

Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO)

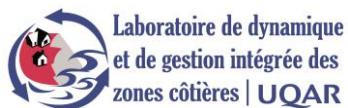
Phase II : rapport final

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.

Mars 2017

CHAIRE DE RECHERCHE
EN GÉOSCIENCE CÔTIÈRE



ÉQUIPE DE RÉALISATION

DIRECTION ET RECHERCHE

Pascal Bernatchez, Ph. D. Géomorphologie côtière et télédétection

Responsable du projet

Professeur titulaire de la Chaire du Québec en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)

Département de biologie, chimie et géographie

Université du Québec à Rimouski

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Adrien Lambert, Ph. D. Morphodynamique côtière. Modélisation et analyse de données, rédaction, Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

Dany Dumont, Ph. D. Sciences de l'eau. Professeur-chercheur, océanographie physique Laboratoire d'analyse et de simulation des systèmes océaniques (LASSO), ISMER.

Caroline Sévigny, Ph. D., Océanographie physique. Auxiliaire de recherche, Interaction vague-glace, ISMER.

Elliott Bismuth, M. Sc. Océanographie physique. Auxiliaire de recherche, Traitement des données de vagues et validation du modèle de vagues (LDGIZC), UQAR.

Evelyne Arsenault, M. Sc. Géographie. Auxiliaire de recherche, analyse des conditions météo-marines pour les événements qui ont provoqué des dommages à la côte (LDGIZC), UQAR.

Jérémy Baudry, M. Sc. Océanographie physique. Auxiliaire de recherche, validation du modèle de vagues, ISMER.

David Didier, M. Sc. Géographie. Candidat au doctorat en Science de l'Environnement, relevés DGPS et instrumentation, UQAR.

Simon Senneville, M. Sc. Physique. Agent de recherche, Laboratoire d'analyse et de simulation des systèmes océaniques modification du code de calcul MOR et fourniture des forçages de niveau d'eau et de courants marins (LASSO), ISMER.

James Caveen, B. Sc en Météorologie. Analyste de l'informatique, implémentation et gestion des ressources de calcul haute-performance dédiées au projet ISMER-UQAR.

Louis Cormier, B. Sc. Géographie. Relevés Lidar, traitement des données Lidar, Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

Susan Drejza, M. Sc. Géographie, relevés DGPS, Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

Marion Bandet, Ph. D. Ocean and Resources Engineering, Auxiliaire de recherche. (LDGIZC), UQAR.

REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche tient à remercier le ministère de la Sécurité publique du Québec, le Plan d'action sur les changements climatiques (PACC 2013-2020) et le Fonds Vert pour le financement de ce projet de recherche.



Images de couverture

Haut : Maria, décembre 2010. Municipalité de Maria.

Bas à gauche : Tombolo aux Îles-de-la-Madeleine, LDGIZC — UQAR

Bas au centre : Sainte-Flavie, route 132 après la tempête du 6 décembre 2010, LDGIZC — UQAR

Bas à droite : Route 132 en Haute-Gaspésie le 6 décembre 2010. LDGIZC – UQAR

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Bernatchez, P., Arsenault, E., Lambert, A., Bismuth, E., Didier, D., Senneville, S., Dumont, D., Caveen, J., Sévigny, C., Beaudry, J. Bandet, M. 2017. Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO), Phase II : rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, mars 2017, 172 p. + annexe.

Table des matières

1	Mise en contexte et objectifs généraux	1
2	Quantifier les paramètres morphodynamiques des grands types de littoraux représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.....	3
2.1	Suivi interannuel des conditions hydrodynamiques et de glace en domaine littoral.....	6
2.1.1	Méthodologie.....	6
2.1.2	Résultats : conditions de niveau d'eau et de vague pour la période de suivi sur L'Isle-aux-Coudres.....	15
2.2	Suivi saisonnier de la morphologie de la côte	33
2.2.1	Problématique	33
2.2.2	Méthodologie	33
2.2.3	Résultats	38
3	Produire la climatologie des vagues et des niveaux d'eau pour la période 1979-2015 pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent.....	61
3.1	Périodes modélisées, conditions aux limites et paramétrisation	61
3.2	Paramétrisations et sorties	63
3.3	Protocole de validation	71
3.3.1	Données expérimentales	71
3.3.2	Protocole statistique.....	73
3.3.3	Protocole de comparaison.....	79
3.4	Résultats de la validation	80
3.4.1	Modèle vs données	80
3.4.2	Intercomparaison 1km vs 5 km	115
3.4.3	Intercomparaison forçages MOR-GEM vs MOR-NARR	126
3.5	Conclusion sur la production de la climatologie des vagues et des niveaux d'eau	137
4	Déterminer les temps de retour des conditions météo-marines responsables de l'érosion et de la submersion côtière pour la période de 1979 à 2010	139
4.1	Identification des temps de retour des événements relatés dans les archives	139
4.1.1	Méthodologie.....	139

4.2	Résultats	151
4.2.1	Identification des événements pour chacun des sites	151
4.2.2	Variables maximales pour chacun des événements par sites	152
4.2.3	Identification des temps de retour des événements météo-marins pour chacun des sites	152
4.2.4	Analyse de la direction des vagues.....	158
4.3	Discussion et conclusion relative aux temps de retour des conditions météo-marines responsables de l'érosion et de la submersion côtière	165
4.3.1	Identification des événements	165
4.3.2	Caractérisation des événements.....	165
4.3.3	Les temps de retour.....	166
5	Conclusion.....	168
6	Références	169

Liste des figures

Figure 1 : Caractéristiques de l'estran suivi sur la rive sud du Saint-Laurent (tirée de Didier et coll., accepté).....	3
Figure 2 : Topo-bathymétrie et direction et hauteur significative des vagues mesurées au houlographe devant le secteur d'étude.....	4
Figure 3 : Localisation des secteurs d'étude et des instruments.....	5
Figure 4 : Exemple de positionnement des instruments pour le suivi morphodynamique de la côte avec les courbes de dépassement des hauteurs des vagues significatives de la bande gravitaire.....	8
Figure 5 : Exemple de déploiement de capteur de pression sur la PFHM réalisé lors de la campagne C1 (12 au 16 mai 2014)	15
Figure 6 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 1 et niveaux d'eau concomitants	16
Figure 7 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants	18
Figure 8 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 3 et niveaux d'eau concomitants	20
Figure 9 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 4 et niveaux d'eau concomitants	22
Figure 10 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants	24
Figure 11 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants	26
Figure 12 : Distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral sud-est de l'île, mesurée à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015.....	29
Figure 13 : Exemple de profil suivi à l'Anse au Lard et identification des éléments morphologiques et marégraphiques	34
Figure 14 : Identification des limites atteintes par le runup au D-GPS	36
Figure 15 : Système de caméra vidéo autonome à Maria.....	37
Figure 16 : Délimitation du jet de rive en continu sur le haut estran à Maria	37
Figure 17 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteint par les vagues sur le haut-estran du profil 1 (Runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité	39
Figure 18 : Évolution verticale du haut-estran du profil 1 entre le printemps 2014 et l'automne 2015	40
Figure 19 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 2 (Runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité	41
Figure 20 : Évolution verticale de l'estran du profil 2 entre l'été 2014 et l'automne 2015.	42
Figure 21 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 3 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité	43
Figure 22 : Évolution verticale du haut-estran du profil 3 entre l'été 2014 et l'automne 2015.	44
Figure 23 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 4 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité	45

Figure 24 : Évolution verticale du haut-estran du profil 4 entre l'été 2014 et le printemps 2015.	46
Figure 25 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 5 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	47
Figure 26 : Évolution verticale du haut-estran du profil 5 entre l'été 2014 et l'automne 2015.	48
Figure 27 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 6 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	49
Figure 28 : Évolution verticale du haut-estran du profil 6 entre l'été 2014 et l'automne 2015.	50
Figure 29 : a) morphologie et position des capteurs du profil 2, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 2.4 et 2.3 pour les années 2014 et 2015.	54
Figure 30 : a) morphologie et position des capteurs du profil 1, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3b et 1.3a pour les années 2014 et 2015.	55
Figure 31 : a) morphologie et position des capteurs du profil 3, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3b et 3.3a pour les années 2014 et 2015.	56
Figure 32 : a) morphologie et position des capteurs du profil 1, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3b et 1.3a pour les années 2014 et 2015.	57
Figure 33 : a) morphologie et position des capteurs du profil 3, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3b et 3.3a pour les années 2014 et 2015.	58
Figure 34 : a) morphologie et position des capteurs du profil 4, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 4.3 b et 4.3a.	59
Figure 35. Grilles de calcul de WAVEWATCH 3 (1 km et 5 km de résolution), et positions des sites de validation.	62
Figure 36 : Localisation spatiale des points de sauvegarde des sorties spectrales et paramétriques du modèle.	70
Figure 37 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à la bouée de Mont-Louis, entre le 17 avril 2013 et le 30 novembre 2015.	85
Figure 38 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à la bouée des îles-de-la-Madeleine, entre le 8 mai 2012 et le 31 décembre 2012.	86
Figure 39 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à la bouée de Point Escuminac, entre le 12 mai 2014 et le 1er décembre 2014.	88
Figure 40 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Saint-Ulric, entre le 3 mai 2010 et le 29 octobre 2012.	89

Figure 41 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Sept-Îles, entre le 5 mai 2010 et le 11 octobre 2012.....	90
Figure 42 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Cap-d'Espoir, entre le 6 octobre 2010 et le 12 octobre 2012.....	91
Figure 43 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de l'Anse au Lard, entre le 31 octobre 2014 et le 30 novembre 2015.	93
Figure 44 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan, entre le 16 octobre et le 30 novembre 2015.....	94
Figure 45 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Maria, entre le 9 et le 30 novembre 2015.....	95
Figure 46 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Saint-Ulric, entre le 3 mai 2010 et le 29 octobre 2012.....	99
Figure 47 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Sept-Îles, entre le 5 mai 2010 et le 11 octobre 2012.....	100
Figure 48 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Cap-d'Espoir, entre le 6 octobre 2010 et le 12 octobre 2012.....	101
Figure 49 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de l'Anse au Lard, entre le 31 octobre 2014 et le 30 novembre 2015.	103
Figure 50 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan, entre le 16 octobre et le 30 novembre 2015.....	104
Figure 51 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Maria, entre le 9 et le 30 novembre 2015.....	105
Figure 52 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Saint-Ulric, entre le 3 mai 2010 et le 29 octobre 2012.....	108
Figure 53 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Sept-Îles, entre le 5 mai 2010 et le 11 octobre 2012.....	109
Figure 54 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Cap-d'Espoir, entre le 6 octobre 2010 et le 12 octobre 2012.....	110
Figure 55 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de l'Anse au Lard, entre le 31 octobre 2014 et le 30 novembre 2015.	112

