

DAEU du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay

Phase 2 – Définition de la zone d'immersion

Phase 2A : Elaboration d'un modèle de courantologie générale



PROJET FINANCÉ
par le fonds européen
de développement régional
Dans le cadre de REACT-EU :
dispositif de relance de l'Union en
réponse à la pandémie de COVID-19



Etablissement Portuaire de Saint-Martin

Rapport d'étude

Ce rapport a été préparé conformément au système qualité de DHI certifié ISO 9001 par Bureau Veritas

ISO 9001
Management System Certification
BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



DAEU du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay

Phase 2 – Définition de la zone d'immersion

Phase 2A : Elaboration d'un modèle de courantologie générale

Préparé pour Etablissement Portuaire de Saint-Martin
Représenté par M. Albéric Ellis, Directeur du port



*La Baie de la Potence, Saint-Martin
Photo : GAIA*

Chef de projet	Caroline TESSIER
Numéro de projet	21803656
Date de validation	26/05/2021
Révision	2.0 (Prise en compte des remarques de l'AMO)
Catégorie	Restreint



SOMMAIRE

1	Introduction	1
2	Le modèle régional de courantologie	3
2.1	La circulation générale influençant Saint-Martin	3
2.2	Emprise et résolution du maillage	5
2.3	Données bathymétriques utilisées pour la construction du domaine	7
2.4	Les forçages du modèle hydrodynamique	9
2.4.1	Le forçage atmosphérique	9
2.4.2	Les conditions limites marines	10
2.5	Paramétrisation du modèle hydrodynamique	13
2.6	Tests de sensibilité à la résolution du maillage	13
2.6.1	Résolution horizontale	13
2.6.2	Résolution verticale.....	15
2.7	Validation du modèle hydrodynamique.....	19
2.7.1	La circulation générale.....	19
2.7.2	Les niveaux d'eau	21
2.7.3	Les courants aux abords de Galisbay	24
3	Le modèle régional de propagation des vagues	29
3.1	Emprise et maillage du modèle de vagues	29
3.2	Les forçages du modèle de vagues	31
3.3	Paramétrisation du modèle de vagues	34
3.4	Validation du modèle de vagues	35
4	Analyse de la climatologie sur 2010-2020	36
4.1	Les conditions météorologiques	36
4.2	Les vagues autour de Saint-Martin	41
4.3	Les circulations autour de Saint-Martin	48
4.3.1	Conditions d'Alizés du Nord-Est	50
4.3.2	L'événement de Northers de début mars 2018	51
4.3.3	Variabilité des courants au large.....	54
4.3.4	Variabilité des courants dans le canal d'Anguilla.....	58
5	Analyse des conditions météo-océaniques sur la zone d'immersion	66
5.1	Les courants sur le site d'immersion.....	67
5.1.1	Cartographie des courants moyens et maximaux sur le site	67
5.1.2	Variabilité des profils de courants au point B2.....	69
5.1.3	Caractérisation des masses d'eau sur la colonne d'eau	72
5.1.4	Situations avec cisaillement vertical des courants.....	74
5.1.5	Percentiles des profils verticaux de courant sur l'année 2018	77
5.1.6	Comparaison des roses de courants aux différents points sur 2011-2020	80
5.2	Les vagues sur le site d'immersion.....	83
5.3	Les scénarios météo-océaniques à considérer pour les simulations de panaches turbides (en Phase 2C)	85

6	Identification de deux sites d'immersion potentiels	85
7	Conclusion - Perspectives	87

ANNEXES

A	Annexe A - Roses des courants au large, dans les zones potentielles d'immersion	1
B	Annexe B – Evolution des profils verticaux de courants à B2 de 2016 à 2020	1

FIGURES

Figure 1-1	Le projet d'aménagement et d'extension du Port de Commerce de Galisbay, esquisse SETEC (à Gauche) et le plan masse des opérations de dragage pour un chenal à -9m (à droite).	1
Figure 1-2	Localisation de la zone d'immersion pré-identifiée dans l'étude d'impact d'EGIS 2017.	1
Figure 2-1	Résultats du modèle HYCOM 1/12° : circulations et salinité de surface le 18 juillet 2020, du secteur Nord Brésil (fleuve Amazone) jusqu'à la mer des Caraïbes. L'encadré en rouge localise Saint-Martin et la zone d'influence considérée pour la construction du modèle régional MIKE 3D.	4
Figure 2-2	Morphologie de l'Est Caribéen (Bouysse, 2007)	5
Figure 2-3	Emprise du modèle régional hydrodynamique de Saint-Martin (MIKE 3D HD)	6
Figure 2-4	Illustration de la discrétisation verticale en sigma-z dans le modèle régional hydrodynamique de Saint-Martin (MIKE 3D HD)	6
Figure 2-5:	Données bathymétriques GEBCO extraites autour de Saint-Martin	7
Figure 2-6:	Données bathymétriques C-MAP extraites autour de Saint-Martin	8
Figure 2-7:	Données topo-bathymétriques LIDAR 2019 de Saint-Martin et Saint-Barthélemy (IGN-SHOM), source data.shom.fr	8
Figure 2-8	Rose des vents CFS 2010-2020 à Saint-Martin	9
Figure 2-9:	Courants de surface modélisés par HYCOM (à gauche) et CMEMS (à droite), situation du 21 Février 2020 à 12 UTC.	11
Figure 2-10:	Courants de surface modélisés par HYCOM (à gauche) et CMEMS (à droite), situation du 21 Février 2020 à 18 TU.	12
Figure 2-11:	Élévation de la surface libre et courants de surface modélisés par HYCOM (à gauche) et courants géostrophiques issus de Alvear-Azcarate et al. 2009 (à droite) ; situation du 13 octobre 2004 à 12h TU.	12
Figure 2-12	Présentation des deux maillages testés, avec une résolution à la côte de 550m (en haut) ou de 650m (en bas)	14
Figure 2-13:	Localisation des deux points d'extraction dans le canal d'Anguilla. Comparaison des séries temporelles des courants obtenues avec les maillages A et B, en surface et au fond aux deux points (« Channel » et « Nearshore »)	15
Figure 2-14	Localisation du point d'extraction des profils de température et salinité pour la comparaison des cas-tests sur la résolution verticale	16
Figure 2-15:	Profils verticaux de Salinité au point S, modélisés par MIKE (en rouge) et par HYCOM (en bleu), pour chaque cas-tests.	17
Figure 2-16:	Profils verticaux de Température au point S, modélisés par MIKE (en rouge) et par HYCOM (en bleu), pour chaque cas-tests.	18
Figure 2-17:	Modelled vertical profiles of salinity (left panel, red line)/ temperature (right panel, red line) extracted at Point E close to East model boundary compared with vertical profiles extracted from HYCOM (blue) for test Case 13	19
Figure 2-18:	Exemple de champs de courants de surface autour de Saint-Martin, résultats du modèle global HYCOM (à gauche) et du modèle régional MIKE 3D (à droite), le 14 janvier 2018 à 18h TU (en haut) et 21h TU (en bas).	20
Figure 2-19	Niveaux d'eau mesurés en 2002 au marégraphe de Saint-Martin (en m par rapport au ZH). Données validées mises à disposition sur le site REFMAR.	21
Figure 2-20	Comparaison des niveaux d'eau (en m par rapport au niveau moyen) modélisés (en bleu) et mesurés au marégraphe de Saint-Martin (en gris les valeurs brutes filtrés sur 1 heure, en rouge les données horaires validées par le SHOM), sur trois périodes en 2019, 2018 et 2017.	23
Figure 2-21	Localisation des stations de mesures de courants réalisées en 2012 et 2013 par HOCER.	24
Figure 2-22	Période du 24 novembre 2012 au 03 janvier 2013 – a) vitesse et direction du vent (CFSR) – b) niveau d'eau modélisé, pression atmosphérique (CFSR) – c) et d) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau modélisés – e) et f) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)	25

Figure 2-23	Période du 22 mars au 02 mai 2013 – a) vitesse et direction du vent (CFSR) – b) niveau d'eau modélisé et mesuré par l'ADCP, pression atmosphérique (CFSR) – c) et d) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau modélisés – e) et f) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER).....	26
Figure 2-24	Synthèse des données courantologiques de 1979 à 1997 (source : SAFEGE, 2013)	27
Figure 2-25	Modèle régional MIKE 3D - Courants de surface et au fond aux abords et dans la baie de Galisbay. Situation du 03 avril 2013 illustrant le décalage vers la droite des courants de surface par rapport au fond, dans la baie de Galisbay.	28
Figure 3-1:	Modèle régional de vagues de Saint-Martin – Emprise et maillage du domaine modélisé.....	30
Figure 3-2:	Modèle régional de vagues de Saint-Martin – Description de la résolution variable du maillage.....	30
Figure 3-3:	Modèle régional de vagues de Saint-Martin – Détail de la bathymétrie.	30
Figure 3-4	Le portail DHI Metocean On Demand, avec les données de houles issus du modèle Global MIKE 21 SW de DHI (1979-2019)	31
Figure 3-5	Modèle Global des vagues de DHI : Série temporelle des hauteurs significatives de houles à l'Est de St-Martin sur 2018 (en haut) ; rose des houles sur 1979-2018 (en bas à gauche) ; comparaison du modèle avec les observations d'altimétrie (en bas à droite).....	32
Figure 3-6	Roses des houles et de la mer de vent aux frontières Est (à droite) et Ouest (à gauche) du modèle régional de Saint-Martin, extraites du modèle global GWM de DHI	32
Figure 3-7	Localisation de la bouée 42060 NOAA, au Sud-Ouest du domaine modélisé	33
Figure 3-8	Comparison of observed and modelled significant wave height at NOAA Buoy 42060 (2010-2020): time-series comparison (upper left panel), histogram comparison (lower left panel) and scatter plot comparison for all data (upper right panel) and for H_{m0} lower than 2.5 m	33
Figure 3-9	Roses des houles mesurées à la bouée NOAA n°42060 sur 2010-2020, et modélisées par le modèle régional MIKE 21SW sur la même période.	34
Figure 4-1	Rose des vents annuelle (direction d'où il vient) et pourcentage d'occurrence, sur 2010-2020, à Saint-Martin – Données CFSR	37
Figure 4-2	Fréquences de dépassement des vitesses du vent CFSR sur 2010-2020 à Saint-Martin.....	37
Figure 4-3	Roses des vents à Saint-Martin sur 2010-2020, pour les quatre saisons – Données CFSR.....	38
Figure 4-4	Distribution des vitesses du vent à Saint-Martin sur 2010-2020, sur les quatre saisons – Données CFSR.....	38
Figure 4-5	Statistiques mensuelles 2010-2020 de la Pression atmosphérique à Saint-Martin – Données CFSR.....	39
Figure 4-6	Distribution de la Pression atmosphérique sur 2010-2020 à Saint-Martin, aux mois de Janvier (à gauche) et d'octobre (à droite) – Données CFSR.	39
Figure 4-7	Statistiques mensuelles 2010-2020 de la température de l'air (CFSR) à Saint-Martin	40
Figure 4-8	Distribution des températures de l'air en Janvier et en Octobre (CFSR, 2010-2020).....	40
Figure 4-9	Cumul mensuel moyen des Précipitations (mm) - Données CFSR, 2010-2020	40
Figure 4-10	Localisation des points d'extraction des résultats du modèle de vagues, sur la bathymétrie du modèle.	41
Figure 4-11	Champs de vagues du Nord-Est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : situation du 20/02/2018, en période d'Alizés de Nord-Est (en haut) et situation du 16/07/2018 en saison humide avec des vagues au large venant de l'Est (en bas).	42
Figure 4-12	Champs de vagues du secteur Nord-Nord-Est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : événement de Northers, situations au 3 et 7 mars 2018.....	43
Figure 4-13	Rose des vagues (direction d'où elles viennent) <u>au point P3-NE</u> et tableau des fréquences d'occurrence associées (%), sur 2010-2020	44
Figure 4-14	Rose des vagues <u>au point P4-NW</u> et tableau des fréquences d'occurrence associées (%), sur 2010-2020	45
Figure 4-15	Rose des vagues <u>au point P5-Détroit</u> et tableau des fréquences d'occurrence associées (%), sur 2010-2020	46
Figure 4-16	Roses des vagues 2010-2020 à <u>P4-NW</u> (à gauche) et à <u>P3-NE</u> (à droite) pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Août-Novembre.	47
Figure 4-17	Localisation des points d'extraction des courants (P1 à P6), sur la bathymétrie du modèle.	48
Figure 4-18	Distribution des courants de surface à P1, P2, P3 et P4 sur la période 2011-2020 (histogramme et courbe cumulative avec percentiles 5%, 25%, 50%, 75% et 95%).....	49

Figure 4-19	Champs de courants de surface autour de Saint-Martin, en condition d'Alizés renforcés le 22/02/2018 à 14h.	50
Figure 4-20	Rose des vents (à gauche, direction d'où il vient) et série temporelle des composantes Uw, Vw du vent, du 24 février au 15 mars 2018.	51
Figure 4-21	Champs de courants de surface autour de Saint-Martin, exemple de deux situations moins fréquentes : les courants portant au Sud-Est (le 04/03/2018 à 19h, en haut) et les courants portant au Sud-Sud-Ouest (situation transitoire du 05/03/2018 à 02h en bas).	52
Figure 4-22	Champs de courants de surface autour de Saint-Martin, exemple de deux situations fréquentes : les courants portant vers l'Ouest/Sud-Ouest (le 06/03/2018 à 18h, en haut) et les courants portant au Nord-Ouest (le 09/03/2018 à 20h en bas).	53
Figure 4-23	Roses des courants 2011-2020 en surface (en haut) et au fond (en bas) aux points d'extraction P2-Ouest (à gauche) et P3-Est (à droite). La direction indique celle vers où les courants portent.	54
Figure 4-24	Roses de courants 2011-2020 à P2-Ouest, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.	56
Figure 4-25	Roses de courants 2011-2020 à P3-Est, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.	57
Figure 4-26	Courant de surface (en haut) et au fond (en bas) dans le canal d'Anguilla, le 20/02/2018 à 21h. Situation par vent d'Alizés du Nord-Est.	59
Figure 4-27	Courant de surface (en haut) et au fond (en bas) dans le canal d'Anguilla, le 20/02/2018 à 21h. Situation par vent de Nord-Ouest (Norther)	60
Figure 4-28	Evolution des profils verticaux de courant au point P4-Détroit, du 02 au 12 mars 2018. Rotation des vents au secteur Ouest (3 mars), Nord-Ouest (4mars) , Nord (6 mars) puis retour au secteur Nord-Est le 7 mars et Est le 8 mars.	61
Figure 4-29	Roses des courants (direction vers où il porte) 2011-2020 en surface (en haut) et au fond (en bas) aux points d'extraction P1-Centre (à gauche) et P4-Détroit (à droite). La direction indique celle vers où les courants portent.	61
Figure 4-30	Roses des courants 2011-2020 en surface (en haut) et au fond (en bas) aux points d'extraction P6-Galisbay Ouest (à gauche) et P5-Galisbay Est (à droite). La direction indique celle vers où les courants portent.	63
Figure 4-31	Roses de courants 2011-2020 à P4-Détroit, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.	64
Figure 4-32	Roses de courants 2011-2020 à P6-Galisbay Ouest, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.	65
Figure 5-1	Localisation de la zone d'immersion pré-identifiée dans l'étude d'impact d'EGIS 2017. La zone pressentie dans le dossier PRO d'EGIS (2017) est localisée un peu plus au Sud-ouest de cette zone, en dehors des câbles sous-marins. Les analyses des résultats du modèle régional MIKE 3D ont été réalisées sur un secteur plus étendu, zone indiquée en pointillés orange.	66
Figure 5-2	Localisation des points d'extraction dans le secteur d'immersion, sur la bathymétrie du modèle régional de Saint-Martin. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé noir.	67
Figure 5-3	Cartographie des courants moyens (en haut) et maximaux (en bas) en 2018, dans la première couche de surface. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé. Les points d'extraction sont indiqués par les carrés blancs.	68
Figure 5-4	Cartographie des courants moyens (en haut) et maximaux (en bas) en 2018, dans la première couche proche du fond. (Attention, l'échelle de couleur n'est pas la même que pour les courants de surface)	69
Figure 5-5	Evolution des profils verticaux de Courants, Température et salinité sur 2018 au point B2. Les années 2016 à 2020 sont présentées en Annexe B.	70
Figure 5-6	Zoom de la Figure 5-5 à B2, du 2 février au 11 mars (en haut) et du 8 mai au 8 juin (en bas). Les encadrés en jaune ciblent les événements analysés dans la section 5.1.3.	71
Figure 5-7	Profils verticaux de Courant (vitesse, direction), Température et Salinité, extraits au point B2 le 20 février et le 3 mars 2018.	73
Figure 5-8	Profils verticaux de Courant (vitesse, direction), Température et Salinité, extraits au point B2 le 22 mai 2018.	74

Figure 5-9	Modèle MIKE 3D - Champs de courant de surface (en haut) et à ~120m de profondeur le 22/02/2018 à 08h. Les coupes verticales sont indiquées en blanc (T1) et en vert (T2).....	75
Figure 5-10	Coupes verticales extraites du modèle MIKE 3D dans l'Ouest de Saint-Martin, T2 (en haut) et T1 (en bas), illustrant les cisaillements de courants sur la verticale.	75
Figure 5-11	Modèle MIKE 3D - Champs de courant de surface (en haut) et à ~120m de profondeur le 22/02/2018 à 08h. Les coupes verticales sont indiquées en blanc (T1) et en vert (T2).....	76
Figure 5-12	Coupes verticales extraites du modèle MIKE 3D dans l'Ouest de Saint-Martin, T2 (en haut) et T1 (en bas), illustrant les cisaillements de courants sur la verticale.	76
Figure 5-13	50 ^{ième} , 75 ^{ième} et 90 ^{ième} percentiles des profils des courants en 2018 aux points B1, B2 et B3.....	78
Figure 5-14	50 ^{ième} , 75 ^{ième} et 90 ^{ième} percentiles des profils des courants en 2018 aux points B6 à B9.	79
Figure 5-15	Localisation des points d'extraction dans le secteur d'immersion, sur la bathymétrie du modèle régional de Saint-Martin. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé noir.	80
Figure 5-16	Roses des courants à B2 et B6, en subsurface (-5m), à -120m/-110m, -260m/-210m et -460m/-310m.....	81
Figure 5-17	Roses des courants à B0 et B7, à -5m, à -110m/-120m, -210/-260m et -310/-460m	82
Figure 5-18	Roses des Vagues saisonnières au point P1-Ouest sur 2010-2020.....	83
Figure 5-19	Exemple de champs de vagues du Nord-Est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla, le 20/02/2018 (en haut) et le 01/03/2018 (en bas).	84
Figure 6-1	Localisation des deux sites d'immersion proposés pour les opérations de clapages : B6 et B2-B8. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé noir.	86
Figure 6-2	Densité du trafic maritime en 2019 (Tous navires) à l'Ouest de Saint-Martin, et localisation des deux zones potentielles d'immersion (carrés blancs).	86

TABLEAUX

Tableau 2-1	Synthèse des spécificités et de la paramétrisation du modèle régional de courantologie de Saint-Martin MIKE 3D HD.....	13
Tableau 2-2	Caractéristiques des deux maillages testés	14
Tableau 2-3	Liste des cas-tests réalisés sur la résolution verticale du modèle hydrodynamique MIKE 3D	16
Tableau 2-4	Références Altimétriques à Saint-Martin (SHOM, RAM 2019). PHMA : Plus Hautes Mer Astronomiques ; PBMA : Plus basses Mers Astronomiques ; NM : Niveau Moyen ; ZH : Zéro Hydrographique.	21
Tableau 3-1	Synthèse des spécificités et de la paramétrisation du modèle régional de vagues de Saint-Martin MIKE 21 SW.....	35
Tableau 4-1	Percentiles des courants (m/s) aux points d'extractions sur 2011-2020.....	49
Tableau 4-2	Fréquence d'occurrence des courants de surface aux points P2-Ouest et P3-Est, sur 2011-2020.....	55
Tableau 4-3	Fréquence d'occurrence des courants de surface aux points P1-Centre et P4-Détroit, sur 2011-2020.....	62

1 Introduction

L'établissement Portuaire de Saint-Martin souhaite réaliser un projet d'extension du Port de Commerce de Galisbay et l'aménagement d'un Quai Croisière (Figure 1-1). Ce projet est associé à des opérations de dragages d'un chenal d'accès au port, dont la cote retenue est finalement de -9m au lieu de -12m dans le projet initial (Etude EGIS 2017).

Le programme actuel prévoit un dragage/déroctage de 317 000 m³ de sable (à valoriser dans le terre-plein), 103 000 m³ d'argile à claper en mer et 203 000 m³ de calcaire (dont 78 500 m³ à claper). Le site d'immersion pressentie dans l'étude d'impact EGIS 2017 est situé à l'Ouest de Saint-Martin, par des fonds de 400-600m, à environ 18km du port de commerce (Figure 1-2).



Figure 1-1 Le projet d'aménagement et d'extension du Port de Commerce de Galisbay, esquisse SETEC (à Gauche) et le plan masse des opérations de dragage pour un chenal à -9m (à droite).

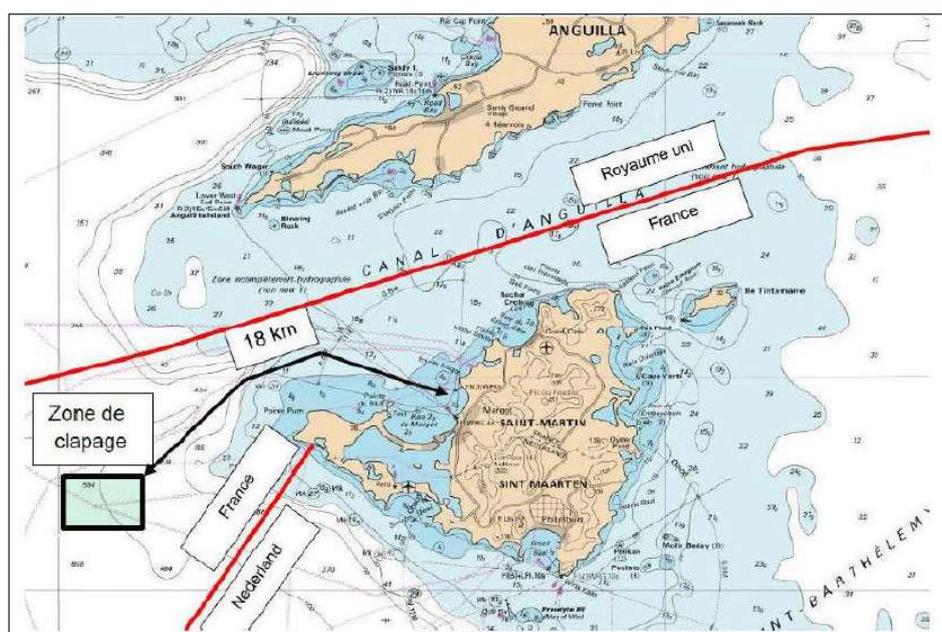


Figure 1-2 Localisation de la zone d'immersion pré-identifiée dans l'étude d'impact d'EGIS 2017.

Dans ce cadre, un Dossier d'Autorisation Environnementale Unique (DAEU) doit être réalisé conformément au Code de l'Environnement. Le groupement GAIA – Impact-Mer – DHI – Birds&Birds a été mandaté pour réaliser les études réglementaires et assurer une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour la passation et le suivi des études d'investigations océanographiques et du milieu biologique.

DHI est en charge des études de modélisations hydro-sédimentaires dans le but d'évaluer les impacts potentiels des panaches turbides générés lors des opérations de dragages dans la baie de Galisbay mais également au large lors des clapages. Ces études s'intègrent dans deux phases principales du projet :

- Phase 2 : Choix de la zone d'immersion
 - Phase 2A : Mise en place d'un modèle régional de Courantologie (et de vagues) pour avoir une compréhension globale des conditions météo-océaniques au large et devant Galisbay
 - Phase 2C : Modélisation de la dispersion des panaches turbides sur deux zones d'immersion potentielles pour alimenter l'analyse multicritères devant mener au choix de la zone d'immersion.

- Phase 5 : Mise en place d'un modèle local à plus haute résolution pour réaliser, pour plusieurs scénarios météo-océaniques :
 - Modélisations plus précises des opérations de clapages au large
 - Modélisations des panaches turbides générés lors des travaux de dragages, pour les différentes méthodes et les différents matériaux dragués
 - Etude de l'ensablement du chenal et des bassins portuaires, estimation des dragages d'entretien

- En tranche Optionnelle 3 : Modélisation du cycle complet des dragages-immersions sur la saison complète des opérations.

Ce rapport présente les résultats de la Phase 2A, consistant à mettre en place un modèle régional de courantologie et de propagation des vagues autour de Saint-Martin et à simuler une période récente de 10 années pour analyser la variabilité des conditions météo-océaniques sur le site d'immersion potentiel et aux abords de la baie de Galisbay.

La présentation des modèles et leur validation avec les données disponibles à ce jour sont présentées en section 2 (modèle de courantologie) et en section 3 (modèle de vagues). L'analyse de la dynamique autour de Saint-Martin et de la climatologie, à partir des résultats sur 2010-2020, est présentée en section 4.

Enfin, en section 5, les conditions météo-océaniques ont été analysées plus finement dans le secteur Ouest de Saint-Martin, pour évaluer la dynamique en plusieurs points et définir deux zones potentielles d'immersion où seront ensuite modélisés les panaches turbides en Phase 2C.

2 Le modèle régional de courantologie

Le modèle régional de courantologie mis en place autour de Saint-Martin est le modèle MIKE 3 HD FM de la suite logicielle MIKEbyDHI©. Il est basé sur un maillage flexible (à résolution variable) et a été développé pour les applications océanographiques, du large jusqu'à la côte et les environnements estuariens.

Pour l'étude de la dynamique autour de Saint-Martin, le modèle régional MIKE 3D est ici emboîté dans le modèle de circulation grande échelle HYCOM GOFS 3.1 de résolution 1/12°. Ce système d'emboîtement de modèles avec augmentation de la résolution (« downscaling ») est réalisé en configuration réaliste, c'est-à-dire que tous les paramètres les plus importants dans la résolution des équations primitives de la dynamique océanique (le forçage atmosphérique et les conditions aux limites) proviennent d'un modèle déterministe opérationnel, et non de données statistiques ou de climatologie.

Le modèle régional de courantologie autour de Saint-Martin a été utilisé pour simuler une période de 10 années, de janvier 2011 à décembre 2020. Les sorties du modèle sont sauveées à un pas de temps horaire sur l'ensemble du domaine, en 3D.

Cette section 2 présente plus en détail les caractéristiques du modèle (bathymétrie, forçages, etc.) et sa validation avec les données disponibles à ce jour (section 2.7). Les analyses des résultats sont présentées en section 4 à 6.

***MIKE 3 HD** constitue le cœur de la suite logicielle MIKE 3 en fournissant les paramètres hydrodynamiques nécessaires aux autres modules. C'est un modèle tridimensionnel pour les calculs hydrodynamiques à surface libre qui permet de simuler les variations du niveau d'eau et la dynamique 3D liée aux processus baroclines, en fonction des paramètres de forçage des zones côtières et du large. Le modèle hydrodynamique de MIKE 3 est utilisé pour simuler de nombreux phénomènes hydrodynamiques en mer dans les cas où des cisaillements de courants ou des courants de densité (liés aux panaches dessalés des fleuves qui s'écoulent en surface ou à une forte stratification thermique) peuvent apparaître. Le modèle MIKE 3 FM utilise une fermeture turbulente performante dite « en k-epsilon », qui permet de résoudre les équations de dissipation et génération d'énergie cinétique turbulente. De plus, la bonne résolution des processus de dispersion dans le champ proche, est maintenant assurée avec le module JET de MIKE 3D FM, ce qui permet de simuler finement les processus liés aux rejets. Les phénomènes 2D tels que la marée et les surcotes sont aussi simulés dans le modèle MIKE 3 HD.*

Enfin, la solution Non-Hydrostatique de MIKE 3D FM, disponible depuis la version commercialisée 2019.1, permet de simuler finement des phénomènes tels que des clapages en mer où les vitesses et accélérations verticales sont fortes lors de la chute convective.

2.1 La circulation générale influençant Saint-Martin

Autour des îles antillaises, les circulations sont complexes et interagissent avec le vent et la bathymétrie. Elles sont liées principalement à la remontée vers le Nord du Courant Nord-Equatorial et les entrées du Courant des Guyanes dans la mer des Caraïbes par les Petites Antilles. Ce courant des Guyanes prolonge le courant Nord-Brazil et est caractérisé par des eaux dessalées de l'Amazonie, ce qui est illustrée Figure 2-1, à partir des résultats du modèle HYCOM 1/12°.

La circulation générale autour de l'île de St-Martin, située au Nord de l'Arc Antillais, est ainsi influencée par :

- Les fluctuations du Courant Nord-Equatorial remontant à l'Est vers le Nord.

- Les entrées du Courant des Guyanes dans la mer des Caraïbes, associé à des méandres et tourbillons de grande échelle dans le bassin Vénézuélien, et dont une partie remonte vers Saint-Martin par le Sud-ouest.
- Les effets du vent qui entraîne les masses d'eau de surface.
- Les différentes masses d'eau caractéristiques évoluant dans la colonne d'eau. L'eau sous-jacente subtropicale (Caribbean Subtropical Underwater, CSUW), est présente sous la couche mélangée de surface, elle est plus salée car formée par évaporation des eaux de surface. Plus en profondeur, on trouve l'eau de la mer des Sargasses (Sargasso Sea Water, SSW) et l'Eau Centrale de l'Atlantique Tropical (Tropical Atlantic Central Water, TACW).
- Les gradients de densité entre les différentes masses d'eau et les processus de mélange associés dans la colonne d'eau, par effets de cisaillement et effet de flottabilité.
- La marée, bien que d'amplitude faible, interagit avec les circulations et fait fluctuer également les courants sur la colonne d'eau.

Le modèle régional de courantologie 3D mis en place dans le cadre de cette étude doit donc pouvoir prendre en compte les processus régissant cette circulation complexe et l'influence des différentes masses d'eau évoluant autour de Saint-Martin.

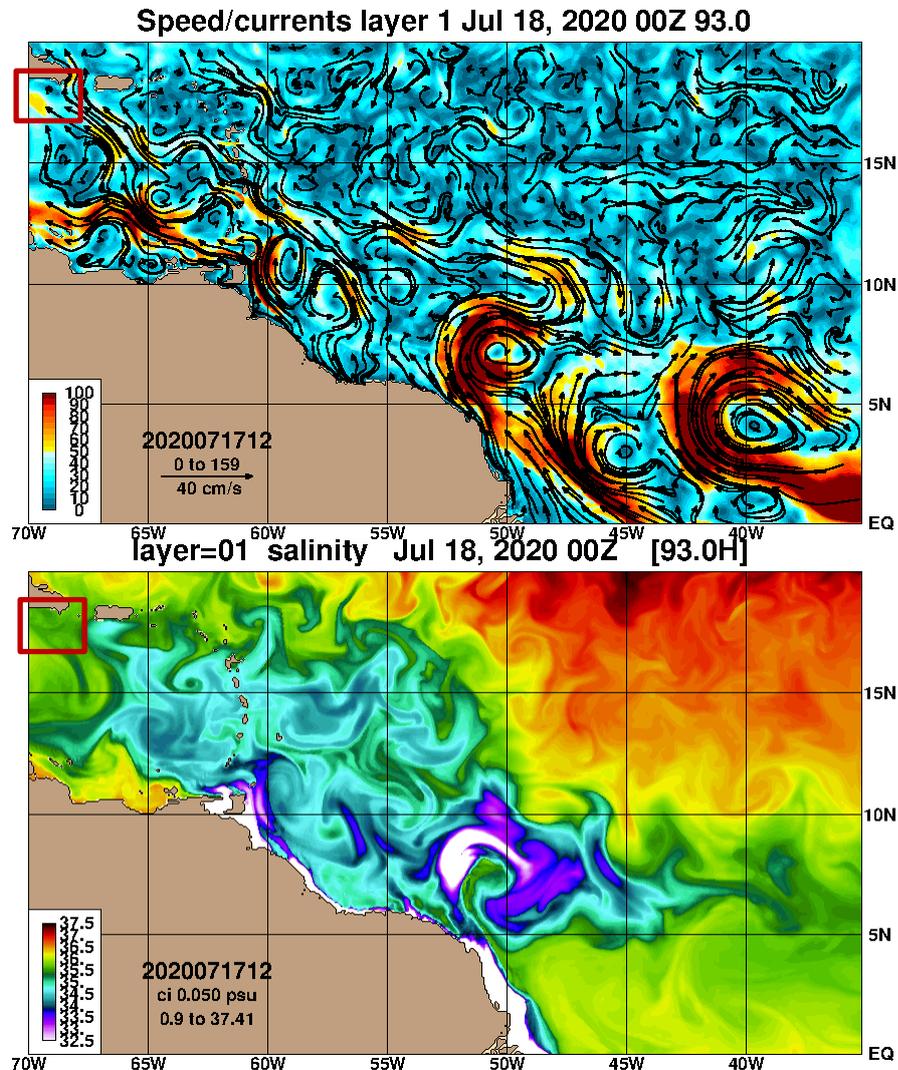


Figure 2-1 Résultats du modèle HYCOM 1/12° : circulations et salinité de surface le 18 juillet 2020, du secteur Nord Brésil (fleuve Amazone) jusqu'à la mer des Caraïbes. L'encadré en rouge localise Saint-Martin et la zone d'influence considérée pour la construction du modèle régional MIKE 3D.

P. BOUYSSÉ

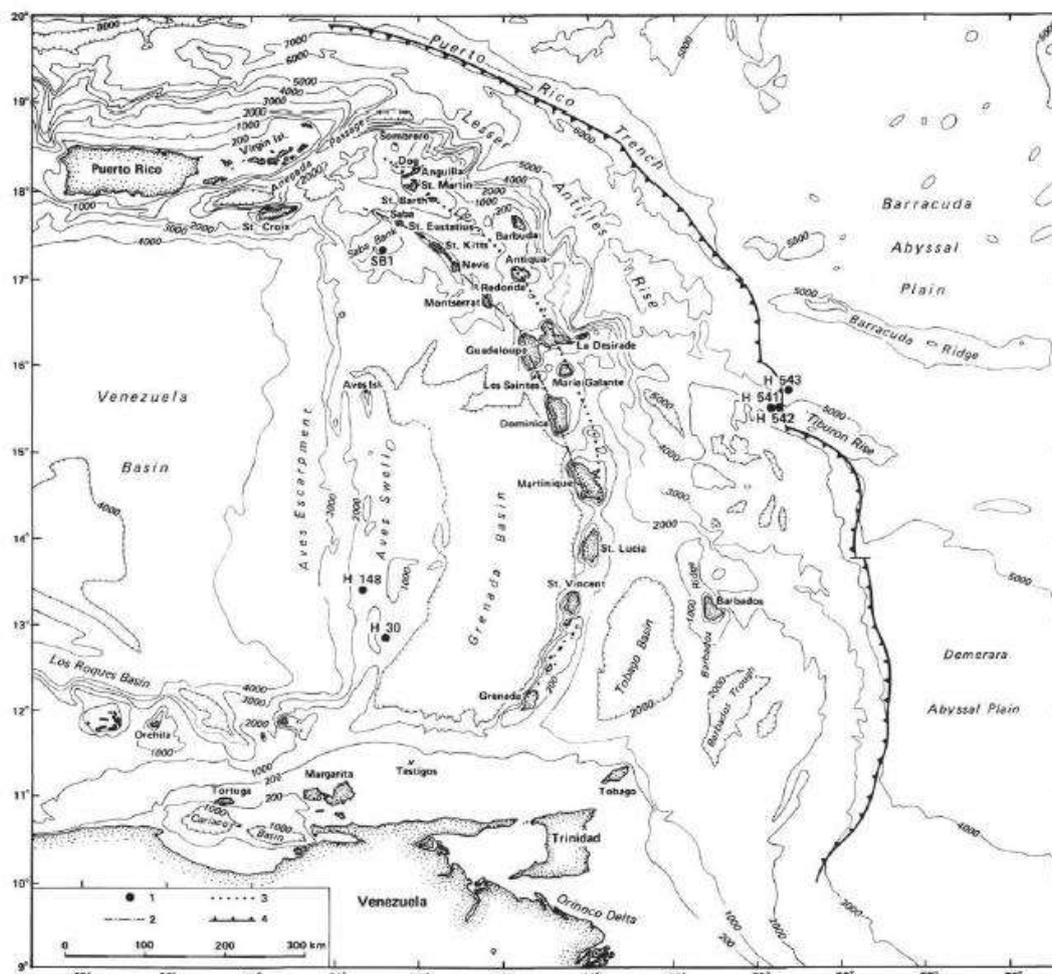


Figure 1. Eastern Caribbean. (Bathymetry [isobaths: 200 m and every 1000 m], simplified from Case and Holcombe [1980], is slightly modified. For toponymy and detailed bathymetry between St. Lucia and Anguila, refer to Fig. 3. Key: 1 = drill sites [SB1 = Saba Bank exploratory well; H = DSDP holes]; 2 = inner arc; 3 = outer arc; 4 = deformation front [after Case and Holcombe, 1980].)

Figure 2-2 Morphologie de l'Est Caribéen (Bouysse, 2007)

2.2 Emprise et résolution du maillage

L'emprise du modèle régional a été définie après analyse des résultats du modèle global HYCOM¹ et de plusieurs tests numériques, de façon à optimiser les temps de calcul tout en garantissant de bonnes conditions limites au modèle : il s'agit de bien prendre en compte la variabilité des circulations du large et les caractéristiques des masses d'eau influençant la zone d'étude. Les analyses ont porté sur une zone allant jusqu'à la Guadeloupe au Sud et jusqu'à Porto Rico à l'Ouest (Figure 2-3). L'emprise du modèle, la position et l'orientation des limites ouvertes a été optimisée en fonction des gradients bathymétriques, de la courantologie générale et des caractéristiques des masses d'eau, analysées au préalable à partir des résultats du modèle global HYCOM et des premières simulations MIKE à grande échelle.

La Figure 2-3 montre l'étendue du domaine et la grille de calcul du modèle régional hydrodynamique MIKE 3D de Saint-Martin. Le maillage flexible a une résolution variable spatialement augmentant du large jusqu'à la côte. La résolution horizontale des éléments du

¹ <https://www.hycom.org/ocean-prediction>

maillage varie de 6.5km au large à ~800m à l'approche de Saint-Martin (et notamment dans l'Ouest de l'île, dans le secteur où sont envisagées les immersions) et jusqu'à 500m dans la zone côtière autour de Saint-Martin et d'Anguilla.

Sur la verticale, le domaine est discrétisé par 35 niveaux avec 10 niveaux sigma jusqu'à 80m de profondeur et 25 niveau z sur le reste du domaine. Les niveaux verticaux sont cohérents avec ceux de HYCOM aux frontières marines. La Figure 2-4 présente une coupe verticale illustrant la discrétisation verticale dans l'Ouest du canal d'Anguilla, à l'approche de Galisbay.

L'analyse de sensibilité à la résolution du modèle est présentée en section 2.6.1 (résolution horizontale) et en section 2.6.2 (résolution verticale).

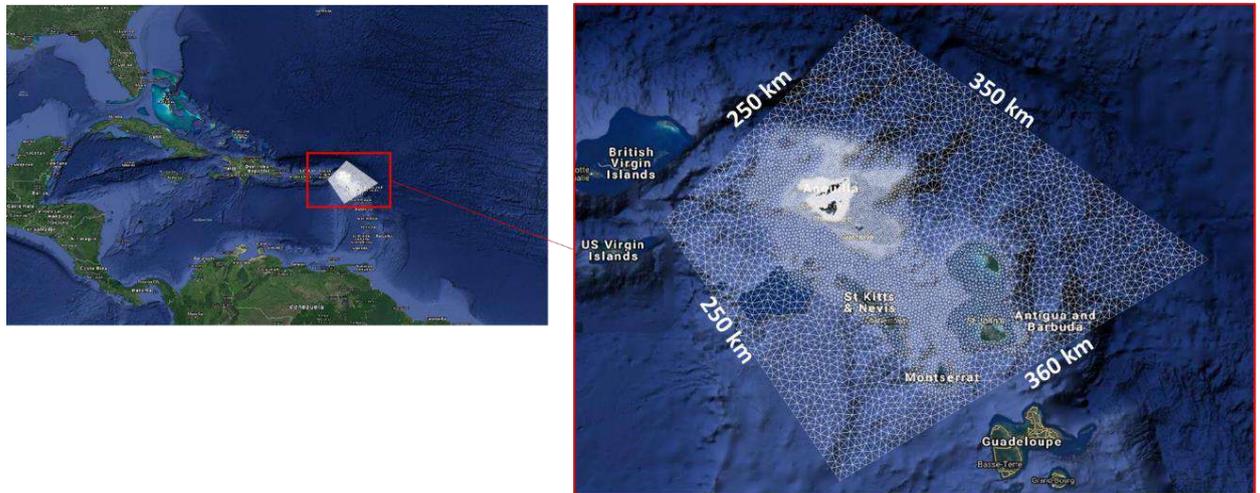


Figure 2-3 Emprise du modèle régional hydrodynamique de Saint-Martin (MIKE 3D HD)

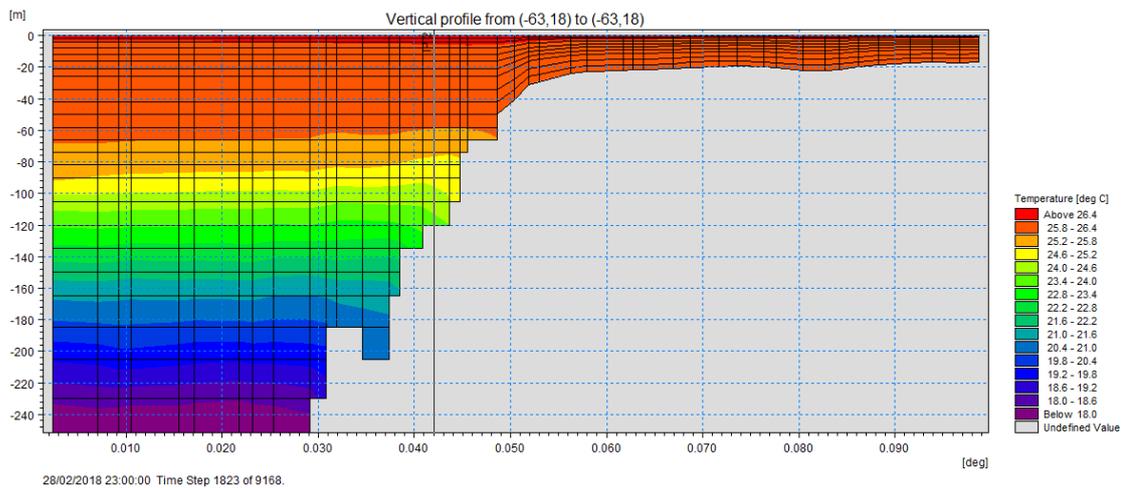


Figure 2-4 Illustration de la discrétisation verticale en sigma-z dans le modèle régional hydrodynamique de Saint-Martin (MIKE 3D HD)

2.3 Données bathymétriques utilisées pour la construction du domaine

Trois différentes sources de données bathymétriques ont été utilisées pour la construction du domaine du modèle régional, du large jusqu'à la côte :

- La base de données GEBCO (General Bathymetric Charts of the Ocean), disponible à l'échelle globale à la résolution d'une minute d'arc, mise à disposition par le British Oceanographic Data Center (BODC), Figure 2-5.
- La base de données C-MAP, construite et mise à jour en continue à partir des cartes nautiques CM-93, gérée et maintenue par Jeppesen, entreprise Norvégienne.
- Les données topo-bathymétriques de très haute résolution LIDAR (IGN-SHOM), accessibles via le serveur data.shom.fr. Les données à 5m de résolution ont été utilisées sur les secteurs côtiers existant (Figure 2-7).

Il existe également de nombreux levés bathymétriques haute résolution locaux dans la baie et aux abords du port de Galisbay. Les données les plus récentes seront utilisées en Phase 5 pour l'étude pour la construction du modèle haute-résolution de Saint-Martin.

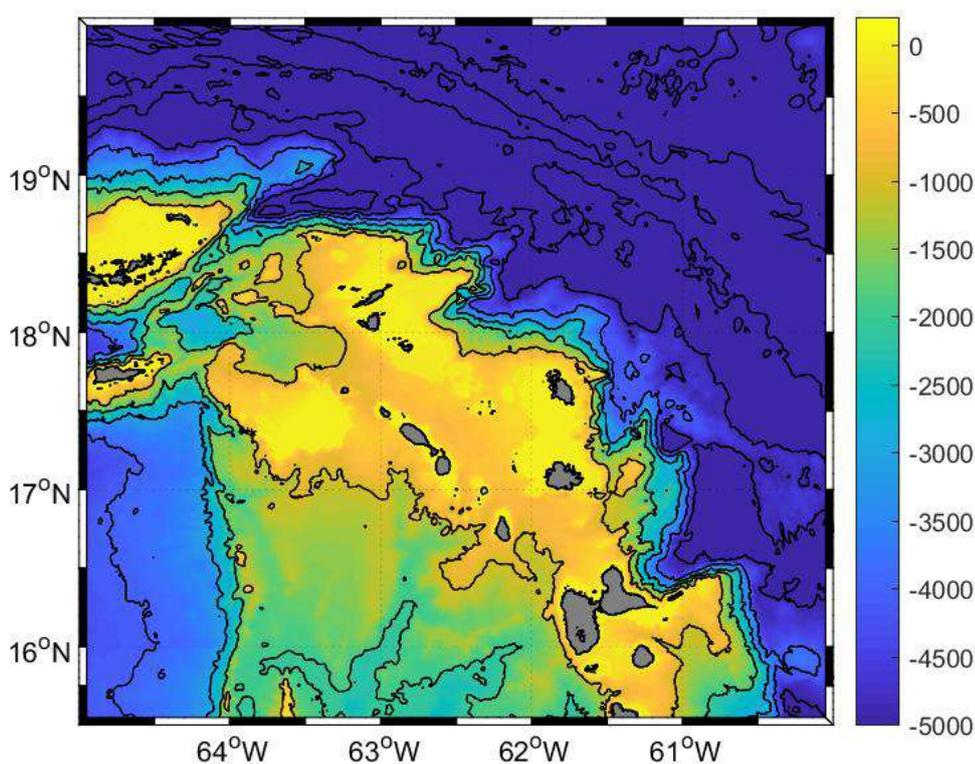


Figure 2-5: Données bathymétriques GEBCO extraites autour de Saint-Martin

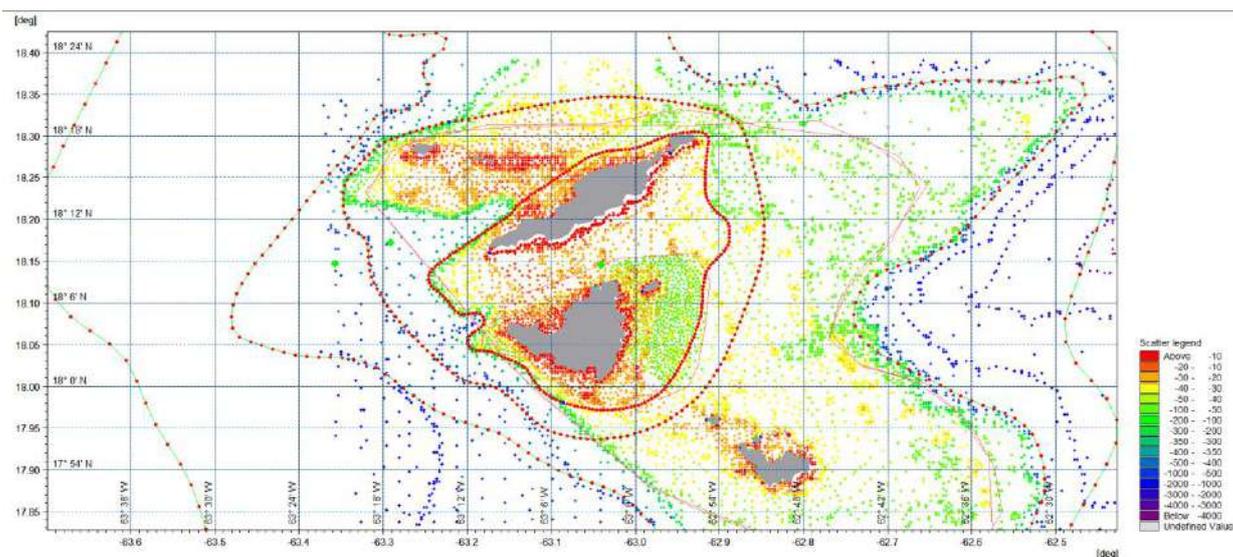


Figure 2-6: Données bathymétriques C-MAP extraites autour de Saint-Martin

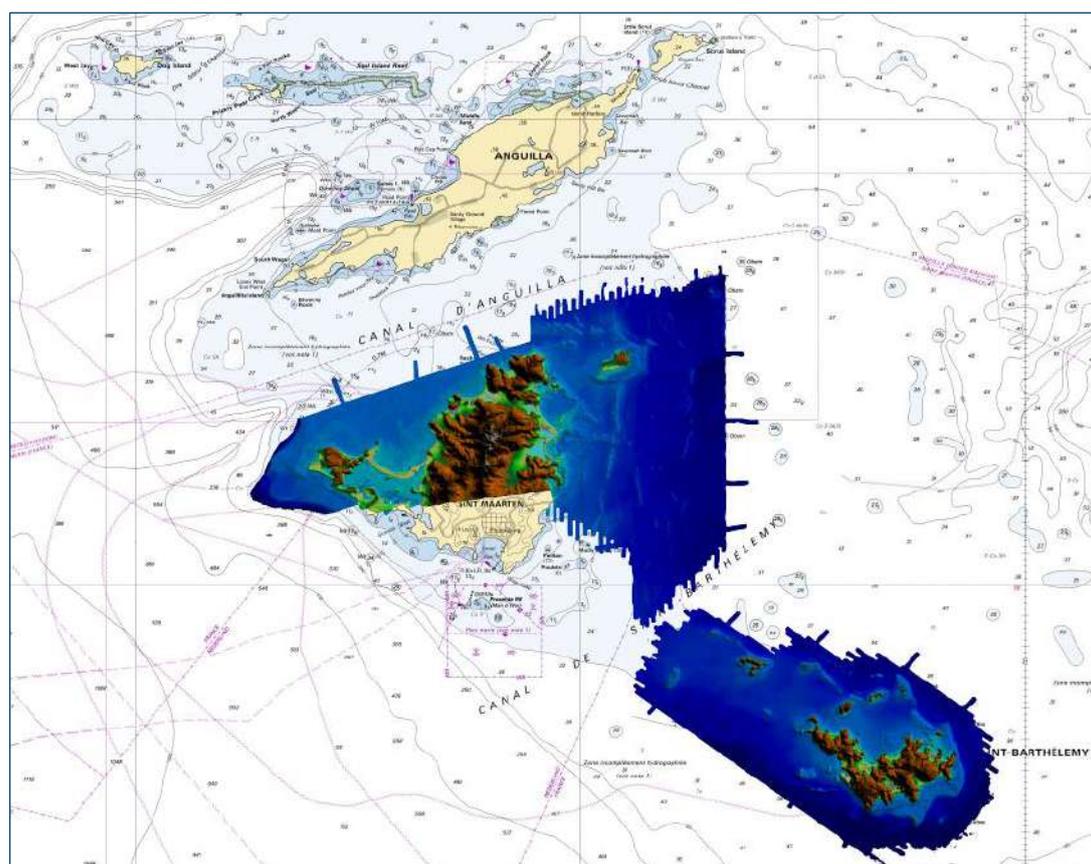


Figure 2-7: Données topo-bathymétriques LIDAR 2019 de Saint-Martin et Saint-Barthélemy (IGN-SHOM), source data.shom.fr

2.4 Les forçages du modèle hydrodynamique

2.4.1 Le forçage atmosphérique

Le forçage atmosphérique du modèle hydrodynamique 3D est assuré par la base de données opérationnelle du Climate Forecast System CFS², produit et mis à disposition par le National Centre for Environmental Prediction (NCEP). CFS est un système global haute résolution couplé « atmosphère-océan-terre-glace de mer ». Le modèle atmosphérique utilisé dans ce système complexe est le modèle GFS. Les variables de la base de données CFS utilisées ici sont :

- La vitesse et la direction du vent à 10m ;
- La pression atmosphérique ;
- Les précipitations ;
- La couverture nuageuse ;
- La température de l'air à 2m ;
- L'humidité relative.

Ces données sont disponibles à la résolution de 0.2° (~22km) pour le vent, la pression atmosphérique et la température de l'air, alors que les autres paramètres sont fournis à la résolution de 0.5° (~55km).

Les processus d'évaporation et les échanges avec l'atmosphère sont pris en compte avec les calculs des flux de chaleur latente, les flux de chaleur sensible et les radiations solaires. Ces derniers sont estimés de façon empirique, notamment en fonction de la position du site sur le globe.

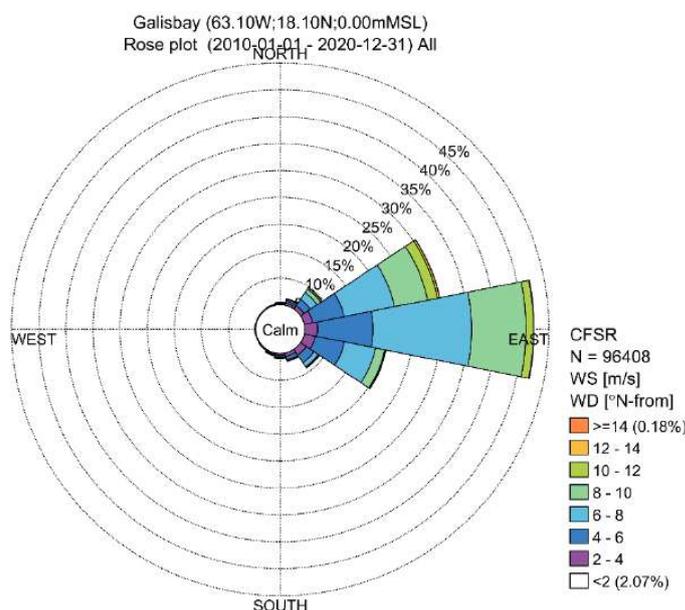


Figure 2-8 Rose des vents CFS 2010-2020 à Saint-Martin

² Saha, S.; Moorthi, S. & Pan, H.L. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, American Meteorological Society, 1015-1057.

