

Rapports de modélisation hydrodynamique

Marine Atlantique S.C.C

Projet d'amélioration de la navigation dans le port de Port aux Basques Étude d'ingénierie côtière Port aux Basques, T.-N.-L.



	Rapport final	L. Campbell	19 février 2021	V. Leys E. Gomes
	Ébauche de rapport	L. Campbell	4 novembre 2020	V. Leys E. Gomes
Numéro ou révision		Examiné par :	Date	Publié par :
 Le présent document a été préparé à l'intention de la partie mentionnée ici. Le contenu et les informations figurant dans le présent document reflètent l'opinion et le meilleur jugement de CBCL Limited, fondés sur les informations disponibles au moment de sa préparation. Toute utilisation du présent document ou tout recours à son contenu par des tiers relève de la responsabilité de ces derniers. CBCL Limited décline toute responsabilité pour tout préjudice subi du fait de l'utilisation de ce document par des tiers.				



19 février 2021

M. Steve Giorno
Responsable du programme des opérations
Marine Atlantique S.C.C.
65 Memorial Drive
Sydney, N.-É. B2A 0B9

Monsieur,

Objet : Étude d'ingénierie côtière visant à améliorer la navigation dans le port de Port aux Basques, Terre-Neuve-et-Labrador

Le présent rapport expose les résultats finaux de l'étude d'ingénierie côtière menée par CBCL en vue d'améliorer la navigation dans le port de Port aux Basques. Nous attendons vos commentaires avec impatience.

Cordialement,

CBCL Limited

Préparé par :
Vincent Leys, M. Sc., ing., PMP
Ingénieur principale des travaux maritimes
Courriel : vincentl@cbcl.ca

Examiné par :
Lorna Campbell, ing.
Ingénieure civile principale, cheffe de projet
lornac@cbcl.ca

Numéro de projet : 202479.04

Le présent document a été préparé à l'intention de la partie mentionnée ici. Le contenu et les informations figurant dans le présent document reflètent l'opinion et le meilleur jugement de CBCL Limited, fondés sur les informations disponibles au moment de sa préparation. Toute utilisation du présent document ou tout recours à son contenu par des tiers relève de la responsabilité de ces derniers. CBCL Limited décline toute responsabilité pour tout préjudice subi du fait de l'utilisation de ce document par des tiers.

Table des matières

Chapter 1	Introduction.....	1
1.1	Contexte	1
1.2	Objectifs.....	1
Chapter 2	Surveillance des processus côtiers.....	3
2.1	Observations des vagues et des courants dans le port	3
2.2	Observations du vent	11
2.2.1	Sources de données.....	11
2.2.2	Épisodes de houle.....	11
2.2.3	Incidence du vent sur l’exploitation des traversiers.....	11
2.3	Tendances du vent à long terme.....	14
2.3.1	Tendances historiques.....	14
2.3.2	Perspectives en matière de changement climatique	14
2.4	Niveaux d’eau.....	19
2.4.1	Marées et ondes de tempête.....	19
2.4.2	Seiche.....	19
2.5	Courants dus à la seiche	20
2.6	Synthèse des observations	21
Chapter 3	Modélisation de l’état actuel.....	23
3.1	Méthodologie.....	23
3.2	Modèle hydrodynamique	25
3.2.1	Conditions aux limites du niveau d’eau.....	25
3.2.2	Résultats du modèle étalonné	25
3.3	Modèles de vagues.....	28
3.3.1	Modèle spectral des vagues régional	28
3.3.2	Modèle de vagues du port à phase résolue.....	30
Chapter 4	Modélisation des conditions futures	32
4.1	Configuration future.....	32
4.2	Courants dus aux tempêtes	32

4.3	Conditions de houle.....	34
4.3.1	Houle du sud-est	34
4.3.2	Vagues dues au vent provenant du nord-est.....	37
4.4	Risque de déplacement des sédiments du lit	39
Chapter 5	Concept pour la réfection de brise-lames	42
5.1	Contexte	42
5.2	Option de concept de réfection du brise-lames de l'île Pikes	42
Chapter 6	Résumé et conclusions.....	45
Chapter 7	Références	47

Annexes

A	Vent de terre et climat des vagues
B	Courbes d'étalonnage du modèle spectral des vagues régional

1.1 Contexte

Marine Atlantique S.C.C. (MAI) propose de mener à bien un projet d'amélioration de la navigation dans le port de Port aux Basques (PAB), à Terre-Neuve-et-Labrador (le « projet »). Ce projet a pour objectif d'améliorer les conditions de navigation de la flotte de MAI grâce au réaménagement de la voie d'accès existante, afin d'éliminer une zone étroite et peu profonde au niveau de Baldwin's Rock, et à la suppression totale de l'île Vardy, afin de créer un bassin d'évitage dans le port intérieur. Les travaux de construction consistent principalement à effectuer des opérations de forage, de dynamitage, puis de dragage (excavation) et de mise en place de roches inertes de manière à optimiser la valorisation.

Dans le cadre du processus d'évaluation du projet, une étude d'ingénierie côtière a été réalisée afin de mieux comprendre l'environnement côtier actuel et les changements qui pourraient en découler si le projet venait à être mis en œuvre. Le présent rapport expose les conclusions de l'étude, qui incluent les résultats des séances de consultation des parties prenantes organisées avec les capitaines de MAI en juin et juillet 2020. En tant qu'acteurs clés, les capitaines de MAI ont été invités à donner leur avis afin de nous aider à évaluer les implications des changements effectués dans le port à la suite du projet et de confirmer notre compréhension des conditions environnementales locales et des contraintes opérationnelles.

1.2 Objectifs

La présente étude d'ingénierie côtière répond aux objectifs suivants :

- Recueillir des données océanographiques de référence en cas de tempête.
- Calibrer les modèles hydrodynamiques et de vagues en fonction des conditions existantes.
- Évaluer les modifications du modèle hydrodynamique et du régime des vagues du port résultant du projet proposé.
- Évaluer des solutions d'ingénierie côtière permettant une utilisation judicieuse des matériaux de dragage, ainsi que l'atténuation des répercussions négatives potentielles du projet sur l'action des vagues dans le port.



Figure 1.1 : Départ d'un traversier passant devant le brise-lames de l'île Pikes, vue vers le sud.
https://www.youtube.com/watch?v=4c4VHkH8_Y4&feature=youtu.be

2.1 Observations des vagues et des courants dans le port

Le 9 décembre 2019, le personnel de CBCL a installé une série d'équipements de surveillance dans le port de Port aux Basques, notamment :

- Un (1) profileur acoustique de vitesse à effet Doppler (ADCP) Teledyne Sentinel destiné à la collecte de profils directionnels des vagues et des courants.
- Quatre (4) manomètres RBR destinés à la collecte de paramètres non directionnels des vagues.

Les instruments ont été installés aux emplacements indiqués dans la Figure 2.1. Tous les instruments ont été installés à l'aide de systèmes d'ancrage au fond, avec un châssis en acier pour l'ADCP (Figure 2.2) et des blocs de béton pour les jauges RBR (Figure 2.3). Tous les instruments ont été récupérés le 23 janvier 2020, après 45 jours de collecte de données au total. Une fois les instruments récupérés, les données ont été téléchargées puis traitées en vue de la présentation des résultats.

L'ADCP a été déployé à une profondeur de 10,5 m derrière le brise-lames, à l'intérieur du port. Ce lieu a été choisi principalement pour les raisons suivantes :

- Emplacement situé en dehors du chenal de navigation.
- Observation des courants autour de l'île Vardy – Compte tenu de l'objectif de la présente étude, le fait de placer l'ADCP derrière le brise-lames permettrait d'obtenir des observations des courants à l'intérieur du port, ce qui améliorerait les résultats de l'étalonnage du modèle dans cette zone. Les conditions météorologiques extérieures nécessaires à la modélisation peuvent être obtenues à partir de sources externes, notamment des modèles et des observations.

L'ADCP a été configuré pour collecter des ensembles de données aux intervalles suivants :

- Données sur les vagues toutes les 30 minutes.
- Mise à jour des profils de courants toutes les 15 minutes.

Le post-traitement des données sur les vagues était effectué à un intervalle moyen de 5 minutes. Les paramètres mesurés pour les vagues sont présentés dans la Figure 2.4, notamment la hauteur significative des vagues (H_s), la période de pic des vagues (T_p) et la direction moyenne des vagues.

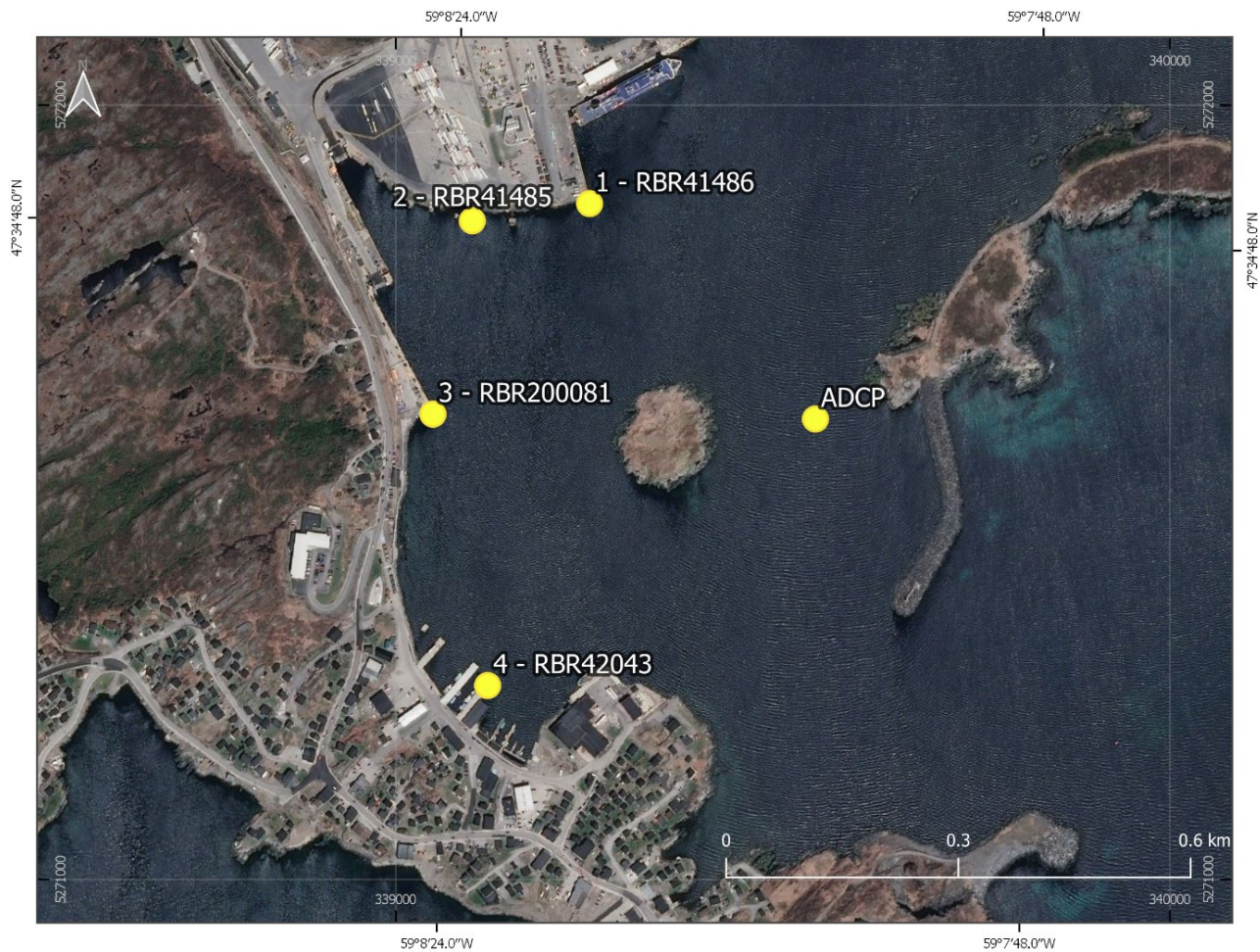


Figure 2.1 : Emplacements des instruments déployés dans le port de Port aux Basques.



Figure 2.2 : Système pour le déploiement de l'ADCP.



Figure 2.3 : Système pour la fixation du manomètre RBR.

Tableau 2.1 : Emplacements des instruments

	Instrument	Abscisse UTM21	Ordonnée UTM21	Profondeur approx.
1	WG RBR 41486	339542	5271595	6 m ZC
2	WG RBR 41485	339250	5271873	7 m ZC
3	WG RBR 200081	339099	5271851	6,5 m ZC
4	WG RBR 42043	339048	5271601	6 m ZC
5	ADCP	339118	5271250	7,3 m ZC

Les ensembles de données actuels ont été recueillis toutes les 15 minutes, avec une résolution de 0,3 m jusqu'à la surface de l'eau. Les séries chronologiques actuelles concernant la vitesse et la direction du courant pour la période de déploiement sont présentées dans la Figure 2.5. Les vitesses du courant enregistrées par l'ADCP en dessous du premier mètre de la surface de l'eau sont restées relativement faibles tout au long de la période d'observation, avec un pic lors d'un épisode de houle le 17 décembre. L'ADCP a enregistré plusieurs épisodes au cours desquels les courants de surface ont atteint au moins 0,5 m/s.

Afin d'évaluer l'ampleur de l'influence des marées sur les vitesses et les directions des courants mesurés, des nuages de points ont été établis pour différentes profondeurs dans la colonne d'eau. Les points représentent les composantes directionnelles (direction vers laquelle se déplace le courant) des mesures de courant sur un diagramme de dispersion polaire. Sur ces graphiques, plus les points de données sont répartis de manière homogène, plus l'influence des marées est marquée dans le signal. En revanche, des points de données plus dispersés indiquent une influence plus importante du vent et des vagues sur les courants près de la surface. Les diagrammes de dispersion polaires présentés dans la

Figure 2.6 montrent que les courants dans la partie inférieure de la colonne d'eau sont largement dominés par le forçage des marées. Les courants proches de la surface présentent une plus grande variabilité en raison de l'influence des vents et des vagues.

Les quatre manomètres RBR ont été installés au large de différents quais et ducs-d'Albe d'amarrage du port. Les capteurs ont tous été déployés à des profondeurs comprises entre 7,5 et 8,5 m et configurés pour enregistrer des séries de données toutes les 20 minutes. La Figure 2.7 présente les séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés par chaque enregistreur de vagues pendant toute la durée du déploiement.

Déploiement de l'ADCP : PortAuxBasque
47.5779N -59.1337W

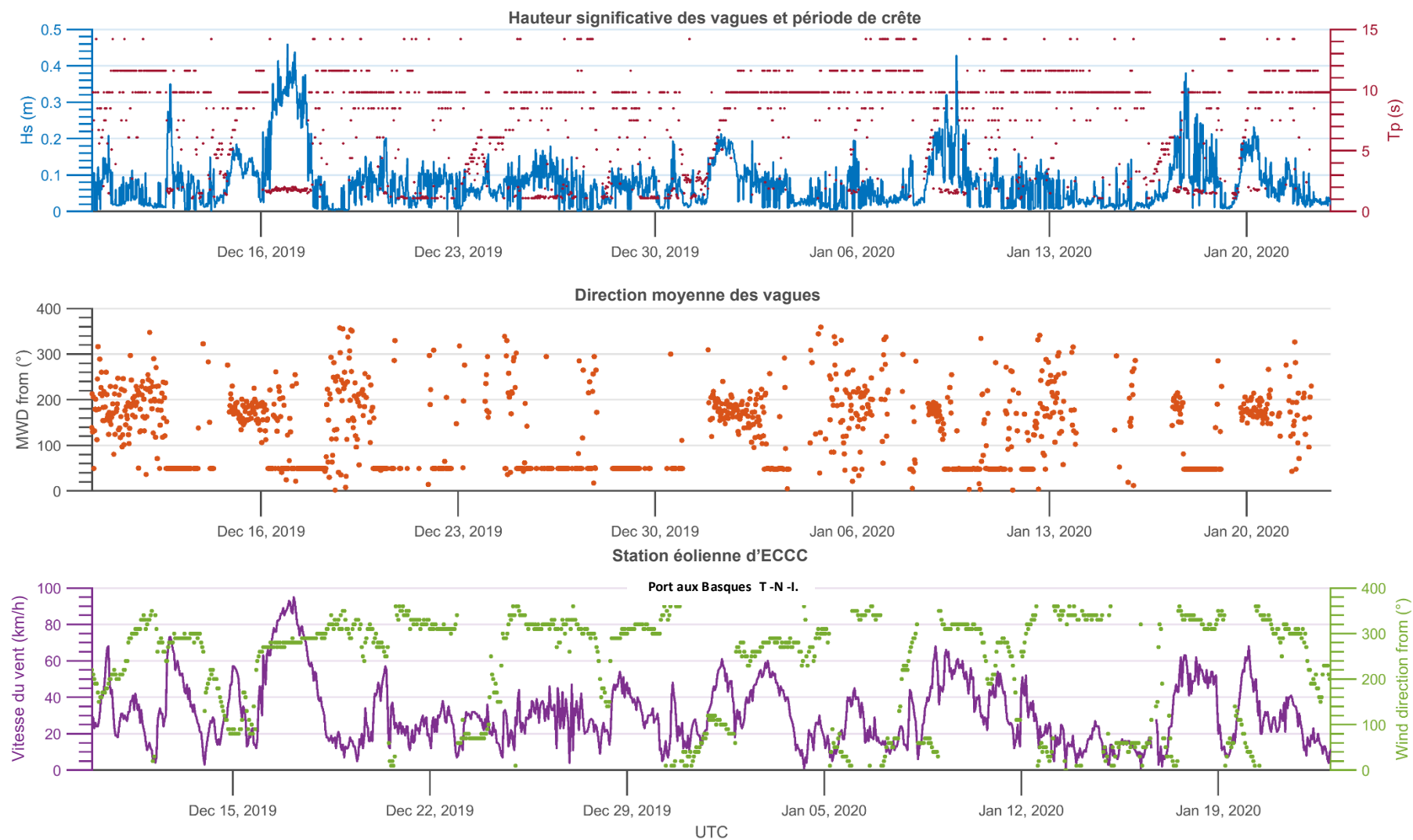


Figure 2.4 : Courants mesurés, hauteurs de vagues à l'ADCP et vents provenant de la station météorologique d'ECCC.

Déploiement de l'ADCP : PortAuxBasque
47.5779N 59.1337W

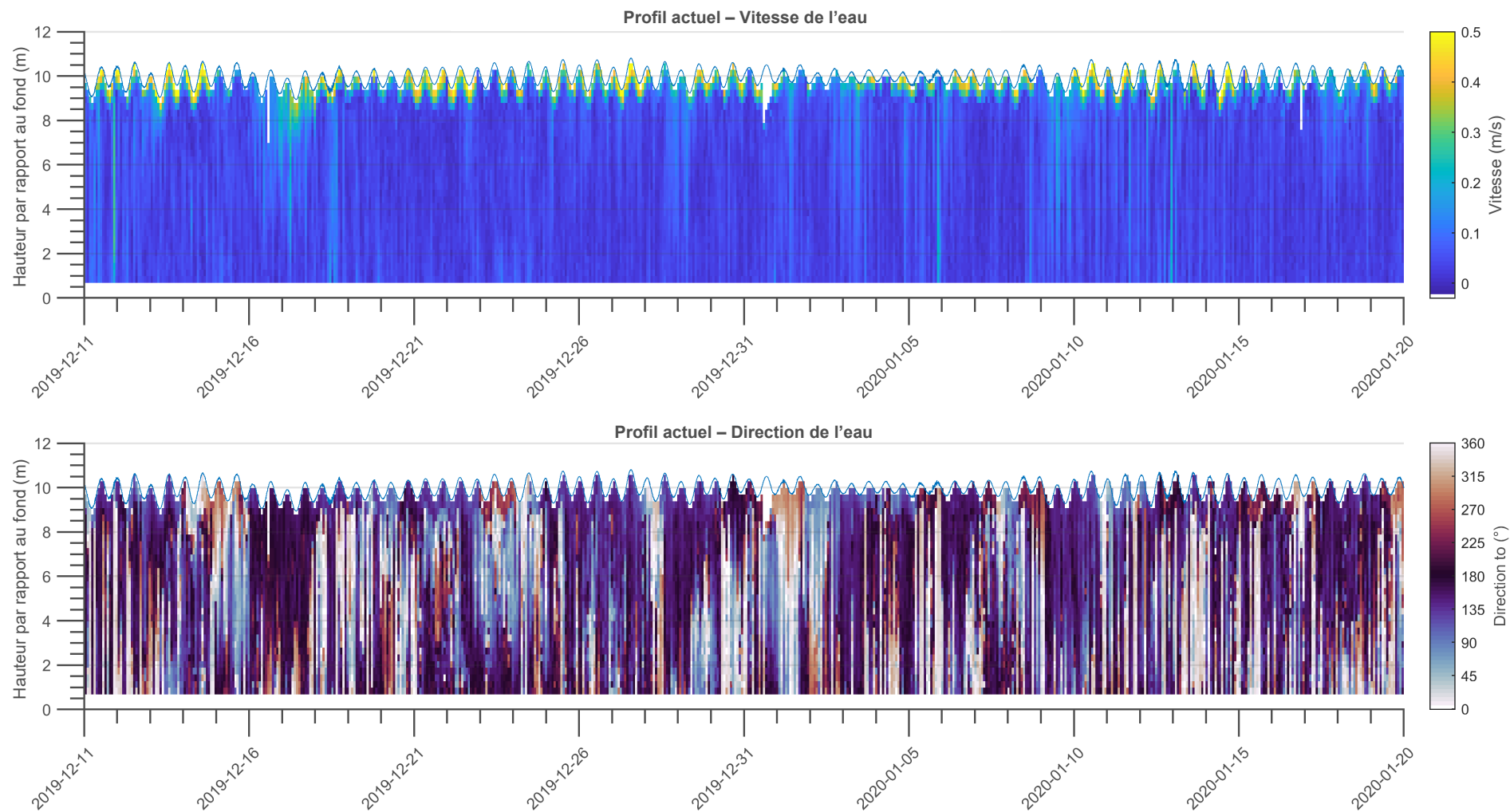


Figure 2.5 : Séries chronologiques du profil de courant : a) vitesse du courant et b) direction du courant (vers).

