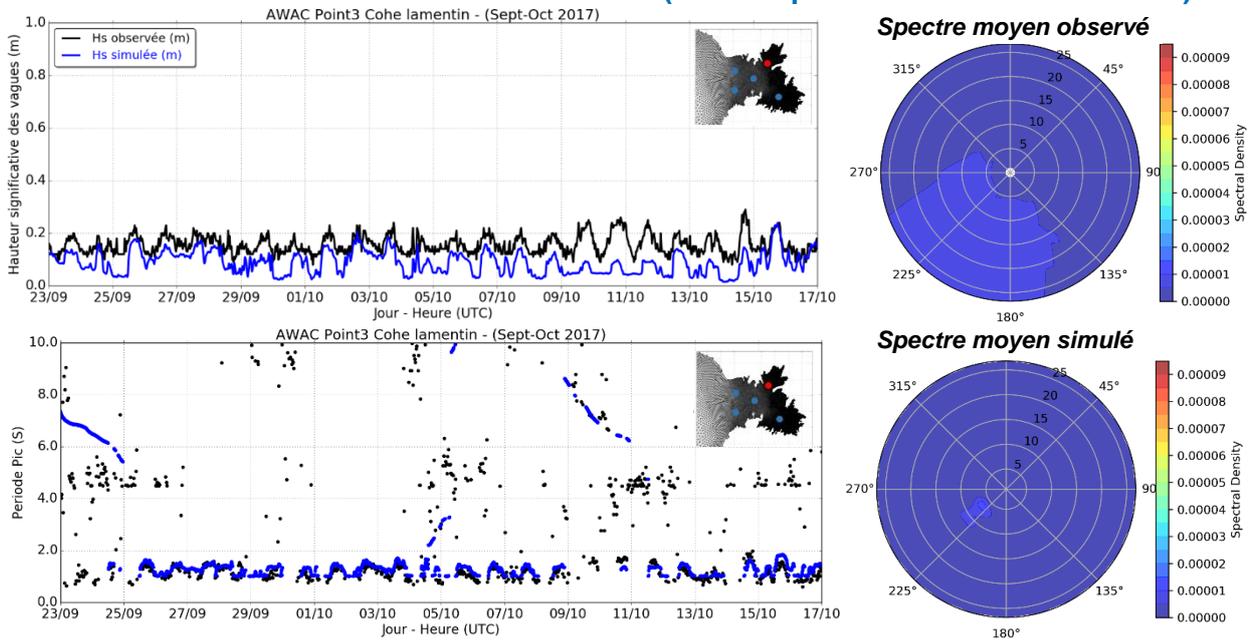


Figure 24. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone maria) pour le Point 3 (Cohé du lamentin – 14 m de fond).

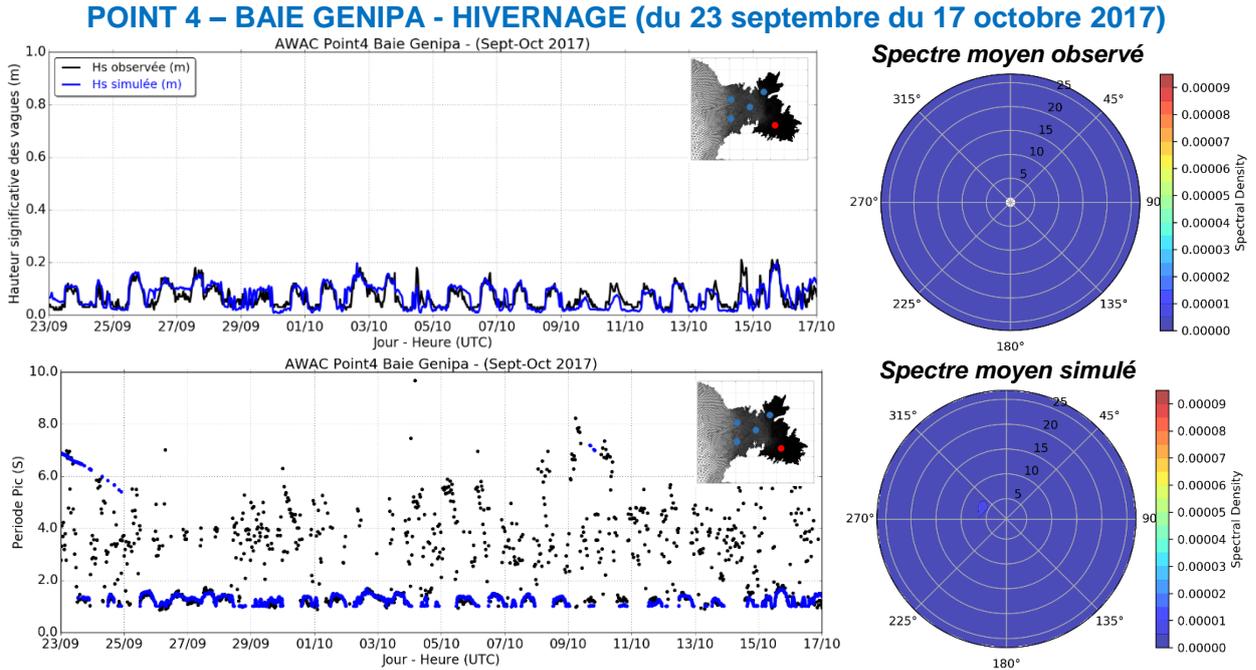


Figure 25. Comparaison des simulations WW3 aux observations NORTEKMED sur les campagnes de carême et hivernage (hors cyclone maria) pour le Point 4 (Baie de Génipa – 18 m de fond).

3.1.2. Simulation pour le cyclone Maria

Le passage du cyclone Maria à proximité de la Martinique pendant la campagne d’hivernage permet d’évaluer la performance du modèle à l’intérieur de la baie en conditions cycloniques. La Figure 26 présente la comparaison des hauteurs significatives, des directions pic et des périodes pic mesurées et simulées sur 2 des 5 points de mesure. Le modèle surestime la hauteur significative maximum des vagues environ de 50 cm à 1 m à l’entrée de la baie mais reproduit bien la propagation et l’atténuation de la houle dans la baie avec des hauteurs significatives au pic de l’évènement de l’ordre de 3 m à l’entrée de la baie et de 1 m sur les points de mesure en fond de baie. L’évolution des périodes pic est fidèle aux observations avec des valeurs de 6 s au pic de l’évènement et jusqu’à 10 s après le passage de l’œil sur l’arc Antillais.

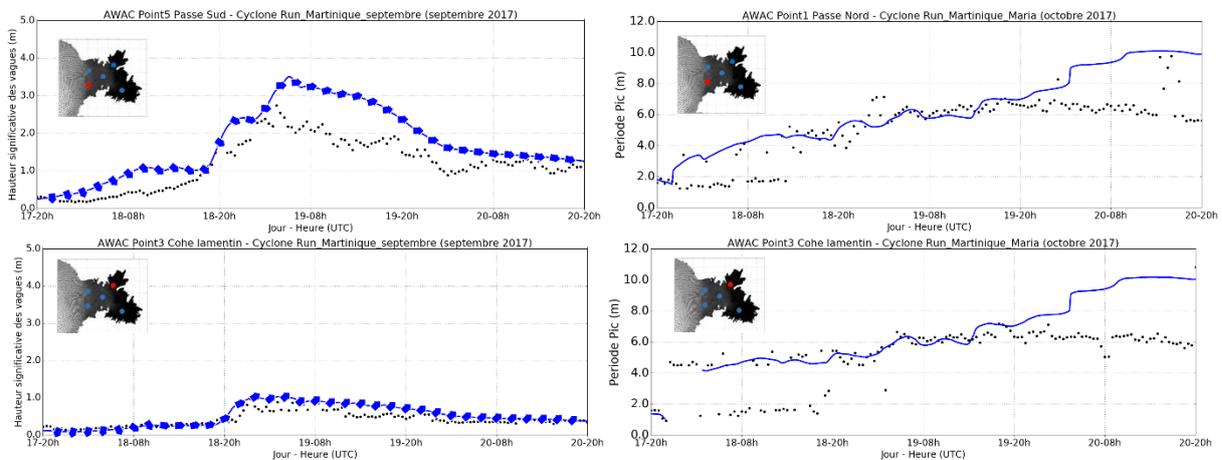


Figure 26. Comparaison des simulations et observations pendant le cyclone Maria. Droite : hauteurs significatives et des directions simulées (bleu) et observées (noir). Droite : périodes pic simulées (bleu) et observées (noir).

3.1.3. Synthèse

Les modélisations réalisées sont en bon accord avec les observations malgré une comparaison délicate du fait des limites instrumentales pour mesurer des conditions d'agitation aussi faibles. Les modulations journalières du clapot liées à la brise de terre ainsi que l'atténuation des houles rentrantes dans la baie (en conditions normales et cycloniques) sont correctement représentées sur les cinq points instrumentés dans le projet. On notera la bonne reproduction de l'évolution temporelle des hauteurs significatives des vagues pour le cyclone Maria avec toutefois une légère surestimation à l'entrée de la baie.

3.2. COURANTOLOGIE 3D

Remarques :

Dans ce paragraphe, la vitesse et la direction du courant sur les points de mesures sont présentées sous forme de graphes permettant de visualiser l'intensité ou la direction des courants (couleurs) le long de la colonne d'eau (axe vertical) et en fonction du temps (axe des abscisses). La zone blanche des mesures (limite de capacité des appareils) est signalée avec une ligne blanche pointillée. La convention utilisée pour la direction est la direction de propagation par rapport à l'axe Nord et dans le sens horaire. Une direction de 270° indique un courant vers l'ouest (sortant de la baie) et une direction de 90° indique un courant vers l'Est (rentrant dans la baie).

Les simulations de température et salinité sont comparées aux séries temporelles mesurées au fond. A l'instant qui coïncide avec la pose et la récupération des instruments, la comparaison est également effectuée sur des profils verticaux instantanés. Enfin, pour l'hivernage des profils de température/salinité continues dans le temps sont aussi disponibles.

3.2.1. Périodes de carême et hivernage (hors cyclone)

Entrée de la baie : points 1 (chenal principal) et 5 (sud du banc Gros Ilet)

Au niveau du chenal principal (Point 1), le modèle reproduit bien les courants qui sont différenciés en fonction de la profondeur (cf. Figure 27) :

- ✓ En surface, le courant est toujours sortant sous l'effet du vent qui souffle vers l'ouest avec une vitesse de l'ordre de 10 à 20 cm.s⁻¹. A cause de la zone blanche des mesures, la comparaison n'est pas complète, mais on distingue la composante sortante du courant à la limite de la zone blanche.
- ✓ Au milieu de la colonne d'eau (entre 10 et 30 m de fond), simulations et observations montrent toutes deux des courants majoritairement rentrants, dirigés vers l'ESE selon l'orientation du chenal, et dont les vitesses n'excèdent pas les 25 cm.s⁻¹.
- ✓ Plus au fond, le mode de circulation des courants est beaucoup plus variable :
 - Sur la période de carême, observations et simulations sont très comparables et montrent deux régimes différents : en début et au milieu de période, le courant est sortant de manière quasi continue alors qu'en milieu de période, il est rentrant de manière quasi continue dans la baie à des vitesses de l'ordre de 10 à 25 cm.s⁻¹.
 - Sur la période d'hivernage, les mesures montrent une alternance très régulière entre des directions entrantes et sortantes à la fréquence de la marée (harmonique semi-diurne M2) avec des vitesses maximales d'environ 60 cm.s⁻¹ au jusant en période de

vives eaux. Si la simulation montre également cette alternance des directions, les vitesses sont sous-estimées par le modèle et ne dépassent pas les 25 cm.s⁻¹.

Concernant la température et la salinité, le modèle reproduit bien les séries temporelles mesurées au fond (cf. Figure 28) pour la période de carême ainsi que les profils verticaux réalisés à la pose et la dépose des campagnes (cf. Figure 60, Annexe 1). Sur cette période, la température de l'eau apparaît relativement homogène sur la colonne d'eau (entre 26° et 27°) et la salinité présente une légère stratification (~35,5 PSU en surface et ~36 PSU au fond). Sur la période d'hivernage, modèle et observations présentent tous deux une stratification bien plus importante (de l'ordre de 3°C et 3 PSU entre surface et fond). En revanche, le modèle montre un léger biais par rapport à la mesure, de +1° à +2° pour les températures et jusqu'à -1 PSU pour la salinité au fond. La Figure 28: Température (gauche) et salinité (droite) au fond au Point 1. Bleu : CROCO. Noir : mesures de [Vincent et al. \(2017a et 2017b\)](#) Figure 28 montre quand même la bonne reproduction verticale et temporelle des conditions thermo halines par le modèle sur la période d'hivernage et suggère des oscillations de température et salinité ($\Delta T = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta S = 1\text{ PSU}$) en phase avec les moments d'inversion du courant au fond.

Le phénomène d'alternance de courants rentrant/sortants observés au Point 1 au fond pendant la campagne d'hivernage évoque la présence d'ondes internes (cf. paragraphe 1.3 et tests au paragraphe 4.2.3) rentrant dans la baie quand la stratification de l'océan est importante, comme suggéré par [Gervais \(2014\)](#). Le modèle capte ce phénomène mais sous-estime l'intensité des courants associés. Cette sous-estimation peut être attribuée à plusieurs facteurs : (1) la résolution spatiale du modèle (2) la sous-estimation de la stratification dans les données GOFS qui sont imposées aux frontières du modèle CROCO (3) la présence d'ondes internes générées à l'extérieur de l'emprise de CROCO et qui ne sont pas représentées dans les données GOFS (qui ne prend pas en compte la marée). L'analyse bibliographique réalisée par [Idier et al. \(2014\)](#) tend à appuyer la dernière hypothèse.

Au sud du banc du Gros Ilet (Point 5), les différences entre simulations et observations sont plus importantes (Figure 30):

- ✓ En surface, le courant est toujours sortant sous l'effet du vent qui souffle vers l'ouest avec une vitesse de l'ordre de 10 à 20 cm.s⁻¹. A cause de la zone blanche des mesures, la comparaison n'est pas complète, mais on distingue la composante sortante du courant à la limite de la zone blanche.
- ✓ Sur le reste de la colonne d'eau, les observations indiquent un courant assez homogène, entre 10 et 25 cm.s⁻¹ et orienté majoritairement vers l'intérieur de la baie. Les simulations quant à elles indiquent une intensité des courants similaires mais une plus grande variabilité dans la direction (alternance entrant ou sortant). Cette différence peut être notamment attribuée au fait que l'épaisseur de la couche de surface est sous-estimée, phénomène particulièrement visible du 26/02 au 16/03.

La Figure 31 montre que sur ce point, la température et la salinité au fond restent relativement constantes sur toute la période de mesure (autour de 29°C et 34,5 PSU en carême de 27 °C et 36 PSU en hivernage). Notamment, les oscillations observées au Point 1 en période d'hivernage sont absentes.

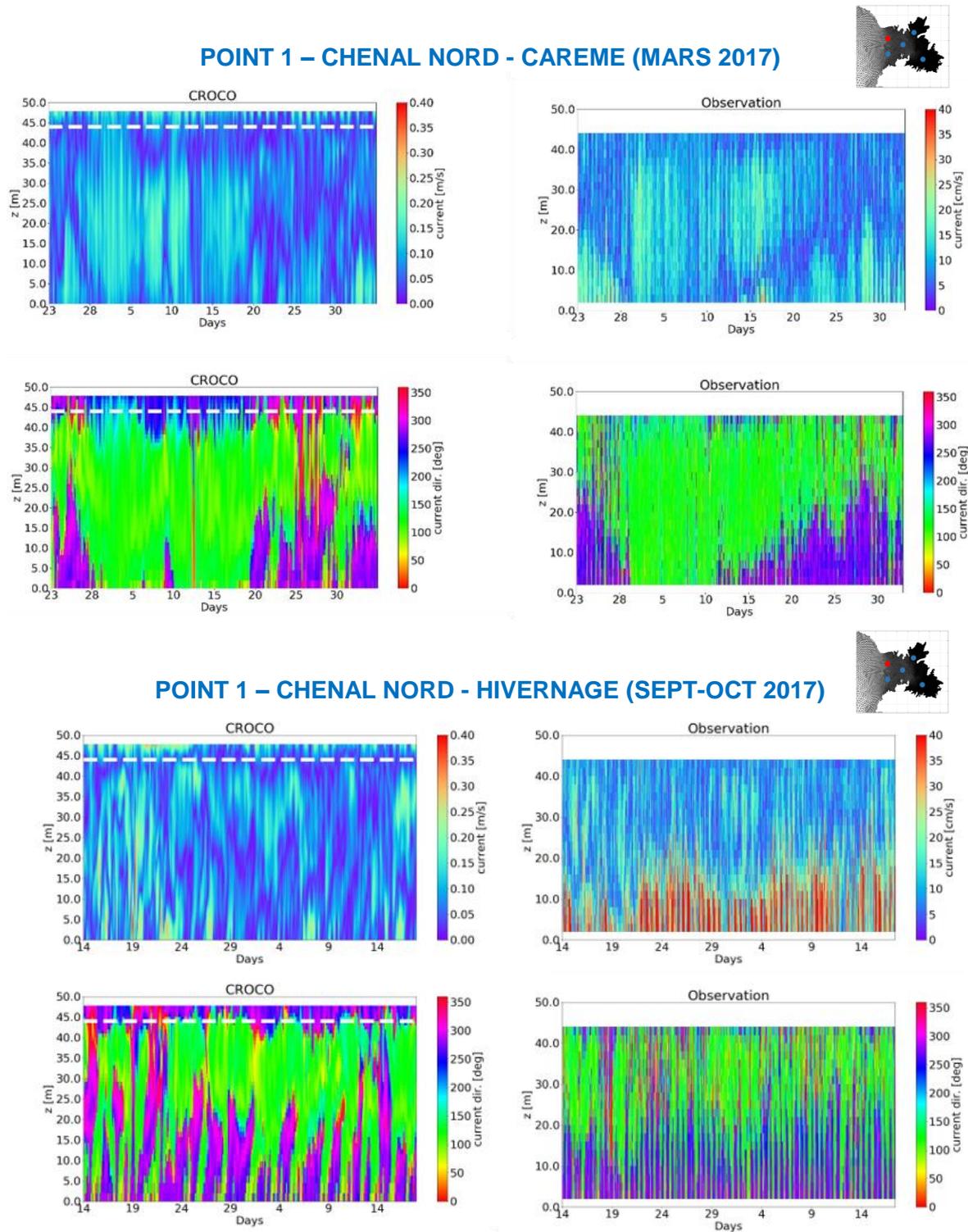
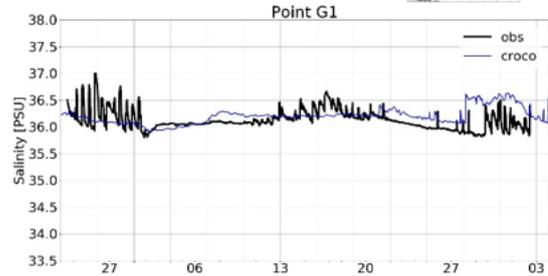
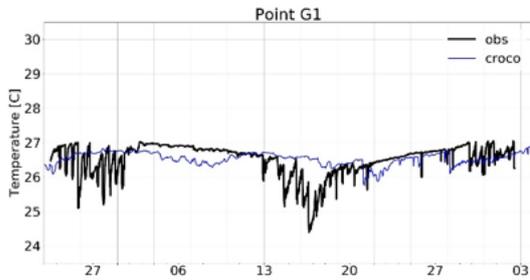
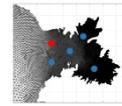


Figure 27 : Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 1. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

POINT 1 – CHENAL NORD - CAREME (MARS 2017)



POINT 1 – CHENAL NORD - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

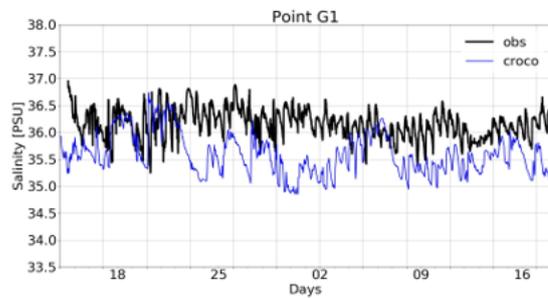
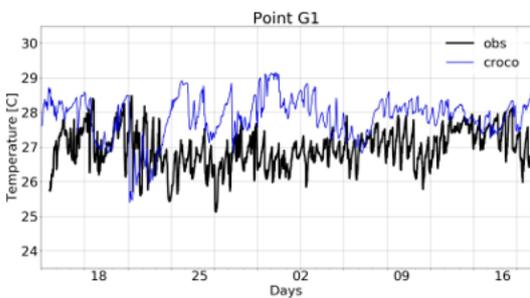
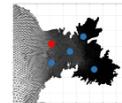


Figure 28: Température (gauche) et salinite (droite) au fond au Point 1. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

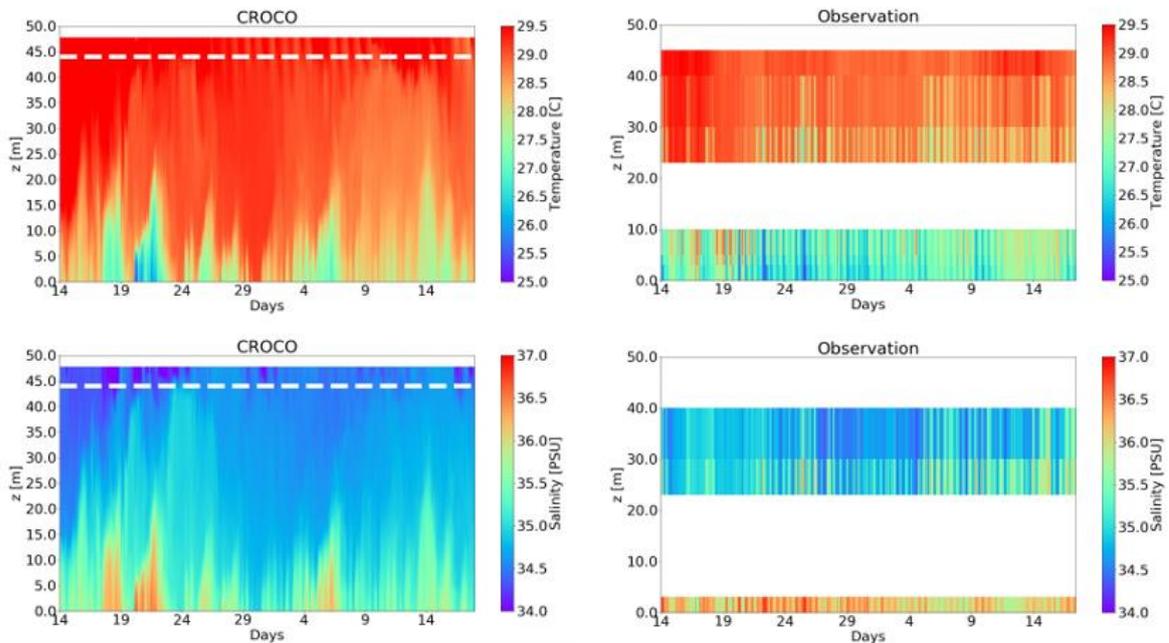
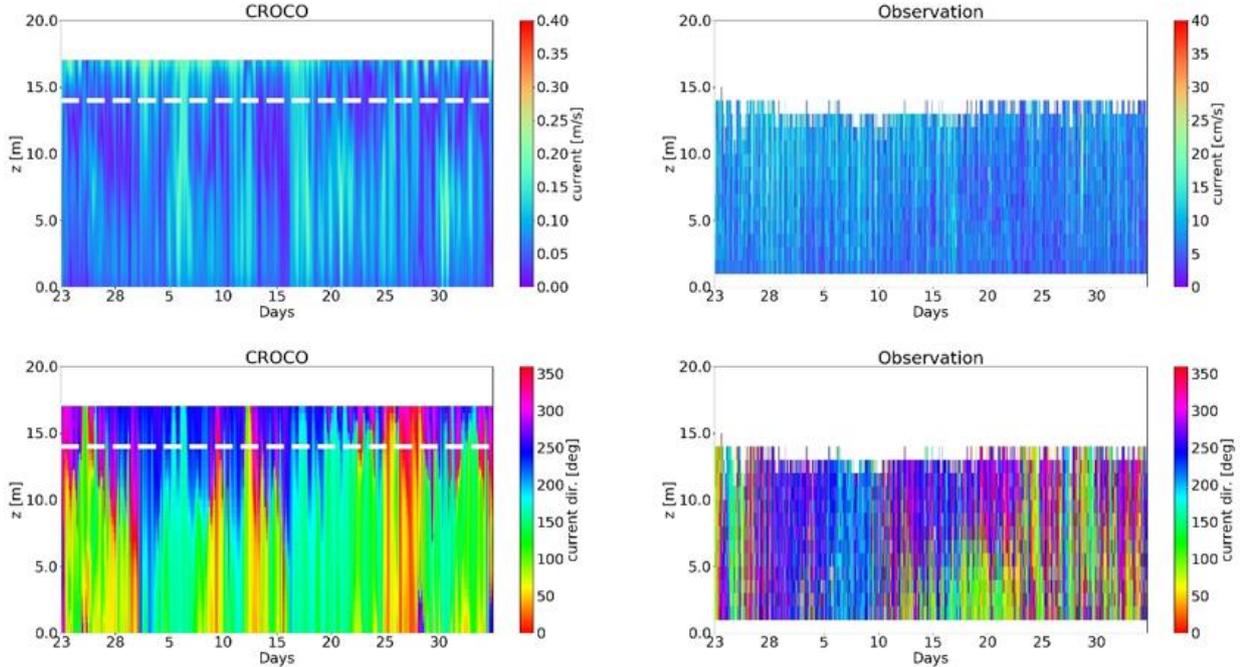
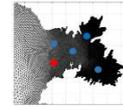


Figure 29: Profils 3D de température et salinité au Point 1 aux mois de septembre et octobre 2017. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017b). Remarque : les mesures CTD de température et salinité ont été réalisées sur lignes différentes de mouillage mais ici les deux profils sont condensés pour une comparaison plus claire.