2.4.2 Les conditions limites marines

Pour générer la dynamique océanique sur le modèle régional de Saint-Martin, des conditions de courants, température et salinité doivent être appliquées sur toute la colonne d'eau aux limites marines du modèle, ici sur les quatre frontières ouvertes.

La circulation générale est issue de la base de données HYCOM GOFS 3.1³ à 1/12° de résolution (données analysées de 2014 à 2020 et données réanalysées avant 2014), et permettant de fournir les variations du niveau d'eau associées à la circulation méso-échelle, les courants et les paramètres hydrologiques (température, salinité) sur toute la colonne d'eau à un pas de temps de 3h.

Comme HYCOM ne prend pas en compte les processus de marée, le signal de marée a été ajouté aux conditions limites marines en considérant les élévations de la surface libre et les courants barotropes de marée, selon la formulation de Flather, 1976⁴. Les signaux de marée sont issus de la base de données DHI-DTU⁵ (10 composantes principales à 1/8° de résolution).

Côté terre, les rivières ne sont pas incluses dans le modèle régional.

Choix des conditions limites de circulation générale HYCOM vs CMEMS

Dans le cadre de cette étude, le modèle régional doit pouvoir simuler les 10 dernières années et les années à venir également, notamment en Phase 5 pour la validation du modèle avec les nouvelles mesures qui seront acquises en 2021-2022. Le choix des conditions limites pour forcer le modèle régional de courantologie de Saint-Martin s'est donc fait en considérant en particulier les données de modèle global suivantes :

- Le système opérationnel HYCOM Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1, analyses disponibles de juillet 2014 à nos jours, données toutes les 3 heures sur 41 niveaux verticaux, à 0.08° x 0.08° de résolution (et 0.08° x 0.04° à partir de Février 2020).
- Le système opérationnel MERCATOR, distribué par CMEMS (Copernicus Marine Services), et disponible de Juillet 2018 à maintenant, avec des données toutes les 6 heures et sur 50 niveaux verticaux, à la résolution 0.08° x 0.08°.

Pour les années antérieures à 2014, les bases de données réanalysées ont été considérées :

- Les réanalyses HYCOM GOFS 3.1, disponibles de janvier 1994 à décembre 2015, données tri-horaires sur 41 niveaux verticaux, à la résolution 0.08° x 0.08° ;
- Les réanalyses MERCATOR GLORYS 12V1 (CMEMS), disponibles de janvier 1993 à juin 2019, sur 50 niveaux et de résolution 0.08° x 0.08°, mais données journalières uniquement.

La comparaison des champs de courant de surface, illustrée sur les figures suivantes, montre que les deux modèles sont en général en bon accord avec la circulation décrite dans la littérature. Il existe un fort courant vers l'ouest entre les petites Antilles et le Golfe du Mexique, longeant la côte vénézuélienne et caractérisé par des méandres et tourbillons grande échelle.

Des différences entre HYCOM et CMEMS sont observées au centre du Bassin Vénézuélien et le long de l'Arc Antillais extérieur (à l'Est). Dans ce secteur HYCOM reproduit en général des

³ <https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis>

⁴ Flather, R.A. 1976, A tidal model of the northwest European continental shelf, *Memoris de la Société Royale des Sciences de Liege*, Vol 6 Issue 10, pages 141–164.

⁵ https://www.space.dtu.dk/english/research/scientific_data_and_models/global_ocean_tide_model

courants plus intenses qui accélèrent entre les îles des Petites Antilles et sur la plateforme d'Avès. D'autre part, CMEMS montre en général une plus faible variabilité temporelle des courants de surface que HYCOM.

La circulation générale simulée par HYCOM, a également été comparée aux résultats de Alvera-Azcarate et al. 2009 ⁶ où les courants géostrophiques sont déduits d'altimétrie satellitale. HYCOM est en très bon accord avec cette publication (Figure 2-11), montrant :

- Le courant Caraïbéen dirigé vers l'Ouest, s'écoulant des Petites Antilles vers le Golfe du Mexique ;
- Les larges méandres se développant jusqu'à la plateforme Nicaraguayenne ;
- Les masses d'eau entrant dans le bassin caraïbéen par le Sud à travers les îles du sud des Petites Antilles et par le Nord à travers les îles du Nord.

Ces analyses ont permis de confirmer le choix d'utiliser les bases de données HYCOM GOFS 3.1 (les analyses et les réanalyses) pour le forçage du modèle régional hydrodynamique 3D de Saint-Martin.

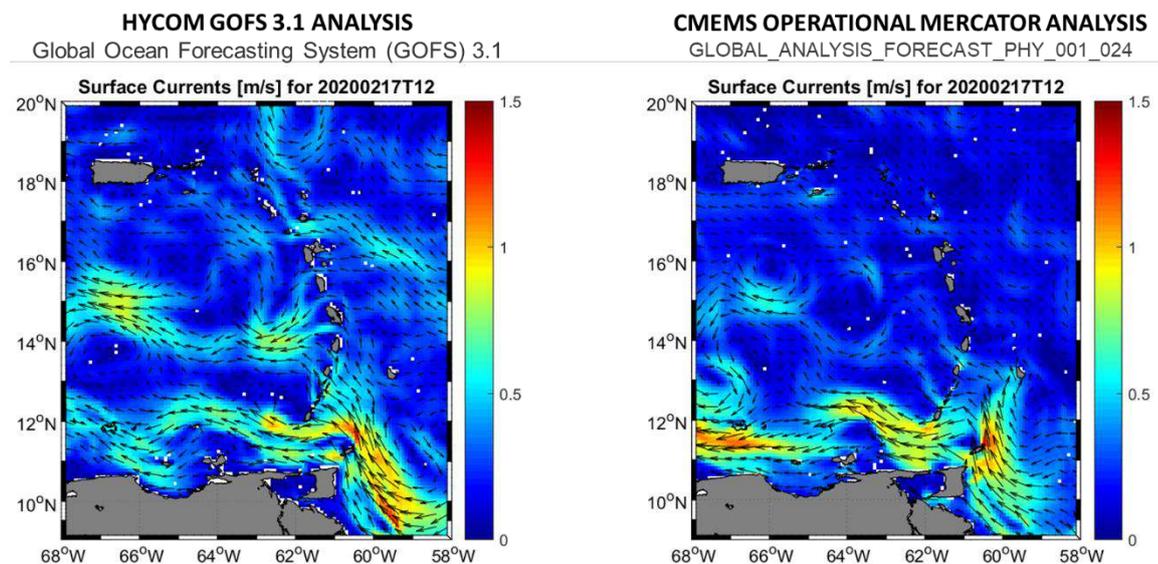


Figure 2-9: Courants de surface modélisés par HYCOM (à gauche) et CMEMS (à droite), situation du 21 Février 2020 à 12 UTC.

⁶ Alvera-Azcarate, Aida; Barth, Alexander and Weisberg, Robert H., "The Surface Circulation of the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico as Inferred from Satellite Altimetry" (2009). Marine Science Faculty Publications 154.

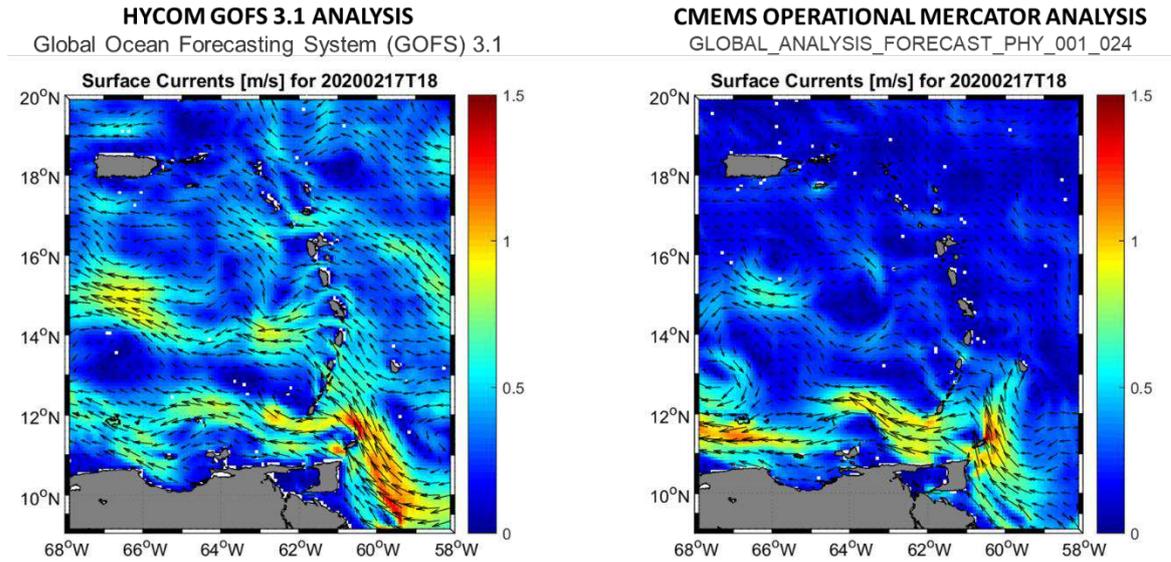


Figure 2-10: Courants de surface modélisés par HYCOM (à gauche) et CMEMS (à droite), situation du 21 Février 2020 à 18 TU.

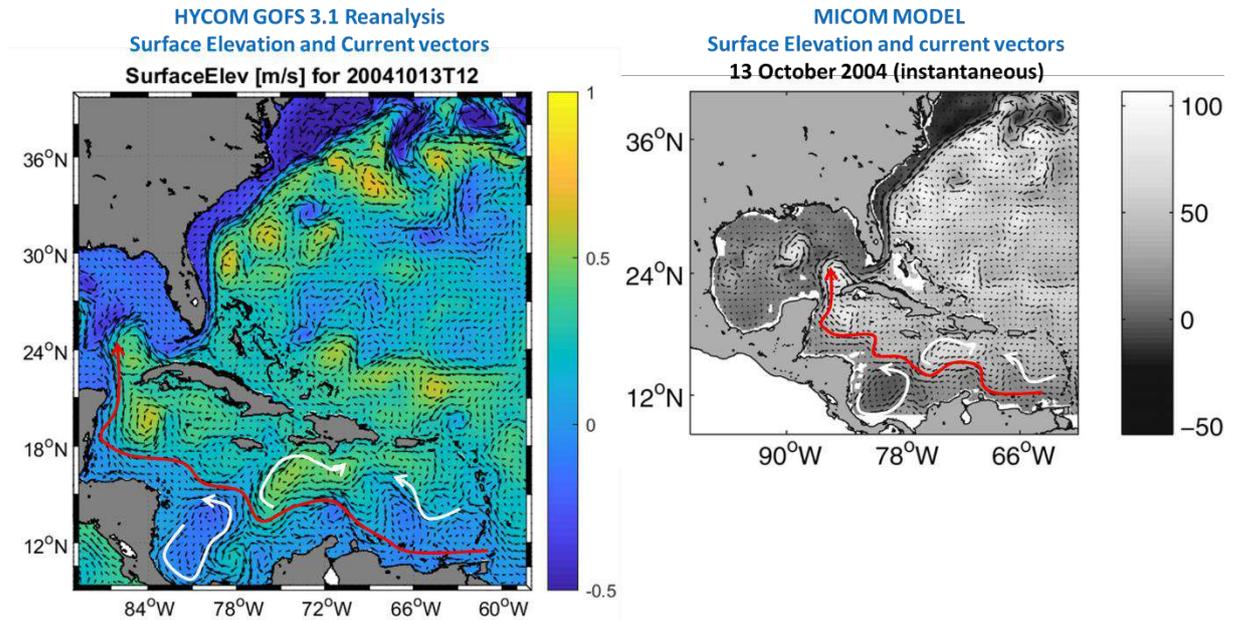


Figure 2-11: Elévation de la surface libre et courants de surface modélisés par HYCOM (à gauche) et courants géostrophiques issus de Alvear-Azcarate et al. 2009 (à droite) ; situation du 13 octobre 2004 à 12h TU.

2.5 Paramétrisation du modèle hydrodynamique

Le Tableau 2-1 résume les caractéristiques de la configuration et la paramétrisation du modèle régional hydrodynamique de Saint-Martin.

Tableau 2-1 Synthèse des spécificités et de la paramétrisation du modèle régional de courantologie de Saint-Martin MIKE 3D HD

Setting	Description/Value
Mesh resolution	Variable resolution flexible mesh with element size of 500m in the coastal area around St.Martin and Anguilla islands, and 800 m in the area of dumping site selection
Simulation period	2016-01-01 – 2020-12-31 (5-years)
Model output time step	30 minutes
Basic equations	Hydrodynamic module – MIKE 3 HD
Horizontal Eddy viscosity	Smagorinsky formulation constant in domain: 0.28
Vertical Eddy viscosity	k-epsilon formulation
Bed resistance	Roughness height: 0.04 m
Wind forcing	NCEP CFSR atmospheric model
Wind drag	Varying linearly with wind speed: $W_a=7\text{m/s}$, $C_a=0.001255$, $W_b=25\text{m/s}$, $C_b=0.002425$ (empirical <i>parameters</i> used to calculate the drag coefficient of air)
Boundary conditions	Spatial and temporally varying water level and current data from HYCOM GOFS 3.1 Global 1/12° Analysis

2.6 Tests de sensibilité à la résolution du maillage

2.6.1 Résolution horizontale

Même si un modèle à plus haute résolution sera mis en place en phase 5, le modèle régional vise à décrire assez finement l'hydrodynamique autour de Saint-Martin pour pouvoir analyser la variabilité de la dynamique 1) dans le canal d'Anguilla, et notamment à l'approche de la baie de Galisbay, 2) dans la zone d'immersion pressentie au large, à l'Ouest de Saint-Martin.

Du fait des temps de simulation importants d'un modèle 3D, plusieurs tests de résolution spatiale du maillage horizontal ont été réalisés. Un bon compromis a été trouvé en considérant une résolution de 550m en zone côtière et 800m sur la zone de transition avec le large, où se situe notamment la pente du plateau.

Nous avons évalué les différences sur les courants entre deux maillages : l'un considérant une résolution de 550m à la côte et le second une résolution de 650m à la côte (Figure 2-12). Une même simulation de deux semaines a été réalisée avec chacun des deux maillages.

Les vitesses de courants en surface et au fond ont été comparés en deux points dans le canal d'Anguilla (Figure 2-13). Les résultats montrent des différences sensibles entre les deux tests, un maillage de résolution de l'ordre de 500m à la côte a donc été adopté pour le maillage final du modèle régional.

Tableau 2-2 Caractéristiques des deux maillages testés

MESH	HORIZONTAL RESOLUTION	Number of Elements
A	550 m	≈21500
B	650 m	≈27000

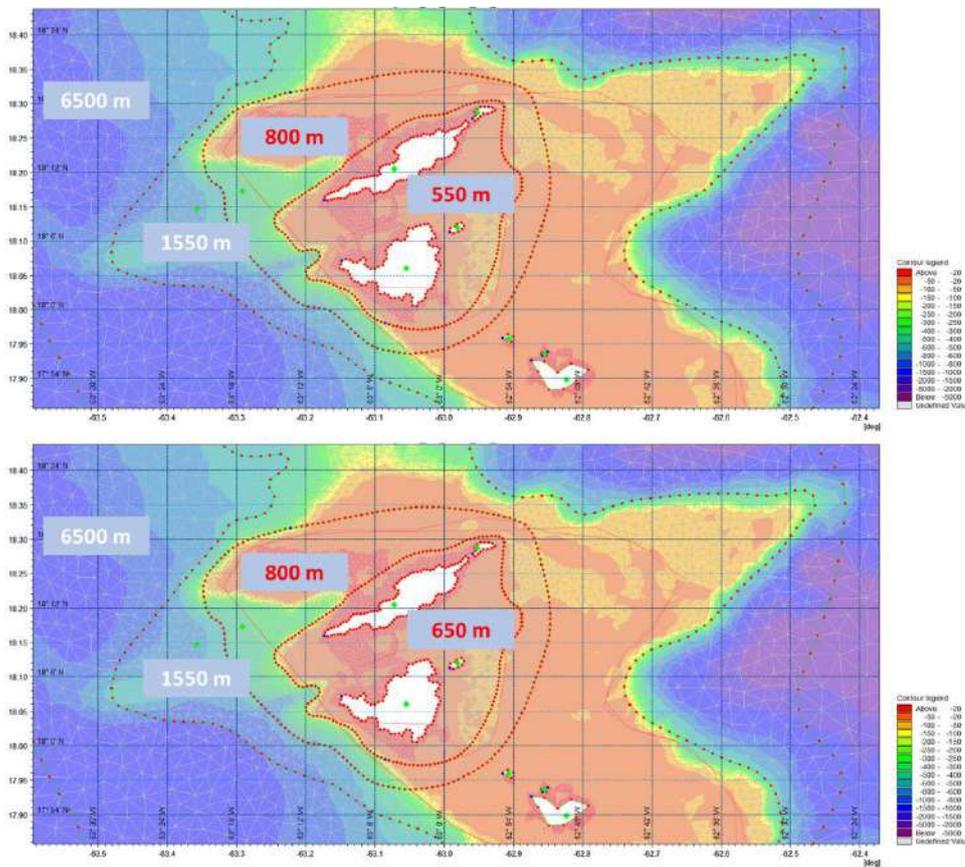


Figure 2-12 Présentation des deux maillages testés, avec une résolution à la côte de 550m (en haut) ou de 650m (en bas)

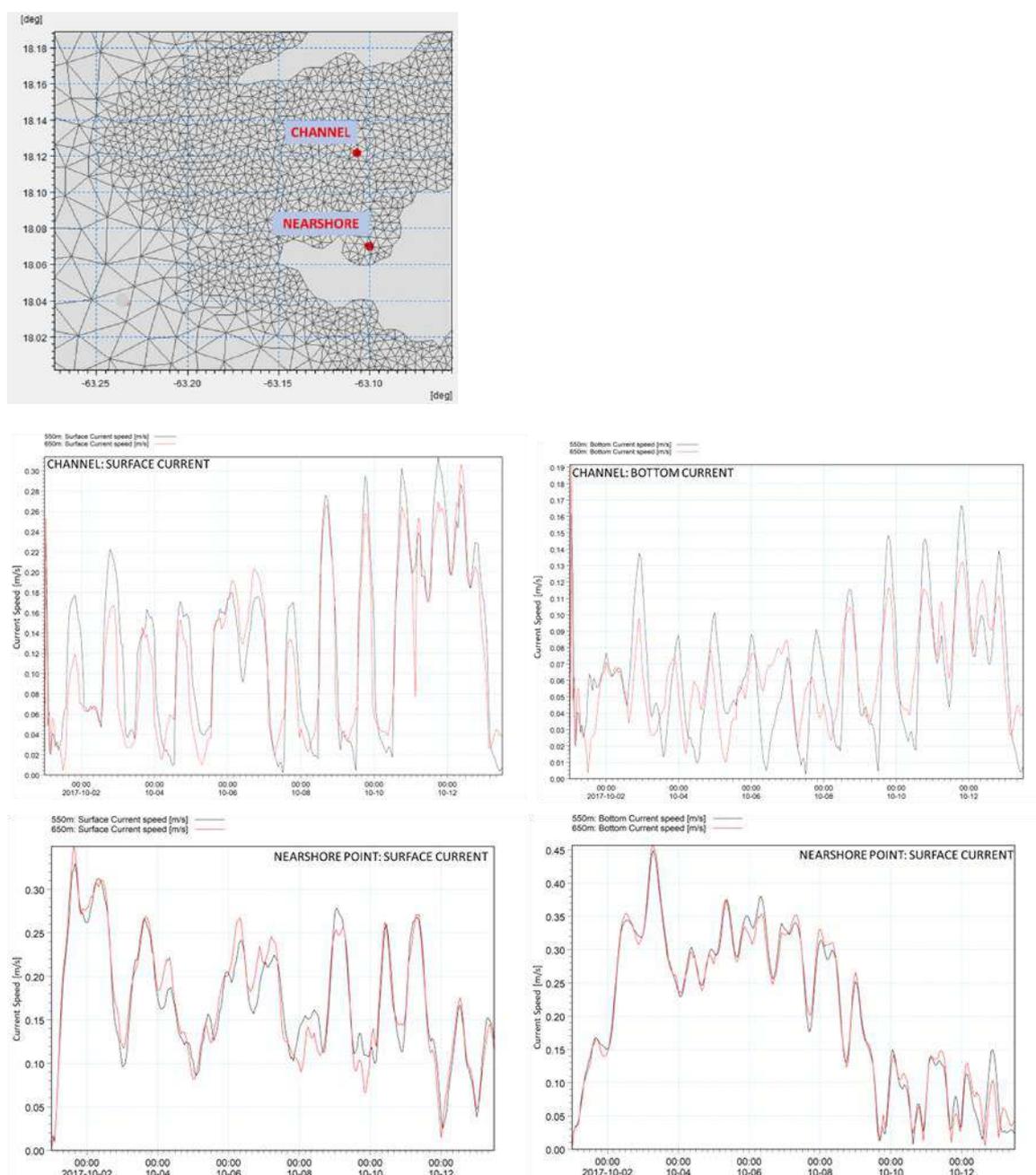


Figure 2-13: Localisation des deux points d'extraction dans le canal d'Anguilla. Comparaison des séries temporelles des courants obtenues avec les maillages A et B, en surface et au fond aux deux points (« Channel » et « Nearshore »)

2.6.2 Résolution verticale

Un certain nombre de tests ont été réalisés pour définir une résolution verticale optimale qui permette 1) une bonne intégration des conditions limites issues du modèle global HYCOM, 2) une dynamique assez fine sur le plateau et la zone côtière, tout en respectant des temps de simulation compatibles avec le planning de l'étude.

Les principaux cas-tests réalisés sont listés dans le Tableau 2-3. Les tests consistent notamment à faire varier le nombre de niveaux sigmas et/ou de niveaux z dans le modèle, ce qui induit des différences sur la manière de résoudre la pente du talus et les processus sur la verticale.

Tableau 2-3 Liste des cas-tests réalisés sur la résolution verticale du modèle hydrodynamique MIKE 3D

CASE ID	Computational Scheme	Vertical Mesh [n.sigma + n. zeta]	Description	computational time/timestep [sec]	computational time w.r.t. baseline [%]
7	High-order	24sig+17z	baseline setup	24	-
8	High-order	15sig+25z	reduced number sigma layers/increased zeta layer	20	83
9	Low-order	15sig+25z	low-order computational scheme	13	54
10	High-order	15sig+25z	increased horizontal resolution in the dumping area	29	121
11	Low-order	15sig+25z	low-order computational scheme/excluded pressure correction	13	54
12	Low-order	12sig+28z	reduced number sigma layers/increased zeta layer	12	50
13	Low-order	10sig+25z	reduced number sigma layers/increased zeta layer	10	42

Les profils de température et salinité ont été extraits en un point situé sur la pente du talus, au Sud-Ouest de Saint-Martin (Point S, Figure 2-14). Dans ce secteur la stratification de la colonne d'eau est supposée complexe et variable dans le temps. Comme il n'existe pas de mesures in-situ de ces paramètres dans ce secteur, les résultats du modèle MIKE 3D ont été comparés aux résultats du modèle global HYCOM (Figure 2-15 et Figure 2-16).

De manière générale, les cas-tests montrent que la stratification verticale est bien reproduite dans tous les cas mais qu'en augmentant le nombre de niveaux z, les profils dans le bas de la colonne d'eau sont en meilleur accord avec HYCOM. La résolution verticale et spatiale du modèle HYCOM étant très faible autour de Saint-Martin, le modèle MIKE est supposé mieux reproduire la dynamique dans les couches de fond que le modèle HYCOM. Les différences dans le bas des profils sont sous doute liés à l'écart de résolution des 2 modèles.

L'utilisation d'un schéma numérique d'ordre inférieur (Low-order Scheme) a permis de réduire considérablement les temps de calcul, tout en donnant des résultats très similaires au schéma d'ordre supérieur (cas-test 9 vs cas-test 8).

Le cas-test 10 montre qu'augmenter la résolution horizontale sur la pente continentale de 800m à 600m ne change pas significativement les profils verticaux modélisés.

Le cas-test 13 a finalement été sélectionné comme étant le meilleur compromis aux vues des temps de simulation et des résultats obtenus. Il considère 10 niveaux sigma jusqu'à 80m de profondeur et 25 niveaux z en deçà.

Enfin, pour vérifier la bonne cohérence des niveaux verticaux du modèle avec ceux de HYCOM qui force le modèle régional, les profils ont été comparés proche des limites du modèle. La Figure 2-17 montre que les profils sont en parfait accord, ici en un point proche de la limite Est. La discrétisation verticale retenue est donc bien adaptée pour intégrer correctement les données de forçages aux limites du modèle.

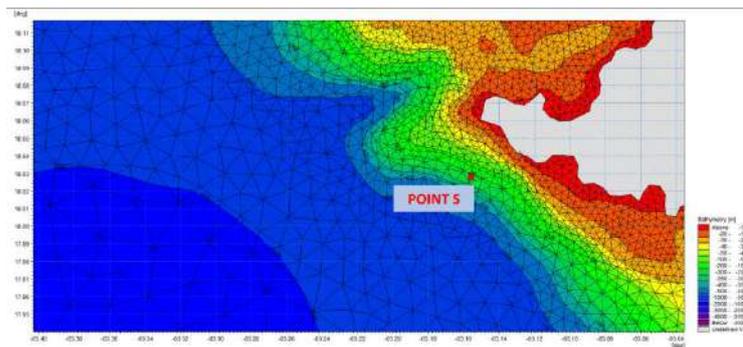


Figure 2-14 Localisation du point d'extraction des profils de température et salinité pour la comparaison des cas-tests sur la résolution verticale

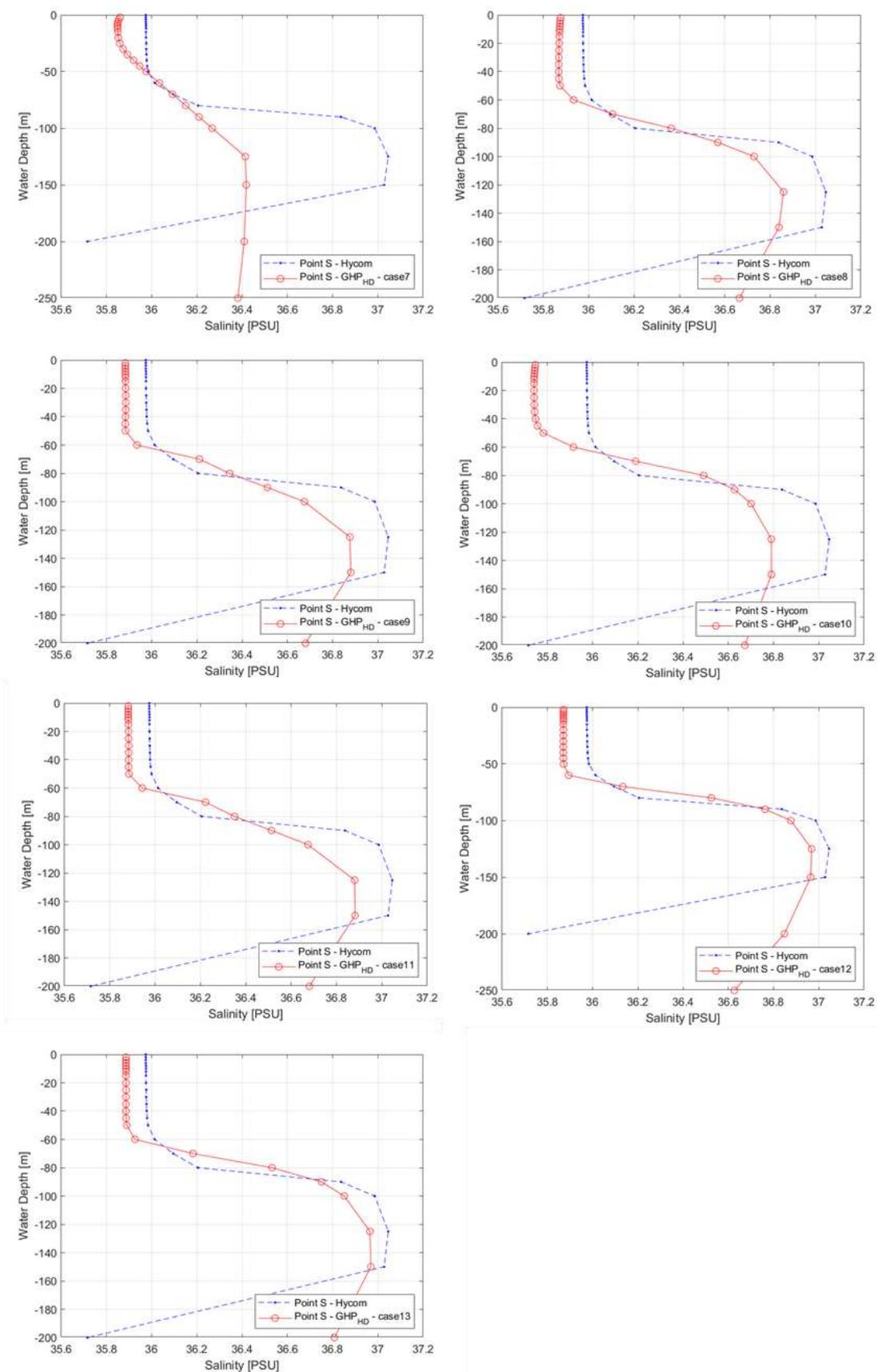


Figure 2-15: Profils verticaux de Salinité au point S, modélisés par MIKE (en rouge) et par HYCOM (en bleu), pour chaque cas-tests.

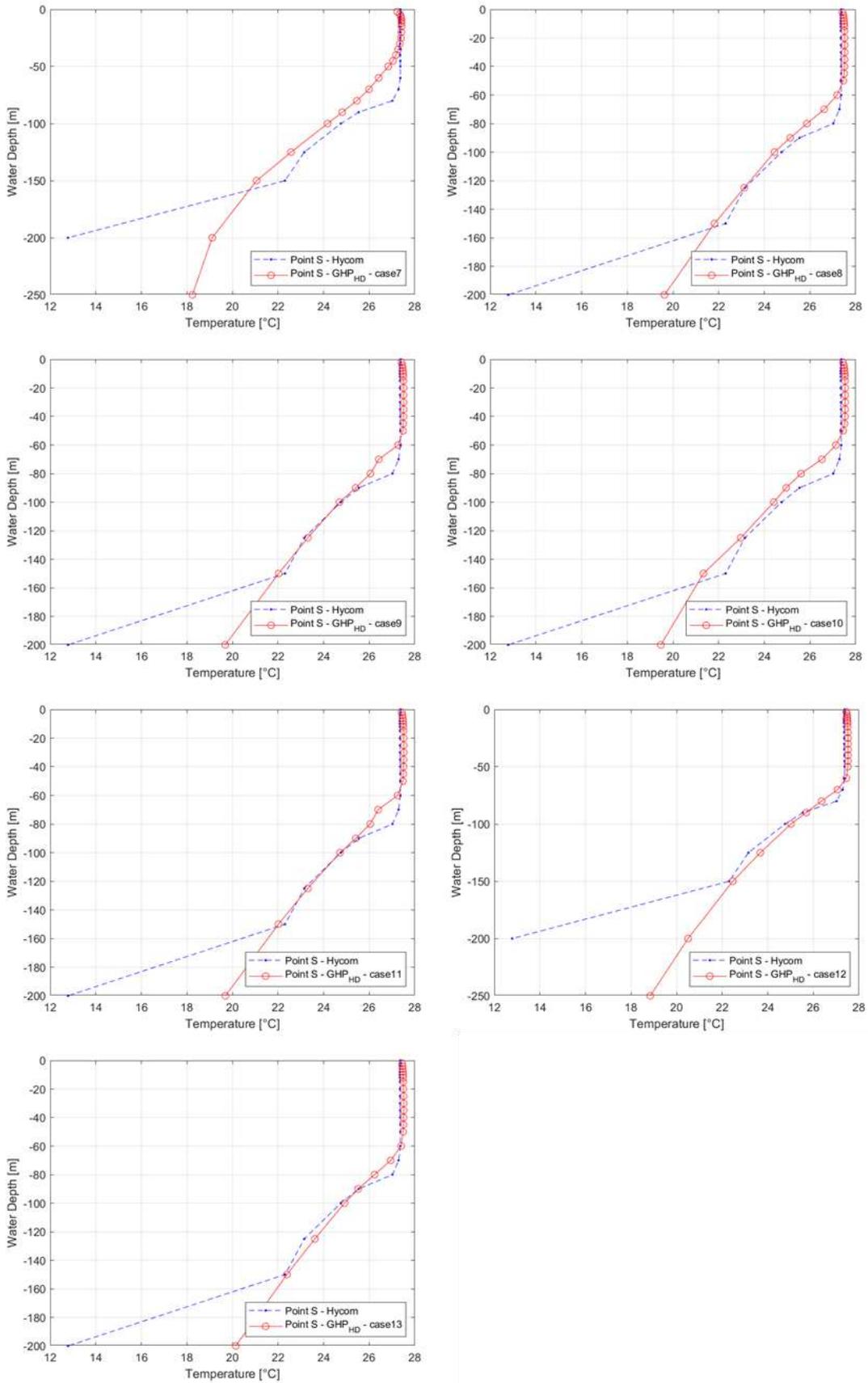


Figure 2-16: Profils verticaux de Température au point S, modélisés par MIKE (en rouge) et par HYCOM (en bleu), pour chaque cas-tests.

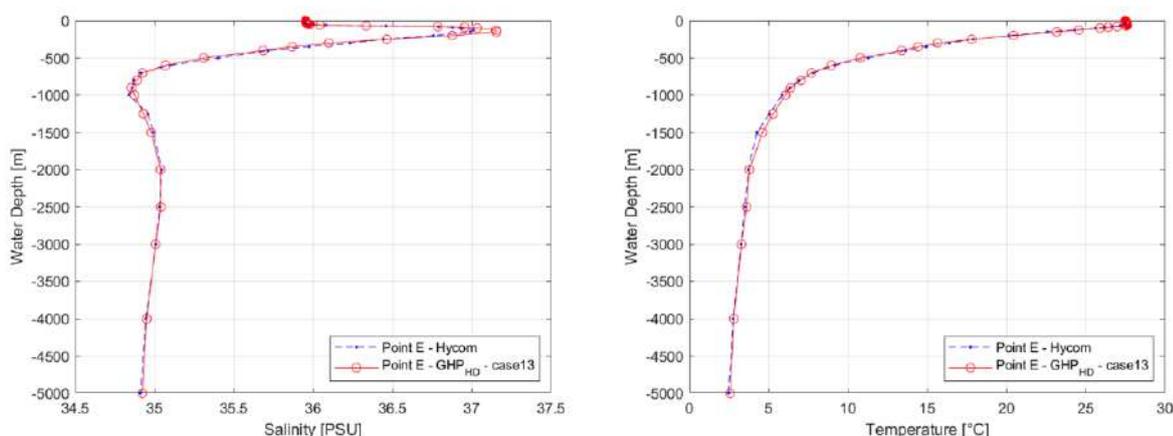


Figure 2-17: Modelled vertical profiles of salinity (left panel, red line)/ temperature (right panel, red line) extracted at Point E close to East model boundary compared with vertical profiles extracted from HYCOM (blue) for test Case 13

2.7 Validation du modèle hydrodynamique

2.7.1 La circulation générale

Les résultats du modèle régional MIKE 3D ont été analysés pour vérifier dans un premier temps la cohérence avec les données de forçage utilisés, issues des résultats du modèle global HYCOM, et avec les données de la littérature sur la circulation générale.

La bonne prise en compte des conditions aux limites a été démontrée à partir de la comparaison des profils verticaux de courants, température et salinité (exemple présenté précédemment en Figure 2-17).

Sur la Figure 2-18, sont présentées deux cartes de courants de surface du 14 janvier 2018, issues du modèle HYCOM (à gauche) et aux mêmes pas de temps, celles simulées par le modèle MIKE 3D (à droite). Selon HYCOM, un courant modéré se développe à l'Est de Saint-Martin et d'Anguilla, portant vers l'Ouest-nord-ouest, alors qu'à l'Ouest le courant est plus intense et vient du Sud-est.

Le modèle régional MIKE 3D reproduit des conditions similaires au large, dans le secteur de plus grandes profondeurs à l'Est mais le courant est fortement accéléré autour d'Anguilla et dans le détroit entre les deux îles, zones peu profondes (<20m), ce qui ne peut bien-sûr pas être résolu par HYCOM du fait de sa faible résolution spatiale.

A l'ouest, les champs de courant issus de MIKE sont cohérents avec ceux de HYCOM, bien que l'intensité en surface puisse différer par moment. Cela est sans doute lié aux différences de résolutions horizontale et verticale.

Dans la majorité des événements, la dynamique autour de Saint-Martin est en bon accord avec HYCOM, les deux modèles utilisant le même forçage atmosphérique (CFSR).

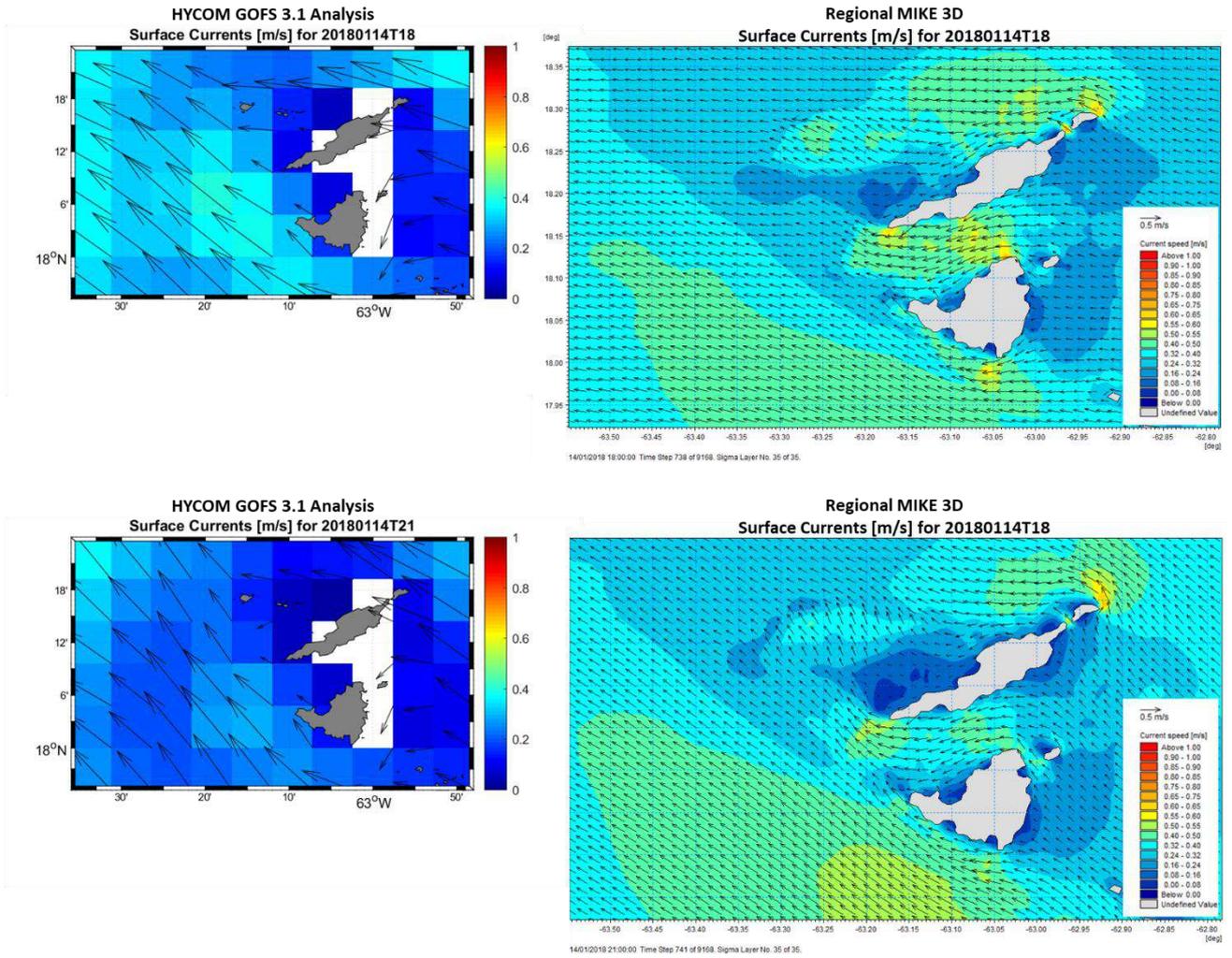


Figure 2-18: Exemple de champs de courants de surface autour de Saint-Martin, résultats du modèle global HYCOM (à gauche) et du modèle régional MIKE 3D (à droite), le 14 janvier 2018 à 18h TU (en haut) et 21h TU (en bas).

2.7.2 Les niveaux d'eau

La marée théorique à Saint-Martin est de type semi-diurne à inégalité diurne. Le marnage est relativement faible, avec un maximum de 0.60m en vive-eau extrême (PHMA-PBMA, selon le RAM 2019 du SHOM, Tableau 2-4). Les niveaux d'eau à Galisbay dépendent aussi fortement des conditions météocéaniques (vent, pression atmosphérique, onde de tempête, circulation générale et dynamique à plus grande échelle dans le bassin Nord Atlantique). Les événements cycloniques peuvent induire ponctuellement de fortes surcotes (de 1 à 2 m). A l'échelle annuelle, le niveau moyen varie ainsi de plus de 25cm sur l'année 2002, Figure 2-19. L'augmentation des niveaux moyens clairement visible ici en septembre-octobre est un phénomène retrouvé aussi sur les autres années, sur des durées plus ou moins longues. Elle peut être expliquée par une saison de plus basses pressions atmosphériques, liée à la remontée vers le Nord de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), phénomène ayant lieu d'aout à novembre, modifiant la position des centres d'action Dépressions/Anticyclones sur le bassin atlantique (remontée de l'Anticyclone des Açores vers le Nord). A contrario, les niveaux sont plus bas en début d'année, sur janvier-mars, du fait de plus hautes pressions atmosphériques.

Tableau 2-4 Références Altimétriques à Saint-Martin (SHOM, RAM 2019). PHMA : Plus Hautes Mer Astronomiques ; PBMA : Plus basses Mers Astronomiques ; NM : Niveau Moyen ; ZH : Zéro Hydrographique.

Nom	Type	Lat.	Long.	Et.	Constante	PHMA	PM sup	NM	BM inf	PBMA
Saint-Martin Marigot	R	18 04 N	63 05 W		2012	00.83		00.53		00.23
Saint-Martin et Saint-Barthélemy										

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	RF/ZH	RF/Ref	ZH/Ref	ZH/Elli	Ref
Saint-Martin Marigot	AS-16	IGN	1988	22.099	21.739	-0.360	-43.73	IGN88
Saint-Martin et Saint-Barthélemy								

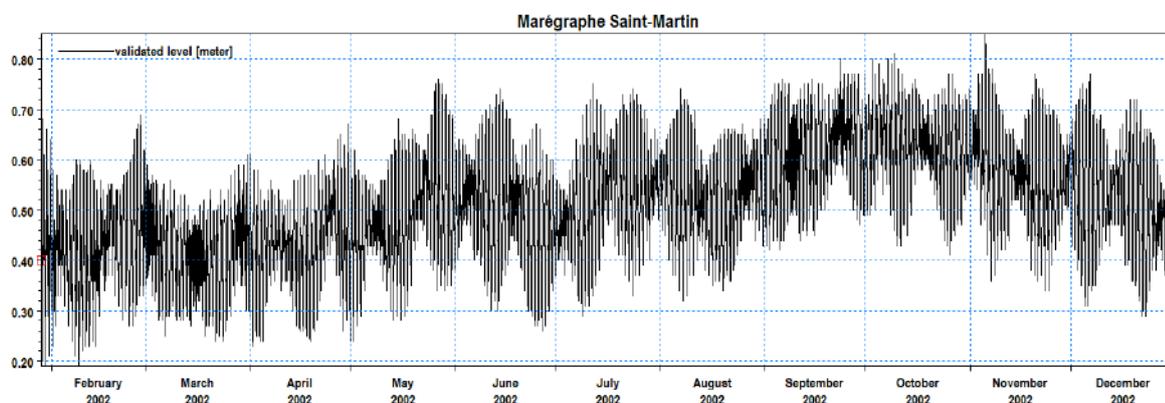


Figure 2-19 Niveaux d'eau mesurés en 2002 au marégraphe de Saint-Martin (en m par rapport au ZH). Données validées mises à disposition sur le site REFMAR.

Il existe assez peu d'observations validées du marégraphe de Saint-Martin, localisé au port de commerce de Galisbay, géré par la Collectivité et mises à disposition par le SHOM/REFMAR : l'année 2002, de décembre 2009 à janvier 2010, avril 2016 et du 25 juillet au 6 septembre 2017.

Les données brutes hautes fréquences ont cependant été téléchargées du site REFMAR (par data.shom.fr) et filtrées par une moyenne mobile d'une heure. De plus les mesures avant le 08 aout 2017 ont été recalées de 18.6cm pour mieux correspondre aux niveaux de prédiction fournis par le SHOM (selon les indications données sur le site REFMAR).

Les résultats du modèle ont été comparés à ces mesures brutes (non validées) du marégraphe de Saint-Martin. Des incertitudes existent donc sur la validité de ces mesures, exceptées sur quelques courtes périodes, où les données validées existent.

Trois périodes de comparaison modèle-mesures sont présentées Figure 2-20, sur 2019, 2018 et 2017. De façon générale, le modèle reproduit bien les niveaux d'eau sur ces périodes avec les amplitudes inégales au cours d'une même journée des deux marées. En condition de vive-eau l'asymétrie est forte alors qu'en morte-eau le caractère semi-diurne est bien visible. Quelques écarts apparaissent ponctuellement, de l'ordre de quelques centimètres, ce qui reste très satisfaisant. Sur certaines autres périodes de l'année, les niveaux modélisés sont en moins bon accord avec les observations à plus basse fréquence (sur plusieurs semaines à plusieurs mois), avec des décalages de 10 à 15cm, qui pourraient être liées à des imprécisions des forçages atmosphérique et océanique, avec une limitation à reproduire certains phénomènes plus grande échelle. Il est cependant difficile d'attribuer uniquement au modèle ces erreurs puisque les mesures brutes ne sont pas validées par le REFMAR et le marégraphe pourrait aussi avoir subi des dérives régulières.

Lors de l'événement cyclonique IRMA du 6 septembre 2017, les mesures validées (en rouge sur la Figure 2-20) sont en très bon accord avec les données brutes filtrées (en gris) mais elles s'arrêtent à 07h50 TU avec un niveau à un peu plus d'1m (ref ZH). Les données brutes relèvent 2.60m à 10h30 TU et redescendent à 1m à 12h TU. Le modèle simule un niveau d'eau maximum plus faibles ~0.8m (ref ZH) mais des décotes plus fortes d'environ 10cm après l'événement. Ces écarts s'expliquent car le forçage atmosphérique du modèle hydrodynamique ne prend pas en compte les variations haute résolution (spatiale et temporelle) du vent et de la pression atmosphérique, ce qui induit que la dynamique liée aux événements cycloniques est ici lissée ou imprécise pour ce type d'événement.

Dans la phase 5 de l'étude, un modèle plus haute résolution sera mis en place autour de Saint-Martin et l'effort de validation du modèle hydrodynamique sera poursuivi. Il est aussi prévu de simuler plus finement deux événements cycloniques avec les champs de vent et pression atmosphérique reconstitués à plus haute résolution.

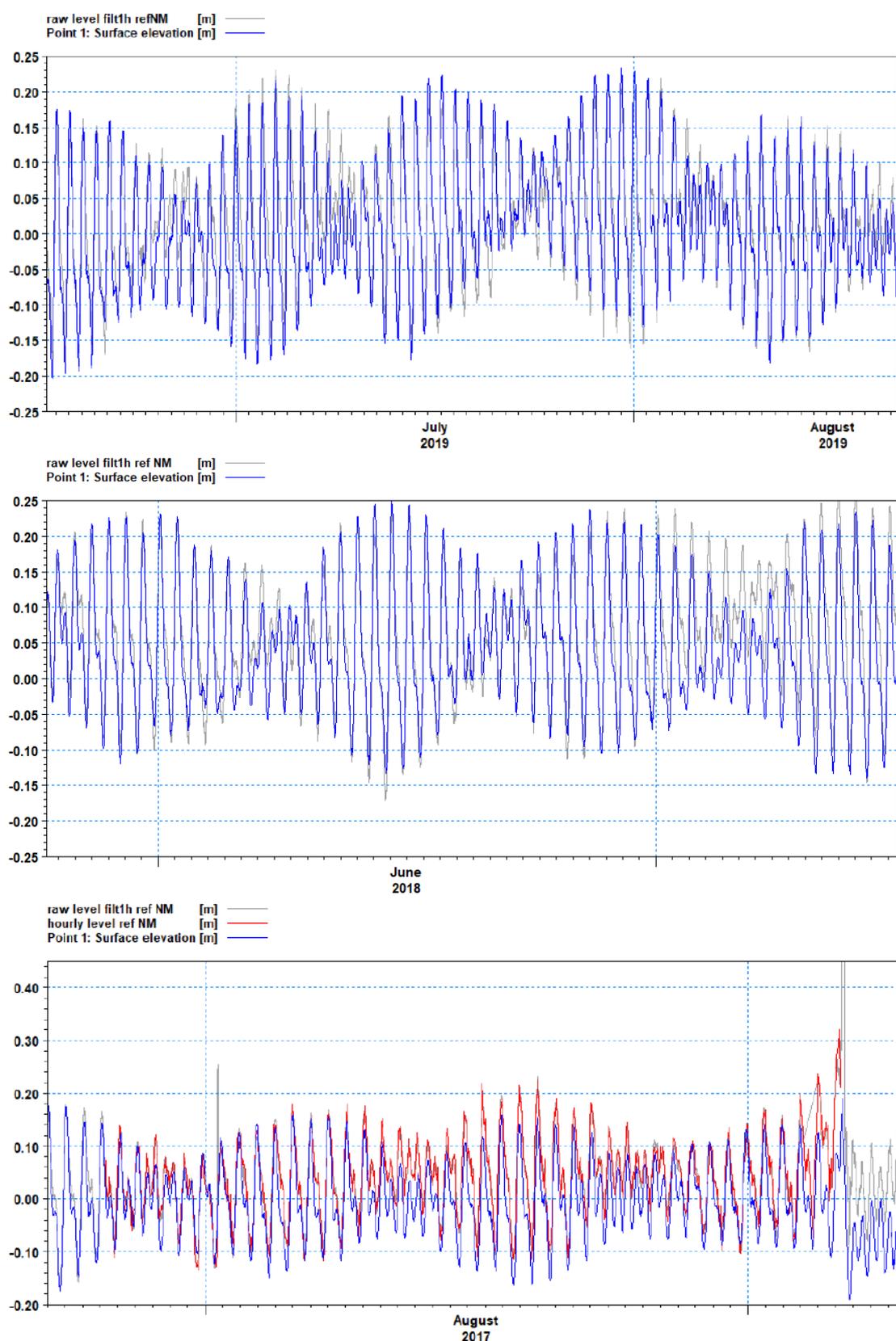


Figure 2-20 Comparaison des niveaux d'eau (en m par rapport au niveau moyen) modélisés (en bleu) et mesurés au marégraphe de Saint-Martin (en gris les valeurs brutes filtrés sur 1 heure, en rouge les données horaires validées par le SHOM), sur trois périodes en 2019, 2018 et 2017.

2.7.3 Les courants aux abords de Galisbay

La validation des courants a été entreprise à partir de mesures ADCP acquises en décembre 2012 et avril 2013 par HOCER⁷ au large de la pointe Arago (Figure 2-21). Les comparaisons modèle-mesures sur ces deux périodes sont présentées Figure 2-22 et Figure 2-23.

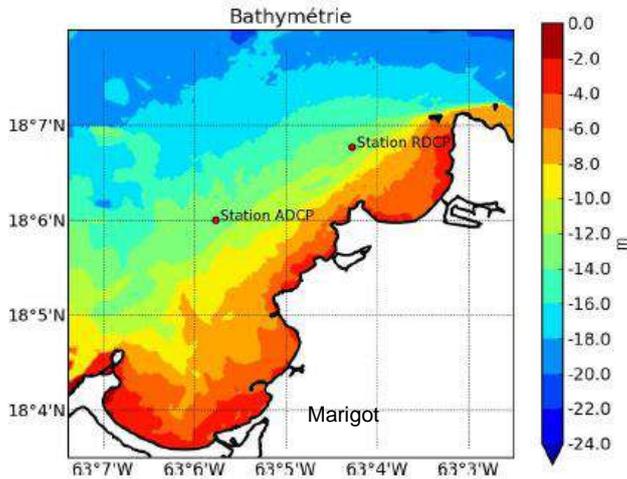


Figure 2-21 Localisation des stations de mesures de courants réalisées en 2012 et 2013 par HOCER.

Dans l'ensemble, le modèle reproduit bien la variabilité des courants dans ce secteur, avec des alternances de directions liées à la marée et au vent. En décembre 2012, les vents proviennent essentiellement du secteur Est-Nord-Est, avec des vitesses de l'ordre de 6-8 m/s, et de 10-12 m/s du 10 au 14 décembre 2012. Sur ces quelques jours, les mesures ADCP, comme le modèle, montrent une intensification des courants portant au Sud-Ouest (> 0.35m/s), alors que les courants de jusant vers l'Est sont très faibles voire inexistants, inversés par les effets du vent. Dans le modèle, le gradient surface-fond des vitesses tend à être plus marqué, alors que les mesures montrent une dynamique un peu plus barotrope. Mais il faut noter que l'ADCP n'échantillonne pas la couche de surface 0-2m ni celle proche du fond, zones de plus fort gradient. Les inversions de direction de courant vers le Nord-Est sont visibles mais non régulières et en général de durée plus courtes que les courants portant au Sud-Ouest. Les courants de marée sont difficiles à identifier car ils sont faibles et souvent perturbés par les effets du vent et de la circulation dans le canal d'Anguilla.