Figure 56 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan, entre le 16 octobre et le 30 novembre 2015.....	113
Figure 57 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Maria, entre le 9 et le 30 novembre 2015.....	114
Figure 58 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	116
Figure 59 : Représentation des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	117
Figure 60 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	118
Figure 61 : Représentation des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	119
Figure 62 : Représentation spatiale de l'erreur entre les périodes moyennes prédictes par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	121
Figure 63 : Représentation des paramètres de régression entre les périodes moyennes prédictes par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	122
Figure 64 : Représentation spatiale de l'erreur entre les périodes moyennes prédictes par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	123
Figure 65 : Représentation spatiale des paramètres de régression entre les périodes moyennes prédictes par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	124
Figure 66 : Représentation spatiale de l'erreur absolue moyenne et des paramètres de régression entre les directions moyennes prédictes par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier 2010 et le 31 décembre 2010.....	125
Figure 67 : Représentation spatiale de l'erreur absolue moyenne et des paramètres de régression entre les directions moyennes prédictes par WW3-1km et WW3-5km pour les 10 % des vagues les plus fortes entre le 1er janvier 2010 et le 31 décembre 2010.....	126
Figure 68 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.	128
Figure 69 : Représentation spatiale des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.	129
Figure 70 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus fortes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.	130

Figure 71 : Représentation spatiale des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	131
Figure 72 : Représentation spatiale de l'erreur pour les périodes moyennes prédictes avec NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	132
Figure 73 : Représentation spatiale des paramètres de régression pour les périodes moyennes prédictes avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	133
Figure 74 : Représentation spatiale de l'erreur pour les périodes moyennes prédictes avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	134
Figure 75 : Représentation spatiale des paramètres de régression pour les périodes moyennes prédictes avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	135
Figure 76 : Représentation spatiale des paramètres de régression et du biais absolu moyen pour les directions moyennes prédictes avec NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	136
Figure 77 : Représentation spatiale des paramètres de régression et du biais absolu moyen pour les directions moyennes prédictes avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.....	137
Figure 78 : Localisation des sites	140
Figure 79 : Exemple de graphique utilisé pour déterminer la durée des événements	142
Figure 80 : Délimitation du début et la fin des événements météo-marins en fonction du seuil de 95 ^e percentile.....	143
Figure 81 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision.....	144
Figure 82 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 33, 2000-10-05).....	145
Figure 83 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 34, 2000-10-05).....	145
Figure 84 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 31 , 2000-10-05).....	146
Figure 85 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 30, 2000-10-05).....	146
Figure 86 : Numérisation des segments côtiers (orientation de la côte).....	148
Figure 87 : Schéma montrant un exemple de classification de vagues de direction 303° (NO) sur un segment côtier orienté entre 226° (SO) à 46° (NE) et dont l'angle d'incidence 0° en absolu correspond à 316° (NO)	149
Figure 88 : Adapté de Charles et coll., 2012 : a) Schéma des mécanismes induisant le transport longshore des sédiments*, adapté des schémas du cours d'océanographie physique de The University of Western Ontario (http : //instruct.uwo.ca) (b, c) : schémas traduisant la dépendance des flux de sédiment longshore** Q en fonction de l'angle d'incidence (b) et de la hauteur (c) des vagues au déferlement, respectivement à hauteur et à angles constants.....	150

Figure 89 : Nombre d'événements par site identifié à partir des Hs ou du NEML supérieur au 95 ^e percentile	151
Figure 90 : Nombre d'événements ayant un temps de retour supérieur aux seuils établis a) \geq à 10 ans; b) \geq à 5 ans; c) \geq à 2 ans.....	153
Figure 91 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal sur l'ensemble des sites	158
Figure 92 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 1 à 9.....	160
Figure 93 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 10 à 18.....	161
Figure 94 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 19 à 27.....	162
Figure 95 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 28 à 36.....	163
Figure 96 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 37 à 45.....	164

Liste des tableaux

Tableau 1 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à l'Anse au Lard	9
Tableau 2 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à L'Isle-aux-Coudres	10
Tableau 3 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Longue-Pointe-de-Mingan.....	12
Tableau 4 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Maria.....	13
Tableau 5 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives ($Hm0$) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 1	17
Tableau 6 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives ($Hm0$) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 2	19
Tableau 7 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives ($Hm0$) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 3	21
Tableau 8 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives ($Hm0$) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 4.....	23
Tableau 9 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives ($Hm0$) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 5.....	25
Tableau 10 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives ($Hm0$) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 6.....	27
Tableau 11 : Comparaison des fréquences des classes de hauteurs significatives pour les vagues provenant des secteurs nord-est et sud.....	28
Tableau 12 : Distribution croisée des hauteurs significatives et directions de vagues à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015 (9204 observations de 1024 s.)	30
Tableau 13 : Période des levés LiDAR mobile terrestre	34
Tableau 14 : Levés au DGPS des profils topographiques de la plage et des levés de runup à l'Anse au Lard	35
Tableau 15 : Levés au DGPS des profils topographiques de la plage de Longue-Pointe-de-Mingan.....	35
Tableau 16 : Influence des différents secteurs morphologiques de la zone intertidale sur l'amortissement des distributions de hauteurs significatives pour les années 2014 et 2015	60
Tableau 17 : Coordonnées des positions des sorties paramétriques interpolées du modèle (degrés décimaux).	64
Tableau 18 : Coordonnées des positions de sorties spectrales du modèle (degrés décimaux).....	65
Tableau 19. Paramètres statistiques entre les hauteurs significatives prédites par WW3 et mesurées aux sites au large (plus de 50 mètres de fond, Mont-Louis et Îles-de-la-Madeleine)	84
Tableau 20 : Paramètres statistiques entre les hauteurs significatives prédites par WW3 et mesurées aux sites de profondeur intermédiaire (entre 30 et 40 mètres de fond, Point Escuminac, Saint-Ulric, Sept-Îles et Cap-d'Espoir).....	87
Tableau 21 : Paramètres statistiques entre les hauteurs significatives prédites par WW3 et mesurées aux sites côtiers (Anse au Lard, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria).....	92

Tableau 22 : Paramètres statistiques entre les périodes moyennes prédites par WW3 et mesurées aux sites de profondeur intermédiaire (entre 30 et 40 mètres de fond : Saint-Ulric, Sept-Îles et Cap-d'Espoir)	98
Tableau 23 : Paramètres statistiques entre les périodes moyennes prédites par WW3 et mesurées aux sites côtiers (moins de 30 mètres de fond : Anse au Lard, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria)	102
Tableau 24 : Paramètres statistiques entre directions moyennes prédites par WW3 et mesurées aux sites de profondeur intermédiaire (entre 30 et 40 mètres de fond : Saint-Ulric, Sept-Îles et Cap-d'Espoir)	107
Tableau 25 : Paramètres statistiques entre directions moyennes prédites par WW3 et mesurées aux sites côtiers (moins de 20 mètres de fond : Anse au Lard, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria)	111
Tableau 26 : Numéros de sites et localité.....	141
Tableau 27 : Classification des directions de vagues par rapport à l'orientation de la côte.....	149
Tableau 28 : Aperçu des valeurs maximales des différents paramètres de même que la valeur des autres paramètres au moment des maximums	152
Tableau 29 : Répartition par sites des événements dont le temps de retour est \geq à 10 ans pour un ou plusieurs paramètres	155
Tableau 30 : Événements dont au moins un des paramètres présente un temps de retour \geq à 10 ans.....	157

1 Mise en contexte et objectifs généraux

Le programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO) vise à produire les données et les connaissances scientifiques de base nécessaires pour élaborer la cartographie du risque d'érosion et de submersion côtière du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Ces connaissances vont aussi pouvoir servir pour évaluer et identifier les solutions durables adaptées à la dynamique côtière. Les résultats de ce programme vont aussi permettre ultérieurement de développer un outil numérique de prévision des niveaux de submersion et d'érosion de manière opérationnelle permettant d'alimenter des systèmes d'alerte en cas de tempête pour les côtes du Québec. Ce programme utilise les standards internationaux développés au cours des dernières années aux États-Unis et en Europe notamment à la suite d'importantes tempêtes qui ont provoqué de nombreux dommages aux infrastructures côtières et des pertes de vie. Ce projet de recherche s'inscrit dans les axes de recherche de la Chaire en géoscience côtière qui a comme but d'évaluer la vulnérabilité des communautés côtières aux aléas d'érosion et de submersion côtières.

La phase I du projet s'est terminée avec la remise du rapport final en novembre 2015 (*Lambert et coll., 2015*). La phase I visait à i) quantifier les paramètres morphodynamiques d'un secteur représentatif de la rive sud du Saint-Laurent, soit celui de Pointe-au-Père/Sainte-Luce ; ii) produire la climatologie des vagues et des niveaux d'eau pour la période de 1979 à 2010 pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent selon une résolution 5km^2 ; iii) identifier les conditions météo-marines responsables de sinistres côtiers (érosion/submersion) dans le Bas-Saint-Laurent lors de la période de 1979 à 2010 et calculer leur temps de retour.

La phase II vise à répondre aux objectifs suivants :

1. Quantifier les paramètres morphodynamiques des grands types de littoraux représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.
2. Produire la climatologie des vagues et des niveaux d'eau pour la période de 1979 à 2015 pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent selon une résolution de 1 km² et comparer à celle d'une résolution de 5 km².
3. Produire les temps de retour des événements qui ont provoqué des dommages à la côte entre 1979 et 2010.
4. Produire la climatologie des vagues et des niveaux d'eau pour la période de 2041-2070 et 2071-2100 pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent en tenant compte des changements climatiques;
5. Déterminer les temps de retour des conditions météo-marines responsables de l'érosion et de la submersion côtière pour le futur dans un contexte de changements climatiques (2041-2100).

Ce rapport présente la méthodologie du projet et les travaux de recherche effectués jusqu'à maintenant ainsi que des exemples de résultats. Ces derniers sont présentés selon les grands objectifs du projet. Il répond aux objectifs 1 à 3. Les objectifs 4 et 5 seront répondus dans un second rapport qui sera remis à l'automne 2017 puisque les sorties de la modélisation future qui servent d'intrant à WW3 seront disponibles seulement en juillet 2017.

2 Quantifier les paramètres morphodynamiques des grands types de littoraux représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent

Dans le cadre de la phase I du projet, les sites de l'Anse au Lard et de la pointe aux Coques dans les municipalités de Pointe-au-Père et de Sainte-Luce ont été instrumentés et les mesures vont se poursuivre jusqu'au printemps 2017. Ce secteur est représentatif des types d'estran retrouvés sur la rive sud du Saint-Laurent, c'est-à-dire de larges estrans rocheux ou meubles avec des plages de sable grossier et gravier (figure 1). L'Anse au Lard présente un estran meuble alors que celui de la pointe aux Coques est rocheux. Ce secteur présente une bathymétrie dans la zone pré littorale assez graduelle et uniforme (figure 2). Les vents et la direction des vagues proviennent principalement de deux directions, soit de l'ouest et du nord-est (figure 2).