POINT 5 – CHENAL SUD - CAREME (MARS 2017)



POINT 5 – CHENAL SUD - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

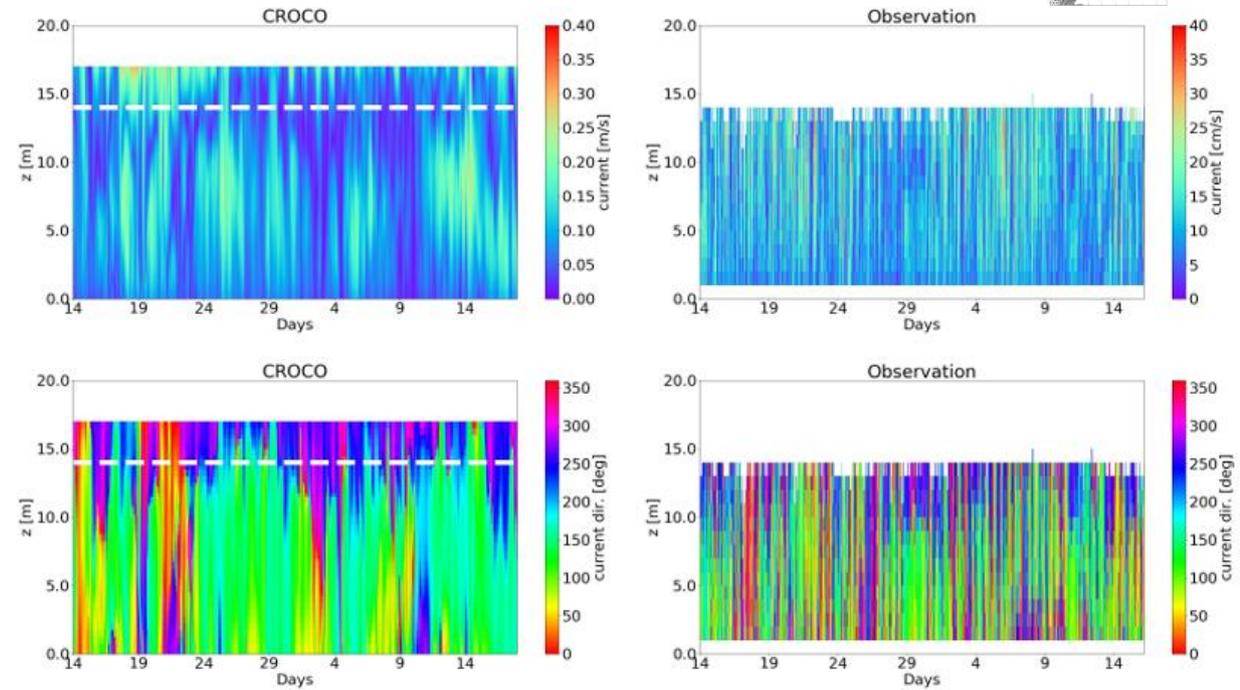
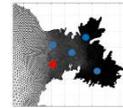


Figure 30: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 5. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

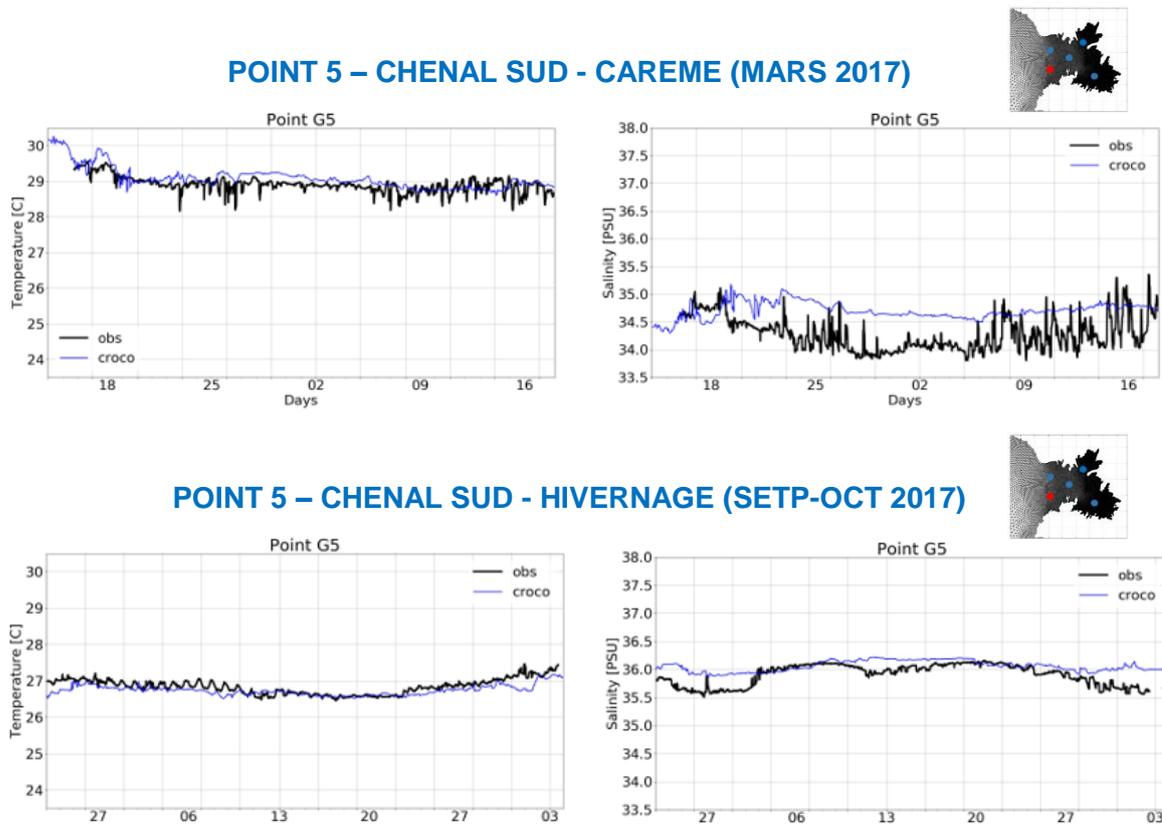


Figure 31 : Température (gauche) et salinite (droite) au fond au Point 5. Bleu : CROCO. Noir : mesures de [Vincent et al. \(2017a et 2017b\)](#).

Milieu de baie : point 2

Pour le Point 2 (Figure 32), les courants sont plus faibles qu'à l'entrée (entre 10 et 20 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), en particulier les pics d'intensité enregistrés au fond. Les différents régimes mis en évidence au Point 1 apparaissent également (mais de manière atténuée) dans les mesures et les simulations qui reproduisent bien les phénomènes observés :

- ✓ Au milieu de la colonne d'eau, les courants sont globalement rentrants avec une direction comprise entre le NE et l'E.
- ✓ Au fond, selon les mêmes périodes qu'au Point 1, les courants peuvent avoir une direction rentrante ou sortante sur plusieurs jours (pendant la campagne de carême) ou montrer une alternance cadencée par la marée (pendant la campagne d'hivernage).

Cela dit, l'épaisseur de la couche de mélange de surface apparaît clairement sous-estimée dans les simulations (comme au Point 5).

Concernant la température et la salinité (voir Figure 33 ci-dessous et Figure 61 en Annexe 1), les simulations sont très similaires aux observations en période de carême mais les oscillations observées en période d'hivernage ne sont pas représentées par le modèle. On peut supposer que les ondes internes observées au Point 1 se propagent au milieu de la baie mais celles-ci étant sous-estimées dans les simulations, elles sont quasi-inexistantes au Point 2.

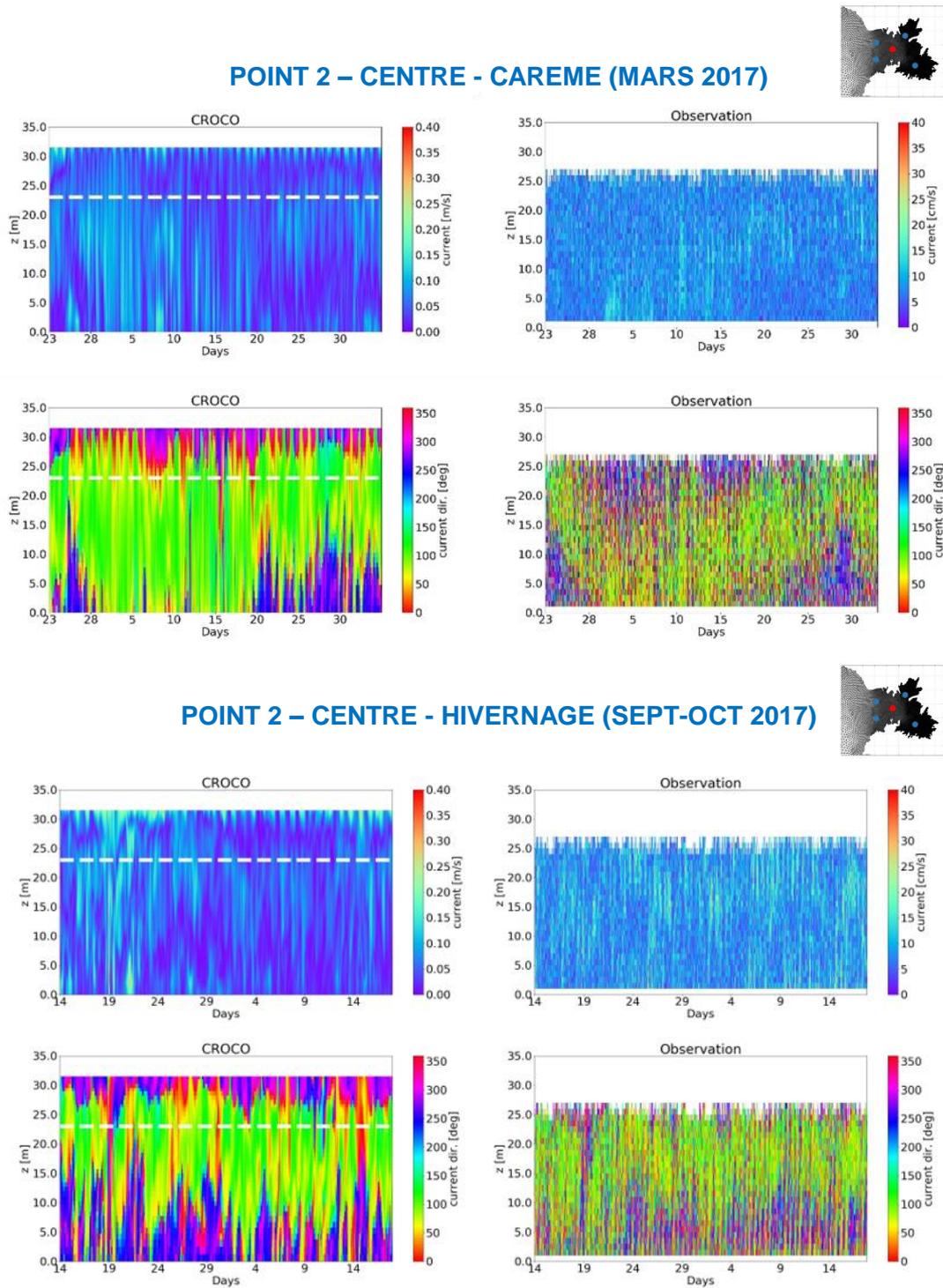


Figure 32: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 2. Gauche : CROCO. Droite : mesure Vincent et al. (2017a et 2017b).

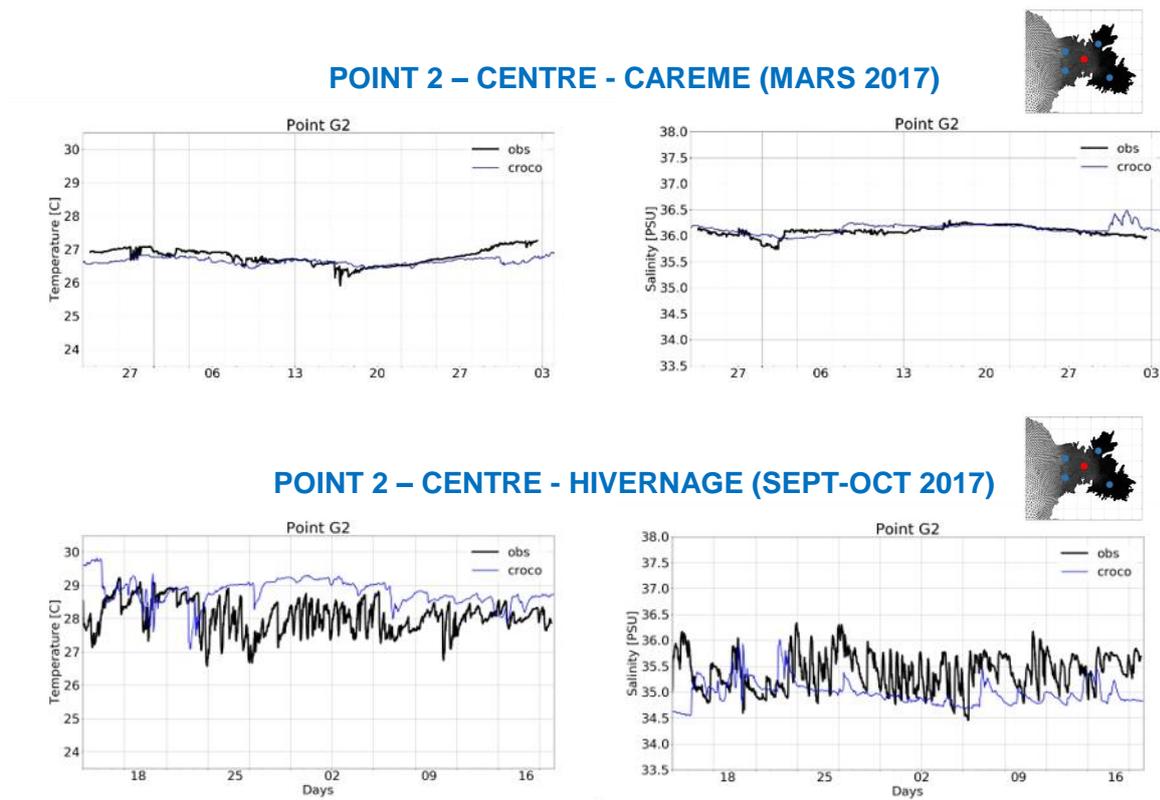


Figure 33: Température (gauche) et salinite (droit) au fond, Point 2. Blue : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017 a et 2017b).

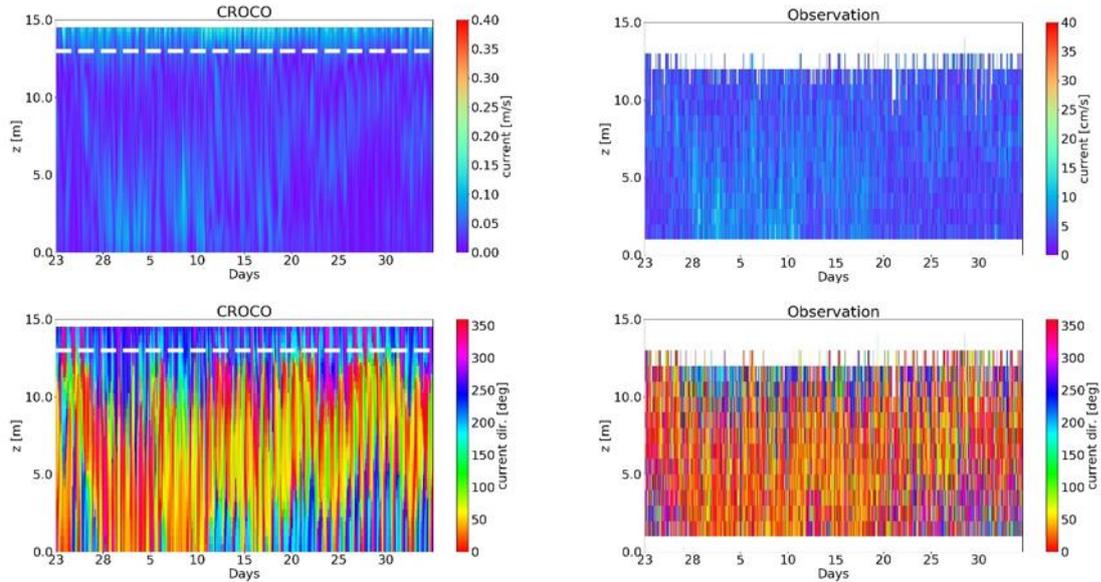
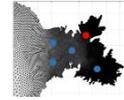
Fond de baie : points 3 et 4

En fond de baie (Figure 35 et Figure 35), sur les Points 3 (Cohé du Lamentin) et 4 (Baie de Génipa), observations et simulations montrent toutes deux des courants très faibles ($<10 \text{ cm.s}^{-1}$). Elles montrent également une légère intensification de la vitesse du courant dans la Cohé du Lamentin sur la période du 28 février au 10 mars (période pendant laquelle les courants sont continuellement entrants au Point 1).

- ✓ Au milieu de la colonne d'eau, le courant se dirige majoritairement en direction du fond de la baie ;
- ✓ Au fond, même si les courants se dirigent majoritairement vers le fond de la baie, les simulations montrent, en accord avec les observations, une alternance de la direction des courants par intermittence, en particulier en période d'hivernage et sur le Point 4 (secteur de la Baie de Génipa).

Les séries temporelle de température et salinité au fond (cf. Figure 36 et Figure 37) montrent une bonne reproduction des observations par le modèle CROCO. En période d'hivernage, la température en fond de baie est plus élevée que pendant la campagne de carême (env. $+2^\circ$) et la salinité est plus basse (env. -1 PSU).

POINT 3 – COHE LAMENTIN - CAREME (MARS 2017)



POINT 3 – COHE LAMENTIN - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

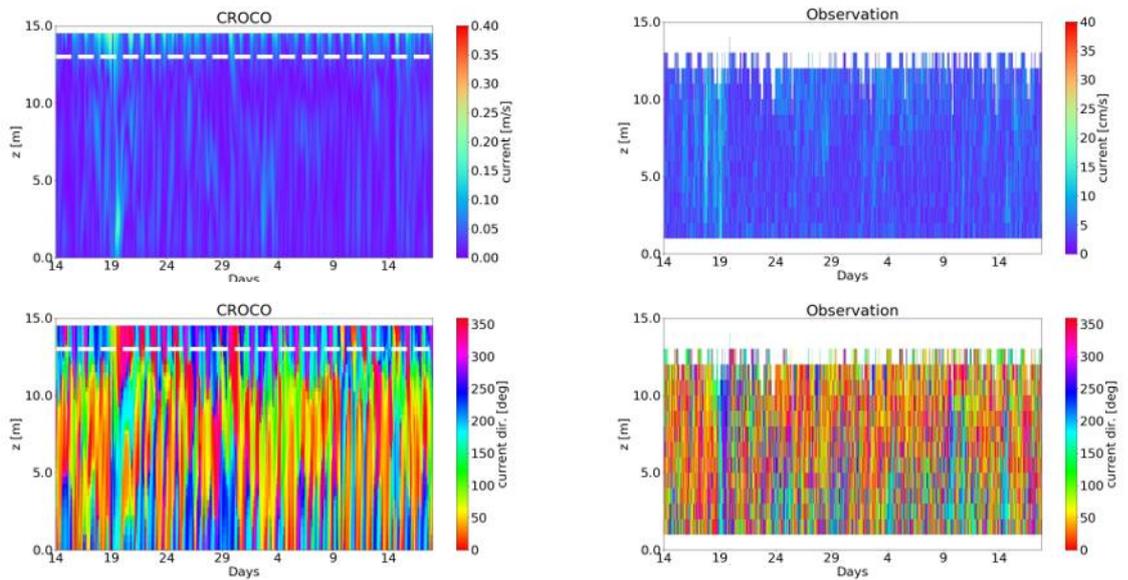
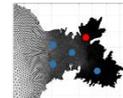


Figure 34: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 3. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

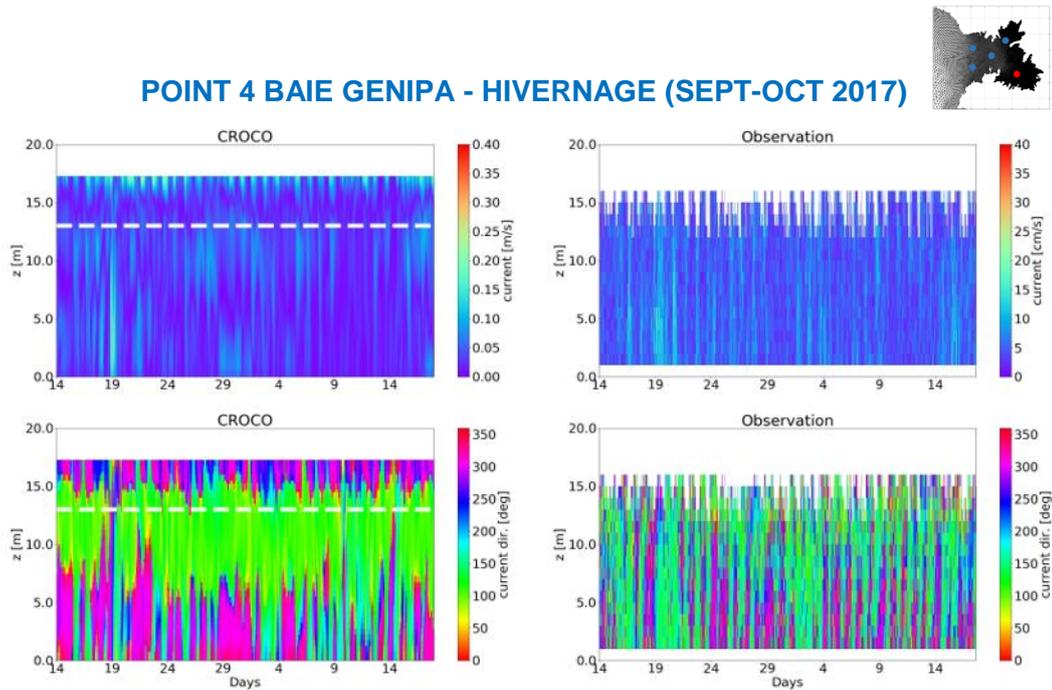


Figure 35: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 4. Gauche : CROCO. Droite : mesure de Vincent et al. (2017a et 2017b) .

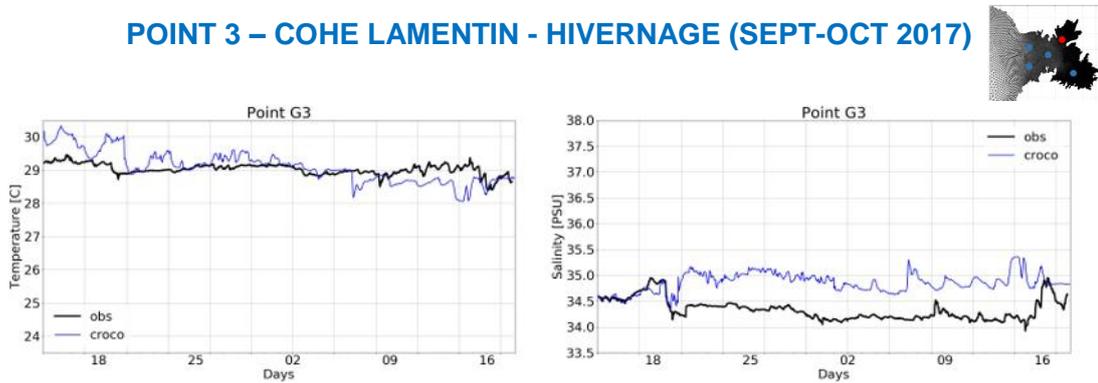
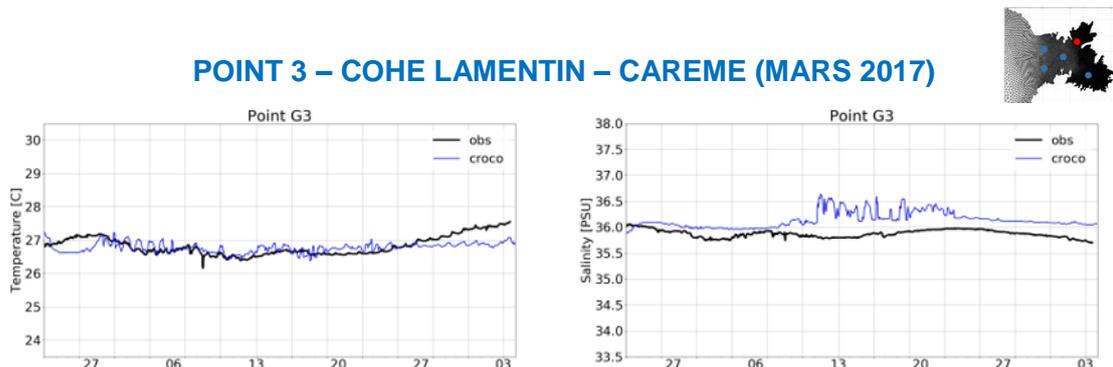


Figure 36: Température (gauche) et salinite (droit) au fond, Point 3. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b) .

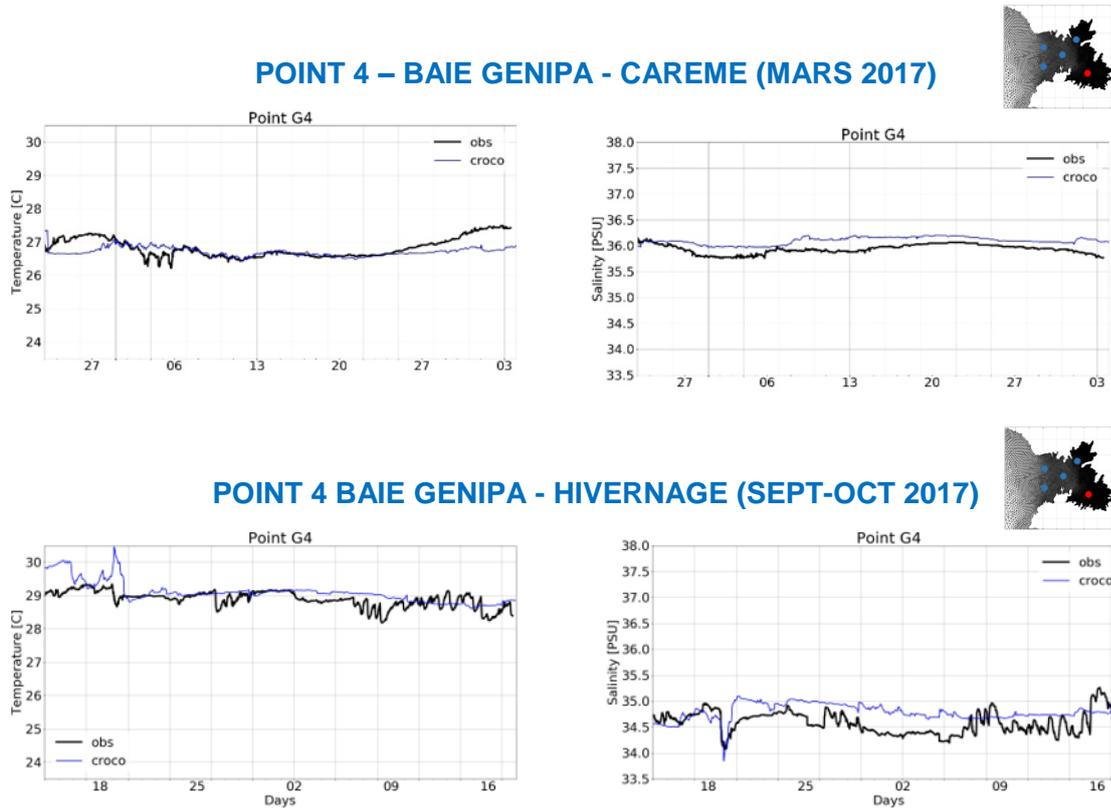


Figure 37: Température (gauche) et salinite (droit) au fond, Point 4. Bleu : CROCO. Noir : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b) .