En Avril 2013, le vent est toujours de secteur Est et varie de 5 à 10m/s. Le modèle reproduit bien les variations du niveau d'eau mesurés par l'ADCP. Les courants sont dans l'ensemble plus faibles qu'en décembre. Les courants moyens sur la colonne d'eau fluctuent entre 0.05 et 0.2 m/s (ADCP) et quelques pics à 0.25 m/s dans le modèle. Le modèle reproduit bien les périodes d'intensification des courants vers le Sud-ouest, jusqu'à 0.35-0.40 m/s en surface : du 29 mars au 2 avril puis les 19-23 avril, avec très peu d'inversion des courants vers l'Est. Ici aussi les courants modélisés sont un peu plus forts dans le haut de la colonne d'eau par rapport aux observations, mais ils restent dans le bon ordre de grandeur. Sur les directions, le gradient surface-fond est aussi visible, avec des directions en surface proches de celles mesurées. Dans la colonne d'eau on note un décalage d'une dizaine de degrés vers le sud des courants d'ouest-Sud-Ouest par rapport aux mesures⁸. Ces différences modèle-mesures sont tout à fait acceptables, au vu de la résolution de 500m du modèle régional dans ce secteur côtier. Des écarts entre le vent CFSR (résolution de 0.2°~18km) et le vent réel pourrait aussi expliquer cette différence, ainsi que des effets locaux liés au relief de l'île.

⁷ Mesures de courants sur l'île de Saint-Martin, Rapport HOCER HCR/BT/11AS01/R, 21/06/2013

⁸ Les mesures ADCP ont été fournies par rapport au Nord magnétique, une correction de 14.1° vers l'ouest a été appliquée pour prendre en compte la déclinaison à Saint-Martin.

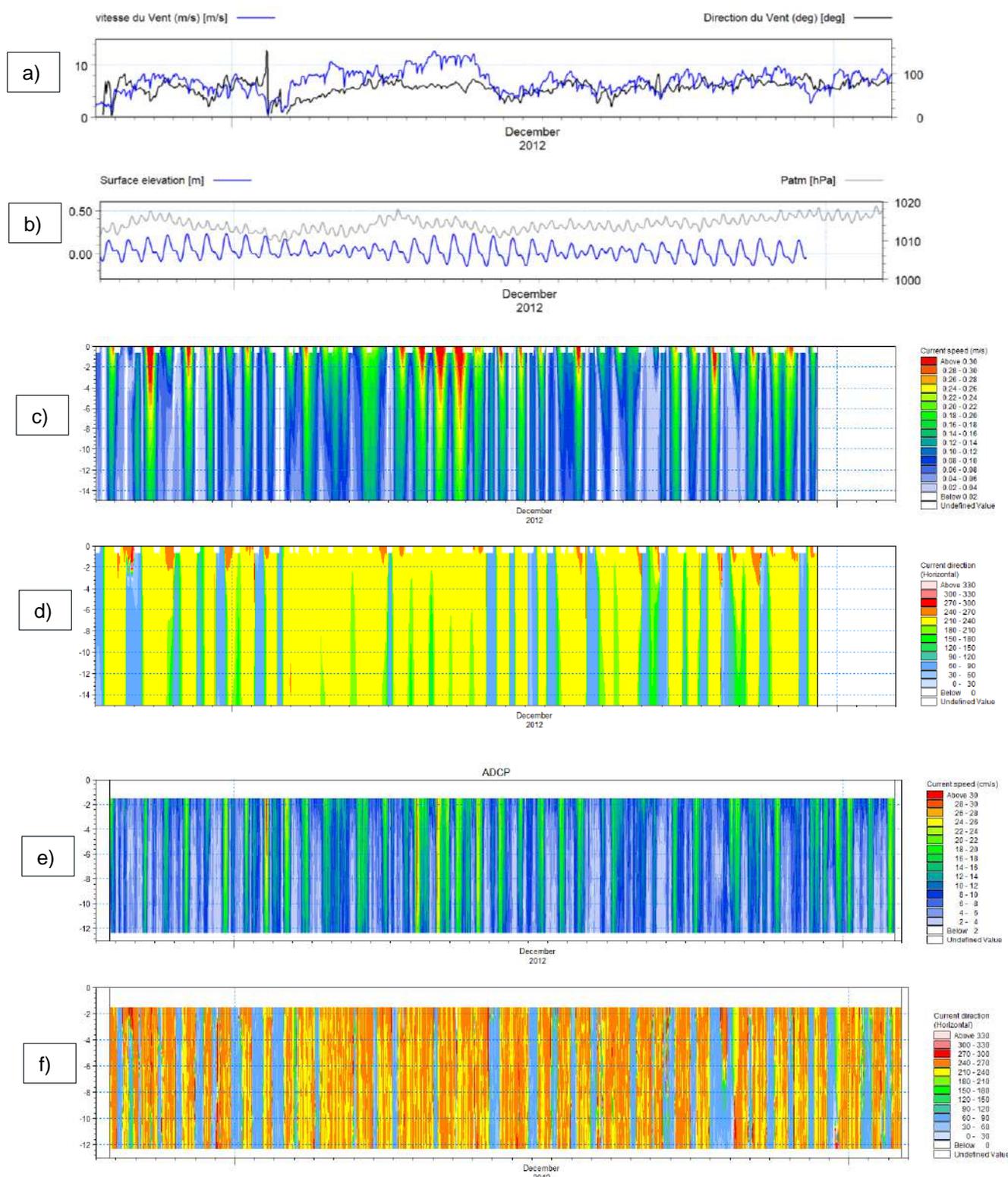


Figure 2-22 Période du 24 novembre 2012 au 03 janvier 2013 – a) vitesse et direction du vent (CFSR) – b) niveau d'eau modélisé, pression atmosphérique (CFSR) – c) et d) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau modélisés – e) et f) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)

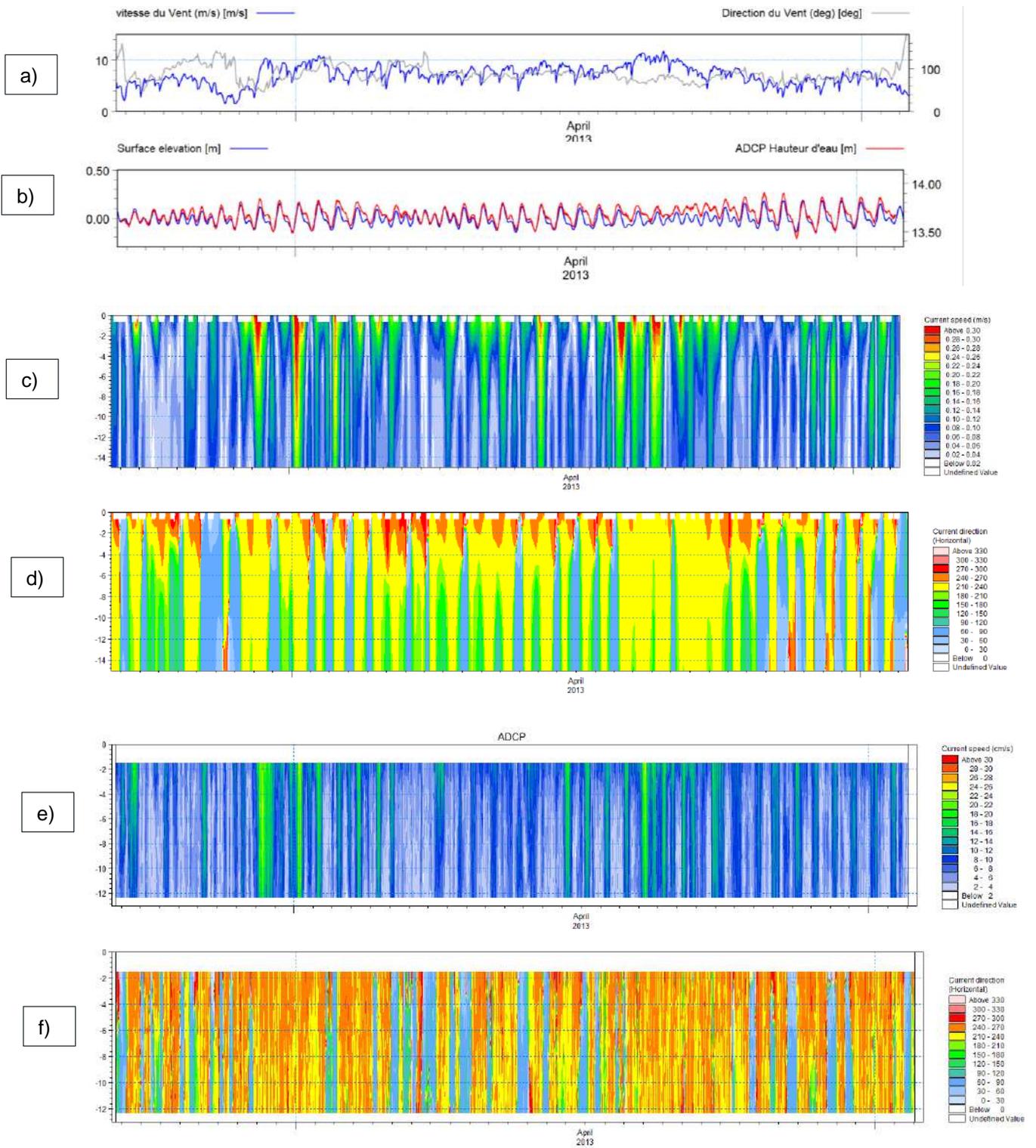


Figure 2-23 Période du 22 mars au 02 mai 2013 – a) vitesse et direction du vent (CFSR) – b) niveau d'eau modélisé et mesuré par l'ADCP, pression atmosphérique (CFSR) – c) et d) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau modélisés – e) et f) vitesses et direction des courants sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)

En baie de Marigot, les données historiques⁹ (Figure 2-24) décrivent une courantologie faible avec une circulation d'Est en Ouest, caractérisée par un décalage vers la droite de 20° à 50° des courants de surface par rapport aux courants proches du fond. Ce phénomène est bien reproduit par le modèle, même si la résolution dans la baie est limitée (de l'ordre de 400m.) Les cartes Figure 2-25 illustrent le phénomène. Le modèle montre également une certaine variabilité de la direction des courants sous les effets conjoints du vent et des courants dans le canal d'Anguilla.

Une validation plus fine de la dynamique dans le canal d'Anguilla et dans la baie de Marigot est envisagée en Phase 5 de l'étude à partir des mesures complémentaires qui seront réalisées en Phase 3.

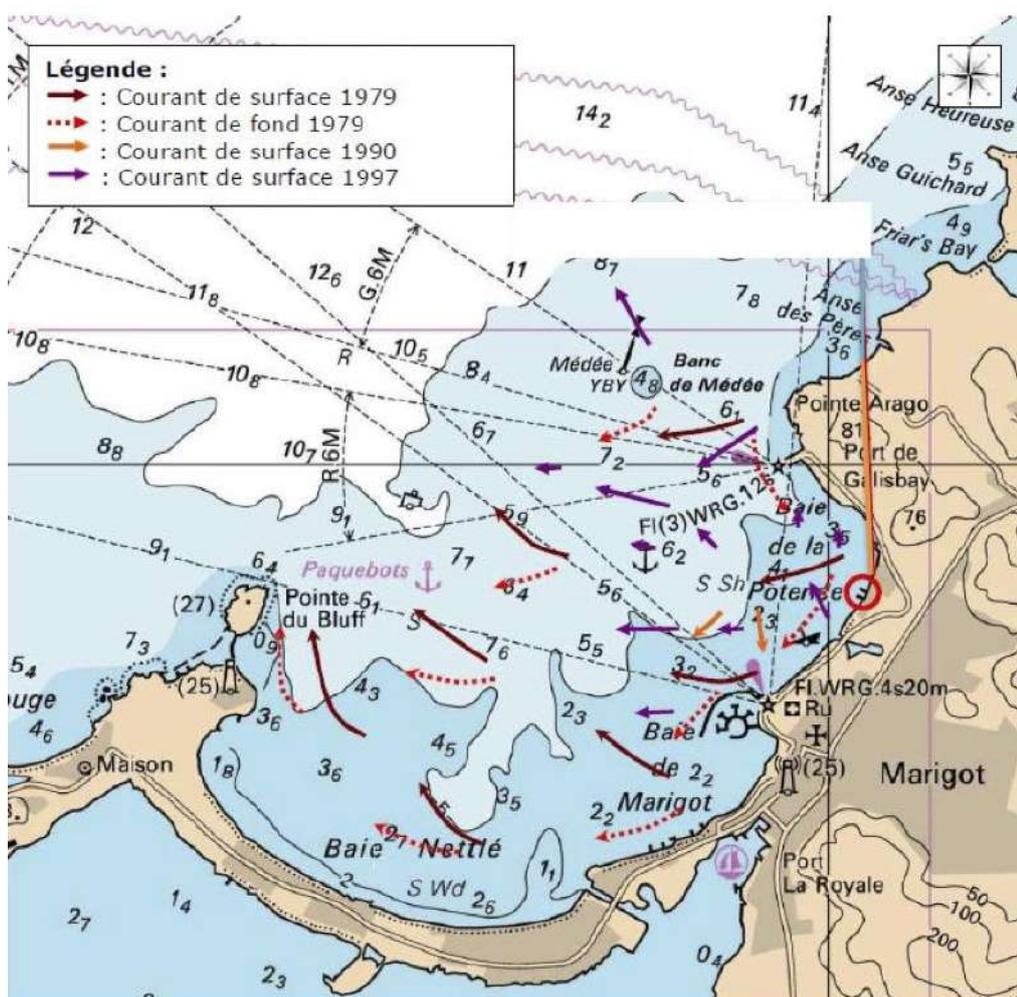


Figure 2-24 Synthèse des données courantologiques de 1979 à 1997 (source : SAFEGE, 2013)

⁹ Etude du GREGSAT de 1979 (Assor) ; Campagne du GREGSAT de novembre 1990 ; Campagne de l'Université de Bordeaux de février 1997

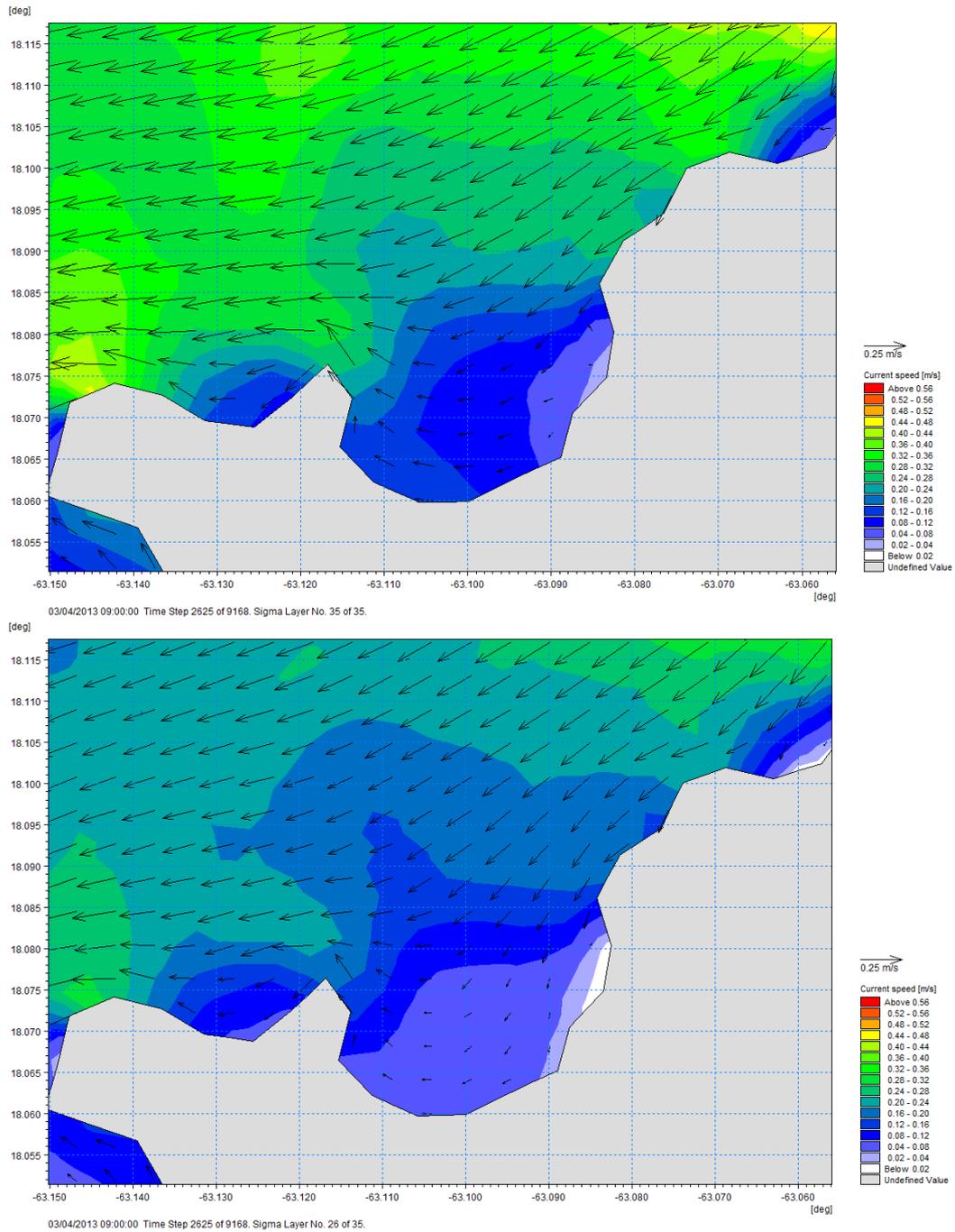


Figure 2-25 Modèle régional MIKE 3D - Courants de surface et au fond aux abords et dans la baie de Galisbay. Situation du 03 avril 2013 illustrant le décalage vers la droite des courants de surface par rapport au fond, dans la baie de Galisbay.

3 Le modèle régional de propagation des vagues

Le modèle régional de propagation des vagues autour de Saint-Martin a été construit avec le logiciel MIKE 21 SW (Spectral Waves) de la suite logiciel MIKEbyDHI©, modèle spectral de dernière génération. Il est forcé aux limites marines par le modèle global GWM de DHI.

Une période de 11 années, de janvier 2010 à décembre 2020, a été simulée. Les sorties du modèle sont sauvegardées à un pas de temps horaire sur l'ensemble du domaine.

Cette section 3 présente plus en détail les caractéristiques du modèle (bathymétrie, forçages, conditions limites, etc.) et sa paramétrisation. Sa validation n'a pu être qu'abordée à partir de mesures de la NOAA en un point situé en limite du domaine. A ce jour, il n'existe pas de mesures de vagues aux abords de Saint-Martin.

Les analyses des résultats du modèle régional de vagues sont présentées en section 4 à 6.

***MIKE 21 SW** est le module de propagation de la houle spectrale. C'est un modèle basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer (mers de vents et houles océaniques) dans les domaines offshore et côtier. MIKE 21 SW prend en compte la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle par moutonnement et déferlement bathymétrique ainsi que la dissipation de la houle par frottement sur le fond, la réfraction et le shoaling liés aux variations de bathymétrie. Les interactions entre houle et courant et les effets de variation de la hauteur du plan d'eau sont pris en compte ainsi que la gestion des zones découvrantes.*

MIKE 21 SW est utilisé pour l'étude des climats de houle en milieu hauturier et côtier, pour de la prévision ou de la reconstitution d'état de mer. Les résultats du modèle de houles sont utilisés pour générer les remises en suspension éventuelles des sédiments (dont les sédiments rejetés sur les sites d'immersion) dans le modèle MIKE 21 MT.

*Enfin, nous pouvons souligner également que DHI a développé une « **Cyclone Toolbox** » qui permet de générer les champs de vent et pression atmosphérique à partir des données « Best Tracks » des cyclones, pour pouvoir simuler ensuite ces conditions extrêmes avec le modèle MIKE 21 SW.*

3.1 Emprise et maillage du modèle de vagues

L'emprise du domaine modélisé avec le modèle de vagues est la même que celle considérée pour le modèle de courantologie, présenté en section 2. Cependant, le maillage du modèle de vague a une résolution spatiale plus faible, nécessaire pour atteindre un bon compromis entre les performances du modèle spectral et le temps de simulation.

La résolution horizontale varie d'environ 6.5 km au large à environ 1km dans la zone côtière d'intérêt pour l'étude, et dans le canal d'Anguilla. Pour apporter aussi une plus-value par rapport au modèle global, la pente continentale très abrupte a été incluse dans une zone de résolution intermédiaire d'environ 2km.

Les données bathymétriques utilisées sont identiques à celles utilisées pour la construction du modèle de courantologie (section 2.3).

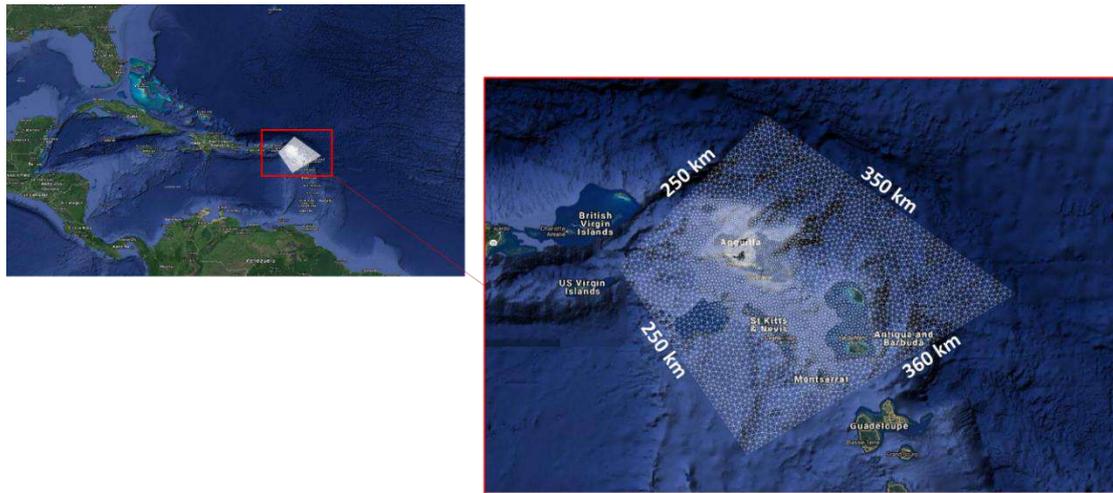


Figure 3-1: Modèle régional de vagues de Saint-Martin – Emprise et maillage du domaine modélisé

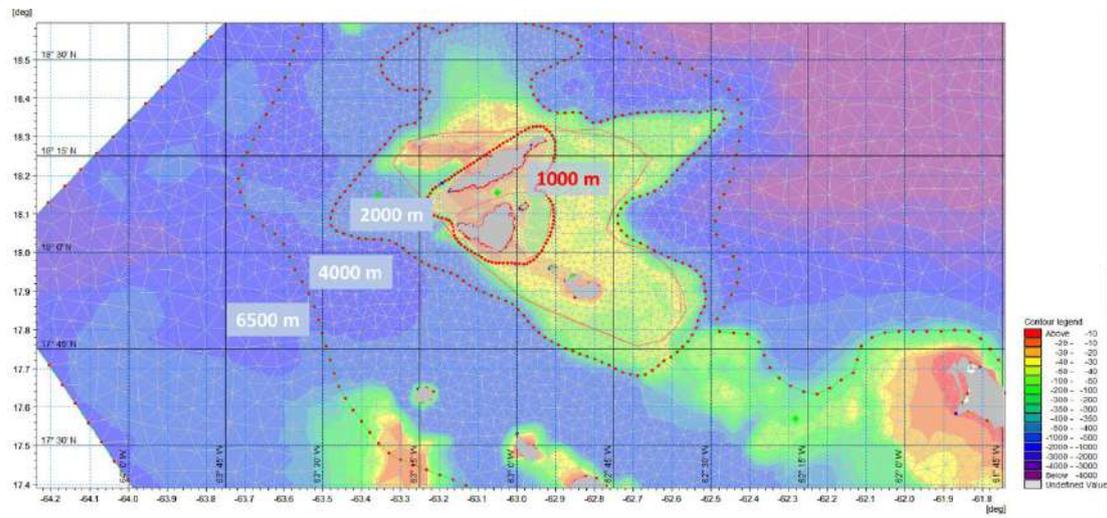


Figure 3-2: Modèle régional de vagues de Saint-Martin – Description de la résolution variable du maillage

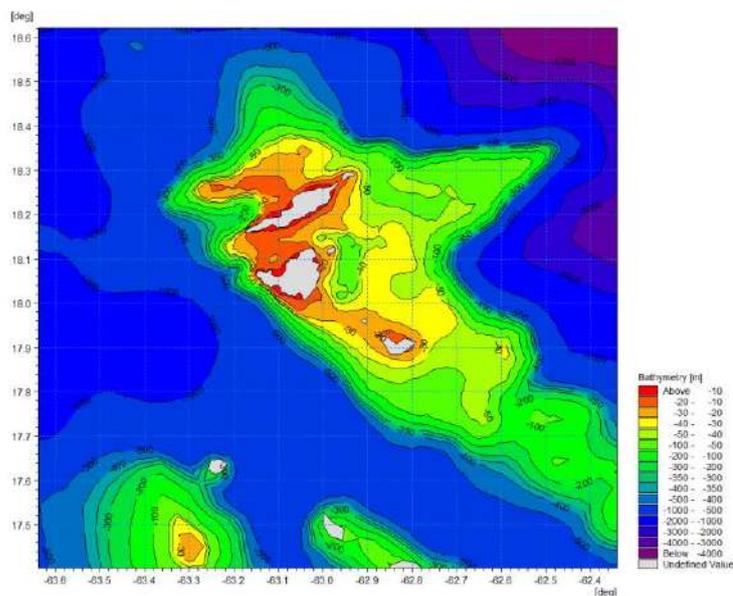


Figure 3-3: Modèle régional de vagues de Saint-Martin – Détail de la bathymétrie.

3.2 Les forçages du modèle de vagues

Le modèle régional de propagation des vagues à Saint-Martin est forcé par le vent de la base de données opérationnelle du Climate Forecast System CFS du NCEP, comme le modèle de courantologie (voir section 2.4.1).

Les conditions aux limites marines sont issues des résultats du modèle Global GWM de DHI, présenté sur « Metocean On Demand » et disponible sur la période 1979-2019 (Figure 3-4). Un exemple de sorties de hauteurs de vagues en un point à l'Est de St-Martin est présenté Figure 3-5, avec une comparaison aux observations par altimétrie.

Ce forçage aux limites est assuré par les paramètres intégrés de hauteur, période de pic et direction moyenne des deux composantes - houles et mer de vent, calculées par le modèle Global GWM de DHI. Cette méthode a déjà fait ces preuves sur plusieurs sites d'étude et permet de simplifier la gestion des conditions limites par rapport à un forçage avec des spectres complets.

La Figure 3-6 présente les roses des houles et de la mer de vent aux deux frontières du modèle régional de Saint-Martin, extraites des résultats du modèle global GWM de DHI. A l'Est, comme à l'Ouest, les houles proviennent du secteur Nord-Est alors que la mer de vent vient du secteur Est-Nord-Est, en bon accord avec la rose des vents CFSR (cf Figure 2-8).

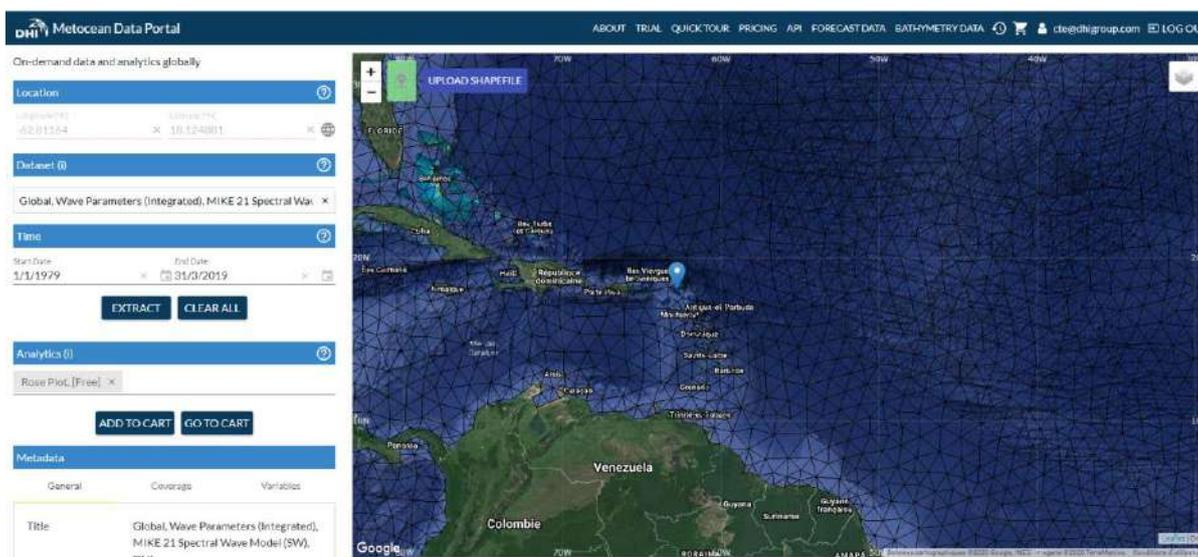


Figure 3-4 Le portail DHI Metocean On Demand, avec les données de houles issus du modèle Global MIKE 21 SW de DHI (1979-2019)

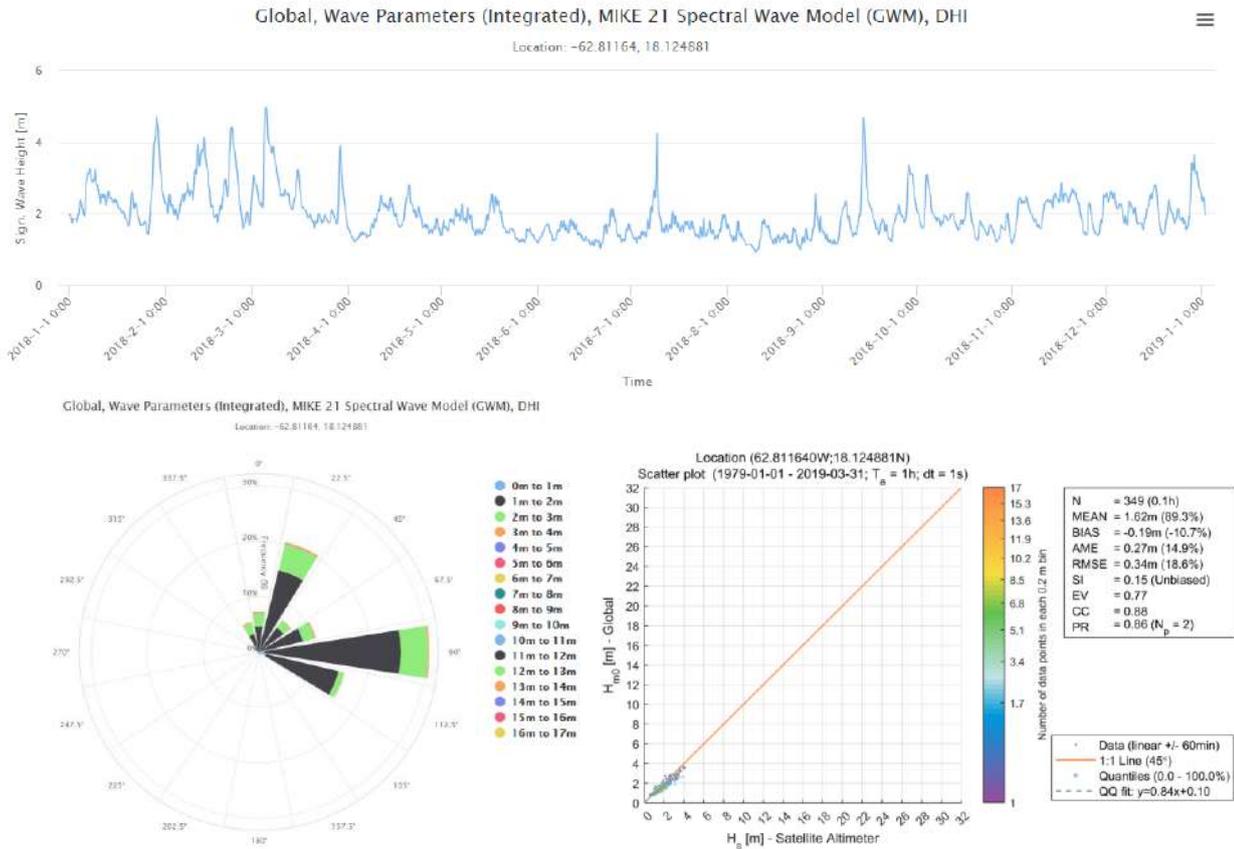


Figure 3-5 Modèle Global des vagues de DHI : Série temporelle des hauteurs significatives de houles à l'Est de St-Martin sur 2018 (en haut) ; rose des houles sur 1979-2018 (en bas à gauche) ; comparaison du modèle avec les observations d'altimétrie (en bas à droite)

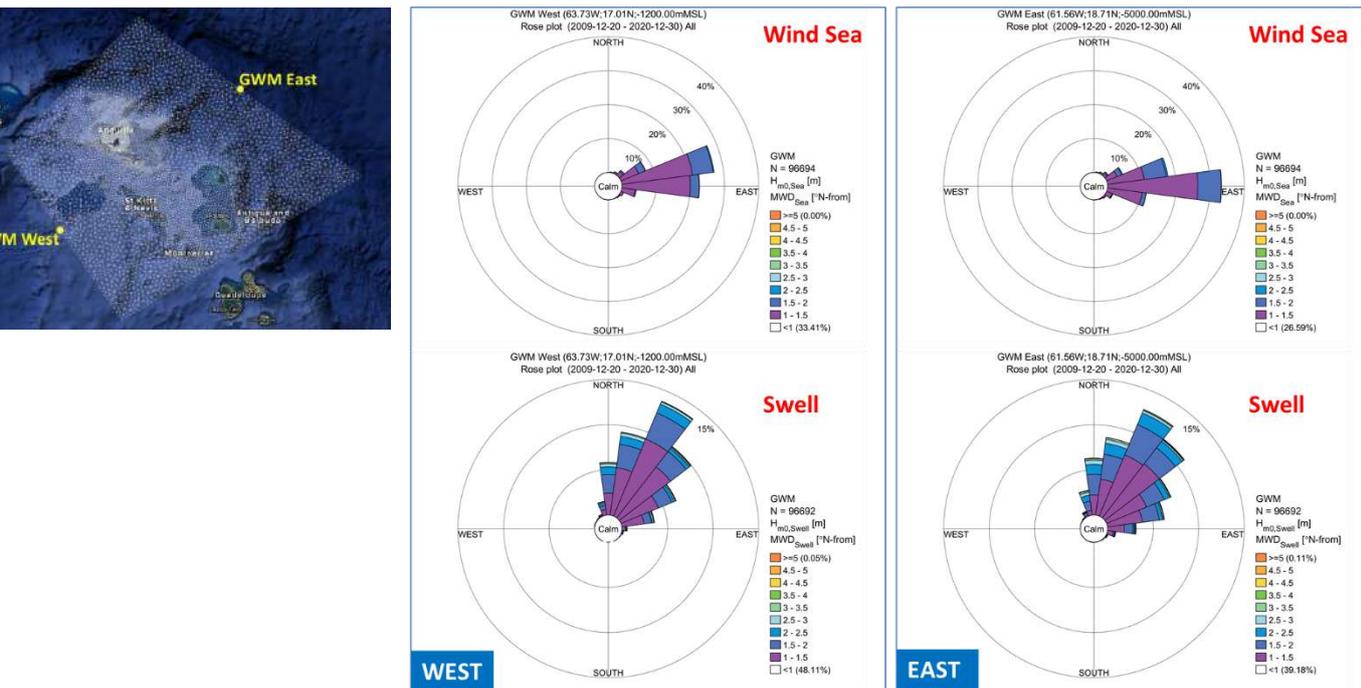


Figure 3-6 Roses des houles et de la mer de vent aux frontières Est (à droite) et Ouest (à gauche) du modèle régional de Saint-Martin, extraites du modèle global GWM de DHI

Validation du modèle à la limite marine (bouée NOAA n°42060)

Les résultats du modèle ont été comparés aux mesures de la bouée 42060 de la NOAA (National Data Buoy Center), localisé au point de coordonnées (16.433 N ; 63.331 W), dans le bassin Vénézuélien. Cette bouée est située à la limite Sud-Ouest du modèle régional de vagues de DHI, cf Figure 3-7. La comparaison a été réalisée sur la série temporelle complète simulée, soit sur plus de 10 années.

Les observations à la bouée montrent que la majorité des vagues (environ 96%) vient du secteur directionnel Est-Sud-Est [90°-120°]. Les vagues modélisées proviennent plutôt du secteur Est-Nord-Est (Figure 3-8). Cet écart en direction peut provenir d'imprécisions sur le forçage vent (CFSR) et/ou d'une résolution spatiale un peu faible du maillage (et de la bathymétrie) dans le sud du domaine, éloigné de Saint-Martin. La comparaison modèle-mesures montre un bon accord des hauteurs de vagues, en particulier pour les conditions normales ($H_s < 2.5m$), représentant plus de 97% des événements.

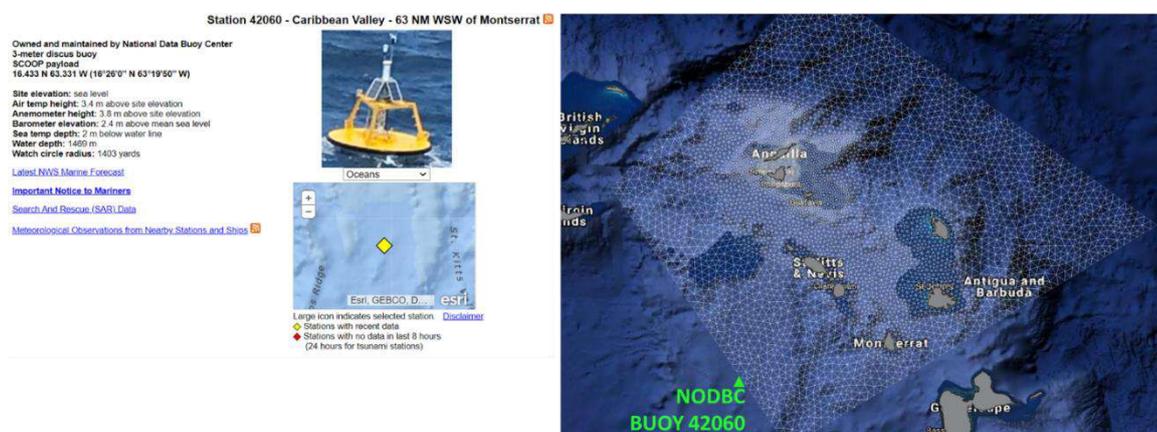


Figure 3-7 Localisation de la bouée 42060 NOAA, au Sud-Ouest du domaine modélisé

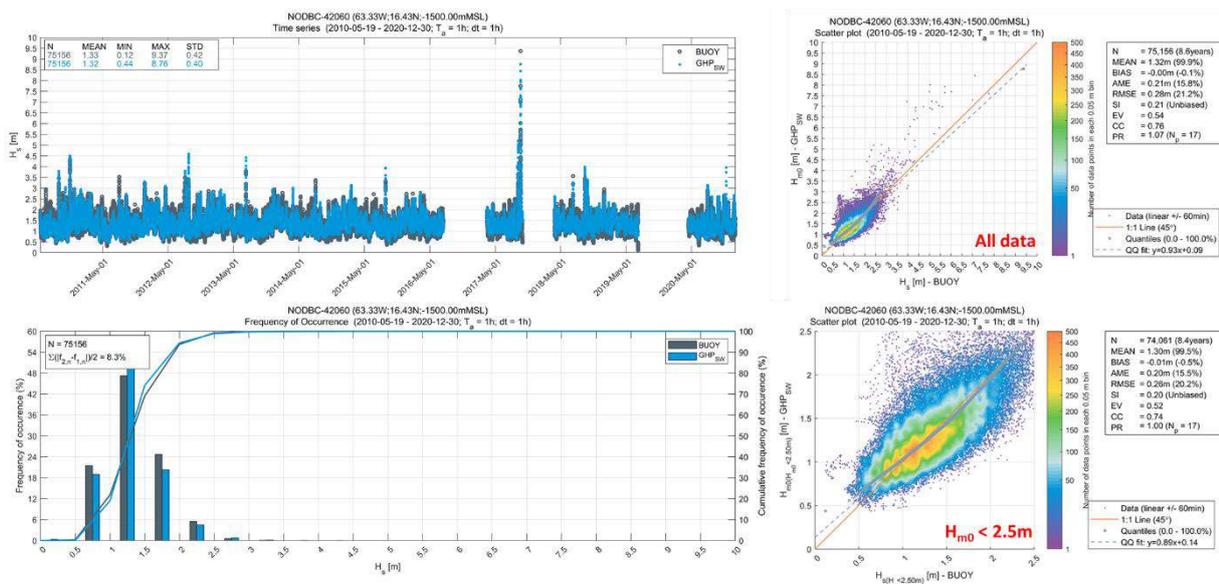


Figure 3-8 Comparison of observed and modelled significant wave height at NOAA Buoy 42060 (2010-2020): time-series comparison (upper left panel), histogram comparison (lower left panel) and scatter plot comparison for all data (upper right panel) and for H_{m0} lower than 2.5 m (lower right panel)

NODBC-42060 (63.33W;16.43N;-1500.00mMSL)
 Dual rose plot (2013-04-07 - 2020-12-30; $T_a = 1h$; $dt = 1h$)

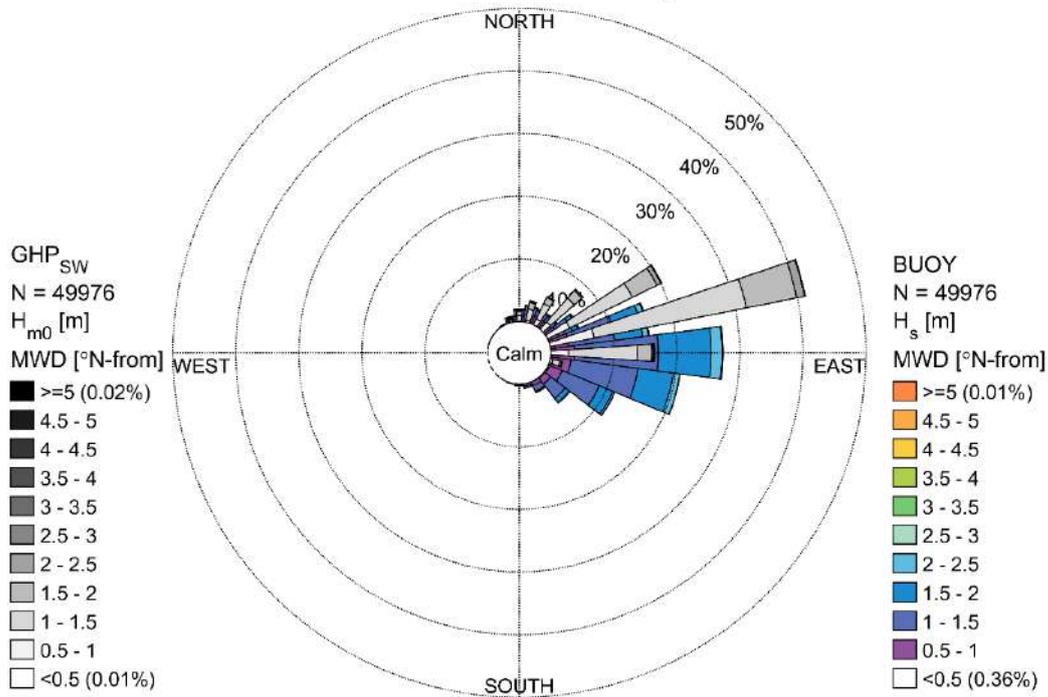


Figure 3-9 Roses des houles mesurées à la bouée NOAA n°42060 sur 2010-2020, et modélisées par le modèle régional MIKE 21SW sur la même période.

3.3 Paramétrisation du modèle de vagues

Le Tableau 3-1 résume les caractéristiques de la configuration et la paramétrisation du modèle régional de vagues de Saint-Martin.

Tableau 3-1 Synthèse des spécificités et de la paramétrisation du modèle régional de vagues de Saint-Martin MIKE 21 SW

Setting	Description/Value
Mesh resolution	Variable resolution flexible mesh with element size of 1000m in the coastal area around St-Martin and Anguilla islands, and 2000 m in the area of dumping site selection
Simulation period	2000-01-01 – 2021-01-01 (10-years)
Basic equations	Fully spectral, instationary
Spectral discretisation	25 frequencies with logarithmic increment factor of 1.1 and fmin of 0.033 Hz (i.e. periods of 2–30s), 24 directions of 15°
Time step (adaptive)	0.01 – 3600 seconds with a maximum time-step factor of 32
Water level	Not included
Current conditions	Not included
Energy transfer	Quadruplet-wave interaction included Triad-wave interaction disabled
Wind forcing	CFSR atmospheric model Air-sea interaction: coupled formulation Cap 0.06 Background roughness Charnock parameter = 0.01 Surface current factor = 0.0
Wave breaking	Included, Specified Gamma, $\gamma = 0.8$, $\alpha = 0.1$.
Bottom friction	Nikuradse constant, $k_n = 0.01\text{m}$.
White capping	Formulation (Bidlot, Janssen, & Abdalla, 2007): $C_{dis} = 2.1$, $\Delta_{dis} = 0.6$
Boundary conditions	2D wave spectra varying in time and along boundary from DHI Global Wave Model

3.4 Validation du modèle de vagues

Pour l'instant, il n'y a pas de mesures de houles disponibles sur le domaine modélisée, en dehors de la Bouée NOAA située à la limite Sud-ouest du domaine et présentée en section 3.2.

Une bouée houlographe doit être installée début 2021 par le BRGM et la Collectivité de Saint-Martin, dans le cadre du projet Carib-Coast (BRGM/Météo-France) et des mesures complémentaires de vagues seront préconisées aux abords de Saint-Martin dans le cadre de la Phase 4 du projet d'Extension du port de Galisbay.

4 Analyse de la climatologie sur 2010-2020

Les résultats du modèle régional de Saint-Martin ont été analysés pour caractériser la climatologie aux abords de Saint-Martin sur les 10 dernières années, en termes de forçage atmosphérique (données horaires CFSR), de vagues et de courantologie. L'objectif est ensuite (en section 6) de déterminer des scénarios météo-océaniques types pour les simulations de panaches turbides. Les statistiques annuelles, saisonnières et mensuelles ont été réalisées sur les différents paramètres.

Les analyses extrêmes, comme la caractérisation des événements cycloniques ne sont pas réalisées ici, les données de forçage CFSR ne pouvant reproduire précisément ces phénomènes avec une résolution spatiale de 0.2°. Une analyse spécifique sera réalisée en Phase 5 pour prendre en compte ces événements sur la dynamique sédimentaire dans la baie de Galisbay.

4.1 Les conditions météorologiques

Le climat des îles du Nord de l'Arc Antillais est de type tropical maritime, partagé entre :

- Une saison sèche (« carême », de décembre à mai) avec des pluies peu abondantes et des températures modérées ;
- Une saison humide et plus chaude (« hivernage », de juin à novembre), avec les Alizés tropicaux humides en juin-juillet puis une période de plus basse pression liée à la remontée de la ZCIT, d'août à novembre, saison propice aux cyclones.

Le vent

En dehors des événements cycloniques, Saint-Martin est soumis à deux types de vent :

- Les Alizés, générés par l'Anticyclone des Açores. Pendant la saison sèche, il descend au Sud et renforce les vents d'Est-Nord-Est sur les Antilles. Pendant l'hivernage, il se déplace vers le nord, les Alizés sont alors affaiblis et irréguliers.
- Les Northers, vents froids de secteur Nord-Est à Nord-Ouest, qui atteignent parfois les Antilles pendant les mois d'hiver (novembre à mars). Ils soufflent derrière le front froid des perturbations qui se déplacent d'Est en Ouest dans l'Atlantique Nord. Ils débutent généralement par un fort coup de vent de secteur Ouest à Nord-Ouest accompagné de fortes averses. Après quelques heures, ils s'établissent au Nord et peuvent souffler avec violence, parfois en tempête, pendant plusieurs jours.

L'analyse des données CFSR de 2010-2020 (Figure 4-1 et Figure 4-2) montre en effet que le climat est dominé par les vents du secteur Est-Nord-Est, avec sur l'année 93% des vents provenant du secteur SE à NE. Seulement 2% des vents sont inférieurs à 2 m/s (7 km/h) mais 37% sont compris entre 6 et 8 m/s (20-30 km/h). De plus 5% des vents sont supérieurs à 10 m/s (36 km/h).

Les roses saisonnières (Figure 4-3) mettent en évidence le renforcement des Alizés d'E-NE en début d'hiver (décembre-Février) avec 36% des vitesses supérieures ou égales à 8 m/s et 10% >10 m/s. Alors qu'en début de saison humide (juin-juillet) les vents sont en général plus faibles (25% > 8m/s et 2% >10 m/s) et orientés plus à l'Est. Pendant l'hivernage (août-novembre) les vents sont à nouveau du secteur SE à NE, avec 3% des vitesses >10m/s mais pouvant aller jusqu'à 38 m/s (137 km/h). Le diagramme de fréquence de dépassement (Figure 4-2) montre qu'à cette saison, les vents de plus 35 m/s (125 km/h), associés aux tempêtes tropicales ou aux cyclones, ont une probabilité d'occurrence de moins d'une heure par an. On rappelle que les événements cycloniques sont cependant lissés/sous-estimés dans ces données CFSR.