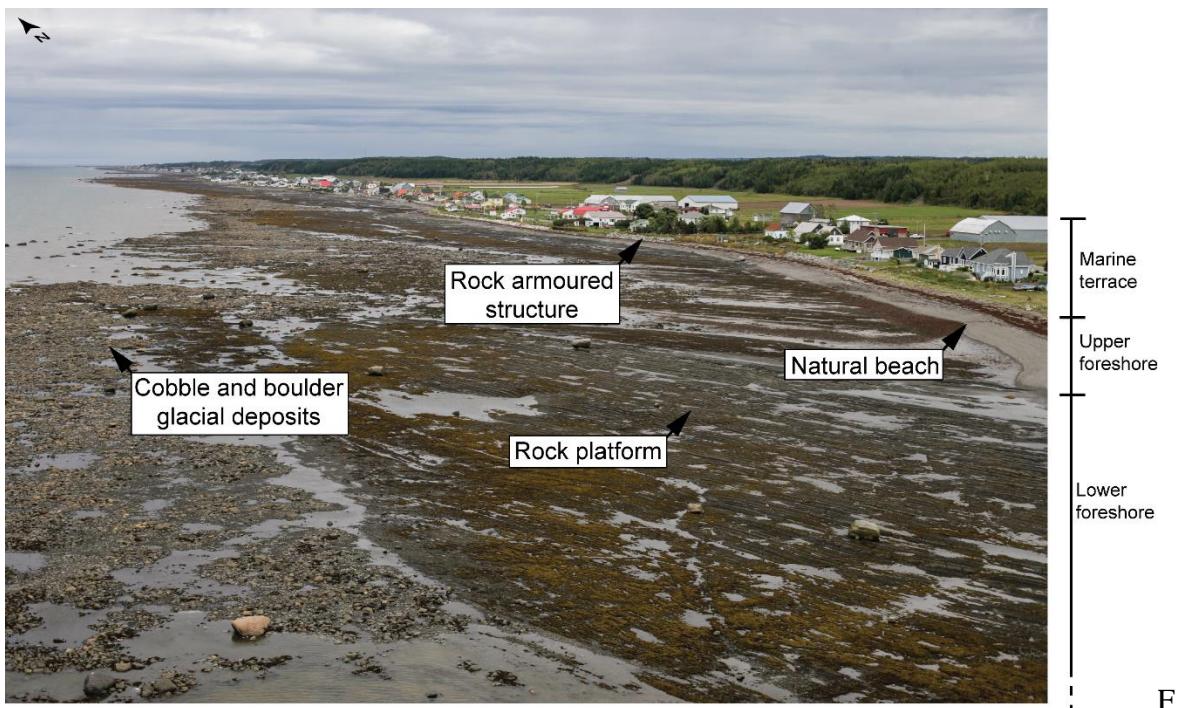


Figure 1 : Caractéristiques de l'estran suivi sur la rive sud du Saint-Laurent (tirée de Didier et coll., accepté).

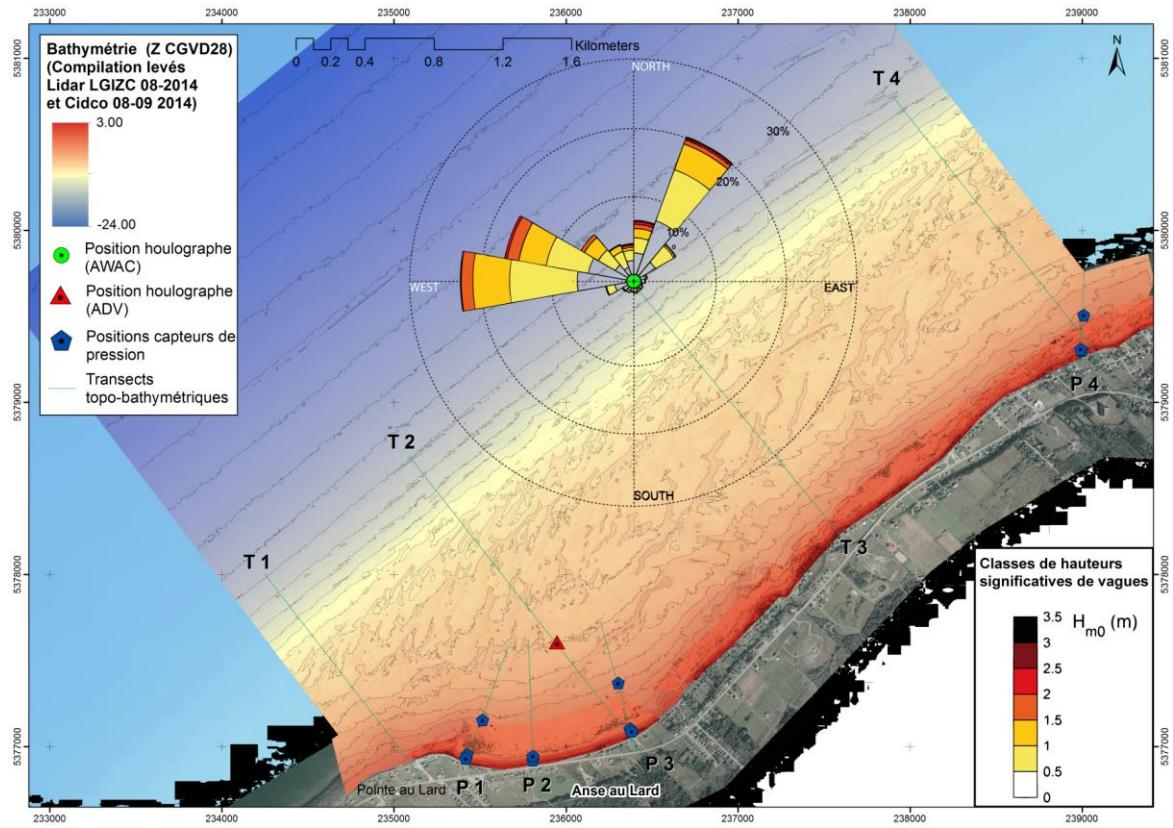


Figure 2 : Topo-bathymétrie et direction et hauteur significative des vagues mesurées au houlographe devant le secteur d'étude.

Dans le cadre de la phase II du projet, trois autres sites ont été instrumentés et suivis pour mesurer les vagues et les niveaux d'eau, soit le secteur de Maria dans la baie des Chaleurs, de L'Isle-aux-Coudres dans la région de la Capitale-Nationale et de Longue-Pointe-de-Mingan sur la Côte-Nord (figure 3). L'acquisition des données se poursuivra jusqu'en 2019 pour les secteurs de la baie des Chaleurs et de la Minganie dans le cadre de la phase III de Modesco pour nous permettre de répondre convenablement à l'objectif 1. Les données de L'Isle-aux-Coudres sont traitées et analysées dans le cadre ce rapport.

Très peu de connaissances existent actuellement sur la dynamique des vagues dans la baie des Chaleurs. Or, ce secteur constitue l'un des plus à risque de submersion au Québec en raison de la hausse relative du niveau de la mer (Koohzare *et coll.*, 2008). En effet, selon la station marégraphique de Belledune dans la baie des Chaleurs, la tendance de la hausse relative du niveau marin a été de 4,06 mm/an entre 1964 et 2014 alors que cette tendance a été aussi importante que 6,96 mm/an entre 2000 et 2014 (Didier *et coll.*, 2015). Cette accélération de la hausse du niveau marin relatif est aussi observée ailleurs dans l'est du Canada et dans le nord-est des États-Unis (Boon, 2012). Le secteur de Maria est d'intérêt en raison de la diversité des enjeux : nombreuses résidences en bordure de mer, la route 132, de nombreux commerces, des sites patrimoniaux, etc. Ce secteur présente un estran étroit à moyen de formation meuble typique des côtes de la baie des Chaleurs. Les niveaux d'atteintes par les vagues sur la côte pour ce secteur ont pu être mesurés lors des tempêtes de décembre

2005 et 2010 par l'équipe de la Chaire en géoscience côtière (Bernatchez *et coll.*, 2011; Quintin *et coll.*, 2013; Didier *et coll.*, 2015), ce qui sera un atout pour le développement d'une méthode de cartographie du risque de submersion.

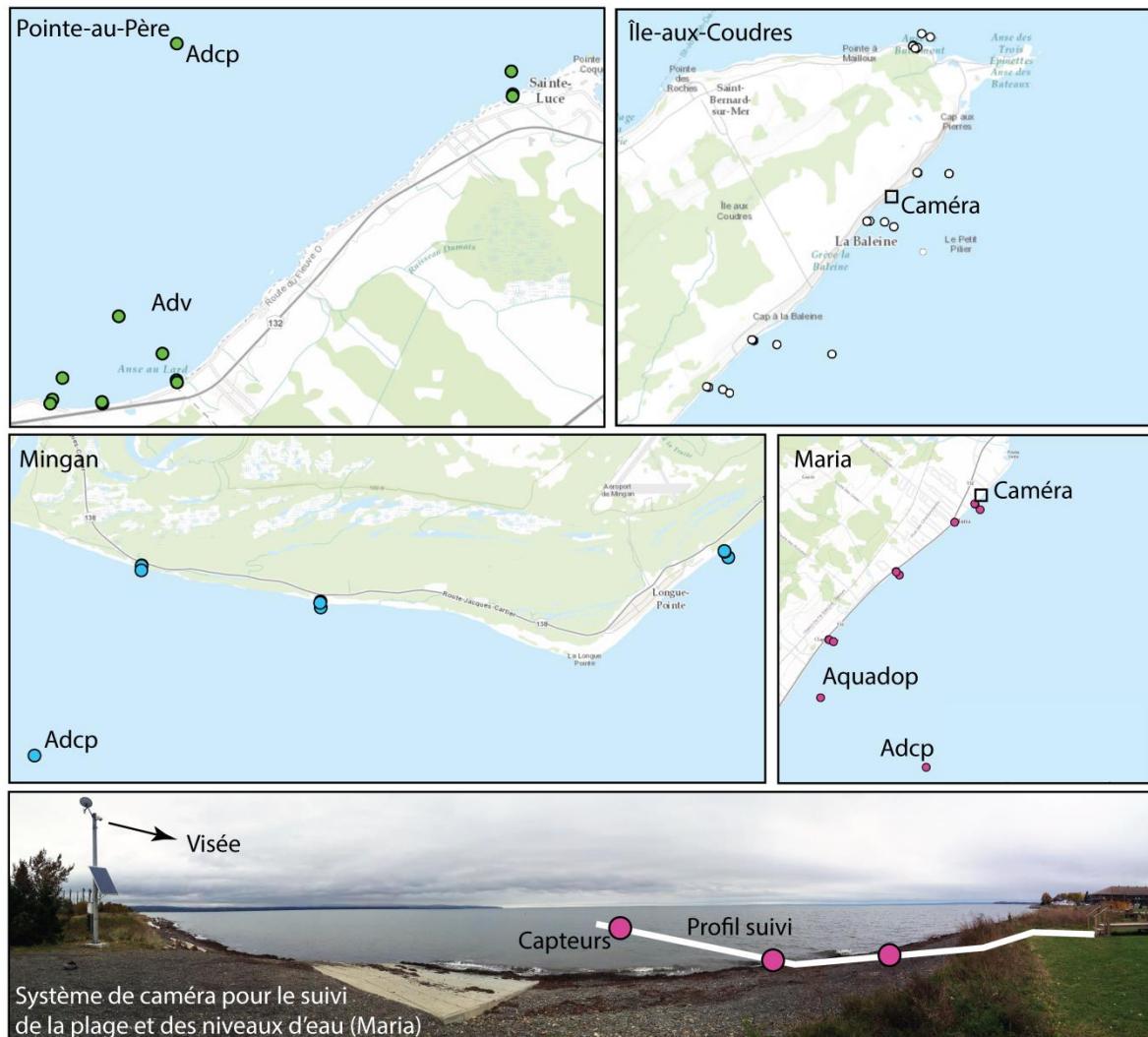


Figure 3 : Localisation des secteurs d'étude et des instruments

Le secteur de L'Île-aux-Coudres présente un large estran rocheux avec une forte variabilité topographique, ce qui offre un très grand potentiel pour évaluer les effets de la topographie sur les niveaux d'atteinte des vagues à la côte. Cet estran se termine du côté mer par des dépôts meubles. Ce secteur est représentatif d'une vaste majorité de côtes retrouvées dans la région de Charlevoix, Chaudière-Appalaches, du Bas-Saint-Laurent et du nord de la Gaspésie. Le contexte insulaire permet aussi de quantifier l'influence de diverses expositions de la côte aux vagues de tempête. De plus, en raison des importants courants de marée dans ce secteur de l'estuaire, il sera possible d'évaluer l'effet des marées sur les niveaux d'eau à la côte. Ce secteur fait aussi l'objet d'un suivi environnemental à la suite d'enrochements qui ont été mis en place pour protéger la route dans le cadre d'un projet du ministère des Transports, Mobilité durable et Électrification des transports.