3.2.2. Simulation pour le cyclone Maria

Malgré les limitations du forçage en surface (vent homogène sur toute la baie), le modèle reproduit correctement les caractéristiques principales du courant qui s'instaure dans la baie pendant le passage du cyclone Maria. Les courants sont très chaotiques et leur direction varie avec le sens du vent qui tourne en fonction de la position relative de l'œil. Les Figure 38, Figure 39, Figure 40, et Figure 41 montrent la comparaison entre le courant simulé (gauche) et mesuré (droite) au moment du passage de l'œil du cyclone sur l'île de la Dominique (le 19/09/2017).

Aux Points 1 et 2 (entrée et milieu de baie), les courants au milieu de la colonne d'eau présentent toujours une direction opposée à la direction de la couche de surface (visible dans la simulation mais pas dans les mesures). Observations et simulations montrent toutes deux que les courants maximums se retrouvent au fond le 19/09/2017 à 0h avec une direction sortant de la baie. En revanche, les vitesses maximales sont sous-estimées au Point 1, avec un maximum simulé de 36 cm.s^{-1} (50 cm.s^{-1} mesurés) et surestimées au Point 2.

Au fond de la baie (Point 3 et 4) le courant est plus faible. Pour le Point 3 (Cohé du Lamentin) vitesse et direction sont bien reproduites et montrent que la colonne d'eau est mélangée sur toute la profondeur au passage au plus proche de l'œil. Pour le Point 4 (Baie de Génipa), le modèle tend à surestimer légèrement les vitesses du courant avec un maximum simulé de 30 cm.s^{-1} (20 cm.s^{-1} mesurés).

POINT 1 – CHENAL NORD (18-19 Septembre 2017)

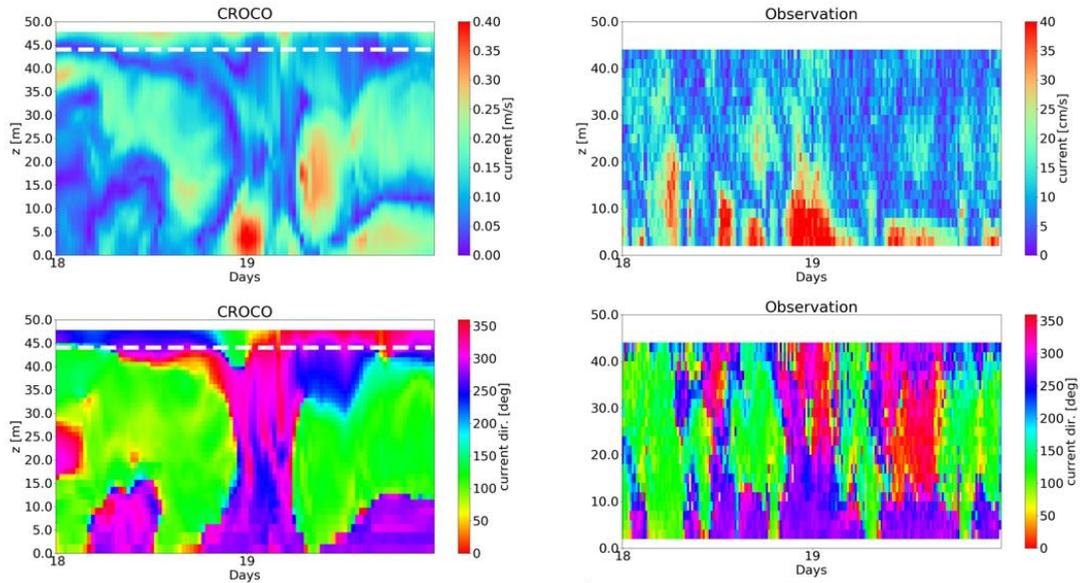


Figure 38. Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 2. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

POINT 2 – CENTRE (18-19 Septembre 2017)

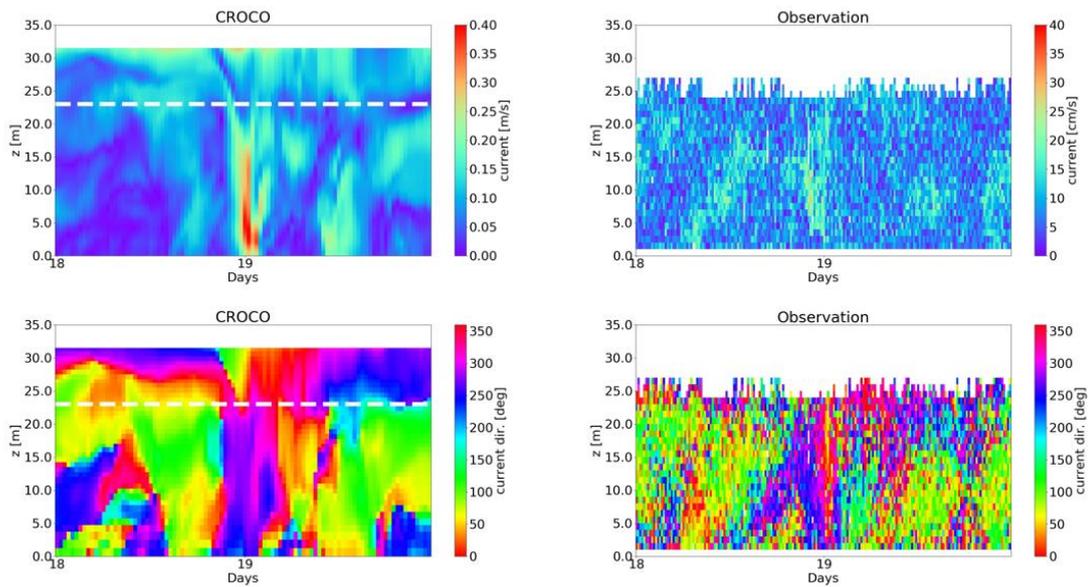


Figure 39 : Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 2. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

POINT 3 – COHE LAMENTIN (18-19 Septembre 2017)

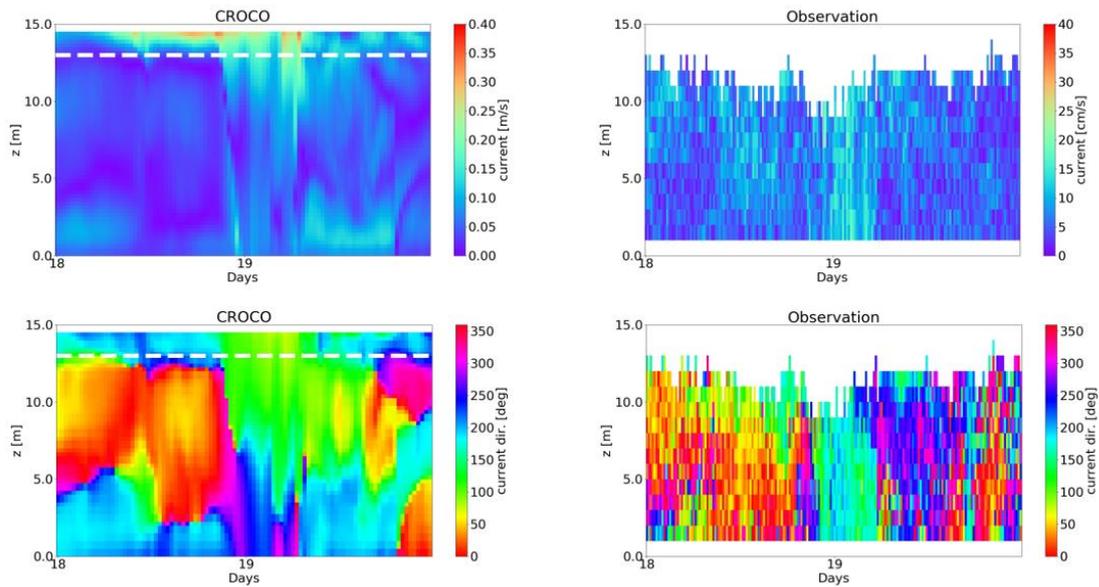


Figure 40 : Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 3. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

POINT 4 BAIE GENIPA (18-19 Septembre 2017)

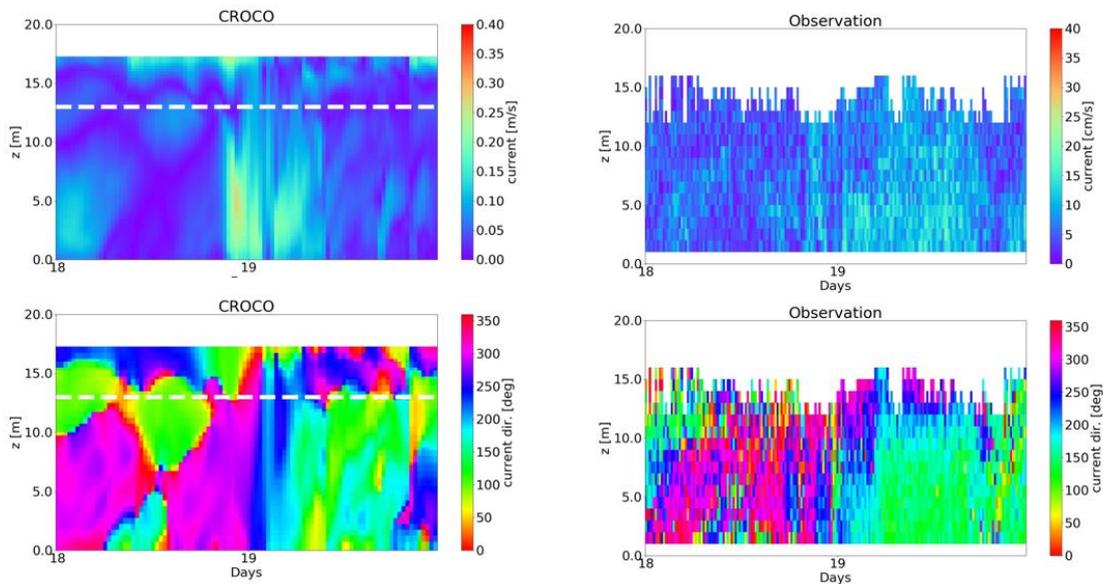


Figure 41: Profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au Point 4. Gauche : CROCO. Droite : mesures de Vincent et al. (2017a et 2017b).

3.2.3. Synthèse

Le modèle mis en place montre un bon accord avec les mesures réalisées en carême, en hivernage, et pendant le cyclone Maria. Les ordres de grandeur et les variations spatio-temporelles de l'intensité et de la direction des courants sont correctement reproduits à l'entrée comme en fond de baie. On note toutefois une sous-estimation des vitesses au fond en période d'hivernage, lorsque la colonne d'eau est fortement stratifiée. Les tests de sensibilité effectués au paragraphe 4.2.3 apportent des explications complémentaires sur les phénomènes observés au fond pendant cette campagne.

4. Analyse des résultats

4.1. ETATS DE MER

4.1.1. Fonctionnement général et variabilité

Les conditions moyennes d'agitation dans la baie (cf. Figure 42) sont assez homogènes sur l'année (hors cyclones) avec des valeurs de l'ordre de 40 cm à l'entrée de la baie (Points 1 et 5), 20-30 cm au centre et moins de 15 cm dans la Baie de Génipa et la Cohé du Lamentin (Point 3 et 4).

Les roses directionnelles des périodes pic (cf. Figure 43) montrent un fonctionnement bimodal avec la présence simultanée de houles longues du large qui pénètrent dans la baie et de clapot généré par le vent d'Est local :

- ✓ Les vagues courtes ($T_p < 4$ s) générées par le vent d'Est local sont présentes dans toute la baie. Une analyse de la partition des spectres indique que la hauteur significative moyenne associée à ce type de vagues est d'environ 20-30 cm à l'entrée de la baie (Points 1 et 5) et 10-20 cm en fond de baie (Points 3 et 4) ;
- ✓ Les vagues plus longues (T_p pouvant dépasser 10 s) issues principalement de houles d'Est ayant contourné la Martinique entrent dans la baie avec une provenance WNW ou WSW et se propagent par réfraction bathymétrique préférentiellement vers la Cohé du Lamentin. Une analyse de la partition des spectres indique que la hauteur significative moyenne associée à ce type de vagues est d'environ 10-20 cm à l'entrée de la baie (Points 1 et 5) et inférieure à 10 cm en fond de baie (Points 3 et 4).

L'alternance entre les phases nocturnes (entrée de houles longues dans la baie et peu de clapot local) et les phases diurnes (entrée de houles longues dans la baie et présence simultanée de clapot local gonflé par la brise de terre diurne) explique que sur l'ensemble de la zone d'étude, la hauteur significative des vagues simulées est légèrement plus importante le jour que la nuit (cf. paragraphe 3.1.1). Les houles du large pénétrant dans la baie et le clapot ont donc des énergies très comparables même si le clapot apparaît comme le mode dominant la majorité du temps.

Certains épisodes de plus forte agitation peuvent intervenir (hors conditions cycloniques) comme par exemple sur les journées du 22 février ou du 18 août (cf. Figure 44). Dans les deux cas les hauteurs significatives ont atteint des valeurs de 60-70 cm à l'entrée de la baie et jusqu'à 40 cm en fond de baie mais les processus responsables de cette agitation plus forte sont différents :

- ✓ Sur la journée du 22 février l'agitation est due à l'entrée de houles de Nord-Ouest générées par un front froid au Nord-Ouest de l'Atlantique. Ces houles ne sont pas présentes en permanence mais leur direction de propagation vers le Sud-Est induit une incidence directe dans la baie. Elles peuvent donc générer une agitation plus importante dans la baie que les houles d'Est même si leur hauteur significative au large est plus faible.
- ✓ Sur la journée du 18 août l'agitation est due à un clapot important généré par un vent local plus fort que la normale (environ 12 m.s^{-1}) associé à des houles d'Est importantes (de l'ordre de 4 m) qui sont rentrées dans la baie en contournant la Martinique.

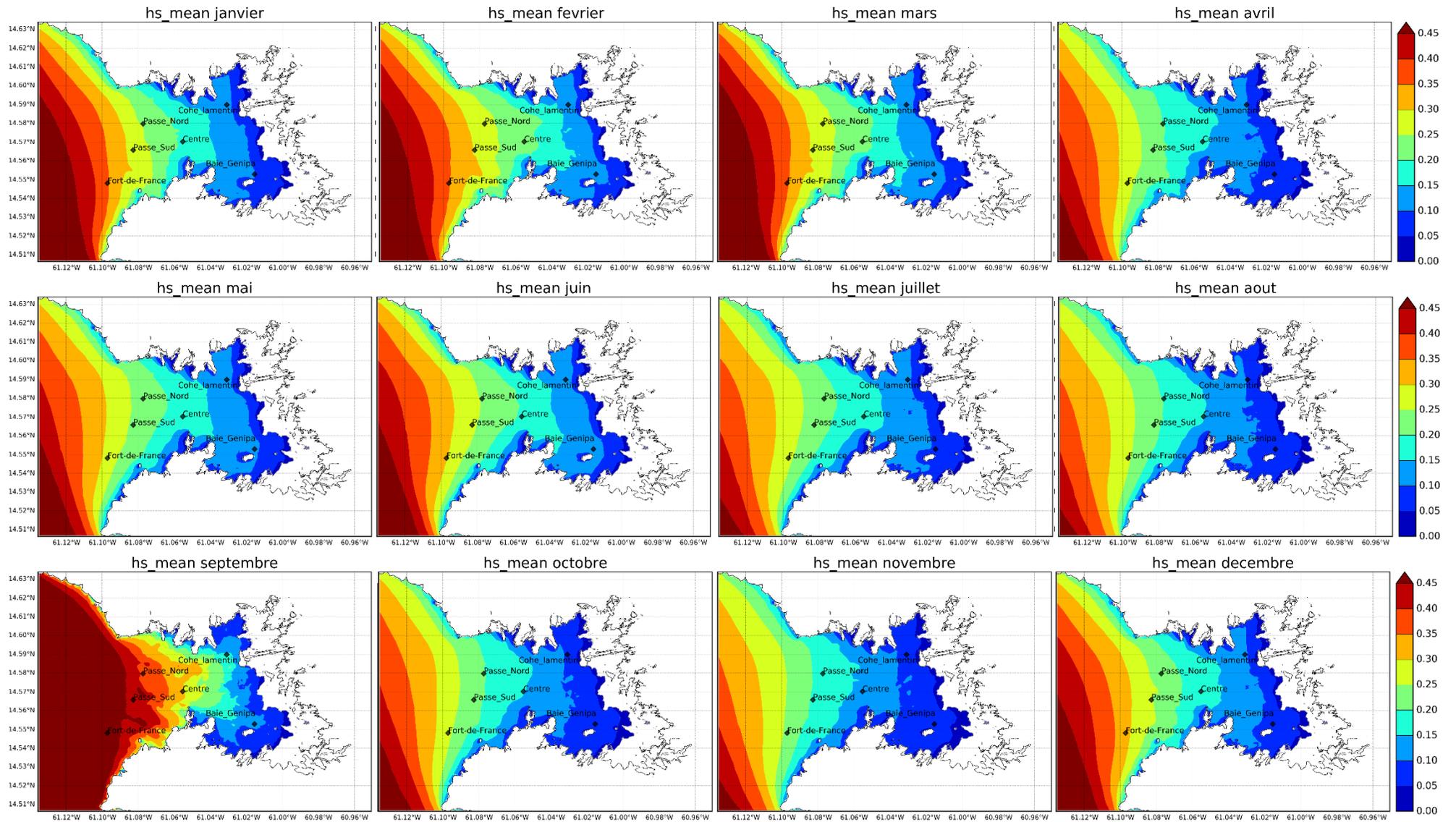


Figure 42. Hauteurs significatives (en m) moyennes mensuelles calculées dans la baie sur l'année 2017.

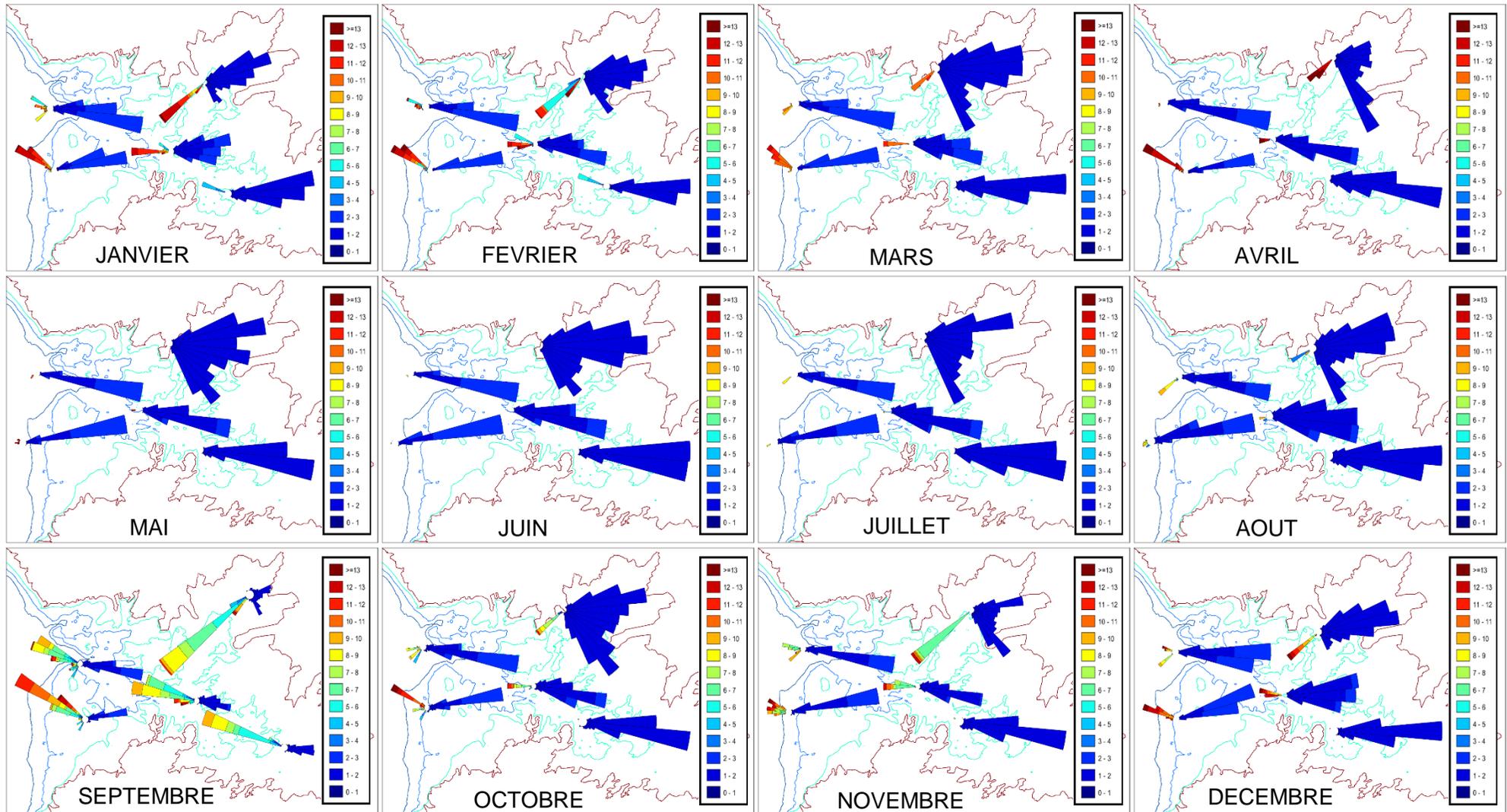


Figure 43. Roses directionnelles des périodes des vagues. Les roses représentent la répartition en terme de direction de provenance (orientation) et de période pic en seconde (couleurs).

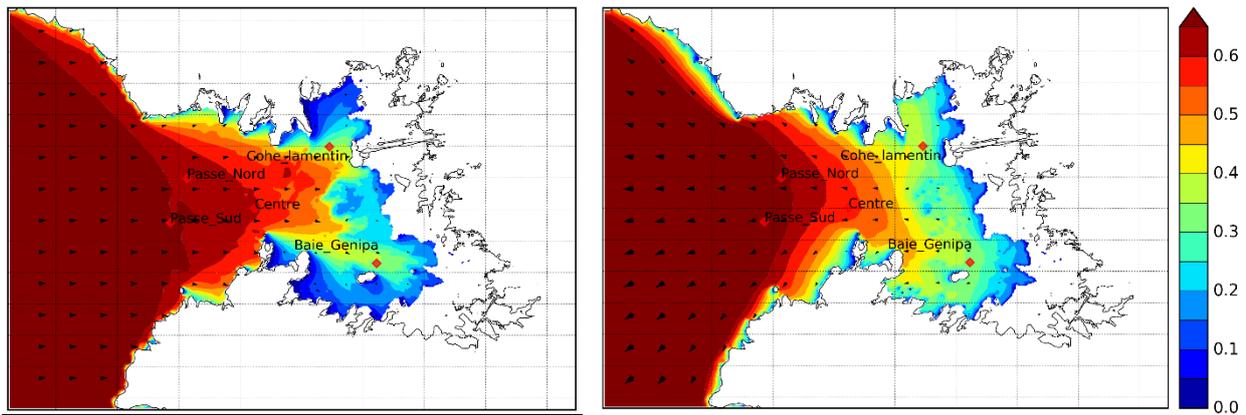


Figure 44. Hauteur significative (m) simulées le 22 février à 0h (gauche) et le 18 août à 15h (droite).

4.1.2. Agitation en conditions cycloniques

Trois cas cycloniques ont été étudiés : Dean (2007), Omar (2008) et Maria qui fait partie de la simulation de l'année 2017. Ces trois cas permettent de considérer des configurations complémentaires avec deux trajectoires « classiques » allant vers l'Est-Nord-Est mais passant soit au Nord de l'île (Maria) soit au Sud de l'île (Dean) et une trajectoire atypique lointaine se dirigeant vers le Nord-Est (Omar). Pour les cas de Dean et Omar, seules les vagues ont été simulées. Dans le cas de Maria, les vagues et la courantologie 3D sont disponibles.

Les vagues générées par les trois cas cycloniques ont atteint des hauteurs maximales comprises entre 2.5 m et 3.5 m à l'entrée de la baie au niveau de la bouée Fort-de-France (cf. Figure 45, Figure 47 et Figure 46, à noter que les observations au niveau de la bouée ne sont disponibles que pour Dean).

Dans les cas de Dean et de Maria, les vagues simulées dans la baie sont un mélange de différents types de vague qui se succèdent ou se superposent selon la position relative de la trajectoire de l'ouragan par rapport à la Martinique :

- ✓ Dans un premier temps, les houles de Nord-Est qui se propagent dans le sens de la trajectoire contournent l'île et pénètrent dans la baie en étant très atténuées par la réfraction avec une provenance de Nord-Ouest ;
- ✓ Puis, la mer de vent générée par le vent local dans la baie grossit à l'arrivée de l'œil à proximité de l'île. Le vent maximum mesuré est de l'ordre de 30 m.s^{-1} de provenance Nord-Est pour Dean et de l'ordre de 20 m.s^{-1} de provenance Nord-Ouest pour Maria;
- ✓ Enfin, après le passage de l'œil sur l'arc Antillais, la houle d'Ouest générée par la queue du cyclone pénètre dans la baie avec une provenance Sud-Est (Dean) ou Nord-Est (Maria).