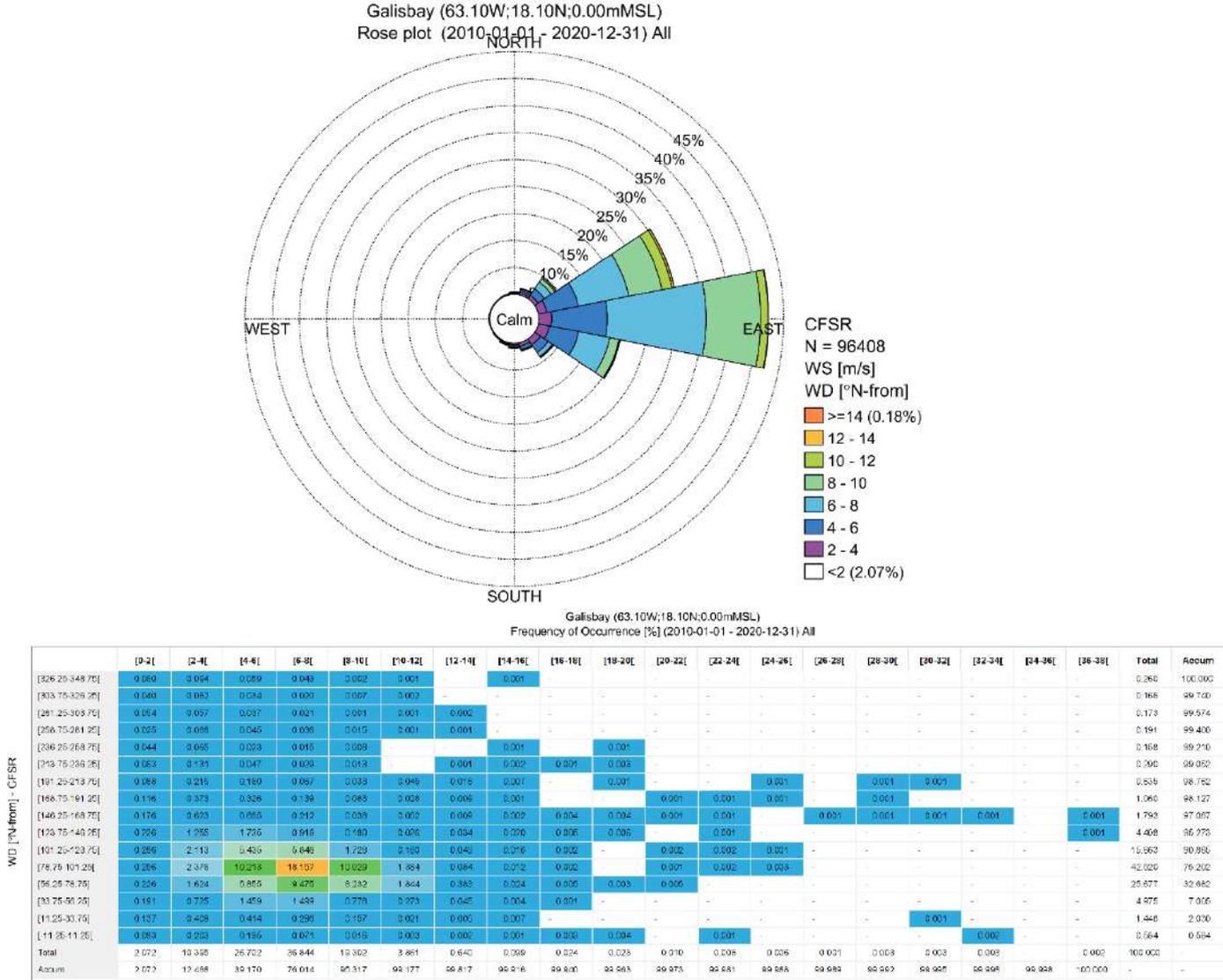


Figure 4-1 Rose des vents annuelle (direction d'où il vient) et pourcentage d'occurrence, sur 2010-2020, à Saint-Martin – Données CFSSR

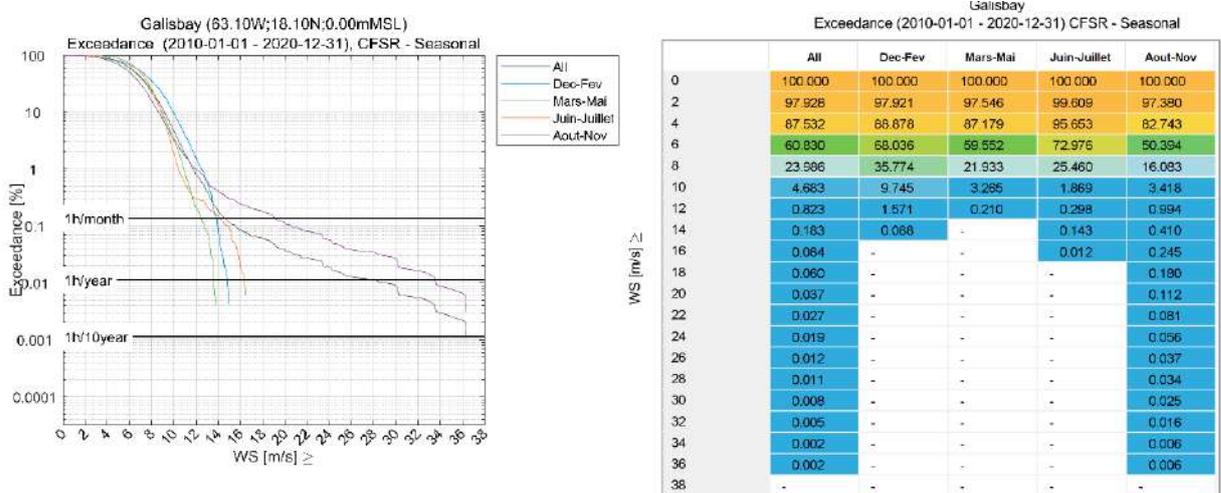


Figure 4-2 Fréquences de dépassement des vitesses du vent CFSSR sur 2010-2020 à Saint-Martin

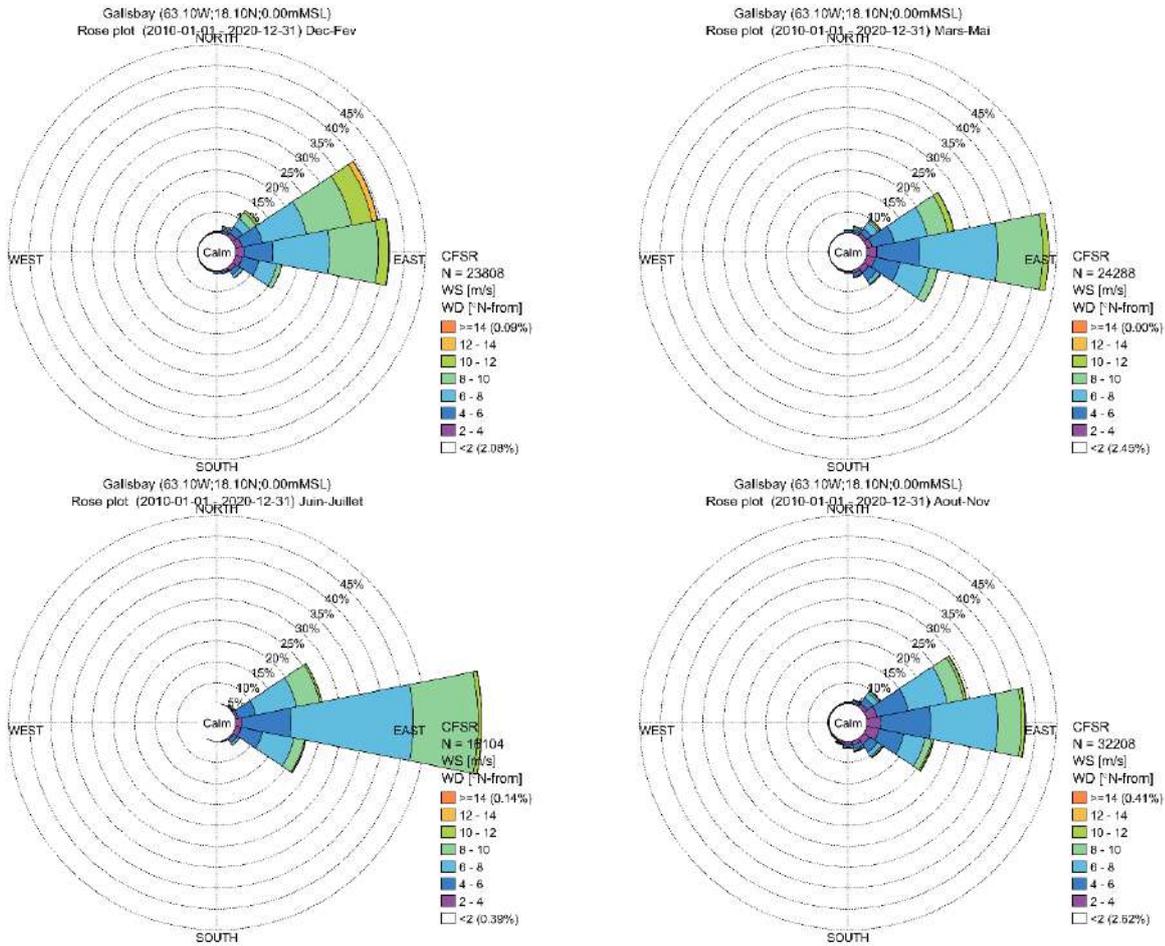


Figure 4-3 Roses des vents à Saint-Martin sur 2010-2020, pour les quatre saisons – Données CFSR

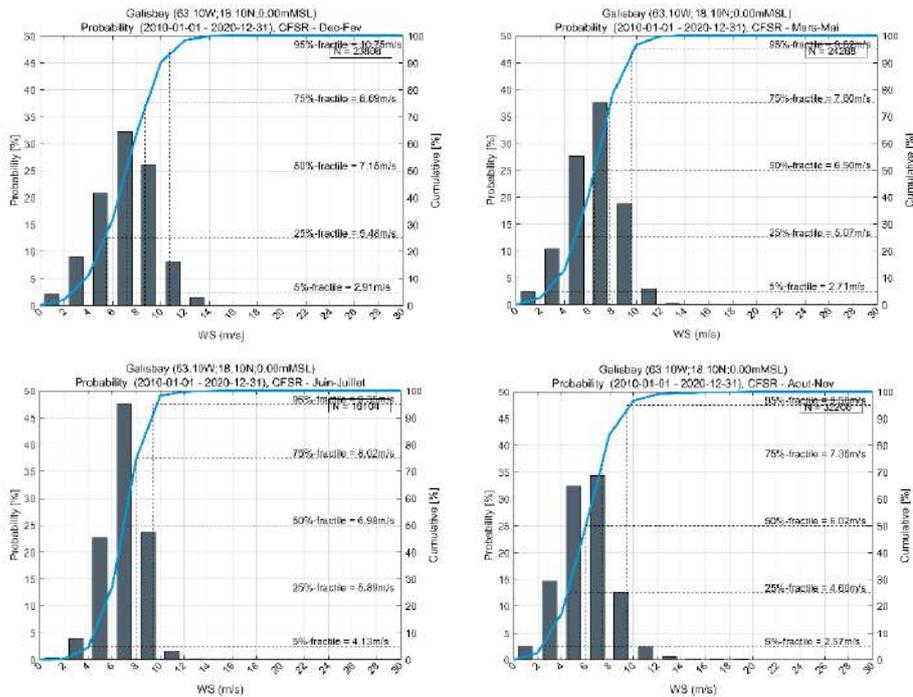


Figure 4-4 Distribution des vitesses du vent à Saint-Martin sur 2010-2020, sur les quatre saisons – Données CFSR

La pression atmosphérique

La pression atmosphérique à Saint-Martin est en moyenne assez stable au cours de l'année, excepté pendant la période des cyclones où elle peut chuter rapidement. Pendant la saison sèche, elle est en moyenne de ~1016 hPa, variant entre 1010 et 1020 hPa. En hivernage, on observe de plus basses pressions d'août à novembre, liée à la remontée de la ZCIT vers le nord et l'apparition d'événements cycloniques. Dans les données CFSR 2010-2020, la pression moyenne est de ~1013 hPa de septembre à octobre, pouvant descendre jusqu'à 996 hPa. Lors des cyclones la pression atmosphérique réelle peut baisser d'avantage, mais ces événements sont ici lissés dans le modèle global CFSR.

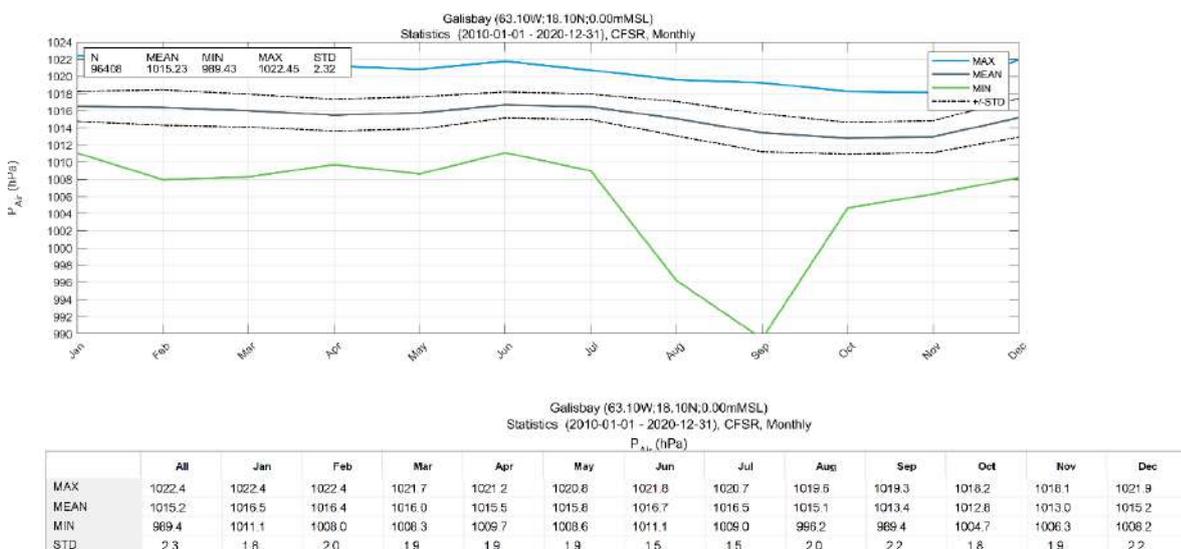


Figure 4-5 Statistiques mensuelles 2010-2020 de la Pression atmosphérique à Saint-Martin – Données CFSR

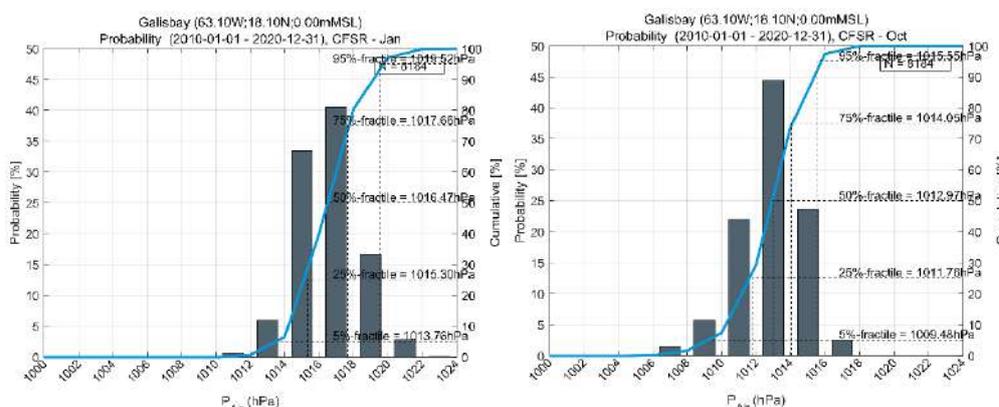


Figure 4-6 Distribution de la Pression atmosphérique sur 2010-2020 à Saint-Martin, aux mois de Janvier (à gauche) et d'octobre (à droite) – Données CFSR.

La température de l'air et les précipitations

La température de l'air est minimale en début de saison sèche (décembre-avril), avec une moyenne mensuelle de 25.5-26°C, associée à la période des Alizés frais et secs (précipitations moyennes mensuelles de ~40 mm). Elle augmente à partir d'avril pour être maximale d'août à octobre (28.2-28.5°C). Les précipitations moyennes mensuelles sont de 167,185 et 170 mm de septembre à novembre.

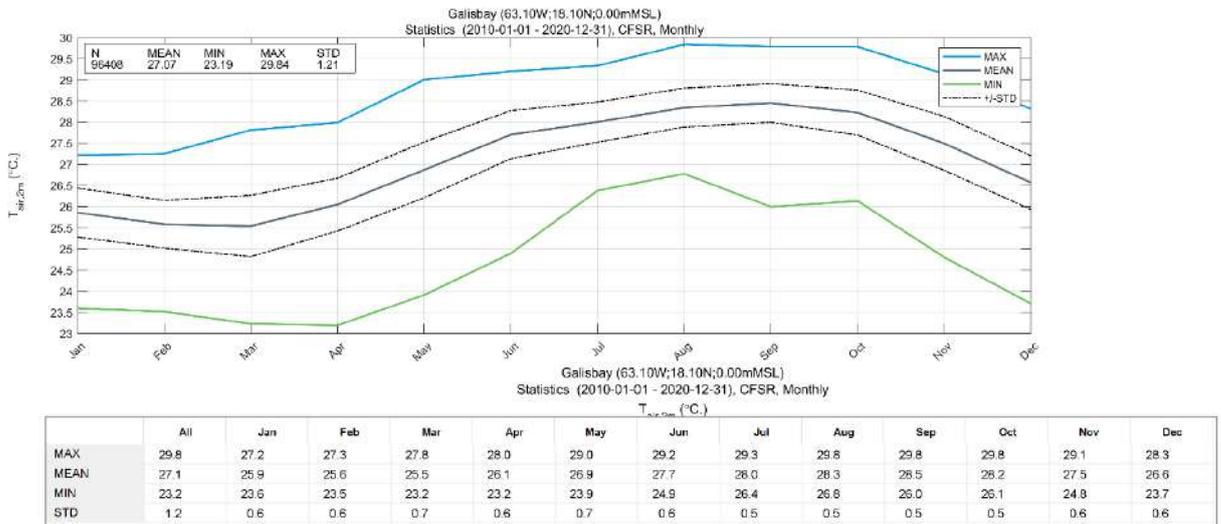


Figure 4-7 Statistiques mensuelles 2010-2020 de la température de l'air (CFSR) à Saint-Martin

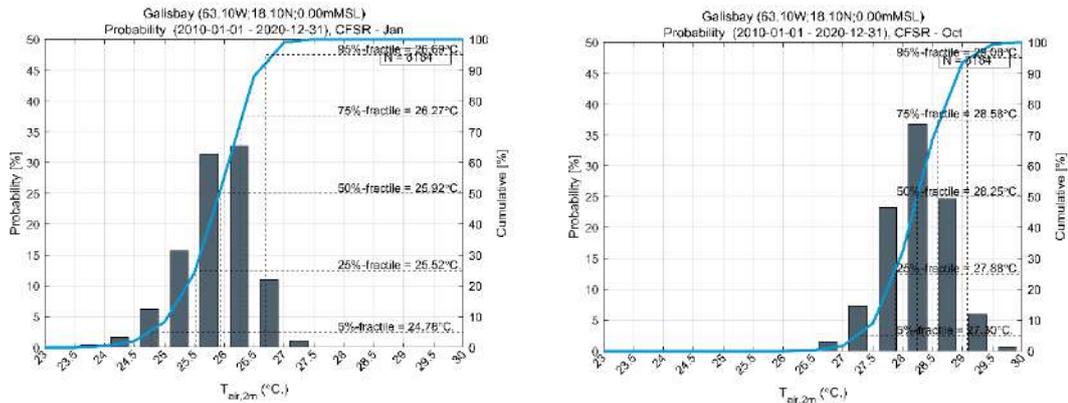


Figure 4-8 Distribution des températures de l'air en Janvier et en Octobre (CFSR, 2010-2020)

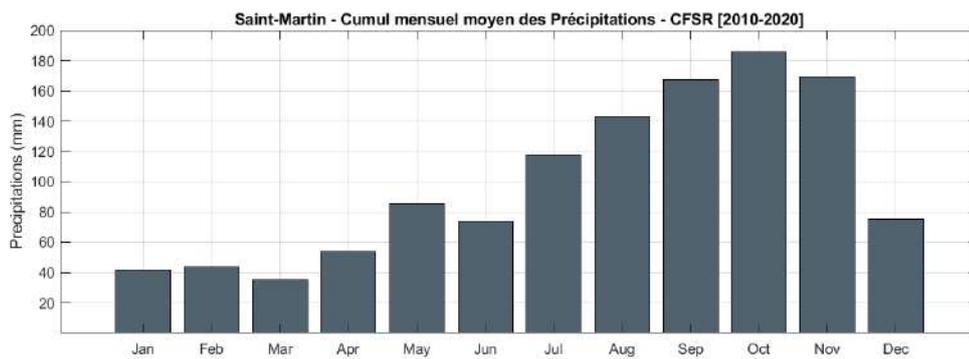


Figure 4-9 Cumul mensuel moyen des Précipitations (mm) - Données CFSR, 2010-2020

4.2 Les vagues autour de Saint-Martin

Les vagues dans ce secteur des Petites Antilles proviennent au large essentiellement du secteur Nord-Est. Comme illustré précédemment à partir des résultats du modèle Global (Figure 3-6), les houles proviennent du Nord-Est alors que la mer de vent provient du secteur Est-Nord-Est, en accord avec les vents dominants (Alizés).

Sur le plateau, les vagues du large se propagent en se réfractant autour des îles d'Anguilla, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Dans le canal d'Anguilla, les vagues s'engouffrent facilement mais s'atténuent en se propageant dans les petits fonds, limitant ainsi fortement l'agitation au niveau de la baie de Galisbay, comparé à la côte Est de Saint-Martin plus exposée. Ce phénomène est illustré sur les champs de vagues présentées Figure 4-11. Cependant les résultats du modèle montrent aussi que lorsque les houles au large s'orientent un peu plus au Nord (direction de provenance), elles sont réfractées autour d'Anguilla et peuvent alors atteindre la baie de Galisbay et y induire des conditions d'agitation particulièrement fortes. Ces conditions sont en effet connues comme telles par les usagers locaux, notamment par les pêcheurs et les plongeurs. Cette situation est illustrée Figure 4-12 avec l'événement de Northers de début mars 2018. Les résultats dans la baie de Galisbay seront d'avantage décrits en Phase 5, à partir des résultats du modèle haute résolution.

Les roses des houles sur 2010-2020 ont ici été extraites en plusieurs points autour de Saint-Martin, localisés Figure 4-10. Elles sont présentées Figure 4-13 (P4-NW), Figure 4-14 (P3-NE) et Figure 4-15 (P5-Détroit) pour caractériser leur variabilité à l'approche de l'île. La rose au point 4-NW montre bien l'effet de réfraction autour du plateau d'Anguilla avec une rose décalée vers le Nord-Nord-Est et des hauteurs plus faibles qu'à l'Est des îles.

Enfin, l'analyse saisonnière des vagues à P4 et P3 (Figure 4-16) met en évidence une période de plus faibles conditions d'agitation en juin-juillet, début de saison humide, avec des vagues orientées plus à l'Est. C'est pendant la saison sèche de décembre-Février, que les conditions agitées sont les plus fréquentes, avec l'établissement des Alizés soufflant du Nord-Est. Pendant la saison cyclonique (Aout-Novembre) les vagues de plus de 3m au point 3-NE ne représentent ici que 1.5% du climat de houles.

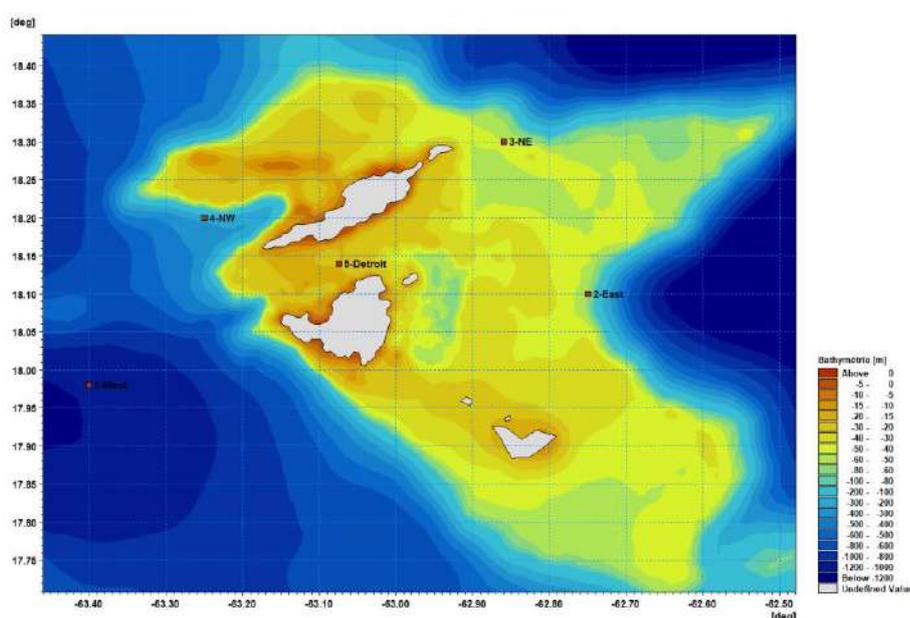


Figure 4-10 Localisation des points d'extraction des résultats du modèle de vagues, sur la bathymétrie du modèle.

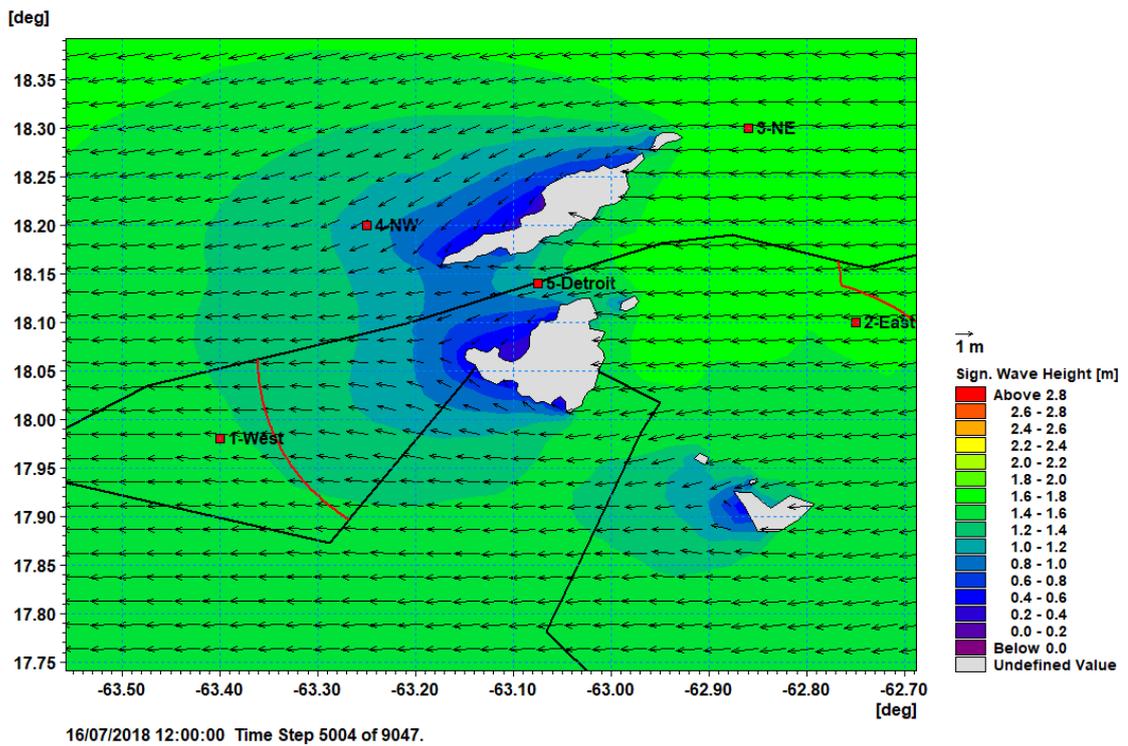
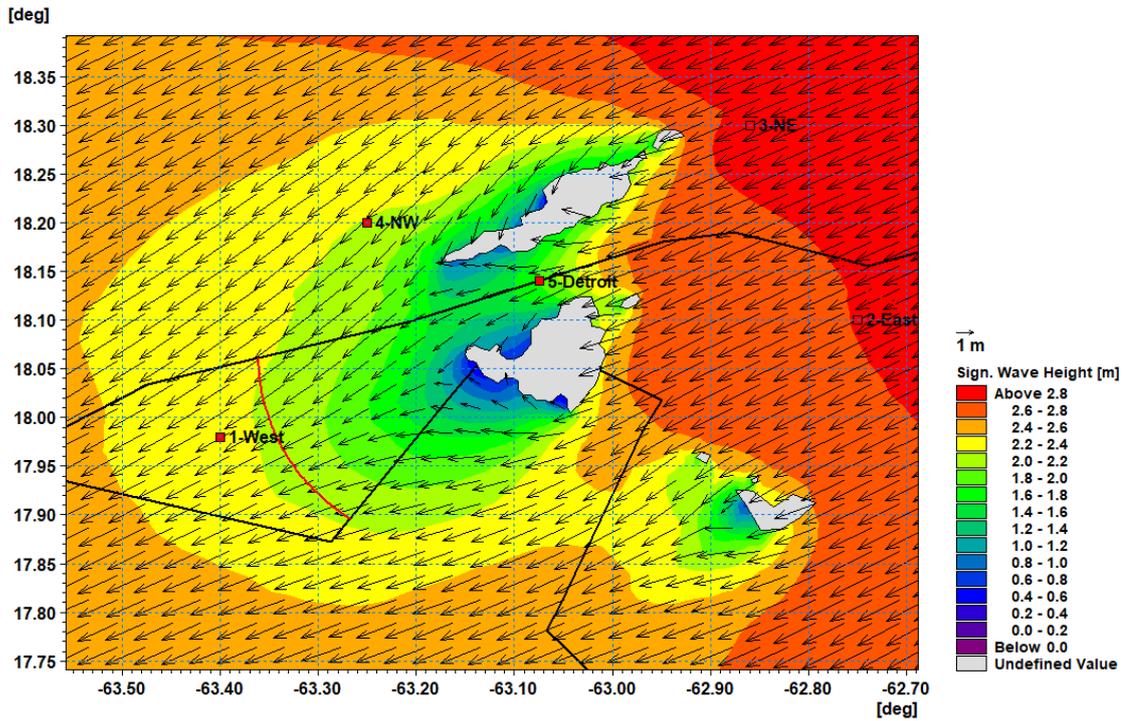


Figure 4-11 Champs de vagues du Nord-Est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : situation du 20/02/2018, en période d'Alizés de Nord-Est (en haut) et situation du 16/07/2018 en saison humide avec des vagues au large venant de l'Est (en bas).

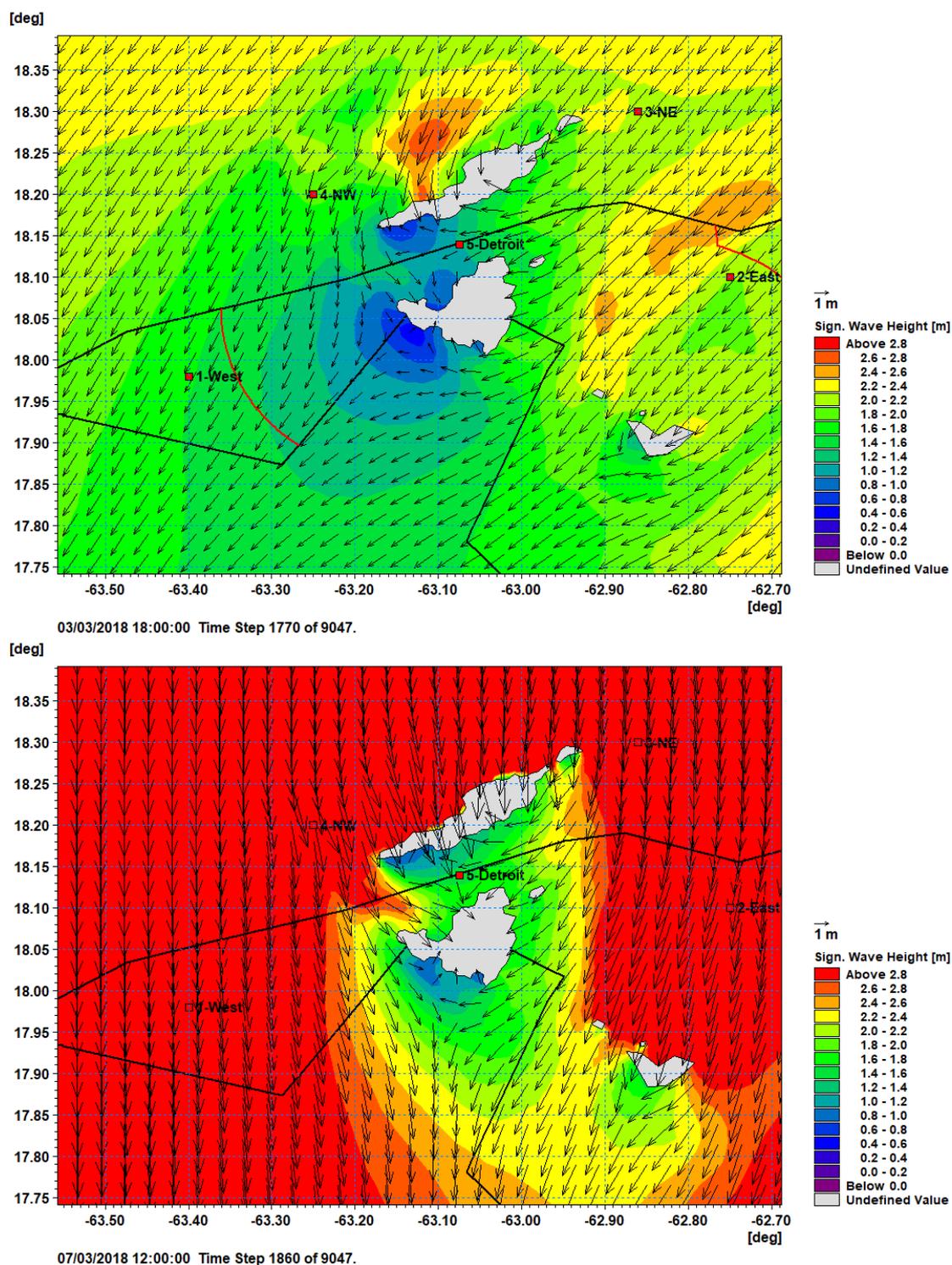
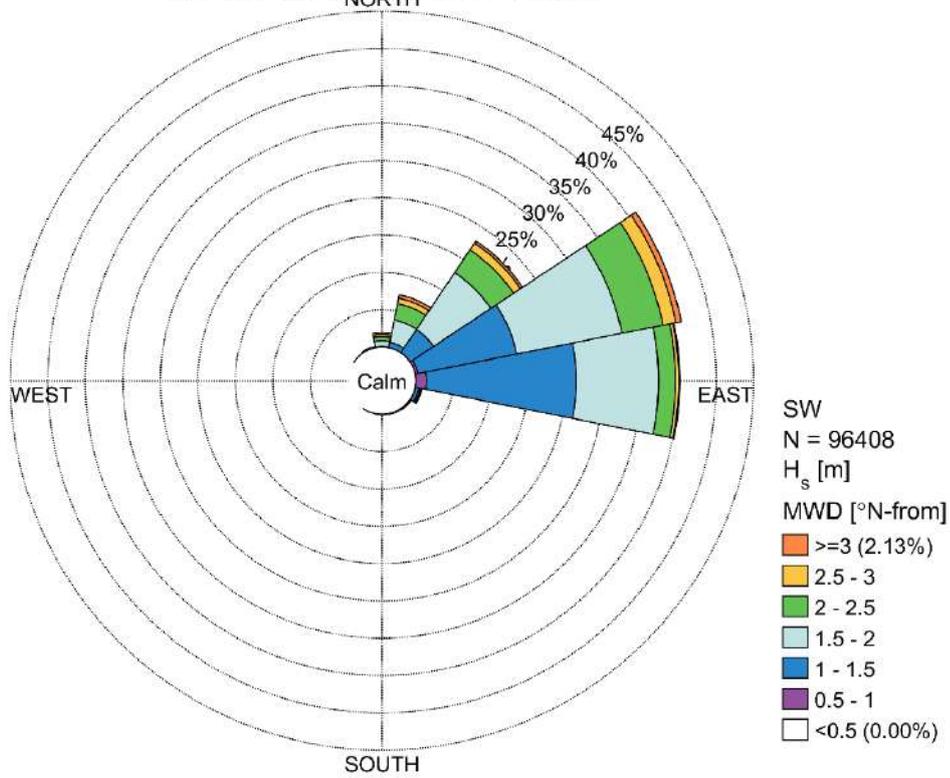


Figure 4-12 Champs de vagues du secteur Nord-Nord-Est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : événement de Northerers, situations au 3 et 7 mars 2018.

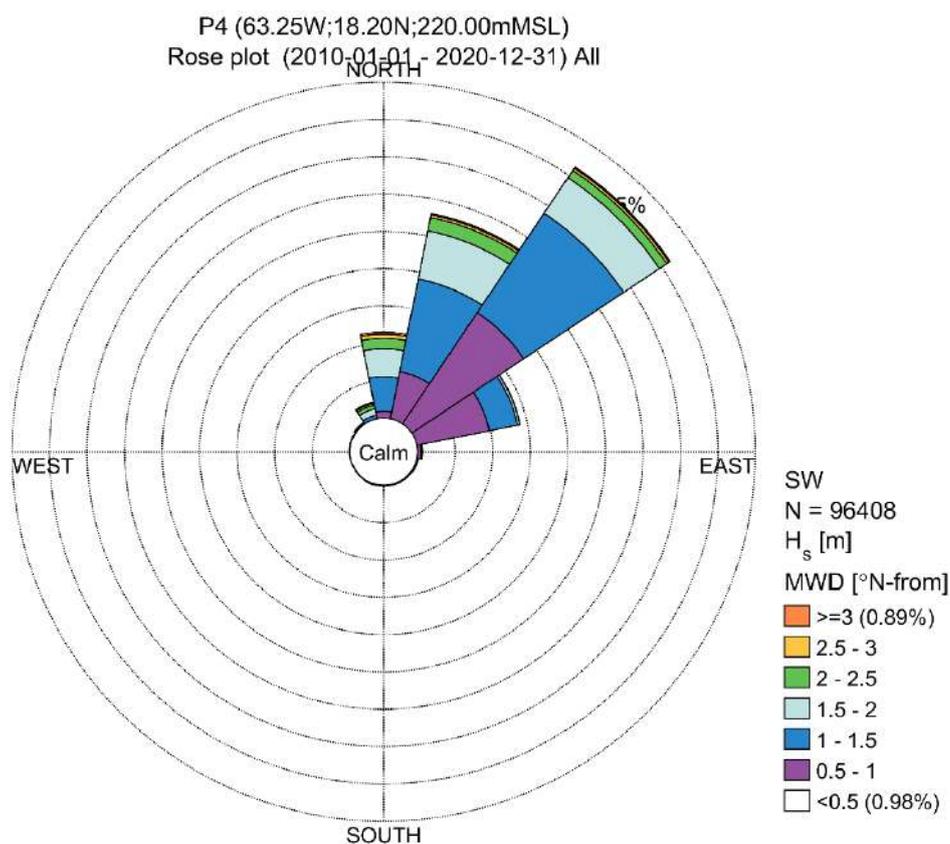
P3 (62.86W;18.30N;49.00mMSL)
Rose plot (2010-01-01 - 2020-12-31) All



P3 (62.86W;18.30N;49.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (2010-01-01 - 2020-12-31) All

MWD [°N-from] - SW	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	Total	Accum
[326.25-348.75[	-	-	0.001	0.030	0.026	0.060	0.007	0.013	0.012	0.012	-	-	0.163	99.939
[303.75-326.25[	-	-	-	-	-	-	0.002	0.002	-	-	-	-	0.004	99.776
[281.25-303.75[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.772
[258.75-281.25[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.772
[236.25-258.75[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.772
[213.75-236.25[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.772
[191.25-213.75[	-	-	-	0.005	0.004	0.002	-	-	-	-	-	-	0.011	99.772
[168.75-191.25[	-	-	0.017	0.016	0.039	0.002	-	-	-	-	0.001	0.001	0.076	99.760
[146.25-168.75[	-	-	0.017	0.008	0.060	0.009	0.004	0.001	0.001	0.001	-	0.001	0.103	99.685
[123.75-146.25[	-	0.004	0.033	0.032	0.059	0.016	0.013	0.006	0.004	0.004	0.003	0.001	0.176	99.582
[101.25-123.75[	-	0.055	0.457	0.189	0.147	0.028	0.032	0.010	0.015	0.006	-	-	0.540	99.406
[78.75-101.25[	-	1.442	19.925	10.948	2.260	0.429	0.044	0.043	0.020	0.021	0.005	0.003	35.139	98.466
[56.25-78.75[	-	0.367	13.402	14.305	5.570	1.764	0.433	0.222	0.057	0.002	-	0.001	36.124	63.327
[33.75-56.25[	-	0.034	3.716	9.172	3.646	1.097	0.221	0.056	0.048	0.020	0.002	0.002	18.015	27.203
[11.25-33.75[	-	0.016	0.724	3.058	2.228	0.746	0.336	0.084	0.032	0.001	0.002	0.001	7.228	9.188
[-11.25-11.25[	-	-	0.119	0.740	0.521	0.325	0.183	0.071	0.003	-	-	-	1.960	1.960
Total	-	1.918	38.412	38.503	14.561	4.479	1.275	0.508	0.192	0.067	0.013	0.010	99.939	-
Accum	-	1.918	40.330	78.833	93.394	97.873	99.147	99.656	99.848	99.915	99.928	99.939	-	-

Figure 4-13 Rose des vagues (direction d'où elles viennent) au point P3-NE et tableau des fréquences d'occurrence associées (%), sur 2010-2020

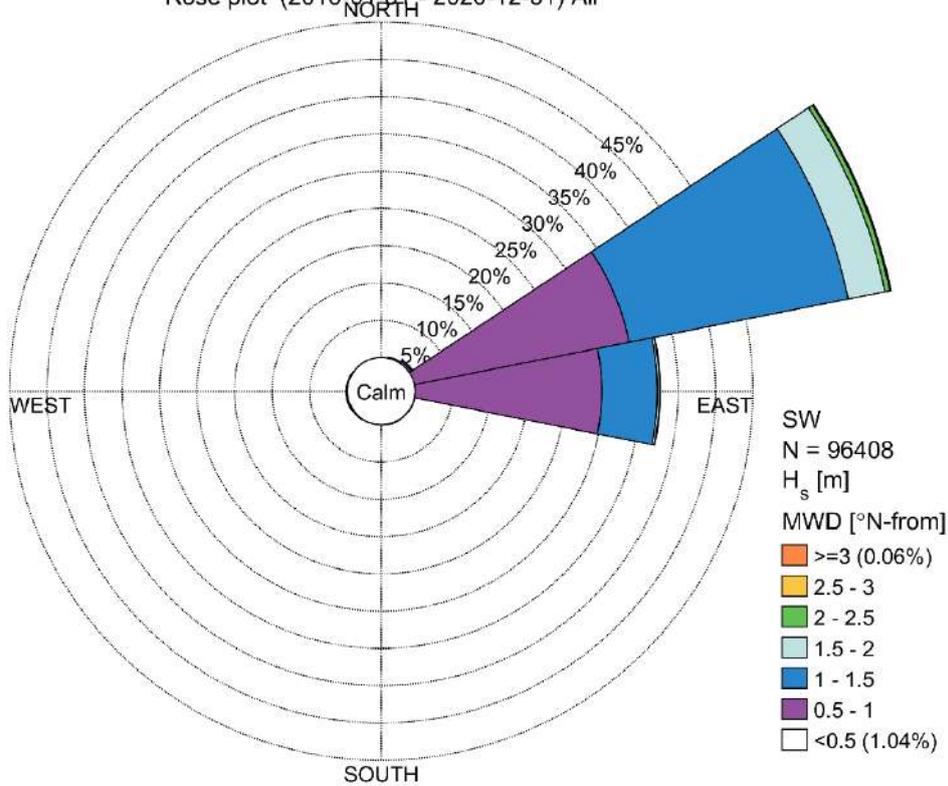


P4 (63.25W;18.20N;220.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (2010-01-01 - 2020-12-31) All

MWD [°N-from] - SW	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	Total	Accum
[326.25-348.75[	-	0.011	0.457	0.863	0.504	0.246	0.083	0.051	0.027	-	-	-	2.243	99.974
[303.75-326.25[	-	0.007	0.091	0.101	0.023	0.037	0.003	-	-	-	-	-	0.252	97.732
[281.25-303.75[	-	0.002	0.040	0.031	0.008	-	-	-	-	-	-	-	0.082	97.479
[258.75-281.25[	-	0.002	0.012	0.026	0.001	-	-	-	-	-	-	-	0.040	97.398
[236.25-258.75[	-	0.003	0.003	0.020	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.033	97.357
[213.75-236.25[	-	0.005	0.016	0.010	0.011	0.008	0.005	0.001	-	-	-	-	0.057	97.324
[191.25-213.75[	-	0.005	0.009	0.033	0.047	0.012	0.011	0.008	0.005	0.001	0.001	0.001	0.135	97.267
[168.75-191.25[	-	0.010	0.012	0.030	0.041	0.004	-	-	0.003	0.002	0.001	0.006	0.111	97.132
[146.25-168.75[	-	0.024	0.040	0.040	0.013	0.015	-	-	-	-	-	0.001	0.134	97.021
[123.75-146.25[	0.001	0.043	0.051	0.019	0.005	0.003	0.003	0.003	-	-	-	0.001	0.129	96.887
[101.25-123.75[	0.005	0.095	0.058	0.023	0.009	0.008	0.001	-	-	-	-	-	0.200	96.739
[78.75-101.25[	0.019	0.438	0.189	0.018	0.002	0.006	-	-	-	-	-	0.001	0.671	96.558
[56.25-78.75[	0.367	9.839	3.806	0.336	0.027	0.012	-	-	0.002	0.001	-	-	14.411	95.897
[33.75-56.25[	0.445	17.920	16.003	5.728	1.165	0.364	0.132	0.036	0.005	0.004	0.004	0.001	41.808	81.477
[11.25-33.75[	0.118	6.462	12.630	6.579	1.812	0.355	0.142	0.041	0.004	0.002	0.002	0.002	28.150	39.589
[-11.25-11.25[	0.006	0.913	4.642	3.711	1.426	0.555	0.208	0.050	0.006	-	-	0.001	11.519	11.519
Total	0.981	35.780	38.050	17.567	5.103	1.625	0.589	0.191	0.054	0.010	0.008	0.015	99.974	-
Accum	0.981	35.761	74.811	92.378	97.482	99.107	99.696	99.887	99.941	99.951	99.960	99.974	-	-

Figure 4-14 Rose des vagues au point P4-NW et tableau des fréquences d'occurrence associées (%), sur 2010-2020

P5 (63.08W;18.14N;20.00mMSL)
Rose plot (2010-01-01 - 2020-12-31) All



P5 (63.08W;18.14N;20.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (2010-01-01 - 2020-12-31) All

MWD [°N-from] - SW	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	Total	Accum
[326.25-348.75[	-	0.008	0.007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.016	100.000
[303.75-326.25[	0.001	0.009	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.022	99.984
[281.25-303.75[	0.001	0.062	0.047	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	0.113	99.963
[258.75-281.25[	-	0.061	0.096	0.035	-	-	-	-	-	-	-	-	0.183	99.850
[236.25-258.75[	-	0.103	0.074	0.016	0.005	0.002	0.001	-	-	-	-	-	0.200	99.687
[213.75-236.25[	0.003	0.060	0.037	0.009	0.007	0.001	0.001	0.002	-	-	-	-	0.121	99.467
[191.25-213.75[	0.002	0.019	0.008	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	-	-	-	-	0.037	99.345
[168.75-191.25[	0.003	0.028	0.012	-	0.002	-	-	0.001	-	-	-	-	0.047	99.308
[146.25-168.75[	0.001	0.064	0.016	0.001	0.001	-	-	0.001	0.001	-	-	-	0.085	99.261
[123.75-146.25[	0.008	0.028	0.001	-	-	0.001	-	-	-	-	-	-	0.036	99.176
[101.25-123.75[	0.008	0.054	0.002	-	-	0.003	-	-	-	-	-	-	0.065	99.140
[78.75-101.25[	0.616	24.862	7.412	0.294	0.050	0.011	0.002	0.004	0.006	0.001	-	-	33.248	99.075
[56.25-78.75[	0.391	29.156	29.732	4.995	0.634	0.139	0.019	0.006	0.006	0.001	0.001	0.002	65.085	65.826
[33.75-56.25[	0.005	0.278	0.216	0.027	-	-	-	-	-	-	-	-	0.526	0.742
[11.25-33.75[	-	0.052	0.079	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.172	0.216
[-11.25-11.25[	-	0.025	0.018	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.044	0.044
Total	1.036	54.900	37.758	5.383	0.703	0.159	0.024	0.016	0.016	0.002	0.001	0.002	100.000	-
Accum	1.036	55.936	93.695	99.078	99.781	99.940	99.964	99.979	99.995	99.997	99.998	100.000	-	-

Figure 4-15 Rose des vagues au point P5-Détroit et tableau des fréquences d'occurrence associées (%), sur 2010-2020

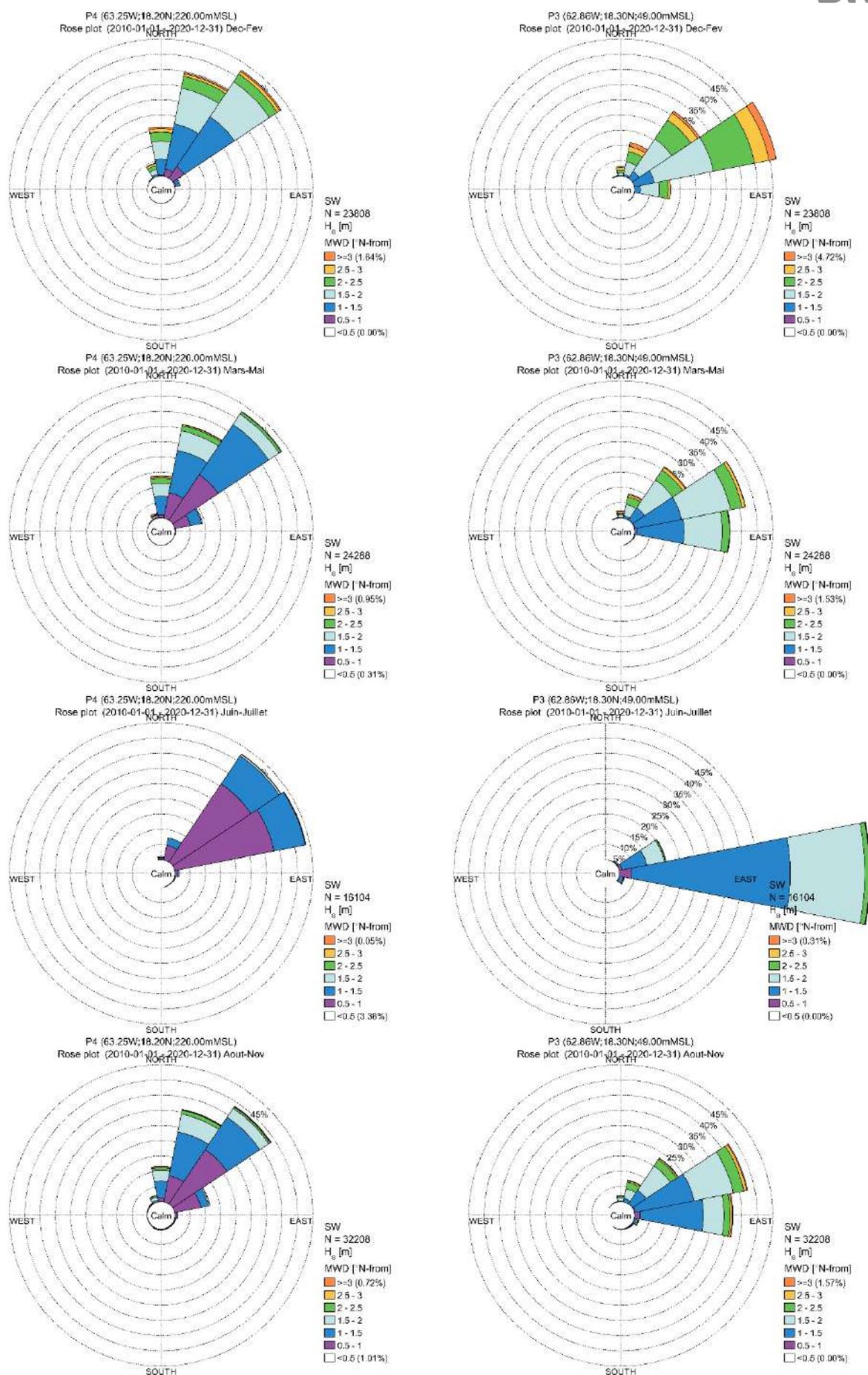


Figure 4-16 Roses des vagues 2010-2020 à P4-NW (à gauche) et à P3-NE (à droite) pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Août-Novembre.

4.3 Les circulations autour de Saint-Martin

Les résultats du modèle hydrodynamique MIKE 3D ont été analysés sur la période 2011-2020. Ils montrent que les circulations autour de Saint-Martin fluctuent rapidement en surface du fait des interactions entre la circulation générale et le vent mais aussi avec la marée qui module sensiblement les courants, bien qu'elle soit de faible amplitude.

Les effets bathymétriques autour des îles jouent aussi un rôle important : les profondeurs d'eau sont inférieures à 40m sur le plateau et inférieures à 20m dans le canal d'Anguilla. D'une part l'amplitude de marée est amplifiée ici, d'autre part le vent peut agir sur toute la masse d'eau dans les petits fonds et les baies. Les nombreux îlots, barrières et hauts-fonds autour de Saint-Martin, d'Anguilla et Saint-Barthélemy contraignent également fortement les courants.

Les interactions entre le large et le plateau sont complexes et variables d'un côté à l'autre de l'île. En revanche, un certain découplage existe entre la couche de mélange superficielle plus chaude et les circulations sous la thermocline. Cette dynamique est abordée en section 5.

Les analyses statistiques des courants de surface et de fond ont ici été réalisées aux points P1-Centre, P2-Ouest, P3-Est, P4-Détroit, P5-Galisbay-Est et P6-Galisbay-Ouest, indiqués Figure 4-17. Les percentiles des vitesses de courant ont été calculés en ces points et sont données dans le Tableau 4-1. Les analyses annuelles et saisonnières sont présentées au large (section 4.3.3) puis dans le canal d'Anguilla (section 4.3.4). Mais dans un premier temps, la dynamique autour de Saint-Martin est illustrée en condition d'Alizés renforcés (section 4.3.1) et pour un événement de Northers de début mars 2018 (section 4.3.2).

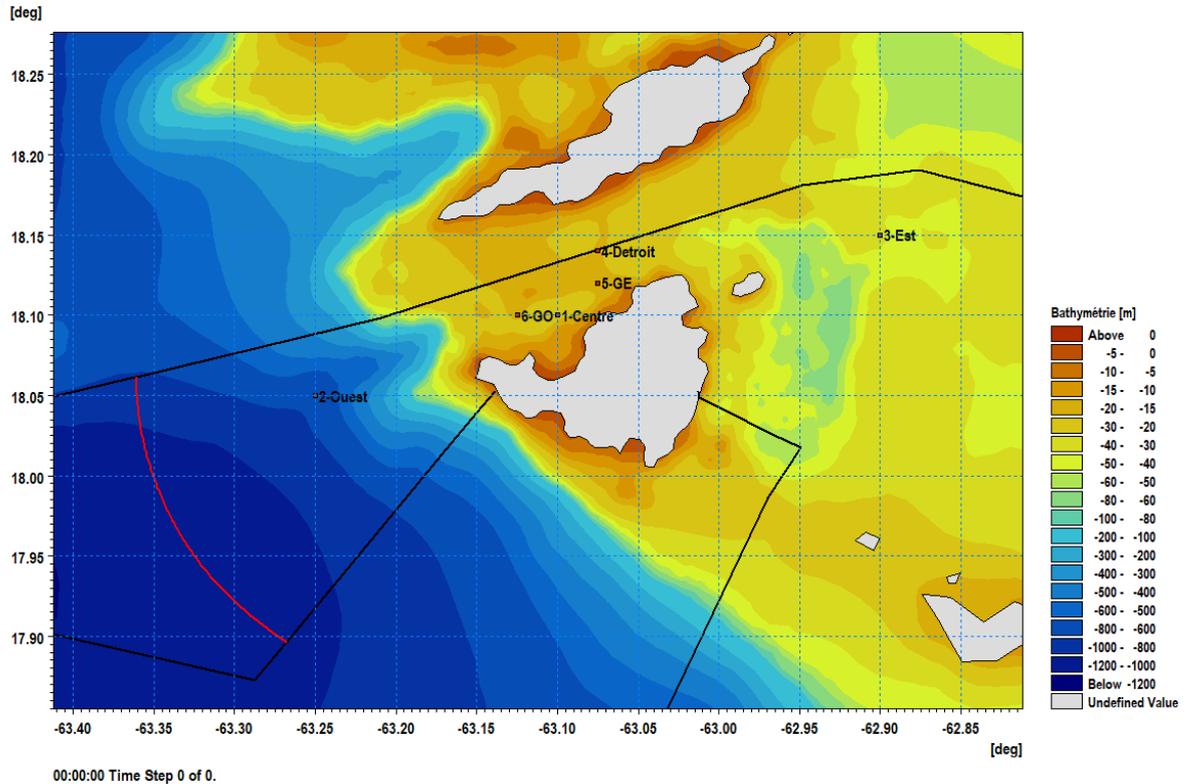


Figure 4-17 Localisation des points d'extraction des courants (P1 à P6), sur la bathymétrie du modèle.