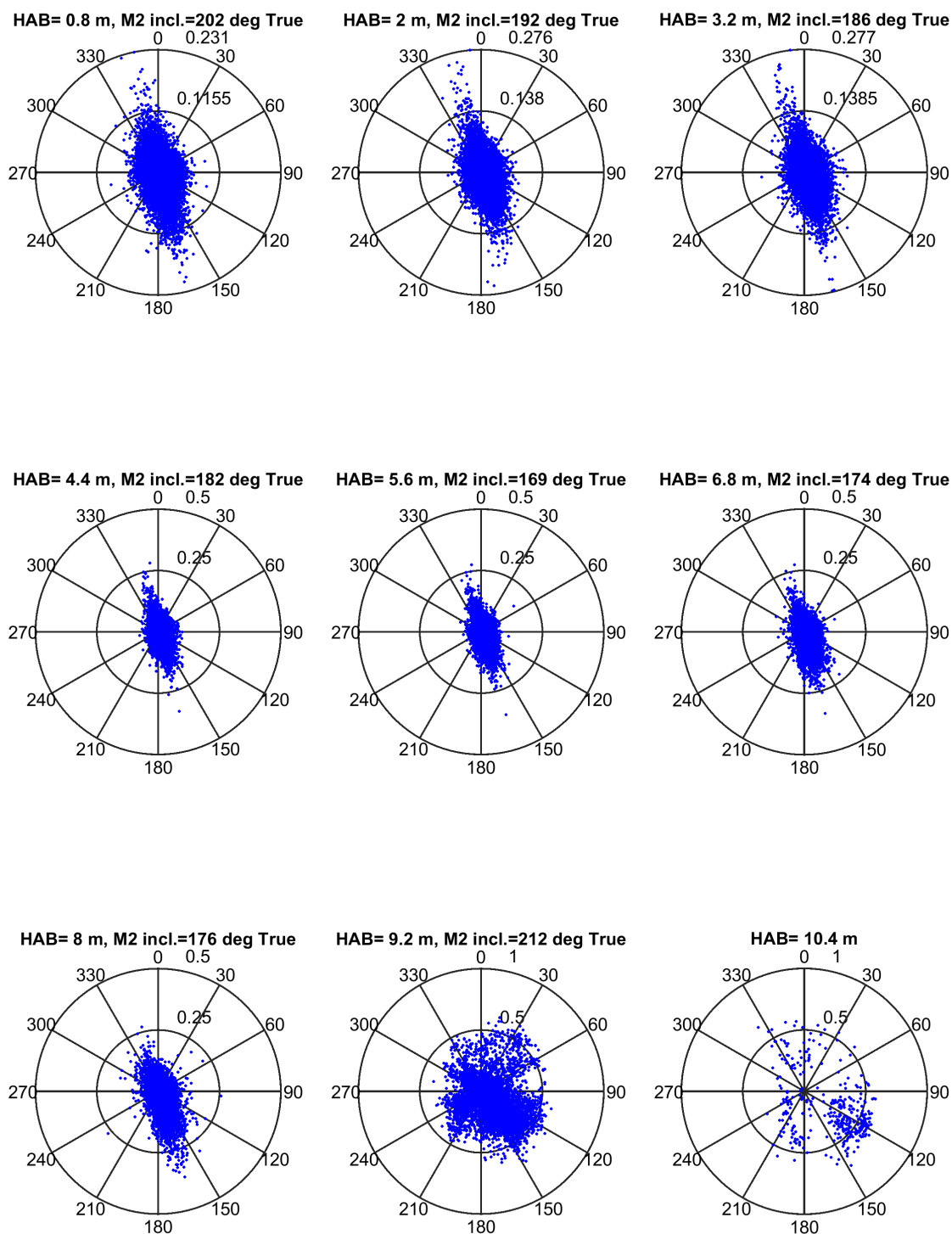


Figure 2.6 : Diagrammes de dispersion actuels à différents niveaux de la colonne d'eau. Le niveau est exprimé en hauteur au-dessus du fond (hab), jusqu'à un maximum de 10,4 m.

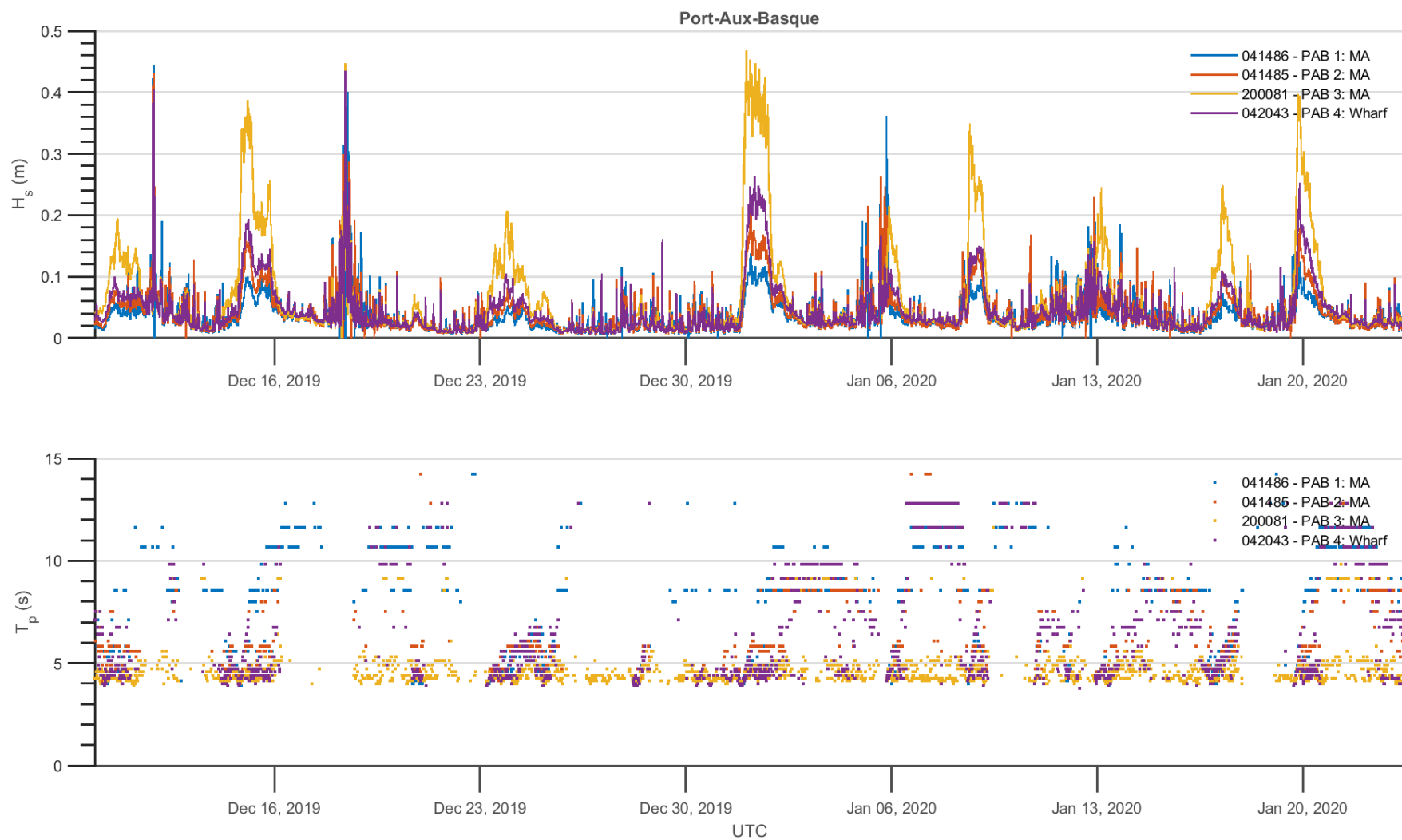


Figure 2.7 : Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés à l'aide de manomètres : a) hauteur significative des vagues et b) période de pic des vagues.

2.2 Observations du vent

2.2.1 SOURCES DE DONNÉES

Les observations du vent provenaient de deux sources :

- Station météorologique de Port aux Basques gérée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC)
- Observations de la bouée houlographe SmartAtlantic au large de Port aux Basques, à 47° 33,7705' N, 59° 006,0239' O (voir www.smartatlantic.ca/station_alt.html?portauxbasques)

Nous avons vérifié que les données issues de ces deux sources concordaient bien. Au cours de cette période, les vents soufflaient principalement de l'ouest et du nord. Des vents soufflant souvent à des vitesses de 50 km/h (14 m/s) ont été observés (Figure 2.8), la vitesse maximale enregistrée s'élevant à 95 km/h (26,3 m/s) à la station d'ECCC le 17 décembre 2019.

2.2.2 ÉPISODES DE HOULE

Comme le montre la Figure 2.8, l'enregistreur de vagues le plus exposé (no 3), situé près du quai no 1 de MAI, a enregistré des vagues de forte amplitude lors d'épisodes de vents d'est soutenus, comme lors des tempêtes du 15 décembre ou du 1^{er} janvier, qui ont fait déferler la houle dans le port. La vitesse maximale du vent enregistrée provenait de l'ouest (le 17 décembre) et n'a pas provoqué de houle immédiate au quai. Une oscillation de seiche des eaux du port à basse fréquence s'est déclenchée vers la fin de la tempête, le 18 décembre, lorsque les vents ont tourné au nord-ouest, donnant lieu à une hauteur de vague apparente de 0,4 m, dont la période était nettement plus longue que celle de la houle ou des vagues de vent. Les seiches portuaires sont abordées dans la section suivante.

2.2.3 INCIDENCE DU VENT SUR L'EXPLOITATION DES TRAVERSIERS

MAI a initialement fait part à CBCL des contraintes opérationnelles générales suivantes :

- Des vents supérieurs à 35 nœuds (65 km/h ou 18 m/s) constituent actuellement la limite habituelle dans port de PAB, dans l'hypothèse d'une exploitation normale du navire. La limite est fixée à 25 nœuds (46 km/h ou 13 m/s) en cas de problèmes techniques sur le navire, par exemple si les propulseurs ne fonctionnent pas.
- Les vents du nord-ouest et du sud-ouest sont ceux qui suscitent le plus d'inquiétudes une fois que le navire est à l'intérieur du port, car ils ont tendance à le pousser vers l'île Vardy, en particulier lorsqu'il effectue un virage à 180° à faible vitesse entre l'île et le quai.
- La manœuvre de virage des navires pour accoster constitue la principale contrainte. Compte tenu de la marge de manœuvre très limitée autour de l'île, il n'y a actuellement aucune marge d'erreur et les capitaines ont indiqué que des vents supérieurs à 30 nœuds venant du nord-ouest et du sud-ouest constituaient un sujet de préoccupation. Le départ est moins préoccupant, car la trajectoire ne comporte pas de virages serrés.

Les capitaines de MAI ont souligné que les seuils susmentionnés ne sont qu'indicatifs et que les décisions opérationnelles sont prises en fonction de leur expérience, en tenant compte d'un ensemble complexe de paramètres liés au navire, aux conditions de vent dans le port, ainsi qu'aux conditions de vent et de houle au large. MAI a fourni les registres d'exploitation à CBCL pour la période de

décembre 2019 à janvier 2020, y compris les horaires de 9 retards ou annulations liés aux conditions météorologiques. Ces événements ont été représentés graphiquement parallèlement aux observations de vent provenant des stations météorologiques d'ECCC (Figure 2.8). Un cas d'annulation coïncidant avec une vitesse de vent observée comprise entre 25 et 30 nœuds a été relevé. Tous les autres cas concernaient des vitesses de vent supérieures à 30 (ou 35) nœuds. Les tendances à long terme des vents en rapport avec les seuils opérationnels sont abordées plus en détail dans la section suivante.

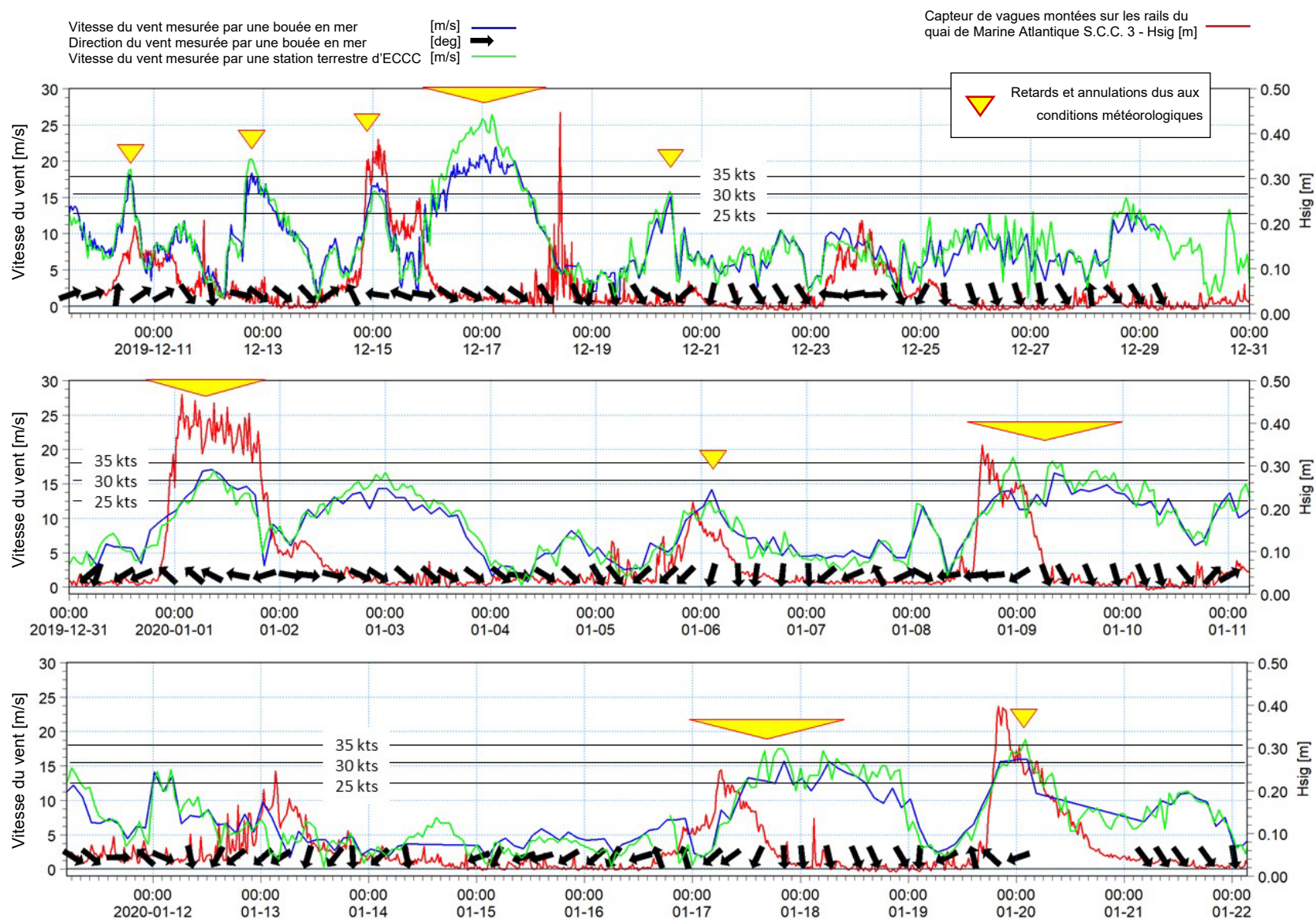


Figure 2.8 : Vitesse et direction du vent observées et hauteur des vagues au quai no 2 de MAI (enregistreur de vagues no 3).

2.3 Tendances du vent à long terme

2.3.1 TENDANCES HISTORIQUES

Les statistiques sommaires sur les vents de terre et le climat des vagues provenant de la reconstitution rétrospective MSC50 (1954-2018), sont présentées à l'annexe A. Nous avons vérifié que les données MSC50 concordaient bien avec les observations récentes des bouées houlographes SmartAtlantic (depuis 2013) au large de Port aux Basques. Les roses des vents établies à partir des données à long terme de la simulation rétrospective MSC50 sur les vents de terre (Figure 2.9 et annexe A) montrent que les vents les plus forts soufflent de l'ouest-nord-ouest, ce qui constitue un facteur limitant pour la navigation, comme indiqué à la section 2.2.3. Les dépassements annuels et saisonniers de la vitesse du vent ont été étudiés pour la période historique 1954-2018 couverte par la simulation rétrospective MSC50. Présentés dans les figures suivantes, les résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

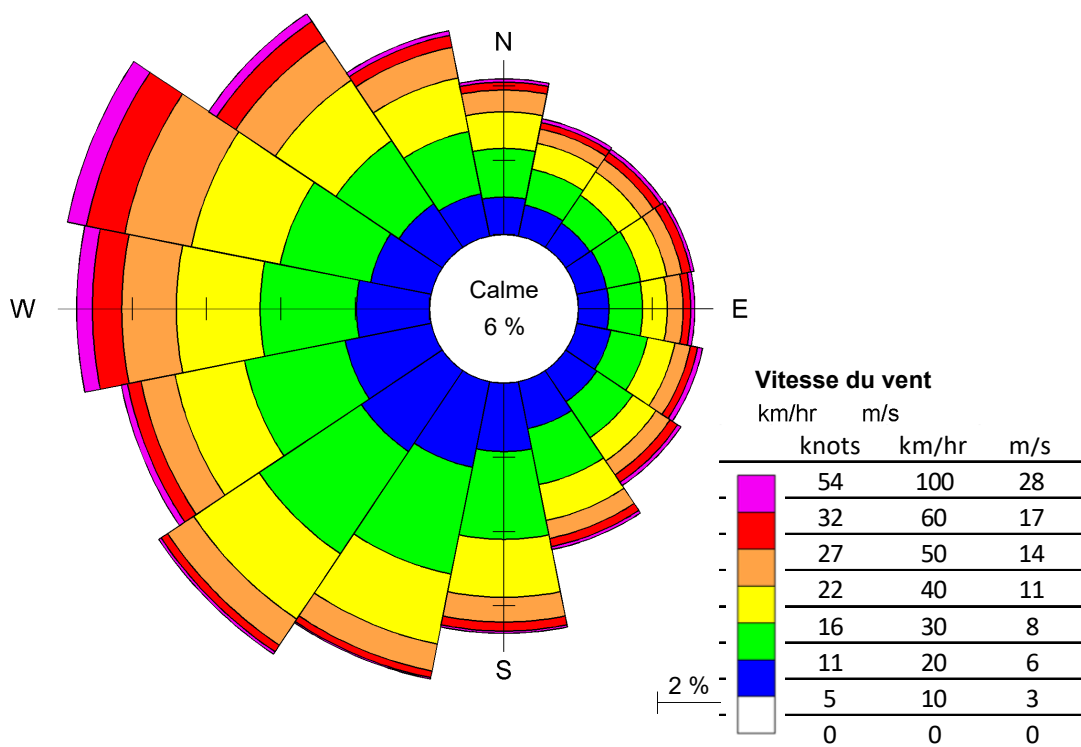
- On observe une tendance annuelle claire à l'augmentation de la fréquence des vents à des vitesses comprises entre 20 et 40 nœuds (Figure 2.10 et Figure 2.11);
- La tendance à la hausse observée d'une année sur l'autre est plus marquée pour la fourchette supérieure des vitesses de vent étudiées (30 à 40 nœuds) que pour la fourchette inférieure (15 à 25 nœuds);
- La tendance annuelle s'explique par une évolution plus marquée à l'automne et, surtout, en hiver;
- La tendance à la hausse pour les seuils de 30, 35 et 40 nœuds se manifeste principalement pour les vents provenant du sud-ouest, de l'ouest et du nord-ouest (Figure 2.12), qui correspondent aux directions les plus sensibles pour l'exploitation des traversiers.

2.3.2 PERSPECTIVES EN MATIÈRE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'incertitude liée au vent dans la modélisation climatique est élevée. Le GIEC indique que la modélisation des vents fait l'objet d'un « degré de confiance faible » (GIEC, 2013). Les phénomènes qui influencent les vents sont complexes et chacun d'entre eux a des effets particuliers. Il est donc difficile de prévoir ces changements, qui devraient d'ailleurs être de nature non linéaire. Les principaux processus à l'origine d'éventuelles variations des vents sont les suivants :

- un changement de trajectoire des tempêtes à l'échelle locale (par exemple, un déplacement vers le nord des cyclones extratropicaux);
- le déplacement et l'intensification des vents d'ouest des latitudes moyennes;
- l'augmentation potentielle de la convection locale provoquée par le réchauffement de la surface du sol.

Des études ont montré que les rafales de vent devraient s'intensifier avec le changement climatique. Pour les Pays-Bas, une étude menée par Cheng et Lopes (2014) suggère une augmentation potentielle de 20 à 40 % des rafales de 70 km/h (38 nœuds) pour la période de 2080 à 2100. C'est le nombre de rafales dépassant les seuils les plus élevés (90 km/h ou 48 nœuds) qui devrait connaître la plus forte augmentation (jusqu'à 100 %). Bien que les projections climatiques concernant les vents soient entachées d'une grande incertitude, les tendances récentes laissent entrevoir une augmentation des épisodes de vents violents. La perspective d'un avenir marqué par des tempêtes plus violentes devrait être prise en compte dans la planification et la conception des infrastructures. Le projet de navigation proposé vise à renforcer la résilience des opérations de MAI en cas de conditions météorologiques défavorables.



Vitesse du vent >30, 35 and 40 kts

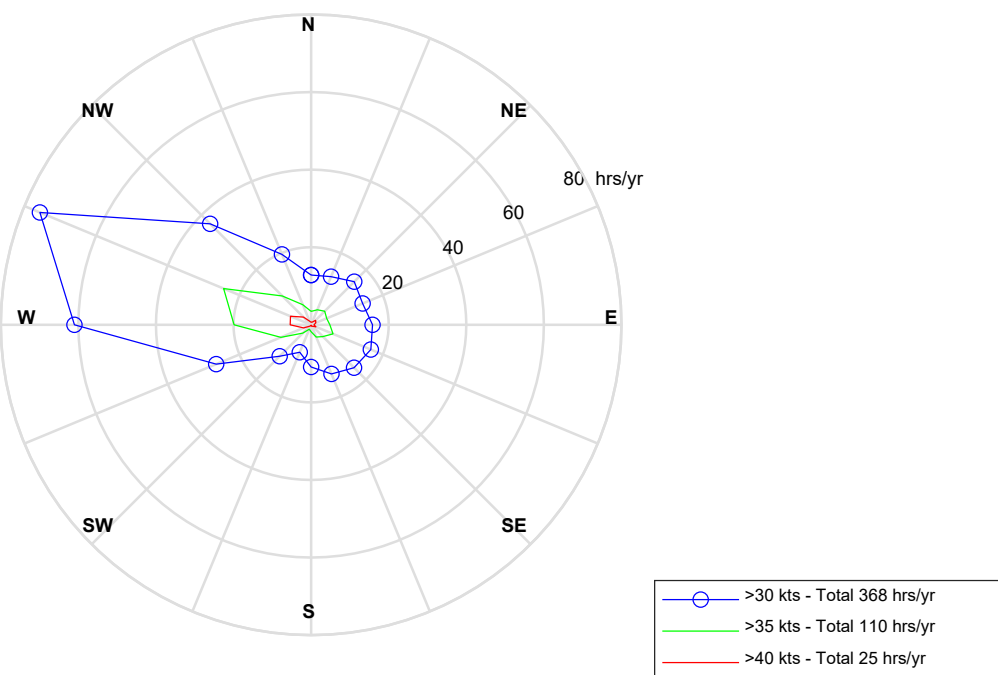


Figure 2.9 : Statistiques annuelles sur la direction du vent incluant le pourcentage d'occurrence (en haut) et le pourcentage de dépassement (en bas)

Les seuils de navigation habituels pour les traversiers se situent entre 30 et 40 nœuds.