Dans le cas de Omar, dont la trajectoire est plus distante et le train de houle principal se dirige vers l'Est, la houle a pénétré directement dans la baie sans être réfractée, ce qui explique les hauteurs de vagues simulées malgré la distance de l'œil du cyclone et l'absence de mer de vent dans la baie.

En fond de baie, c'est le cyclone Dean qui a généré les vagues les plus importantes ($H_{s_{\max}} \sim 1.5$ m sur le Point 3 et le Point 4) de par les vents locaux intenses au passage au plus près de l'œil (cf. Figure 45). La Cohé du Lamentin semble plus exposée aux houles longues pénétrant dans la baie que la baie de Génipa qui est notamment protégée par la présence de la Pointe-du-Bout (cf. Figure 46 et Figure 47).

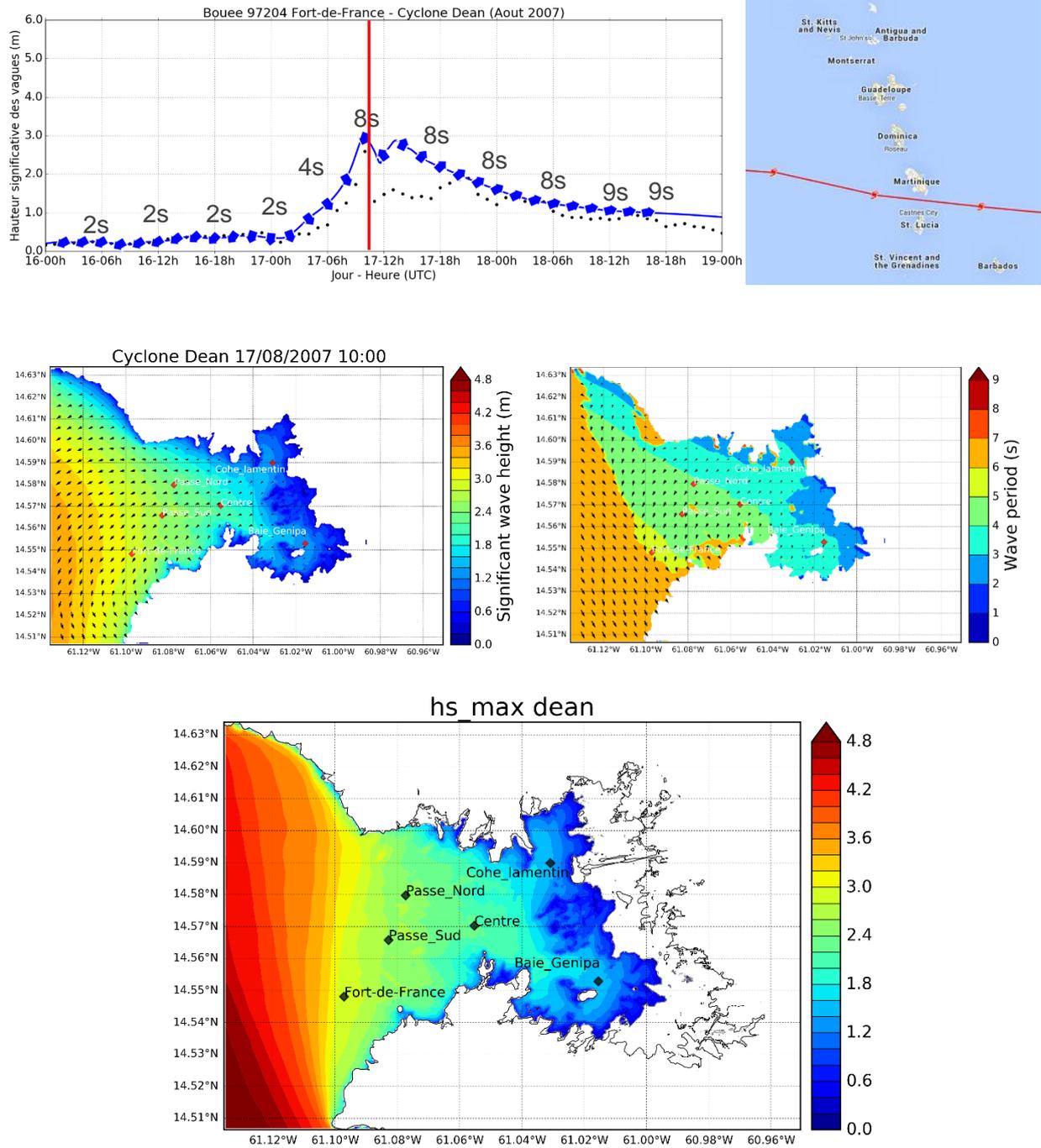


Figure 45. Hauteurs significatives et direction des vagues simulées pour le cyclone Dean. La figure du haut présente la série temporelle des hauteurs significatives (et de la période en chiffres, les points correspondent aux observations de Hs) et les figures du bas montrent les champs instantanés au moment du pic simulé à la bouée Fort-de-France (désigné par un trait rouge sur la série temporelle)

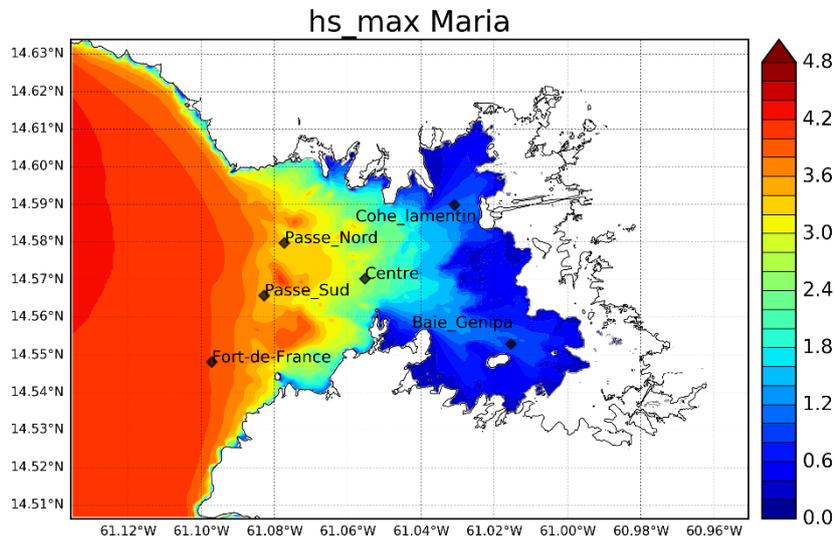
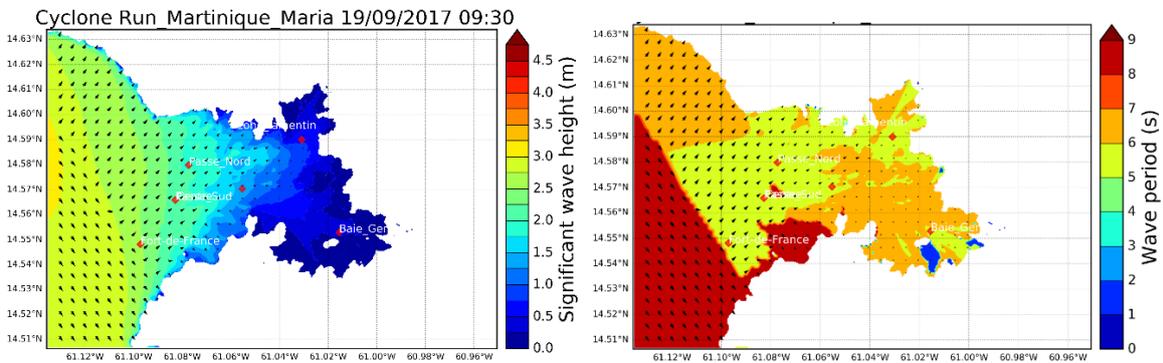
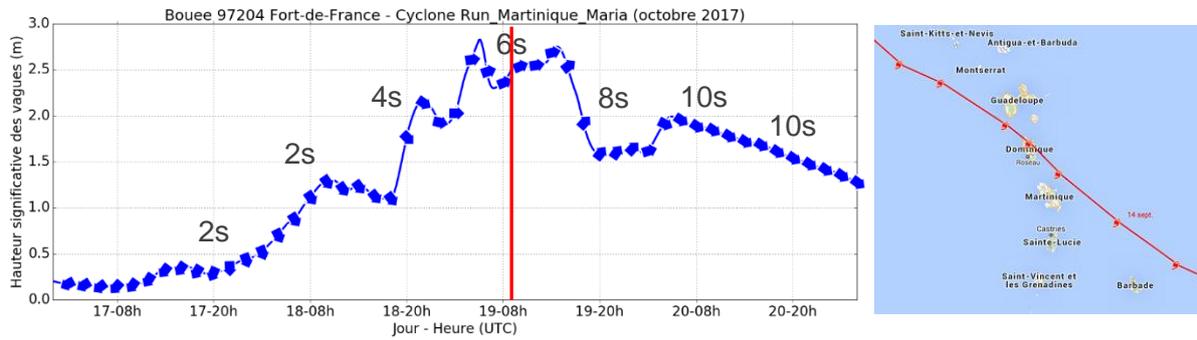


Figure 46. Hauteurs significatives et direction des vagues simulées pour le cyclone Maria. La figure du haut présente la série temporelle des hauteurs significatives (et de la période en chiffres) et les figures du bas montrent les champs instantanés au moment du pic simulé à la bouée Fort-de-France (désigné par un trait rouge sur la série temporelle).

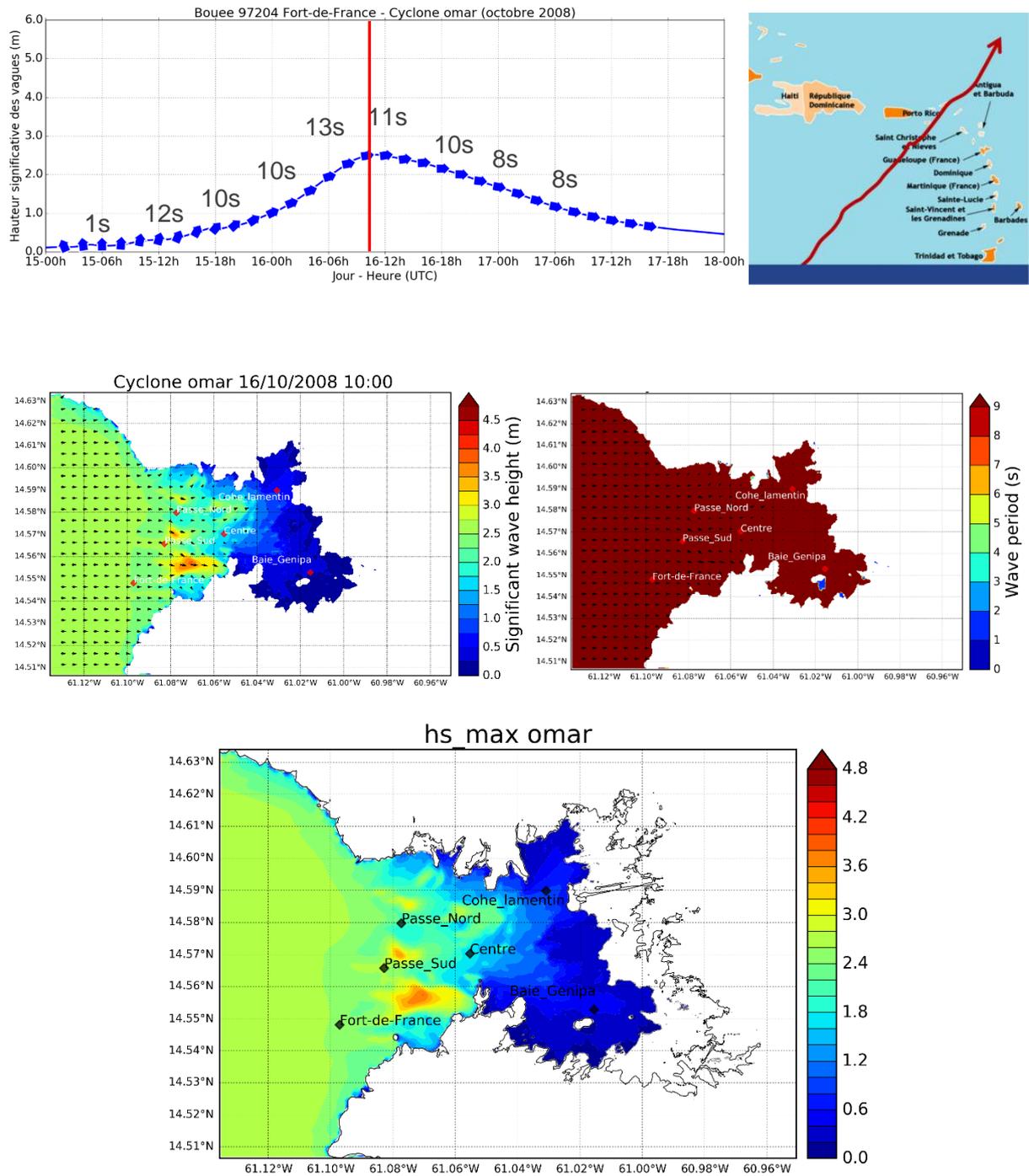


Figure 47. Hauteurs significatives et direction des vagues simulées pour le cyclone Omar. La figure du haut présente la série temporelle des hauteurs significatives (et de la période en chiffres) et les figures du bas montrent les champs instantanés au moment du pic simulé à la bouée Fort-de-France (désigné par un trait rouge sur la série temporelle).

4.2. CIRCULATION DANS LA BAIE

Les observations et modélisations décrites au paragraphe 2.3.4 montrent que la dynamique de la baie est complexe. Dans cette partie, le paragraphe 4.2.1 décrit la circulation générale dans la baie et sa variabilité saisonnière, le paragraphe 4.2.2 analyse les courants à l'échelle d'un cycle de marée en période de carême et hivernage, et le paragraphe 4.2.3 propose une analyse préliminaire des processus qui peuvent influencer les circulations principales dans la baie.

4.2.1. Circulation générale et variabilité saisonnière

Les simulations réalisées sur un an permettent d'étudier la circulation moyenne mensuelle dans la baie et de distinguer les grands courants dominants. Ceux-ci sont décrits sur des couches représentatives de la surface (2^{nde} couche), du milieu (20^{ème} couche) et du fond (39^{ème} couche). Rappelons que le modèle est discrétisé en 40 couches sur la verticale (colonne d'eau). Ces couches sont donc situées à des profondeurs différentes selon les variations spatiales de la bathymétrie.

La circulation générale dans la baie présente une variabilité saisonnière faible. Les cartes du mois de Mars et de Novembre (Figure 48) illustrent cette faible variabilité (les cartes relatives aux autres mois de l'année 2017 sont fournis en Annexe 2). Le schéma de circulation générale suivant a été déduit de ces résultats de simulations (Figure 49, gauche) :

- ✓ En surface, dans la couche de mélange, le courant se dirige globalement vers la sortie de la baie. Les eaux en provenance du fond de la baie (Baie de Génipa et Cohé du Lamentin) se dirigent préférentiellement vers le Nord-Ouest en suivant le sens du vent et la succession des hauts fonds. Les moyennes mensuelles les plus importantes ($\sim 20 \text{ cm.s}^{-1}$) sont observées au Nord de la baie (Grande Seiche, Banc Mitan et Baie des Flamands). Au sud de la baie, la présence de la Pointe-du-Bout entrave la circulation des courants de surface qui présentent des vitesses globalement plus faibles sauf dans les secteurs de Trois Ilets et de l'Anse à l'Ane.
- ✓ Au milieu de la colonne d'eau, dans les secteurs peu profonds où toute la tranche d'eau est mélangée (principalement sur les bancs), le courant moyen se dirige également préférentiellement vers la sortie de la baie, entraîné par le vent. En revanche, dans les secteurs plus profonds, les simulations montrent un courant globalement rentrant. Celui-ci rentre dans la baie par le chenal principal (avec une vitesse moyenne d'environ 10 cm.s^{-1}), chemine dans la passe des Trois-Îlets et génère un tourbillon (aussi appelé « gyre ») dans la baie de Génipa qui circule dans le sens horaire autour de l'Île du Gros Ilet. A proximité de la Pointe-du-Bout, il se divise également en plusieurs branches dont l'une repart directement vers le large en longeant la côte Sud de la baie et l'autre part vers la Cohé du Lamentin avec des vitesses très faibles.
- ✓ En bas de la colonne d'eau (près du fond), le courant moyen est plus chaotique et globalement plus faible que dans le reste de la colonne d'eau. A l'entrée de la baie, au niveau du Banc du Gros Ilet et du Banc Mitan, le courant présente des vitesses moyennes d'environ 10 cm.s^{-1} . A l'intérieur de la baie, les courants moyens sont encore plus faibles. On retrouve pour certains mois (ex : Mars), une circulation générale similaire à celle observée au milieu de la colonne d'eau alors que pour d'autres (ex : Novembre), aucune circulation dominante n'apparaît.

Ce schéma de circulation est cohérent avec les résultats de [Lazure et al \(1996\)](#) et avec le schéma proposé par [Castaing et al. \(1986\)](#) repris sur la Figure 49. Les simulations apportent cependant des précisions sur la circulation en forme de gyre dans la baie de Génipa et indiquent que les courants de surface au nord de la baie sont globalement plutôt orientés vers l'ouest-nord-ouest. A noter que cette description correspond au mode de circulation dominant dans la baie qui peut subir des variations à l'échelle de la journée ou de quelques heures.

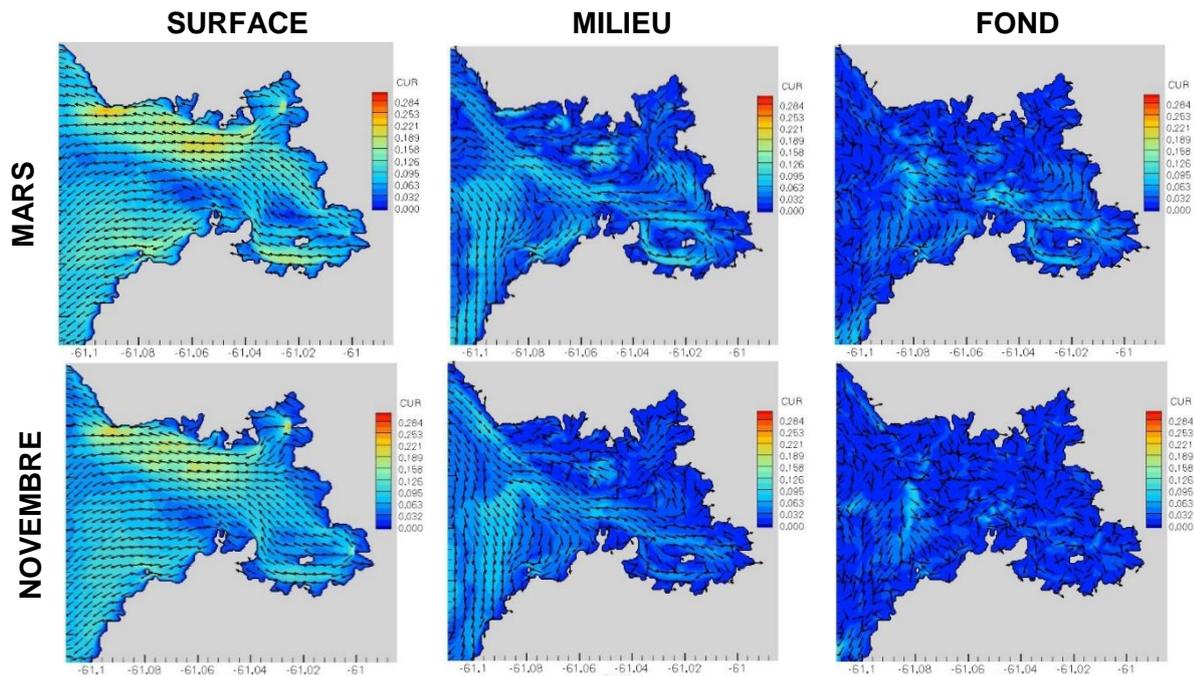


Figure 48. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (mois de Mars et Novembre, les cartes des autres mois sont en Annexe 2).

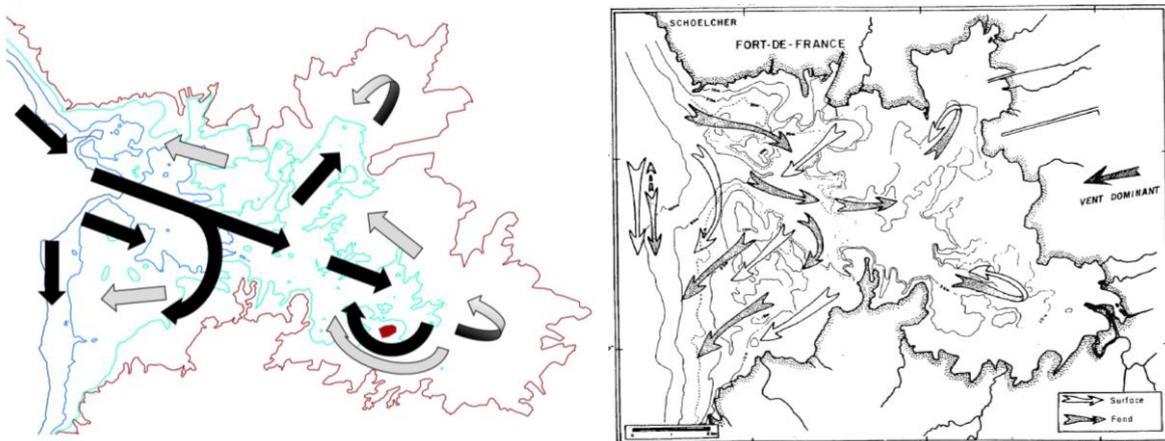


Figure 49. Gauche : Schéma de circulation générale déduit des simulations. Courants au milieu de la colonne d'eau : Noir / Courants de surface : Gris. Droite : Schéma issu de l'étude de Castaing et al. (1986).

4.2.2. Analyse des courants sur un cycle de marée

Afin d'illustrer la variabilité des courants dans la baie à l'échelle d'un cycle de marée, les variations horaires des courants sont analysées sur un cycle de marée. Tout d'abord, nous considérons deux situations représentatives du carême et de l'hivernage (voir paragraphe 3.1.3 pour les caractéristiques détaillées de ces périodes). Les Figures 50 et 51 illustrent les conditions et différences des deux situations sélectionnées, au niveau du Point 1 :

- ✓ Sur la journée du 4 mars 2017 pendant la campagne de carême (cf. Figure 50) : les courants qui circulent sous la couche de mélange dans le chenal principal sont rentrants de manière

continue sur toute la colonne d'eau. Les courants sont plutôt homogènes sur la colonne d'eau avec une amplitude modulée par la marée (20 cm.s^{-1} à marée montante). La simulation numérique est en bon accord avec les mesures. Cette période est par ailleurs marquée par des vents d'Est plus forts que la moyenne et dont la direction est particulièrement stable pendant plusieurs jours (cf. Figure 10). La période est caractérisée aussi par une faible stratification (cf. les profils de température/salinité en Annexe 1). On rappelle que la stratification mesure la différence de densité le long de la colonne d'eau.

- ✓ Sur la journée du 4 octobre 2017 pendant la campagne d'hivernage (cf. Figure 51) : les courants de fond dans le chenal principal montrent une alternance des directions à une fréquence semi-diurne (correspondant à la fréquence de l'onde de marée M2). Ces courants ne sont pas homogènes sur la colonne d'eau et présentent de pics de 60 cm.s^{-1} au fond. La simulation numérique n'arrive pas à capturer ces pics de courants, comme déjà remarqué lors de la validation (cf. paragraphe 3.2). La période d'hivernage est, du point de vue météorologique et hydrologique, assez contrastée par rapport à la période de carême avec un vent plus variable en direction et une stratification bien développée à l'entrée de la baie.

Les Figure 52 et 53 montrent les cartes de courants à marée montante et descendante (pour les couches de surface, milieu et fond de la colonne d'eau). Les cartes horaires sur tout le cycle de marée sont fournies en Annexes (3 et 4) :

- ✓ Les courants de surface et du milieu présentent toujours les mêmes caractéristiques évoquées dans le paragraphe précédent : (1) les courants de surface, modulés par l'intensité et la direction du vent, se dirigent vers la sortie de la baie ; (2) les courants au milieu de la colonne d'eau sont rentrants au niveau du chenal principal puis ressortent en longeant la côte sud de la baie ou suivent la passe des Trois Ilet pour se séparer en plusieurs branches dans la baie de Génipa et la Cohé du Lamentin. Pour la période de carême cette circulation est plus visible. On retrouve une légère amplification du courant à marée montante (cf. Figure 52 et Figure 50).
- ✓ Les courants de fond en revanche présentent des différences plus nettes. Alors qu'ils sont similaires au milieu de la colonne d'eau le 4 mars à marée montante comme descendante, ils sont plus chaotiques sur la journée du 4 octobre. Il apparaît que la circulation générale présentée au paragraphe 4.2.1 présente une variabilité, en particulier pour les courants de fond, qui en hivernage ne semble pas directement corrélée à la circulation de surface instaurée par le vent mais plus au cycle de marée (voir paragraphe 4.2.3). L'inversion du courant au fond au niveau du chenal est plus visible sur des cartes de courant dans un plan vertical qui coupe la baie de Fort-de-France d'ouest en est, en passant par le canal principal (Figure 54). Même si l'amplitude du courant au fond est bien inférieure aux pics enregistrés, on peut remarquer l'alternance du courant de fond rentrant/sortant (rouge/bleu) ainsi que des accélérations. La section suivante fournit des éléments complémentaires permettant de mieux comprendre ces circulations.

L'analyse des courants sur un cycle de marée avec le marnage maximum observée sur 2017 (environ 50 cm de marnage le 4 décembre 2017, en période de transition) montre des courants très similaires en direction et en vitesse que ceux décrits pour la journée du 4 octobre (cf. Annexe 5). Le fait de doubler le marnage n'occasionne donc pas de courants significativement plus intenses dans les simulations.