Tableau 4-1 Percentiles des courants (m/s) aux points d'extractions sur 2011-2020

Point	Courant en surface (m/s)				Courant au fond (m/s)			
	P25%	P50%	P75%	P95%	P25%	P50%	P75%	P95%
P1- Centre	0.06	0.11	0.19	0.32	0.03	0.06	0.09	0.15
P2-Ouest	0.12	0.19	0.27	0.41	0.01	0.02	0.03	0.04
P3-Est	0.10	0.16	0.22	0.32	0.04	0.06	0.08	0.13
P4-Détroit	0.10	0.20	0.32	0.50	0.05	0.09	0.16	0.27
P5-Galisbay Est	0.10	0.19	0.31	0.48	0.05	0.09	0.15	0.26
P6-Galisbay Ouest	0.08	0.14	0.24	0.38	0.04	0.07	0.10	0.18

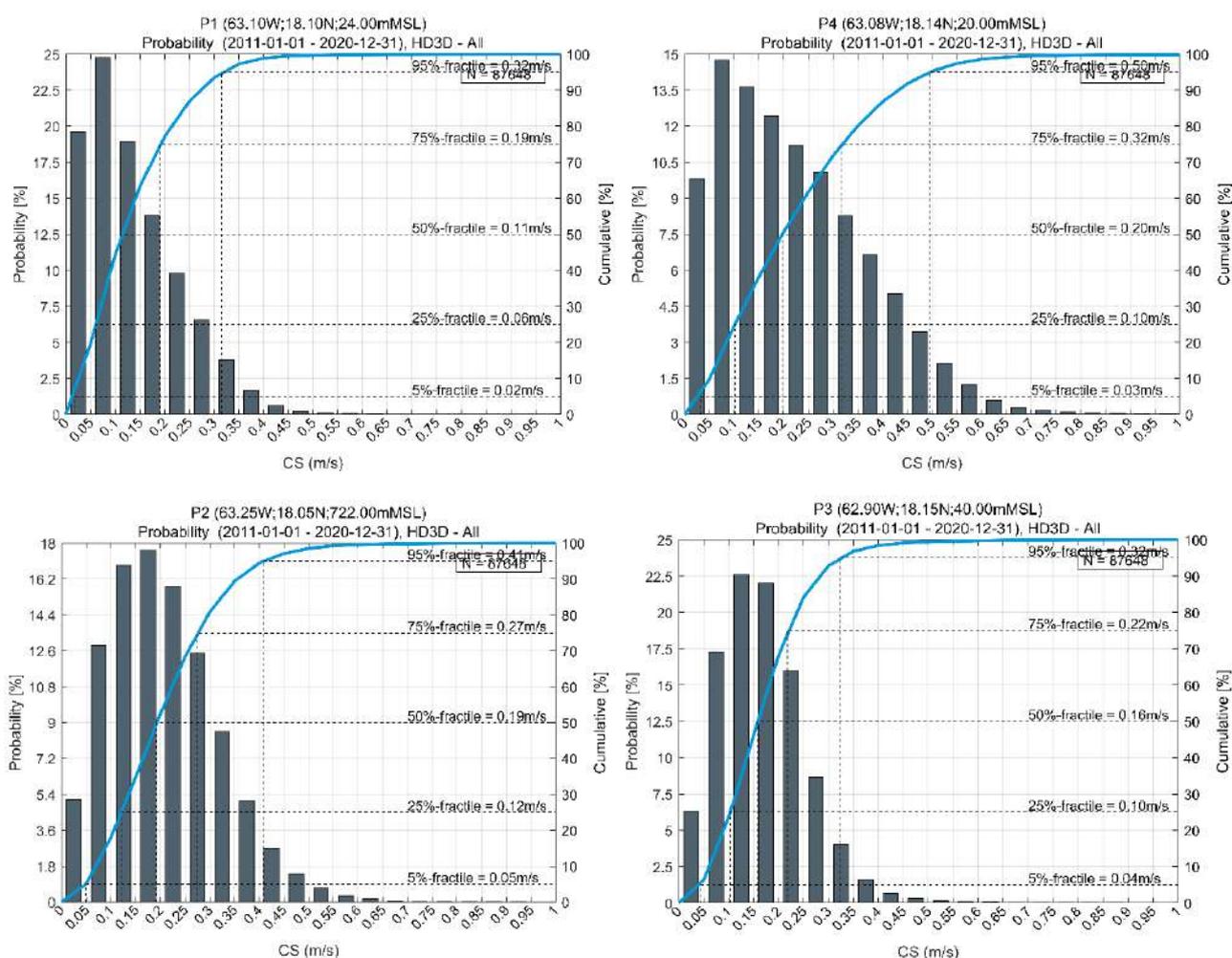


Figure 4-18 Distribution des courants de surface à P1, P2, P3 et P4 sur la période 2011-2020 (histogramme et courbe cumulative avec percentiles 5%, 25%, 50%, 75% et 95%).

4.3.1 Conditions d'Alizés du Nord-Est

En condition fréquente d'Alizé du Nord-Est, les circulations sont intensifiées vers l'Ouest autour de Saint-Martin. Le courant dans le détroit d'Anguilla peut atteindre 0.8m/s en surface et 0.4m/s au fond. La Figure 4-22 illustre cette circulation en condition d'Alizés du Nord-Est renforcés (12 m/s) le 22 février 2018. Au sud-Ouest de Saint-Martin, les courants portent ici au Nord-Ouest, longeant le relief sous-marin.

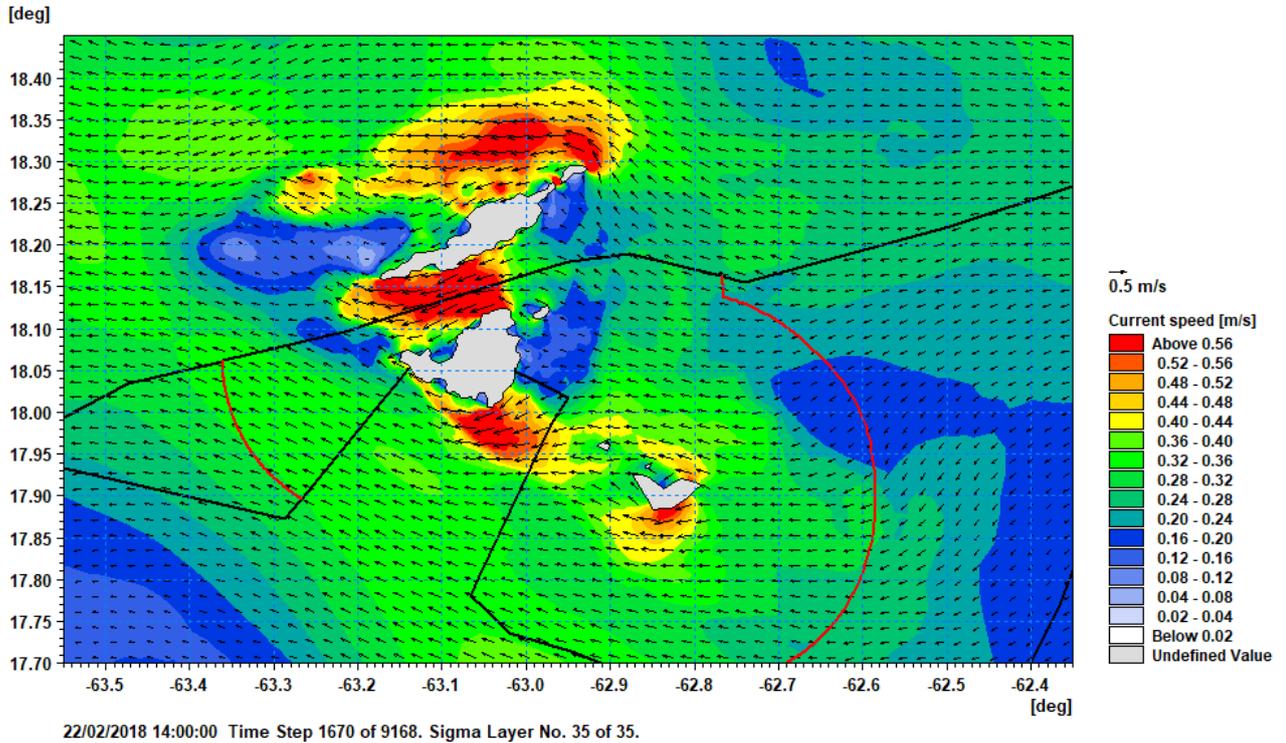


Figure 4-19 Champs de courants de surface autour de Saint-Martin, en condition d'Alizés renforcés le 22/02/2018 à 14h.

4.3.2 L'événement de Northers de début mars 2018

Pour illustrer la dynamique des courants de surface autour de Saint-Martin, en relation avec les conditions de vent, l'événement de Northers du 3 au 8 mars 2018 est décrit ci-après. Les conditions de vent sont présentées Figure 4-20 et les champs de courants de surface ont été extraites du modèle à plusieurs dates les 5, 6 et 8 mars 2018 (figures ci-après).

En février 2018, les Alizés soufflent du Nord-Est et la circulation au large portent au Nord-Ouest. Les courants de surface dans le canal d'Anguilla sont essentiellement dirigés vers l'Ouest-Sud-Ouest avec des fluctuations d'intensités rapides de quelques cm/s à plus de 50 cm/s (en quelques heures). Du 28 février au 2 Mars, les vents tournent un peu plus à l'Est et oscillent entre le Sud-Est et le Nord-Est. Une inversion courte des courants a lieu le 28 février dans le détroit, de 03h à 11h, associé à des circulations plus faibles autour de Saint-Martin. Le 3 mars, les vents tournent rapidement au secteur Ouest, avec des fluctuations de l'Ouest-Sud-ouest à l'Ouest pendant 24h. Il s'établit ensuite au Nord-Ouest le 4 mars au soir, jusqu'au 6 mars 12h où il tourne au Nord brièvement pour revenir au secteur N-NE. Le 8 mars, le vent revient au secteur Est puis à l'Est-Sud-Est les 9 et 10 mars 2018.

Les courants autour de Saint-Martin fluctuent beaucoup sur cette période mais l'effet du vent sur les circulations est bien visible :

- Sur la Figure 4-21 est présentée la situation du 4 mars à 19h où les courants sont orientés vers le Sud-Est (et l'Est dans le canal d'Anguilla) induits par les vents de Nord-Ouest. La situation du 5 mars à 2h montre une situation transitoire où les courants portent au Sud et au Sud-Ouest de part et d'autre de Saint-Martin. Les courants dans le détroit sont faibles et dirigés vers le Sud-Ouest.
- Sur la Figure 4-22, les situations plus fréquentes sont présentées avec les courants orientés vers le Sud-Ouest le 6 mars et vers le Nord-ouest le 8 mars, liée au retour du vent au secteur Nord-Est puis Est-Sud-Est. Dans le détroit, les courants portent au Sud-Ouest et dépassent localement les 0.5 m/s.

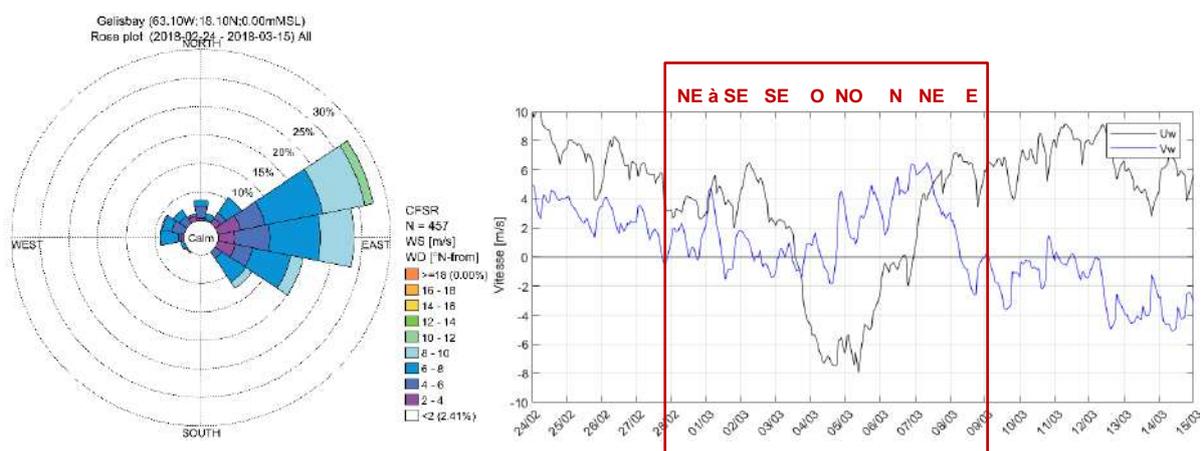


Figure 4-20 Rose des vents (à gauche, direction d'où il vient) et série temporelle des composantes U_w, V_w du vent, du 24 février au 15 mars 2018

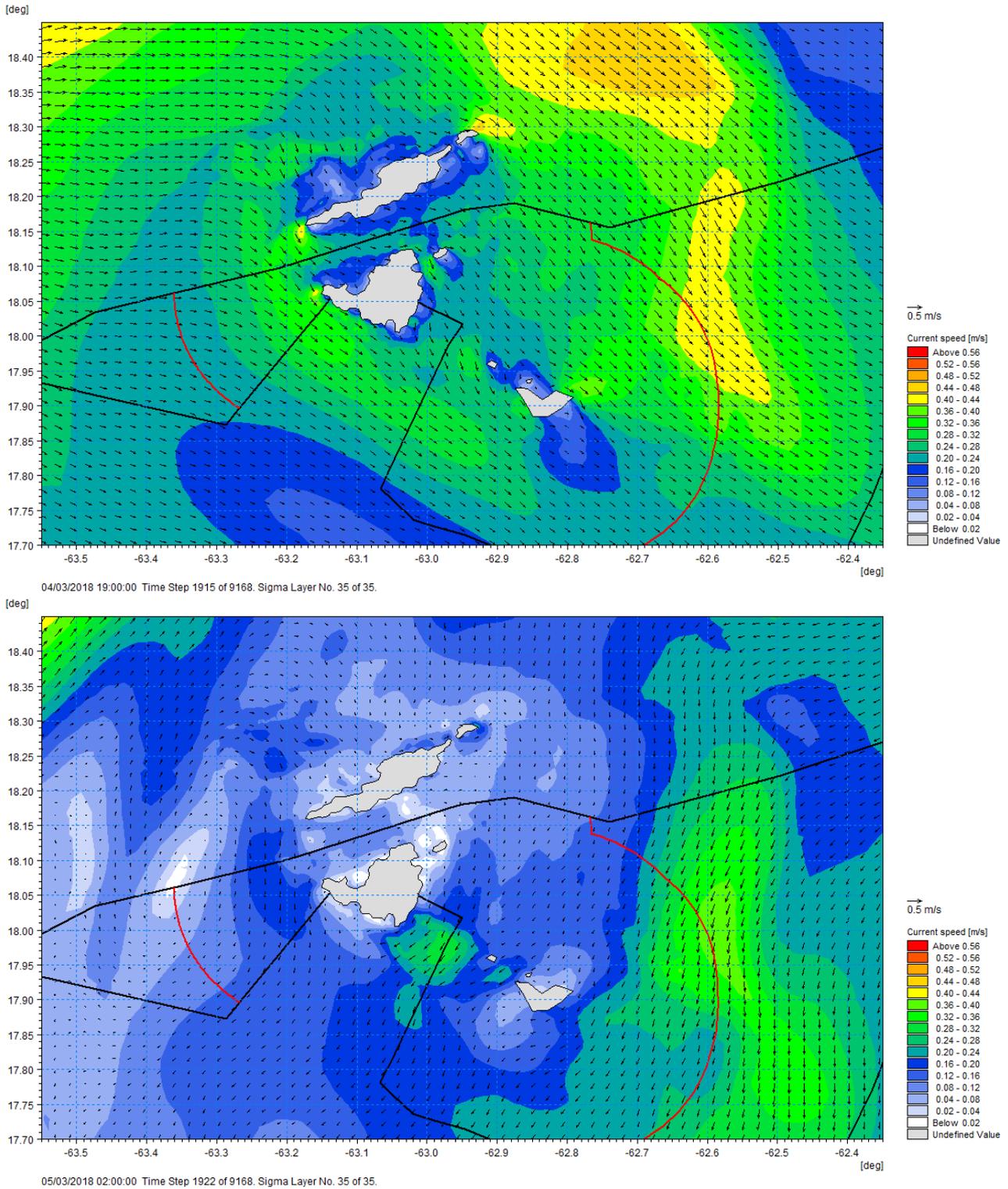


Figure 4-21 Champs de courants de surface autour de Saint-Martin, exemple de deux situations moins fréquentes : les courants portant au Sud-Est (le 04/03/2018 à 19h, en haut) et les courants portant au Sud-Sud-Ouest (situation transitoire du 05/03/2018 à 02h en bas).

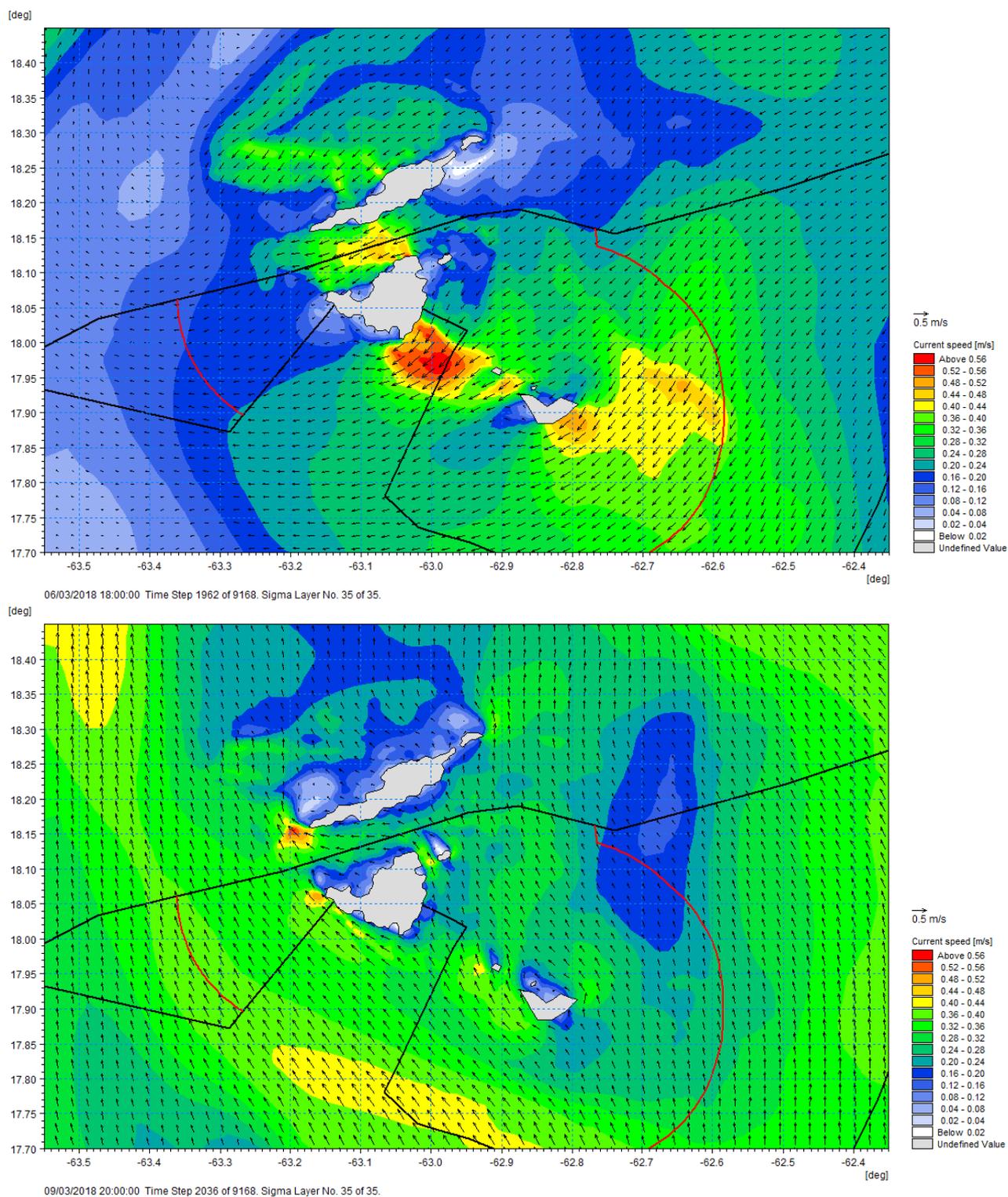


Figure 4-22 Champs de courants de surface autour de Saint-Martin, exemple de deux situations fréquentes : les courants portant vers l'Ouest/Sud-Ouest (le 06/03/2018 à 18h, en haut) et les courants portant au Nord-Ouest (le 09/03/2018 à 20h en bas).

4.3.3 Variabilité des courants au large

Les roses des courants de surface et au fond, aux points P2-Ouest et P3-Est, sont présentés Figure 4-23. Les roses saisonnières sont présentées Figure 4-24 et Figure 4-25.

A l'Ouest de Saint-Martin les courants portent essentiellement vers le Nord-Ouest en surface, avec 50% des vitesses comprises entre 0.15 et 0.35 m/s et 15% >0.35m/s. Au fond les vitesses sont toujours très faibles < 0.05 m/s. La variabilité saisonnière est assez faible mais on peut noter l'apparition de courants portant au Nord-Nord-Est à partir du mois de mars, inexistant en début de saison sèche.

Au point P3-Est, la rose des courants de surface est un peu plus étalée sur le secteur Nord-Nord-Ouest. Au fond, les courants sont orientés vers le Nord-Est et le Sud-Ouest, avec 85% des vitesses <0.1 m/s. Les courants de surface sont plus faibles en décembre-Février (5% sont >0.25m/s) alors qu'ils sont intensifiés pendant la saison humide, de juin à novembre (20-22% >0.25m/s). Pendant cette saison le courant au fond porte essentiellement vers le Sud-Ouest.

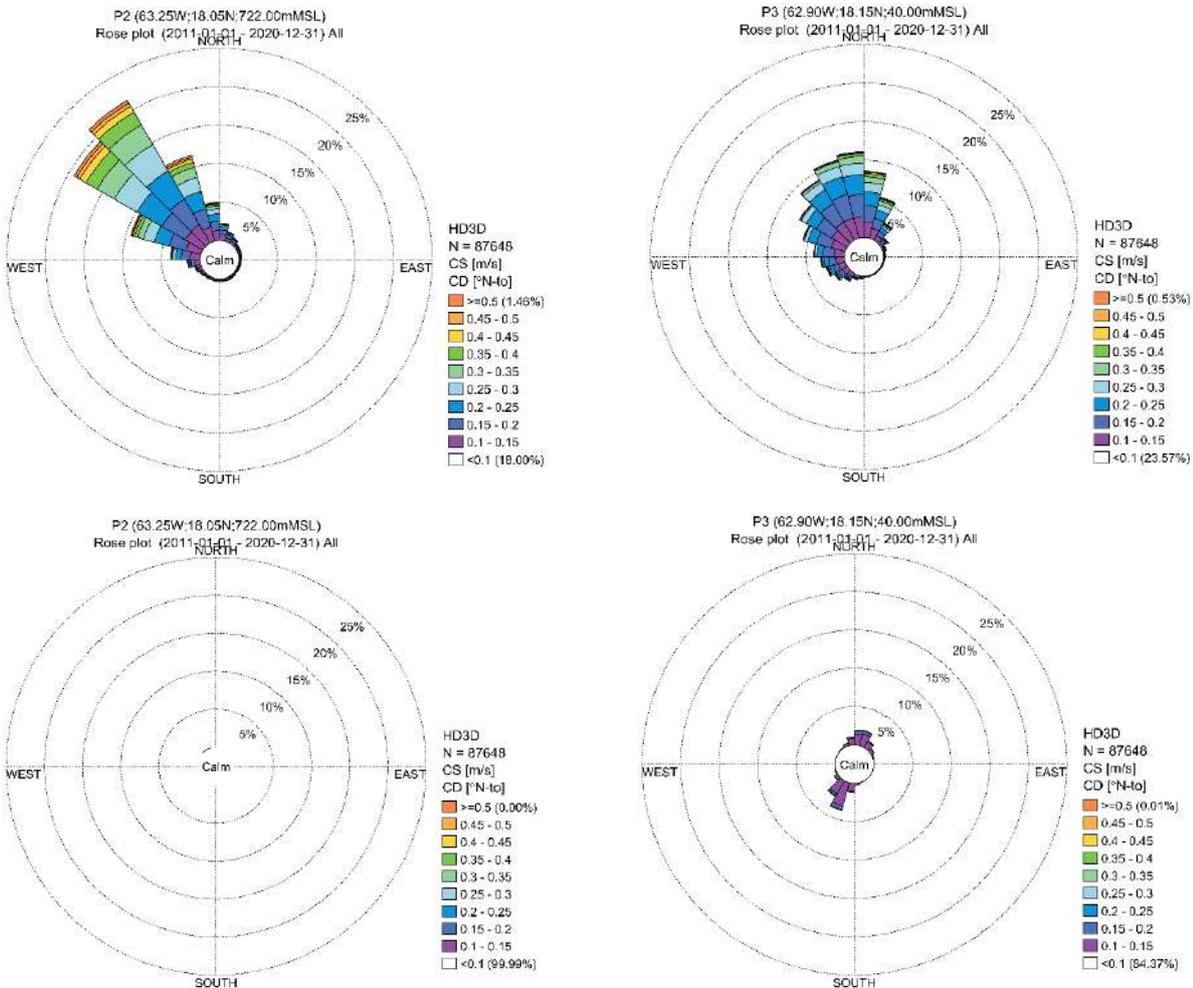


Figure 4-23 Roses des courants 2011-2020 en surface (en haut) et au fond (en bas) aux points d'extraction P2-Ouest (à gauche) et P3-Est (à droite). La direction indique celle vers où les courants portent.

Tableau 4-2 Fréquence d'occurrence des courants de surface aux points P2-Ouest et P3-Est, sur 2011-2020

P2 (63.25W,18.05N,722.00mMSL)
Frequency of Occurrence (%) (2011-01-01 - 2020-12-31) All

CD [N;U] - HDSD	[0-0.05]	[0.05-0.1]	[0.1-0.15]	[0.15-0.2]	[0.2-0.25]	[0.25-0.3]	[0.3-0.35]	[0.35-0.4]	[0.4-0.45]	[0.45-0.5]	[0.5-0.55]	[0.55-0.6]	[0.6-0.65]	[0.65-0.7]	[0.7-0.75]	[0.75-0.8]	[0.8-0.85]	[0.85-0.9]	[0.9-0.95]	[0.95-1]	Total	Accum
[045-060]	0.238	0.821	1.273	1.157	0.966	0.692	0.374	0.202	0.118	0.062	0.027	0.015	0.007	0.007	0.003	0.006	0.002	-	-	-	5.974	99.940
[090-045]	0.275	1.140	1.899	2.438	2.956	1.901	1.347	0.897	0.588	0.224	0.109	0.054	0.026	0.015	0.013	0.017	0.007	0.011	0.005	0.005	12.974	95.908
[045-000]	0.301	1.330	2.738	3.829	4.241	3.505	2.972	1.980	0.973	0.478	0.207	0.092	0.050	0.024	0.017	0.007	0.010	0.008	0.007	-	23.918	81.032
[000-015]	0.308	1.383	2.958	3.496	3.701	3.395	2.955	1.947	0.938	0.471	0.216	0.119	0.046	0.035	0.001	0.006	-	-	-	-	20.957	68.014
[085-000]	0.398	1.144	2.014	2.354	1.878	1.425	0.775	0.538	0.242	0.143	0.078	0.032	0.008	0.015	0.001	-	-	-	-	-	10.862	37.077
[070-085]	0.306	0.949	1.931	1.885	0.731	0.367	0.173	0.082	0.009	0.016	0.019	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	-	5.115	26.195
[005-270]	0.294	0.786	0.718	0.532	0.228	0.108	0.027	0.007	-	-	0.005	0.007	0.003	-	-	-	-	-	-	-	2.710	21.080
[040-055]	0.246	0.501	0.403	0.348	0.107	0.038	0.017	0.005	-	-	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.852	18.370
[025-040]	0.359	0.405	0.278	0.251	0.054	0.079	0.001	0.002	0.001	0.003	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.215	16.718
[010-225]	0.213	0.300	0.215	0.087	0.049	0.015	0.003	0.003	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.988	16.505
[005-010]	0.235	0.254	0.183	0.050	0.033	0.010	0.003	-	-	0.003	-	-	-	0.001	-	-	-	-	-	-	0.810	14.018
[000-005]	0.300	0.305	0.189	0.048	0.034	0.008	0.003	-	-	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	0.001	-	0.838	13.708
[055-000]	0.173	0.298	0.170	0.084	0.051	0.010	0.003	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.772	12.672
[050-050]	0.167	0.284	0.169	0.088	0.049	0.019	0.003	0.002	0.001	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.822	12.100
[035-050]	0.167	0.274	0.181	0.048	0.039	0.027	0.005	0.001	0.001	-	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.734	11.272
[000-035]	0.198	0.167	0.101	0.080	0.031	0.014	0.013	0.002	0.003	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.905	10.548
[005-020]	0.116	0.152	0.131	0.079	0.049	0.024	0.011	0.013	0.001	-	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.588	9.943
[000-005]	0.130	0.164	0.131	0.071	0.045	0.026	0.014	0.015	0.007	-	-	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	0.620	9.349
[015-000]	0.163	0.203	0.207	0.114	0.060	0.015	0.013	0.014	0.007	-	-	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	0.778	8.738
[00-015]	0.136	0.233	0.154	0.143	0.062	0.015	0.003	0.011	0.006	0.002	0.001	0.001	-	0.003	-	-	-	-	-	-	0.882	7.949
[05-00]	0.151	0.257	0.229	0.138	0.079	0.026	0.015	0.009	-	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	-	-	-	-	0.921	7.147
[00-05]	0.167	0.339	0.190	0.267	0.135	0.066	0.027	0.007	0.005	-	-	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	-	-	-	-	1.361	6.225
[05-00]	0.207	0.373	0.152	0.389	0.239	0.081	0.043	0.018	0.008	0.006	0.005	-	-	0.002	-	0.001	-	-	0.001	-	1.517	4.865
[0-05]	0.222	0.573	0.227	0.677	0.479	0.212	0.106	0.043	0.001	0.010	0.007	0.006	0.001	-	0.002	0.001	-	0.002	0.001	-	3.047	3.047
Total	6.143	12.933	16.873	17.633	15.855	12.484	8.532	5.084	2.855	1.425	0.714	0.299	0.161	0.079	0.046	0.035	0.026	0.023	0.019	0.006	99.948	-
Accum	6.148	17.968	34.860	52.502	68.358	80.842	86.373	94.467	97.112	98.637	99.252	99.550	99.711	99.790	99.838	99.874	99.901	99.924	99.934	99.940	-	-

P3 (62.90W,18.15N,40.00mMSL)
Frequency of Occurrence (%) (2011-01-01 - 2020-12-31) All

CD [N;U] - HDSD	[0-0.05]	[0.05-0.1]	[0.1-0.15]	[0.15-0.2]	[0.2-0.25]	[0.25-0.3]	[0.3-0.35]	[0.35-0.4]	[0.4-0.45]	[0.45-0.5]	[0.5-0.55]	[0.55-0.6]	[0.6-0.65]	[0.65-0.7]	[0.7-0.75]	[0.75-0.8]	[0.8-0.85]	[0.85-0.9]	[0.9-0.95]	[0.95-1]	Total	Accum
[045-060]	0.384	1.539	2.638	2.896	2.861	1.582	0.871	0.531	0.176	0.046	0.023	0.007	0.003	0.003	0.010	0.006	0.002	0.001	0.001	-	12.979	99.978
[090-045]	0.405	1.690	2.890	3.131	2.900	1.378	0.831	0.147	0.061	0.031	0.003	0.005	0.008	0.007	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	-	12.620	88.908
[015-030]	0.432	1.829	2.881	2.743	2.233	1.090	0.318	0.081	0.051	0.014	0.002	0.002	0.002	-	-	-	0.001	0.001	0.001	0.002	11.076	74.408
[000-015]	0.438	1.536	2.380	2.286	1.513	0.725	0.153	0.054	0.016	0.001	0.007	0.006	0.001	-	-	-	0.001	-	-	-	5.076	53.333
[085-000]	0.408	1.207	1.851	1.077	1.142	0.470	0.106	0.038	0.003	0.006	0.003	0.002	0.001	0.001	-	0.001	-	-	-	-	7.867	54.763
[070-085]	0.347	1.141	1.494	1.334	0.812	0.383	0.056	0.028	0.011	0.003	0.003	0.002	-	0.002	0.002	-	-	-	-	-	5.268	49.908
[005-270]	0.334	1.035	1.140	0.947	0.596	0.275	0.083	0.038	0.016	0.008	0.007	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	4.439	41.437
[040-055]	0.266	0.874	0.942	0.707	0.465	0.185	0.081	0.048	0.020	0.014	0.010	0.008	0.007	-	0.001	-	-	-	-	-	3.641	38.068
[025-040]	0.265	0.843	0.760	0.534	0.298	0.140	0.078	0.031	0.019	0.010	0.014	0.008	0.003	0.001	0.005	0.003	0.002	0.001	-	-	3.825	33.357
[010-225]	0.222	0.502	0.476	0.308	0.179	0.084	0.021	0.012	0.006	0.006	0.001	0.002	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	1.822	30.532
[005-010]	0.200	0.375	0.300	0.167	0.087	0.037	0.014	0.008	0.001	0.001	-	0.002	-	0.001	-	-	-	-	-	-	1.100	28.610
[000-005]	0.156	0.277	0.205	0.081	0.048	0.011	0.003	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.764	27.430
[055-000]	0.149	0.180	0.087	0.047	0.024	0.002	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.516	29.938
[050-050]	0.141	0.146	0.071	0.040	0.019	0.009	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.418	23.120
[035-050]	0.152	0.131	0.068	0.030	0.015	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.421	25.703
[030-035]	0.147	0.161	0.056	0.027	0.031	0.009	0.005	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.442	25.262
[005-020]	0.137	0.147	0.082	0.055	0.032	0.010	0.006	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.460	24.938
[000-005]	0.158	0.164	0.080	0.054	0.025	0.024	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.508	24.378
[015-00]	0.154	0.229	0.116	0.087	0.050	0.013	0.010	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.699	23.870
[00-015]	0.227	0.282	0.162	0.143	0.081	0.048	0.018	0.007	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.001	23.211
[05-00]	0.248	0.437	0.282	0.303	0.209	0.268	0.246	0.022	0.013	0.016	0.005	-	-	0.001	0.001	-	-	-	-	-	1.775	22.210
[00-05]	0.240	0.731	0.724	0.618	0.529	0.307	0.187	0.087	0.060	0.038	0.024	0.022	0.009	0.001	0.002	0.001	-	0.002	0.001	0.001	3.566	20.435
[05-00]	0.280	0.902	1.321	1.354	1.088	0.723	0.523	0.281	0.171	0.091	0.034	0.028	0.024	0.009	0.001	-	-	-	-	-	6.708	16.648
[0-05]	0.351	1.249	1.982	2.130	1.787	1.225	0.747	0.387	0.178	0.087	0.031	0.010	0.015	0.013	0.003	0.001	0.002	0.001	-	-	10.142	10.142
Total	6.296	17.270	22.587	22.024	18.989	9.681	4.022	1.602	0.666	0.329	0.167	0.111	0.089	0.048	0.030	0.022	0.014	0.016	0.011	0.003	99.978	-
Accum	6.296	23.968	46.185	68.177	84.165	92.846	96.840	98.451	99.120	99.467	99.634	99.744	99.833	99.882	99.912	99.934	99.948	99.963	99.976	99.978	-	-

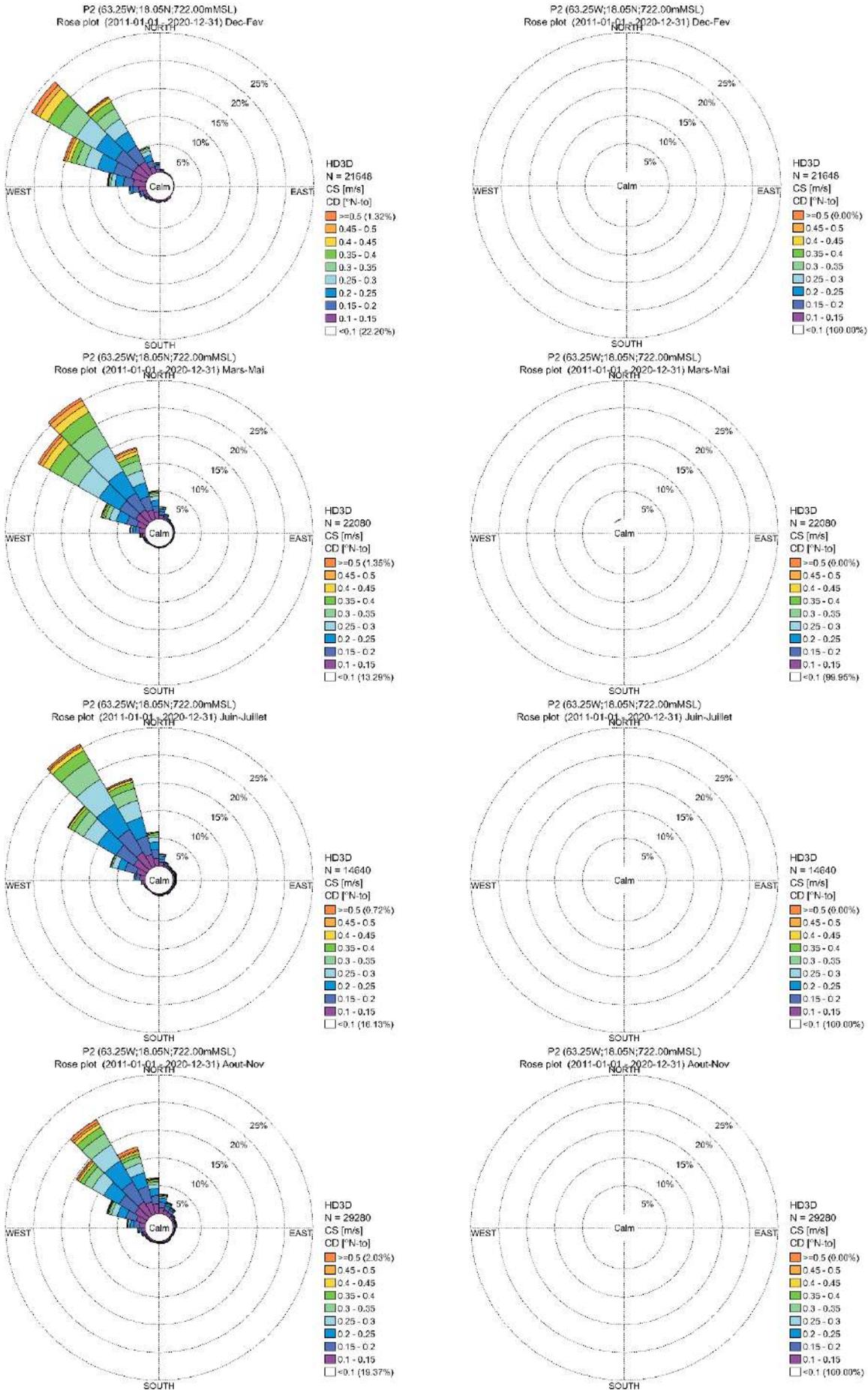


Figure 4-24 Roses de courants 2011-2020 à P2-Ouest, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.

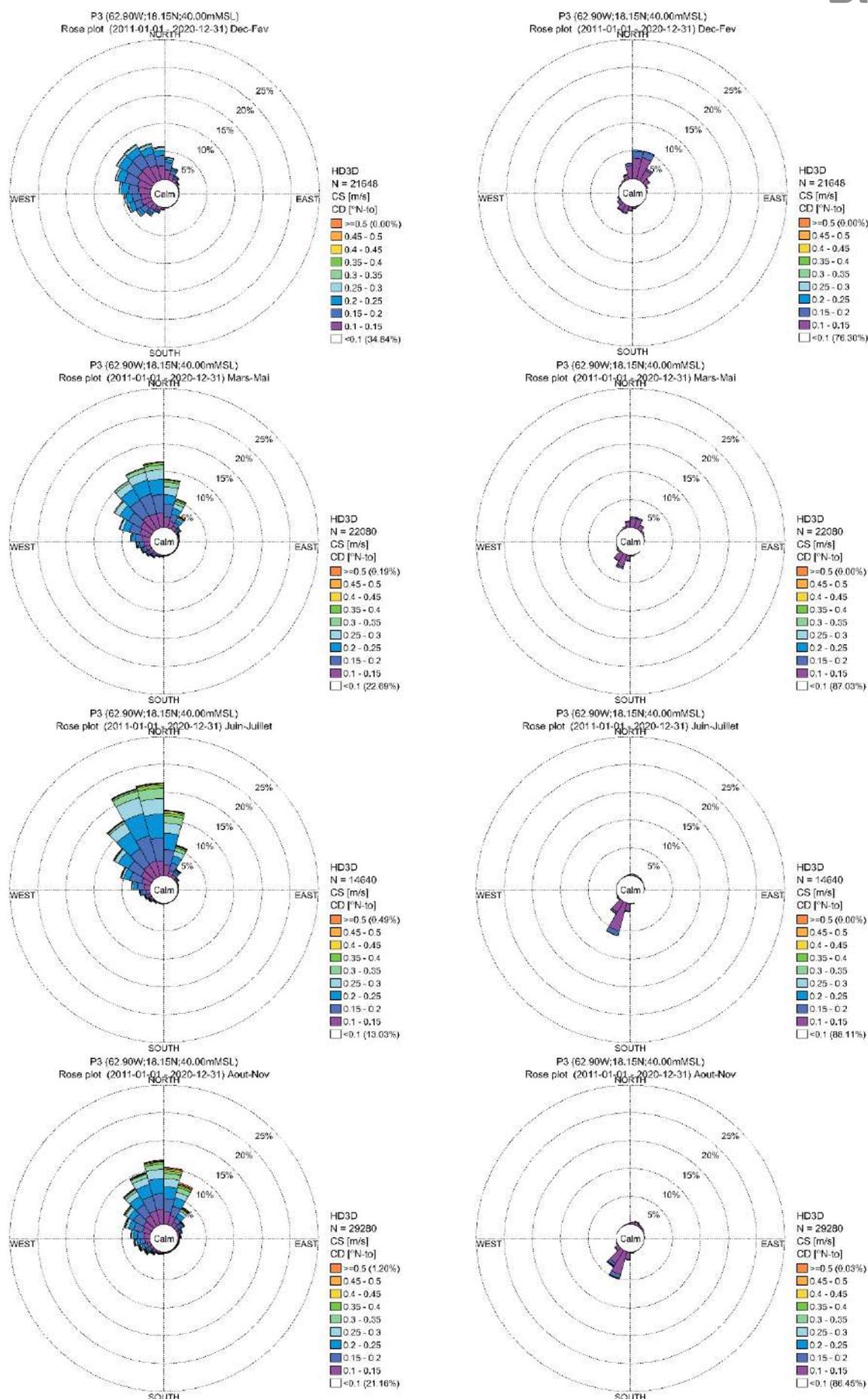


Figure 4-25 Roses de courants 2011-2020 à P3-Est, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.

4.3.4 Variabilité des courants dans le canal d'Anguilla

Comme les vents dominants viennent du secteur Est-Nord-Est, les courants dominants dans le canal d'Anguilla portent à l'Ouest (du Sud-Ouest au Nord-Ouest, selon le secteur dans le détroit). Cependant leur intensité varie fortement et des inversions vers l'Est peuvent aussi avoir lieu : lorsque les vents faiblissent (le courant de marée de jusant portant à l'Est peut alors s'exprimer dans le détroit) ou lorsque les vents tournent au secteur Ouest-Nord-Ouest, favorisant alors la circulation entre les îles vers l'Est. Ces situations sont cependant moins fréquentes et les vitesses associées plus faibles, comme le montre les roses de surface aux points P1-Centre et P4-Détroit (Figure 4-30).

Les cartes présentées en Figure 4-26 illustrent la situation la plus fréquente avec des courants vers l'Ouest-Sud-Ouest dans le détroit, intensifié en surface, induits par les Alizés du Nord-Est. Les vitesses sont en général plus fortes le long d'Anguilla (ici $>0.4\text{m/s}$). Alors qu'elles sont toujours atténuées à l'approche de la baie de Galisbay ($<0.15\text{ m/s}$).

En Figure 4-27, les courants portent vers l'Est-Nord-Est dans le canal d'Anguilla, liés à la marée et à la rotation des vents au secteur Ouest lors de l'événement de Northers de début mars 2018.

On constate que dans le détroit, la masse d'eau est assez homogène sur la verticale (en température et salinité) et s'écoule souvent dans le même sens en surface et au fond, du fait de hauteurs d'eau faibles. Il peut cependant exister un décalage des directions entre la couche de surface entraînée par le vent et les courants au fond qui subissent uniquement l'effet de la marée et sont contraints par la bathymétrie. C'est donc au moment du jusant que peut apparaître des cisaillements entre surface et fond si les vents ne sont pas trop forts (ce qui est visible par exemple le 9 mars sur la Figure 4-28).

Les roses au point P5 et P6 (Figure 4-30) montrent aussi l'effet de la topo-bathymétrie du site sur les écoulements : les courants dominants s'orientent un peu plus vers le Sud-Ouest à P5 alors qu'à P6, ils s'orientent à l'Ouest.

La circulation dans la baie de Galisbay est essentiellement d'Est en Ouest avec un décalage des directions au fond vers l'intérieur de la baie (par rapport aux directions en surface), comme documenté dans les quelques mesures historiques (voir section 2.7.3).

Les roses saisonnières à P4-Détroit (Figure 4-31) et P6-Ouest (Figure 4-32) montrent que pendant la saison humide (juin à novembre), les inversions de courant vers l'Est sont plus fréquentes et régulières alors que pendant la saison des Alizés (Décembre-Février) les vents contrent souvent le courant de marée de jusant.

Le modèle régional, avec des mailles de 400-500m entre Saint-Martin et Anguilla, permet ainsi de reproduire une courantologie générale aux abords de Galisbay, avec une bonne variabilité spatiale et temporelle liée aux processus de la marée, aux effets du vent et sa variabilité saisonnière. Un modèle de plus haute résolution sera cependant mis en place en Phase 5 pour simuler la dispersion des panaches turbides lors des dragages dans la baie.

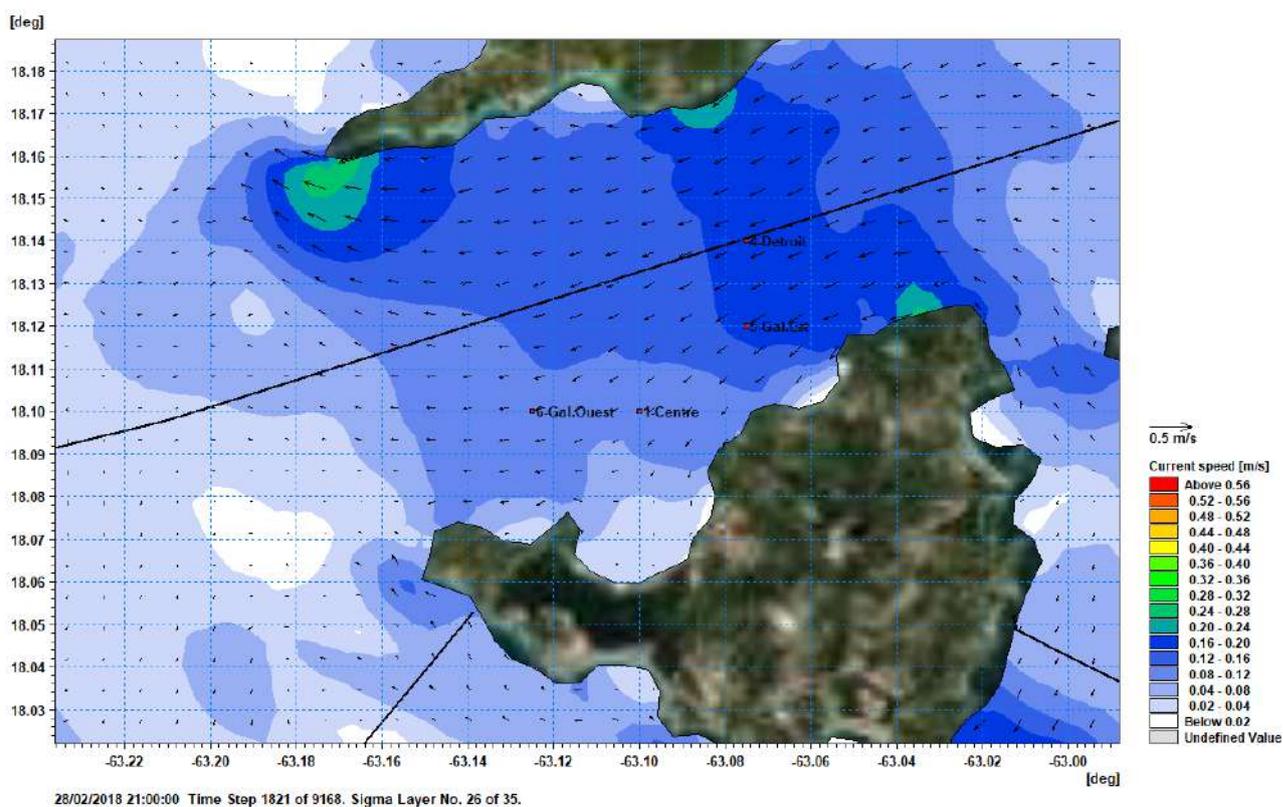
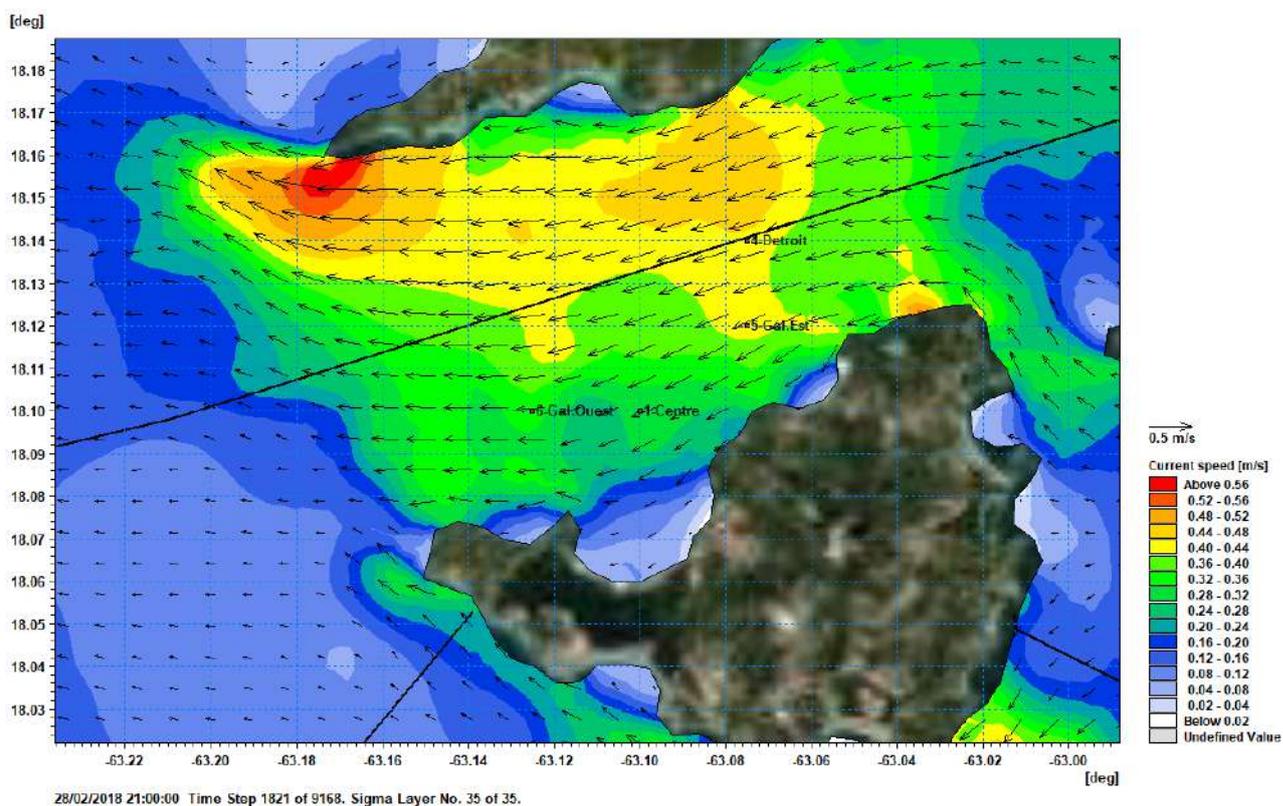


Figure 4-26 Courant de surface (en haut) et au fond (en bas) dans le canal d'Anguilla, le 20/02/2018 à 21h. Situation par vent d'Alizés du Nord-Est

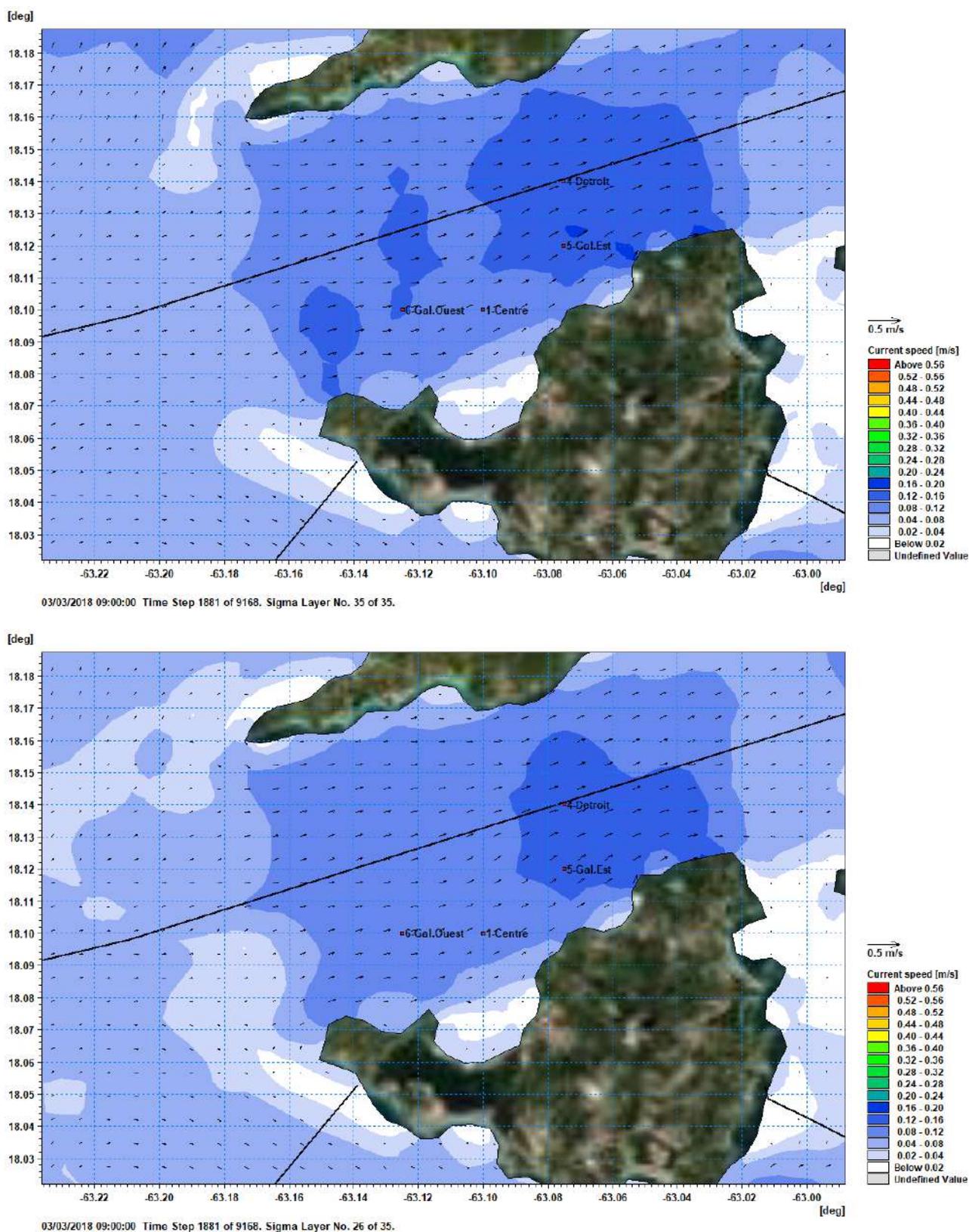


Figure 4-27 Courant de surface (en haut) et au fond (en bas) dans le canal d'Anguilla, le 20/02/2018 à 21h. Situation par vent de Nord-Ouest (Northerly)

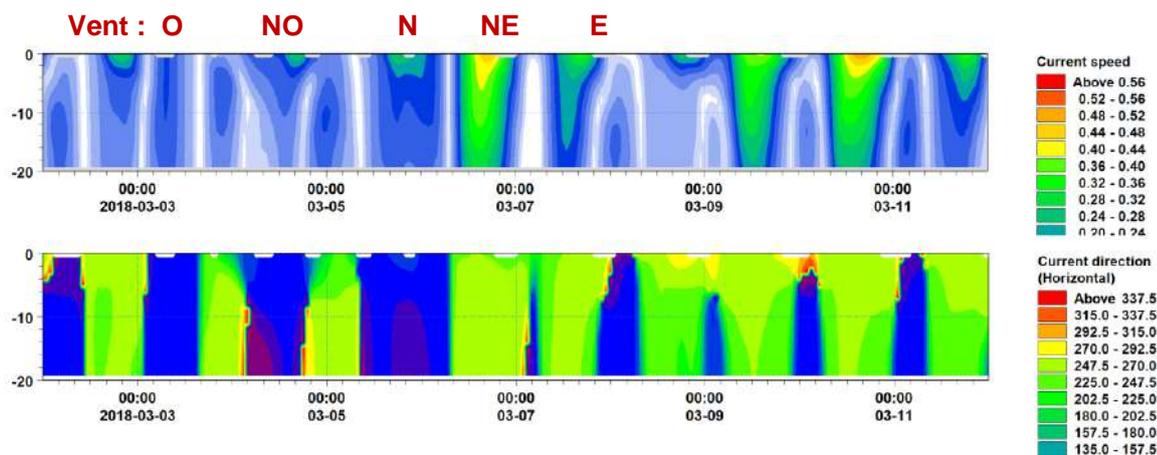


Figure 4-28 Evolution des profils verticaux de courant au point P4-Détroit, du 02 au 12 mars 2018. Rotation des vents au secteur Ouest (3 mars), Nord-Ouest (4 mars), Nord (6 mars) puis retour au secteur Nord-Est le 7 mars et Est le 8 mars.