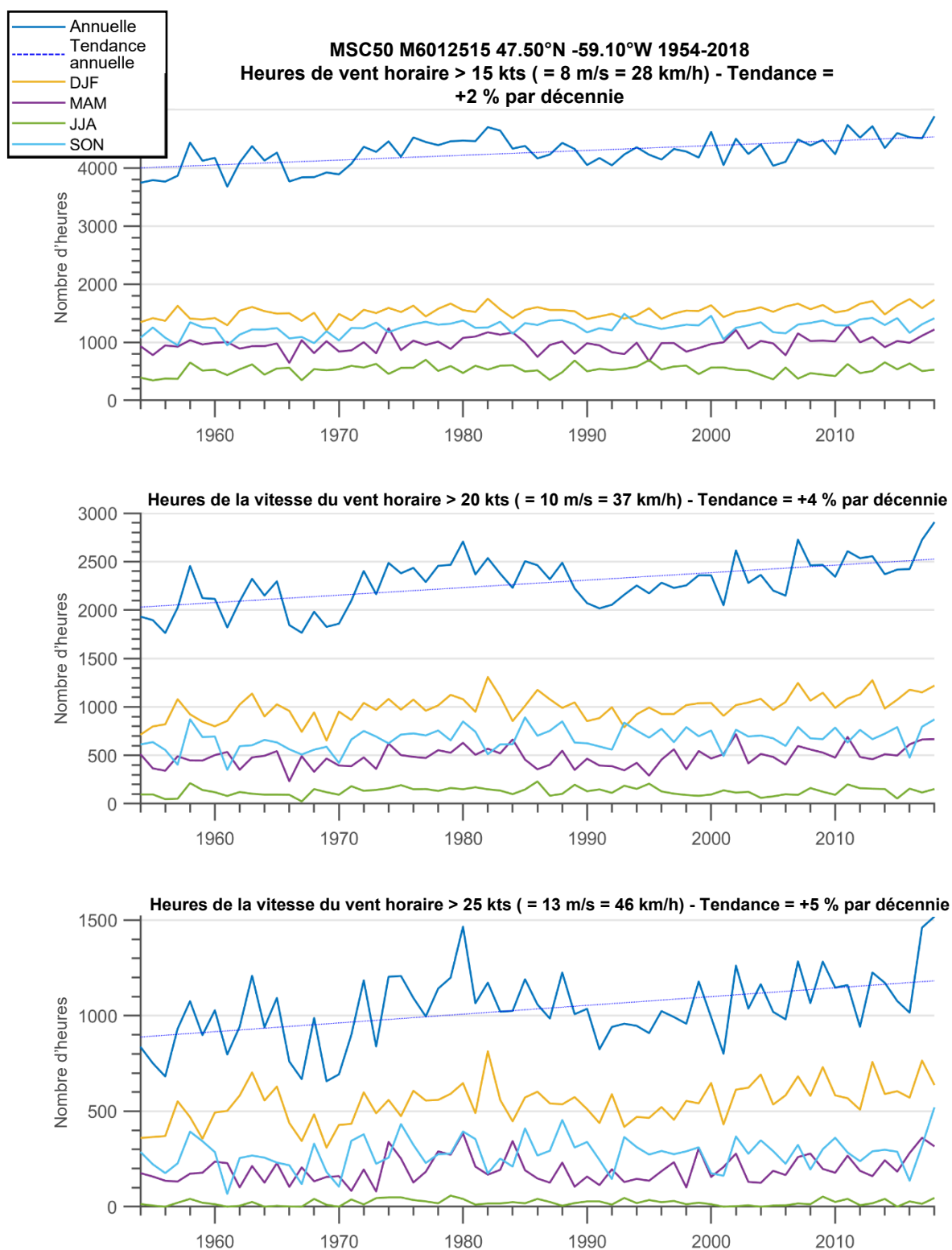


Figure 2.10 : Dépassements historiques annuels et saisonniers de la vitesse du vent horaire de 15, 20 et 25 nœuds par heure, à une hauteur de 10 m au-dessus du niveau de la mer, d'après la simulation rétrospective MSC50.

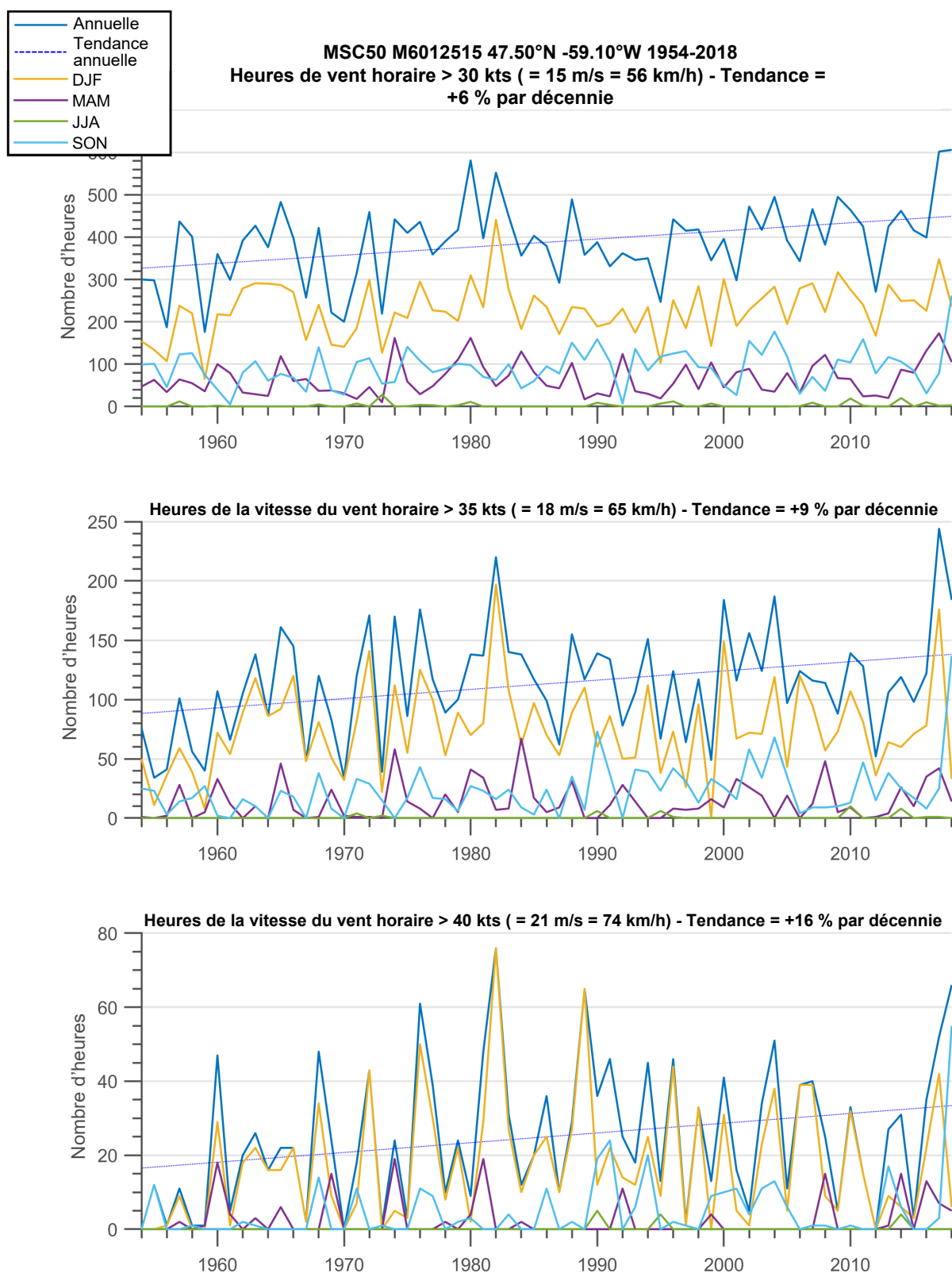


Figure 2.11 : Dépassements historiques annuels et saisonniers de la vitesse du vent horaire de 30, 35 et 40 nœuds, à une hauteur de 10 m au-dessus du niveau de la mer, d'après la simulation rétrospective MSC50.

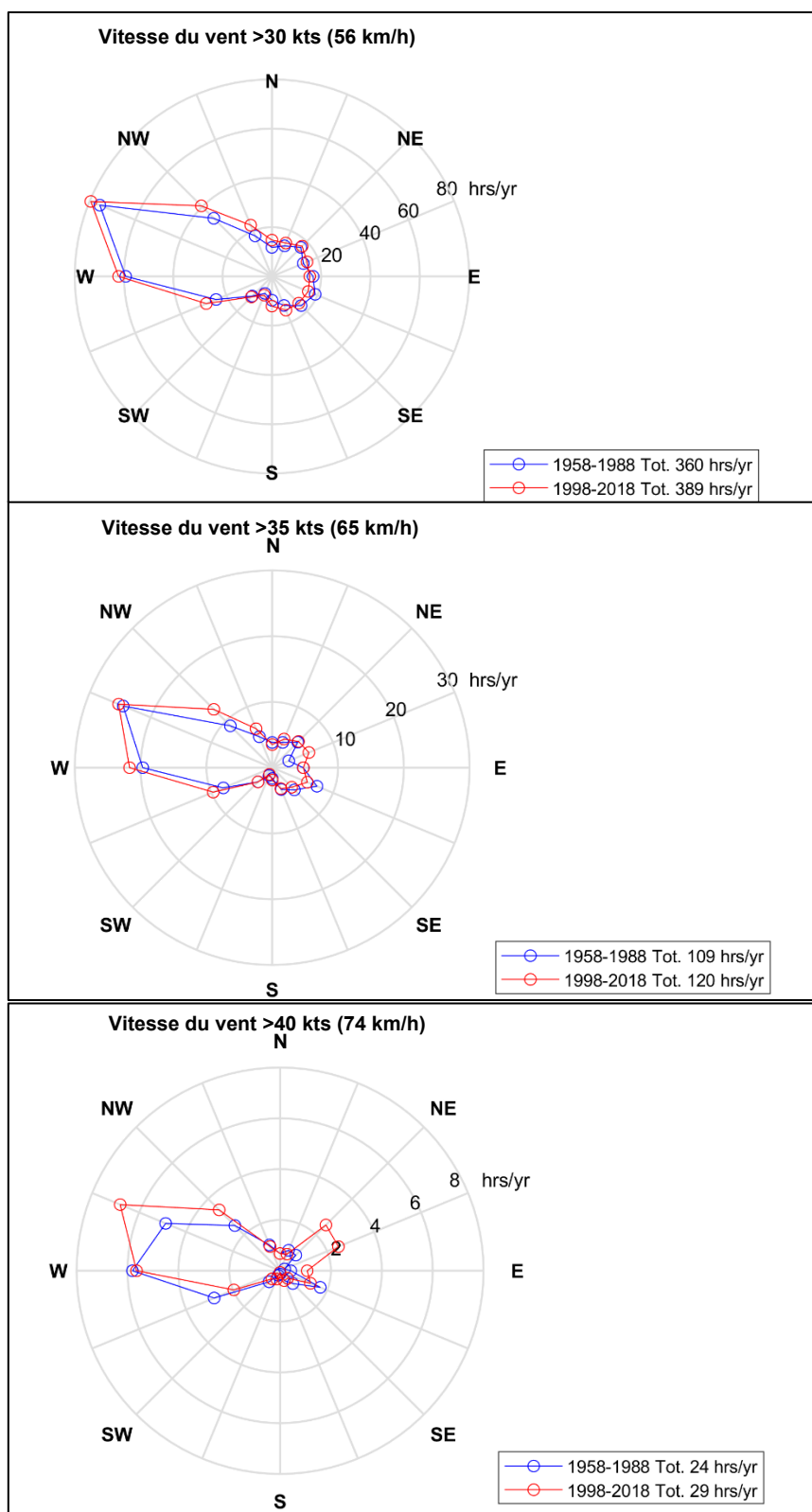


Figure 2.12 : Évolution historique de la répartition directionnelle de la vitesse du vent horaire supérieure à 30, 35 et 40 nœuds (graphiques du haut, du milieu et du bas).

2.4 Niveaux d'eau

2.4.1 MARÉES ET ONDES DE TEMPÊTE

Un marégraphe du MPO est en service à Port aux Basques depuis 1959. Les marées astronomiques locales sont semi-diurnes : deux marées hautes et deux marées basses se produisent au cours de chaque jour lunaire de 25 heures. Le niveau des marées est indiqué dans le Table 2.2. Les valeurs extrêmes des niveaux d'eau totaux ont été obtenues à partir de l'analyse des pics de crue observés au cours de la période de mesure (CBCL, 2014).

Tableau 2.2 : Niveaux d'eau dans le port de PAB

Valeurs extrêmes par période de retour [années]	m Zéro des cartes	m CGVD28	m CGVD2013
100 ans	2,74	1,64	1,14
50 ans	2,67	1,57	1,07
10 ans	2,52	1,42	0,92
5 ans	2,46	1,36	0,86
2 ans	2,37	1,27	0,77
1 an	2,31	1,21	0,71
Niveaux des marées publiés par le SHC			
Pleine mer supérieure, grande marée	2,0	0,9	0,4
Pleine mer supérieure, marée moyenne	1,7	0,6	0,1
Niveau moyen de l'eau	1,2	0,1	-0,4
Basse mer inférieure, marée moyenne	0,6	- 0,5	-1,0
Basse mer inférieure, grande marée	0,3	- 0,8	-1,3

2.4.2 SEICHE

Les données des marégraphes enregistrées pendant la période d'observation affichent une oscillation des eaux du port, c'est-à-dire une seiche, provoquée par l'activité orageuse. Typiquement, son amplitude pendant une tempête est comprise entre 0,2 et 0,4 m, sur une période de 20 minutes (Figure 2.13). La seiche se produit dans la partie intérieure du port, derrière les brise-lames.

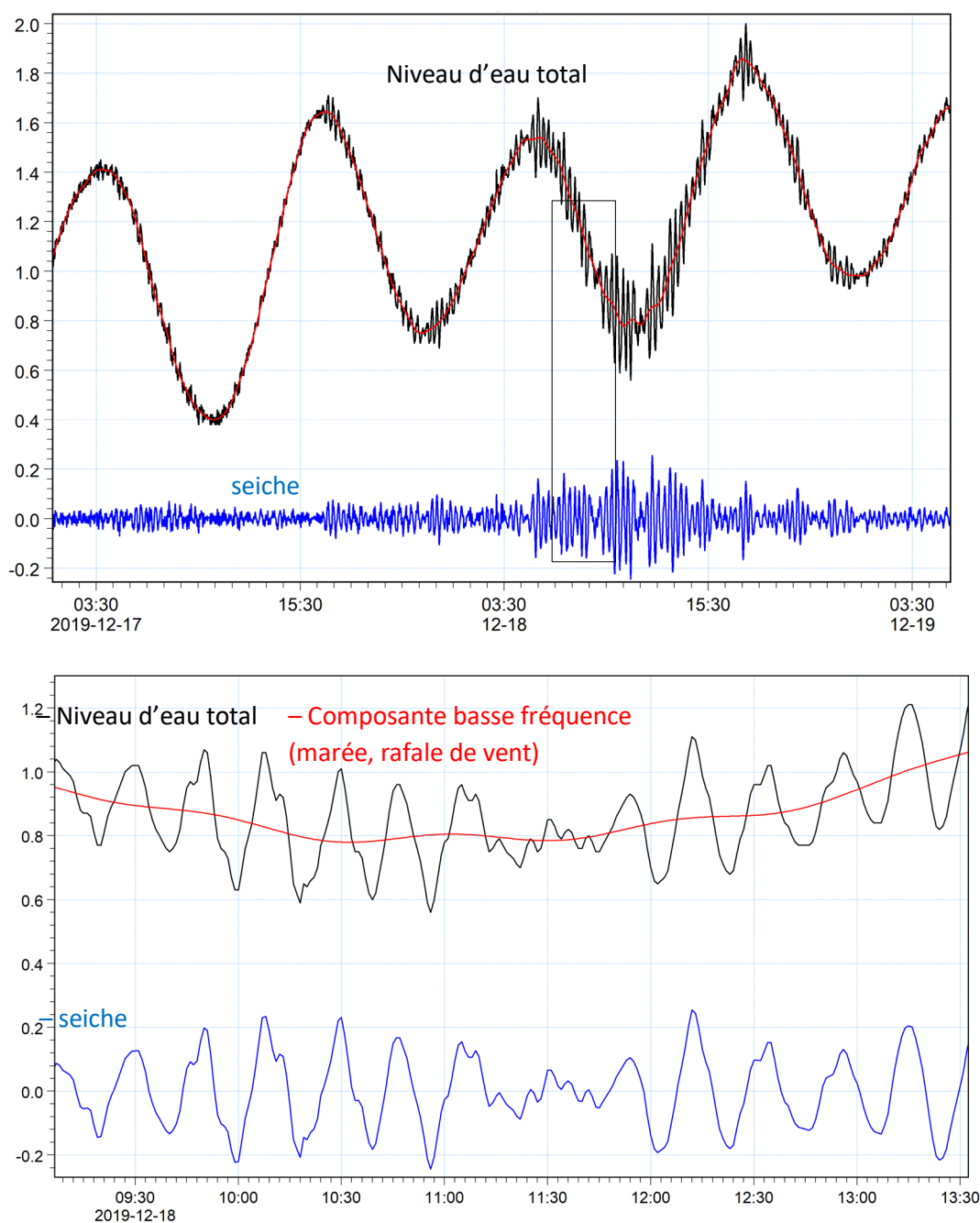


Figure 2.13 : Exemples d’observations du marégraphe du MPO réalisées pendant la période de surveillance et illustrant la seiche dans le port.

2.5 Courants dus à la seiche

La seiche a des répercussions sur les courants dans l’ensemble du port. C’est ce que montrent les observations sur le terrain (Figure 2.14) :

- La hauteur significative des vagues (H_s) calculée par les enregistreurs de vagues est élevée (0,4 m) le 18 décembre, lorsque le vent souffle depuis la terre (nord-ouest). Les « H » indiqués par les instruments de mesure des vagues correspondent en réalité à l’amplitude d’une seiche à basse fréquence, et non à des vagues de vent.

- Courants oscillants élevés enregistrés par l'ADCP le 18 décembre. Les vitesses de courant les plus élevées observées sur le site sont dues à la seiche. La composante « marée » des courants est négligeable. Cela n'a rien d'étonnant, car la superficie relativement réduite du port de Port aux Basques nécessite une variation relativement importante du niveau de l'eau pour générer des courants importants à l'entrée et à la sortie du port. Les gradients de niveau d'eau sont plus marqués lors d'une seiche que lors d'une marée, d'où des courants plus forts.

2.6 Synthèse des observations

Le port de Port aux Basques est relativement à l'abri des tempêtes côtières, ce qui a permis le développement du port pour petites embarcations et du terminal de traversiers. Les observations recueillies au cours d'une période de tempêtes, du 9 décembre 2019 au 23 janvier 2020, ont révélé ce qui suit :

- Une forte agitation due aux vagues au niveau des quais (avec une hauteur significative des vagues supérieure à 0,3 m) lors des périodes de vents de tempête du sud-ouest, ainsi que des vagues de vent du nord-est se formant dans tout le port.
- Présence d'une oscillation à basse fréquence (seiche) déclenchée lors des tempêtes. La seiche se manifeste sous la forme d'une vague de longue période, d'une hauteur comprise entre 0,2 et 0,4 m, sur une période d'une durée habituelle de 20 minutes. Elle entraîne des vitesses de courant maximales supérieures à 0,2 m/s au site d'observation du courantomètre. Ces vitesses restent relativement faibles, bien qu'elles soient nettement supérieures à la composante de marée du courant, qui est négligeable à l'intérieur du port.

Afin de compléter les observations recueillies au cours de la période de surveillance 2019-2020, les tendances à long terme relatives aux vents violents, qui constituent le paramètre déterminant pour l'exploitation des traversiers, ont été analysées. Les tendances récentes laissent entrevoir une augmentation des épisodes de vents violents. La perspective d'un avenir marqué par des tempêtes plus violentes devrait être prise en compte dans la planification et la conception des infrastructures. Le projet de navigation proposé vise à renforcer la résilience des opérations de MAI en cas de conditions météorologiques défavorables.

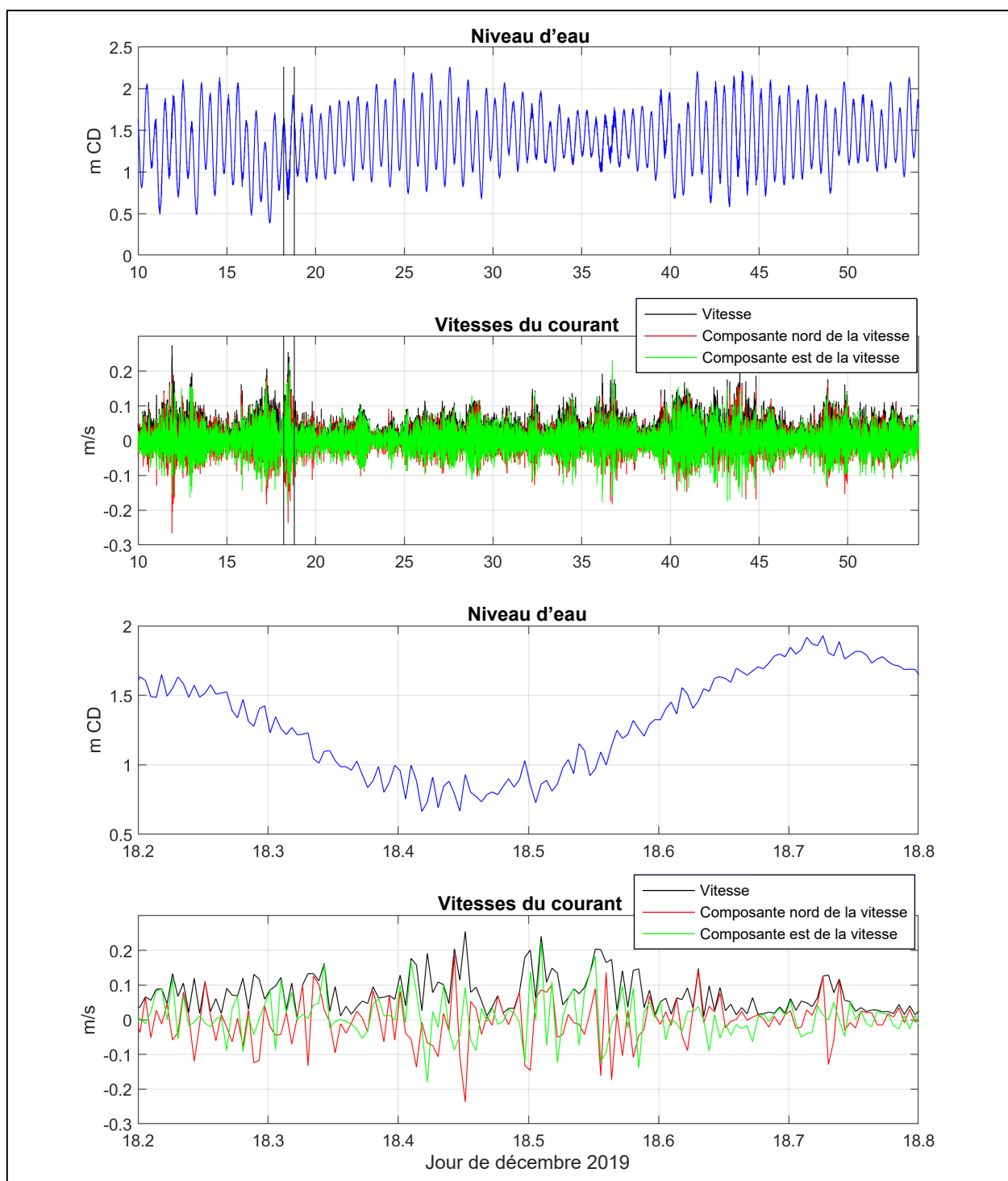


Figure 2.14 : Niveaux d'eau et courants moyens mesurés par l'ADCP lors d'une tempête de vent du nord-ouest provoquant une seiche.

3.1 Méthodologie

Utilisé dans des études antérieures, le modèle DHI MIKE21 de CBCL a été mis à jour et calibré à partir de mesures de terrain récentes. Il s'agit d'un modèle régional, qui simule l'hydrodynamique (HD) et le spectre des vagues (SV) à une haute résolution dans la zone portuaire. Pour élaborer ce modèle, une grille de données bathymétriques a d'abord été créée. Cette grille comprenait les données bathymétriques multifaisceaux récemment recueillies dans le cadre de la campagne de levés menée par Canadian Seabed Research (CSR) pour le compte de Marine Atlantique, ainsi que des cartes marines pour les zones ne disposant pas de données de levés. Le modèle utilise un maillage triangulaire non structuré, ce qui présente l'avantage de permettre une représentation plus fine de la zone côtière grâce à des mailles plus fines que celles utilisées pour les zones plus profondes, au large (Figure 3.1).