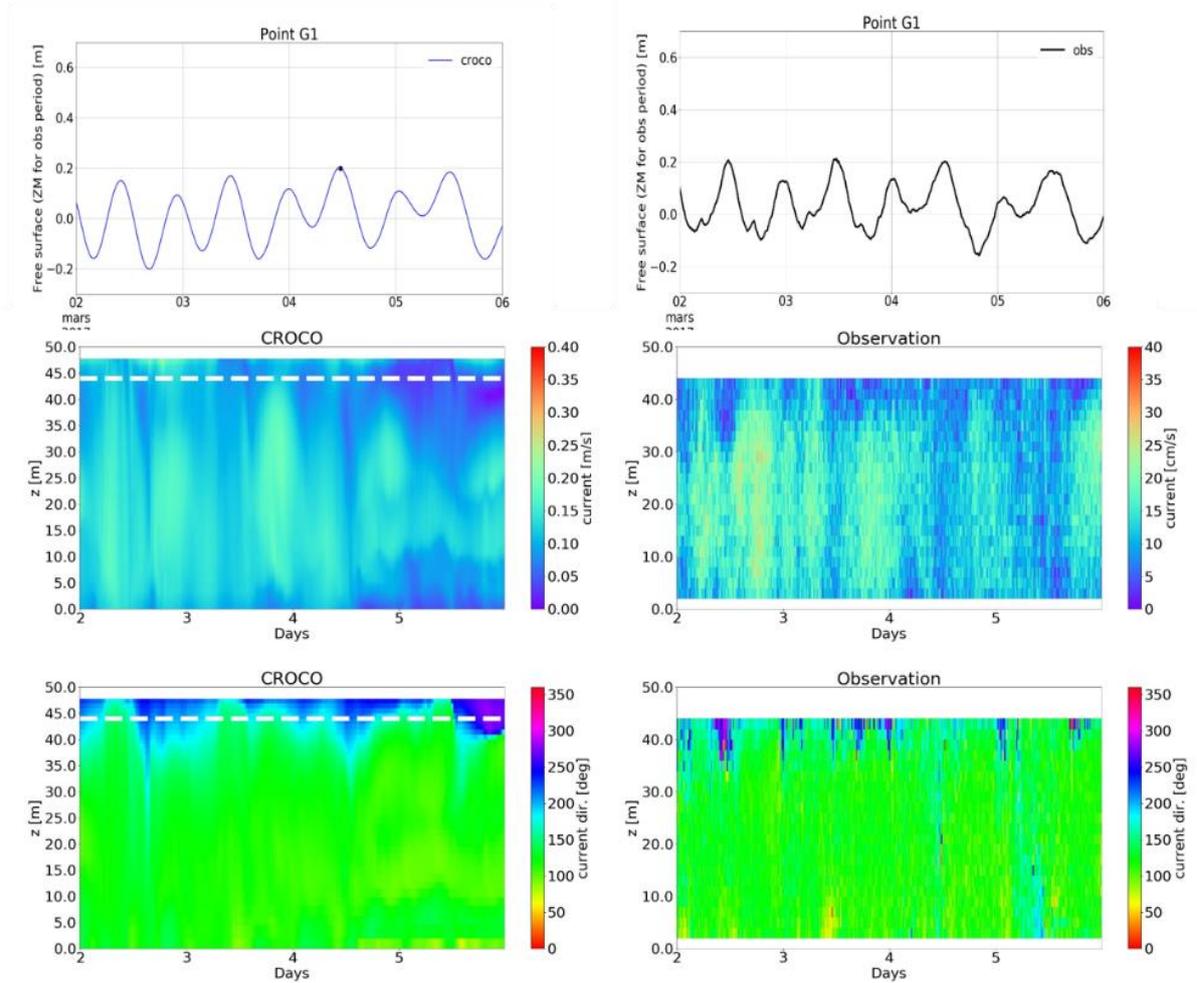


Figure 50. Niveaux d'eau et courants pendant la campagne de carême (02/03/2017- 06/03/2017) au Point 1. Gauche : simulation CROCO. Droite : observations NORTEKMED. Le point noir sur la série du niveau d'eau est utilisé comme pleine mer (PM) de référence pour la Figure 52.

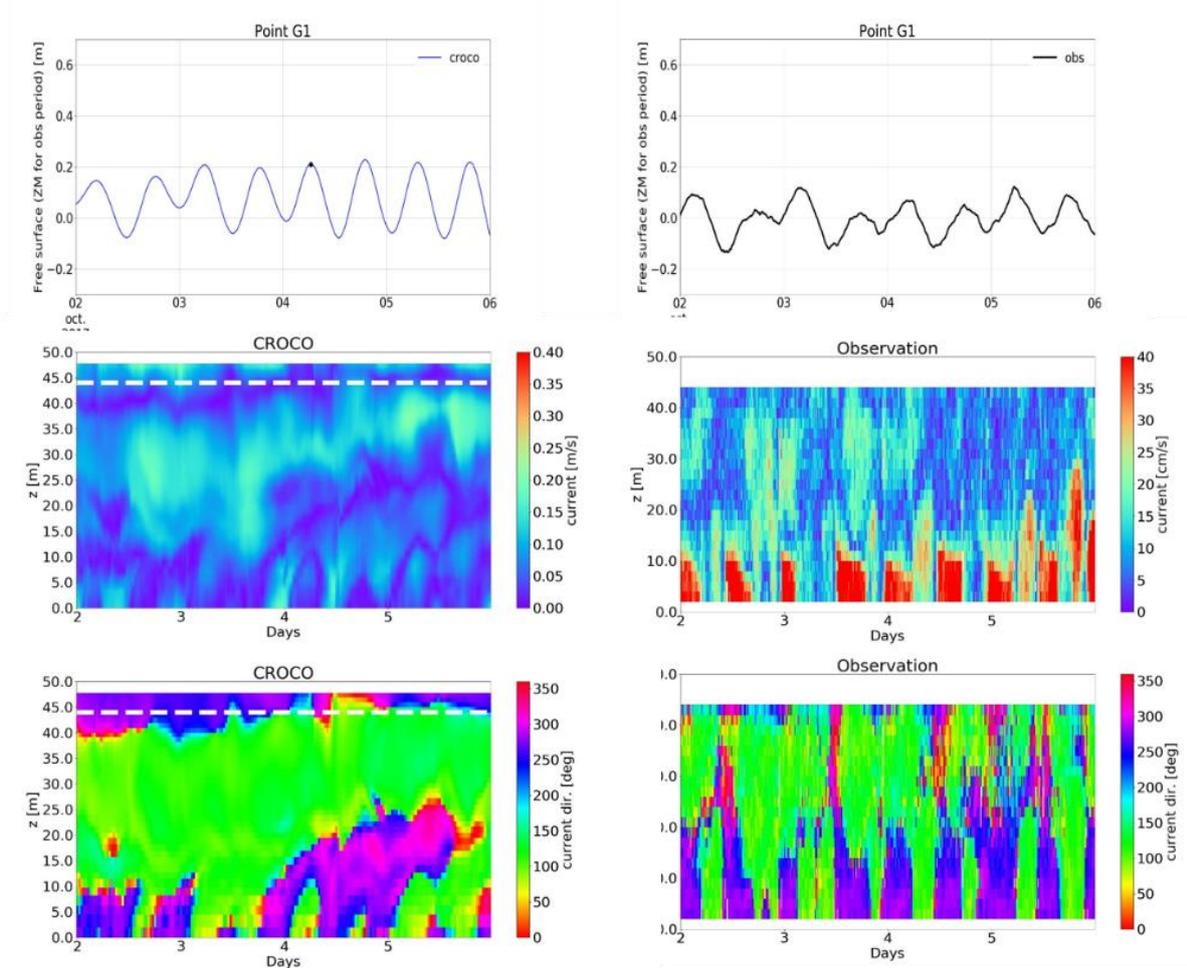


Figure 51. Niveaux d'eau et courants pendant la campagne d'hivernage (02/10/2017- 06/10/2017) au Point 1. Gauche : simulation CROCO. Droit : observations NORTEKMED. Le point noir sur la série du niveau d'eau est utilisé comme pleine mer (PM) de référence pour la Figure 53 Figure 52.

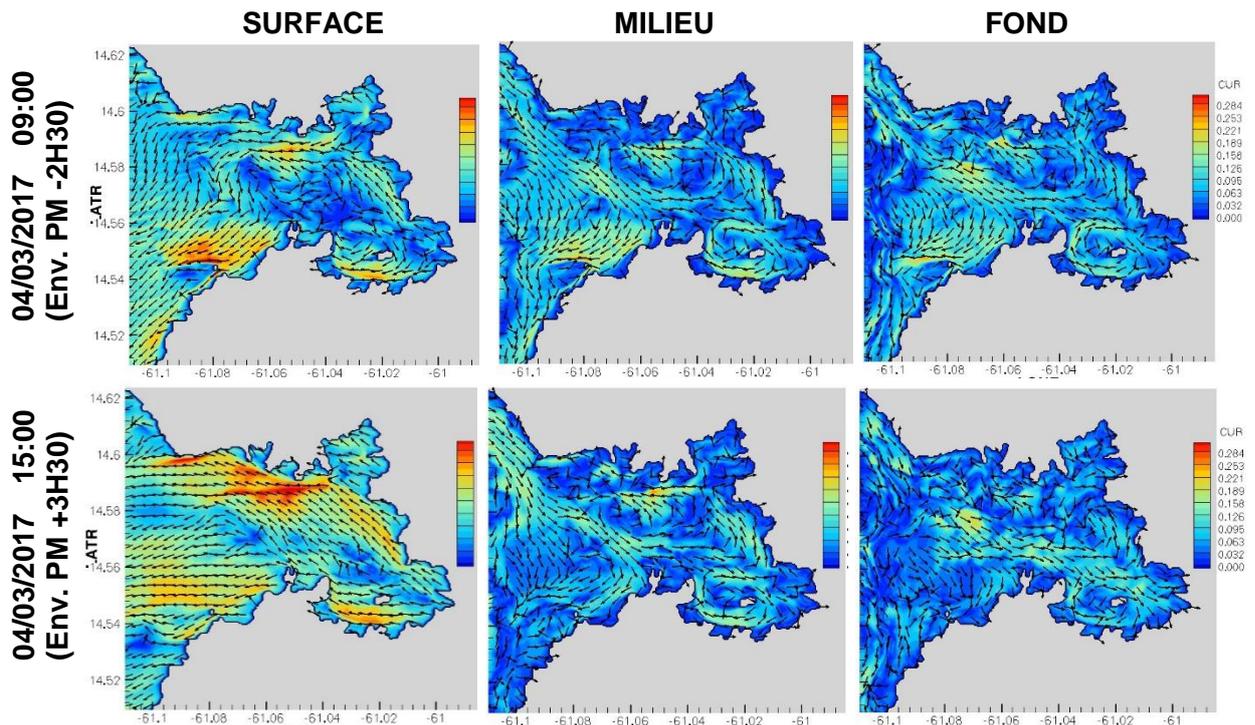


Figure 52. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) pendant la campagne de carême le 04/03/2017. P.M. est la pleine mer de référence en Figure 50.

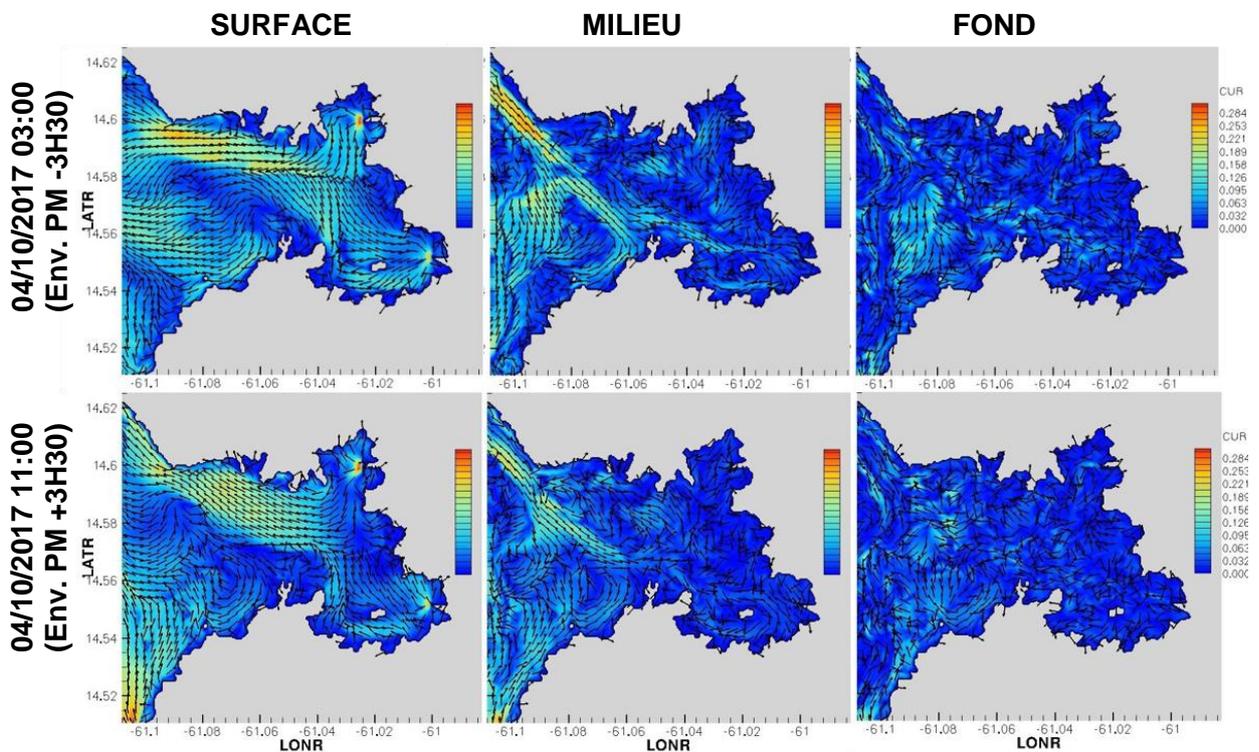


Figure 53. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) pendant la campagne d'hivernage le 04/10/2017. P.M. est la pleine mer de référence en Figure 51.

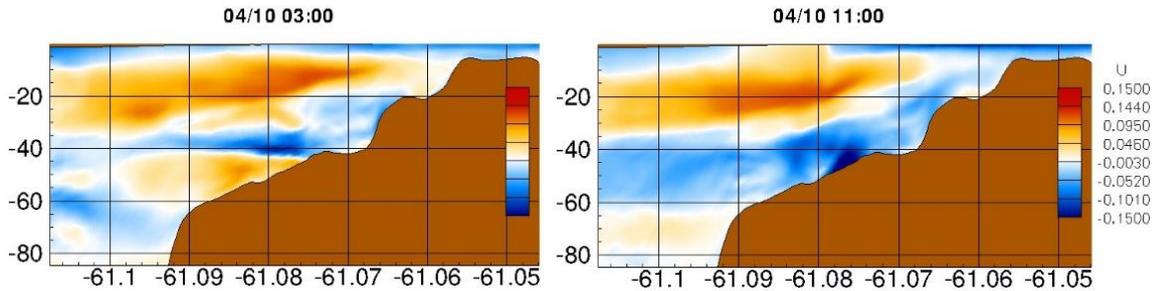


Figure 54. Composante est-ouest du courant (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) pendant la campagne d'hivernage le 04/10/2017. Les cartes sont tracées dans un plan vertical qui coupe la baie de Fort-de-France d'ouest en est dans l'axe du chenal principal

4.2.3. Tests de sensibilité et analyse des processus régissant la circulation

La Martinique est exposée au courant des Caraïbes généré à partir du courant nord équatorial qui traverse les Antilles en se dirigeant vers l'ouest. La baie de Fort-de-France étant protégée de ce courant par l'effet d'ombrage de l'île (Lazure et al, 1996), nous étudions dans cette partie l'influence des autres paramètres sur la circulation dans la baie : vent, marée et stratification.

Influence du vent

Afin de caractériser l'action du vent sur la circulation, nous avons considéré un fluide homogène (et visqueux) forcé uniquement par un vent constant en direction et intensité ($7 m.s^{-1}$, soufflant vers l'Ouest). Après une période transitoire de 48 heures, la circulation dans la baie est relativement stationnaire (cf. Figure 55) et apparaît très similaire à la circulation générale décrite au paragraphe précédent, en conditions réelles. Les courants de surface sont dirigés vers l'Ouest et peuvent atteindre $20 cm.s^{-1}$ dans les secteurs de haut fond du nord de la baie. Dans ces zones de basse profondeur, l'intensité du vent suffit à engendrer un courant résultant vers l'Ouest sur toute la colonne d'eau. Au contraire, dans les zones plus profondes, la couche de mélange de surface ne pénètre pas jusqu'au fond et les courants au fond de la colonne d'eau sont inversés et prennent une direction rentrante avec des vitesses de l'ordre de $15 cm.s^{-1}$ dans le chenal principal.

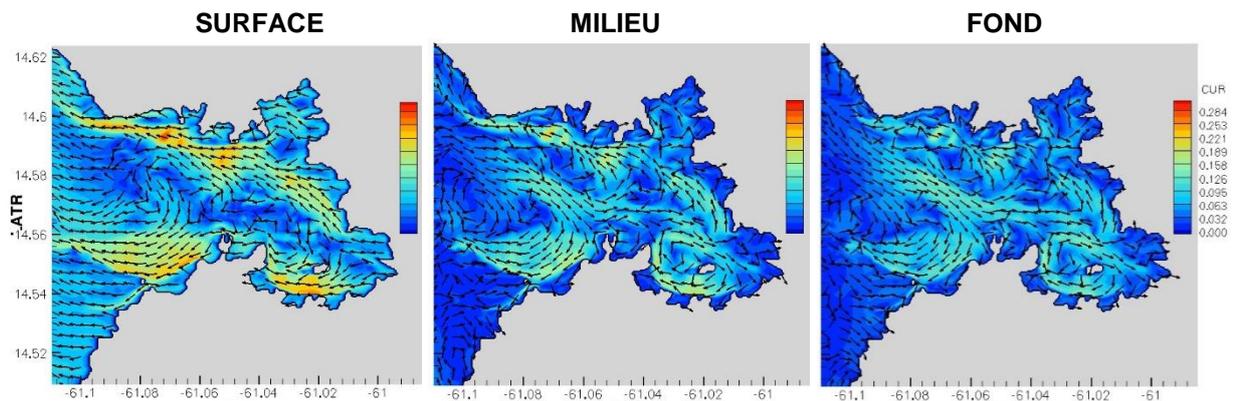


Figure 55. Courants générés par un vent d'Est constant de $7 m.s^{-1}$ au bout de 4 jours de simulation. Vitesse (couleur en $m.s^{-1}$) et direction (flèches) du courant en surface (gauche), au milieu (milieu) et au fond (droite).

Les courants ainsi obtenus sont très proches des courants moyens mensuels. Nous pouvons donc conclure que la circulation générale de la baie est contrôlée principalement par le vent qui pousse les masses d'eau de surface vers la sortie de la baie. Les courants rentrants dans les

couches plus profondes permettent la conservation du volume d'eau dans la baie, avec des apports particulièrement importants au niveau du chenal principal. En particulier, la situation décrite au paragraphe 4.2 pour le 4 Mars 2017, pendant une période caractérisée par du vent stable et une stratification faible, ressemble beaucoup à la circulation expliquée par le vent seul (cf. Figures 55 et 52).

Influence de la marée en milieu homogène

La marée en Martinique est mixte à inégalité diurne avec des marnages dans la baie de Fort-de-France très modérés allant de 10 cm à 30 cm en fonction du coefficient de marée. Afin de caractériser l'influence de la marée sur la circulation, nous considérons dans un premier temps un fluide homogène (en température, salinité et densité) forcé par la marée semi-diurne avec un marnage de 20 cm. Les courants résultants dans la baie sont homogènes sur la verticale mais surtout le courant de marée est très faible (Figure 56), de l'ordre de 1 cm.s^{-1} , soit 10 fois moins que les courants générés par le vent dans le test précédent. Ce test montre que la marée seule ne peut pas expliquer les forts courants de fond mesurés dans le chenal principal lors de la campagne d'hivernage.

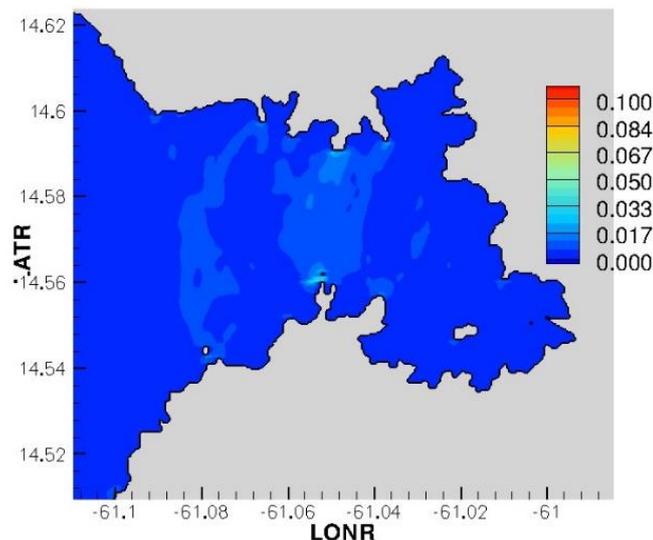


Figure 56. Vitesse maximale du courant (en surface) sur un cycle de marée semi-diurne avec un marnage de 20 cm (couleurs en m.s^{-1}).

Influence de la marée en milieu stratifié

Afin de compléter l'analyse, nous considérons toujours un marnage de 20 cm, mais, cette fois-ci nous considérons que le fluide est stratifié. Ce test a pour objectif d'identifier si les ondes internes peuvent expliquer les forts courants mesurés au fond du chenal principal.

Rappel sur les ondes internes : Un fluide stratifié est composé de masses d'eau de différentes densités : typiquement les masses d'eau plus denses ont tendance à rester sous les particules moins denses. Un gradient de densité se produit verticalement et peut maintenir des ondes gravitaires générées par une source d'énergie, par exemple lorsque l'onde de marée rencontre une forte pente bathymétrique. Ces ondes se propagent à l'intérieur du fluide homogène (de même densité) et sont appelées ondes internes.

Une potentielle source génératrice d'ondes internes est le banc sous-marin d'Aves (Aves Ridge) situé 200 km à l'Ouest de la Martinique (Sosa, 2016). L'emprise du modèle hydrodynamique 3D mis en place pour la baie de Fort de France ne permet pas de générer les ondes internes au niveau de ce banc (qui est hors du domaine modélisé). Par ailleurs, les données GOFS utilisées en conditions aux limites du modèle CROCO implanté ne prenant pas en compte la marée, ce type d'ondes internes ne peut pas être représenté dans les données de forçage. Ce test vise donc uniquement à identifier si localement (Martinique/Baie de Fort-France), des ondes internes pourraient être générées et expliquer les forts courants au fond.

Nous considérons deux stratifications typiques rencontrées en carême et hivernage. Ces stratifications typiques ont été définies en sélectionnant une stratification idéalisée (courbe « Fit », Figure 57, première ligne) à partir des deux profils de stratification issus des données GOFS: le premier, caractéristique de la période de carême (01/03/2017), est peu stratifié, et le second, caractéristique de la période d'hivernage (01/09/2017), présente une stratification plus importante et une thermocline bien marquée. La température est recalculée via l'équation d'état linéaire et la salinité négligée. A noter que, pour des contraintes de temps de calcul, les tests sont effectués en utilisant la grille mère de résolution 200 m, ce qui a tendance à atténuer les vitesses de courant modélisées (qui ne sont donc pas comparables à celles présentées ci-dessus).

Sur la Figure 57 (troisième et quatrième ligne) on distingue des ondes générées au niveau de la rupture de pente à l'entrée de la baie de Fort-de-France et qui se propagent vers la côte :

- ✓ Pour la simulation de type hivernage, la zone de génération est située vers 100 m de profondeur. La position de la thermocline, qui est relativement haute et marquée (à environ 36 m de profondeur), permet aux ondes de se propager à l'intérieur de la baie.
- ✓ En carême, au contraire, la région de génération est plus profonde et le rayonnement ne semble pas se propager entre 0-50 m où l'océan est très faiblement stratifié. Les ondes internes ne semblent pas rentrer dans la baie.

L'intensité de la stratification et la position de la thermocline contrôlent donc (1) l'apparition d'ondes internes au niveau de la rupture de pente à l'entrée de la baie et (2) leur propagation à l'intérieur de la baie. La présence de ces ondes est visible dans le chenal au Point 1 (cf. Figure 57, deuxième ligne à droite), notamment au fond où le courant montre une alternance de direction à la fréquence de la marée. Ces ondes génèrent des courants rentrants au fond du chenal principal dont l'intensité est d'un ordre de grandeur supérieur aux courants liés à la marée seule. Au contraire en carême, dans le chenal principal (Figure 58, deuxième ligne à gauche), le courant reste plus faible et plus homogène le long de la verticale.

La succession de pics de courant au fond est similaire aux mesures de Figure 51 (mais les vitesses sont encore une fois un ordre de grandeur inférieures). Des études ultérieures (simulation avec la grille fille, test de sensibilité par rapport à la forme de la stratification) seraient nécessaires pour confirmer et préciser le rôle des ondes internes (générées en Martinique ou plus au large à l'ouest) sur l'alternance du courant et les fortes oscillations de vitesse, température et salinité au fond (au Point 1).