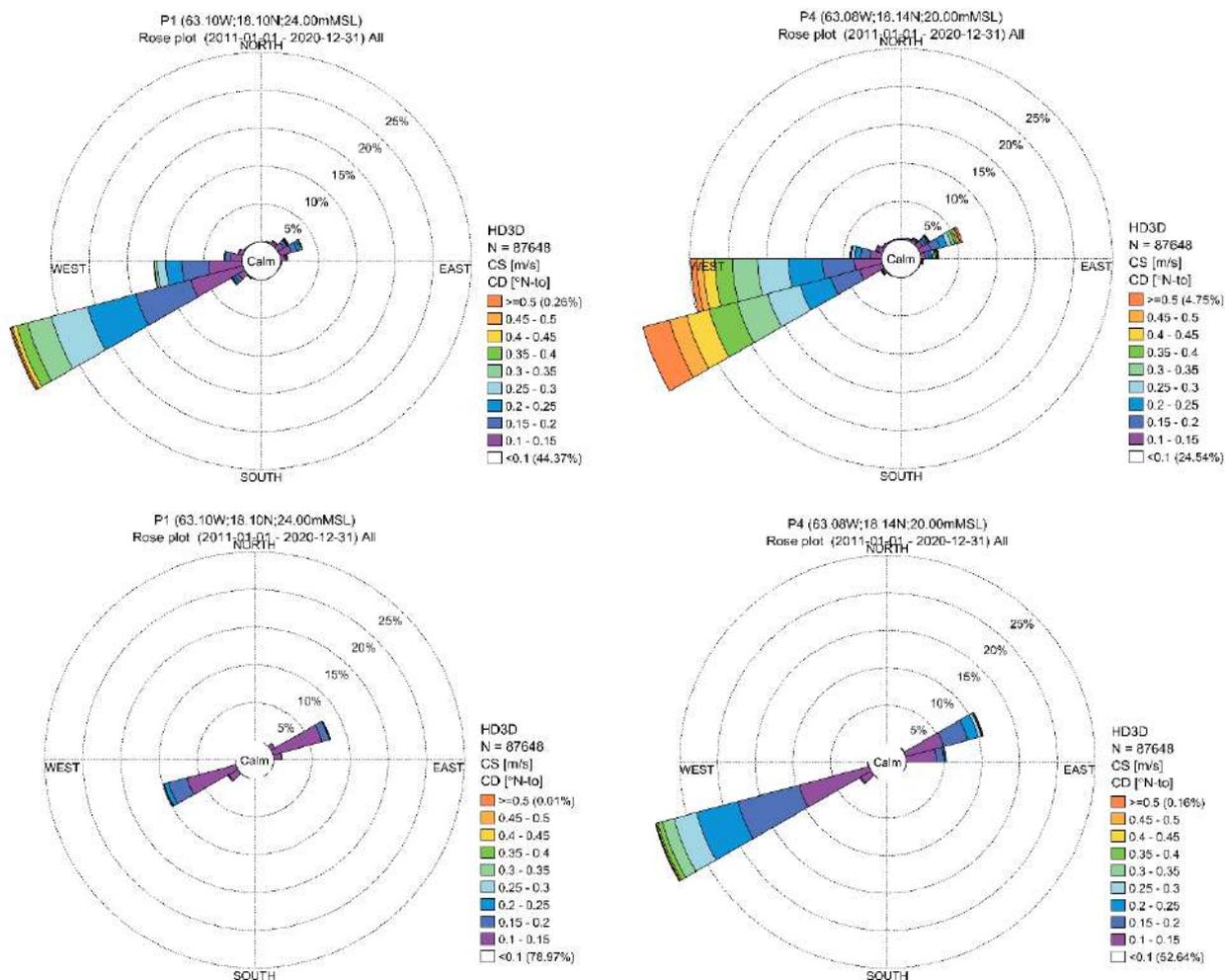


Figure 4-29 Roses des courants (direction vers où il porte) 2011-2020 en surface (en haut) et au fond (en bas) aux points d'extraction P1-Centre (à gauche) et P4-Détroit (à droite). La direction indique celle vers où les courants portent.

Tableau 4-3 Fréquence d'occurrence des courants de surface aux points P1-Centre et P4-Détroit, sur 2011-2020

P1 (63.10W;18.10N;24.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (2011-01-01 - 2020-12-31) All

	[0-0.05]	[0.05-0.1]	[0.1-0.15]	[0.15-0.2]	[0.2-0.25]	[0.25-0.3]	[0.3-0.35]	[0.35-0.4]	[0.4-0.45]	[0.45-0.5]	[0.5-0.55]	[0.55-0.6]	[0.6-0.65]	[0.65-0.7]	[0.7-0.75]	[0.75-0.8]	[0.8-0.85]	[0.85-0.9]	[0.9-0.95]	[0.95-1]	Total	Accum	
[945-960]	0.693	0.452	0.734				0.003		0.001												1.152	99.602	
[960-945]	0.707	0.452	0.738	0.003																	1.193	99.610	
[915-930]	0.756	0.553	0.569	0.003																	1.367	97.617	
[900-915]	0.876	0.779	0.145	0.008	0.023																1.812	95.229	
[885-900]	1.070	1.298	0.548	0.073	0.910	0.091	0.003	0.001	0.001												2.970	84.417	
[870-885]	1.380	2.131	1.581	0.648	0.143	0.031	0.002	0.007	0.007												5.861	81.498	
[855-870]	1.830	4.177	4.438	3.400	2.110	1.118	0.339	0.266	0.029	0.006	0.006	0.003	0.001	0.001							17.960	65.607	
[840-855]	1.830	5.199	7.001	7.446	6.537	4.911	3.735	1.478	0.527	0.196	0.086	0.002	0.016	0.005	0.006	0.008	0.003	0.003	0.001		33.009	67.007	
[825-840]	1.133	1.444	0.970	0.473	0.290	0.140	0.065	0.032	0.018	0.007	0.007	0.000	0.007	0.001							4.982	79.426	
[810-825]	0.907	0.365	0.144	0.039	0.019	0.002	0.003	0.001														1.198	24.836
[795-810]	0.955	0.193	0.041	0.001					0.001													0.950	73.646
[780-795]	0.985	0.697	0.018																			0.914	25.050
[765-780]	0.264	0.082	0.007																			0.353	22.638
[750-765]	0.273	0.059	0.007																			0.339	22.587
[735-750]	0.223	0.089	0.007																			0.308	21.949
[720-735]	0.289	0.681	0.009	0.001																		0.309	21.673
[705-720]	0.369	0.145	0.028	0.008																		0.560	21.299
[690-705]	0.344	0.314	0.037	0.041	0.011	0.021	0.001															1.010	20.881
[675-690]	0.937	0.819	0.588	0.219	0.105	0.041	0.015	0.002		0.001												2.769	19.881
[660-675]	1.398	2.313	1.801	0.804	0.392	0.185	0.088	0.042	0.015	0.005	0.001											6.741	16.912
[645-660]	1.223	1.641	0.912	0.416	0.169	0.084	0.050	0.016	0.014	0.016	0.019	0.007	0.005	0.003	0.005						4.579	10.171	
[630-645]	1.325	0.889	0.402	0.138	0.024	0.029	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001											2.490	0.993
[615-630]	0.858	0.628	0.709	0.022	0.001	0.002	0.001															1.709	3.068
[60-615]	9.736	0.593	0.089	0.003	0.001	0.002	0.000	0.001														1.309	1.369
Total	19.601	24.765	19.544	13.805	8.811	6.535	3.756	1.660	0.604	0.229	0.112	0.066	0.027	0.013	0.013	0.011	0.008	0.007	0.002	0.001	99.992	-	
Accum	19.601	44.966	63.310	77.115	86.026	93.481	97.247	98.907	99.511	99.740	99.852	99.910	99.937	99.950	99.962	99.968	99.970	99.971	99.971	99.971	-	-	

P4 (63.08W;18.14N;20.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (2011-01-01 - 2020-12-31) All

	[0-0.05]	[0.05-0.1]	[0.1-0.15]	[0.15-0.2]	[0.2-0.25]	[0.25-0.3]	[0.3-0.35]	[0.35-0.4]	[0.4-0.45]	[0.45-0.5]	[0.5-0.55]	[0.55-0.6]	[0.6-0.65]	[0.65-0.7]	[0.7-0.75]	[0.75-0.8]	[0.8-0.85]	[0.85-0.9]	[0.9-0.95]	[0.95-1]	Total	Accum		
[945-960]	0.400	0.338	0.119	0.003																	0.865	99.912		
[960-945]	0.400	0.347	0.107	0.010	0.001					0.001												0.925	99.068	
[915-930]	0.450	0.439	0.147	0.014	0.001	0.001																1.049	99.136	
[900-915]	0.476	0.624	0.300	0.086	0.008																	1.472	97.087	
[885-900]	0.780	0.807	0.147	0.240	0.071	0.037				0.001	0.001											2.400	95.616	
[870-885]	0.840	1.593	1.928	1.250	0.754	0.428	0.130	0.049	0.009	0.006	0.003	0.003	0.003									8.380	91.157	
[855-870]	0.769	2.333	3.029	4.211	4.288	4.031	3.739	2.332	1.807	0.964	0.362	0.194	0.094	0.034	0.017	0.013	0.007	0.002	0.001	0.002		26.000	80.777	
[840-855]	0.748	2.178	3.071	3.870	4.119	4.382	4.195	3.743	3.040	2.308	1.006	0.510	0.483	0.248	0.137	0.080	0.044	0.019	0.008	0.014		85.191	66.687	
[825-840]	0.483	0.540	0.260	0.148	0.075	0.054	0.030	0.025	0.005	0.005	0.005	0.001	0.007									1.829	23.490	
[810-825]	0.287	0.139	0.056	0.015	0.000	0.001				0.001													0.488	21.467
[795-810]	0.172	0.074	0.016	0.000																			0.267	21.371
[780-795]	0.170	0.050	0.008																				0.186	21.100
[765-780]	0.130	0.042	0.000																				0.130	20.920
[750-765]	0.127	0.027	0.002	0.000																			0.160	20.732
[735-750]	0.130	0.054	0.018	0.005																			0.200	20.672
[720-735]	0.155	0.082	0.036	0.002																			0.236	20.519
[705-720]	0.204	0.137	0.062	0.018	0.000	0.001																	0.426	20.137
[690-705]	0.321	0.252	0.184	0.114	0.076	0.048	0.011	0.006	0.002	0.001	0.002	0.002										1.010	19.713	
[675-690]	0.483	0.899	0.901	0.533	0.292	0.246	0.175	0.149	0.127	0.087	0.037	0.022	0.006	0.000	0.003	0.003	0.001					3.531	18.696	
[660-675]	0.937	1.499	1.516	1.205	0.931	0.848	0.934	0.208	0.283	0.147	0.105	0.058	0.030	0.023	0.014	0.020	0.009	0.009	0.006	0.005	0.005		7.766	16.964
[645-660]	0.913	0.973	0.711	0.444	0.291	0.151	0.123	0.069	0.046	0.019	0.011	0.013	0.005	0.003	0.002	0.001						3.449	7.376	
[630-645]	0.880	0.976	0.386	0.198	0.076	0.037	0.027			0.007	0.001	0.001	0.001										1.774	3.927
[615-630]	0.444	0.444	0.214	0.098	0.011	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001													1.188	2.163
[60-615]	0.430	0.379	0.116	0.023	0.002					0.002													0.960	0.960
Total	9.802	14.743	13.627	12.425	11.180	10.002	8.281	6.660	5.029	3.448	2.130	1.234	0.691	0.306	0.173	0.104	0.060	0.039	0.014	0.021	99.912	-		
Accum	9.802	24.545	38.172	50.597	61.777	71.828	80.108	86.769	91.798	95.246	97.676	98.610	99.201	99.507	99.681	99.784	99.845	99.876	99.892	99.912	-	-		

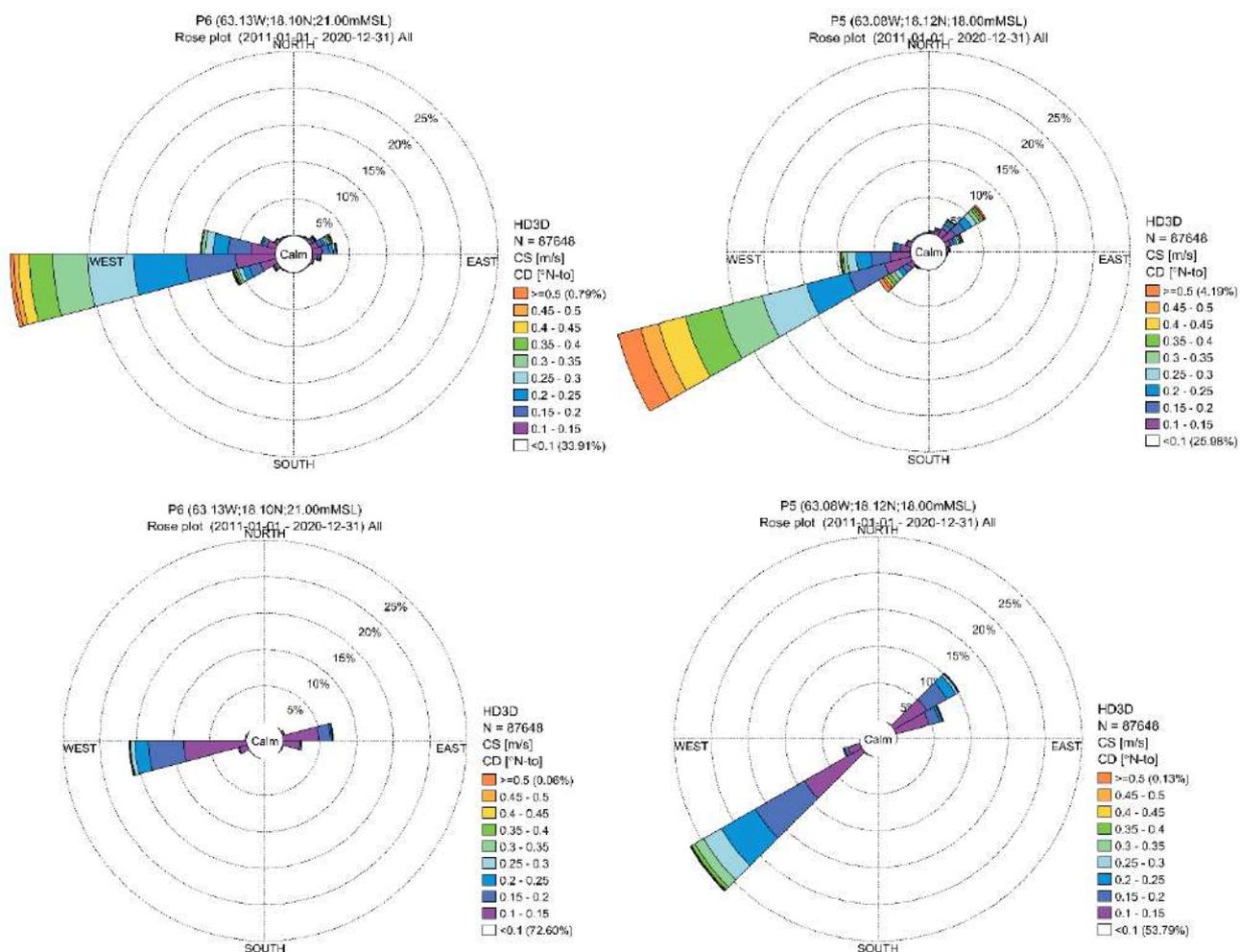


Figure 4-30 Roses des courants 2011-2020 en surface (en haut) et au fond (en bas) aux points d'extraction P6-Galibay Ouest (à gauche) et P5-Galibay Est (à droite). La direction indique celle vers où les courants portent.

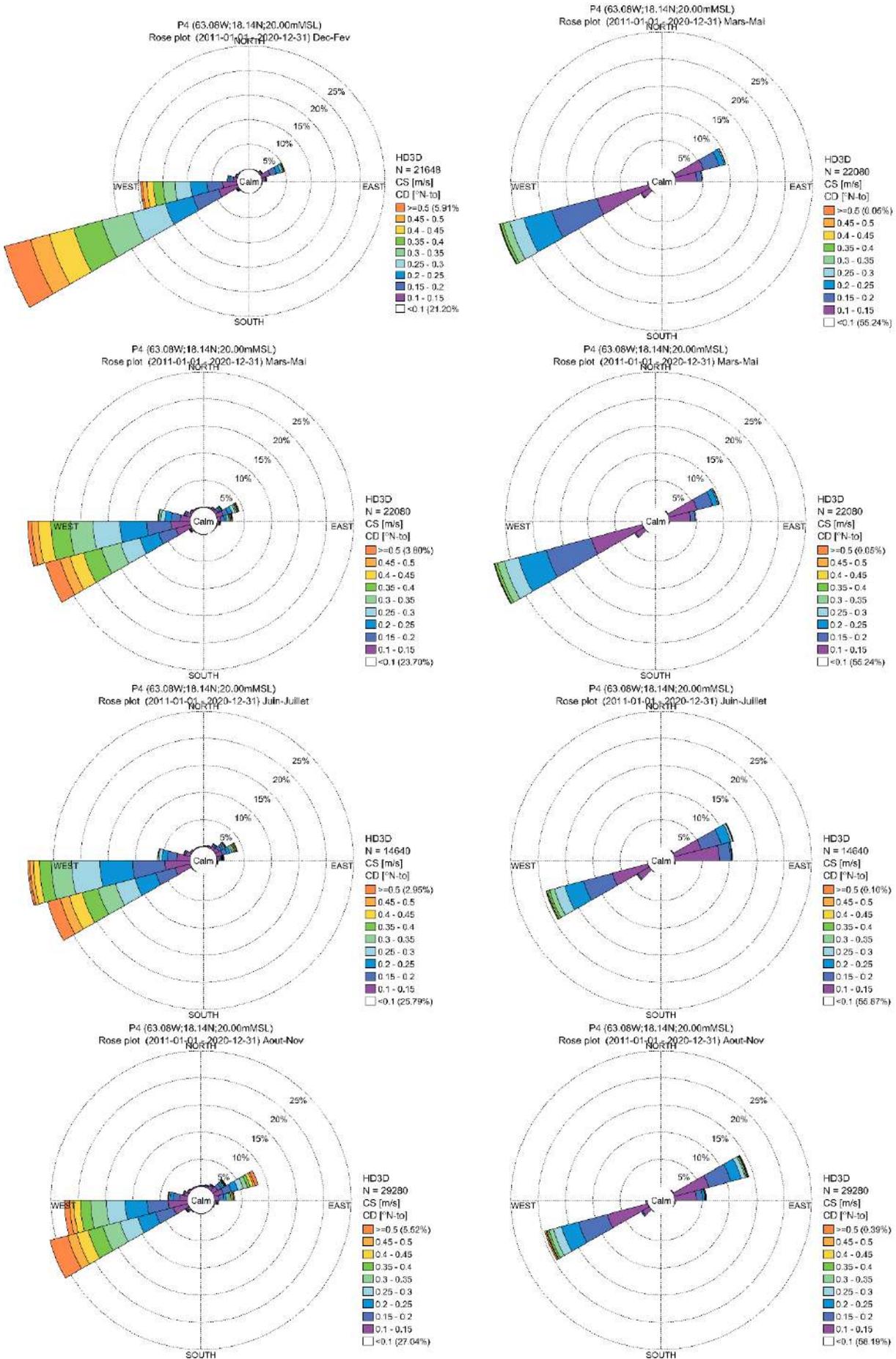


Figure 4-31 Roses de courants 2011-2020 à P4-Détroit, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.

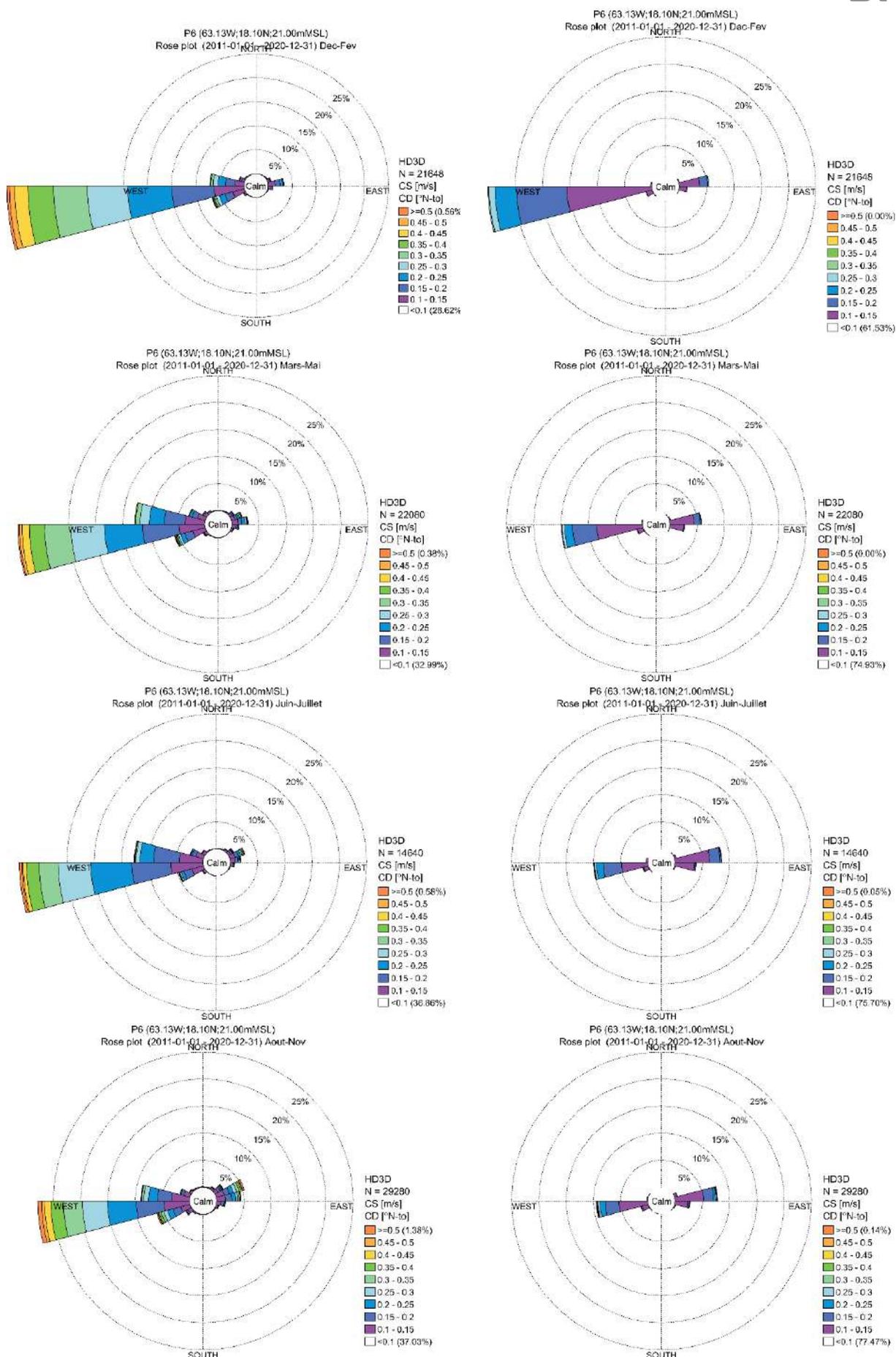


Figure 4-32 Roses de courants 2011-2020 à P6-Galisbay Ouest, en surface (à gauche) et au fond (à droite), pour les saisons Décembre-Février, Mars-Mai, Juin-Juillet et Aout-Novembre.

5 Analyse des conditions météo-océaniques sur la zone d'immersion

Dans cette section, il s'agit de caractériser les conditions météo-océaniques sur la zone d'immersion pressentie et en particulier d'évaluer la variabilité des courants sur la colonne d'eau en plusieurs points dans le secteur Ouest de Saint-Martin. L'objectif est d'aider au choix de deux zones potentielles d'immersion ayant le moins d'impact possible en termes de dispersion des panaches turbides et de risque de retour à la côte.

La zone d'immersion pressentie lors de l'étude d'impact d'EGIS de 2017 est localisée par des fonds de 400 à 600m à l'Ouest de Saint-Martin. Du fait de la présence de câbles sous-marins, cette zone a ensuite été déplacée légèrement au sud-ouest dans le dossier PRO d'EGIS (2017), à une distance de 20km du port de Galisbay, en zone un peu plus profonde (600-800m).

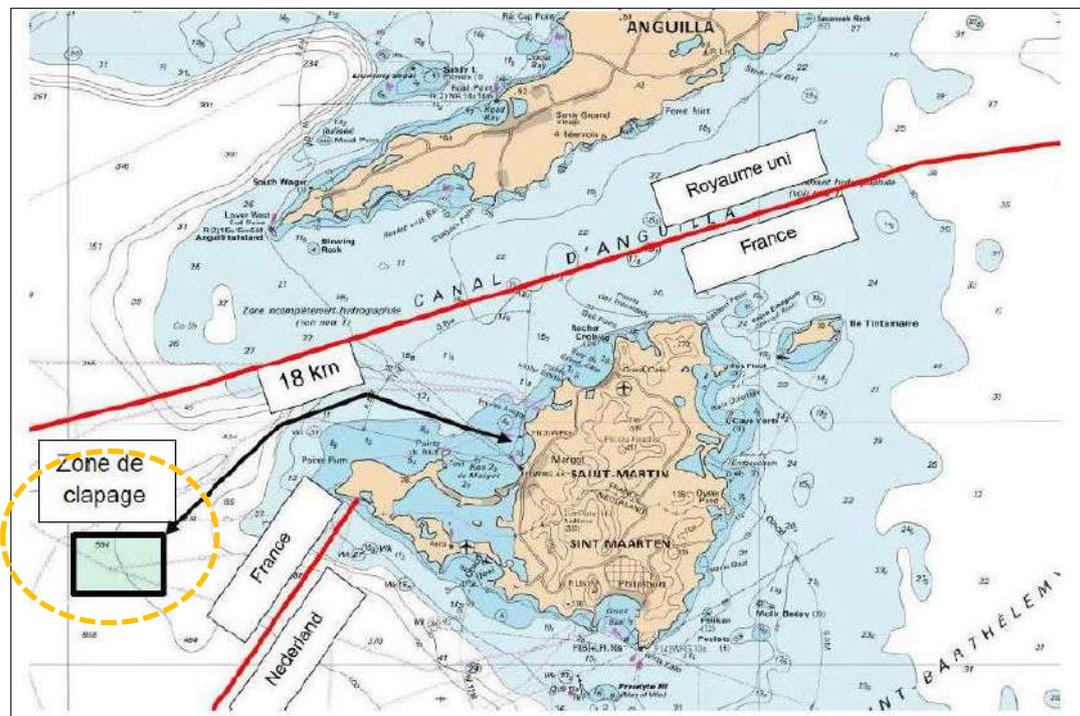


Figure 5-1 Localisation de la zone d'immersion pré-identifiée dans l'étude d'impact d'EGIS 2017. La zone pressentie dans le dossier PRO d'EGIS (2017) est localisée un peu plus au Sud-ouest de cette zone, en dehors des câbles sous-marins. Les analyses des résultats du modèle régional MIKE 3D ont été réalisées sur un secteur plus étendu, zone indiquée en pointillés orange.

Les analyses de courantologie du modèle MIKE 3D ont été réalisées en 10 points sur une zone étendue, indiquée en orange sur la Figure 5-1. La position des points d'extraction B0 à B9 est indiquée Figure 5-2. Le point B2 est centré sur la zone initiale pressentie. Les points B0 et B3 à B5 ont été considérés plus proche de la côte, pour comparer aux autres points situés dans des profondeurs de ~500m (B1, B6), ~600m (B2, B7, B8) et 770m (B9).

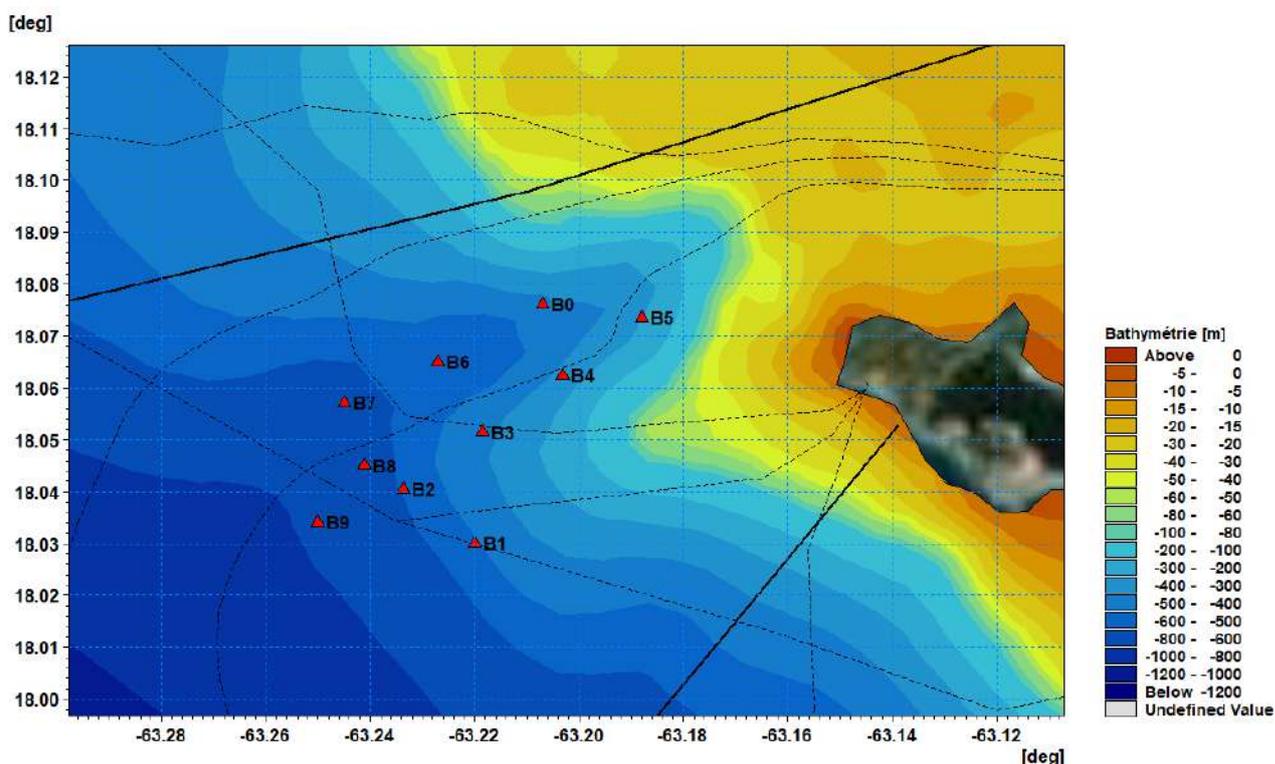


Figure 5-2 Localisation des points d'extraction dans le secteur d'immersion, sur la bathymétrie du modèle régional de Saint-Martin. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé noir.

5.1 Les courants sur le site d'immersion

5.1.1 Cartographie des courants moyens et maximaux sur le site

Dans un premier temps, les courants moyens et maximaux ont été calculés sur l'année 2018, dans la première couche de surface (Figure 5-3) et dans la première couche proche du fond (Figure 5-4).

En surface, les vitesses sont maximales (> 1 m/s) là où le plateau s'étend vers le large, dans le prolongement des pointes Ouest de Saint-Martin et d'Anguilla. Dans le secteur d'immersion les vitesses maximales sont de 0.9 m/s alors que les vitesses moyennes sont de l'ordre de 0.2m/s.

Au fond, il est intéressant de voir que les vitesses moyennes et les vitesses maximales sur 2018 sont minimales dans la zone de plus grande profondeur, formant une cuvette entre les deux avancées de la plateforme. Les points d'extraction B6 et B7 apparaissent ainsi déjà intéressants comme secteur potentiel d'immersion car ils pourraient induire une moindre dispersion des sédiments au fond par rapport aux autres points. Les points B8 et B4 pourraient aussi être favorables. Par contre, proche du point B1, il apparaît une petite zone de plus forts courants sans doute induits par des irrégularités du fond. La vitesse moyenne est de 0.15 m/s et la vitesse maximale atteint 0.6 m/s localement.

L'évaluation des conditions de courant aux différents points de la zone d'immersion doit aussi considérer la variabilité des courants dans la colonne d'eau.

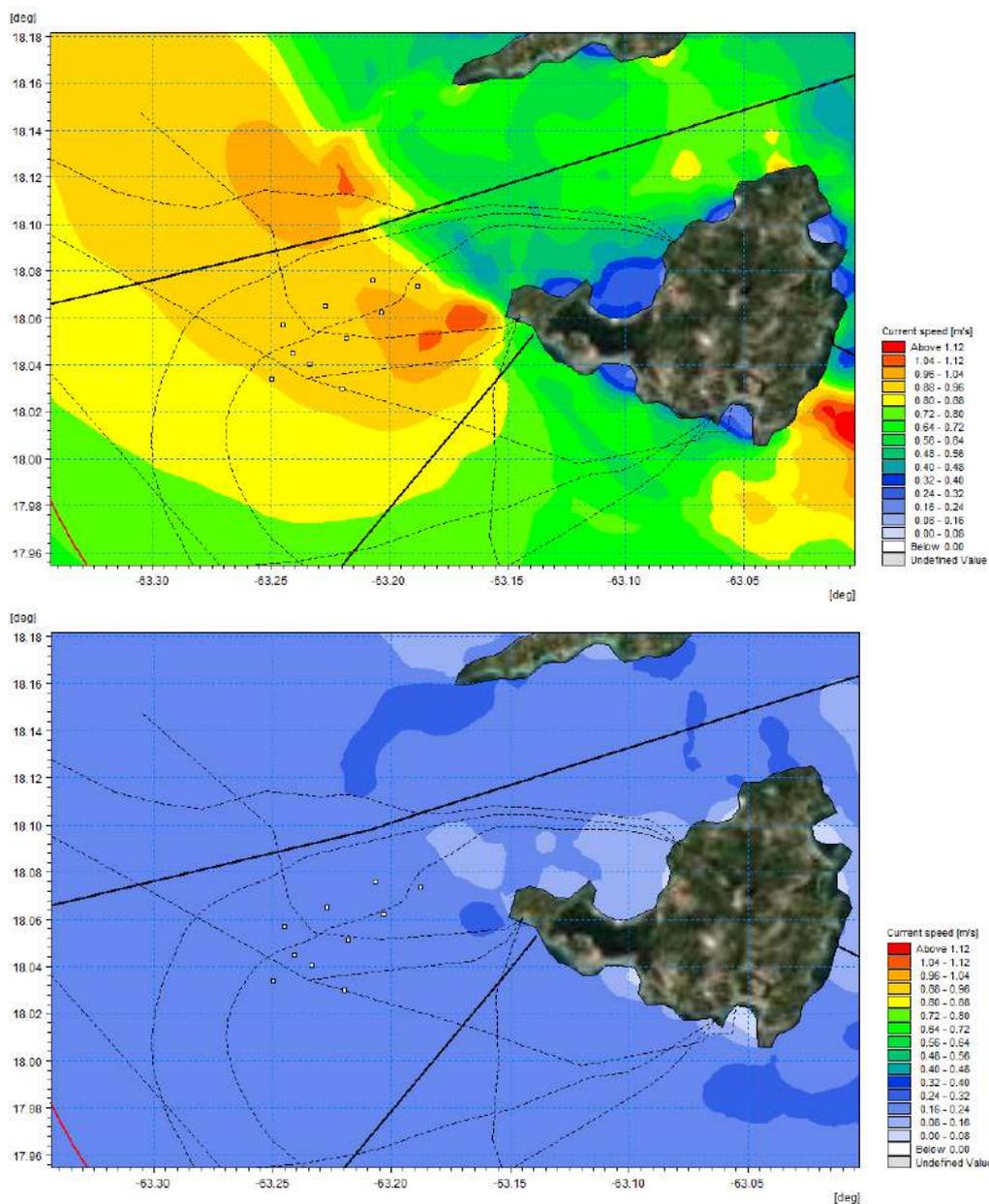


Figure 5-3 Cartographie des courants moyens (en haut) et maximaux (en bas) en 2018, dans la première couche de surface. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé. Les points d'extraction sont indiqués par les carrés blancs.

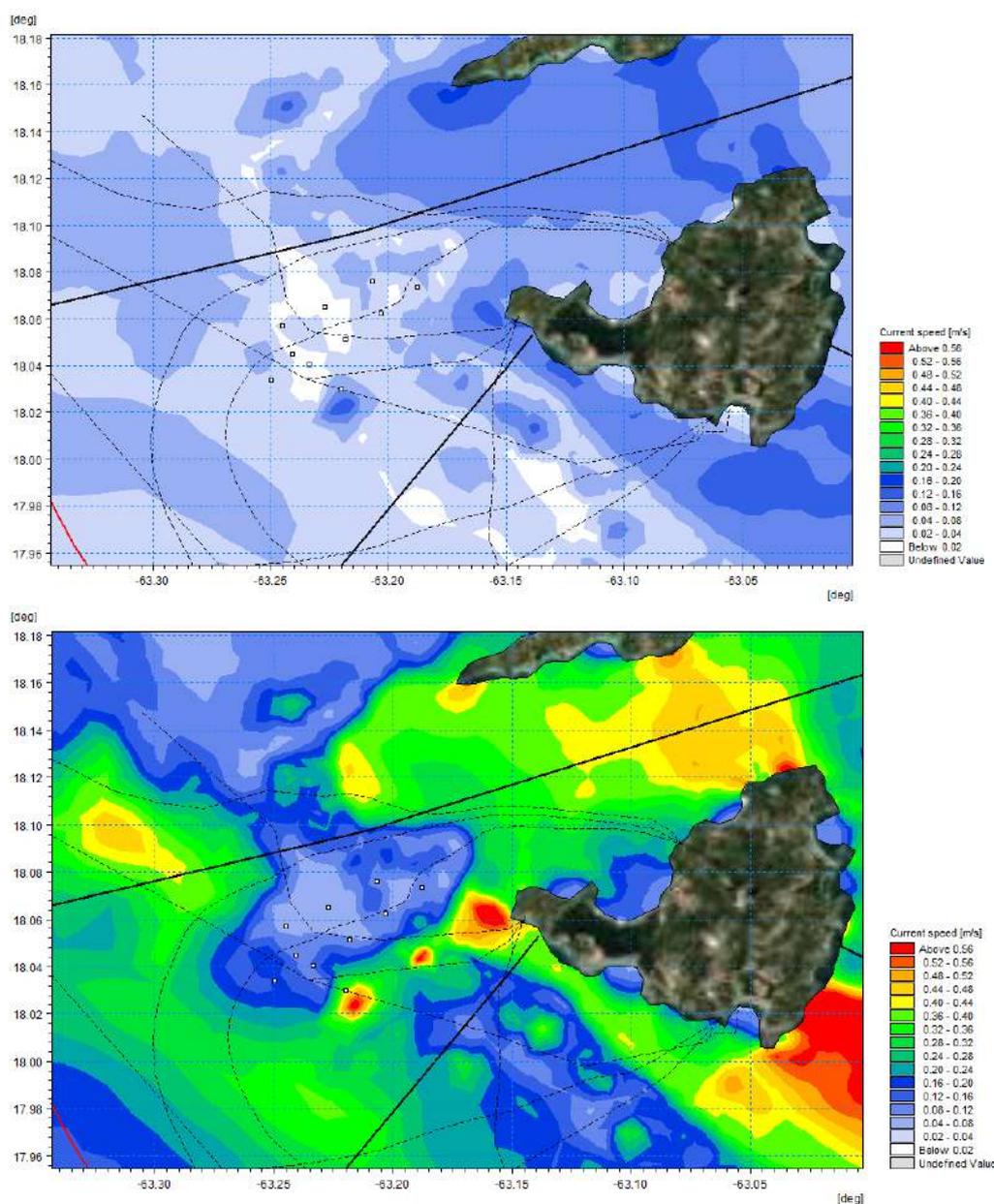


Figure 5-4 Cartographie des courants moyens (en haut) et maximaux (en bas) en 2018, dans la première couche proche du fond. (Attention, l'échelle de couleur n'est pas la même que pour les courants de surface)

5.1.2 Variabilité des profils de courants au point B2

Les profils verticaux de courant, température et salinité ont été extraits au point B2 de 2016 à 2020. L'évolution temporelle des profils sur 2018 est présentée Figure 5-5 et Figure 5-6. Les autres années sont présentées en Annexe B.

Bien que les circulations dans cette zone soient majoritairement dirigées vers le Nord-ouest, les résultats mettent en évidence une assez grande variabilité des courants, que ce soit temporelle ou sur la colonne d'eau :

- En surface, les événements de plus forte intensité ($>0.25\text{m/s}$) ont lieu sur des durées variant de quelques heures à plusieurs jours, et sont parfois visibles dans la colonne d'eau

jusqu'à plus de 100m. Des inversions de direction des courants apparaissent aussi, assez irrégulièrement.

- Dans la colonne d'eau, des veines de courant apparaissent régulièrement, d'une part sous la thermocline, entre 100 et 200m associé à une salinité plus importante et d'autre part entre 150m et 300m, avec des vitesses en général plus fortes (0.15 à 0.3 m/s). Ces courants sont induits par l'évolution dans la colonne d'eau des différences masses d'eau de la circulation générale (Eau sous-jacente Subtropicale, Eau Centrale de l'Atlantic Tropical).
- Dans le bas de la colonne d'eau, sous les 500m, les vitesses sont en général très faibles, <0.1m/s, mais la variabilité des directions est bien plus fréquente et clairement attribuée au processus de la marée avec des inversions semi-diurnes de Sud-Sud-Ouest à Est-Nord-Est.

La marée est un processus barotrope qui est bien pris en compte dans le modèle et est clairement visible sur ces séries temporelles, en particulier sur les zooms Figure 5-6. Elle fait fluctuer à plus haute fréquence les courants et hauteurs d'eau mais sa dynamique est ici fortement perturbée par les processus baroclines, notamment la stratification de la masse d'eau, les effets du vent en surface et la circulation des différentes masses d'eau évoluant dans la colonne d'eau sous les effets des gradients de densité.

L'événement particulièrement intense de fin mai 2018 est exceptionnel, lié à la tempête Tropicale Alberto. Il est décrit dans la section suivante.

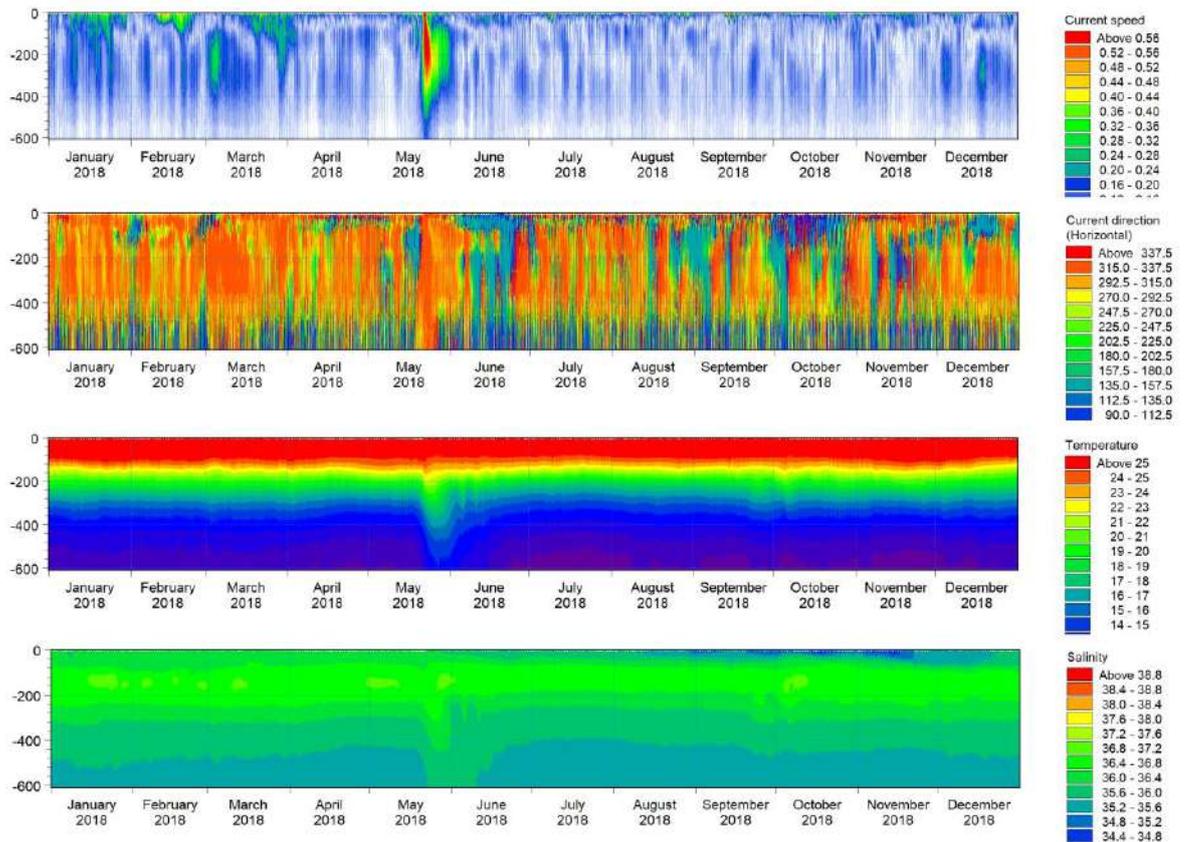


Figure 5-5 Evolution des profils verticaux de Courants, Température et salinité sur 2018 au point B2. Les années 2016 à 2020 sont présentées en Annexe B.

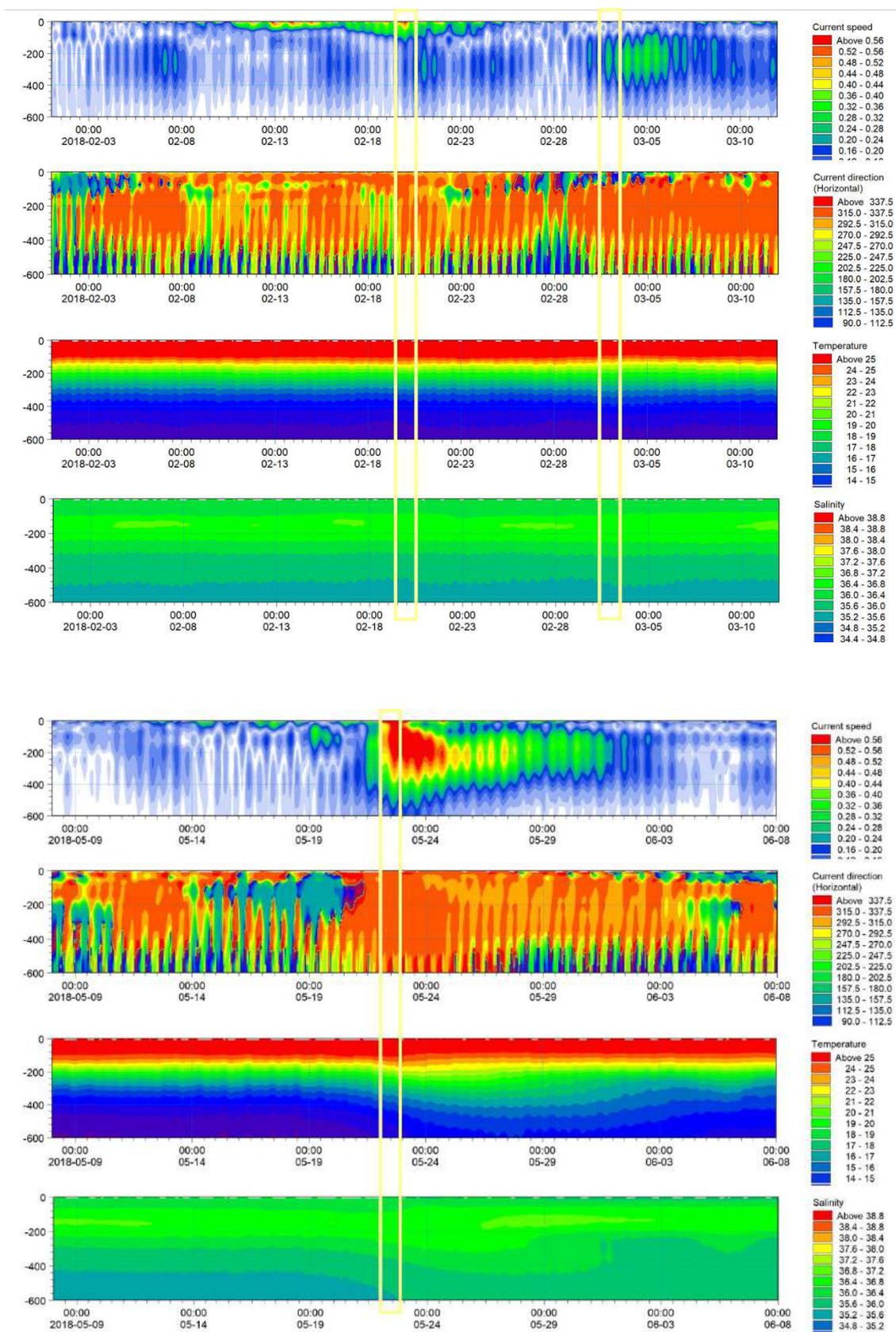


Figure 5-6 Zoom de la Figure 5-5 à B2, du 2 février au 11 mars (en haut) et du 8 mai au 8 juin (en bas). Les encadrés en jaune ciblent les événements analysés dans la section 5.1.3.

5.1.3 Caractérisation des masses d'eau sur la colonne d'eau

La variabilité de la dynamique simulée par le modèle a été étudiée plus finement sur la colonne d'eau au point B2, localisé sur la zone d'immersion initialement pressentie.