Enfin, le dernier secteur est celui de Longue-Pointe-de-Mingan qui est caractéristique des estrans étroits et meubles avec des cordons sableux de bas estran et pré littoraux typiques du littoral du golfe du Saint-Laurent. Ce secteur présente un régime micro à mésotidal. Il s'agit aussi d'un secteur fort dynamique, avec un transit sédimentaire très important et avec une variabilité saisonnière et annuelle importante de la morphologie des plages. Ce secteur a déjà connu dans le passé des événements importants de submersion lors de tempêtes, notamment au niveau de la municipalité. La route 138 est aussi menacée par le recul du littoral sableux.

Deux types de suivis ont été effectués sur ces quatre secteurs, soit un suivi des conditions hydrodynamiques et un suivi morphologique et des niveaux d'atteinte du jet de rive dans différentes conditions météo-marines allant des conditions de tempête aux conditions calmes.

2.1 Suivi interannuel des conditions hydrodynamiques et de glace en domaine littoral.

Tout d'abord pour assurer les mesures des conditions hydrodynamiques, une stratégie de déploiements a été mise en place pour s'assurer d'obtenir les données nécessaires pour mettre en lien les changements morphologiques de la côte avec les conditions météo-marines et pour pouvoir aussi valider et calibrer les modèles numériques. La figure 3 présente la localisation des instruments de mesure sur les quatre secteurs d'étude.

2.1.1 Méthodologie

Un profileur de courant à effet doppler acoustique ADCP de type Nortek AWAC 1 MHz a été mis en place à une profondeur de -13 m, cote hydrographique, à l'Anse au Lard, à -14 m à Longue-Pointe-de-Mingan et à -13 m à Maria. Ces données permettent de reconstituer des spectres directionnels de vagues à partir desquels sont extraits les paramètres de hauteur, période et direction des vagues, ainsi que les niveaux d'eau et les vitesses des courants dans la colonne d'eau. Cette quantification sur deux ans va fournir une climatologie précise des dynamiques dans la phase terminale de leur propagation vers la côte et servira également à valider les modèles numériques de propagation de vagues en eau peu profonde. Des courantomètres (Nortek ADV et Aquadopp) ont aussi été positionnés sur des périodes de quelques mois à l'Anse au Lard à une profondeur de -6 m, à Maria à une profondeur de -4 m et à L'Isle-aux-Coudres à une profondeur de -1,8 m. Cet instrument permet aussi de mesurer les courants et leur direction qui sont à l'origine du transport sédimentaire.

Pour obtenir des mesures de niveaux d'eau et de vagues près de la côte, des capteurs de pression RBR Virtuoso ont été déployés sur chacun des sites d'étude sur trois isobathes différentes longshore, de la limite des basses mers maximales jusqu'au haut estran. Ces instruments permettent de quantifier les paramètres non directionnels (spectraux) des vagues et les niveaux d'eau en acquérant les données de dénivellation de la surface libre à 4 Hz. La montre un exemple de type de déploiement pour le secteur de l'Anse au Lard. La première

ligne (ligne shoaling) est positionnée immédiatement avant le point de déferlement des plus grosses vagues de tempêtes, entre -0,5 et -2 m (cote hydrographique). Elle donne des informations sur les vagues et les niveaux d'eau avant la phase de dissipation finale de l'énergie des vagues dans le déferlement. La seconde ligne (ligne surf zone) est positionnée au niveau de la flexure, à la limite onshore de l'estran et du haut estran sableux (plage). Elle permet d'évaluer les paramètres de vagues et de niveaux d'eau et de courant avant le runup, et d'évaluer la quantité d'énergie dissipée sur l'estran rocheux ou meuble par comparaison avec les données de la ligne shoaling. Grâce à la modulation tidale, ces appareils enregistrent les paramètres hydrodynamiques en plusieurs points de la zone de déferlement. Ces comparaisons permettront la mise en évidence du rôle de la morphologie de l'avant-côte sur les paramètres de vagues à la côte. La troisième ligne est positionnée au centre du haut estran sableux (ligne swash). Son rôle sera de quantifier les paramètres terminaux des vagues et des niveaux d'eau à la côte et de voir la relation avec la morphologie de l'estran, paramètres directement corrélables aux aléas d'érosion/submersion côtière. La figure 4 montre très bien l'effet de la topographie sur la réduction de la hauteur des vagues significatives du large vers la côte.

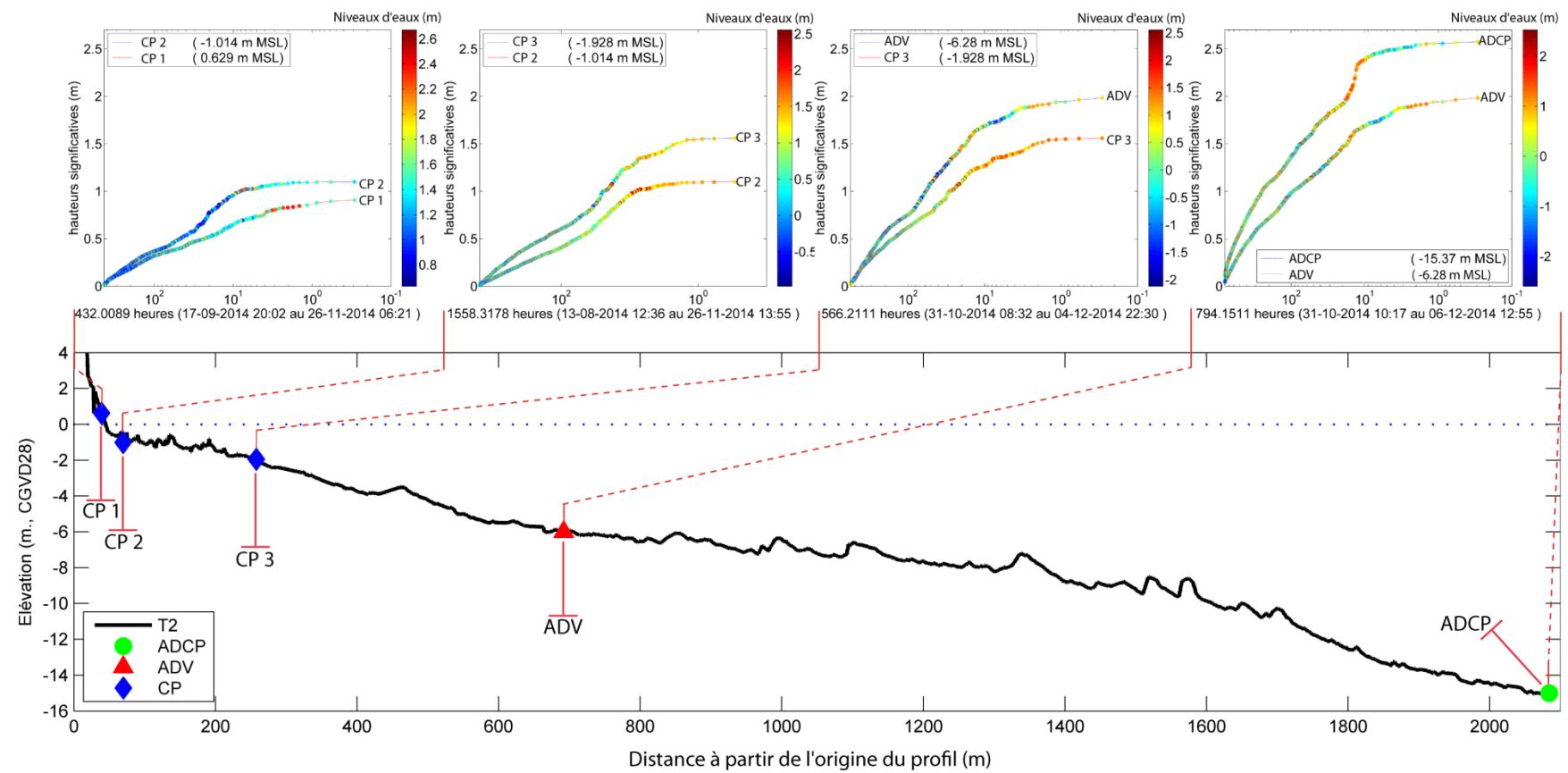


Figure 4 : Exemple de positionnement des instruments pour le suivi morphodynamique de la côte avec les courbes de dépassement des hauteurs des vagues significatives de la bande gravitaire

Les tableau 1 à 4 présentent les périodes de déploiements et de récupération des instruments pour les quatre secteurs d'étude pour la phase II du projet Modesco.