Une modélisation supplémentaire des vagues dans le port, à haute résolution, a été réalisée à l'aide d'un modèle à phases résolues afin d'étudier l'agitation des vagues dans le bassin liée aux houles. Le type de modèle et les domaines d'application sont résumés dans le Table 3.1, accompagné des principales données d'entrée et de sortie.

Tableau 3.1 : Résumé des modèles utilisés dans la présente étude

Domaine d'application	Modèle	Objectif	Entrées et étalonnage	Résultats
Transformation locale des vagues, amplification des vagues de vent.	Modèle spectral des vagues DHI MIKE21.	Transformation des vagues près du rivage et amplification des vagues par le vent jusqu'à l'entrée du port.	Simulation rétrospective MSC50, observations des vagues et du vent	Climat des vagues à l'entrée du port, vagues provoquées par un vent du nord-est.
Agitation des vagues dans le port due à la houle et aux longues vagues.	Modèle de vagues à phases résolues DHI MIKE21 BW.	Évaluer à l'échelle locale l'agitation due à la houle et la réflexion contre les quais	Conditions de houle à l'entrée du port et observations de l'enregistreur de vagues.	Agitation des vagues dans le port
Niveaux d'eau et courants de marée.	Modèle hydrodynamique MIKE21 HD.	Niveaux d'eau et vitesse du courant.	Observations du niveau de l'eau réalisées à l'aide de l'ADCP et du marégraphe du MPO	Niveaux d'eau et courants dans le port.

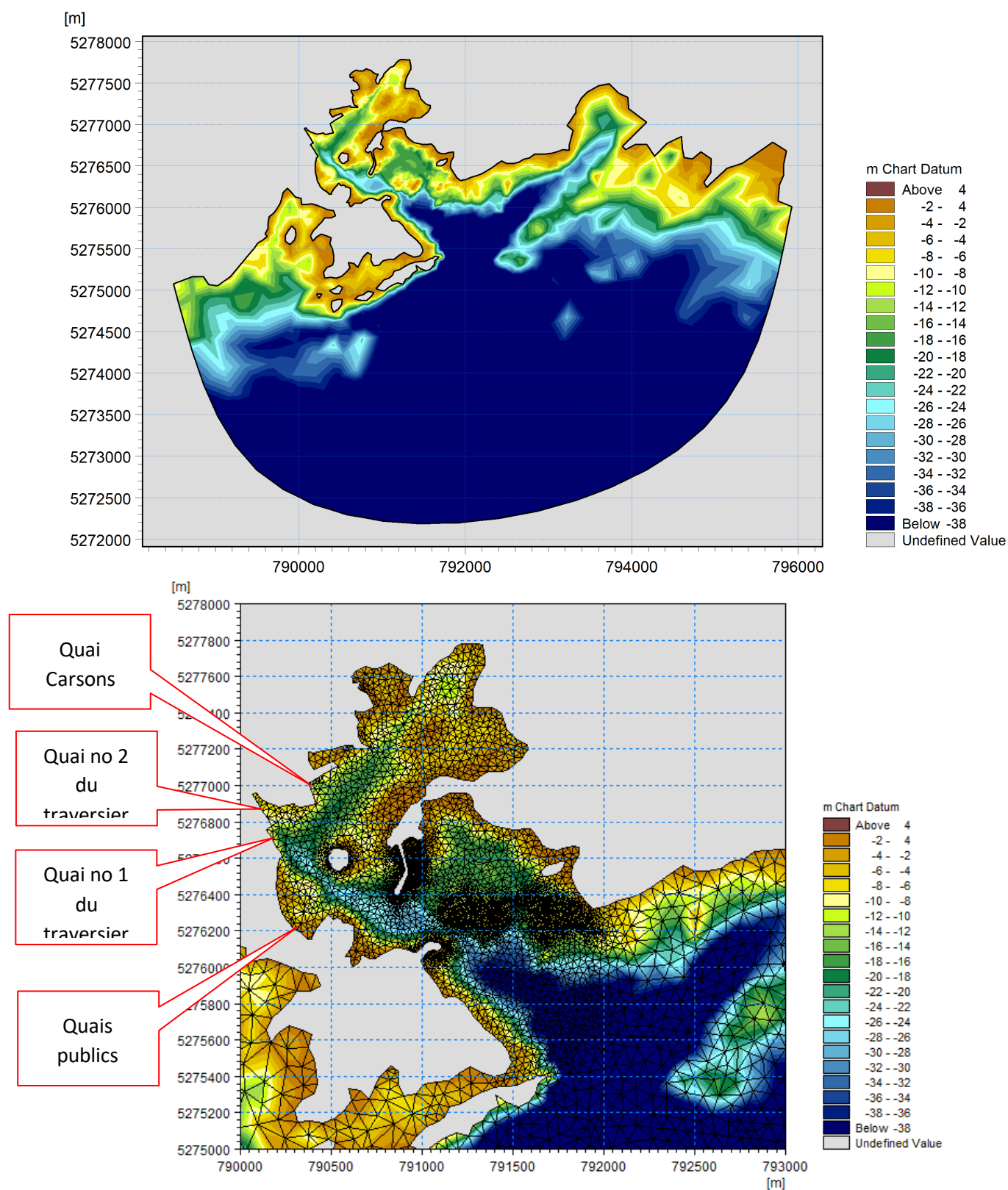


Figure 3.1 : Modèle MIKE21 avec maillage à haute résolution sur la zone du projet.

3.2 Modèle hydrodynamique

3.2.1 CONDITIONS AUX LIMITES DU NIVEAU D'EAU

Afin de générer des conditions aux limites pour le niveau de l'eau au large, les observations du marégraphe de Port aux Basques ont été modifiées pour inclure le signal de marée complète, ainsi que la composante de seiche ramenée à 4 % de son amplitude telle qu'observée par le marégraphe du port. Le facteur d'échelle des limites de la seiche constituait un paramètre d'étalonnage déterminé afin d'obtenir une représentation équilibrée des niveaux d'eau et des courants dans le modèle à haute définition.

3.2.2 RÉSULTATS DU MODÈLE ÉTALONNÉ

Les niveaux d'eau et les courants modélisés et observés sont présentés respectivement à la Figure 3.2 et à la Figure 3.3. L'objectif principal de l'étalonnage haute définition est d'obtenir une représentation acceptable des courants. La fourchette générale des vitesses de courant modélisées se situe à moins de 10 % des observations, sur la base de la vitesse moyenne du courant entre le 15 et le 19 décembre, qui constitue un indicateur approprié pour mesurer l'énergie globale du courant dans le système. Le modèle reproduit correctement l'amplitude de la seiche sur 20 minutes ainsi que les variations associées du niveau d'eau et des courants lors de la plus forte tempête (18 décembre). L'amplitude de la seiche est quelque peu sous-estimée pendant les périodes plus calmes, probablement en raison d'approximations concernant les champs de vent et les niveaux d'eau aux limites.

Des instantanés des courants de seiche modélisés (marée descendante et marée montante) sont présentés à la Figure 3.4. Les zones où les courants sont légèrement plus forts ($\sim 0,3$ m/s, soit 0,6 nœud) se situent principalement aux extrémités du brise-lames et ne constituent pas un problème pour la navigabilité en raison de la vitesse relativement faible de ces courants.

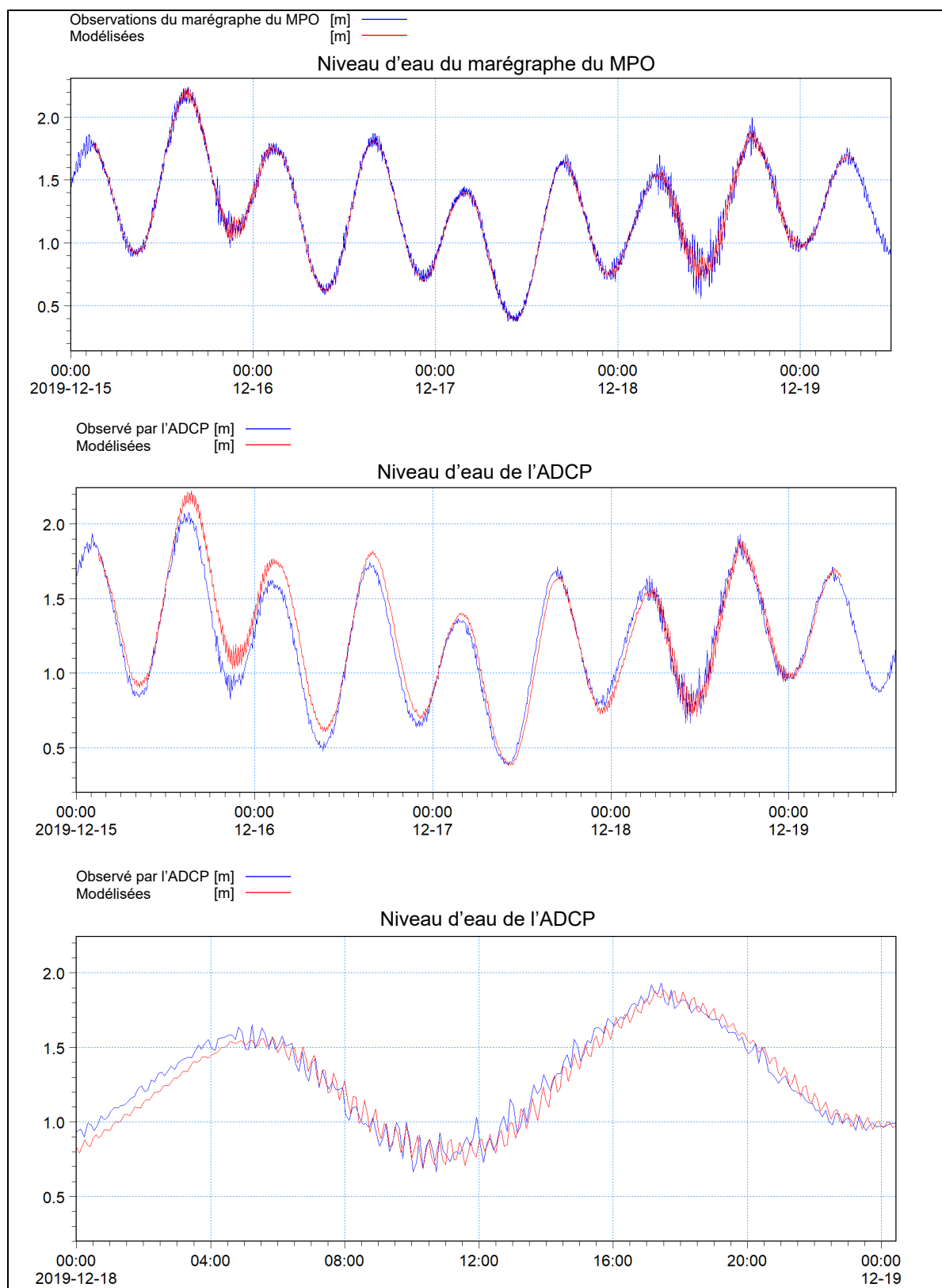


Figure 3.2 : Étalonnage du modèle hydrodynamique – Niveaux d'eau.

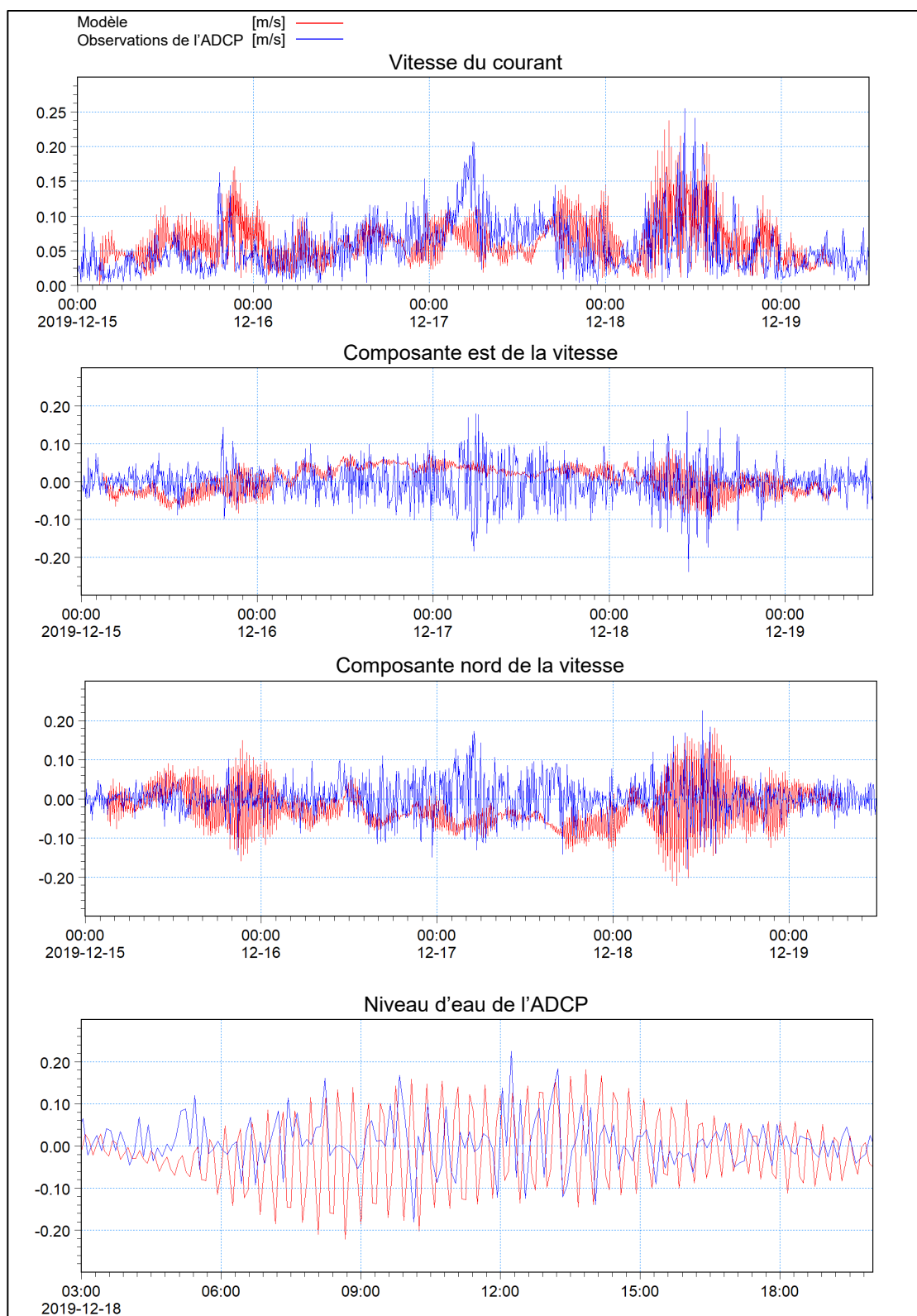


Figure 3.3 : Étalonnage du modèle hydrodynamique – Courants.

L'intervalle de confiance du modèle est de $\pm 10\%$ par rapport à la vitesse moyenne du courant.

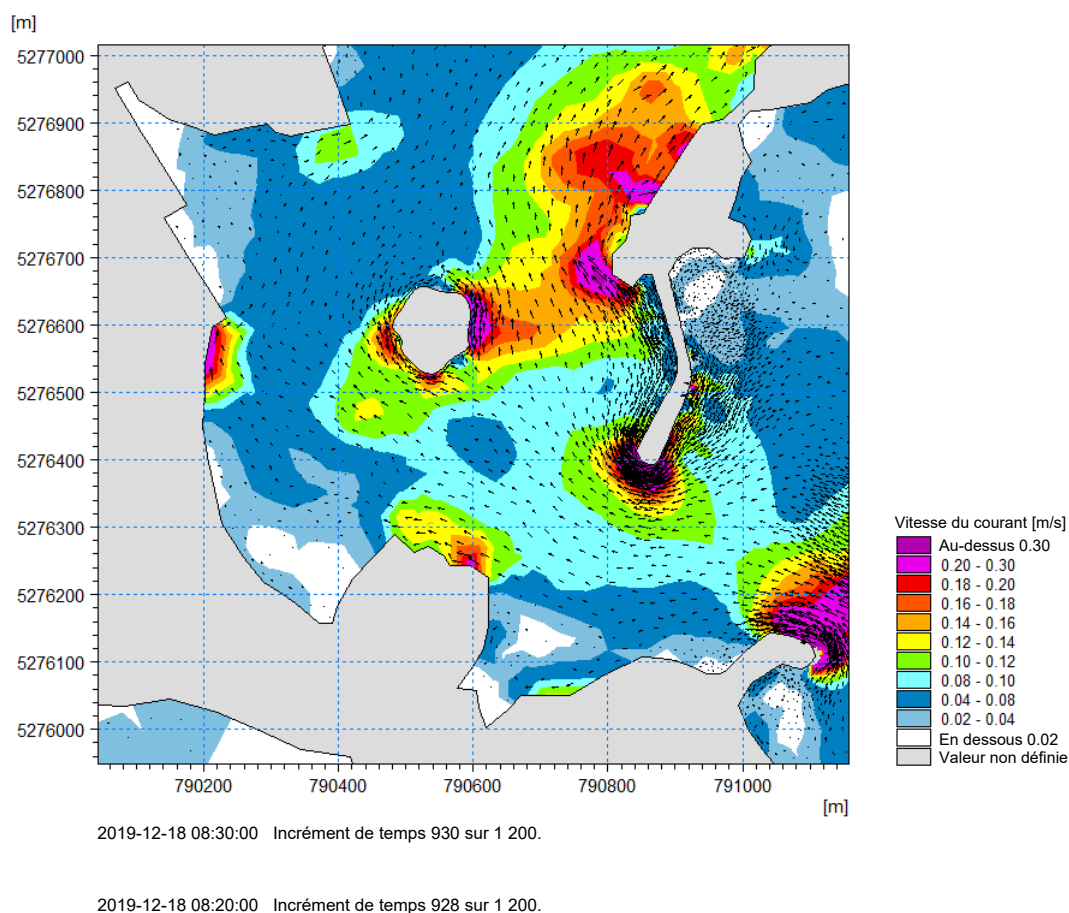


Figure 3.4 : Instantanés des courants de seiche modélisés (au pic de la marée descendante et en début de marée montante).

3.3 Modèles de vagues

3.3.1 MODÈLE SPECTRAL DES VAGUES RÉGIONAL

Description du modèle – Le modèle spectral des vagues MIKE21, qui ne requiert que peu de ressources de calcul, a été utilisé en mode entièrement spectral avec une approche quasi stationnaire dans le domaine temporel (c'est-à-dire en régime stationnaire). Le modèle simule les phénomènes physiques suivants :

- Réfraction et formation de bancs due aux variations de profondeur.
- Dissipation due à la rupture des vagues induite par la profondeur; un coefficient de rupture type de 0,8 a été retenu (c'est-à-dire le rapport entre la hauteur des vagues déferlantes et la profondeur de l'eau).
- Dissipation due au frottement de fond (on a supposé une rugosité typique du fond de 0,04 m).
- Dissipation due à la formation de crêtes blanches.
- Interaction non linéaire entre ondes.
- Amplification des vagues par le vent (la formulation non couplée recommandée par le DHI pour les applications côtières à petite échelle a été utilisée).

Conditions aux limites – Les données sur les vagues au large ont été obtenues à partir de la simulation rétrospective des vagues ERA5, un ensemble de données contenant des informations horaires sur le vent et les vagues fournies par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Les données d'ERA5 fournissent la hauteur significative des vagues et la période de crête par heure, au fil du temps et pour un site situé au large. Des essais ont également été menés en utilisant les observations en mer fournies par la bouée SmartAtlantic comme conditions aux limites. Les résultats obtenus à partir d'ERA5 et des conditions aux limites des bouées se sont révélés comparables. Il a toutefois été constaté que les variations importantes de la direction des vagues mesurées par la bouée augmentaient quelque peu l'incertitude d'étalonnage, d'où le choix des données d'ERA5.

Étalonnage – Le modèle spectral régional des vagues a été étalonné à partir de deux tempêtes majeures survenues les 1^{er} et 20 janvier 2020. Compte tenu des conditions aux limites décrites précédemment, le modèle de vagues a été étalonné à partir des observations des données provenant de l'enregistreur de vagues et de l'ADCP en ajustant deux paramètres :

- le coefficient de tension du vent en surface de Charnock (1955), à une valeur de 0,005 (cette valeur est inférieure à celle utilisée dans les précédentes études de modélisation sur ordinateur de CBCL, où nous avons utilisé la valeur par défaut de 0,01);
- les coefficients de réflexion au niveau du littoral, ajustés à 0,4 (pour la zone du terminal de traversier, cette valeur est inférieure à celle des modélisations précédentes de CBCL, où nous avons utilisé une valeur prudente de 0,9 pour les quais verticaux).

Ce modèle a permis d'obtenir un ajustement raisonnable pour la plupart des observations concernant la hauteur de vague maximale enregistrée le 1^{er} janvier 2020, en particulier pour l'enregistreur de vagues no 3, le plus exposé, situé à l'extrémité du quai no 1 de MAI. Une image du modèle au plus fort de cette tempête est présentée à la Figure 3.5. Les graphiques représentant les séries chronologiques d'étalonnage figurent à l'annexe B.

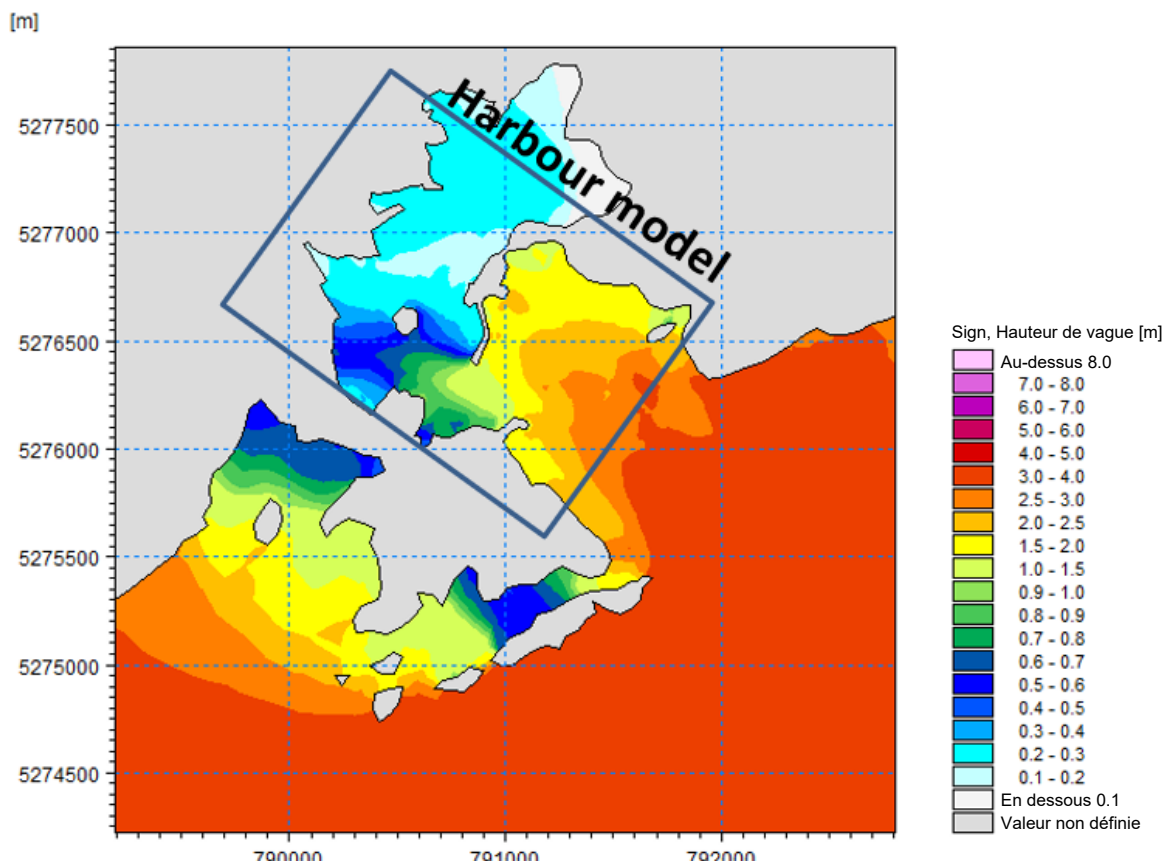


Figure 3.5 : Modèle régional des vagues : pic de la tempête, 1^{er} janvier 2020.