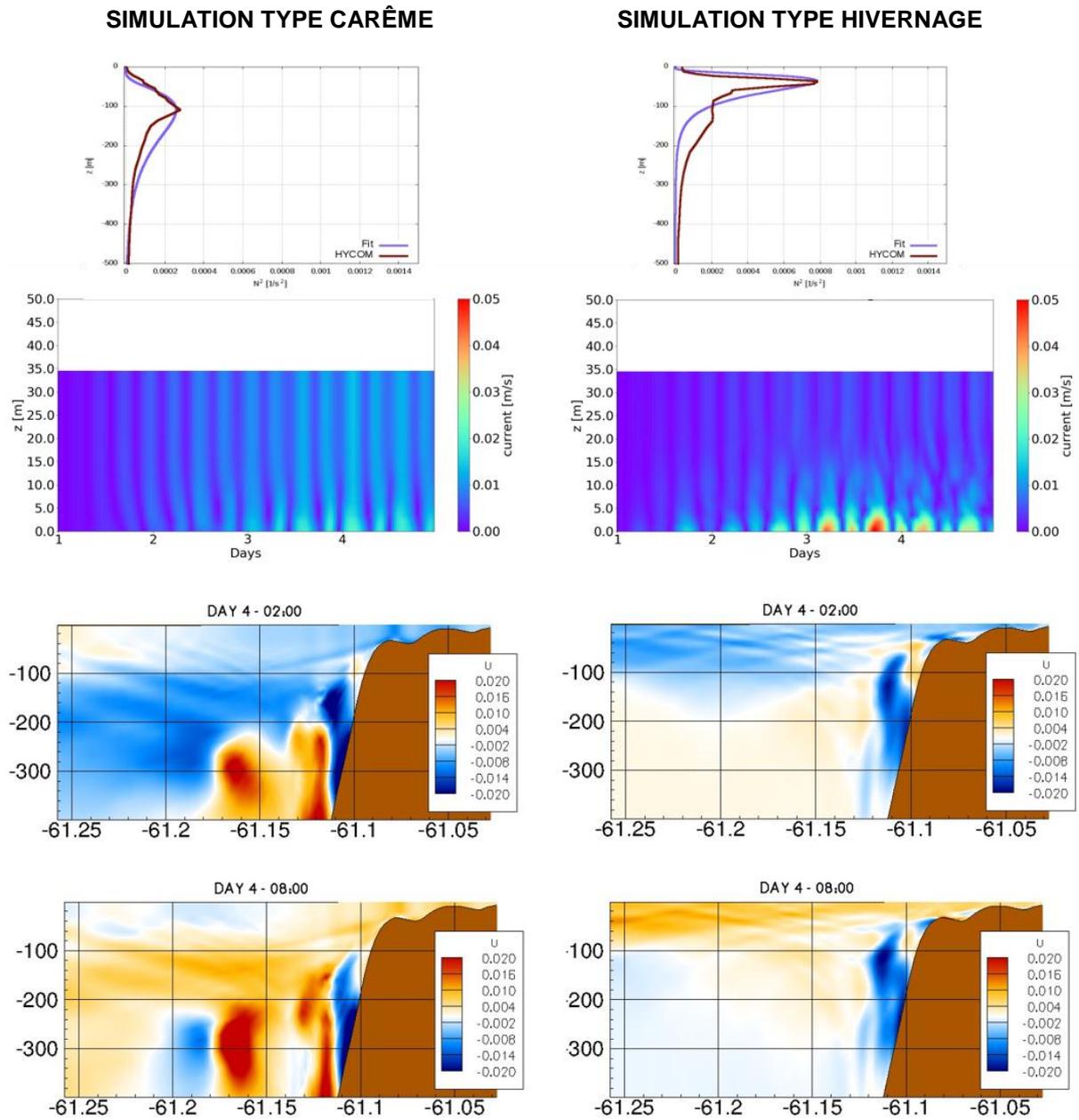


Figure 57. Influence de la marée en milieu stratifié. Colonne de gauche : stratification typique pour la carême. Colonne de droite : stratification typique pour l'Hivernage. Première ligne : fréquence de stratification imposée comme condition initiale. Deuxième ligne : profils 3D de la vitesse du courant. Troisième et quatrième lignes : Composante u du courant dans un plan 2DV qui coupe la baie de Fort-de-France. L'intervalle de la palette de couleur va de -0.02 m/s (bleu) à 0.02 m/s (rouge).

Influence de crues

En l'absence de données mesurées ou simulées continues plus précises, les simulations réalisées sur l'année 2017 (et qui constituent la base de données HydrosedMar) utilisent des moyennes journalières de débits calculés au niveau des embouchures des principales rivières (cf. paragraphe 2.3.3). Si la prise en compte de ces débits contribue à bien reproduire (avec le modèle) les conditions thermo-halines en fond de baie à échelle journalière, elle ne permet pas de caractériser l'impact des pics de crue. Dans ce test, nous cherchons à caractériser le panache généré par une crue importante des rivières en fond de baie. Pour cela, on considère des conditions intenses de type cycloniques en choisissant des conditions représentatives de la journée du 28 septembre 2017 (après le passage de Maria) mais en injectant des débits extrêmes aux embouchures des Rivières Salée et Lézarde. Le vent et la pluviométrie sont constants sur la simulation ($U_{10}=15.5 \text{ m.s}^{-1}$ et $R = 132 \text{ mm.j}^{-1}$). Les débits injectés ($Q = 178 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $90 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, aux embouchures des Rivière Lézarde et Rivière Salée, respectivement) correspondent à la valeur horaire maximale mesurée sur l'année 2016 aux stations de la CTM du Pont Spitz (Rivière Lézarde) et de la Coulisse (Rivière Salée).

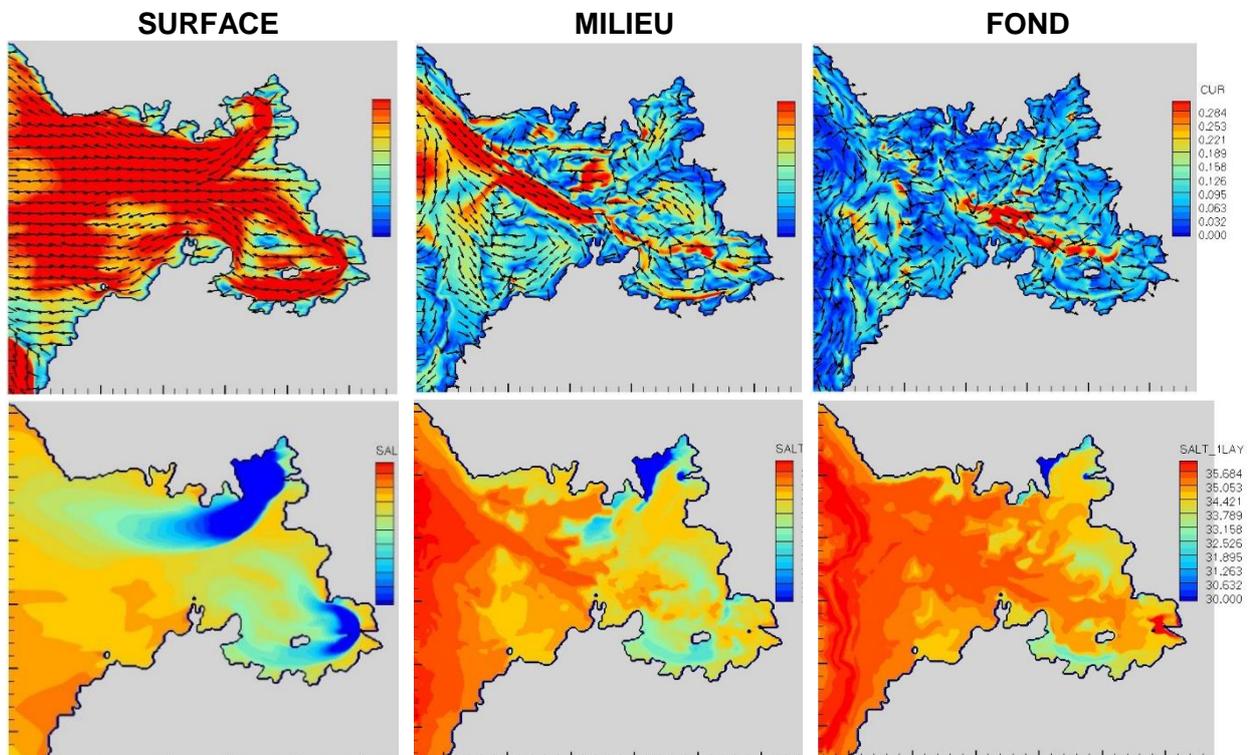


Figure 58. Courants 3D et salinité (PSU) après 12 heures de calcul pour un débit moyen (gauche) et centenal (droite).

La Figure 58 présente les courants et la salinité (qui indique l'extension du panache dans la baie) après 12 heures de simulation avec un débit constant injecté de manière continue. En surface, le panache de la rivière Lézarde s'étend jusqu'à la sortie de la baie après 12 heures de simulation alors que celui de la Rivière Salée ne dépasse pas la Pointe du Bout. Cette différence s'explique par le débit moins important de la rivière Salée et par la présence de la Pointe-du-Bout qui fait un effet barrière. Dans la Cohé du Lamentin, les eaux continentales sont piégées et s'accumulent au niveau de la Pointe des Sables. Le même phénomène est observé (dans une moindre mesure) au niveau des Trois Ilets (car les courants de surface suivent le tourbillon qui tourne autour de l'île du Gros Ilet).

4.2.4. Circulation en conditions cycloniques

Les courants simulés pendant le cyclone (cf. Figure 59) sont très variables selon la direction du vent qui varie selon la position relative de l'œil par rapport à la Martinique. Rappelons que lors du passage du cyclone, le vent a effectué une rotation antihoraire : il soufflait vers l'est le 19/09/2017 à 0h, puis a tourné vers Nord-Nord-Ouest le 20/09/2017. Les circulations modélisées pendant le cyclone Maria sont telles que :

- ✓ Les courants de surface suivent la direction du vent. En temps normal, ils sont globalement sortants mais prennent une direction opposée au moment du passage de l'œil sur la Dominique qui a induit des vents d'Ouest très inhabituels.
- ✓ Les couches plus profondes ne sont pas complètement mélangées : au contraire une circulation s'installe en opposition aux courants de surface. Cette configuration observée en conditions normales (vent dominants venant de l'Est) est aussi observée quand le vent vient d'Ouest : un courant en sens inverse (vers le Nord-Ouest) s'installe dans le canal principal. Les vitesses simulées sont particulièrement importantes avec un courant sortant de 25-30 cm/s. Le tourbillon de la baie de Genipa s'inverse également par rapport à la configuration habituelle et circule en sens antihoraire. Le courant sortant du chenal principal disparaît lorsque le vent continue sa rotation antihoraire (le 19/09/2017 12:00). Une fois le cyclone passé, le vent reprend sa direction habituelle (provenance Est) et le courant au niveau du chenal reprend sa direction entrante.

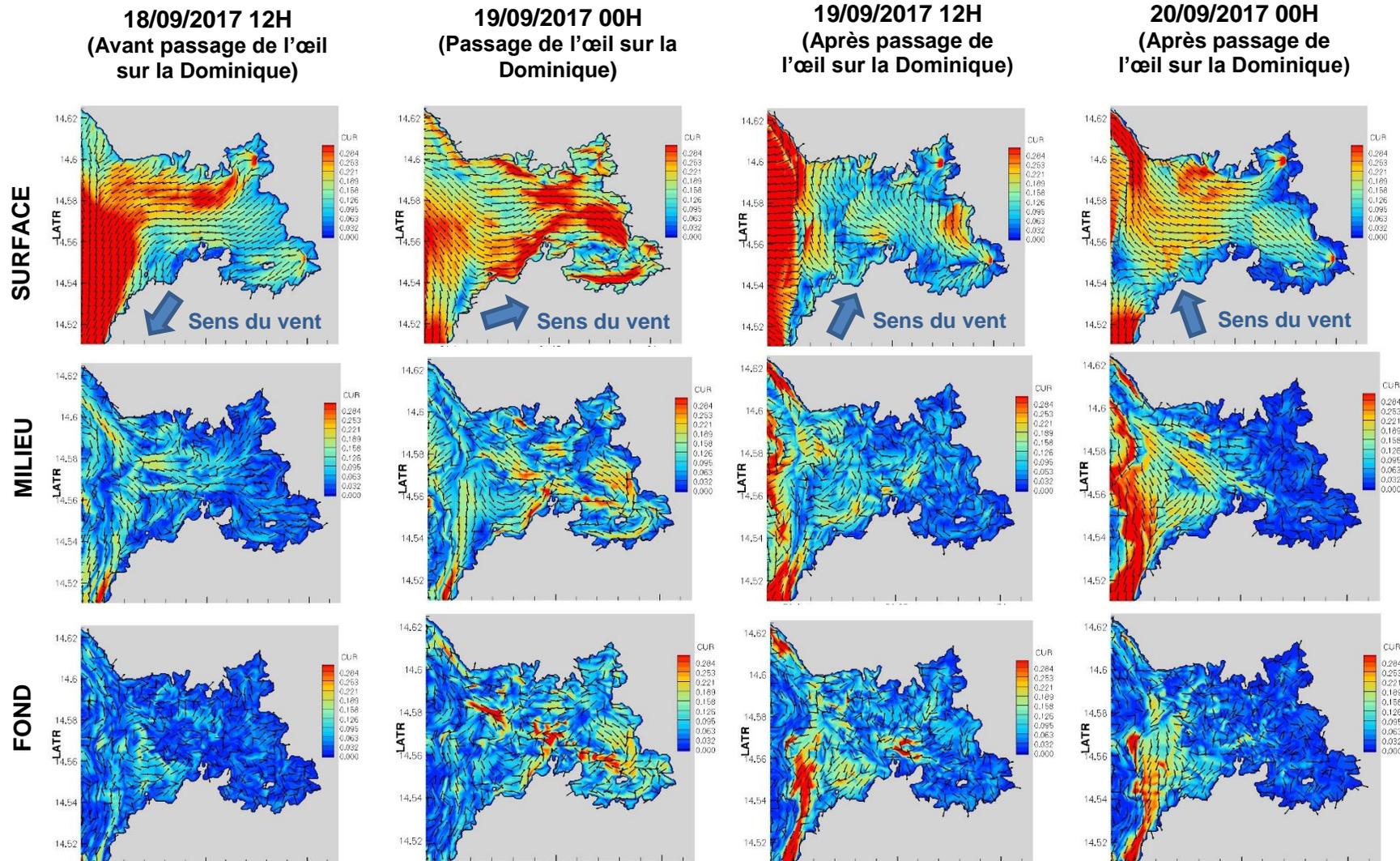


Figure 59. Courants simulés pendant le cyclone Maria.

5. Synthèse et conclusions

5.1. AGITATION

Les modélisations réalisées sont en bon accord avec les observations malgré une comparaison délicate du fait des limites instrumentales pour mesurer des conditions d'agitation aussi faibles. On notera toutefois une légère surestimation des hauteurs significatives des vagues pour le cyclone Maria.

Les conditions d'agitation hors épisode cyclonique sont globalement très peu énergétiques avec des valeurs moyennes (max) de l'ordre de 40 cm (70 cm) à l'entrée de la baie et moins de 15 cm (40 cm) en fond de baie. Elles montrent un fonctionnement bimodal avec la présence simultanée de clapot local, en particulier en journée, et de houles longues du large. Celles-ci proviennent de houles d'Est ayant contourné la Martinique mais aussi de houles de Nord-Ouest provenant des fronts froids de l'Atlantique Nord-Ouest. La présence de brise de terre diurne augmente le clapot dans la baie et entraîne une hauteur significative des vagues un peu plus importante en journée (de l'ordre de 10 cm).

En conditions cycloniques, les hauteurs simulées au pic sont comprises entre 2.5 m et 3 m à l'entrée de la baie et jusqu'à 1.5 m en fond de baie pour le cyclone Dean.

5.2. COURANTOLOGIE 3D

Le modèle mis en place montre un bon accord avec les mesures réalisées en carême et hivernage, et pendant le cyclone Maria. On note toutefois une sous-estimation des vitesses au fond en période d'hivernage, lorsque la colonne d'eau est fortement stratifiée. Les simulations réalisées sur l'année 2017, ainsi que sur des conditions idéalisées ont permis de compléter la connaissance existante sur la circulation et les courants dans la Baie de Fort-de-France.

Les courants dans la baie sont globalement faibles, de l'ordre de quelques centimètres par seconde à quelques dizaines de centimètres par seconde.

Les simulations réalisées ont montré que les courants de marée sont faibles (quelques centimètres par seconde), et que la circulation générale dans la baie est principalement contrôlée par le vent. Ce vent, venant principalement de l'est, pousse les masses d'eau de surface vers la sortie de la baie et génère, par une mécanique de compensation, des courants rentrant dans les couches plus profondes. Les eaux océaniques rentrent principalement par le chenal principal, cheminant dans la passe des Trois-Îlets et se divisent ensuite en deux branches dans la Cohé du Lamentin et dans la baie de Génipa dans laquelle elles génèrent un tourbillon contournant l'Île du Gros Ilet. Ce schéma peut s'inverser lorsque de forts vents viennent d'ouest (exemple : lors de cyclones comme Maria).

Même si les courants de marée sont négligeables, la marée a un effet indirect non négligeable : dans les couches de fond, la circulation induite par le vent se superpose aux courants potentiellement générés par des ondes internes qui sont excitées par la marée et apparaissent quand la stratification est importante, principalement pendant la période d'hivernage. Plus le vent est fort et la stratification faible, plus la circulation générale est bien installée et se retrouve également dans les couches de fond. Plus le vent est faible et la stratification importante, plus les ondes internes peuvent apparaître et générer une circulation plus chaotique, avec des courants au fond plus forts qu'en surface, caractérisés par une modulation semi-diurne.

En cas de crue, les eaux continentales issues de la Rivière Lézarde et de la Rivière Salée se propagent loin et peuvent atteindre la sortie de la baie en 12 heures. Les zones côtières les plus impactées par ces panaches (pour les conditions simulées) sont le secteur de la Pointe des Sables pour la Cohé du Lamentin et le littoral des Trois-Ilets pour la Baie de Génipa.

5.3. ACCESSIBILITE ET UTILISATION DE LA BDD

Les données de modélisation sont mises à disposition pour la communauté scientifique et les gestionnaires de la baie. Une interface de visualisation ainsi qu'une interface de téléchargement sont accessibles via le site internet du projet (<http://hydrosedmar.brgm.fr>).

6. Bibliographie

Ardhuin, F., Rogers, W.E., Babanin, A.V., Filipot, J., Magne, R., Roland, A., Van der Westhuysen, A., Queffelec, P., Lefevre, J., Aouf, L., Collard, F., 2010. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *J. Phys. Oceanogr.* 40(1), 917–1,941.

Bleck, R., An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. 2002. *Ocean Modelling*, 37, 55-88.

Bretschneider, C.L., 1972. A non-dimensional stationary hurricane wave model. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, vol. I, pp. 51–68

Castaing P., De Resseguier A., Julius C., Parra M., Pons J.C., Pujos M., Weber O. (1986) - Qualité des eaux et des sédiments dans la baie de Fort de France (Martinique). Rapport de contrat, 84.L.0896. Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine. Bordeaux, 93 pp.

Fairall C.W., Bradley E.F., Rogers D.P., Edson J.B., Young G.S., 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment.. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 101, NO. C2, 3747-3764.

Debreu L., Marchesiello P., Penven P., Cambon G. 2012. Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling* 49-50 - 1–21

Egbert, G.D., Erofeeva, S.Y. 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 19 - 183-204.

Gervais M. (2014) Mise en œuvre d'une plateforme de modélisation hydrodynamique pour les Antilles françaises. Rapport Ifremer.

HOLLAND G. (1980). An analytic model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, Vol. 108, pp 1212-1218.

Idier D., Le Roy M., Gervais M. et Cayocca F. (2014) – Modélisation hydro-sédimentaire de la baie de Fort-de-France : besoins des acteurs et programme technique. Rapport final. BRGM/RP-63433-FR, 87 p., 19 fig., 2 tabl., 7 ann.

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 Meteor. Society*, 91, 363-376. [doi:10.1175/2009BAMS2755.1](https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1)

Taïlamé, A.L., S. Lanini, S. (2019). Définition des volumes prélevables en Martinique. Rapport final. BRGM/RP-68883-FR, 45 p., 29 ill., 3 ann.

Lazure P., Salomon JC, Breton M. (1996) Subtidal circulation in Fort de France Bay, in: Small Islands Marine: Science and Sustainable Development. *Coastal and Estuarine Studies*, 51, 71-82.

- S. LECACHEUX, F. DESMAZE, D. IDIER, R. PEDREROS. (2018) – Projet HYDROSEDMAR : Synthèse et analyse des mesures hydro-sédimentaires réalisées dans la baie de Fort-de-France (2017-2018). Rapport final. BRGM/RP-68217-FR, 76 p., 42 fig., 5 tabl., 4 ann.
- Marchesiello, P., McWilliams, J.C. , Shchepetkin, A.F., 2001. Open boundary condition for long-term intergration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3, 1-20.
- Penven P., Marchesiello P., Debreu L., Lefevre J.. 2008. Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling and Software*, 2008, 23 (5), pp.660-662.
- Vincent L. (2017a) - Mesures hydro-sédimentaires dans le baie de Fort-de-France en Martinique, période de carême du 22/02/2017 au 04/04/2017. EON1496_Rapport_HydroSed_Careme_2017.
- Vincent L. (2017b) - Mesures hydro-sédimentaires dans le baie de Fort-de-France en Martinique, période hivernale du 13/09/2017 au 18/10/2017. EON1496_Rapport_HydroSed_Hiver_2017.
- Bretschneider, C.L., 1972. A non-dimensional stationary hurricane wave model. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, vol. I, pp. 51–68 ;
- Saha, S., S. Moorthi, H. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, R. Kistler, J. Wollen, D. Behringer, H. Liu, D. Stokes, R. Grumbine, G. Gayno, J. Wang, Y. Hou, H. Chuang, H. Juang, J. Sela, M. Iredell, R. Treadon, D. Kleist, P. VanDelst, D. Keyser, J. Derber, M. Ek, J. Meng, H. Wei, R. Yang, S. Lord, H. van den Dool, A. Kumar, W. Wang, C. Long, M. Chelliah, Y. Xue, B. Huang, J. Schemm, W. Ebisuzaki, R. Lin, P. Xie, M. Chen, S. Zhou, W. Higgins, C. Zou, Q. Liu, Y. Chen, Y. Han, L. Cucurull, R. Reynolds, G. Rutledge and M. Goldberg, 2010: The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1057.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model – *Ocean Modelling*, 9, 347-404.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C. 2003. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, NO. C3, 3090.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C. 2008. Accurate Boussinesq oceanic modeling with a practical, “Stiffened” equation of state. *Ocean Modelling*, 38, 41-70.
- SHOM (2013) Références altimétriques maritimes - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. ISBN 978-2-11-097286-6.
- Smagorinsky, J., General circulation experiments with primitive equations. 1963. *Monthly Weather Review*, vol. 91 pp.99-164.
- E.A. Sosa. First MODIS Images Catalog of Aves Ridge Solitons in the Caribbean Sea (2008-2013), 2016.
- Tolman, 2014: User manual and system documentation of WAVEWATCH- III version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMABTech.
- Vittecoq, B., Lachassagne P., Lanini, S., Ladouche, B., Marechal, J.C., Petit, V., 2007. Elaboration d’un système d’information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisation quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR, 221p, 87 ill., 8 ann.

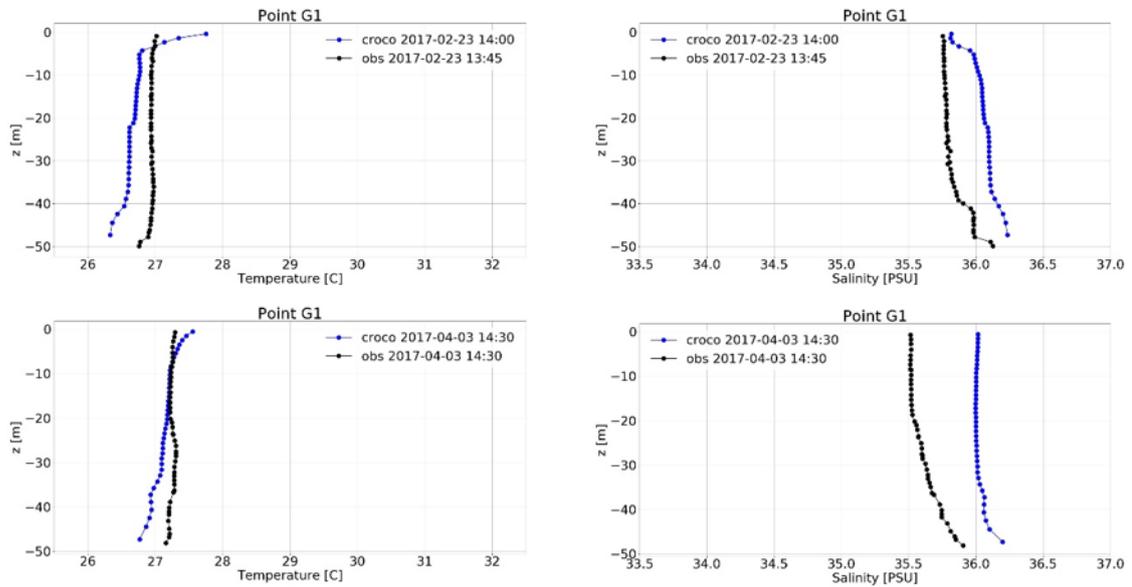
Xie L, Bao S., Pietrafesa L.J., Foley k., Fuentes M., 2006. A Real-Time Hurricane Surface Wind Forecasting Model: Formulation and Verification. *American Meteorological Society – Monthly Weather Review*, vol. 134 pp.1355-1370.

Warner, J.C., Sherwood, C.R., Arango, H.G., Signell R.P. 2005 Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*, 8, 81-113.