A partir de l'évolution temporelle des profils verticaux de courant, température et salinité sur 2018 (Figure 5-5 et Figure 5-6), les trois événements suivants ont été analysés :

- Événement 1 : 20 février 2018 à 00h
- Événement 2 : 03 mars 2018 à 00h
- Événement 3 : 22 mai 2018 à 15h

Les profils verticaux de courants, température et salinité sont présentés Figure 5-7 (20 février et 03 mars) et Figure 5-8 (22 mai).

Pour les trois événements, les profils de courant sont tous caractérisés par un courant portant majoritairement vers le Nord-Ouest, en général sur toute la colonne d'eau. Les événements 1 et 3 montrent des situations avec des vitesses plus fortes en surface, diminuant progressivement dans la colonne d'eau. L'événement du 3 mars montre une situation avec des vitesses faibles dans la couche de surface, dirigées vers le Nord-Est, alors qu'elles sont maximales autour de 200-300m de profondeur, portant vers le Nord-Ouest. En termes de cisaillement de courant, on remarque une tendance à l'inversion des directions dans la couche de fond (entre 500 et 600m) probablement induit par la marée, avec des vitesses très faibles des courants.

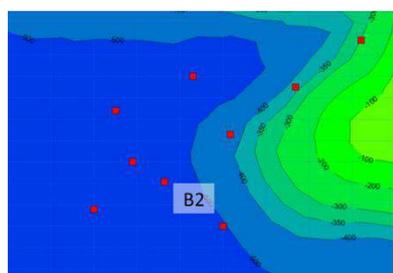
L'événement de fin mai 2018 est exceptionnel par son intensité et la durée de son impact sur la masse d'eau, il peut être attribué à la tempête tropicale Alberto qui toucha Cuba et la Floride les 24-25 mai avec de fortes précipitations. Les courants au point B2 sont forts sur presque toute la colonne d'eau, supérieurs à 0.6 m/s jusqu'à 240m de profondeur. Cet événement dure plusieurs jours et est associé à un approfondissement de la couche de mélange, visible du 24 mai au 2 juin, avec l'apparition d'une masse d'eau plus chaude et plus salée jusqu'à plus de 300m de profondeur au lieu de 200m les jours précédents (voir Figure 5-6).

En termes de profils de température et salinité, les trois événements mettent en évidence les caractéristiques suivantes :

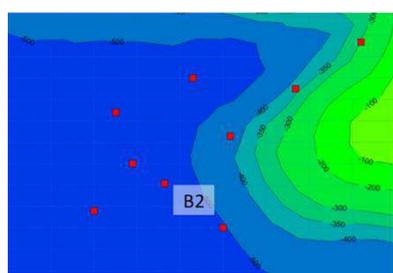
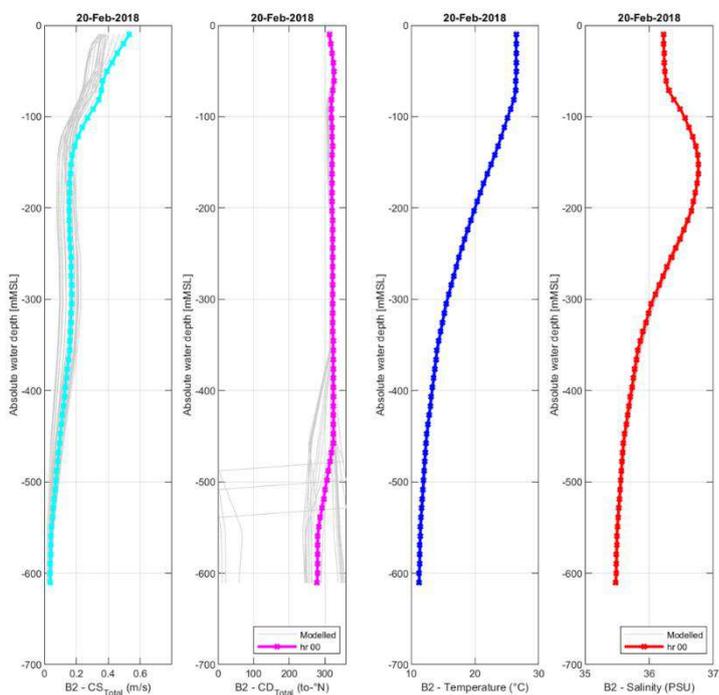
- Une couche de mélange relativement moins salée (~36psu) allant jusqu'à 80m, parfois 100m de profondeur, où se trouve la thermocline.
- Sous la couche de mélange superficielle, le profil de salinité est caractérisé par un petit « ventre » avec des salinités atteignant un maximum (~36.7 psu) autour de 120-150m de profondeur, indiquant une zone de forte stratification et la présence d'une masse d'eau différente.
- Excepté lors d'événement particulier, les profils de température montrent en général une moindre variabilité que ceux de salinité : la couche de mélange superficielle chaude (25 à 29°C) s'établit sur 80 à 100m puis la température décroît progressivement jusqu'au fond (~10°C).

Les résultats aux autres points d'extraction dans ce secteur Ouest de Saint-Martin ont montré des analyses similaires. Ces profils sont en accord avec les caractéristiques des masses d'eau connues pouvant être rencontrées dans ce secteur des Antilles :

- L'eau de surface caribéenne (Caribbean Surface Water, CSW) composant essentiellement la couche de mélange de surface.
- L'eau sous-jacente subtropicale (Subtropical Underwater, SUW), formée par évaporation de l'eau de surface devenant plus salée et coulant jusqu'à trouver son équilibre de flottabilité.
- Dans les couches plus profondes, la salinité décroît progressivement dans l'eau de la mer des Sargasses (Sargasso Sea Water, SSW) puis l'eau centrale de l'Atlantique Tropical (Tropical Atlantic Central Water, TACW) caractérisée par des salinités minimales.



	Year	Month	Day	Hour
Ext 1	2018	February	20	0
Ext 2	2018	March	3	0
Ext 3	2018	May	22	15



	Year	Month	Day	Hour
Ext 1	2018	February	20	0
Ext 2	2018	March	3	0
Ext 3	2018	May	22	15

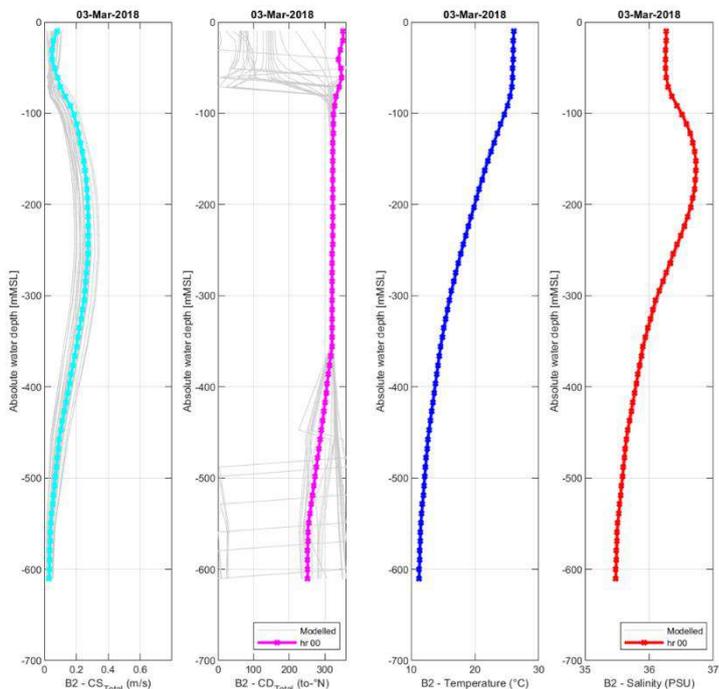


Figure 5-7 Profils verticaux de Courant (vitesse, direction), Température et Salinité, extraits au point B2 le 20 février et le 3 mars 2018.

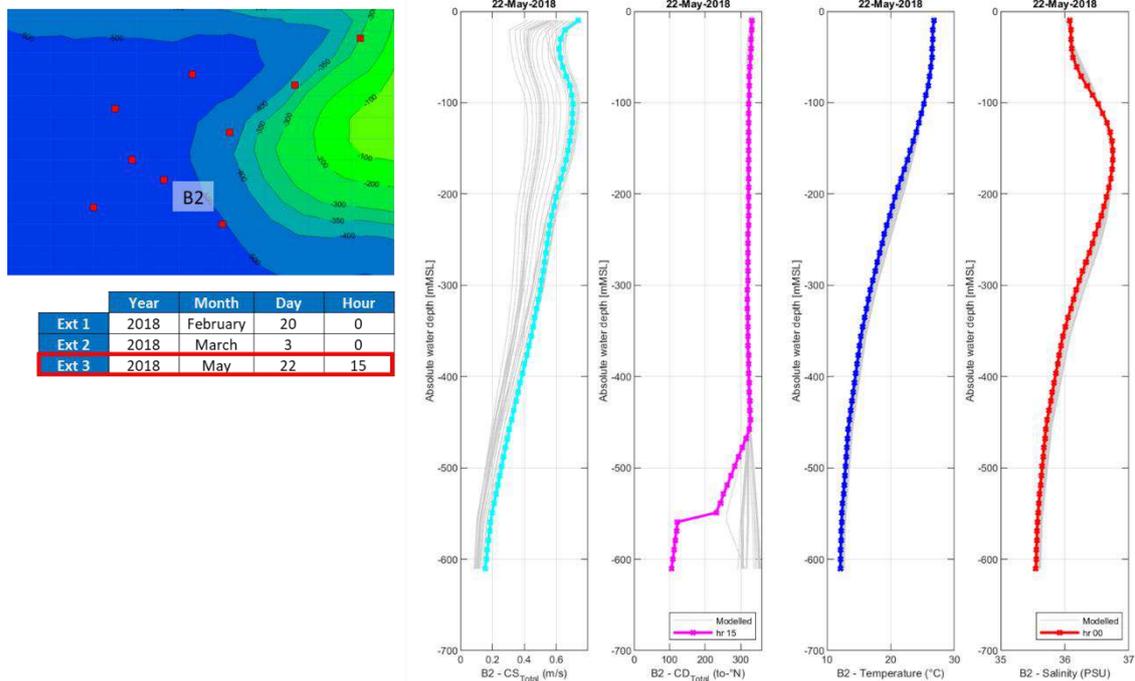


Figure 5-8 Profils verticaux de Courant (vitesse, direction), Température et Salinité, extraits au point B2 le 22 mai 2018.

5.1.4 Situations avec cisaillement vertical des courants

Les profils de courants du 3 mars présentés précédemment illustrent une situation où les courants de surface dans ce secteur portent vers le Nord-Est alors que ceux de la masse d'eau sous-jacente sont dirigés vers le Nord-Ouest. En section 4.3.2, nous avons décrit l'événement de Northers de début mars 2018, avec une rotation des vents à l'Ouest-Sud-Ouest le 3 mars en fin de journée puis au Nord-Ouest. Or en début de journée du 3 mars, cette rotation du vent n'est pas encore initiée, le courant de surface tourne pourtant au Nord-Est en effet quelques heures mais avec une intensité faible. La Figure 5-9 montre les champs de courant en surface et à environ 120m de profondeur le 3 mars à 4h. Les courants plus au large à l'ouest de saint-Martin sont plus intenses et portent au Nord-Est en surface, alors qu'ils sont en effet plus faibles proche de la cote. L'interaction avec le vent mais aussi avec la marée pourrait expliquer ce phénomène. Les coupes verticales Figure 5-10 sont réalisées du large à la cote (T1) et parallèlement au talus du sud-est au nord-ouest (T2). Elles permettent de bien visualiser les cisaillements de courants entre la couche de surface et la veine de courant qui longe le talus vers le nord-ouest à une immersion de 100 à 300m.

D'autres situations ont été identifiées dans les résultats du modèle avec des cisaillements verticaux de courant pouvant apparaître dans la zone d'immersion. Elles semblent liées au découplage entre, d'une part la circulation en surface qui est influencée par le vent et les courants sur le plateau de Saint-Martin/Anguilla et d'autre part, la circulation s'établissant dans les couches plus profondes qui est contrainte par la bathymétrie, longeant le talus et ne pouvant guère remonter sur le plateau. Ainsi la situation du 22 février 2018 montre des courants forts en surface dirigés vers l'Ouest/Sud-ouest autour des îles et dans le canal d'Anguilla, alors qu'en profondeur la circulation longe Anguilla et le talus pour s'orienter Sud-Est devant Saint-Martin à l'immersion de 100-150m, sous la thermocline.

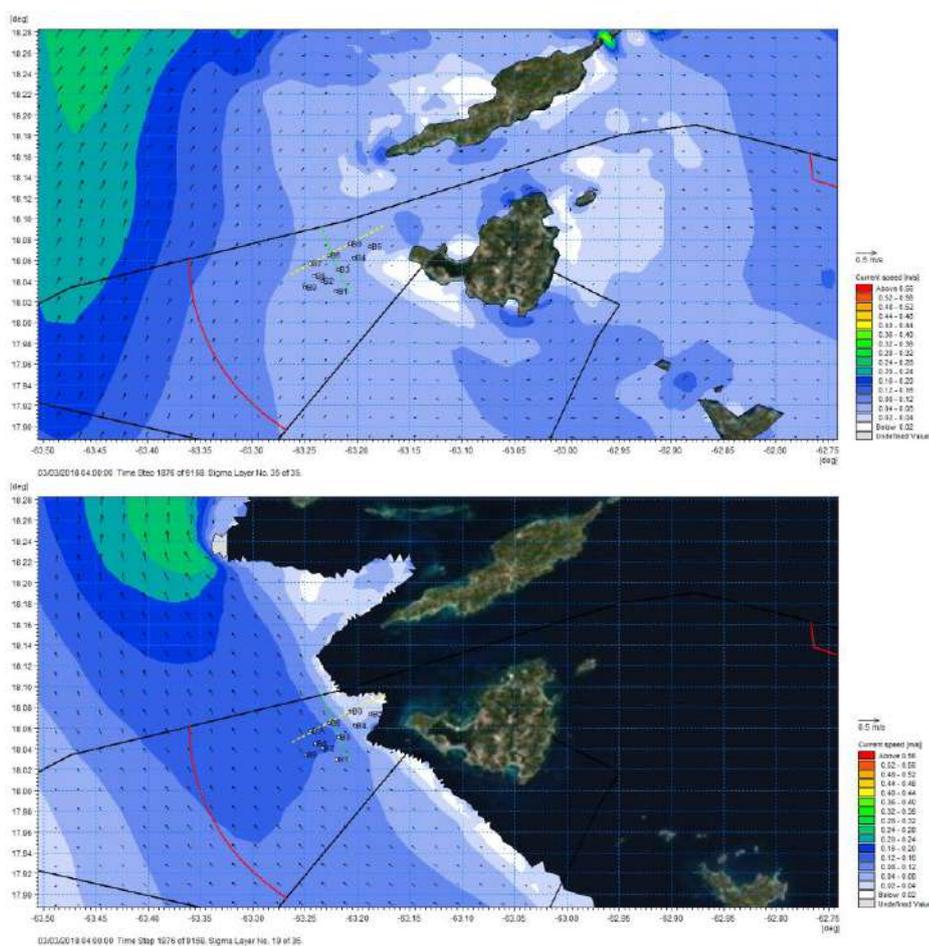


Figure 5-9 Modèle MIKE 3D - Champs de courant de surface (en haut) et à ~120m de profondeur le 22/02/2018 à 08h. Les coupes verticales sont indiquées en blanc (T1) et en vert (T2).

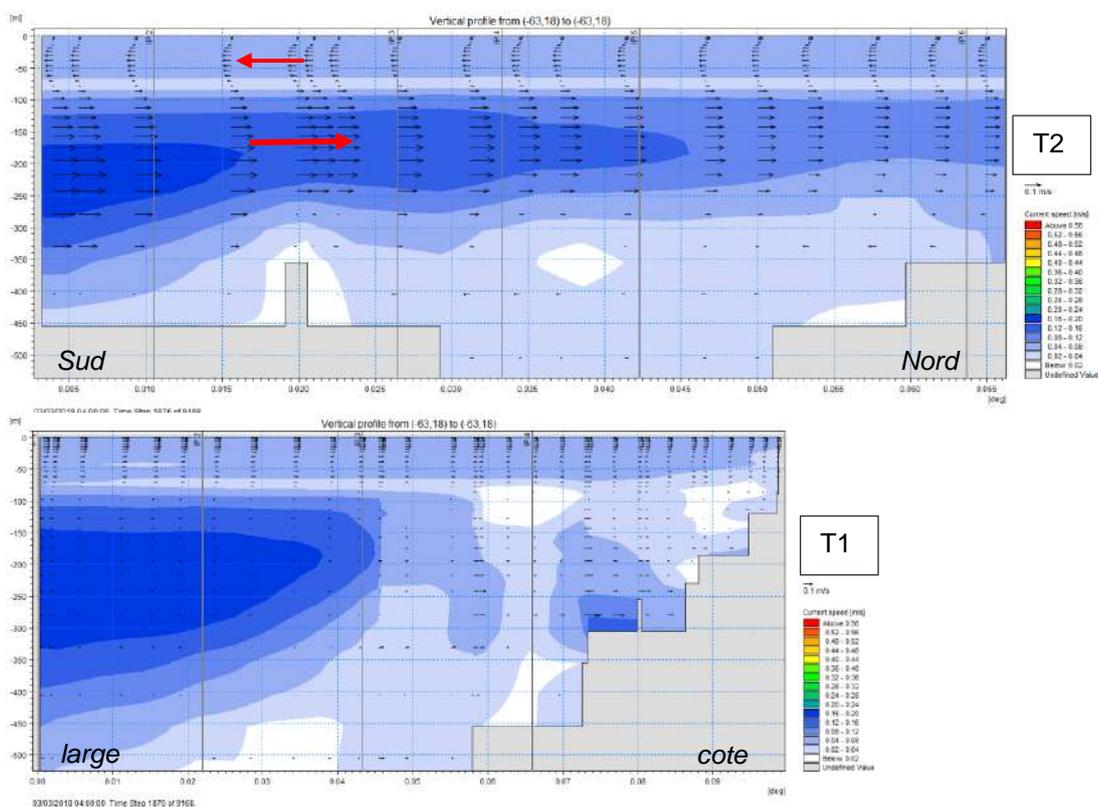


Figure 5-10 Coupes verticales extraites du modèle MIKE 3D dans l'Ouest de Saint-Martin, T2 (en haut) et T1 (en bas), illustrant les cisaillements de courants sur la verticale.

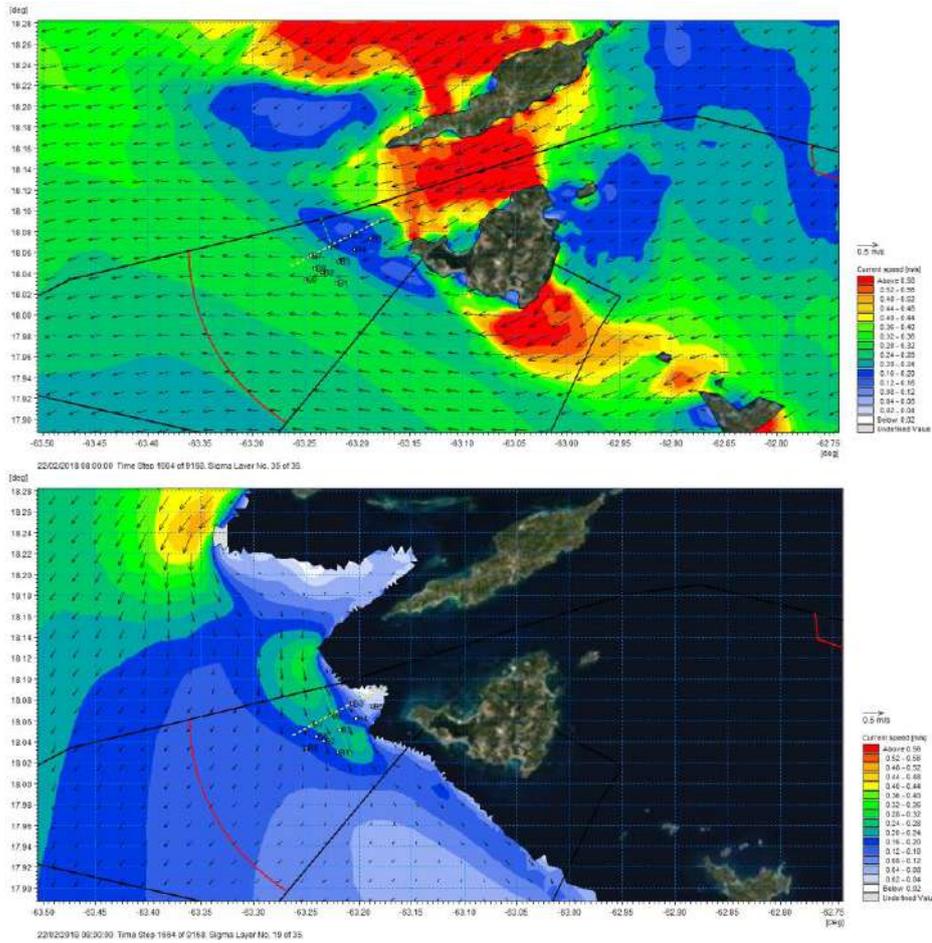


Figure 5-11 Modèle MIKE 3D - Champs de courant de surface (en haut) et à ~120m de profondeur le 22/02/2018 à 08h. Les coupes verticales sont indiquées en blanc (T1) et en vert (T2).

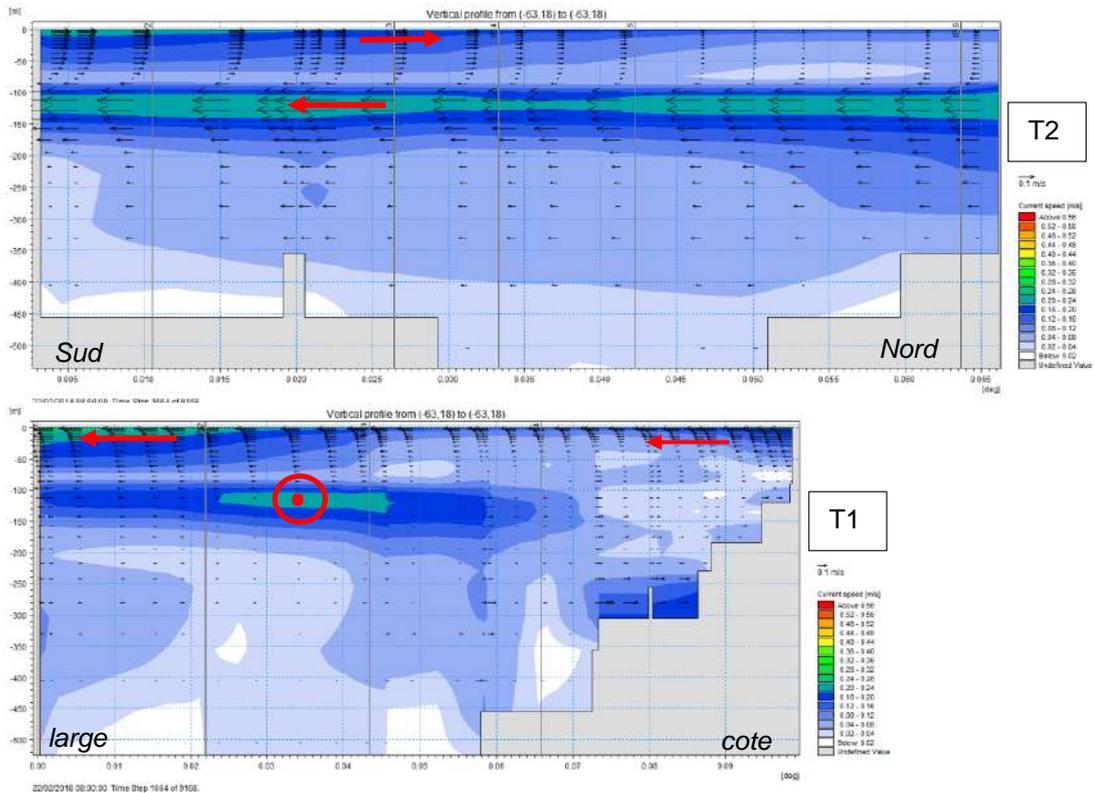


Figure 5-12 Coupes verticales extraites du modèle MIKE 3D dans l'Ouest de Saint-Martin, T2 (en haut) et T1 (en bas), illustrant les cisaillements de courants sur la verticale.

Les analyses précédentes suggèrent que la variabilité du courant dans la zone d'immersion est dominée, en surface, par les conditions de vent affectant la couche de mélange superficielle, alors qu'une plus faible variabilité spatiale est attendue dans les couches profondes, les circulations générales étant contraintes par la bathymétrie. La marée peut influencer également sensiblement les circulations dans la colonne d'eau mais aussi en surface lorsque le vent est faible.

Pour approfondir l'étude de la variabilité des profils verticaux de courant, les résultats aux points B1 à B9 ont été analysés sur la base des profils verticaux sur l'année 2018 complète (section 5.1.5) et à partir des roses de courant extraites en plusieurs profondeurs en chaque point (5.1.6).

5.1.5 Percentiles des profils verticaux de courant sur l'année 2018

L'analyse statistique des profils verticaux de courant modélisés a été réalisée en calculant les percentiles de tous les profils de l'année 2018, en chaque point : B1 à B3 (Figure 5-13) et B6 à B9 (Figure 5-14). Sur chaque figure, l'ensemble des profils de vitesses de courant de 2018 sont tracés en gris et les courbes en pointillé bleu figurent les 50^{ième}, 75^{ième} et 90^{ième} percentiles (P_{50} , P_{75} et P_{90}). Ces profils bleus représentent donc la vitesse du courant dépassée 50% - 75% et 90% du temps.

Ces résultats montrent que les vitesses les plus fortes sont localisés en surface, dans la couche de mélange. Elles peuvent dépasser 0.8 m/s à B1-B3 mais le P_{90} est inférieur à 0.4 m/s.

Sur toutes les stations, les profils percentiles montrent une augmentation progressive des vitesses en descendant autour des 200-300m où l'eau sous-jacente Subtropicale plus salée s'écoule. Plus en profondeur, sous les 400m, la vitesse diminue progressivement.

Au fond les vitesses sont particulièrement faibles à B2 et de B6 à B9, où elles sont <0.2m/s avec un P_{90} à ~0.05m/s. A B1 et B3 les vitesses au fond sont plus élevées, le P_{90} est de 0.1m/s.

Globalement, les percentiles des vitesses de courant sur la colonne d'eau apparaissent plus faibles à P6 qu'aux autres points alentours, P7 à P9.

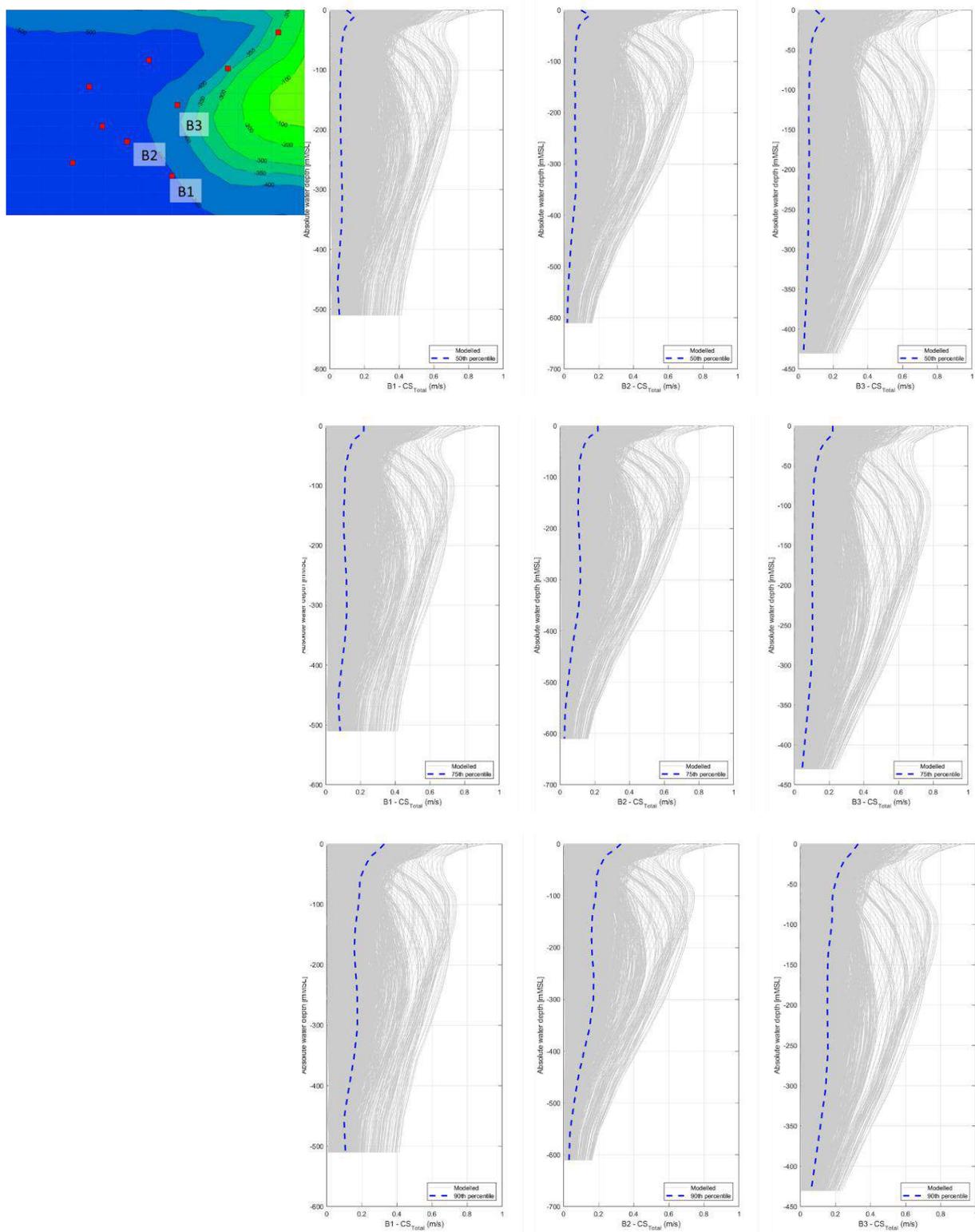


Figure 5-13 50^{ième}, 75^{ième} et 90^{ième} percentiles des profils des courants en 2018 aux points B1, B2 et B3

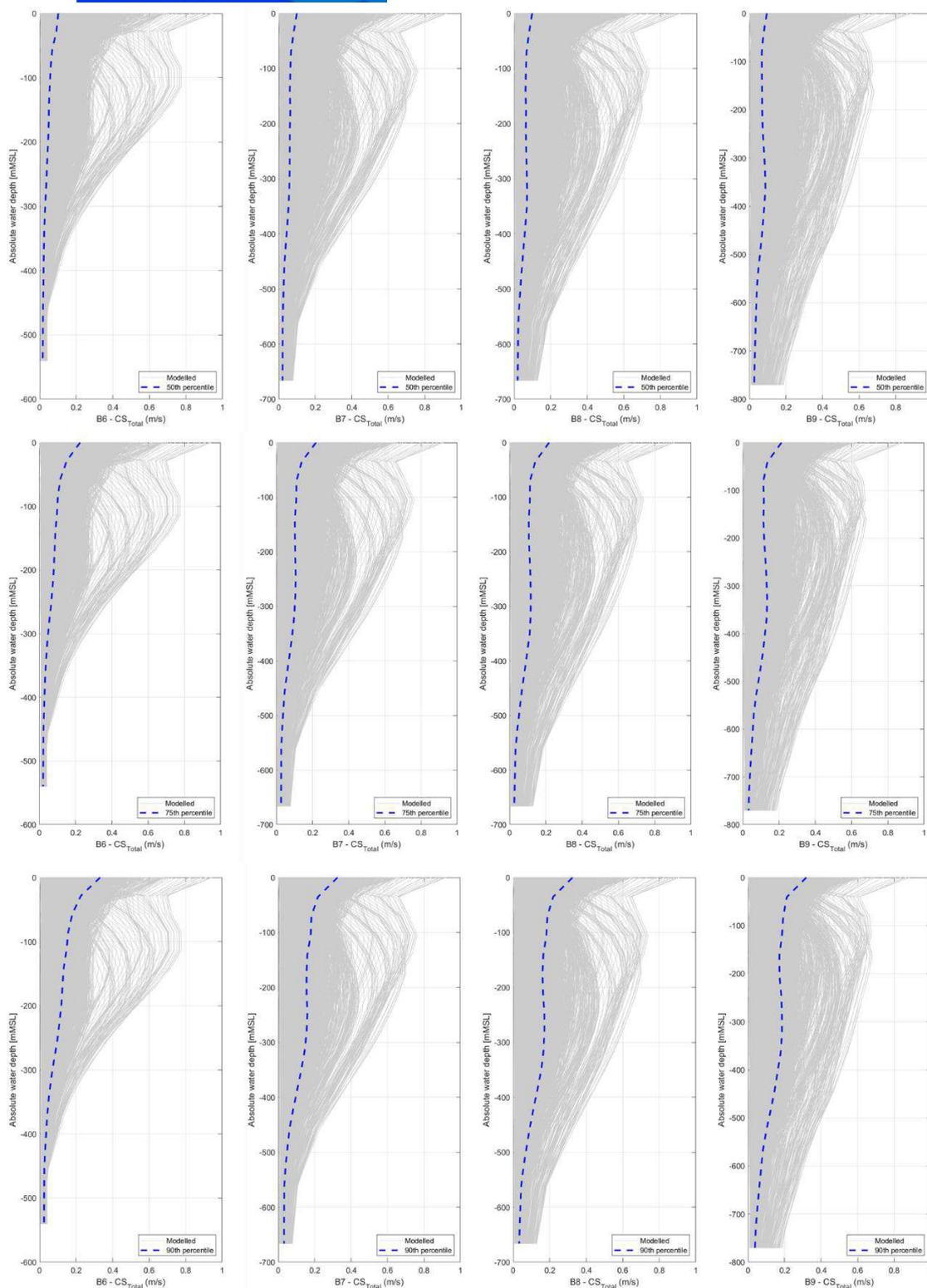
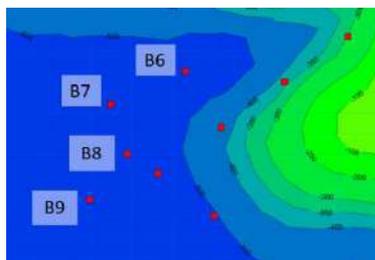


Figure 5-14 50^{ième}, 75^{ième} et 90^{ième} percentiles des profils des courants en 2018 aux points B6 à B9.

5.1.6 Comparaison des roses de courants aux différents points sur 2011-2020

La variabilité spatiale des courants sur la colonne d'eau a été étudiée aux différents points de la zone étudiée B0 à B9, dont la localisation est reprise Figure 5-15. Les roses de courants ont été calculées à partir des résultats du modèle sur la période 2011-2020 à plusieurs immersions : en subsurface (-5m), sous la thermocline (-120m), au niveau de l'écoulement de l'Eau Centrale de l'Atlantique Tropical (-260m) et en profondeur à environ 100-150m du fond.

Tous les résultats sont présentés en Annexe A. La Figure 5-16 présente les roses à B2 (où la profondeur d'eau est de 600m) et à B6 (de profondeur 540m). La Figure 5-17 présente les roses à B0 (profondeur 450m) et à B7 (profondeur 670m).

En surface, les conditions sont assez similaires aux différents points, avec des courants forts portant au secteur Nord-Ouest.

Sous la thermocline, les courants sont plus intenses à B2 et B7 par rapport à B6, ce qui a été mis en évidence également avec le percentile 90. Les points B8 et B9 ont également des courants plus intenses. Au point B6 les événements vers le Sud-Est semblent aussi de moindre intensité. Le point B0 a des courants faibles dans la colonne d'eau mais il existe une composante vers la cote dans le bas de la colonne d'eau.

En général les courants sont faibles au fond. Les roses ont également été extraites, elles sont présentées à la fin de l'Annexe A, avec une échelle de couleur différente. Les points B3 et B4 ont des courants au fond plus intenses qu'en B6 et orientés respectivement vers l'Est-Nord-Est et le Nord-Nord-Est, donc vers Saint-Martin (ils longent le talus). De même B8 et B9 ont des vitesses au fond plus fortes qu'en B6.

Ainsi le secteur autour du point B6 apparait a priori comme le plus favorable pour minimiser la dispersion des panaches turbides, que ce soit sur la colonne d'eau ou au fond. Cependant plusieurs autres points pourraient aussi convenir, notamment B7 ou encore la zone B2-B8. Cette dernière est située cependant un peu plus proche des câbles sous-marins.

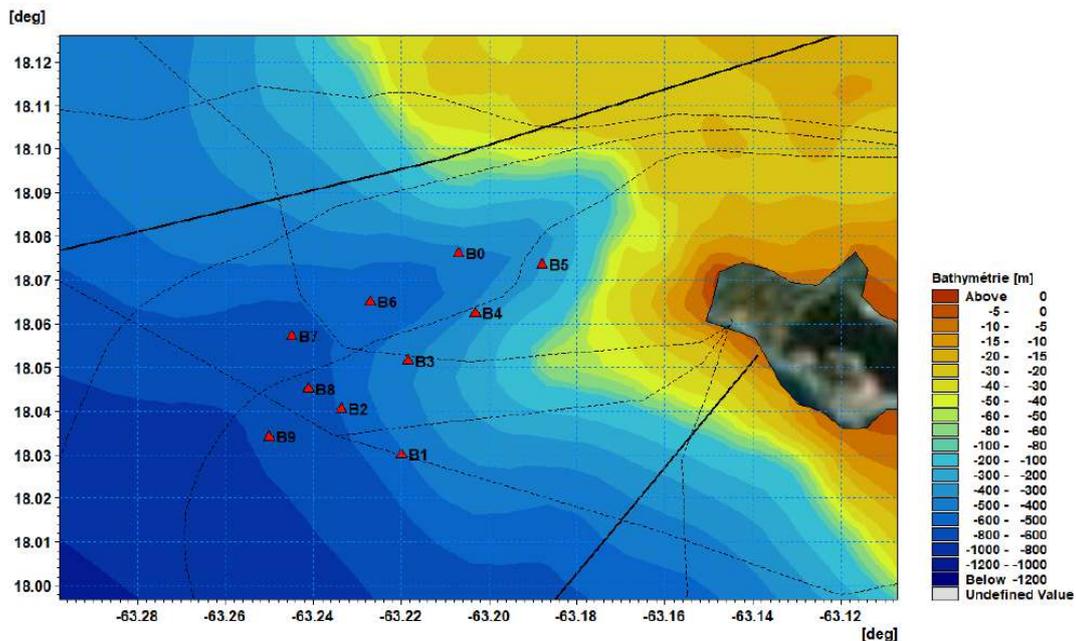


Figure 5-15 Localisation des points d'extraction dans le secteur d'immersion, sur la bathymétrie du modèle régional de Saint-Martin. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé noir.

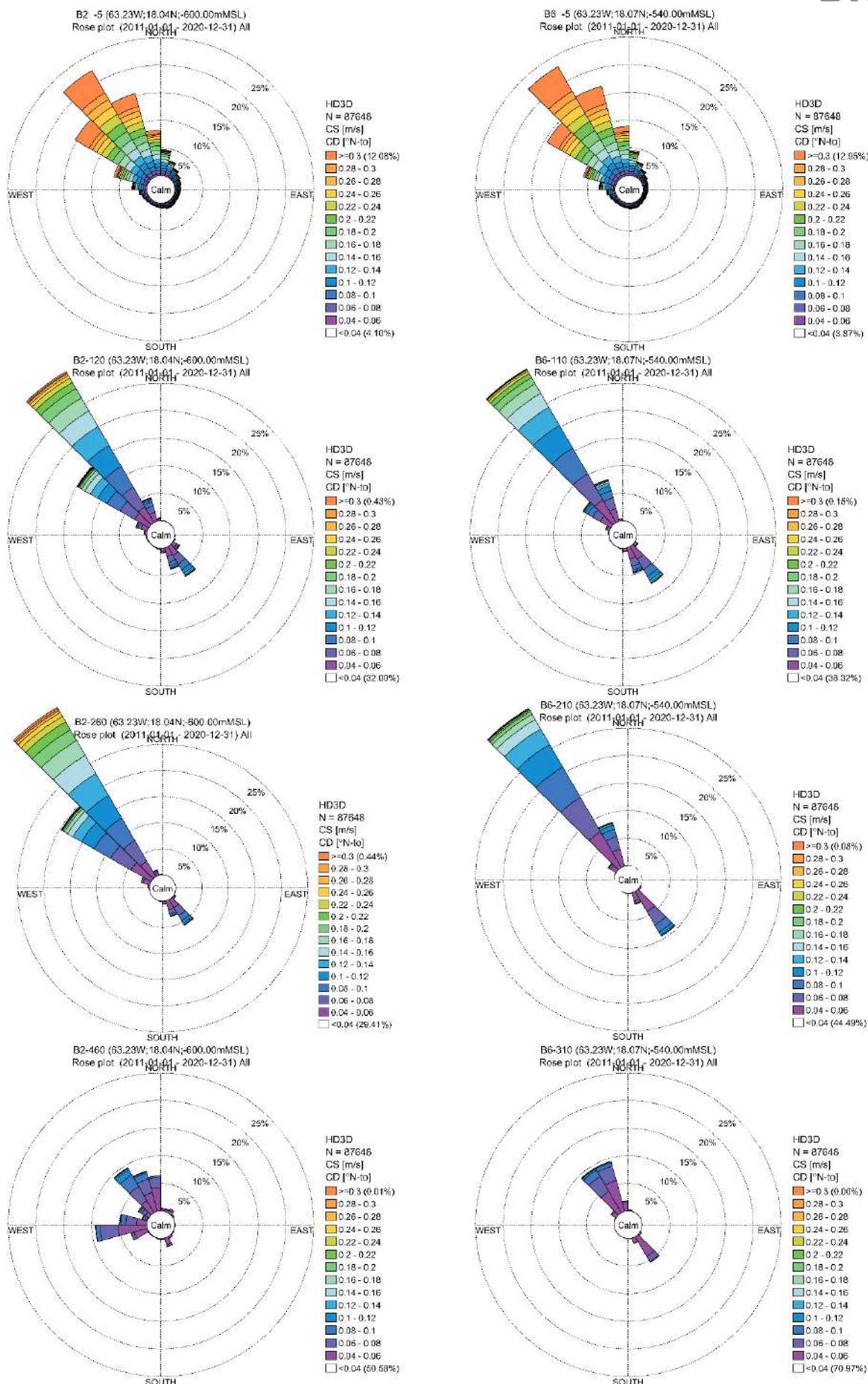


Figure 5-16 Roses des courants à B2 et B6, en subsurface (-5m), à -120m/-110m, -260m/-210m et -460m/-310m

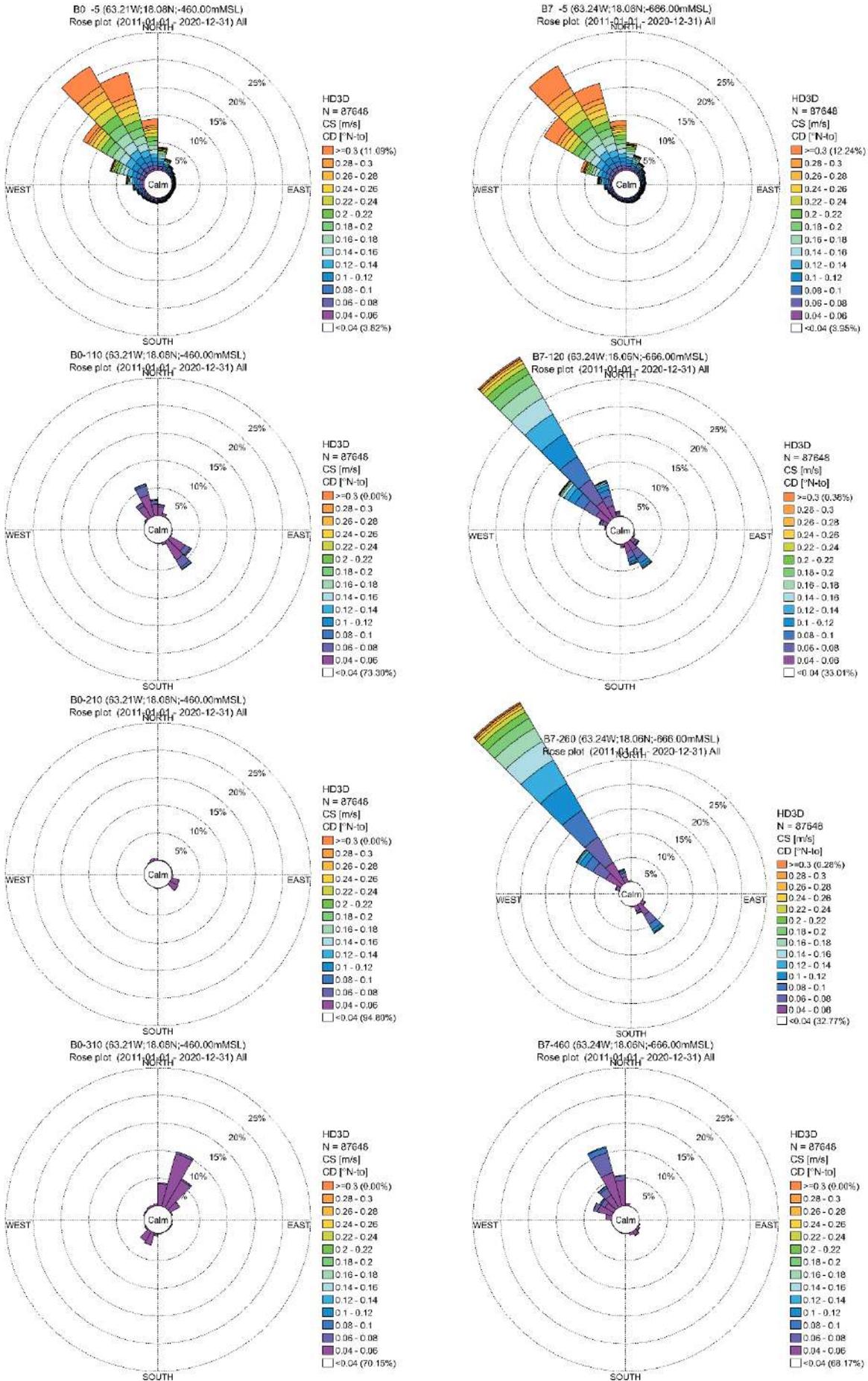


Figure 5-17 Roses des courants à B0 et B7, à -5m, à -110m/-120m, -210/-260m et -310/-460m

5.2 Les vagues sur le site d'immersion

Les conditions de vagues ont été extraites sur la zone pressentie d'immersion, en particulier au point B2, localisé précédemment Figure 5-2. Les vagues proviennent essentiellement du secteur Nord à Nord-Est, excepté au début de la saison des pluies, en juin-juillet où elles viennent du secteur Est/Nord-Est avec des hauteurs bien plus faibles (99% sont <1.5m). Elles sont par contre renforcées pendant la période des Alizés, de décembre à février, avec 33% des hauteurs significatives >1.5m. La zone d'immersion étant située par des profondeurs élevées >400m, la variabilité spatiale des vagues dans ce secteur est faible et ce point est considéré comme représentatif. Il peut être observé des variations de l'ordre de la dizaine de degrés entre les différents points analysés précédemment sur la Zone d'Immersion pressentie, liées la réfraction autour d'Anguilla par le Nord et de Saint-Martin par le Sud-Est. Les hauteurs de vagues tendent à être plus faibles aussi en se rapprochant de la côte Sud-Ouest de Saint-Martin, par effet d'abri de l'île et par atténuation avec la réfraction bathymétrique. La Figure 5-19 illustre ce phénomène pour des houles venant de l'Est-Nord-Est et du Nord-Nord-Est.

L'action des vagues sur les fonds est nulle par grande profondeur, elles ne seront donc pas critiques en termes de remaniement des dépôts sur le site d'immersion, par contre elles pourront être considérées pour les fenêtres de navigabilité des chalands pour les opérations de clapage.

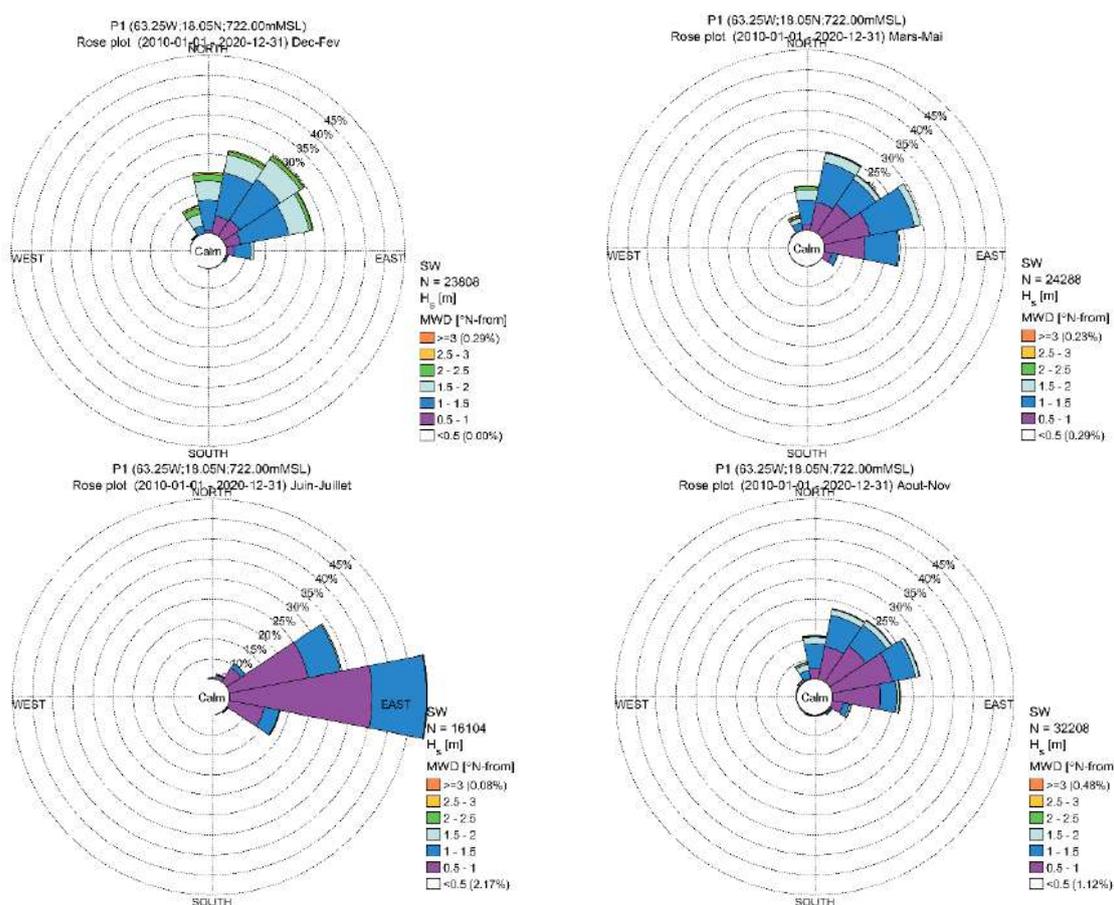


Figure 5-18 Roses des Vagues saisonnières au point P1-Ouest sur 2010-2020

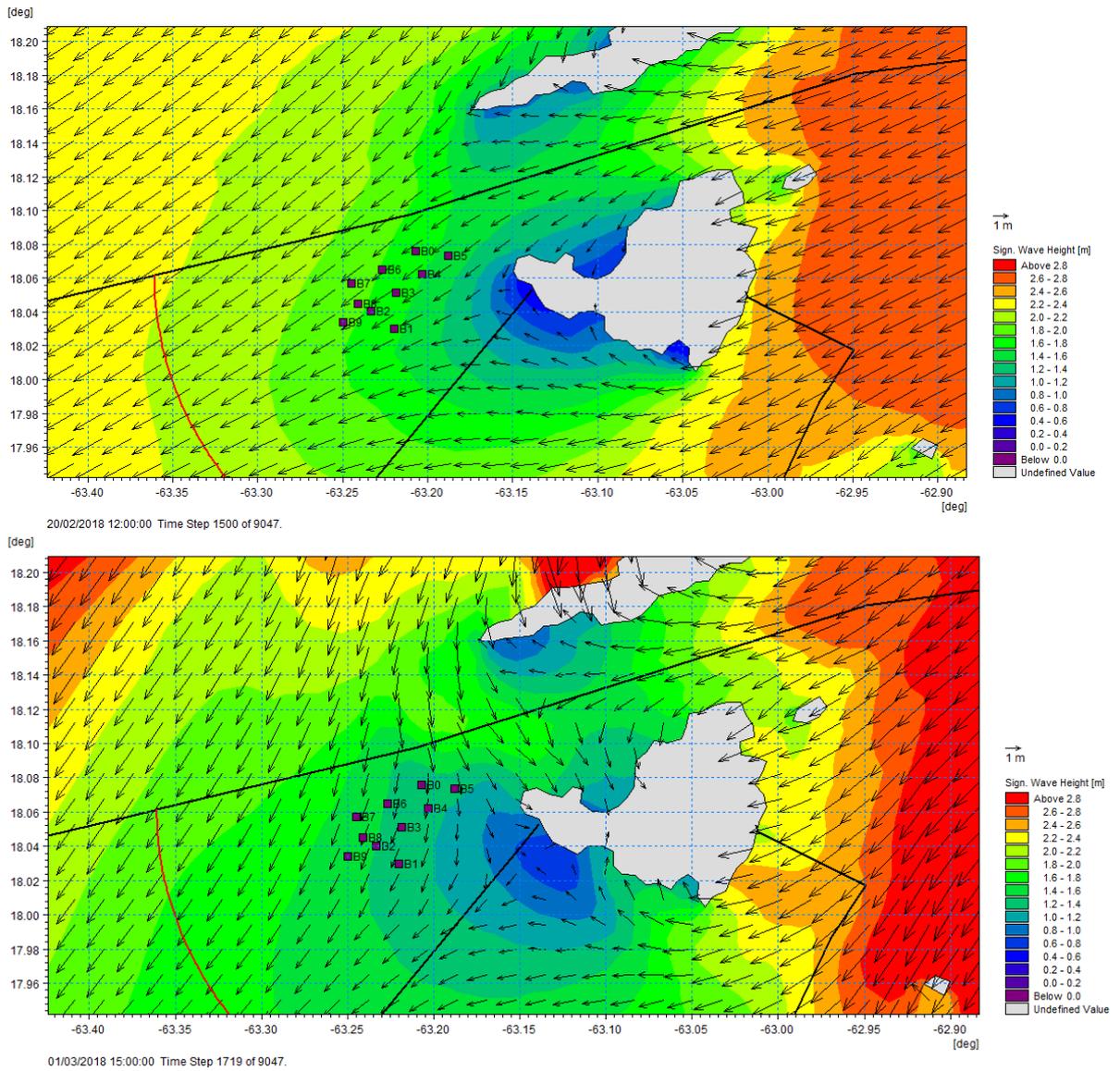


Figure 5-19 Exemple de champs de vagues du Nord-Est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla, le 20/02/2018 (en haut) et le 01/03/2018 (en bas).