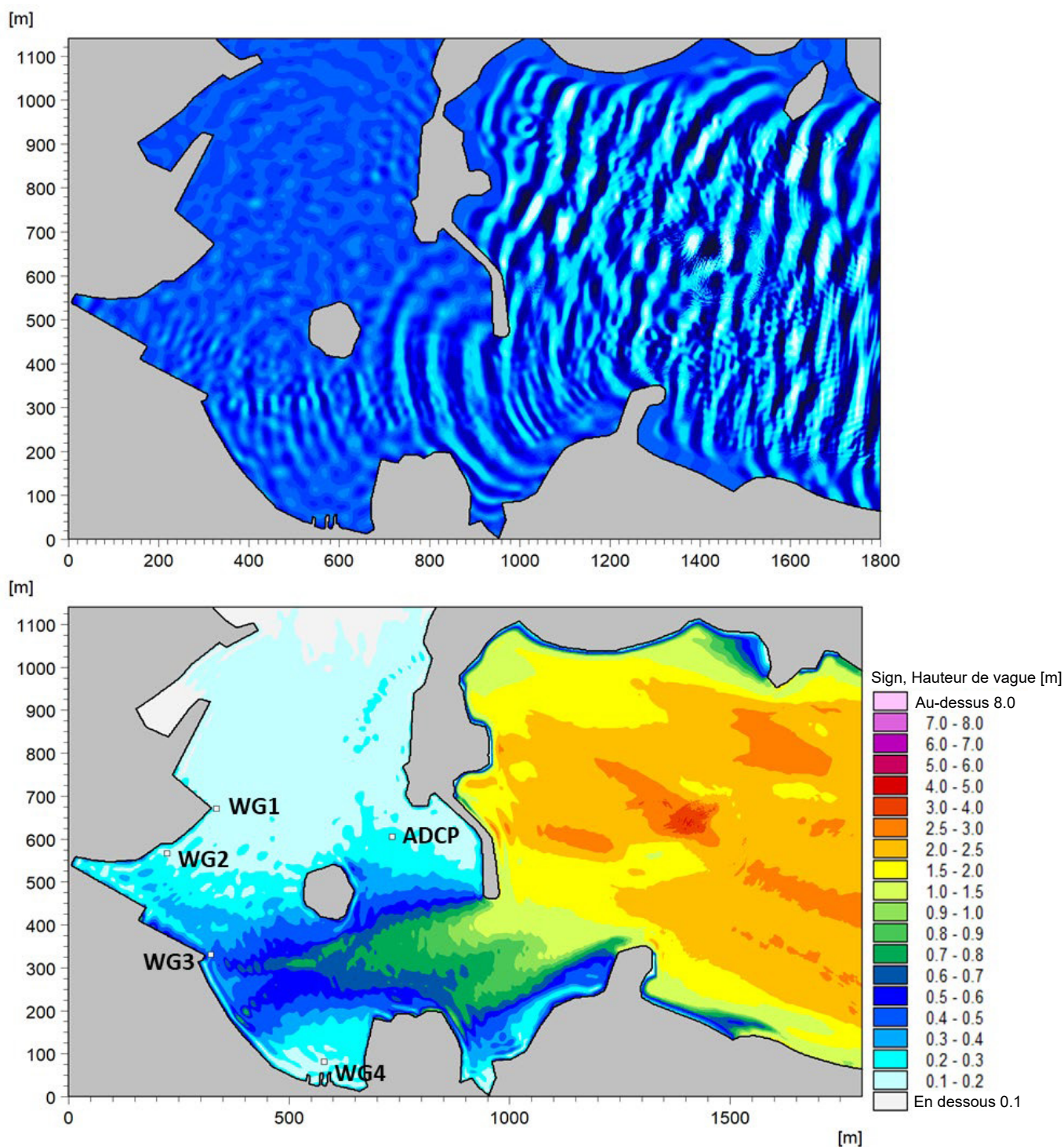
Conditions aux limites : vent de sud-est de 33 nœuds

3.3.2 MODÈLE DE VAGUES DU PORT À PHASE RÉSOLUE

Le modèle MIKE21 Boussinesq Waves (BW), qui permet de modéliser des vagues individuelles et des réflexions multiples, a été utilisé pour simuler le schéma de propagation des vagues dans le port avec une plus grande précision que le modèle spectral. Le modèle BW est le mieux adapté pour modéliser la diffraction, les réflexions multiples et l'action des vagues à longue période. Les résultats de cette modélisation sont présentés à la figure **Figure 3.6**.

Le modèle portuaire BW a été étalonné en affinant les angles d'arrivée des vagues et en ajustant les coefficients de réflexion le long du littoral et à l'intérieur du bassin, pour les conditions de tempête extrêmes du 1^{er} janvier 2020. Les conditions de houle ou le domaine du modèle à haute résolution ont été définis à partir des résultats étalonnés du modèle spectral régional des vagues, obtenus à partir de la position de la limite du domaine. L'étalonnage s'est concentré sur le WG3, qui est le quai le plus exposé, avec une hauteur significative de vague mesurée de 0,4 m le 1^{er} janvier 2020.

Lors des réunions avec les capitaines qui se sont tenues entre juin et juillet 2020, il a été confirmé que les résultats du modèle de vagues étaient réalistes. Il a également été confirmé que l'agitation actuelle due aux vagues au quai des traversiers n'était pas considérée comme problématique et n'avait pas entraîné d'interruption ni de retard dans les opérations. Le vent constitue le paramètre le plus important.



	GT1	WG2	WG3	WG4
Hs mesurée [m]	0,10	0,16	0,40	0,22
Hs modélisée [m]	0,16	0,15	0,41	0,18
Erreur [%]	61 %	-5 %	3 %	-16 %

Figure 3.6 : Modèle étalonné des vagues dans le port : pic de tempête, 1^{er} janvier 2020.

4.1 Configuration future

Les matériaux issus du dynamitage, des travaux d'excavation et du dragage seront acheminés vers le brise-lames de l'île Pikes et la zone de remblayage de l'île Pikes en vue d'une réutilisation à des fins utiles. La majeure partie des déblais de dragage sera déposée dans la zone de remblayage prévue à cet effet sur l'île Pikes. Afin de comprendre les conditions futures après le remblayage, celui-ci a été intégré aux modèles hydrodynamiques et de vagues aux fins de simulations. Les résultats sont présentés dans les sections suivantes.

Il convient de noter que la configuration des zones de remblayage est encore susceptible d'être modifiée, dans l'attente de la conception définitive. La configuration finale sera vérifiée à l'aide des modèles côtiers afin de garantir un impact minimal. Les exigences du contrat stipuleront que les impacts côtiers du tracé définitif ne devront pas s'écarter de manière significative de ceux présentés dans les résultats de la modélisation ci-dessous.

4.2 Courants dus aux tempêtes

Les résultats concernant les courants de seiche maximaux sont présentés à la Figure 4.1. Le modèle indique que la suppression de l'île et le remblayage entraîneraient un déplacement vers l'est de la trajectoire des courants de pointe à l'intérieur du port. Les courants resteraient relativement faibles et ne devraient pas entraîner d'érosion ni de sédimentation importante dans le bassin, étant donné que le fond est principalement rocheux. Les conditions au sein du chenal de navigation ne devraient pas connaître de changements significatifs et aucune répercussion n'est prévue sur les opérations.

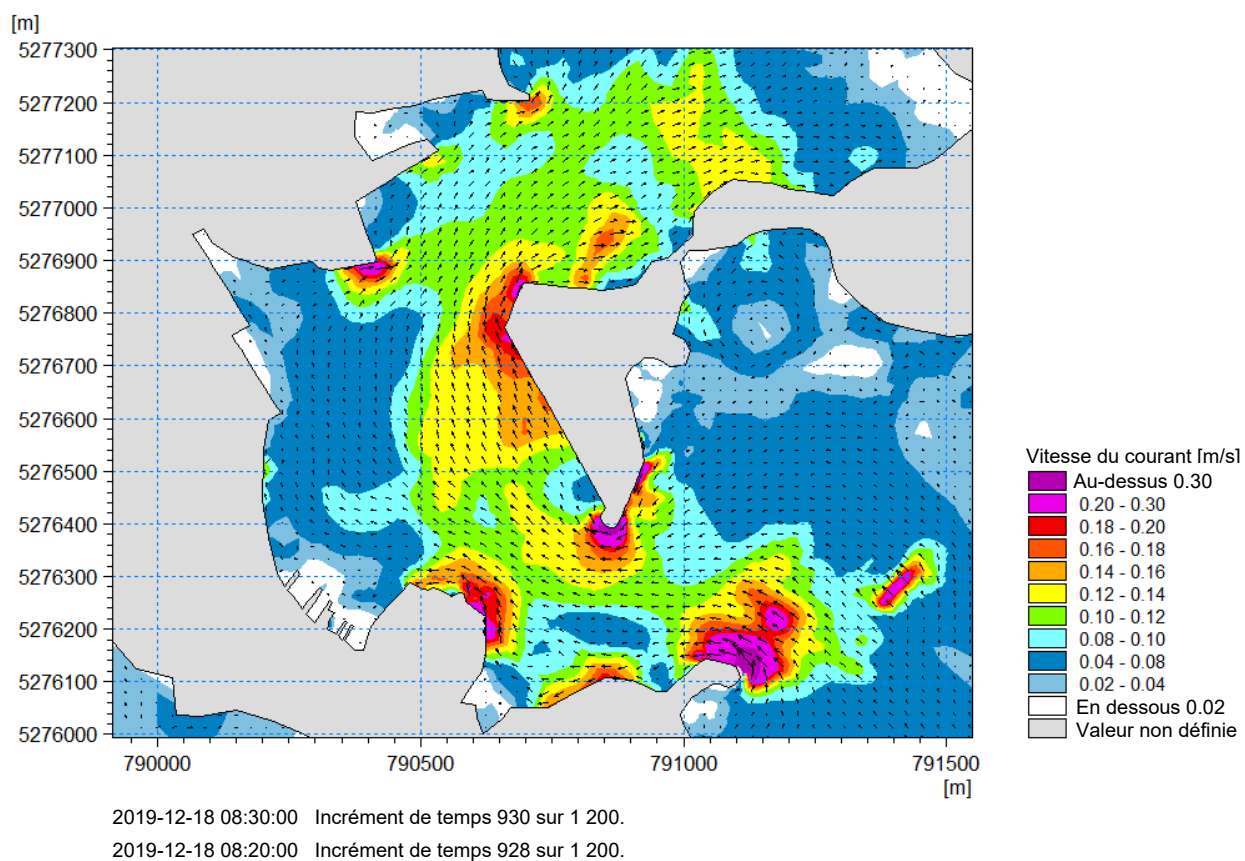


Figure 4.1 : Instantanés des courants de seiche modélisés (au pic de la marée descendante et en début de marée montante) après suppression de l'île et remplissage.

4.3 Conditions de houle

4.3.1 HOULE DU SUD-EST

La Figure 4.2 présente une modélisation de l'agitation des vagues correspondant à une tempête d'une récurrence d'un an venant du sud-est. Les conclusions sont les suivantes :

- La suppression de l'île (graphique du milieu) entraînera une augmentation de l'agitation des vagues du sud-est au niveau des quais de MAI par rapport aux conditions actuelles (graphique du haut);
- L'ajout de remblai à l'arrière du brise-lames de l'île Pikes (graphique du bas) ne devrait pas entraîner de changements significatifs de l'agitation des vagues du sud-est par rapport au scénario prévoyant uniquement la suppression de l'île (graphique du milieu);
- Avec la suppression de l'île et le remblayage (graphiques du milieu et du bas), les conditions de vagues au quai no 2 de MAI devraient être comparables à celles qui existent actuellement (graphique du haut) au quai no 1 de MAI.

4.3.1.1 Commentaires des capitaines

Ces résultats ont été présentés aux capitaines de MAI aux fins de discussion, à l'occasion des réunions d'information organisées avec ceux-ci. Les capitaines ont indiqué que l'agitation actuelle des vagues au quai no 1 n'était pas considérée comme problématique et n'avait pas entraîné d'interruption ni de retard dans les opérations. En conséquence, aucun consensus n'a pu être dégagé quant à la hauteur maximale tolérable des vagues au niveau du quai, cette limite n'ayant jamais été atteinte. C'est le vent qui constitue la principale contrainte opérationnelle.

La hauteur significative des vagues varie le long des quais en raison des phénomènes de réflexion de la houle. Des valeurs représentatives de la hauteur des vagues ont été sélectionnées en un point situé approximativement à mi-longueur du quai, et à une distance équivalente à la moitié de la largeur d'un navire par rapport au quai, afin de réaliser le graphique « Hauteur des vagues en fonction de la vitesse du vent du sud-est » présenté à la Figure 4.3. Ce graphique a été produit afin d'étayer la discussion avec les capitaines sur la question de savoir si l'agitation des vagues peut poser problème selon de la vitesse du vent, qui constitue actuellement le paramètre déterminant pour les retards ou les annulations de traversiers. Les capitaines ont été informés que les conditions de houle au quai no 2 de MAI devraient devenir comparables à celles qui règnent actuellement au quai no 1 de MAI.

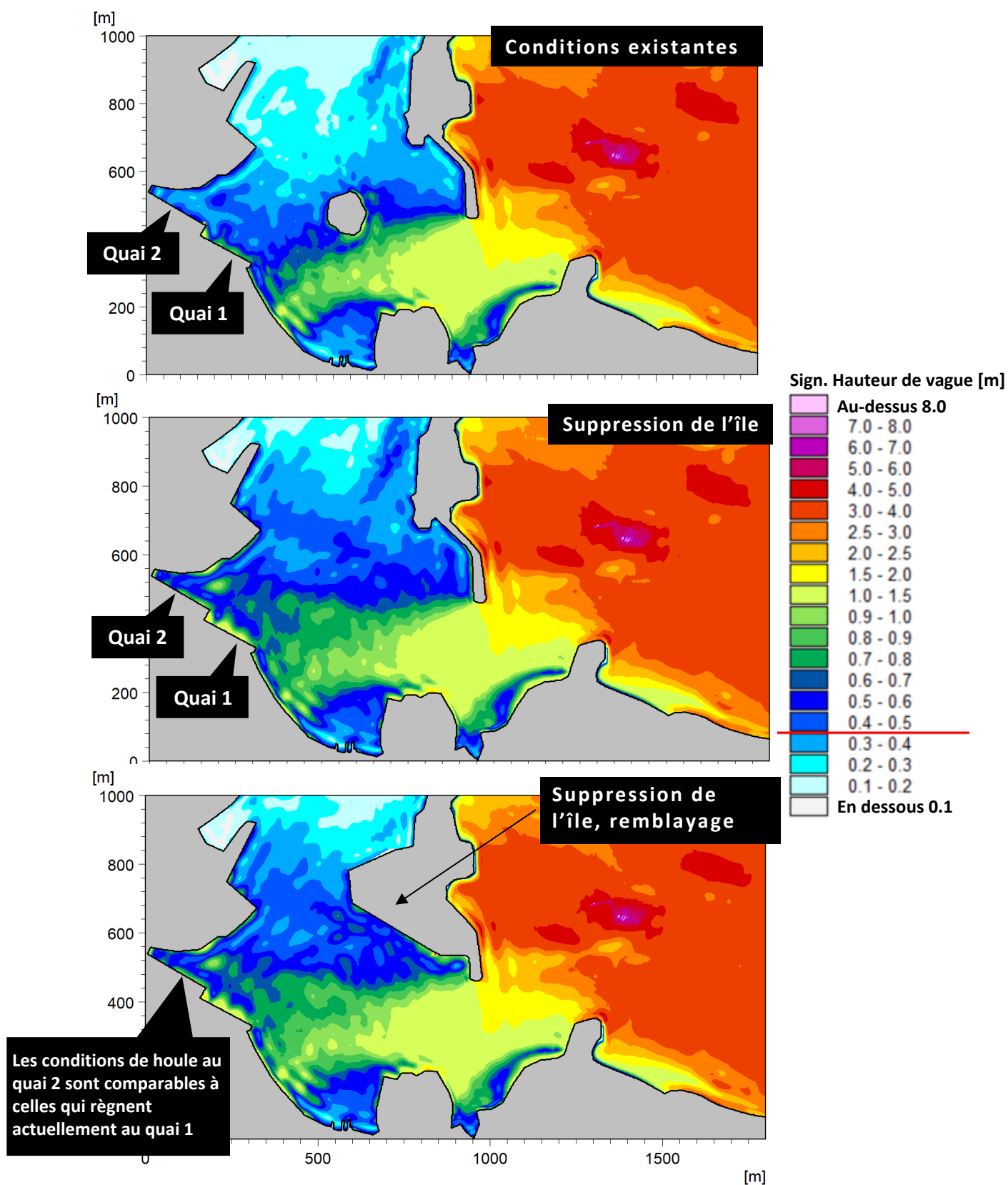


Figure 4.2 : Simulation de l'agitation des vagues générée par une tempête venant du sud-est avec période de retour d'un an, dans les conditions actuelles (en haut), après la suppression de l'île Vardy

(au milieu) et après le remblayage (en bas).

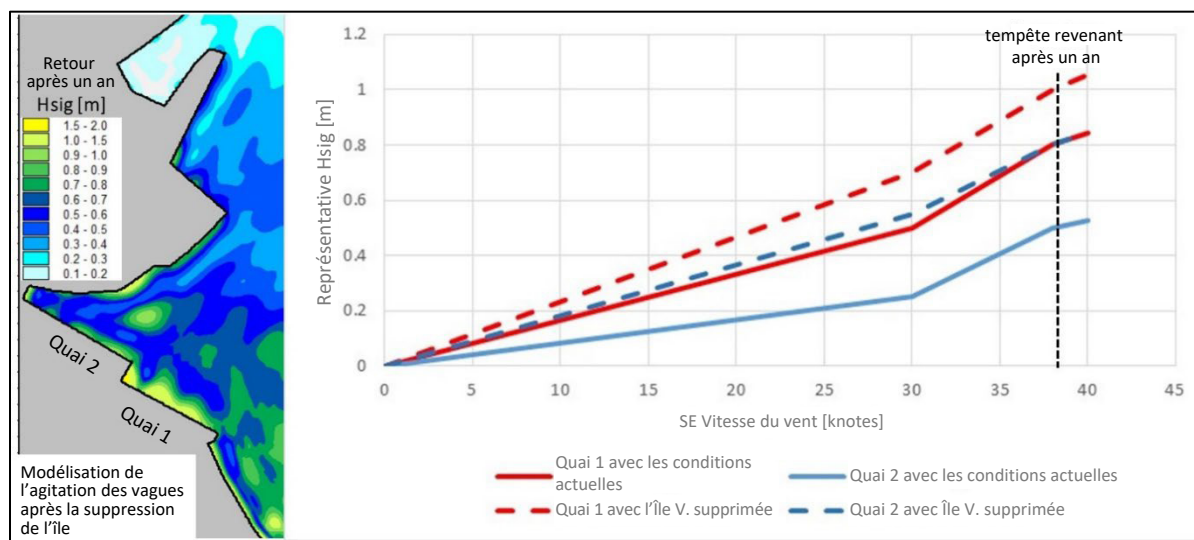


Figure 4.3 : Modélisation de l'agitation des vagues représentative actuelle et future en fonction de la vitesse du vent du sud-est aux quais de MAI.

4.3.1.2 Seuils de hauteur des vagues

Les seuils de hauteur significative de vague indiqués par la World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC 1995) pour les transbordeurs de voitures varient entre 0,4 et 0,6 m. L'agitation des vagues à quai dépasse parfois 0,4 m, sans que cela ne suscite d'inquiétudes de la part des capitaines. Par conséquent, la valeur maximale des données du PIANC, soit 0,6 m, pourrait s'avérer plus représentative et correspondrait à des vitesses de vent du sud-est comprises entre 25 et 32 nœuds pour les scénarios futurs aux quais 1 et 2, respectivement. Ces vitesses de vent sont proches du seuil de vent habituel actuel, compris entre 30 et 35 nœuds. Il est donc peu probable que l'agitation future des vagues devienne le paramètre déterminant dans des conditions de vent du sud-est fort, mais moins fréquent.

Cette conclusion a été globalement confirmée par les capitaines lors de la présentation de ces résultats, ceux-ci ayant notamment indiqué que les conditions de houle au quai no 2 deviendraient à l'avenir comparables à celles qui ont cours actuellement au quai no 1. Les capitaines ont indiqué que :

- Le vent devrait rester le paramètre déterminant, car les augmentations prévues de la hauteur des vagues n'ont pas été jugées susceptibles de perturber les opérations.
- L'augmentation de l'agitation des vagues pourrait être atténuée en améliorant les systèmes d'amarrage, notamment, mais sans s'y limiter, par l'ajout d'une butée de poupe et d'un duc-d'Albe de proue au quai no 1.
- À l'avenir, le quai no 2 devrait rester le lieu d'amarrage privilégié, le quai no 1 n'étant utilisé que lorsque des travaux d'entretien sont effectués sur le quai no 2.

4.3.1.3 Érosion du littoral

L'érosion se produit généralement lorsque la houle océanique vient frapper un littoral érodable constitué de sédiments meubles ou de roches friables. Le modèle indique que la zone où l'action de la houle sera modérément accrue s'étendra le long du littoral au nord-ouest de l'île, qui est déjà protégé

soit par des enrochements, soit par des structures rigides et des quais. Il n'y a donc aucune raison de craindre que la suppression de l'île n'entraîne une érosion accrue du littoral.

4.3.2 VAGUES DUES AU VENT PROVENANT DU NORD-EST

L'île de Vardy offre actuellement une protection partielle aux quais de la ville contre les vagues provoquées par les vents du nord-est. Le modèle spectral des vagues a été utilisé pour évaluer les conditions de vagues dues au vent générées localement par le nord-est (Figure 4.4). La suppression de l'île de Vardy aurait accru l'agitation des vagues du nord-est au niveau des quais de la ville par rapport aux conditions actuelles. Toutefois, cet effet devrait être atténué par le nouveau remblayage, à tel point que l'agitation des vagues aux quais de la ville ne devrait pas dépasser les conditions actuelles.