Tableau 1 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à l'Anse au Lard

Almanach de déploiement de l'ADCP de 2014 à 2016

Houlographe/profileur de courant Nortek AWAC 1 MHz							
X	Y	Profondeur	Mission	Début mesure	Date déploiement	Date récupération	
48.55226	68.42685	14	AL_F14	30 octobre 2014	31 octobre 2014	4 mai 2015	
48.55229	68.42647	14	AL_S15	12 mai 2015	12 mai 2015	20 octobre 2015	
48.55229	-68.42647	14	AL_W15	21 octobre 2015	27 octobre 2015	24 mai 2016	
48.55234	-68.42643	14	AL_S16	23 mai 2016	25 mai 2016	24 novembre 2016	
48.55234	-68.42643	14	AL_H16	24 novembre 2016	24 novembre 2016	A venir	

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2015

Position	serial	Coordonnées			Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016 1		Automne 2016 2	
		X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p2.1	55123	5376933.97	235821.89	0.48	08/06/15	07/07/15	07/07/15	15/09/15	15/09/15	19/11/15	19/11/15	11/12/15
p2.2	55102	5376947.29	235818.23	-0.98	08/06/15	07/07/15	07/07/15	15/09/15	15/09/15	19/11/15	19/11/15	11/12/15
p2.3	55137	5377131.61	235513.71	-1.67			07/07/15	15/09/15	15/09/15	19/11/15	19/11/15	11/12/15
Position	serial	Coordonnées			Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016 1		Automne 2016 2	
		X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p4.1	55002	5379299.46	238978.14	2.11					14/09/15	19/11/15	19/11/15	11/12/15
p4.2	55097	5379314.85	238980.71	0.66					14/09/15	13/11/15	19/11/15	11/12/15
p4.3	55038	5379490.75	238970.15	-1.49					14/09/15	21/11/15	23/11/15	11/12/15

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2016

Position	serial	Coordonnées			Été 2016 1		Automne 2016 1		Automne 2016 2	
		X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p2.1	55087	235821.83	5376933.99	0.48	16/06/16	01/09/16	01/09/16	03/11/16	03/11/16	10/01/17
p2.2	55142	235820.06	5376947.15	-0.98	16/06/16	01/09/16	01/09/16	02/11/16	02/11/16	10/01/17
p2.3	55090	235790.29	5377073.64	-1.67	24/07/16	01/09/16	01/09/16	02/11/16	02/11/16	10/01/17
Position	serial	Coordonnées			Été 2016 1		Automne 2016 1		Automne 2016 2	
		X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p4.1	55098	238994.90	5379302.96	2.11	16/06/16	01/09/16	21/09/16			25/12/16
p4.2	55117	238973.87	5379312.14	0.66	16/06/16	01/09/16	01/09/16	03/11/16	03/11/16	10/01/17
p4.3	120128						01/09/16			06/12/16

À L'Isle-aux-Coudres, les instruments ont été déployés dans le cadre d'un projet en collaboration avec le ministère des Transports, Mobilité durable et Électrification des transports. Un total de 6 sites avec des capteurs de pression sont installés le long de l'estran (tableau 2). 21 capteurs de pressions ont été implantés pour mesurer les niveaux d'eau et les vagues à la côte dans divers contextes morphologiques et d'expositions aux vagues. Un courantomètre a aussi été installé pour mesurer les courants pour évaluer le transport sédimentaire.

Tableau 2 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à L'Isle-aux-Coudres

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2015

		Coordonnées			Printemps 2015		Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p1.1	55122	5248726.01	313638.433	2.25084	18/05/15	04/08/15	04/08/15	02/10/15	02/10/15	07/12/15
p1.2	55087	5248716.65	313669.678	1.43944	17/05/15	02/08/15	02/08/15	02/10/15	02/10/15	07/12/15
p1.3A	55119	5248682.83	313893.137	1.08703	17/05/15	02/08/15	02/08/15	02/10/15	02/10/15	07/12/15
p1.3B	55039	5248624.52	314004.003	-1.38568	17/05/15	02/08/15	02/08/15	02/10/15	02/10/15	08/12/15
		Coordonnées			Printemps 2015		Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p2.1	55118	5249472.55	314368.46	2.24822	18/05/15	04/08/15	04/08/15	02/10/15	02/10/15	08/12/15
p2.2	55091	5249464.75	314386.874	1.3661	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	08/12/15
p2.3	55115	5249404.63	314752.803	-1.01468	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	08/12/15
p2.4	55002	5249246.95	315628.726	-2.01962	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	08/12/15
		Coordonnées			Printemps 2015		Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p3.1	55116	5251375.41	316186.974	2.24449	18/05/15	04/08/15	04/08/15	02/10/15	02/10/15	08/12/15
p3.2	55093	5251379.66	316226.871	1.13532	17/05/15	03/08/15	03/08/15	01/10/15	01/10/15	08/12/15
p3.3A	55092	5251364.53	316465.838	1.09445	17/05/15	03/08/15	03/08/15	02/10/15	02/10/15	08/12/15
p3.3B	55037	5251287.52	316616.051	-1.83977	17/05/15	03/08/15	03/08/15	02/10/15	02/10/15	08/12/15
		Coordonnées			Printemps 2015		Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p4.1	55094	5252155.93	316985.986	2.25073	18/05/15	04/08/15	04/08/15	02/10/15	02/10/15	09/12/15
p4.2	55117	5252150.13	317000.696	1.23886	17/05/15	03/08/15	03/08/15	01/10/15	01/10/15	09/12/15
p4.3b	55038	5252135.87	317491.638	-2.25378	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	09/12/15
		Coordonnées			Printemps 2015		Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p5.1	55121	5254140.44	316975.215	2.26394	18/05/15	03/08/15	03/08/15	02/10/15	02/10/15	09/12/15
p5.2	55089	5254159.14	316991.497	1.24625	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	09/12/15
p5.3b	55040	5254326.66	317195.302	-1.96723	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	09/12/15
		Coordonnées			Printemps 2015		Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p6.1	55120	5254178.53	316914.832	2.25265	18/05/15	03/08/15	03/08/15	02/10/15	02/10/15	09/12/15
p6.2	55095	5254195.46	316925.022	1.50395	17/05/15	03/08/15	03/08/15	02/10/15	02/10/15	09/12/15
p6.3	55036	5254384.01	317058.874	-1.83937	17/05/15	02/08/15	02/08/15	01/10/15	01/10/15	09/12/15

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2016

		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p1.1	55115	313638.4112	5248725.994	2.263	04/05/16	03/07/16	03/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	15/10/16	13/12/16
p1.2	55157	313669.7513	5248716.673	1.42789	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	16/10/16	13/12/16
p1.3A	120130	313893.1815	5248682.794	1.03657	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	21/09/16	16/10/16	13/12/16
p1.3B	55039	314003.5678	5248625.293	-1.40644	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	10/09/16	16/10/16	13/12/16
		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p2.1	55155	314368.4721	5249472.571	2.23152	04/05/16	03/07/16	03/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	15/10/16	13/12/16
p2.2	120125	314386.8417	5249464.678	1.35916	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	08/10/16	15/10/16	13/12/16
p2.3	120124	314754.00035	5249402.424	-1.06957	06/05/16	04/07/16	04/07/16	20/08/16	20/08/16	08/10/16	15/10/16	13/12/16
p2.4	55038	315628.6309	5249246.92	-2.03242	04/05/16	04/07/16	04/07/16	20/08/16	20/08/16	10/09/16	16/10/16	13/12/16
		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p3.1	120127	316187.0529	5251375.369	2.2552	04/05/16	03/07/16	03/07/16	19/08/16	19/08/16	07/10/16	16/10/16	13/12/16
p3.2	120129	316226.8632	5251379.646	1.16939	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	08/10/16	15/10/16	13/12/16
p3.3A	120128	316466.0062	5251364.656	1.11748	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	ADV			
p3.3B	55040	316616.0263	5251287.981	-1.84347	04/05/16	04/07/16	04/07/16	20/08/16	20/08/16	10/09/16	16/10/16	13/12/16
		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p4.1	120126	316986.0504	5252155.892	2.24109	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	08/10/16	15/10/16	13/12/16
p4.2	55158	317000.5405	5252150.015	1.22045	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	15/10/16	13/12/16
p4.3B	55034	317491.5724	5252136.321	-2.20662	04/05/16	04/07/16	04/07/16	20/08/16	20/08/16	10/09/16	16/10/16	13/12/16
		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p5.1	55159	316975.3264	5254140.413	2.27353	04/05/16	04/07/16	04/07/2016	19/08/16	19/08/16	20/09/16	15/10/16	13/12/16
p5.2	55160	316991.5355	5254160.289	1.24293	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	15/10/16	13/12/16
p5.3	55037	317195.3968	5254327.764	-2.03918	04/05/16	04/07/16	04/07/16	20/08/16	20/08/16	10/09/16	16/10/16	13/12/16
		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
p6.1	550154	316914.8373	5254178.7	2.25746	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	15/10/16	13/12/16
p6.2	120123	316924.963	5254196.51	1.45728	04/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	07/10/16	15/10/16	13/12/16
p6.3	55036	317059.3367	5254385.469	-1.90593	04/05/16	04/07/16	04/07/16	20/08/16	20/08/16	10/09/16	16/10/16	13/12/16
		Coordonnées			Printemps 2016		Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin	début	fin
PA.1	55002	316937.2016	5252037.539	2.42955	07/05/16	03/07/16	03/07/16	19/08/16	19/08/16	09/09/16	16/10/16	13/12/16
PA.2	55102	316966.0936	5252026.423	1.39493	07/05/16	04/07/16	04/07/16	19/08/16	19/08/16	20/09/16	16/10/16	13/12/16

A Longue-Pointe-de-Mingan, trois profils ont été instrumentés de 3 capteurs de pression avec deux expositions différentes aux vagues et des contextes morphologiques différents (avec présence et absence de barres sableuses pré littorales) pour un total de 9 capteurs (tableau 3x). Un ADCP a aussi été installé au large à une profondeur de 14 m pour mesurer la hauteur des vagues et leur direction.

Tableau 3 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Longue-Pointe-de-Mingan

Almanach de déploiement des ADCP et Vector de 2015 à 2016

Houlographe/profileur de courant Nortek AWAC 1 MHz						
X	Y	Profondeur	Mission	Début mesure	Date déploiement	Date récupération
50.243367	-64.313402	14m	MI_W15	14 octobre 2015	16 novembre 2015	18 mai 2016
50.243367	-64.313402	14 m	MI_S16	18 mai 2016	20 mai 2016	22 novembre 2016
50.243367	-64.313402	14m	MI_H16	22 novembre 2016	25 novembre 2016	A venir
Houlographe/courantomètre Nortek Vector						
X	Y	Profondeur	Mission	Début mesure	Date déploiement	Date récupération
5570650.71892	320088.33385	-0,80711m	LPMF16	16 septembre 2016	17-sept-16	18 novembre 2016

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2015

		Coordonnées			Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p1.0	55099	320108.65	5570690.61	1.99	31/07/15	14/10/15	14/10/15	17/01/16
p1.1	55098	320102.67	5570677.46	0.84	31/07/15	14/10/15	14/10/15	02/12/15
p1.2	55160	320089.15	5570651.42	-1.00	29/07/15	14/10/15	14/10/15	02/12/15
p1.3	55159	320098.98	5570590.18	-1.45	29/07/15	14/10/15	14/10/15	02/12/15
		Coordonnées			Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p2.1	55157	323669.58	5569969.40	0.81	29/07/15	14/10/15	14/10/15	02/12/15
p2.2	55156	323663.96	5569944.10	-0.16	29/07/15	14/10/15	14/10/15	31/12/15
p2.3	55154	323674.35	5569851.30				18/10/15	02/12/15
		Coordonnées			Été 2015		Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p3.1	55155	331716.38	5570976.30	-0.32	29/07/15	15/10/15	15/10/15	02/12/15
p3.2	55158	331725.69	5570961.26	-2.12	29/07/15	15/10/15	15/10/15	02/12/15
p3.3	55154	331793.93	5570847.88	-1.20	29/07/15	15/10/15	15/10/15	02/12/15

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2016

		Coordonnées			Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p1.0	120145	320108.60	5570690.82	0.92	01/06/16	31/07/16	31/07/16	14/09/16	14/09/16	19/12/16
p1.1	120152	320102.62	5570677.11	-0.64	01/06/16				Perdu	
p1.2	55092	320089.07	5570651.76	-0.86	01/06/16	30/07/16	30/07/16	15/09/16	ADV	
p1.3	55120	320100.89	5570602.54	-1.16	01/06/16	31/07/16	31/07/16	15/09/16	15/09/16	01/12/16
		Coordonnées			Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p2.1	120144	323669.16	5569968.31	1.01	01/06/16	31/07/16	30/07/16	14/09/16	14/09/16	11/01/17
p2.2	120154	323663.93	5569943.95	-1.04	01/06/16	30/07/16	30/07/16	15/09/16	15/09/16	19/12/16
p2.4	55122	323666.18	5569855.82	-1.02	01/06/16	31/07/16	31/07/16	15/09/16	15/09/16	14/11/16
		Coordonnées			Été 2016 1		Été 2016 2		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin	début	fin
p3.1	55093	331716.37	5570976.18	0.13	01/06/16	29/07/16	29/07/16	14/09/16	14/09/16	11/01/17
p3.2	120143	331725.55	5570961.20	-1.13	01/06/16	30/07/16	30/07/16	15/09/16	15/09/16	11/01/17
p3.3	120150	331793.21414	5570849.47633	-0.95	01/06/16	31/07/16	31/07/16	15/09/16	15/09/16	01/12/16

Enfin, à Maria, trois profils ont été instrumentés de capteurs de pression (tableau 4). 10 capteurs de pression ont été implantés pour mesurer les niveaux d'eau et les vagues à la côte. Un ADCP a aussi été installé au large à une profondeur de 13 m ainsi qu'un courantomètre permettant de mesurer le transport sédimentaire près de la côte.