5.3 Les scénarios météo-océaniques à considérer pour les simulations de panaches turbides (en Phase 2C)

En phase 2C, la simulation des panaches turbides induits par les opérations d'immersion sera réalisée en considérant 8 scénarios météo-océaniques de 15 jours.

Des analyses précédentes nous pouvons proposer que ces scénarios doivent inclure en particulier les conditions météo-océaniques suivantes :

- Condition fréquente de vents de NE (Alizés) ;
- Condition de vents d'Est-SE (et/ou de circulation générale du SE intensifiée) ;
- Condition de Northers : rotation du vent de l'Ouest au Nord, induisant une modification des circulations autour de Saint-Martin ;
- Tempête tropicale en mer des Caraïbes (exemple du 22-29 mai 2018).

Les 8 scénarios considéreront des chronologies/successions différentes avec des intensités variables du vent et des courants, de manière à représenter la climatologie des différentes saisons, en conditions normales et événementielles. Les conditions de marée seront aussi considérées dans les scénarios (cycle morte-eau/vive-eau).

De plus, un scénario de 1 à 1.5 mois sera aussi simulé pour évaluer les impacts potentiels à moyen terme des panaches turbides.

Bien que les opérations de clapage n'auront pas lieu lors d'événements tempétueux, le cas d'une tempête tropicale pourra être simulé pour évaluer l'effet de forts courants alors qu'un panache turbide est déjà présent dans la colonne d'eau du fait d'opérations de clapages ayant eu lieu précédemment. Les conditions cycloniques seront simulées en phase 5 pour l'étude de stabilité du chenal de navigation en baie de Galisbay.

6 Identification de deux sites d'immersion potentiels

Des analyses présentées précédemment, le secteur du point B6 apparaît le plus favorable pour la moindre dispersion des panaches turbides, du fait de courants sur la colonne d'eau et au fond plus faibles que dans le reste de la zone étudiée. Il est situé à 15km du port de commerce. Plus à la côte, sur des fonds inférieurs à 300m, il existe un risque de retour à la cote des panaches et plus au large, les vitesses de courants sont plus élevées.

Le secteur de B2-B8 pourrait aussi être considéré car les vitesses des courants ne sont pas beaucoup plus fortes. Il est situé un peu plus loin, à 18km du port mais a l'intérêt d'être un peu plus éloigné de la limite Nord des eaux territoriales (5 km contre 3km à B6). En revanche il est entouré de plusieurs câbles sous-marins, ce qui pourrait constituer une gêne si les masses turbides clappées se déplacent fortement au cours de leur chute.

De plus, le croisement a été fait avec le trafic maritime identifié en Phase 2B par TerraMaris sur la base des données AIS de l'année 2019. La Figure 6-2 présente la densité du trafic maritime de tous les types de navires, et la localisation des points analysés précédemment. Cette étude met en évidence une faible fréquentation sur le secteur d'immersion. Il n'apparaît donc pas de contrainte particulière pour les opérations de clapages envisagées sur les zones potentielles.

L'Etat Initial réalisé en Phase 1 a montré qu'il n'existait pas d'autres contraintes spécifiques sur le secteur d'immersion, en particulier il n'y a pas de pêche professionnelle dans ce secteur, ni de Saint-Martin, ni d'Anguilla.

Aussi, les deux sites d'immersion B6 et B2-B8 sont proposés, après prise en compte des usages (câbles, trafic maritime, pêche) identifiés en Phase 1 et 2B. Ils sont localisés sur la Figure 6-1.

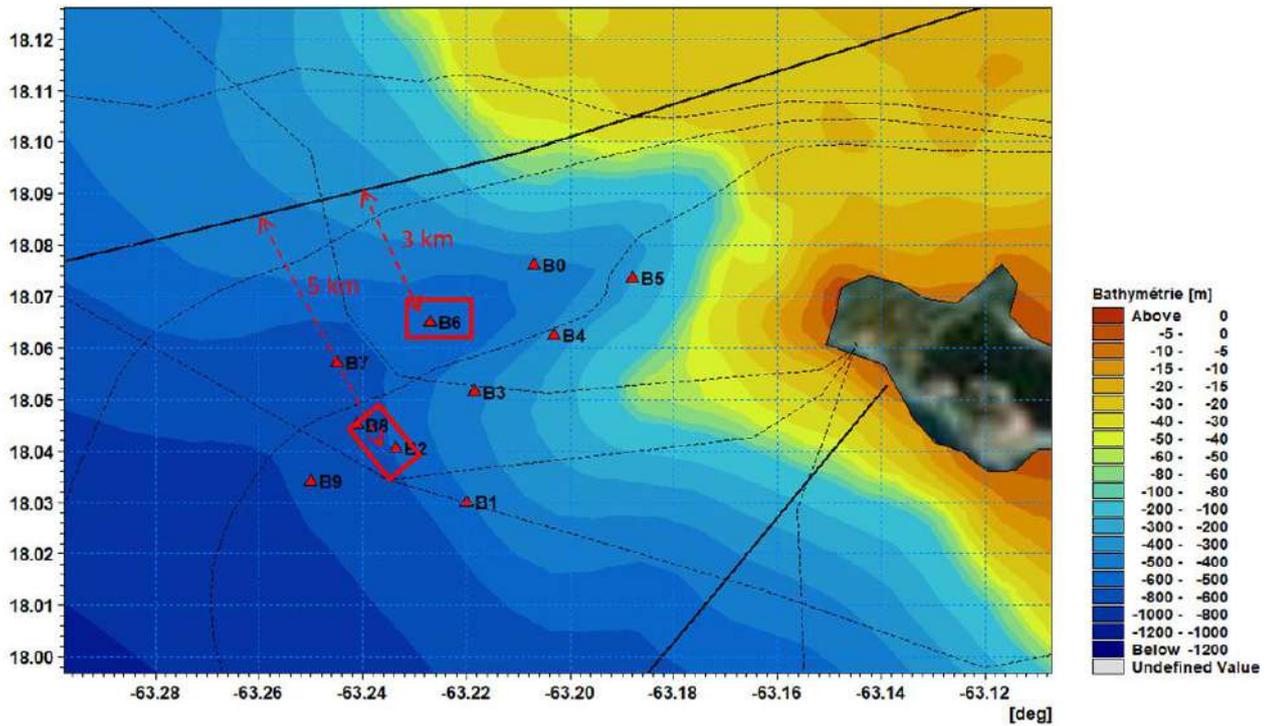


Figure 6-1 Localisation des deux sites d'immersion proposés pour les opérations de clapages : B6 et B2-B8. Les câbles sous-marins sont indiqués par les lignes en pointillé noir.

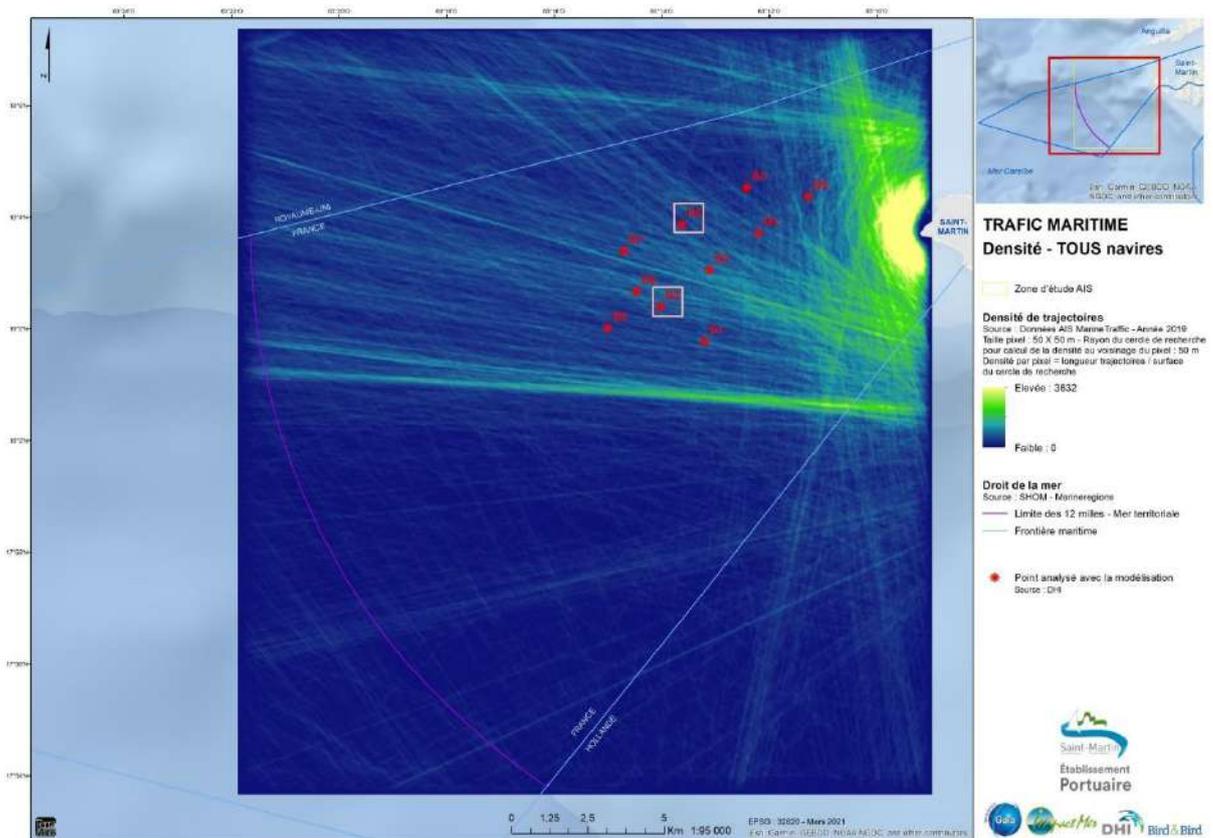


Figure 6-2 Densité du trafic maritime en 2019 (Tous navires) à l'Ouest de Saint-Martin, et localisation des deux zones potentielles d'immersion (carrés blancs).

7 Conclusion - Perspectives

Les modèles régionaux de courantologie et de vagues de Saint-Martin ont été mis en place avec la suite logicielle MIKEbyDHI©.

Pour simuler la dynamique complexe des circulations autour de Saint-Martin, le modèle hydrodynamique MIKE 3D a été configuré de façon réaliste pour prendre en compte les effets météorologiques (vent, température de l'air, précipitations, etc.), la marée (théorique) et les circulations générales issues du modèle global HYCOM GOF3.1 1/12°. Les années 2011 à 2020 ont été simulées. Les résultats ont permis de caractériser la dynamique autour de Saint-Martin, au large mais aussi dans le canal d'Anguilla.

La propagation des vagues autour de Saint-Martin a été simulée de 2010 à 2020 avec le modèle MIKE 21 SW, forcé par le modèle global GWM de DHI. Les houles proviennent essentiellement du Nord-Est alors que la mer de vent vient du secteur Est. La réfraction autour d'Anguilla et Saint-Martin induit des conditions d'Est assez peu énergétiques à Galisbay alors que les houles du Nord induisent des niveaux d'agitation élevés dans le canal d'Anguilla et jusqu'à la baie. Dans la configuration actuelle, le modèle ne peut reproduire précisément les événements cycloniques du fait d'une résolution spatiale trop basse des champs de vent et de pression atmosphérique. Des simulations spécifiques sont envisagées en Phase 5 pour prendre en compte ces conditions extrêmes dans l'étude de stabilité du chenal de navigation.

Le modèle régional de courantologie, avec des mailles de 400-500m entre Saint-Martin et Anguilla, a montré sa capacité à reproduire la courantologie aux abords de Galisbay, avec une bonne variabilité spatiale et temporelle liée aux processus de la marée, à la circulation générale, aux effets du vent et sa variabilité saisonnière. Un modèle de plus haute résolution sera cependant construit en Phase 5 pour simuler finement la dispersion des panaches turbides lors des dragages dans la baie de Galisbay.

L'analyse des résultats sur la zone d'immersion pressentie et aux alentours a permis de caractériser les masses d'eau influençant la dynamique dans ce secteur et d'étudier leur variabilité afin d'identifier des secteurs où la dispersion serait a priori minimale. Le secteur autour du point B6 apparaît ainsi le plus favorable pour limiter la dispersion des panaches turbides, que ce soit sur la colonne d'eau ou au fond. Plus à la côte, sur des fonds inférieurs à 300m, il existe un risque de retour à la côte des panaches et plus au large, les vitesses de courants sont plus élevées. Le secteur entre B2 et B8 pourrait aussi donner des résultats satisfaisants. Ce secteur est situé un peu plus loin du port (18km contre 15km pour B6), mais est aussi un peu plus éloigné de la limite nord des eaux territoriales (5km contre 3km pour B6). En revanche, il est entouré de câbles sous-marins. Ces deux sites potentiels d'immersion sont donc proposés à ce stade de l'étude.

Les modélisations de panaches turbides permettront d'alimenter l'analyse multicritères qui permettra de statuer sur le choix optimal de la zone d'immersion. Elles prendront en compte le comportement de la masse turbide dans la colonne d'eau en fonction de la composition des matériaux immergés. Ces modélisations permettront notamment d'évaluer si la majorité des sédiments clapés atteint rapidement le fond, si une partie est piégée à la thermocline, si les fines sont libérées au cours de leur chute, ou encore si les matériaux atteignent une profondeur d'équilibre et se dispersent plutôt dans la colonne d'eau.

Les scénarios météo-océaniques simulés seront représentatifs de la climatologie locale, telle que présentée dans ce rapport. Ils seront définis en début de Phase 2C, pour être validés par le MO au préalable des simulations de panaches turbides.



ANNEXES



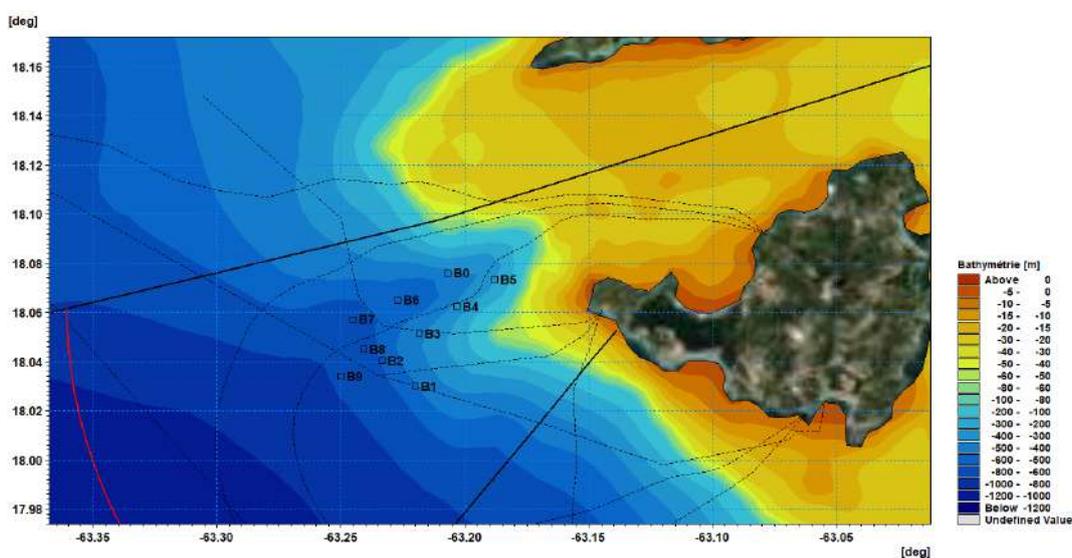
ANNEXE A – Roses des courants au large, dans les zones potentielles d’immersion

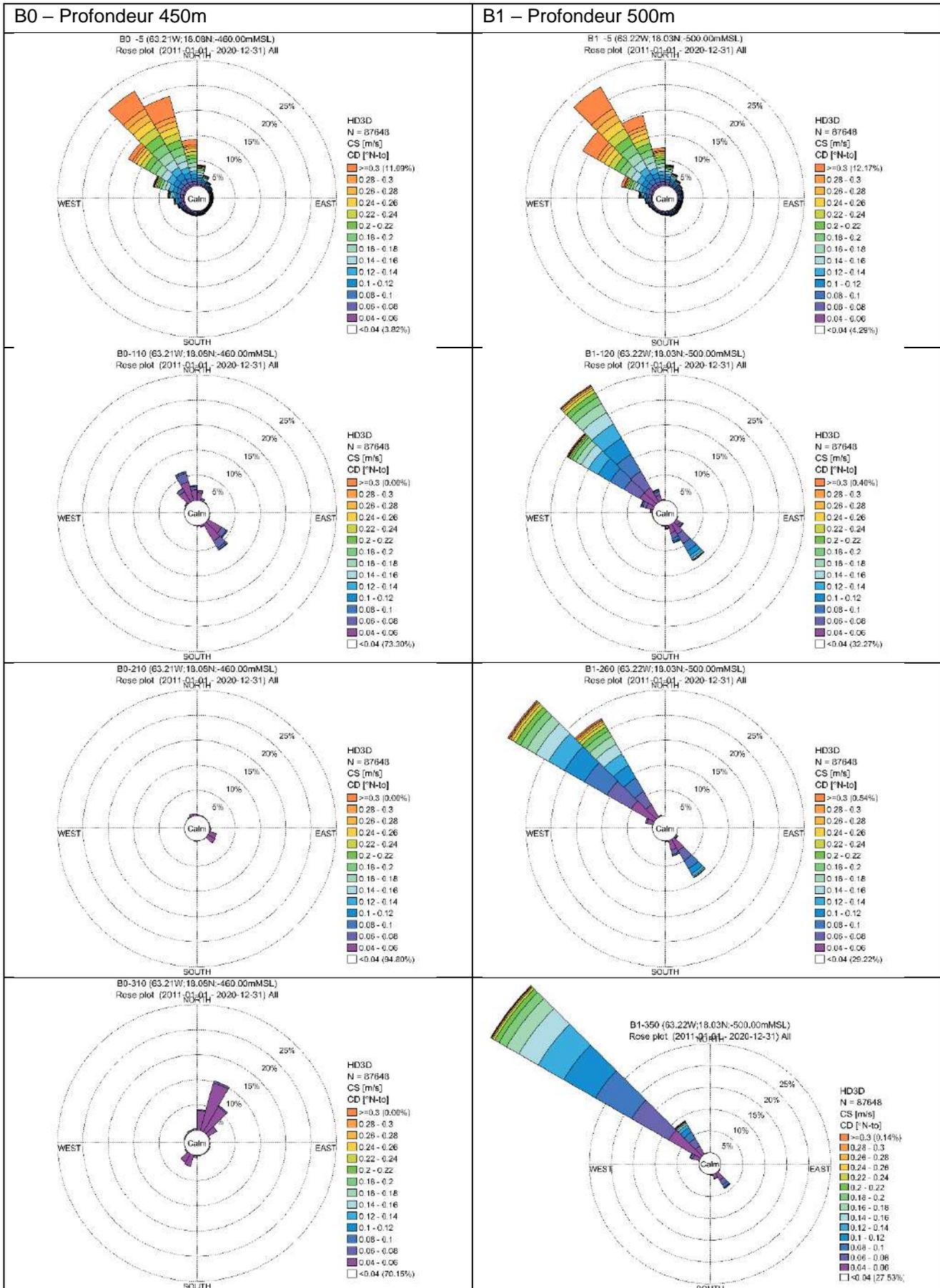


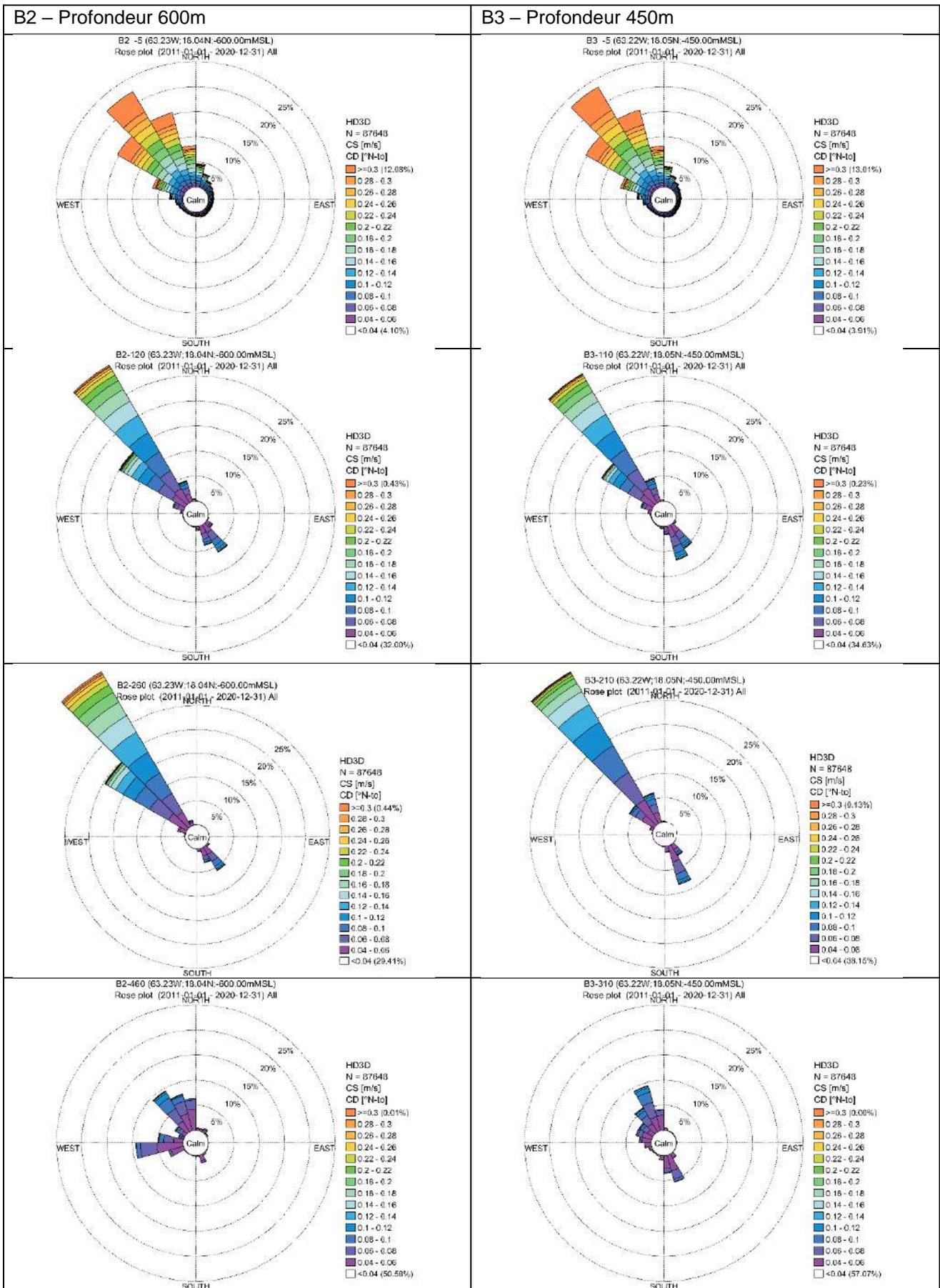
A Annexe A - Roses des courants au large, dans les zones potentielles d'immersion

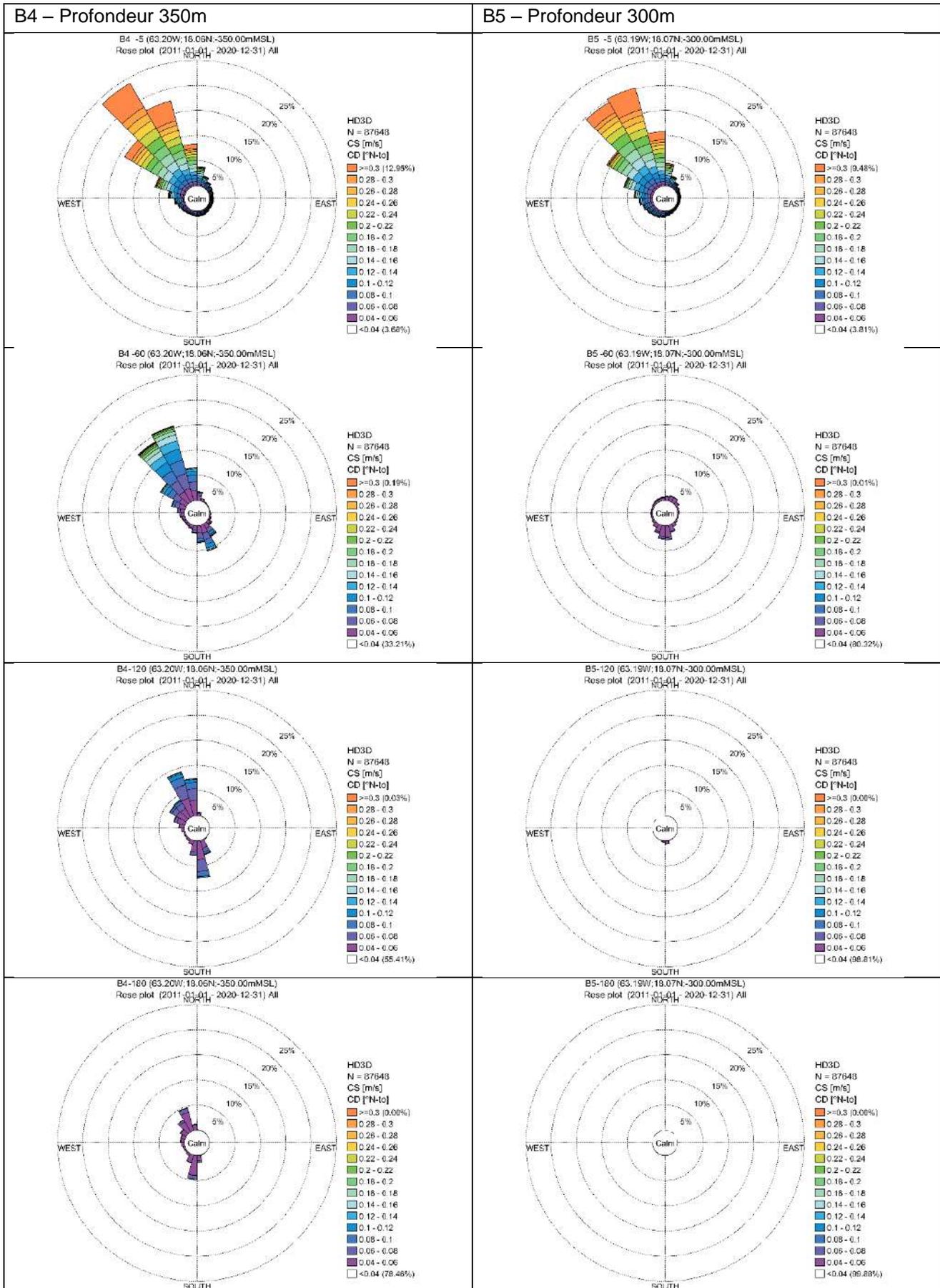
Les roses de courant 2011-2020 ont été extraites aux points B0 à B9 à plusieurs immersions : en subsurface (-5m), sous la thermocline (-120m), au niveau de l'écoulement de de l'Eau Centrale de l'Atlantique Tropical (-260m) et en profondeur à environ 100-150m du fond. Ces immersions ont été ajustées en chaque point selon la hauteur d'eau totale, en particulier pour les points B4 et B5 moins profonds. Elles sont indiquées dans le titre au-dessus de chaque rose.

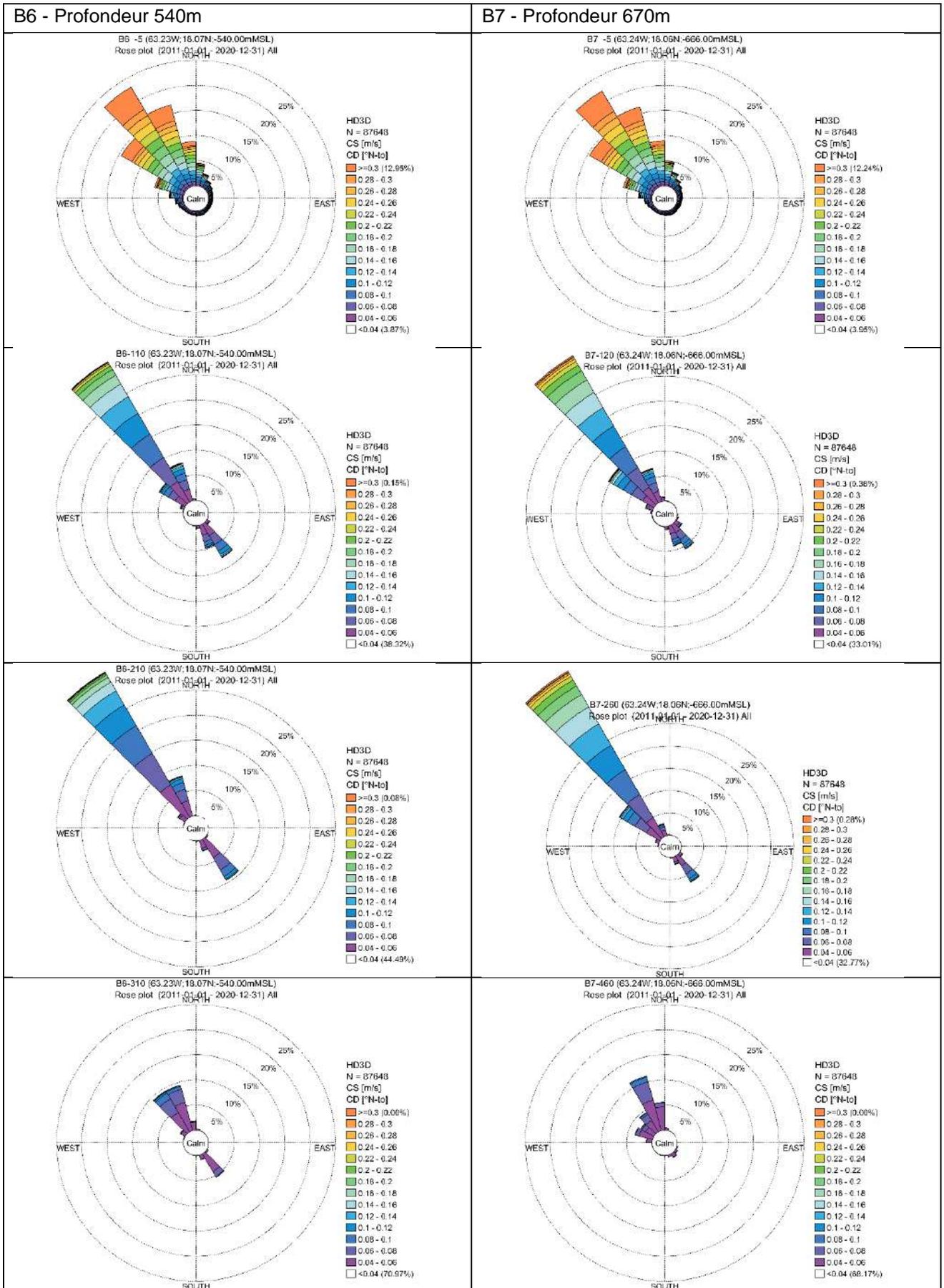
En général les courants proches du fond sont très faibles, excepté au point B5 où il semble apparaitre un courant de fond le long de la pente. Ces roses sont présentées dans le dernier tableau.

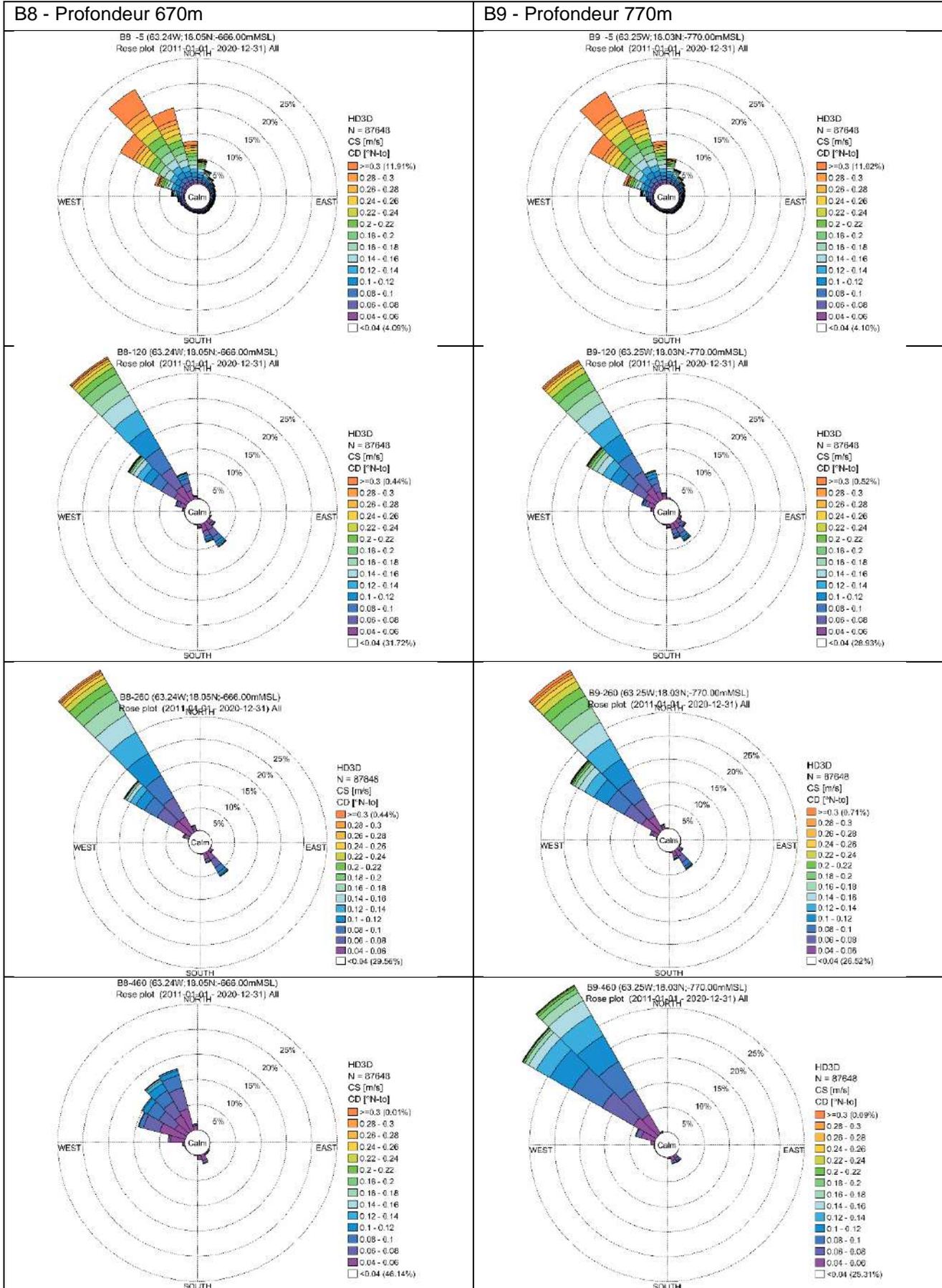




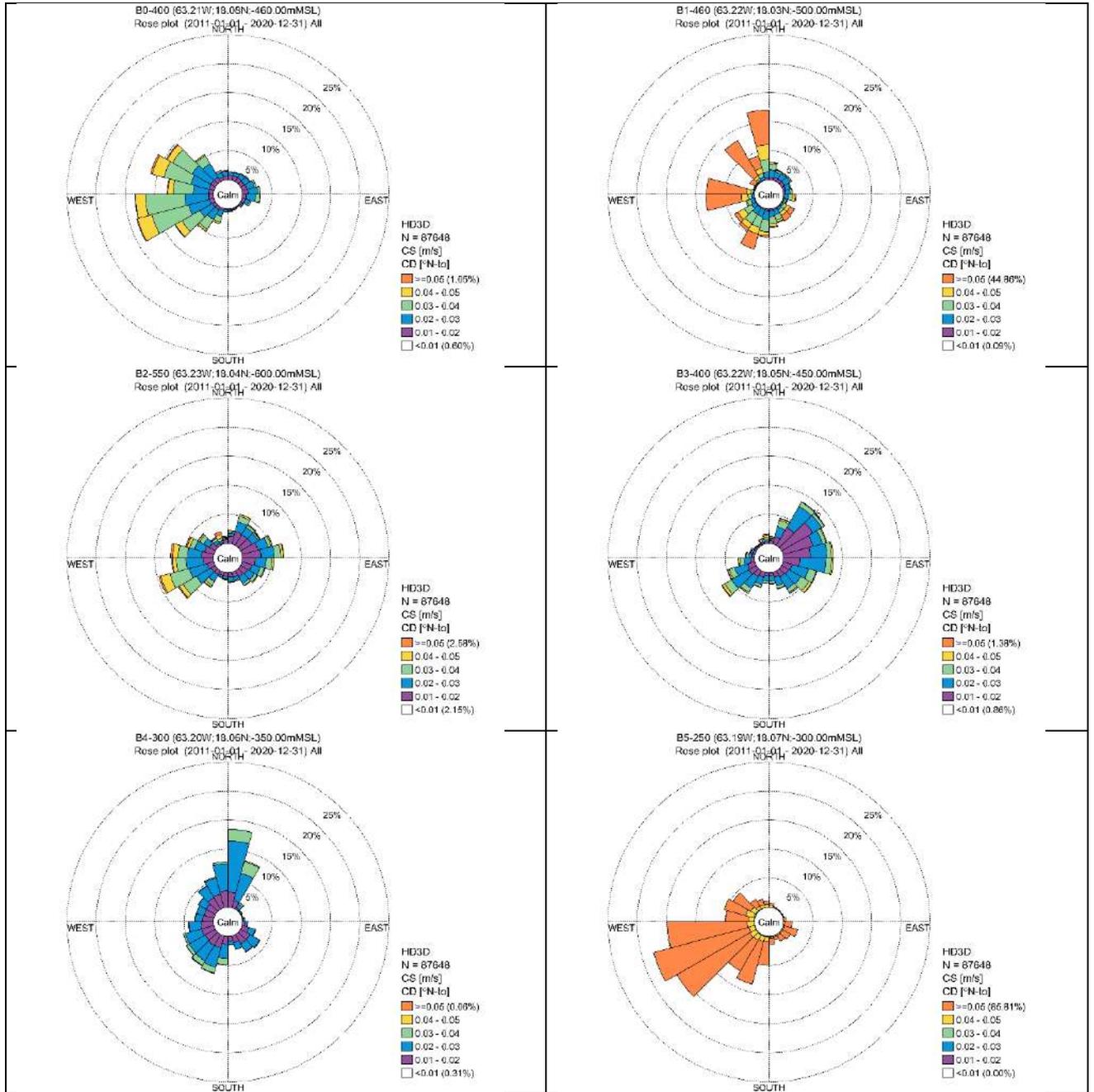




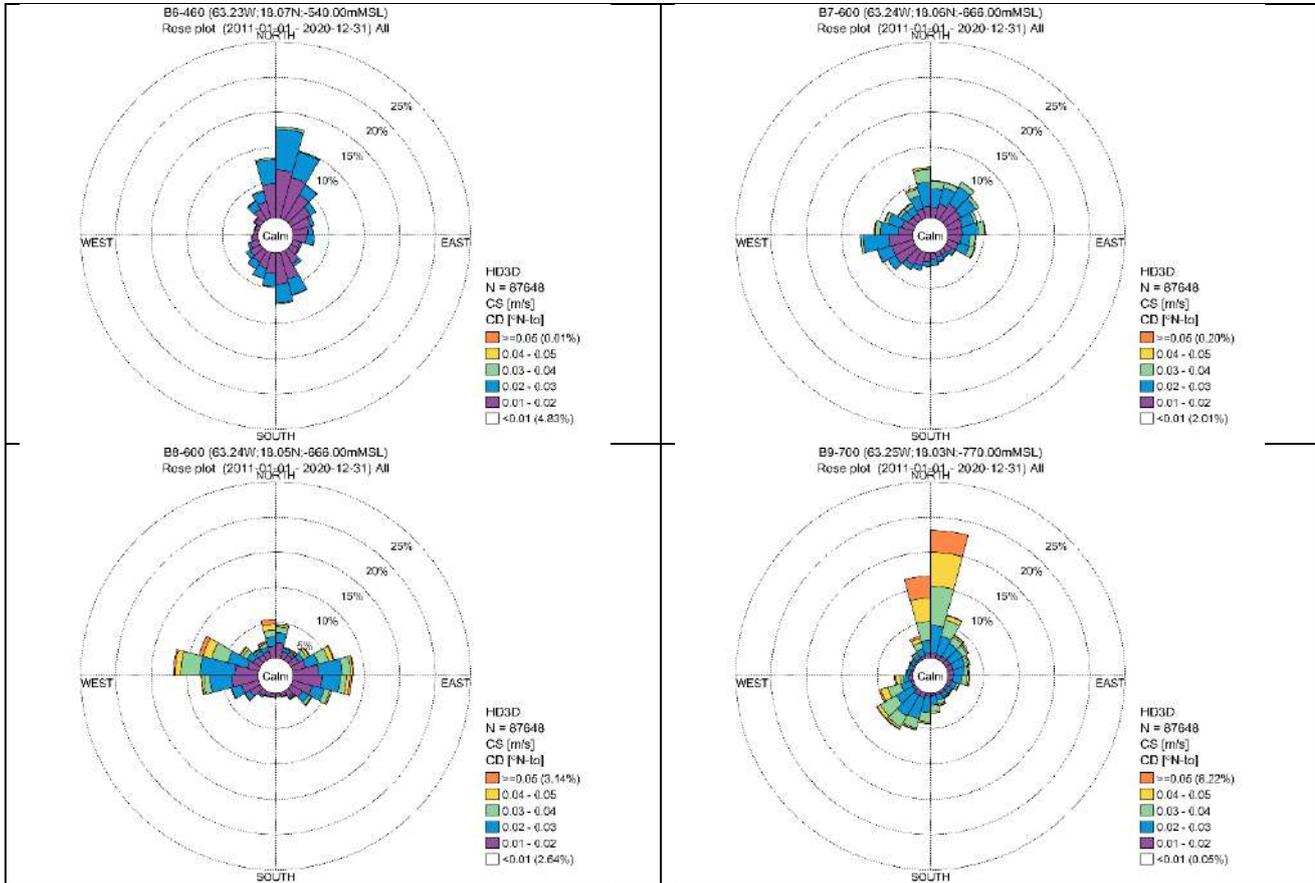




Roses des courants au fond aux points B0 à B5



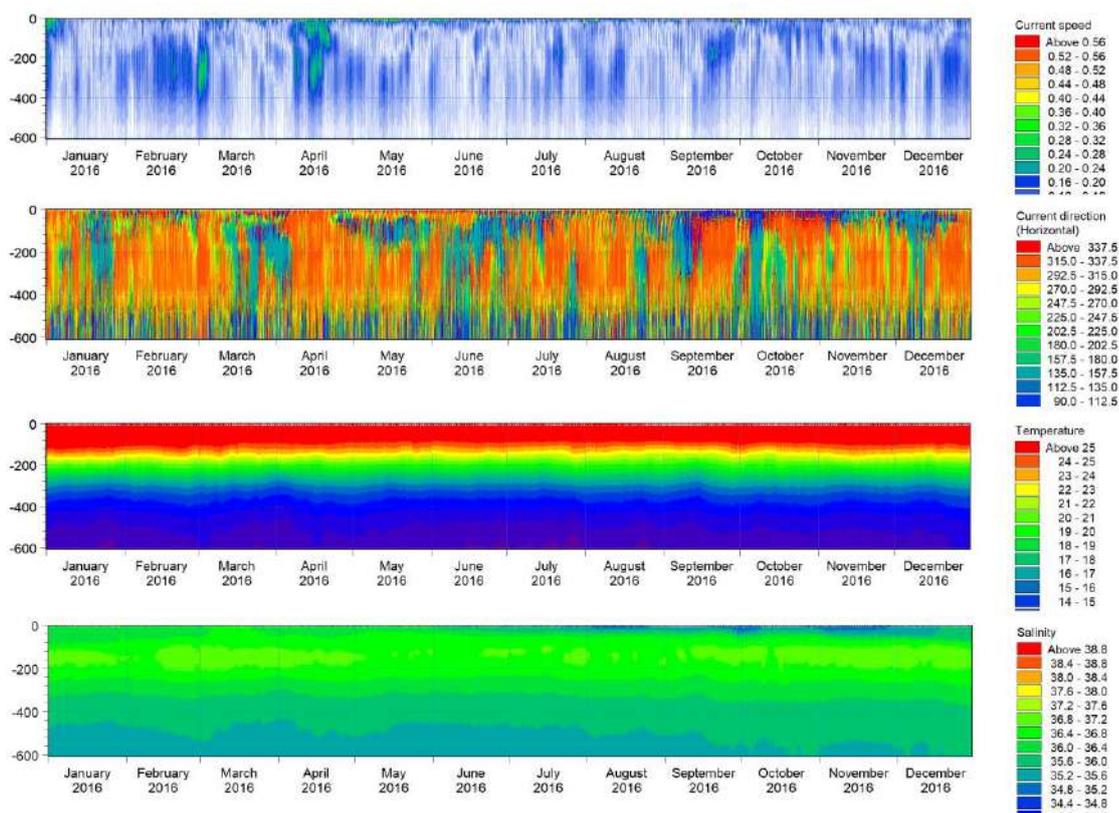
Roses des courants au fond aux points B6 à B9

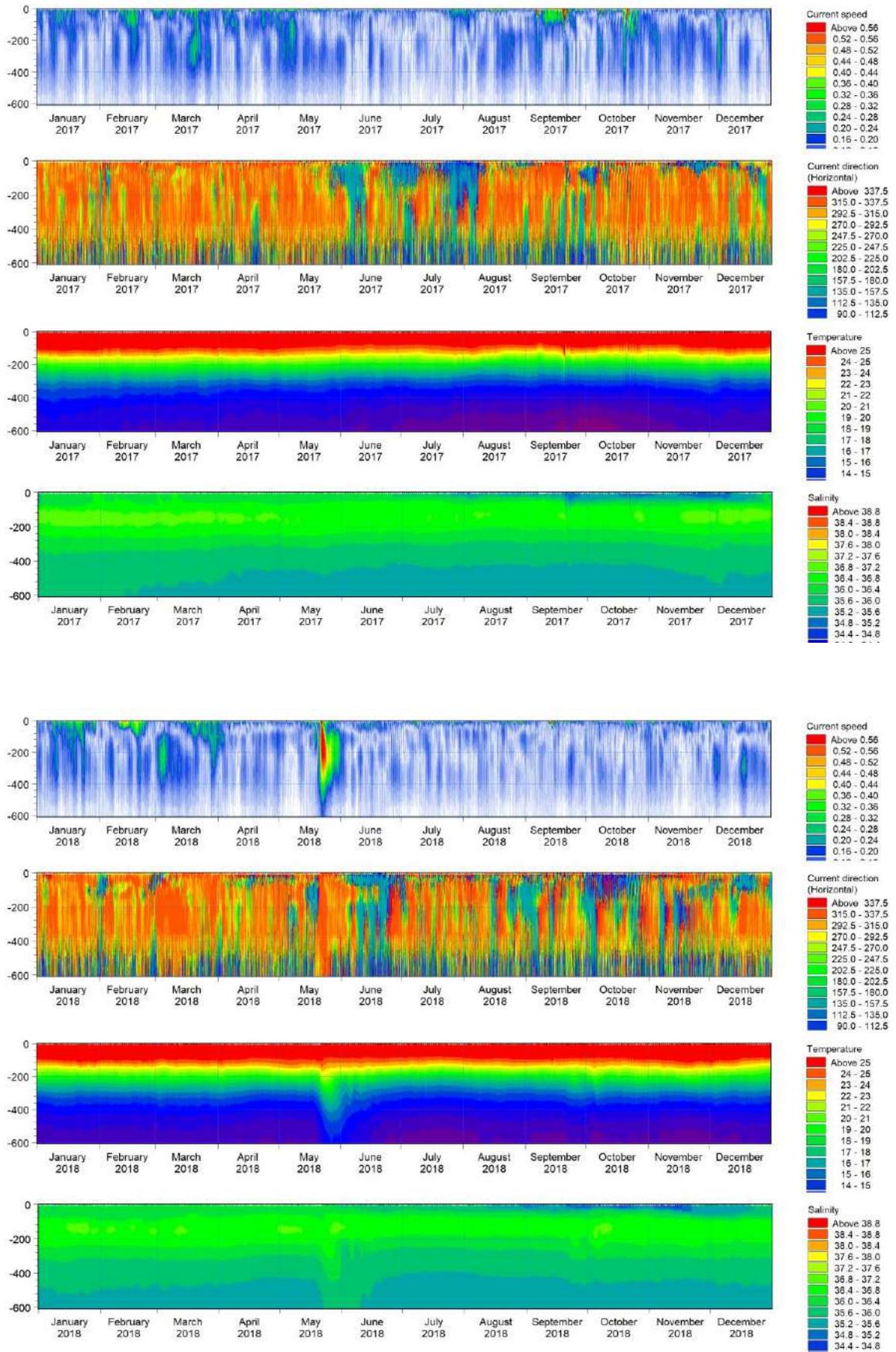


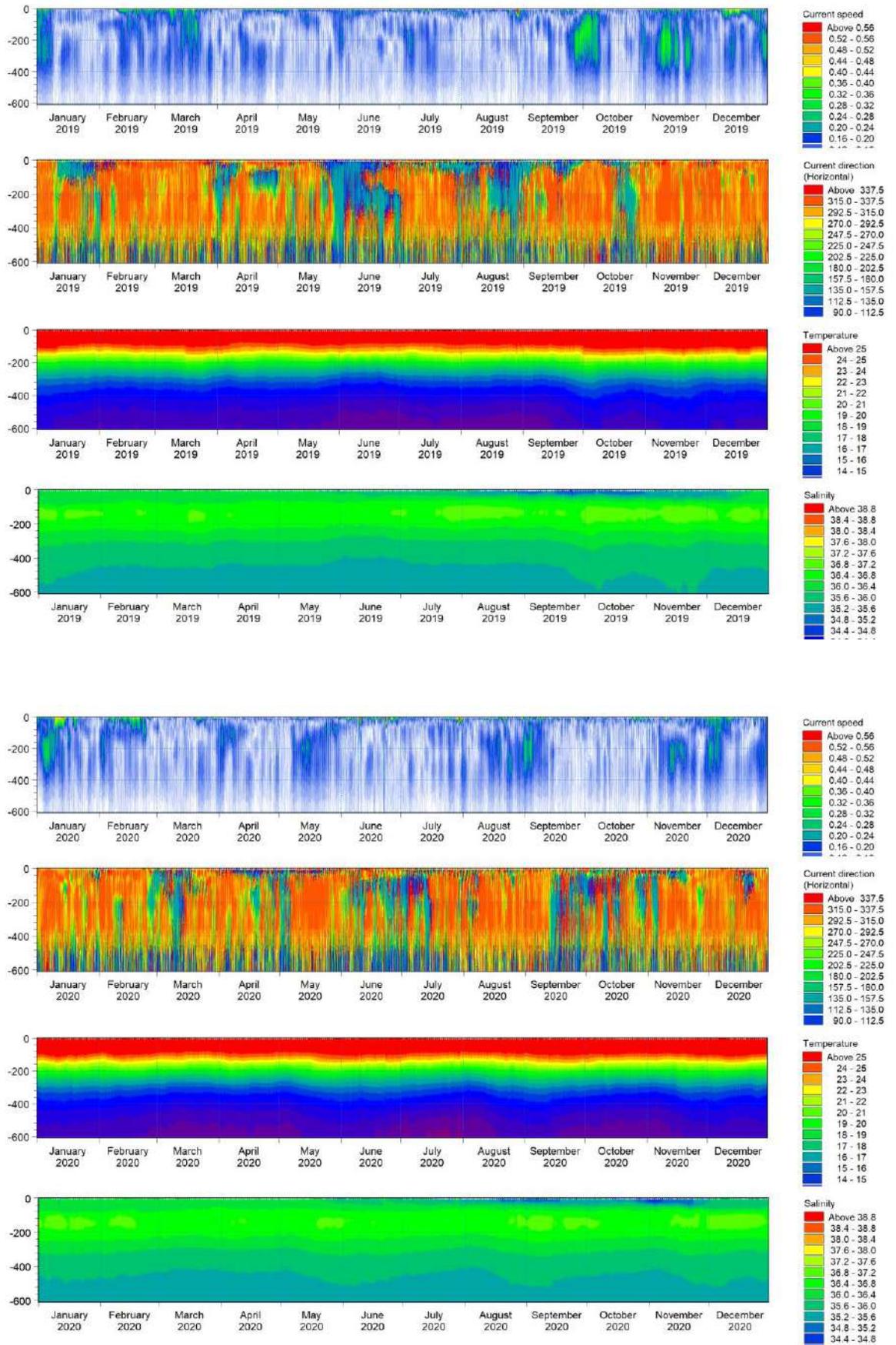
ANNEXE B – Evolution des profils verticaux à B2 de 2016 à 2020



B Annexe B – Evolution des profils verticaux de courants à B2 de 2016 à 2020









FIN DU DOCUMENT