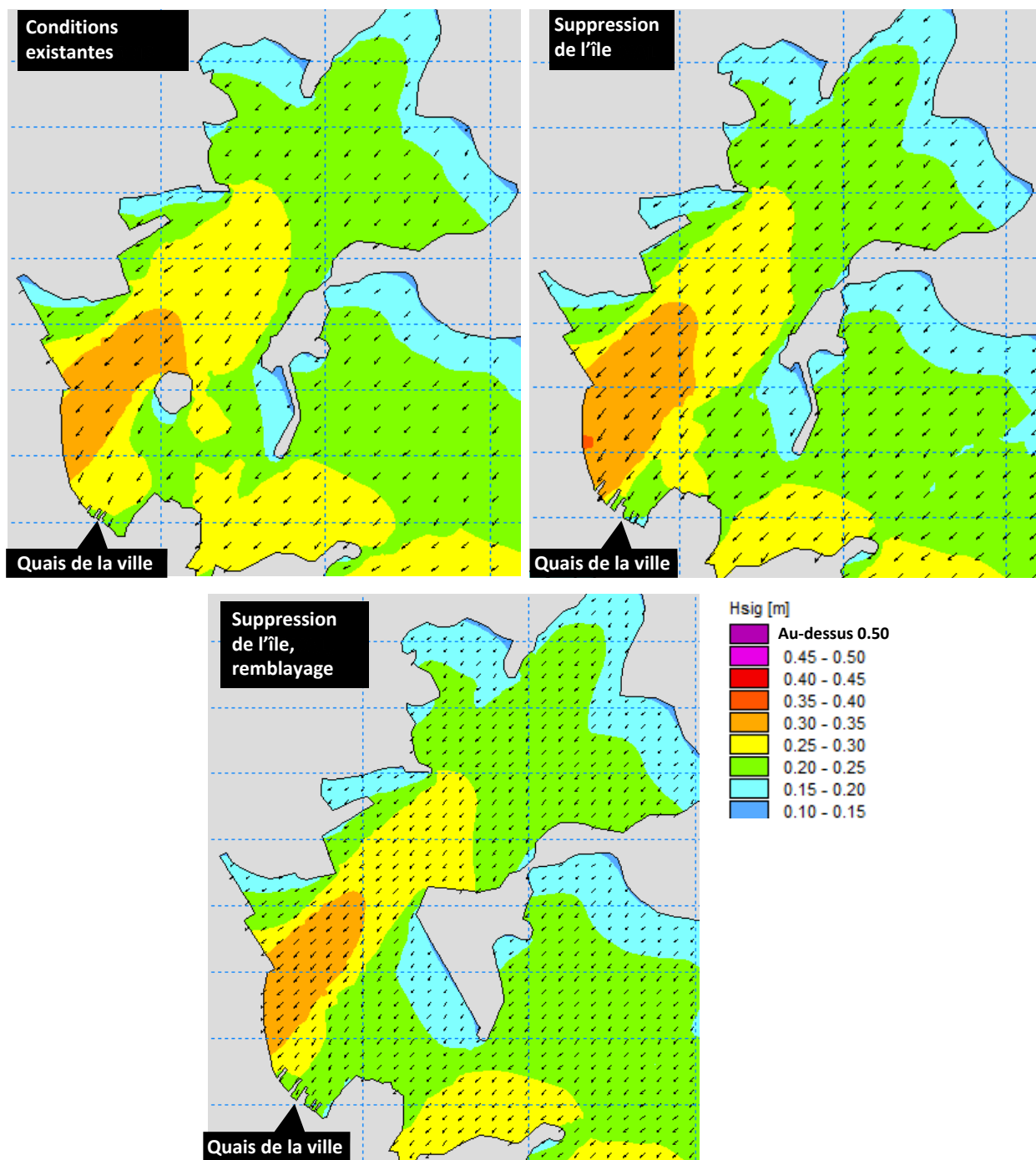


Figure 4.4 : Simulation de l'agitation des vagues due à une tempête venant du nord-est avec période de retour d'un an dans les conditions actuelles (en haut à gauche), après suppression de l'île Vardy (en haut à droite) et le remblayage (en bas).

4.4 Risque de déplacement des sédiments du lit

Cette section présente une analyse préliminaire de l'incidence que le projet pourrait avoir sur le mouvement des sédiments du lit du bassin du port, après des modifications modélisées des contraintes de cisaillement au niveau du lit. Les contraintes de cisaillement au niveau du lit sont couramment utilisées pour évaluer le déplacement des sédiments sur la couche de fond.

Les contraintes de cisaillement du lit peuvent être comparées aux seuils critiques de contrainte de cisaillement de divers sédiments afin de prédire si un mouvement de sédiments va se produire (US Geological Survey, 2008). La contrainte de cisaillement du lit est une donnée fiable, car elle repose sur des paramètres hydrodynamiques dont la fiabilité est supérieure à celle des paramètres sédimentaires. Les contraintes de cisaillement maximales, qui surviennent lors des courants de tempête maximaux, sont comparées pour les conditions actuelles et la conception proposée (Figure 4.5). Ces cartes permettent d'indiquer le type de mobilisation des sédiments qui se produira lors de ces événements.

La granulométrie présentée en détail dans le rapport du programme sur les sédiments marins indiquait que :

Au nord-est des quais de la ville, les sédiments sont principalement composés de sable, avec un peu d'argile et de gravier. La localisation et la granulométrie médiane des échantillons sédimentaires sont illustrées à la Figure 4.6. La granulométrie médiane (D_{50}) est couramment utilisée pour caractériser le type de sédiment, comme indiqué sur cette figure. Il est peu probable que des sédiments se déplacent au nord-est des quais de la ville sous l'effet de l'hydrodynamique portuaire, car la contrainte de cisaillement critique nécessaire à leur mobilisation est généralement supérieure aux contraintes de cisaillement maximales au fond observées dans le milieu, c'est-à-dire que les sédiments sont trop grossiers pour être entraînés par les courants ambiants. Les zones susceptibles de connaître des mouvements de sédiments comprennent le pourtour des têtes de brise-lames ainsi que la zone située entre l'île Vardy et le brise-lames de l'île Pikes. Le sillage du traversier pourrait entraîner un mouvement supplémentaire des sédiments le long du chenal de navigation.

La suppression de l'île Vardy et le remblayage du brise-lames ne devraient pas entraîner de modification significative des contraintes de cisaillement maximales du lit, ni, par conséquent, du mouvement des sédiments à l'intérieur du port.

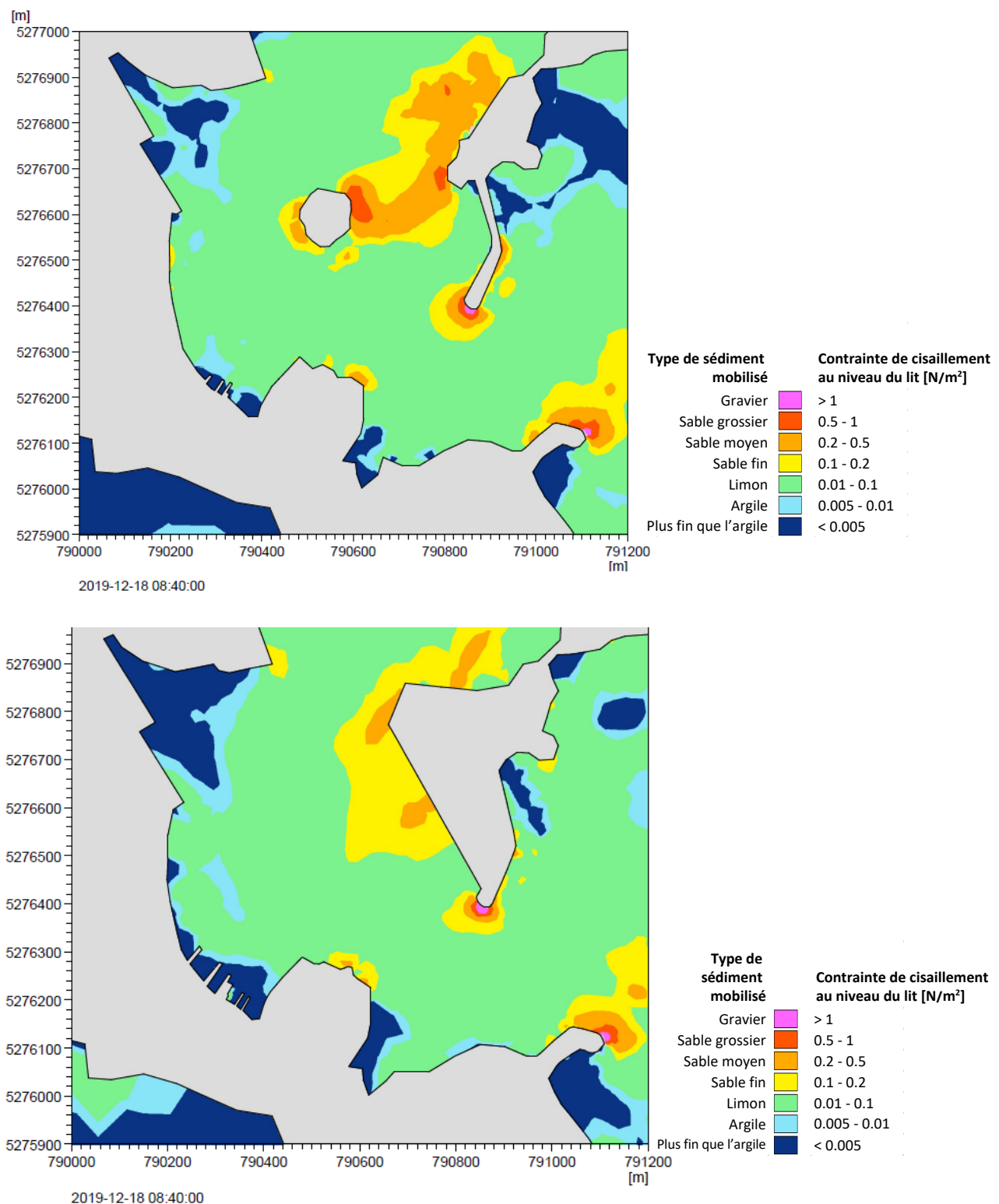


Figure 4.5 : Contraintes de cisaillement maximales modélisées au niveau du lit pour les conditions actuelles (en haut) et futures (en bas), sur la base des seuils établis pour différents types de sédiments.

Note : sur la base d'un modèle hydrodynamique des écoulements et des seiches du port, sans tenir compte de l'effet des vagues, qui serait important à l'extérieur du port et dans les zones de déferlement peu profondes.

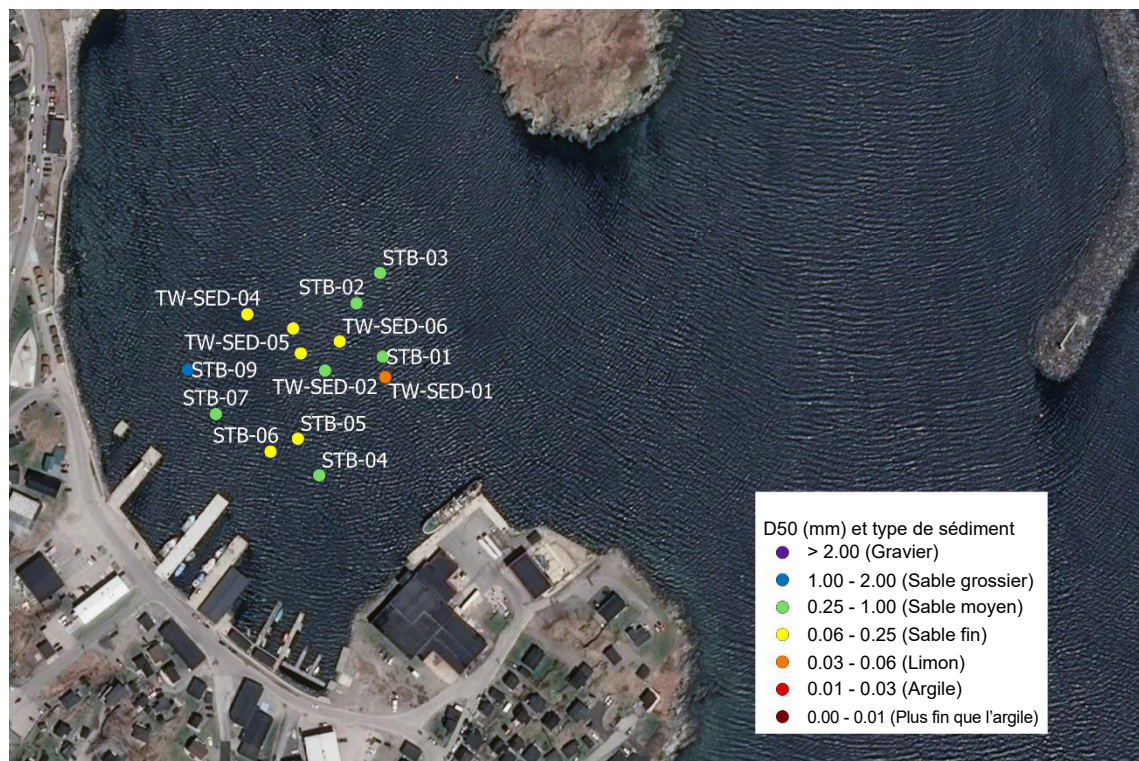


Figure 4.6 : Granulométrie médiane et type de sédiments des échantillons prélevés dans le cadre du programme d'échantillonnage des sédiments marins.

Chapter 5 **Concept pour la réfection de brise-lames**

5.1 Contexte

Dans le cadre de la planification globale des opérations de MAI, des évaluations de l'état des infrastructures ont été réalisées, notamment pour le brise-lames de l'île Pikes et celui de Graveyard Point. Les études précédentes menées par CBCL (2014, 2018) avaient mis en évidence que le brise-lames de l'île Pikes devait être réparé à relativement court terme. Situé au sud, le brise-lames de Graveyard Point est considéré comme disposant d'une réserve suffisante de pierres de protection pour justifier simplement une surveillance continue dans un avenir rapproché.

Parmi les recommandations formulées dans le rapport de 2014, mentionnons :

- Réaliser une surveillance continue, ce qui a conduit à l'évaluation réalisée en 2018 à l'aide d'un drone et qui a mis en évidence des dommages importants le long du corps principal du brise-lames de l'île Pikes (Figure 5.1), ainsi que le fait que le versant sous le vent n'était pas protégé et risquait de subir des dommages importants en cas de grand débordement;
- Effectuer des travaux de réfection pour le brise-lames de l'île Pikes comprenant les étapes suivantes :
 1. poser des pierres de renfort latéral, depuis la crête jusqu'au versant avant endommagé, puis remplacer les pierres de la crête par de nouvelles pierres;
 2. Réparer la totalité de la pente arrière.

5.2 Option de concept de réfection du brise-lames de l'île Pikes

La conception classique d'un brise-lames consiste à déterminer la granulométrie et la pente requises pour les enrochements en fonction des conditions de vagues de référence et du niveau de dégradation souhaité, dans le but de réduire au minimum les quantités de roches nécessaires. Cependant, la composition granulométrique des roches disponibles dans les carrières locales n'est pas clairement établie au stade de la planification. Cette situation, combinée à des conditions de houle très forte, justifierait généralement la conception d'un brise-lames de type « berme ». Un brise-lames en berme consiste à utiliser une couche plus épaisse de pierres d'enrochement dans la zone d'impact des vagues, dont l'épaisseur est déterminée par la granulométrie des matériaux disponibles. La conception d'une berme nécessite généralement des enrochements de plus petite taille, mais en plus grande quantité que dans le cas d'une conception classique à deux couches d'enrochements. La section transversale finale tient compte des contraintes pratiques liées à la construction et permet, une fois les travaux terminés, de remodeler la pente pour qu'elle soit plus plate et stable.

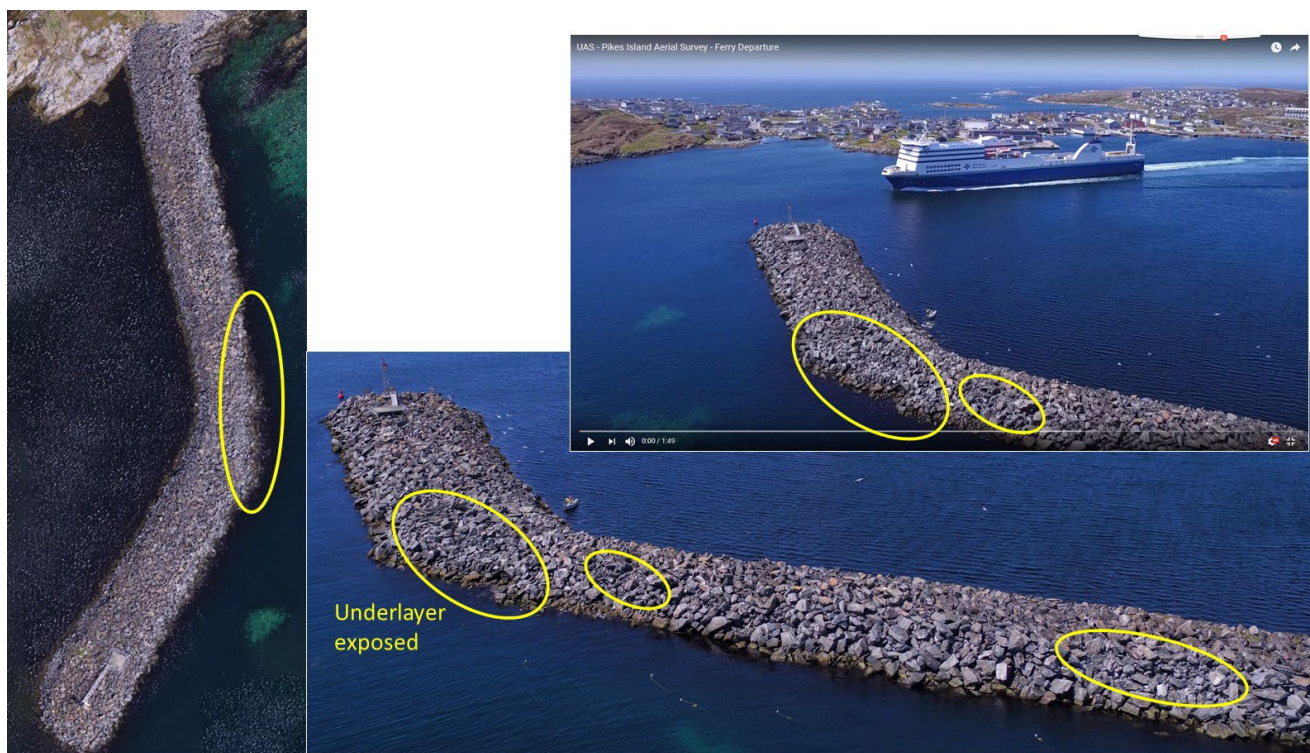


Figure 5.1 : Dommages subis par le brise-lames de l'île Pikes, d'après une étude par drone réalisée en 2018.

Des recommandations relatives à la conception géométrique des brise-lames à berme sont présentées dans l'ouvrage de Van der Meer et Sigurdason (2016), ainsi que des outils de calcul pour la conception préliminaire. Une coupe transversale schématique est présentée à la Figure 5.2. La conception repose sur les hypothèses suivantes :

- Conditions de vagues de référence : $H_s = 3,8 \text{ m}$, $T_p = 12,4 \text{ s}$
- Utilisation de 3 catégories de roches (0,3 à 1, 1 à 3 et 3 à 5 tonnes)
- Densité supposée de la roche : $2\,650 \text{ kg/m}^3$
- Nouvelle hauteur de crête : $8,0 \text{ m ZC}$
- Largeur du talus : environ 12 m
- Réaménagement partiel d'un brise-lames de type berme.

La conception des travaux de réparation du brise-lames dépendra du type et des quantités de roches disponibles.

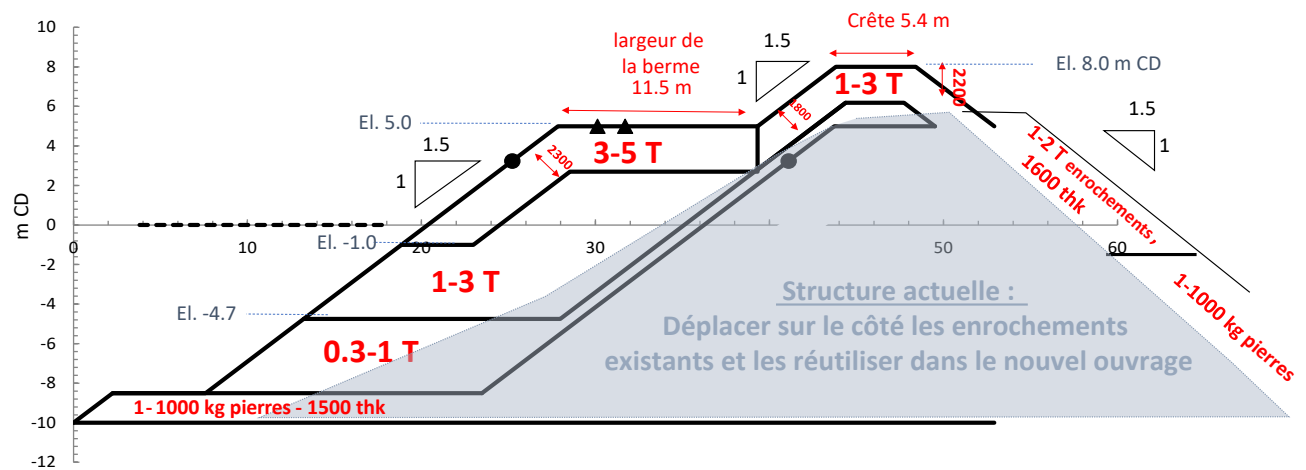


Figure 5.2 : Coupe transversale de concept pour la réparation du brise-lames de l'île Pikes.

Une étude d'ingénierie côtière a été réalisée afin d'étayer la conception et l'évaluation des impacts du projet d'amélioration de la navigation proposé par MAI à Port aux Basques. Les observations sur le terrain réalisées durant l'hiver 2019-2020 ont servi à étalonner un modèle hydrodynamique et houlométrique du port.

Les conditions de houle devraient changer au niveau des quais de MAI après la suppression de l'île de Vardy et les travaux de remblayage le long du brise-lames de l'île Pikes. Les conditions de houle au quai no 2 de MAI, qui est moins exposé, devraient devenir comparables à celles qui règnent actuellement au quai no 1, plus exposé. Les capitaines ont indiqué que cela ne constituait pas un sujet de préoccupation majeure, pour les raisons suivantes :

- Le vent devrait rester le paramètre déterminant, car les augmentations prévues de la hauteur des vagues n'ont pas été jugées susceptibles de perturber les opérations.
- L'augmentation de l'agitation des vagues pourrait être atténuée en améliorant les systèmes d'amarrage, notamment, mais sans s'y limiter, par l'ajout d'une butée de poupe et d'un duc-d'Albe de proue au quai no 1.
- À l'avenir, le quai no 2 devrait rester le lieu d'amarrage privilégié, le quai no 1 n'étant utilisé que lorsque des travaux d'entretien sont effectués sur le quai no 2.

La suppression de l'île de Vardy aurait accru l'agitation des vagues du nord-est au niveau des quais de la ville par rapport aux conditions actuelles. Toutefois, cet effet devrait être atténué par le nouveau remblayage, à tel point que l'agitation des vagues aux quais de la ville ne devrait pas dépasser les conditions actuelles.

Les tendances historiques en matière de vitesse du vent laissent présager une augmentation des épisodes de vents violents. La perspective d'un avenir marqué par des tempêtes plus violentes en raison du changement climatique doit être prise en compte dans la planification et la conception des infrastructures. Le projet d'amélioration de la navigation proposé vise à renforcer la résilience des opérations de MAI en conditions de vents violents, qui demeureront le paramètre le plus contraignant sur le plan opérationnel.

Enfin, les opérations de dragage permettront de récupérer de grandes quantités de roches qui pourront être valorisées comme matériau de remblayage. Ce projet offre également l'occasion de réparer les dégâts qu'a subis le brise-lames de l'île Pikes. Compte tenu des difficultés potentielles à obtenir des roches de la taille voulue dans des carrières locales, un concept de brise-lames de type « berme » a été mis au point. Le concept proposé consiste à utiliser une couche plus épaisse de pierres d'enrochement dans la zone d'impact des vagues, dont l'épaisseur est déterminée par la granulométrie des matériaux disponibles. La section transversale finale tiendra compte des contraintes pratiques liées à la construction et permettra, une fois les travaux terminés, de remodeler la pente pour qu'elle soit plus

plate et stable. La conception évoluera à mesure que de nouvelles informations seront disponibles concernant les types et les quantités de roches disponibles.