Tableau 4 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Maria

Almanach de déploiement des ADCP et Vector de 2015 à 2016

Houlographe/profileur de courant Nortek AWAC 1 Mhz						
X	Y	Profondeur	Mission	Début mesure	Date déploiement	Date récupération
48.1350018	-65.9877937	14m	MA_W15	29 octobre 2015	9 novembre 2015	25 mai 2016
48.1350018	-65.9877937	14m	MA_S16	25 mai 2016	31 mai-2016	19 novembre 2016
48.13499	-65.98775	14m	MA_H16	19 novembre 2016	19 novembre 2016	A venir

Houlographe/profileur de courant Nortek Aquadopp HR 2 Mhz						
X	Y	Profondeur	Mission	Début mesure	Date déploiement	Date récupération
48.15297	-66.00727	2m	MA_S16	26 mai 2016	26 mai 2016	28 août 2016
48.15303	-66.00723	4,2m	MA_F16	28 août 2016	28 août 2016	19 novembre 2016

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2015

		Coordonnées			Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin
p1.1	120123	192373.4845	5336207.228	0.475	28/10/15	15/12/15
p1.2	120124	192382.0988	5336201.988	-0.794	28/10/15	15/12/15
p1.3	55096	192456.8373	5336167.535	-1.28923	29/10/15	15/12/15
		Coordonnées			Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin
p2.1	120129	193547.713	5337392.32	0.546	28/10/15	15/12/15
p2.2	120125	193553.3648	5337384.493	-0.631	28/10/15	15/12/15
p2.3	120128	193607.421	5337333.313	-1.089	28/10/15	15/12/15
		Coordonnées			Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin
p3.1	55104	194574.89	5338252.69	0.595	27/10/15	15/12/15
		Coordonnées			Automne 2015	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin
p4.1	120126	194920.52	5338573.74	0.498	27/10/15	16/12/15
p4.2	120130	194929.04	5338564	-0.558	27/10/15	16/12/15
p4.3	120127	195013.98	5338471.94	-1.468	27/10/15	16/12/15

Almanach de déploiement des capteurs de pression pour 2016

		Coordonnées			Été 2016		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p1.1	55103	5336221.14	192381.21	0.55	03/07/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16
p1.2	55116	5336201.97	192382.12	-1.21	03/07/16	16/09/16	16/09/16	13/11/16
p1.3	55088	5336167.63	192456.89	-1.70	04/07/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16
		Coordonnées			Été 2016		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p2.1	55096	5337396.20	193544.79	0.45	03/07/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16
p2.2	120153	5337370.83	193564.29	-1.16	03/07/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16
p2.3	55077	5337332.82	193606.43	-1.70	03/07/16	16/09/16	16/09/16	13/11/16
		Coordonnées			Été 2016		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p3.1	55101	5338252.74	194574.93	0.28	04/06/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16
		Coordonnées			Été 2016		Automne 2016	
Position	serial	X	Y	Z	début	fin	début	fin
p4.1	120136	5338576.47	194923.16	0.30	03/07/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16
p4.2	120138	5338566.20	194930.85	-1.09	03/07/16	16/09/16	16/09/16	13/11/16
p4.3	120147	5338471.94	195013.99	-2.02	03/07/16	17/09/16	17/09/16	13/11/16

2.1.2 Résultats : conditions de niveau d'eau et de vague pour la période de suivi sur L'Isle-aux-Coudres

Pour quantifier le climat de vague du large à la côte on compare donc de proche en proche les valeurs des données de hauteur significative (Hm_0) produites par les différents capteurs d'un même profil morphodynamique (figure 5). Cette section présente les climatologies obtenues pour les ondes incidentes (ondes courtes, $1 \text{ s} < T < 18 \text{ s}$), les résultats obtenus pour les ondes d'infragravité (ondes longues, $s < T < 200 \text{ s}$) seront présentés ultérieurement.



Figure 5 : Exemple de déploiement de capteur de pression sur la PFHM réalisé lors de la campagne C1 (12 au 16 mai 2014)

La climatologie conjointe de vagues et de niveaux d'eau pour les années 2014 (15 mai au 12 décembre) et 2015 (4 mai au 15 décembre selon marées) est présentée sous forme de distributions statistiques des données de Hm_0 pour la bande de fréquence gravitaire.

Les moyennes, moyennes des 10 % des valeurs les plus élevées, du 99 % percentiles ainsi que les maxima des hauteurs significatives des ondes incidentes (Hm_0) et niveaux d'eau (d) sur la période sont calculés. Les distributions sont ordonnées sous forme de courbes de fréquences cumulées, aussi appelées courbes de dépassement, afin de mettre en évidence la fréquence des événements extrêmes. En raison de la durée insuffisante de l'échantillonnage (2 ans), il est trop tôt pour proposer une statistique des périodes de retour. Les figures 6 à 11 de même que les tableaux 5 à 10 présentent les différentes caractéristiques des vagues et des niveaux d'eau pour les différents profils.

2.1.2.1 Profil 1

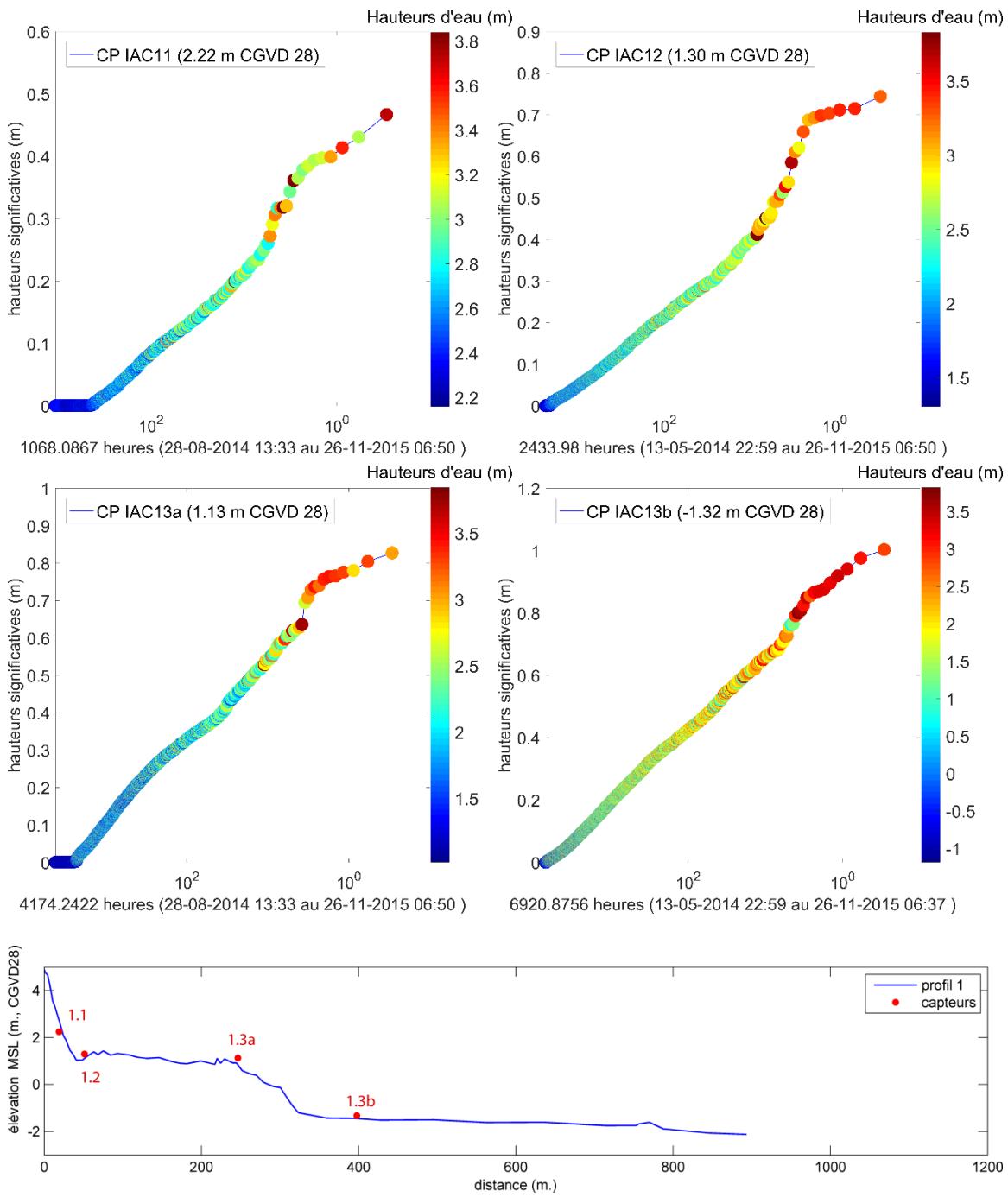


Figure 6 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 1 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 5 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 1

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP1.1	0.02	2.47	0.14	2.87	0.29	3.12	0.47	3.84
CP1.2	0.06	2.05	0.23	2.51	0.42	2.80	0.74	3.83
CP1.3a	0.07	1.57	0.29	2.09	0.50	2.43	0.83	3.84
CP1.3b	0.11	1.43	0.37	1.73	0.60	2.10	1.00	3.82