Annexe 1

Comparaison des modélisations aux profils de température et salinité des campagnes Hydrosedmar

POINT 1 – CHENAL NORD – CAREME (MARS 2017)



POINT 1 – CHENAL NORD - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

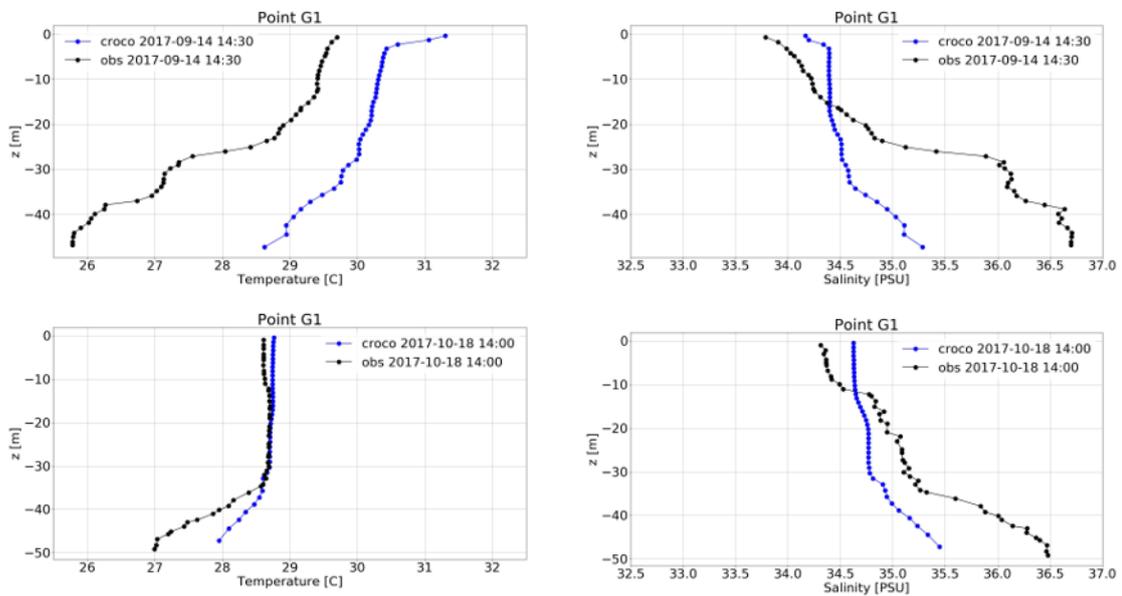
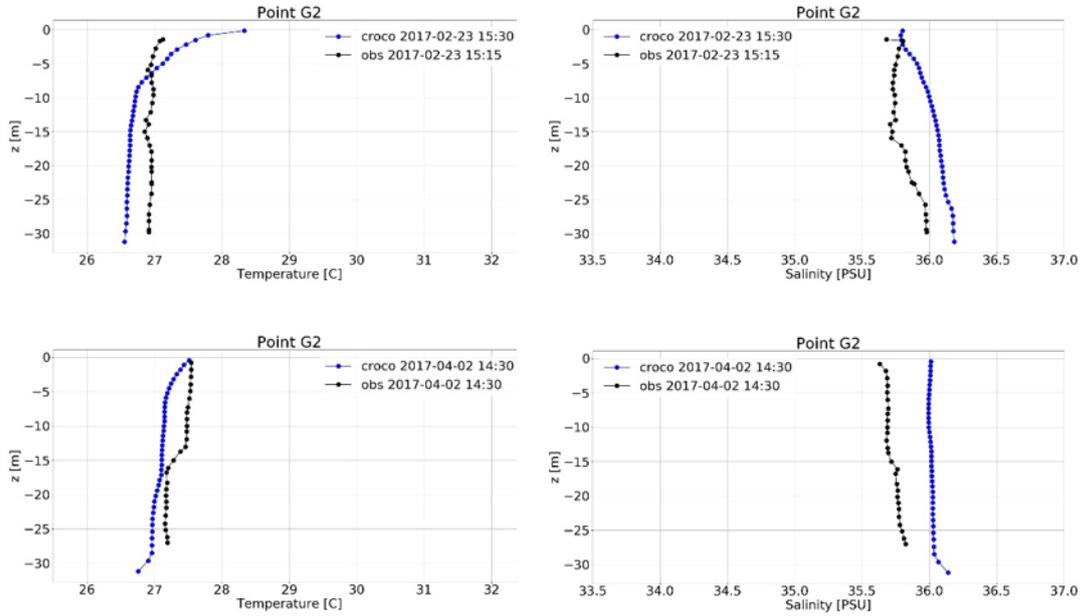


Figure 60. Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 1. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas : profils à la récupération de l'instrument.

POINT 2 – CENTRE - CAREME (MARS 2017)



POINT 2 – CENTRE - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

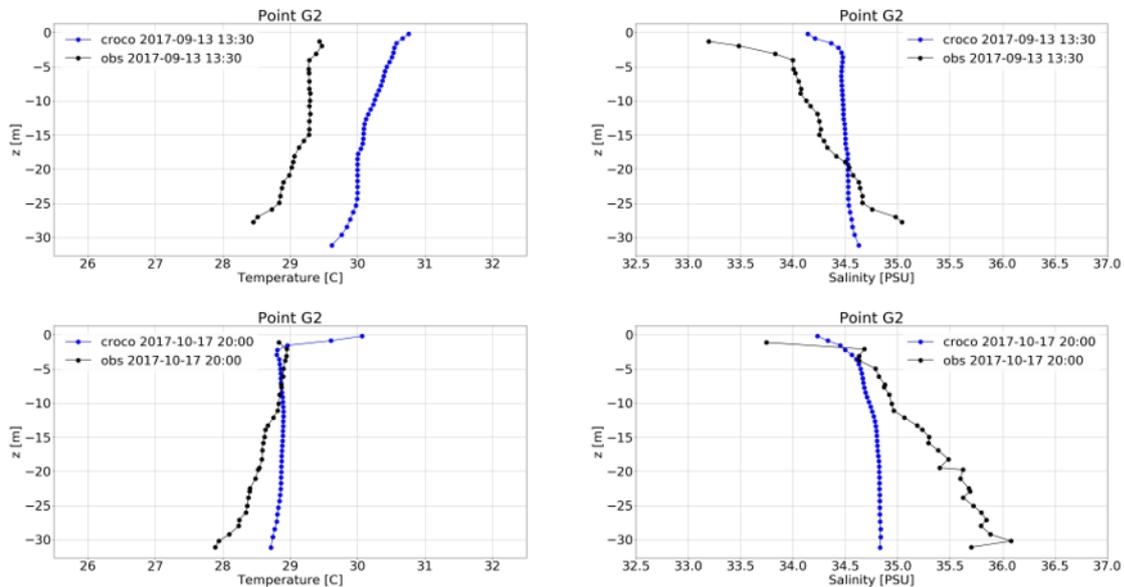
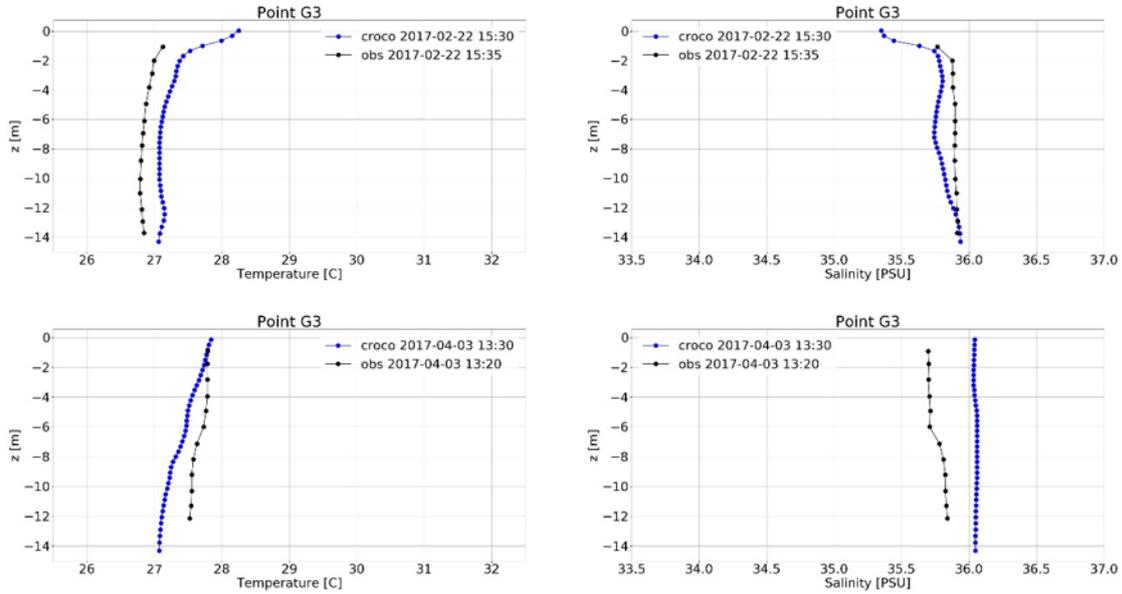


Figure 61. Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 2. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas: profils à la récupération de l'instrument.

POINT 3 – COHE LAMENTIN - CAREME (MARS 2017)



POINT 3 – COHE LAMENTIN - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

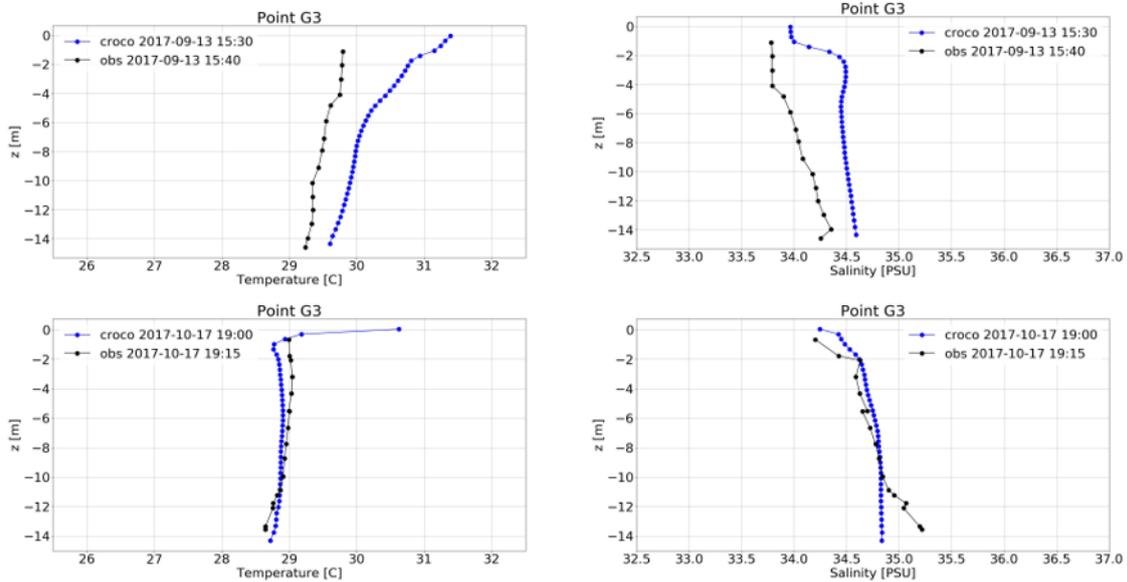
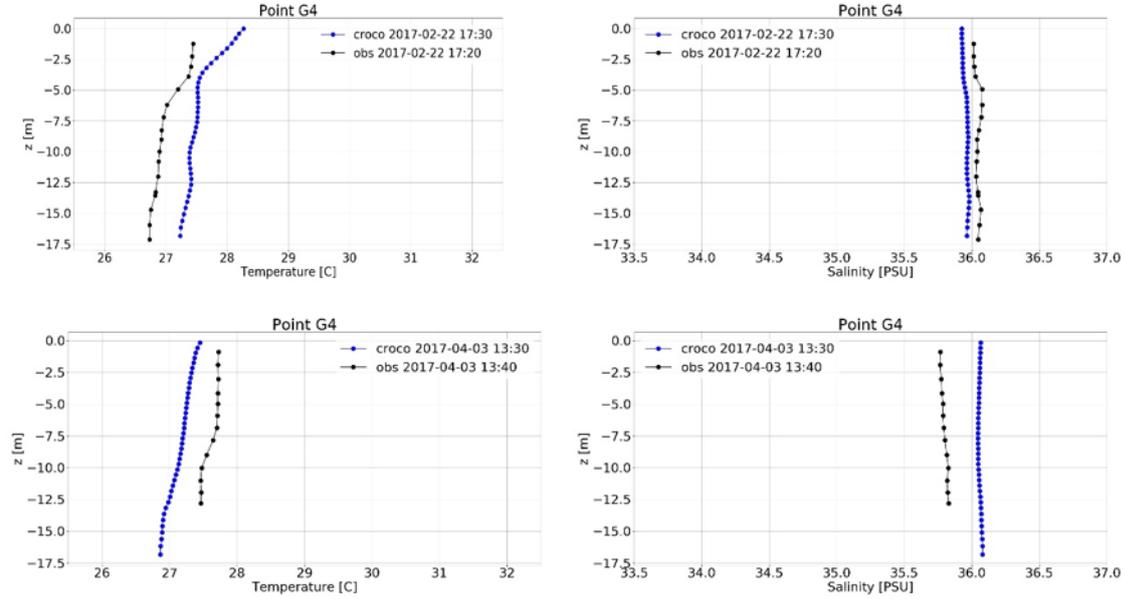


Figure 62.: Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 3. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas : profils à la recuperation de l'instrument.

POINT 4 – BAIE GENIPA - CAREME (MARS 2017)



POINT 4 - BAIE GENIPA - HIVERNAGE (SEPT-OCT 2017)

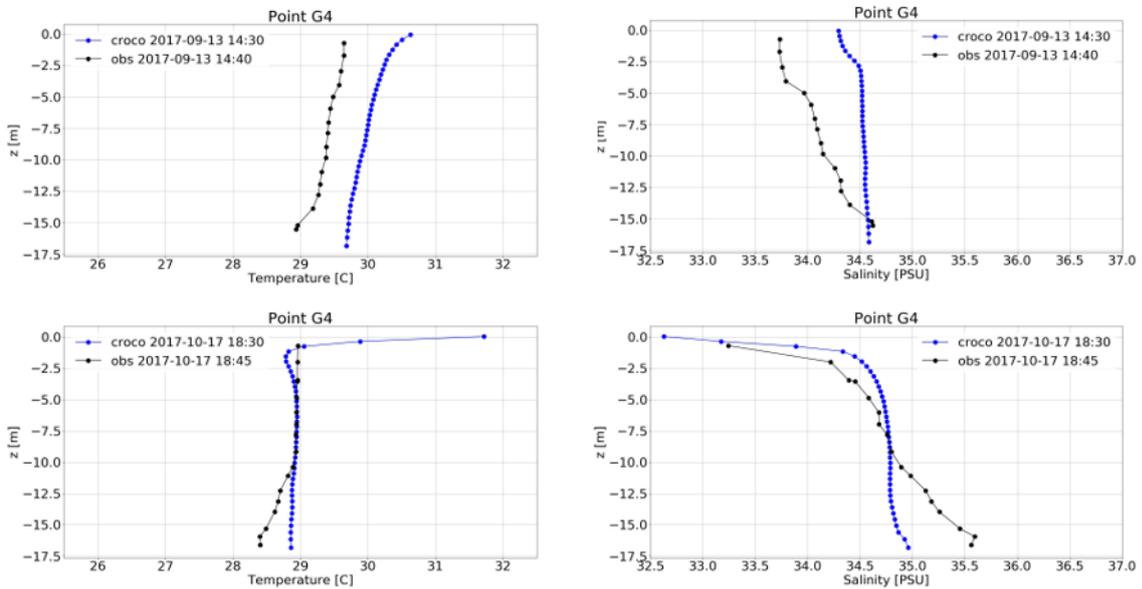


Figure 63. Comparaison des profils de température (gauche) et salinité (droite) mesurés et observés sur la colonne d'eau au Point 4. En haut : profils à la pose de l'instrument. En bas : profils à la récupération de l'instrument.

Annexe 2

Moyennes mensuelles de courants

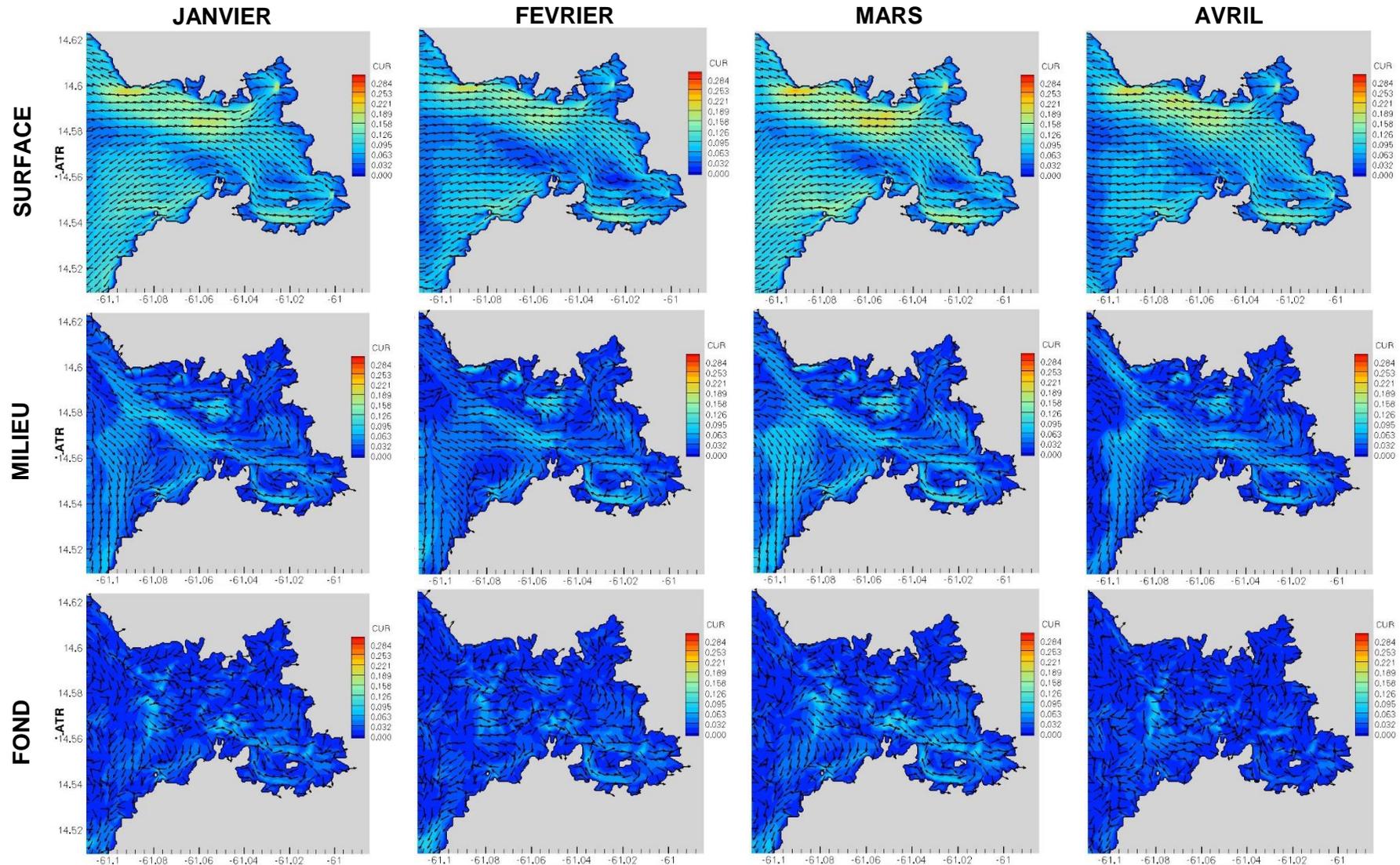


Figure 64. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (Janvier à Avril).

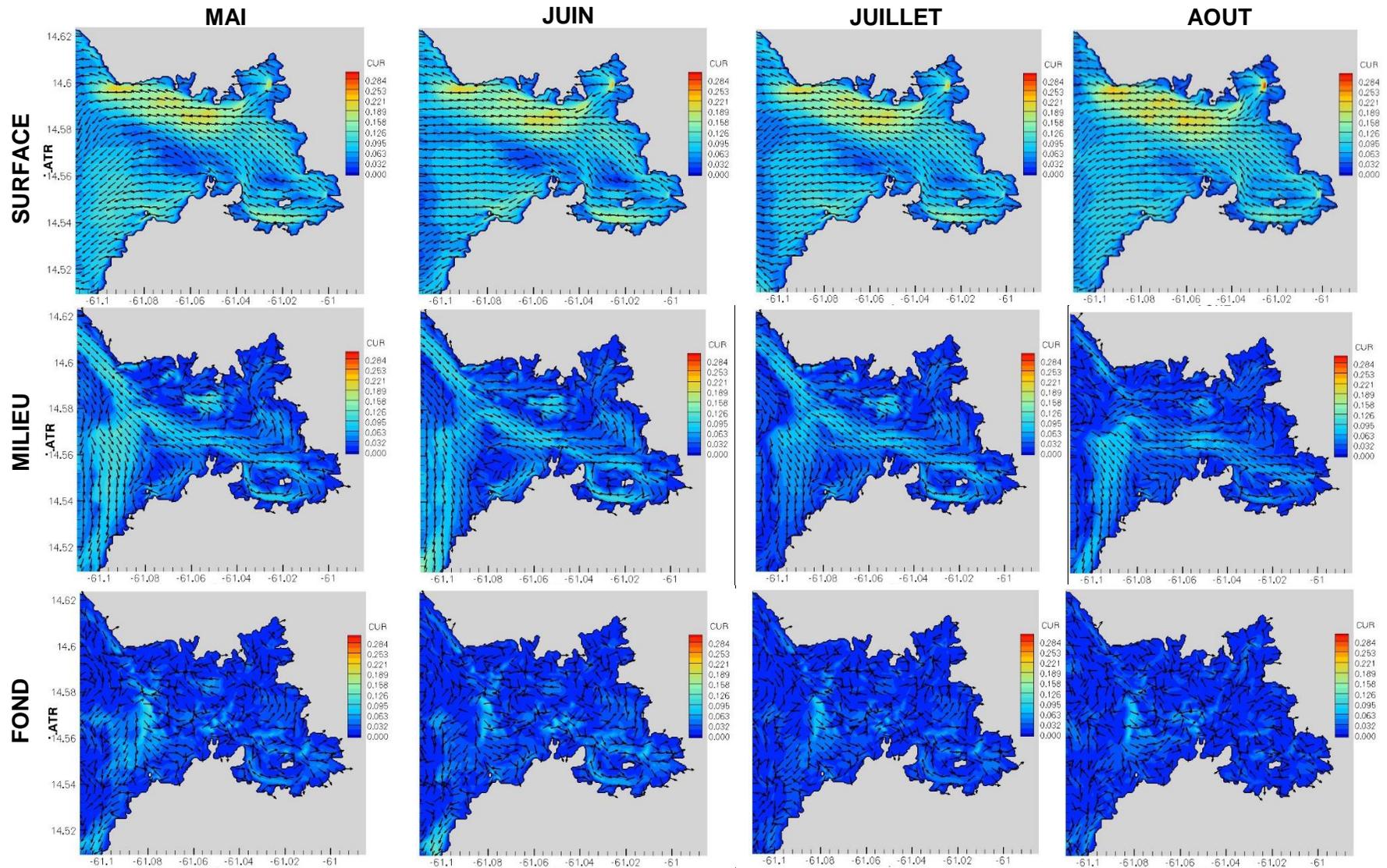


Figure 65. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (Mai à Août).

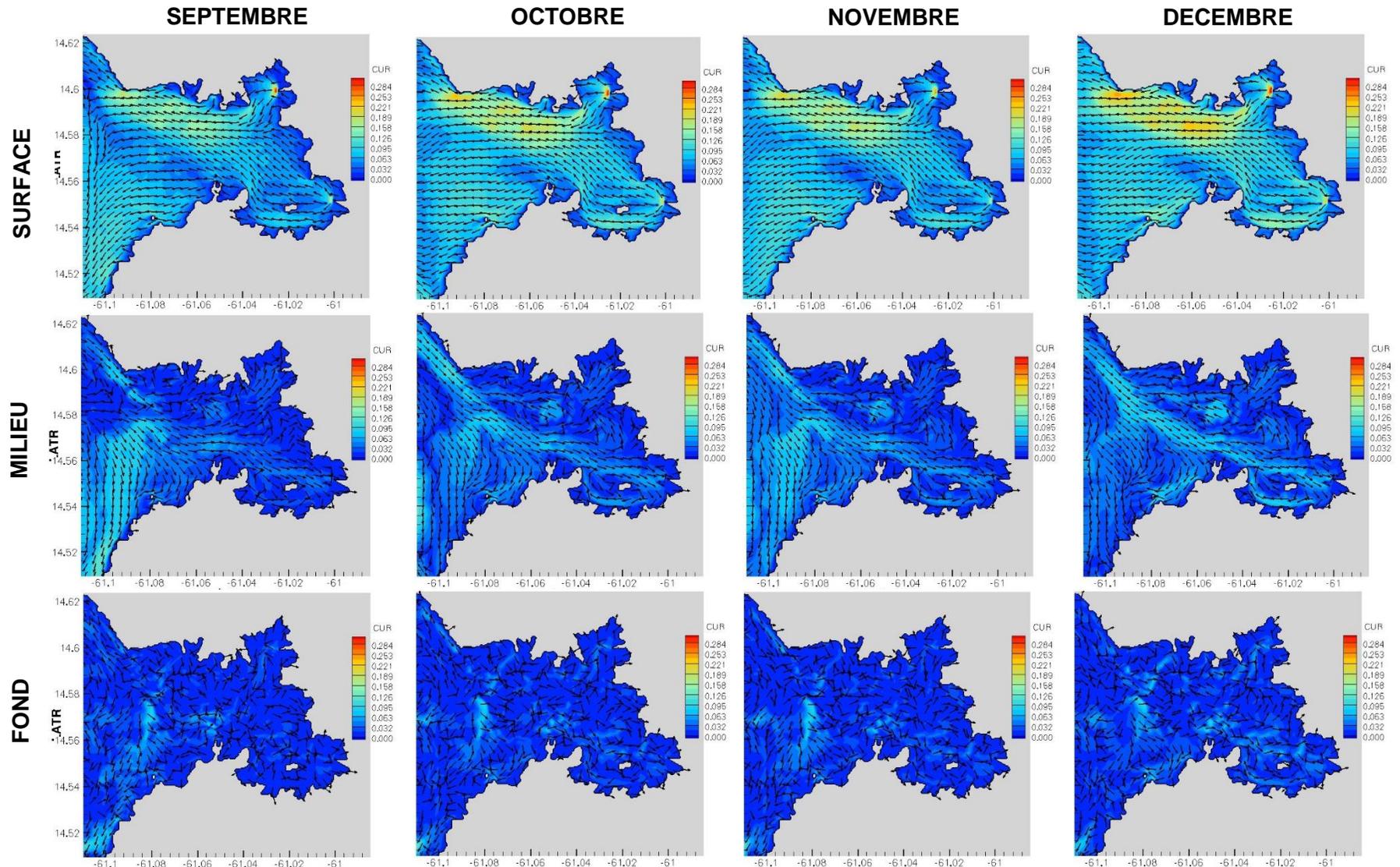


Figure 66. Moyennes mensuelles des courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France (Septembre à Décembre).