Le présent document a été préparé à l'intention de la partie mentionnée ici. Le contenu et les informations figurant dans le présent document reflètent l'opinion et le meilleur jugement de CBCL Limited, fondés sur les informations disponibles au moment de sa préparation. Toute utilisation du présent document ou tout recours à son contenu par des tiers relève de la responsabilité de ces derniers. CBCL Limited décline toute responsabilité pour tout préjudice subi du fait de l'utilisation de ce document par des tiers.

- CBCL 2014. Port-aux-Basques Wave Climate and Breakwater Study. Préparé pour MAI. Tâche 1.6.2.5 de MAI.
- Charnock, H. 1955. Wind stress on a water surface. Q. J. R. Meteorol. Soc. 81, 639-640. DOI : 10.1002/qj.49708135027.
- Cheng, C.S. et Lopes, E., 2014. "Possible Impacts of Climate Change on Wind Gusts under Downscaled Future Climate Conditions: Updated for Canada". Journal of Climate, p. 1255 à 1270. DOI : 10.1175/JCLI-D-13-00020.1. <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/27/3/1255/34924/Possible-Impacts-of-Climate-Change-on-Wind-Gusts>
- GIEC, 2013. Résumé à l'intention des décideurs. Dans : Rapport 2013 du GIEC sur le changement climatique : les bases scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V., Bex et P.M. Midgley (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.
- PIANC 1995. Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours – A Practical Guide. Rapport du groupe de travail no 24, supplément au bulletin no 88.
- U.S. Geological Survey, 2008. Simulation of Flow Sediment Transport, and Sediment Mobility of the Lower Coeur d'Alene River, Idaho. Rapport sur les recherches scientifiques 2008 – 5093.
- Van der Meer, J. et Sigurdason, S., 2016. Design and Construction of Berm Breakwaters. World Scientific Publishing. ISBN-10 : 9814749605.

Vent de terre et climat des vagues



Figure A.1 : Site de la simulation rétrospective des vents et des vagues MSC50 en mer (M6012515, à 47,5 N 59,1 O, 1954-2018) et bouée de mesure des vagues SmartAtlantic (47° 33,7705' N, 59° 006,0239' O, de 2013 à aujourd'hui).

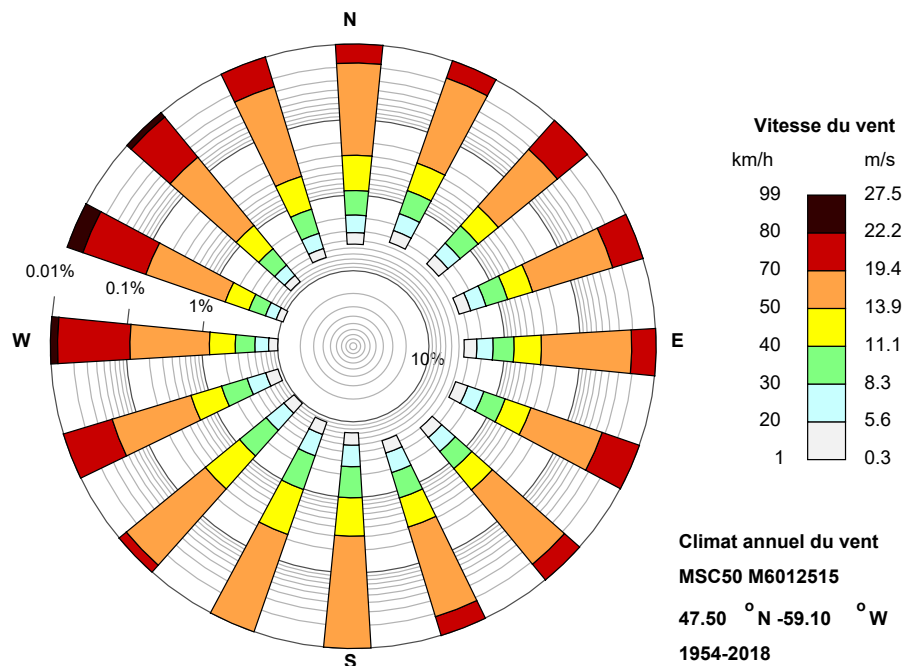


Figure A.2 : Fréquences annuelles de la vitesse du vent par direction

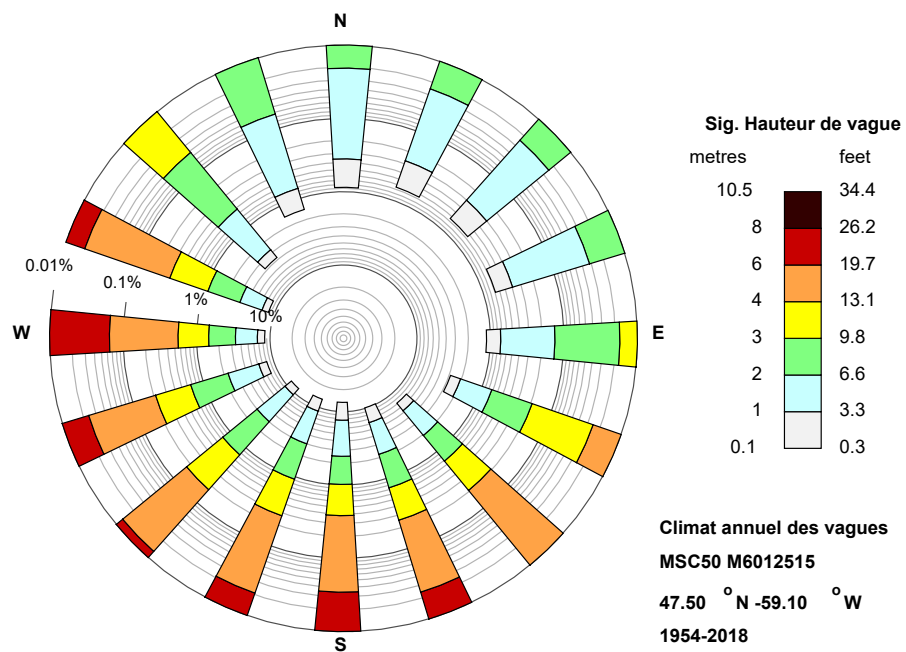


Figure A.3 : Fréquences annuelles de la hauteur significative des vagues par direction

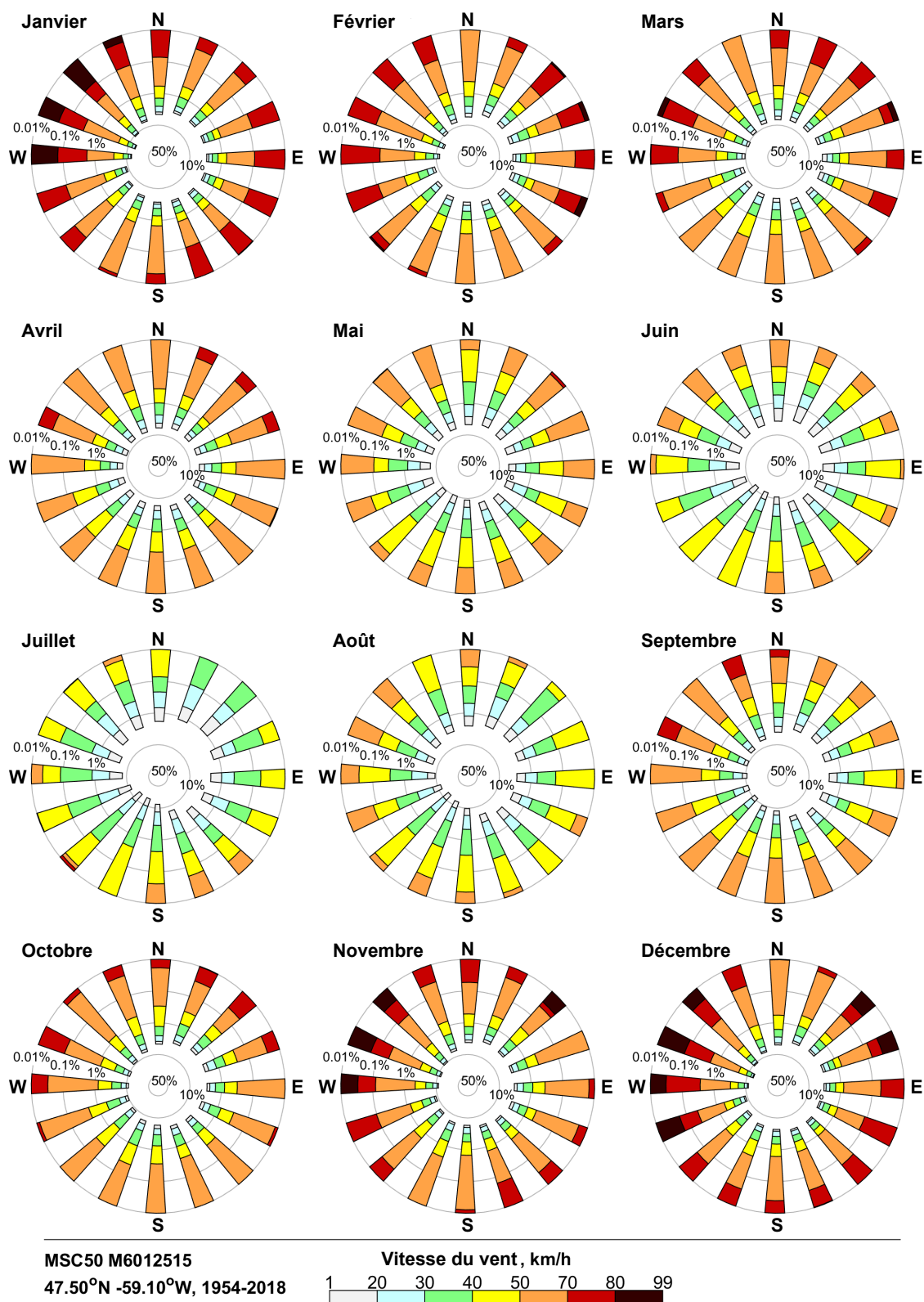


Figure A.4 : Fréquences mensuelles de la vitesse du vent par direction

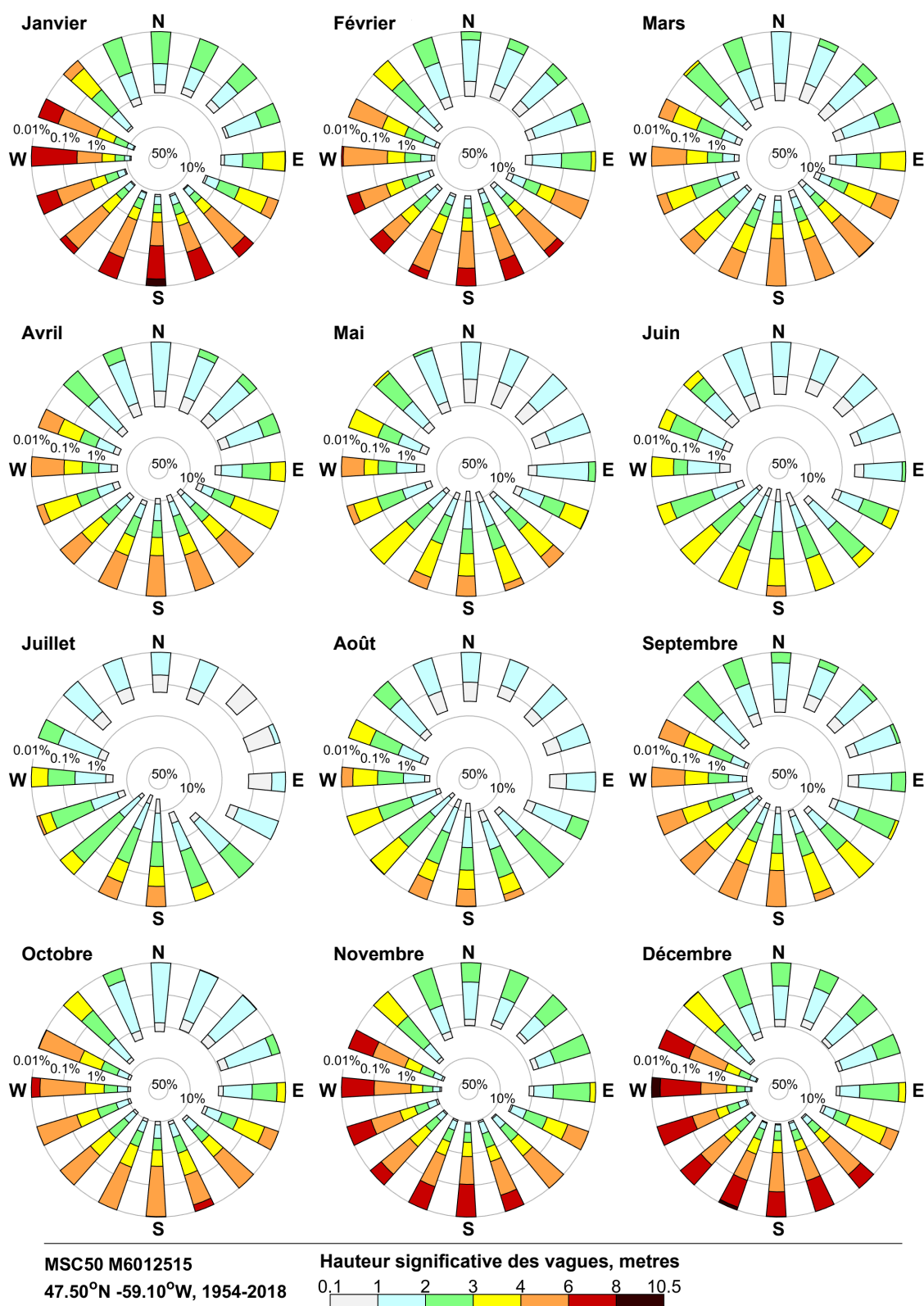
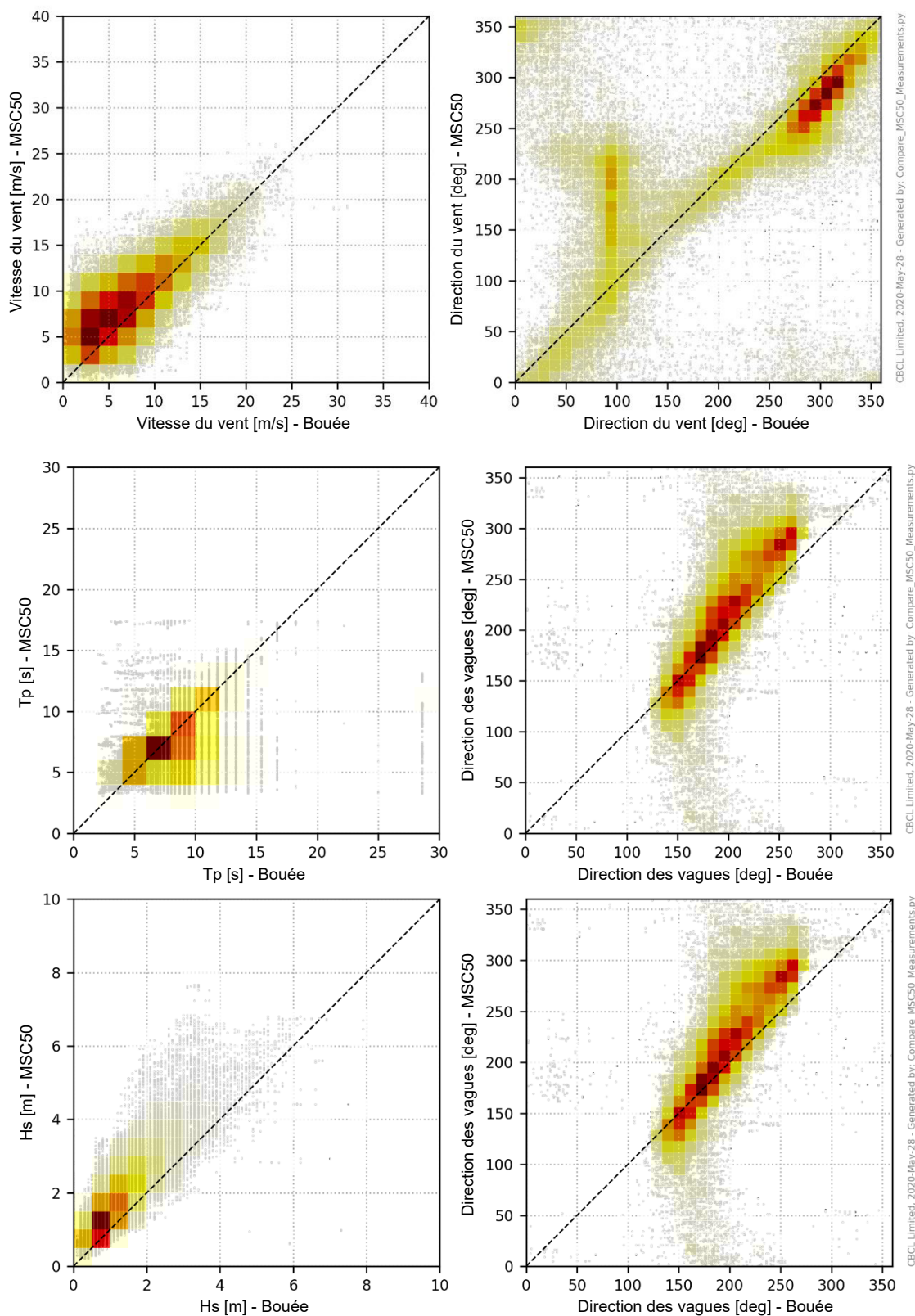


Figure A.5 : Fréquences mensuelles de la hauteur significative des vagues par direction

Tableau A.1 Valeurs extrêmes issues du modèle MSC50 M6012515 (1954-2018)

Dir.	PR (années)	Hs (m)	Tp (s)	Vitesse du vent horaire (m/s)	(nœuds)
N	1	2,1	8,8	18,1	35
	10	3,1	10,8	21,7	42
	25	3,4	11,4	22,8	44
	50	3,7	11,8	23,6	46
	100	3,9	12,2	24,4	47
NE	1	2	7,9	18,5	36
	10	3	10,4	22,6	44
	25	3,3	11,1	23,8	46
	50	3,6	11,6	24,6	48
	100	3,9	12	25,4	49
E	1	2,8	8,6	19,7	38
	10	3,7	9,8	22,7	44
	25	4	10,1	23,6	46
	50	4,2	10,4	24,3	47
	100	4,4	10,6	25	49
SE	1	5,2	10,7	19,4	38
	10	6,8	11,9	22,8	44
	25	7,5	12,2	24,3	47
	50	7,9	12,5	25,5	50
	100	8,4	12,7	26,7	52
S	1	6,1	11	18,4	36
	10	7,8	12,3	21,7	42
	25	8,9	13	23	45
	50	9,9	13,5	23,9	46
	100	11	14	24,9	48
SO	1	5,4	10,7	18,5	36
	10	7,1	11,1	22,6	44
	25	7,6	11,2	24,1	47
	50	8	11,3	25,2	49
	100	8,4	11,3	26,4	51
O	1	5,8	10,8	21	41
	10	7,3	11,3	23,9	46
	25	7,8	11,5	24,9	48
	50	8,2	11,6	25,5	50
	100	8,6	11,7	26,2	51
NO	1	3,7	10,7	20,4	40
	10	5,5	11,8	24,2	47
	25	6,1	12,1	25,6	50
	50	6,5	12,3	26,7	52
	100	7	12,5	27,7	54

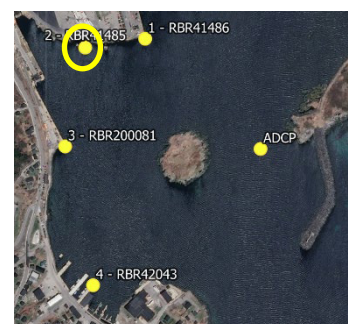
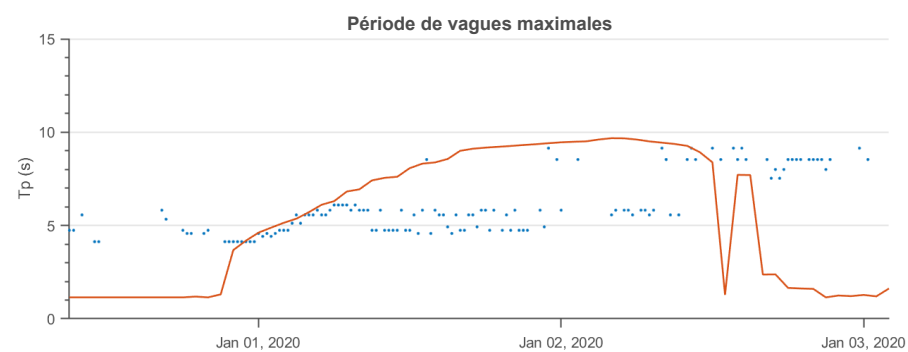
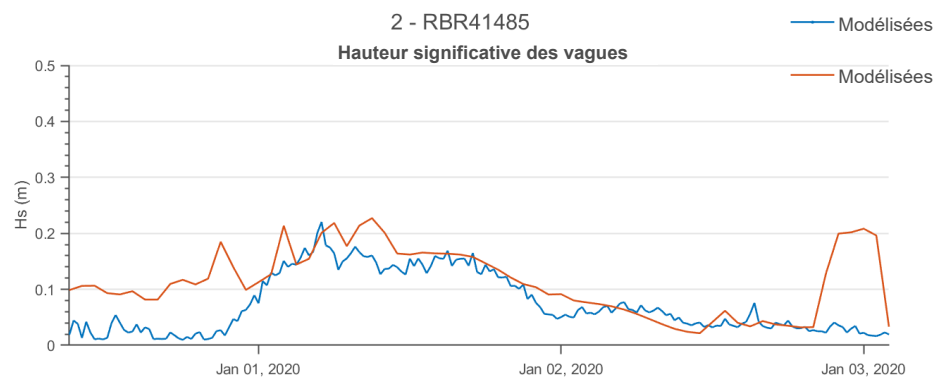
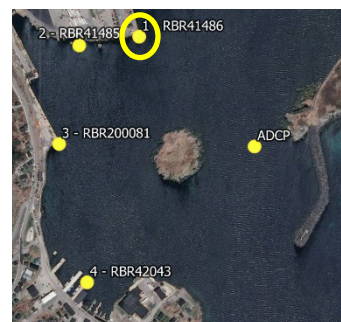
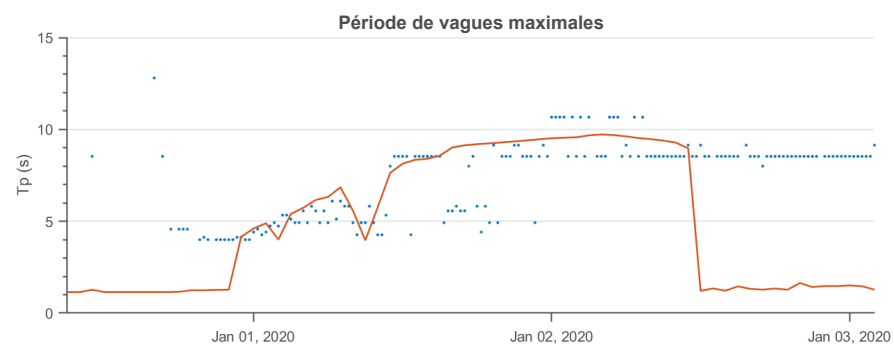
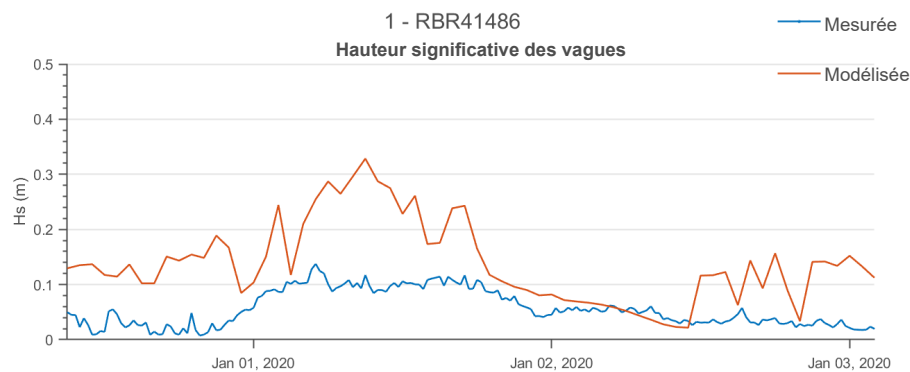
Comparaison entre le MSC50 et la bouée en mer de PAB (2013-2018)