2.1.2.2 Profil 2

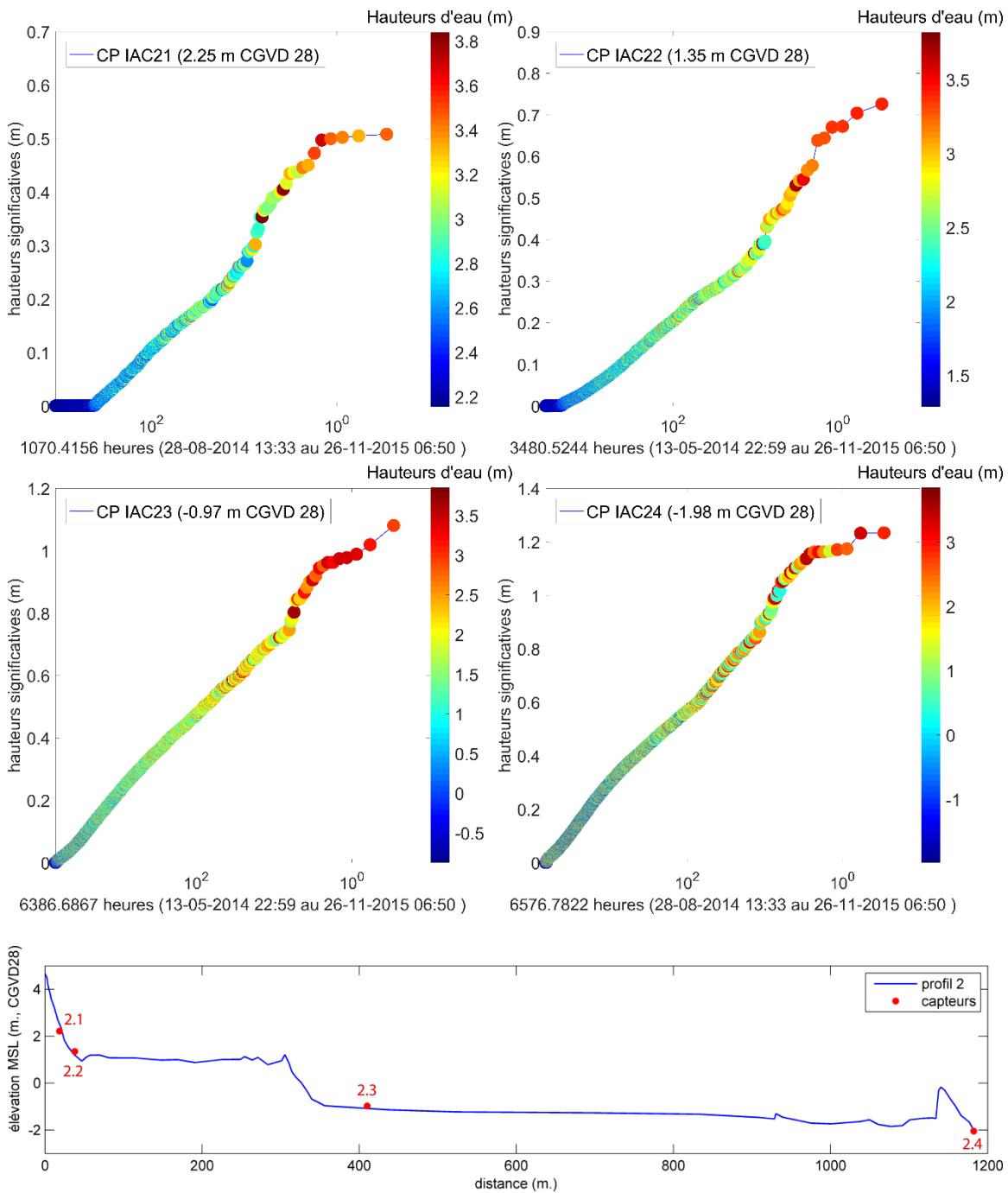


Figure 7 : Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 6 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 2

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP2.1	0.03	2.41	0.17	2.86	0.37	3.13	0.51	3.84
CP2.2	0.04	1.85	0.19	2.46	0.36	2.74	0.73	3.82
CP2.3	0.13	1.43	0.41	1.69	0.65	2.15	1.08	3.85
CP2.4	0.16	1.43	0.52	1.46	0.84	1.83	1.23	3.84

2.1.2.3 Profil 3

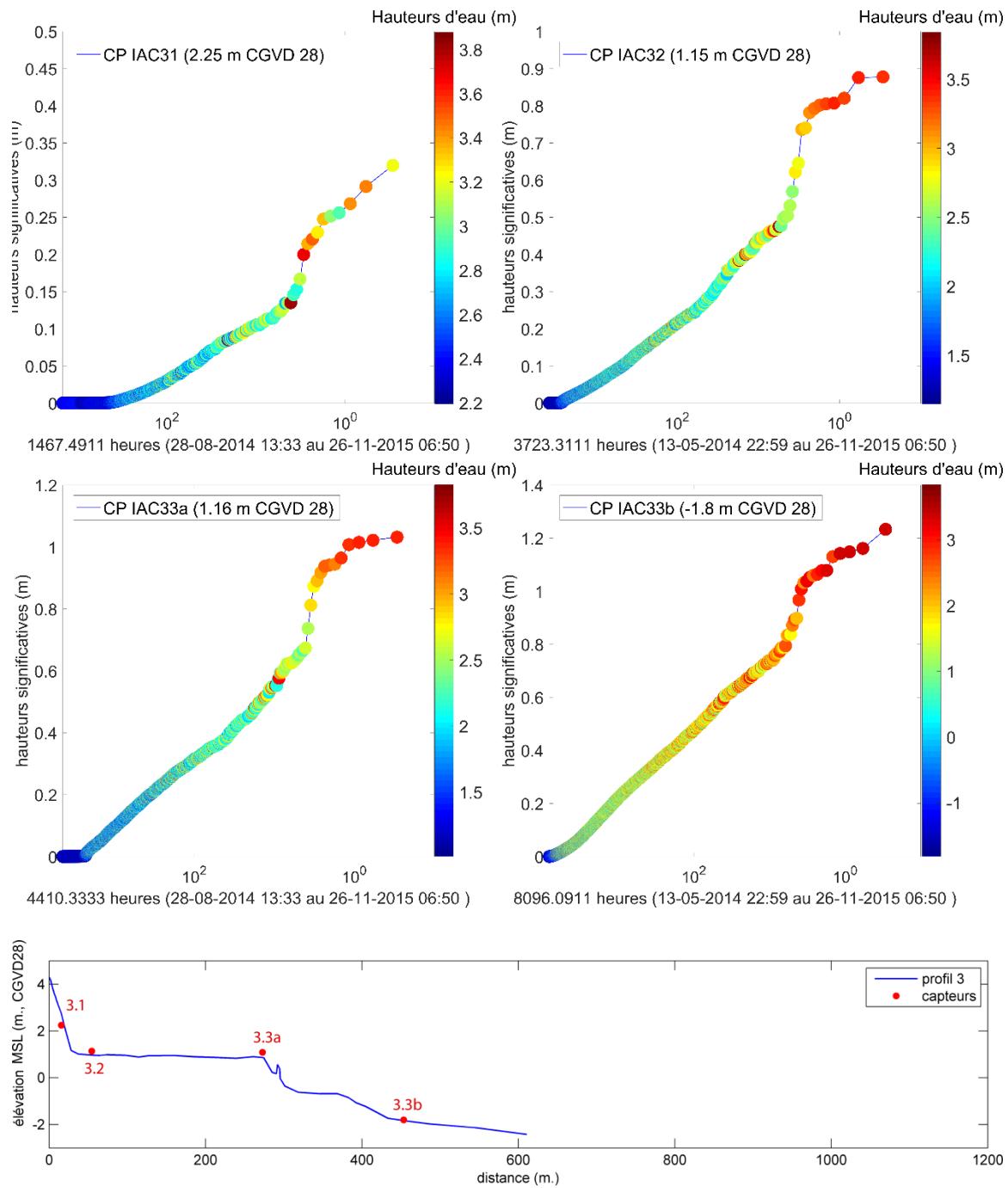


Figure 8 : Courbes de dépassement des Hm0 pour le profil 3 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 7 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 3

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP3.1	0.01	2.46	0.05	2.85	0.14	3.09	0.32	3.88
CP3.2	0.04	1.79	0.20	2.39	0.41	2.59	0.88	3.84
CP3.3a	0.06	1.55	0.27	2.17	0.50	2.42	1.03	3.83
CP3.3b	0.13	1.44	0.41	1.67	0.69	2.11	1.23	3.84

2.1.2.4 Profil 4

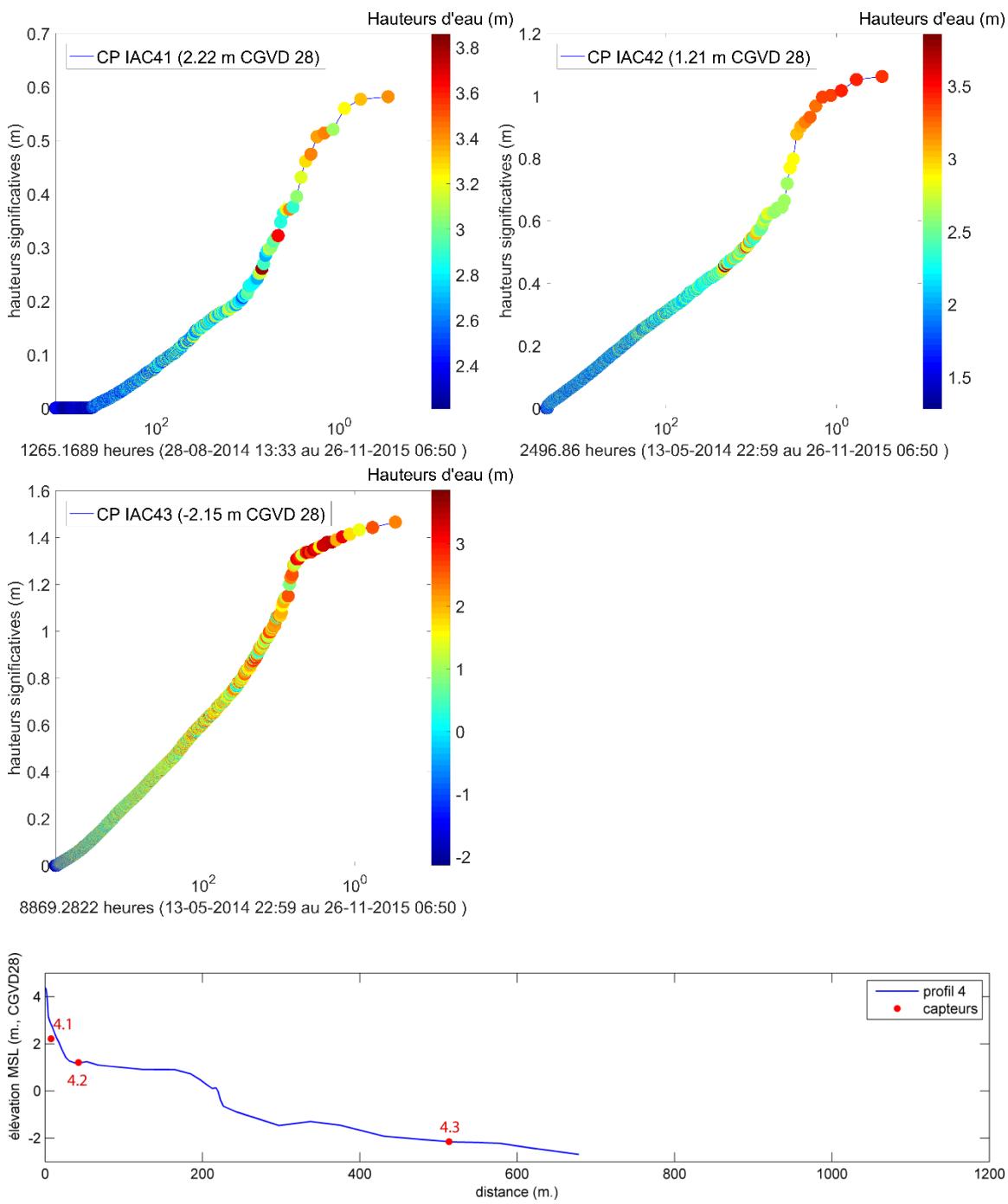


Figure 9 : Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 4 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 8 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 4