Annexe 3

Analyse des courants sur un cycle de marée en carême

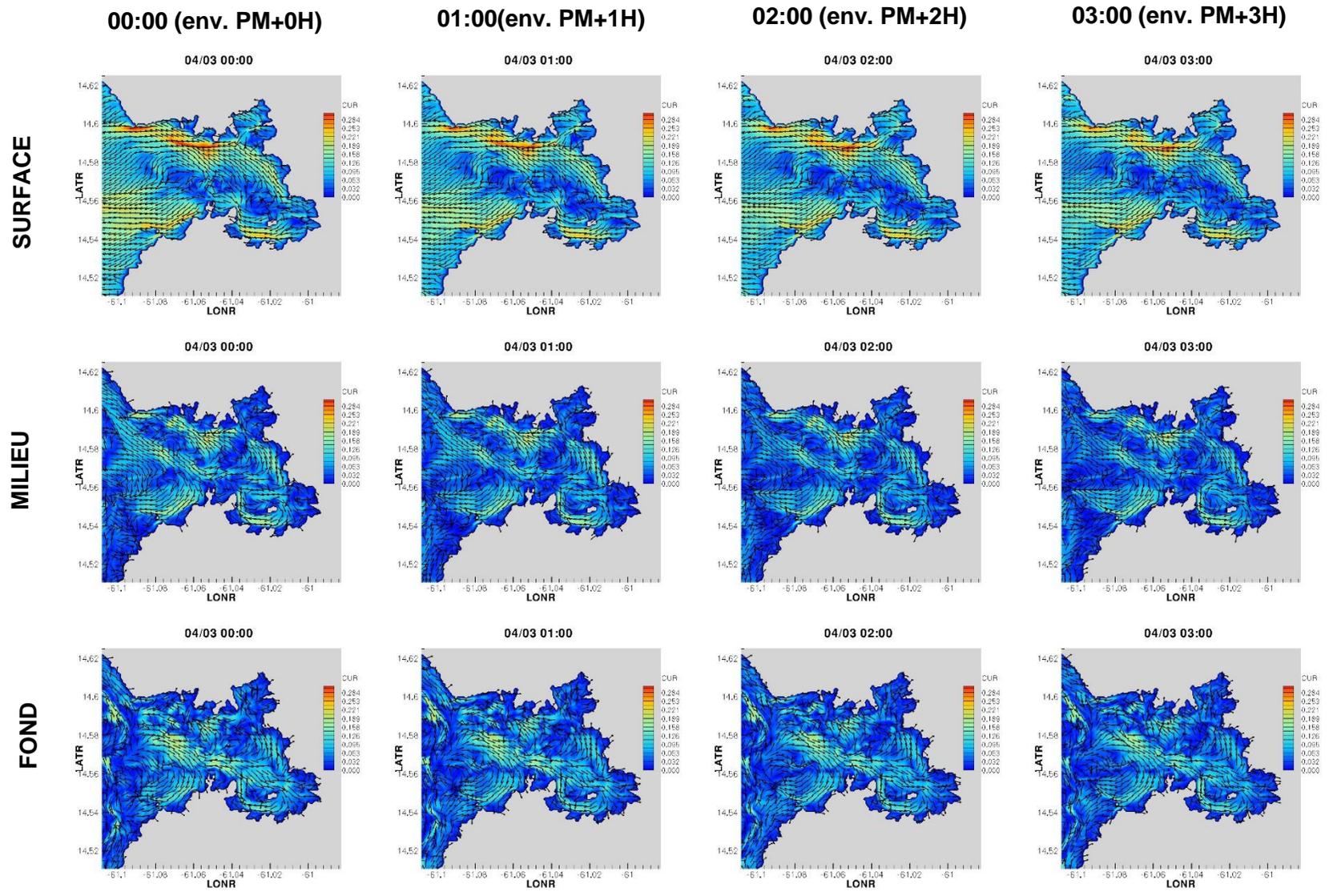


Figure 67. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/03/2017).

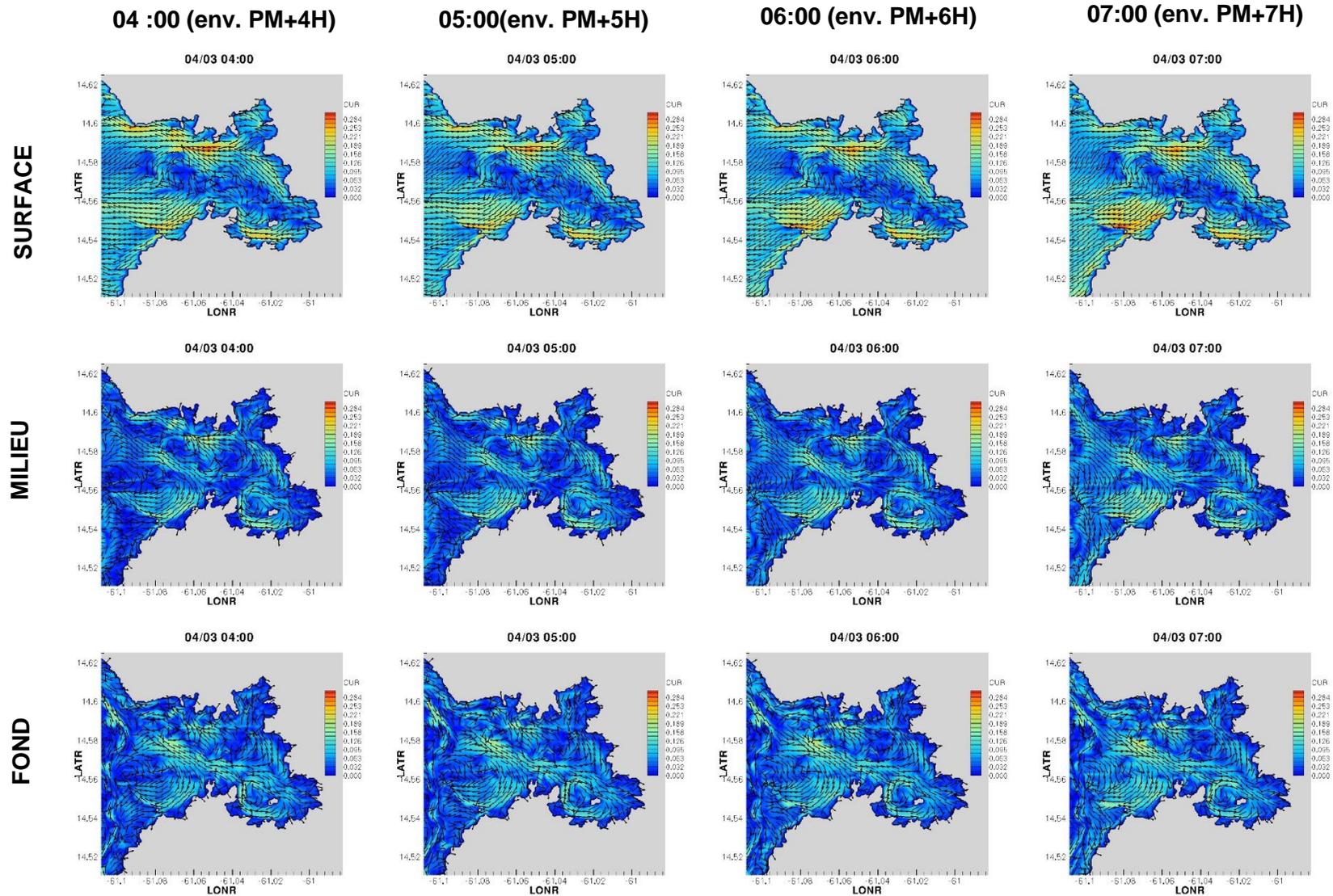


Figure 68. Courants (intensité en m.s⁻¹ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/03/2017).

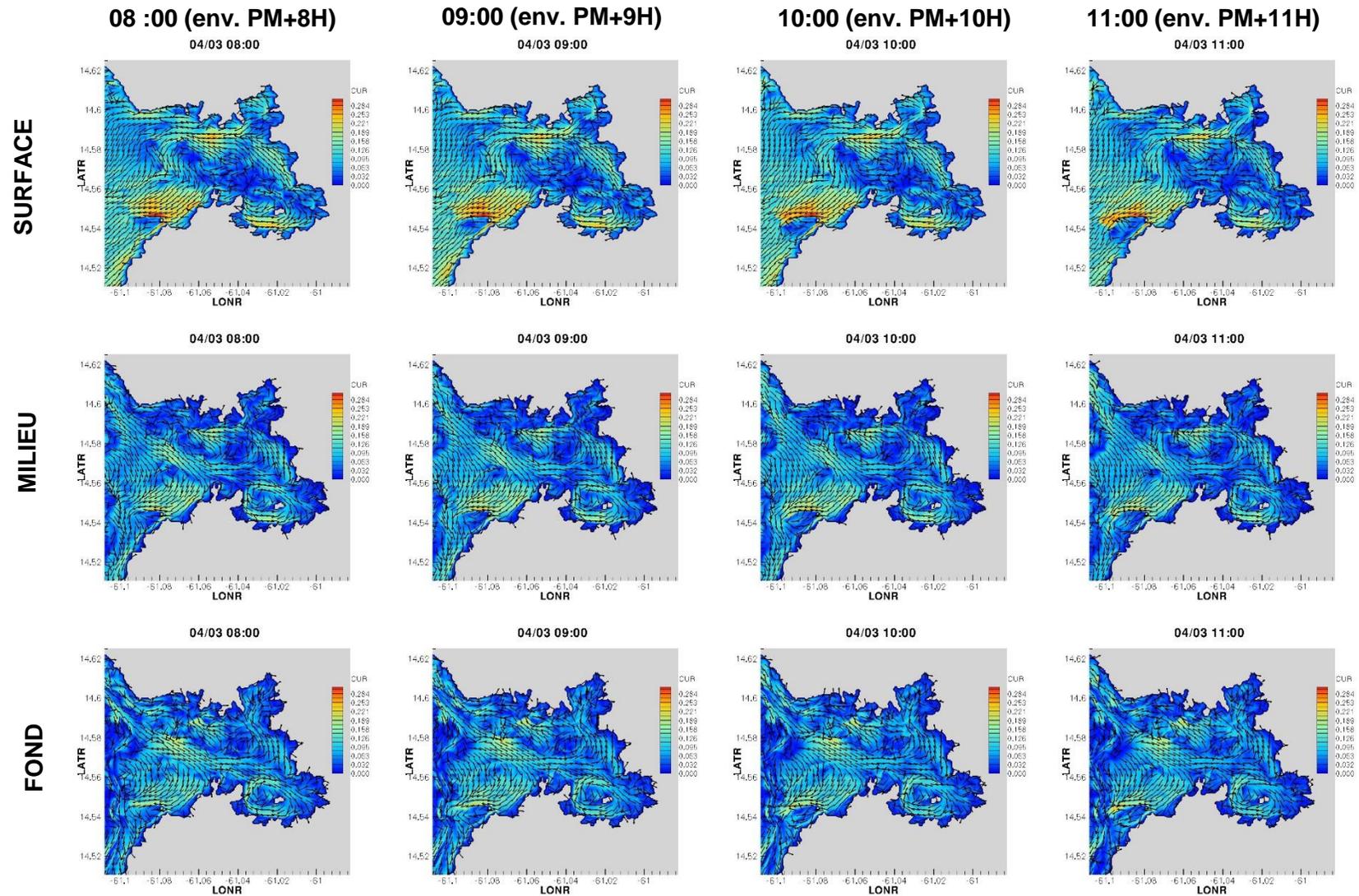


Figure 69. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/03/2017).

Annexe 4

Analyse des courants sur un cycle de marée en hivernage

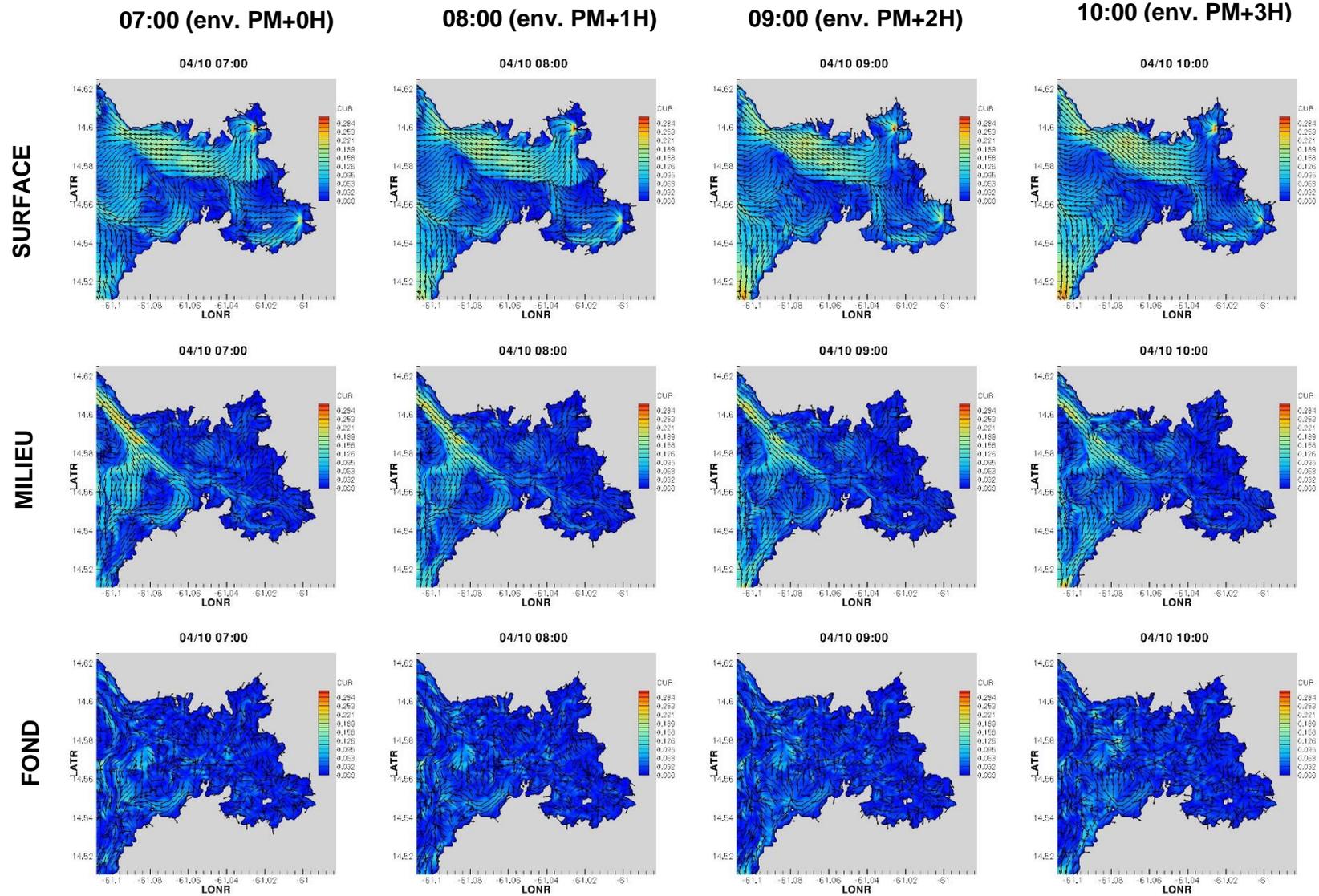


Figure 70. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/10/2017).

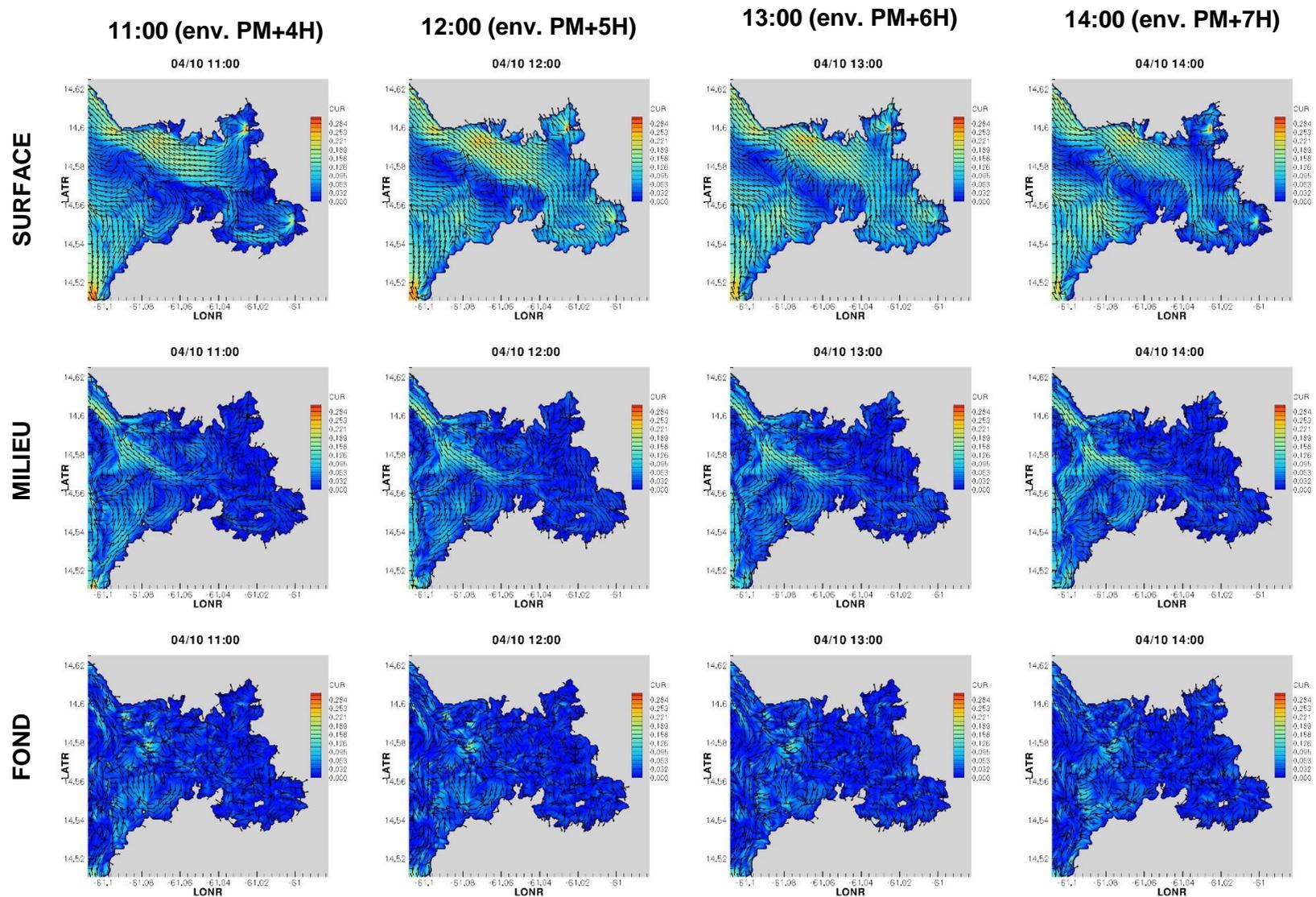


Figure 71. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/10/2017).

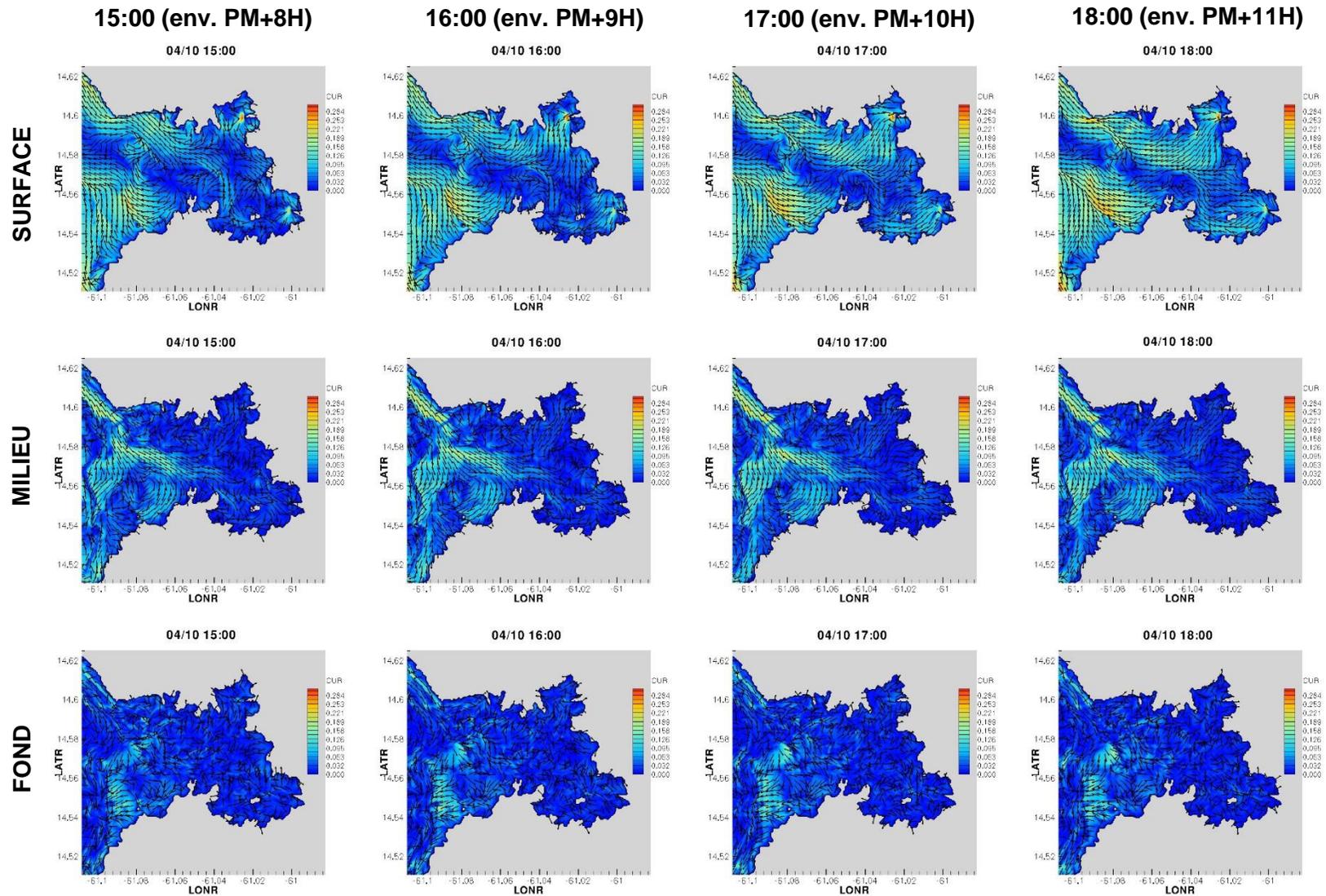


Figure 72. Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) de surface, milieu et fond dans la baie de Fort-de-France pour en cycle de marée (04/10/2017).

Annexe 5

Analyse des courants sur un cycle de marée avec un marnage de 50 cm

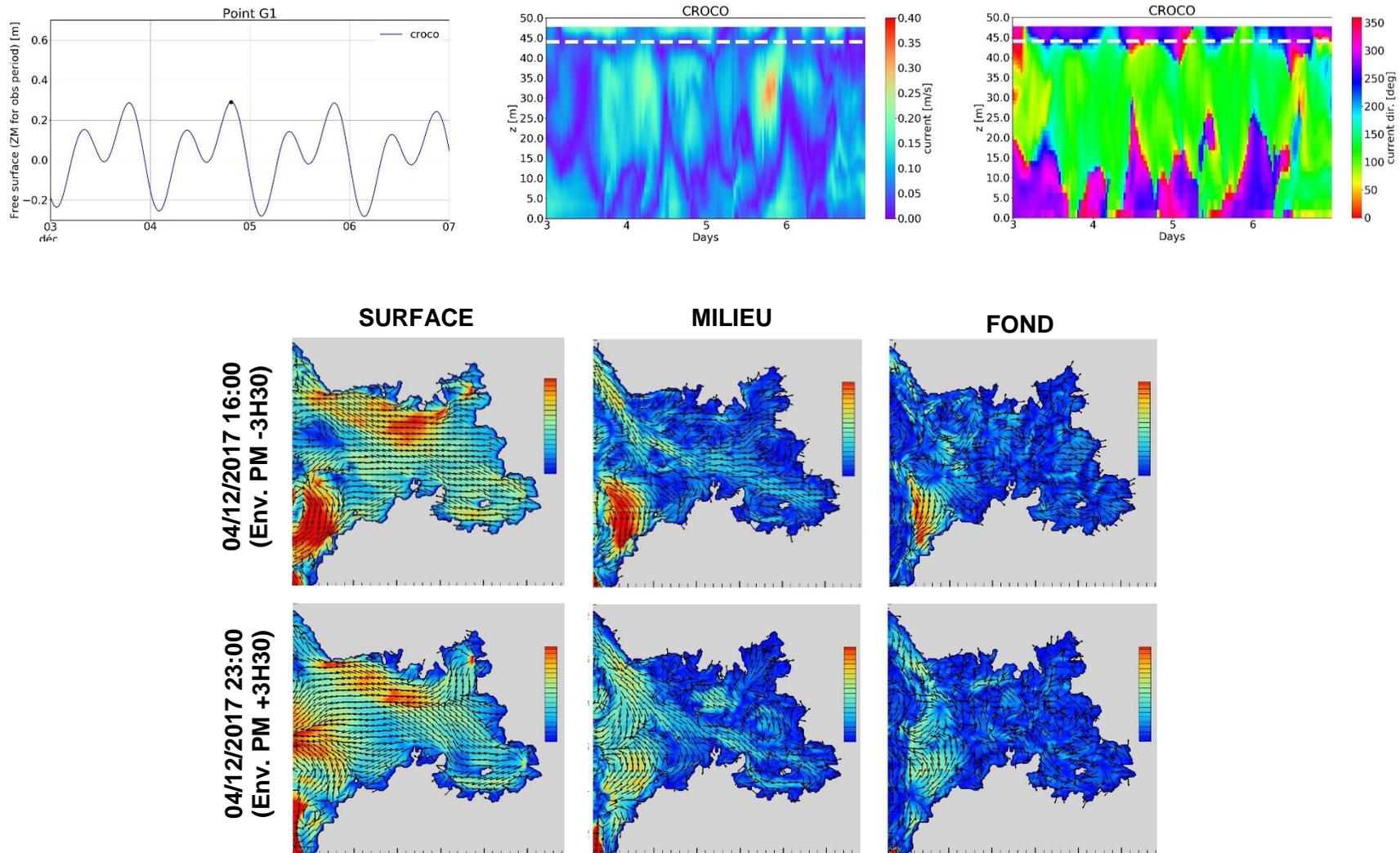


Figure 73. Haut : Niveaux d'eau et courants du 3 au 7 décembre (marnage d'environ 50 cm) simulés au Point 1. Bas : Courants (intensité en $m.s^{-1}$ et direction) le 4 décembre. P.M. est la pleine mer de référence indiquée par une point noir sur la serie du niveau d'eau (panel du haut) Figure 52.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de Martinique

4 lot. Miramar – Route Pointe des Nègres
97200 – Fort-de-France - Martinique

Tél. : 05 96 71 17 70 - www.brgm.fr