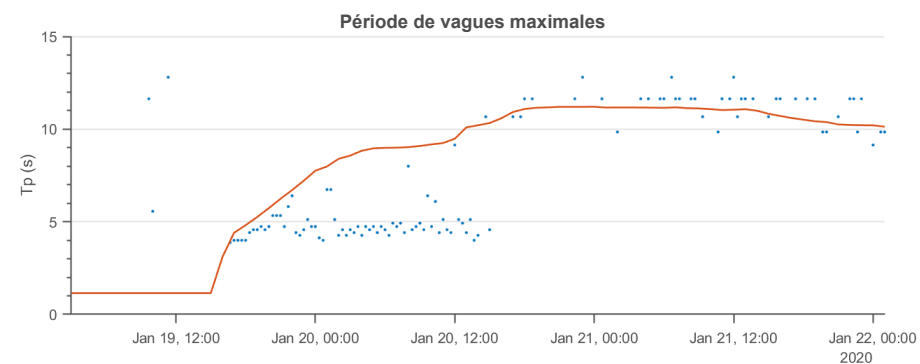
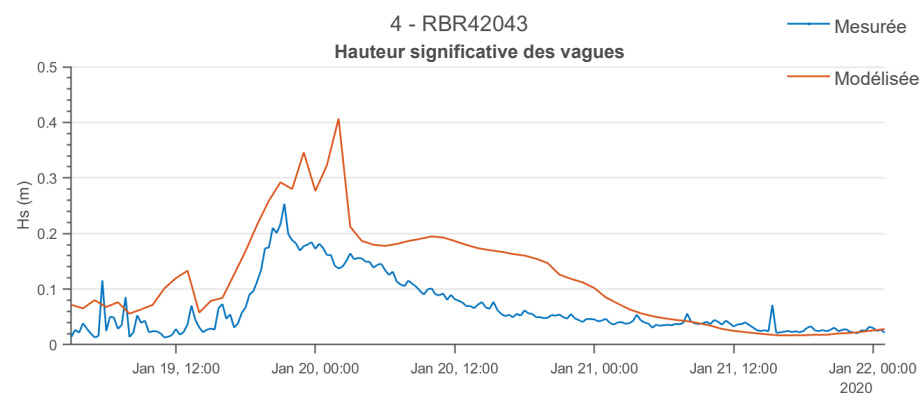
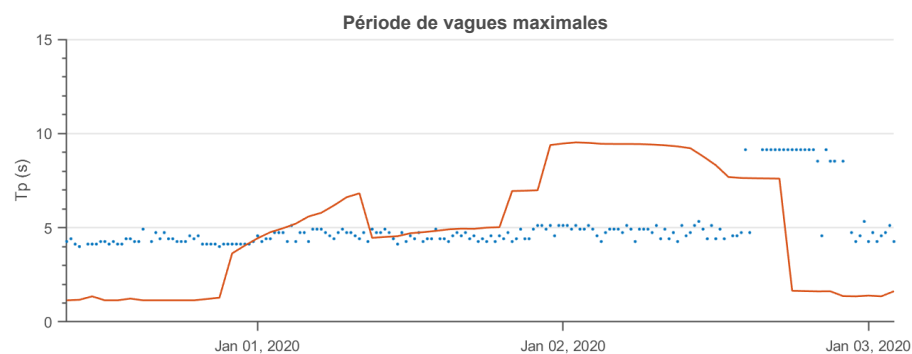
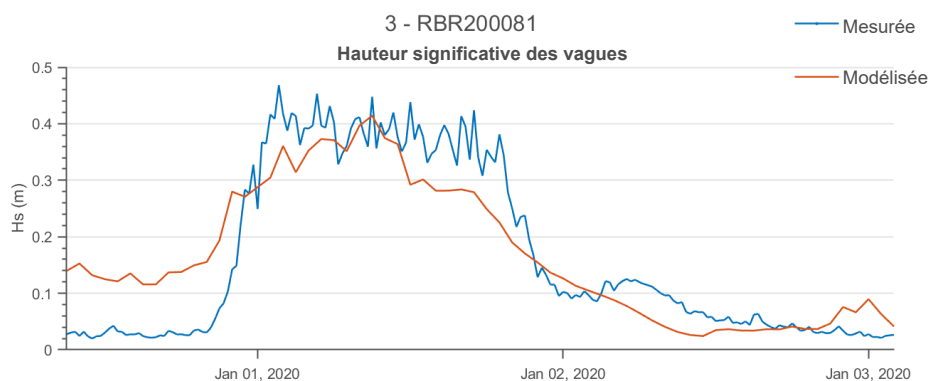
ANNEXE B

Courbes d'étalonnage du modèle spectral des vagues régional

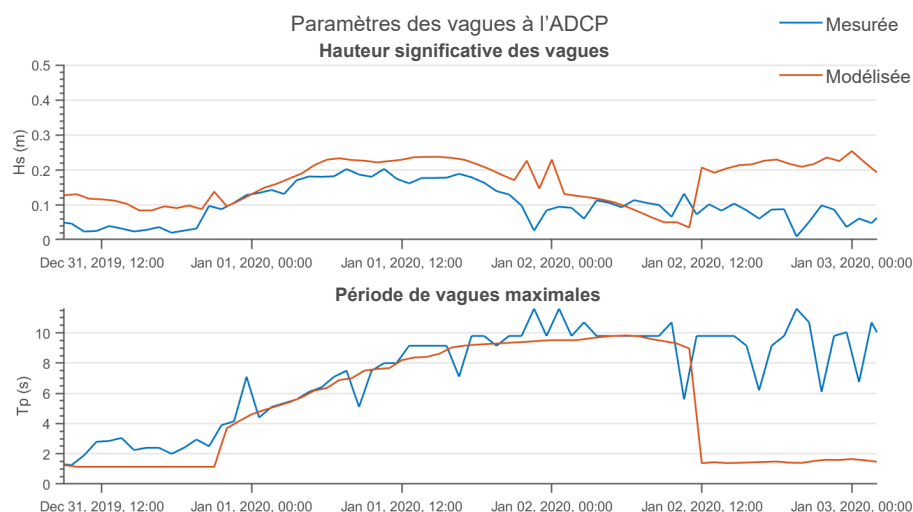
Étalonnage du modèle spectral de prévision de vague (SPV), tempête du 1^{er} janvier 2020



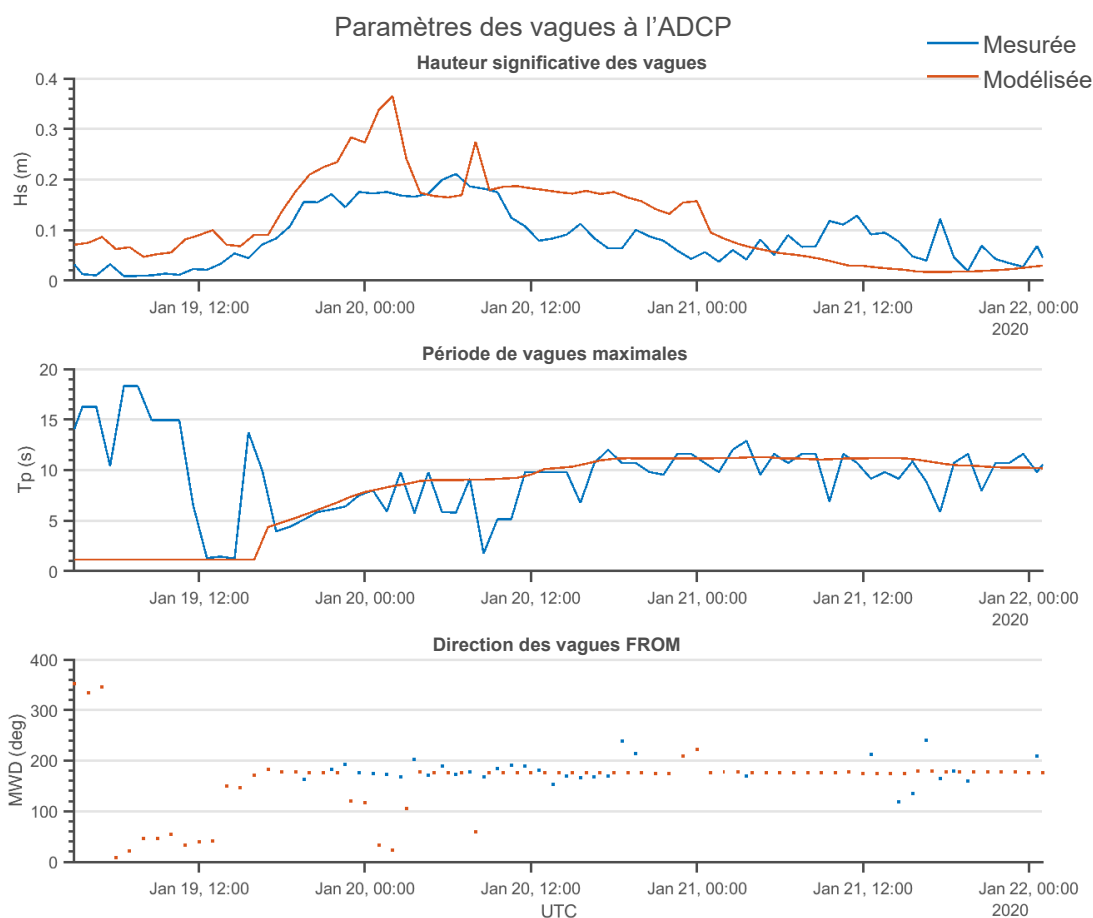
Étalonnage du modèle spectral de prévision de vague (SPV), tempête du 1^{er} janvier 2020



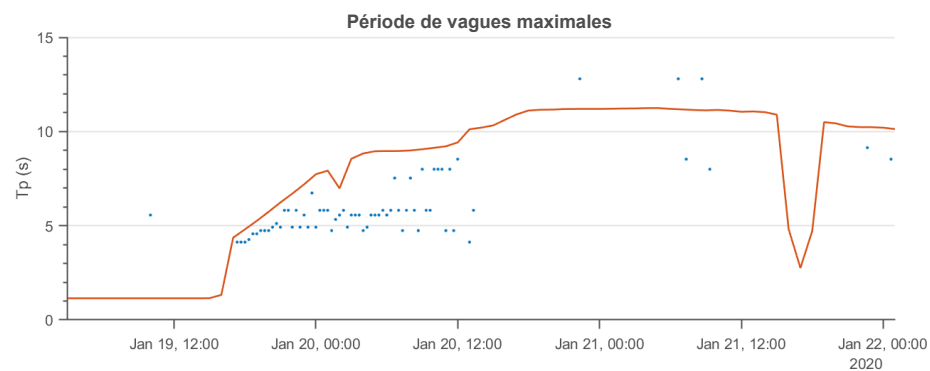
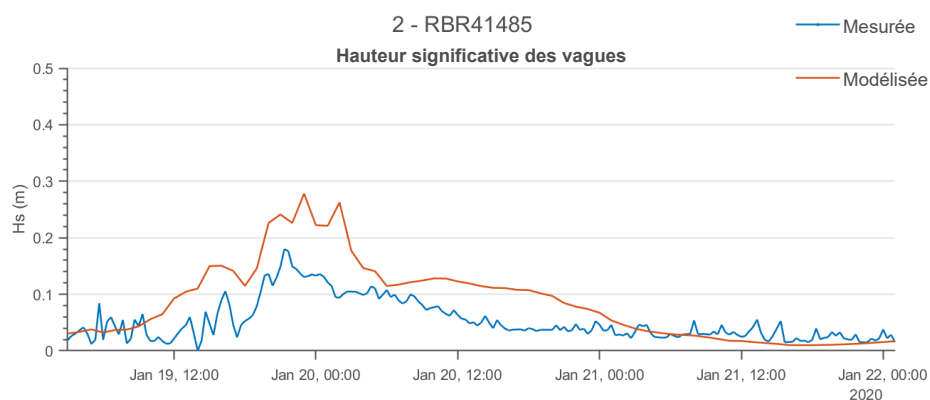
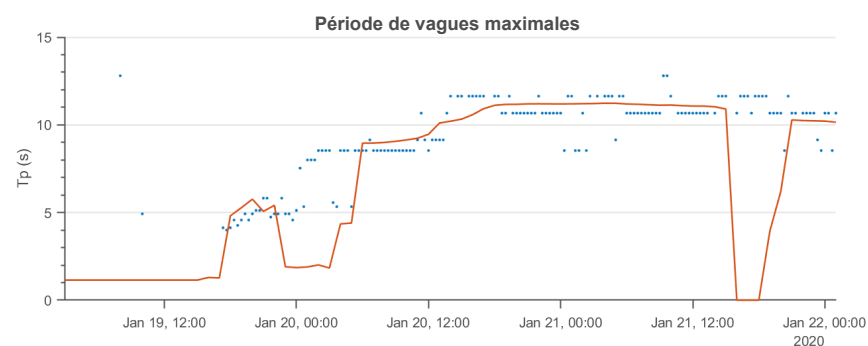
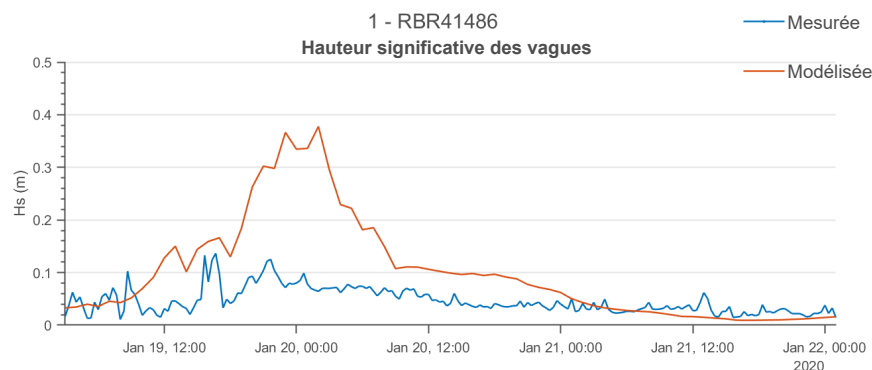
Étalonnage du modèle spectral de prévision de vague (SPV), tempête du 1^{er} janvier 2020



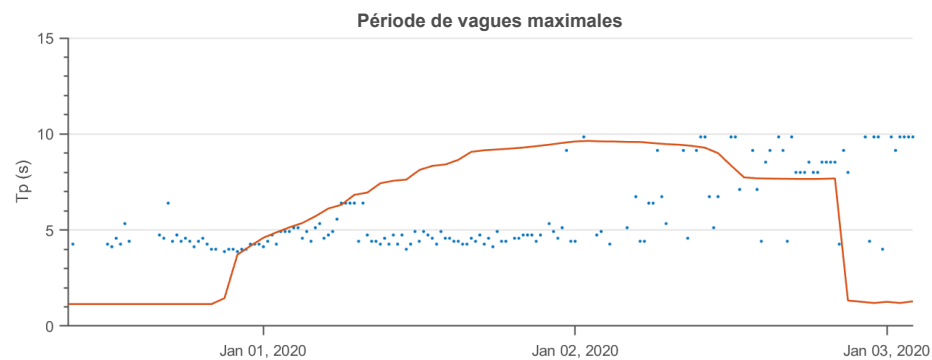
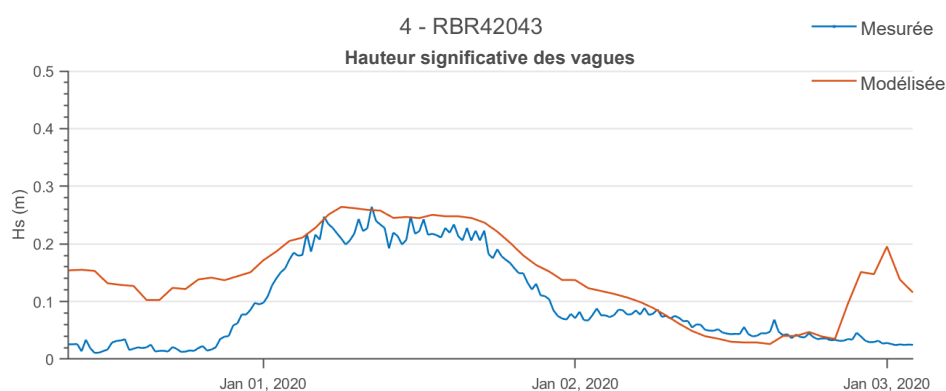
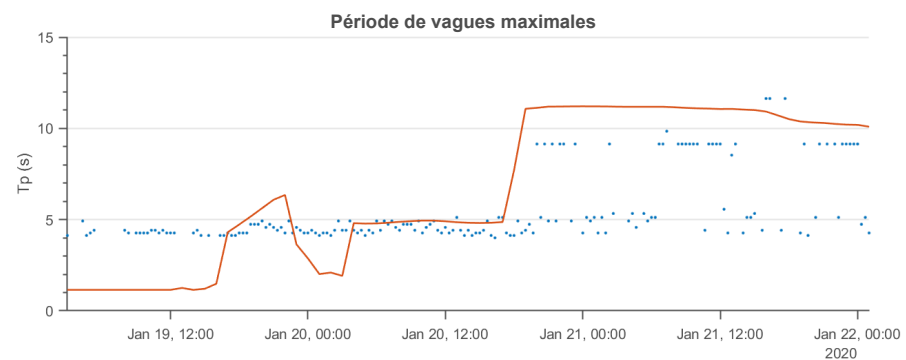
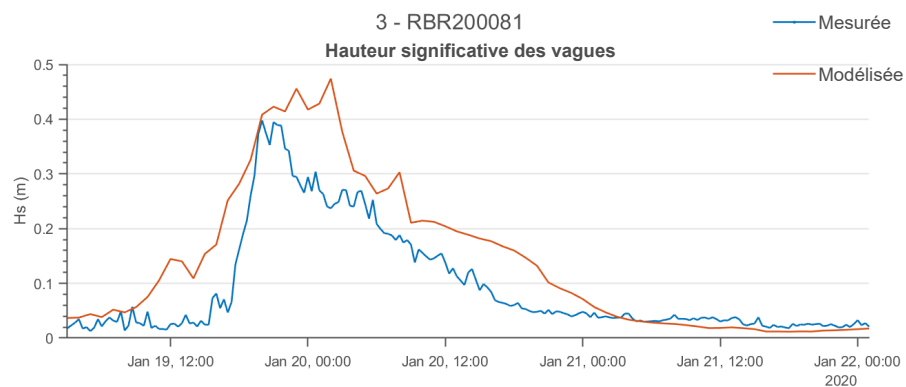
Étalonnage du modèle spectral de prévision de vague (SPV), tempête du 20 janvier 2020

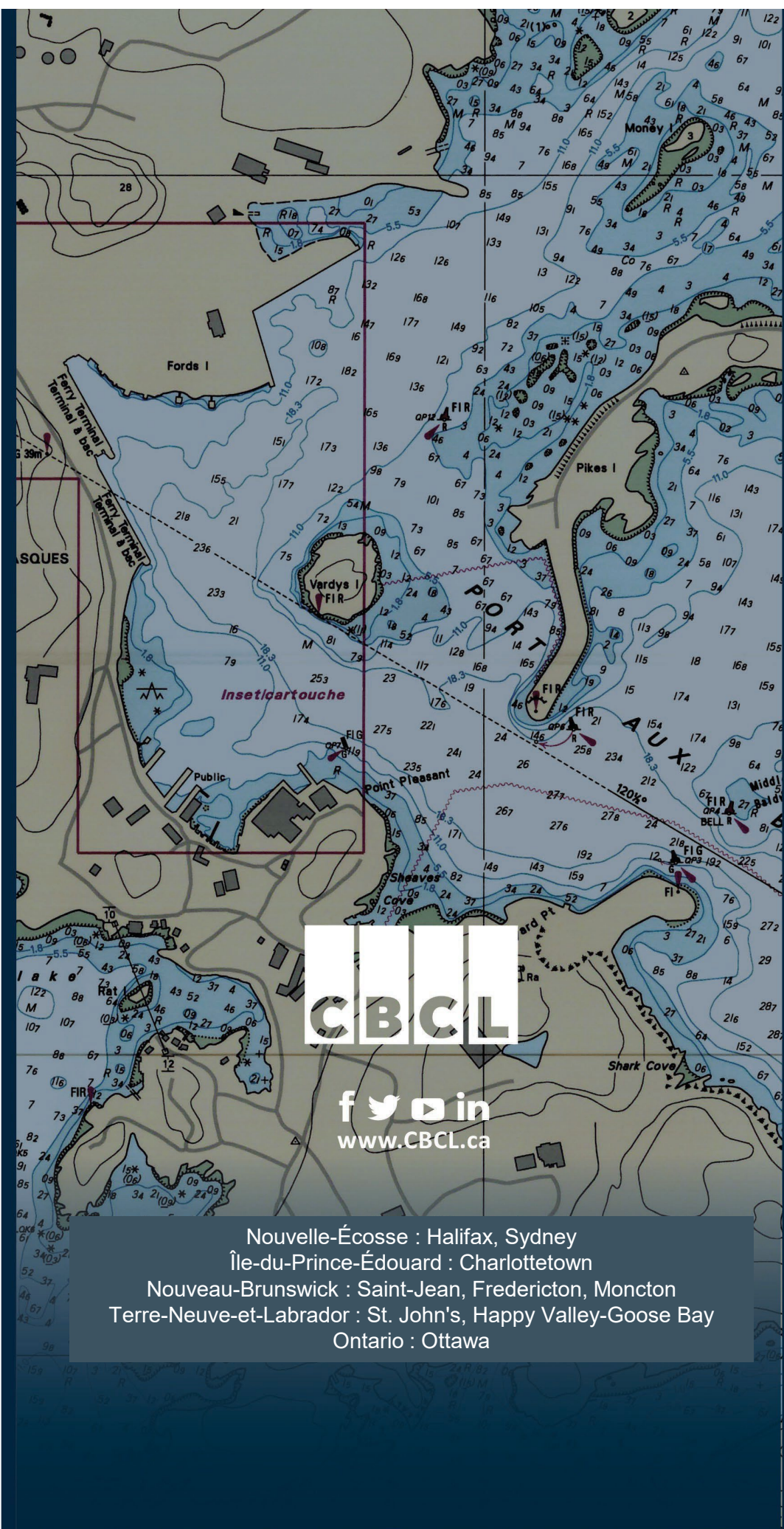


Étalonnage du modèle spectral de prévision de vague (SPV), tempête du 20 janvier 2020



Étalonnage du modèle spectral de prévision de vague (SPV), tempête du 20 janvier 2020





f t y in
www.CBCL.ca

Nouvelle-Écosse : Halifax, Sydney
Île-du-Prince-Édouard : Charlottetown
Nouveau-Brunswick : Saint-Jean, Fredericton, Moncton
Terre-Neuve-et-Labrador : St. John's, Happy Valley-Goose Bay
Ontario : Ottawa