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP4.1	0.02	2.46	0.13	2.81	0.32	3.01	0.58	3.86
CP4.2	0.10	2.06	0.32	2.32	0.57	2.72	1.06	3.86
CP4.3	0.15	1.44	0.51	1.50	0.92	1.78	1.47	3.86

2.1.2.5 Profil 5

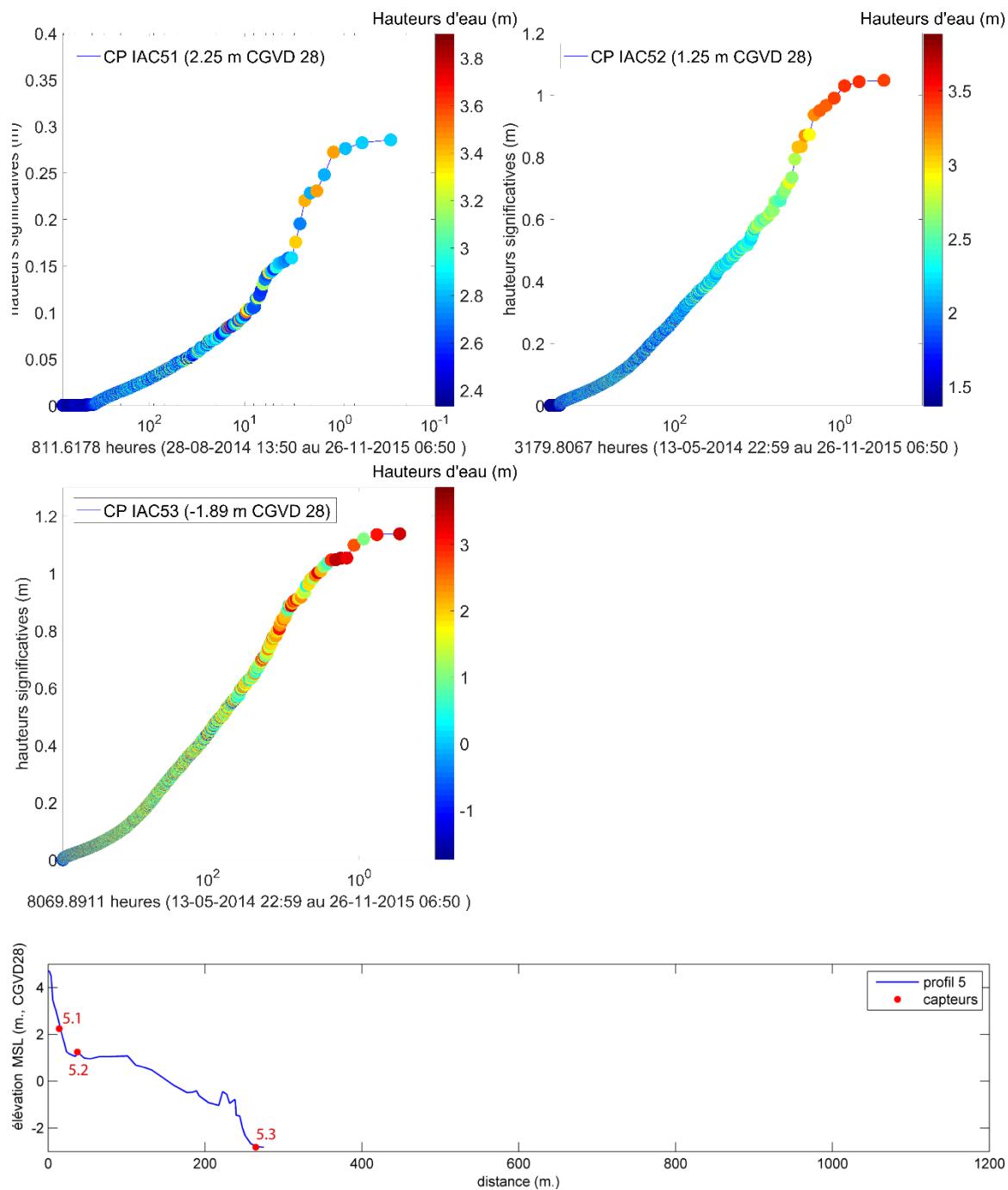


Figure 10 : Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 9 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 5

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP5.1	0.01	2.57	0.07	2.82	0.17	2.89	0.29	3.90
CP5.2	0.06	1.91	0.26	2.15	0.56	2.46	1.05	3.89
CP5.3	0.08	1.44	0.34	1.43	0.70	1.66	1.14	3.87

2.1.2.6 Profil 6

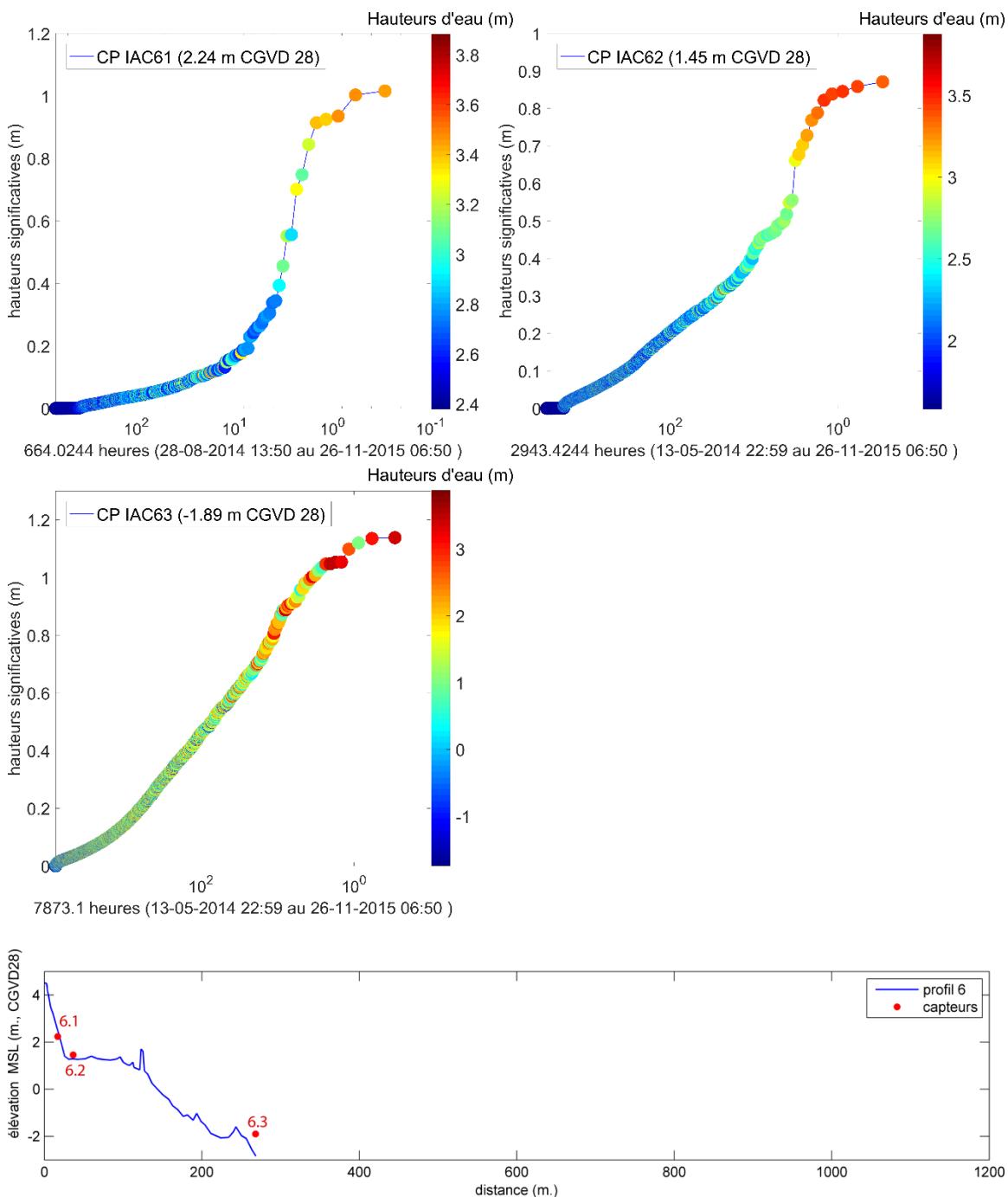


Figure 11 : Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 10 : Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 6

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP6.1	0.02	2.61	0.13	2.87	0.53	3.00	1.02	3.88
CP6.2	0.04	1.98	0.20	2.27	0.41	2.60	0.87	3.88
CP6.3	0.09	1.44	0.35	1.42	0.70	1.66	1.14	3.88

2.1.2.7 Évaluation de la direction des vagues

Les paramètres directionnels (tableau 12) de vagues ont été mesurés par l'ADV déployé au nord-est de l'île à -1.81 m d'élévation relative au CGVD28, entre le 20/05/2015 et le 15/12/2015. L'instrument est déployé sur la face sud-est du cordon sableux et mesure donc les vagues avant leur réfraction sur le sommet du cordon.

La figure 12 présente une spatialisation de la distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral sud-est de l'île.

Les vagues mesurées à la position de l'ADV proviennent majoritairement des secteurs sud (44 % des observations) et du secteur nord-est (19 % des observations), ce qui correspond aux deux distances de fetch les plus longues, situées dans l'axe de l'estuaire (tableau 12).

Les observations du secteur sud sont peu étalées directionnellement, elles sont distribuées sur 30° entre 165° et 195°. Les vagues du secteur Nord-est sont beaucoup plus étalées, elles sont distribuées sur 50°, entre 35° et 85°.

La distribution des hauteurs est dominée par les petites vagues : les occurrences de vagues inférieures à 0.25 m représentent 75 % de la distribution, soit 1963 heures et 20 min sur 2617 heures mesurées. Ces vagues proviennent majoritairement du secteur sud, qui représente 35 % des occurrences de cette classe. Les vagues du secteur nord-Est (35° à 85°) inférieures à 0.25 m ne représentent que 10 % des occurrences de la distribution.

Les occurrences de vagues de hauteurs significatives supérieures à 0.75 m représentent 0.14 % de la distribution totale, soit 3 h et 40 minutes sur 2617 heures mesurées. 9 observations proviennent du secteur sud, 4 du secteur nord-Est.

Les vagues du secteur Nord-Est sont moins fréquentes que celle du sud (19 % contre 44 %), elles sont néanmoins plus élevées en moyenne : 0.25 m contre 0.18 m pour le secteur sud (tableau 11).

Tableau 11 : Comparaison des fréquences des classes de hauteurs significatives pour les vagues provenant des secteurs nord-est et sud.

Secteurs	Classes de hauteurs significatives (m.)					Occurrences
	[0 - 0.25[	[0.25 - 0.5[	[0.5 - 0.75[	[0.75 - 1.0[	[1.0 - 1.125[
N-E (45°-85°)	56.92	37.74	5.14	0.21	0.00	1542
S (175° — 195°)	80.45	15.40	3.92	0.20	0.02	4052

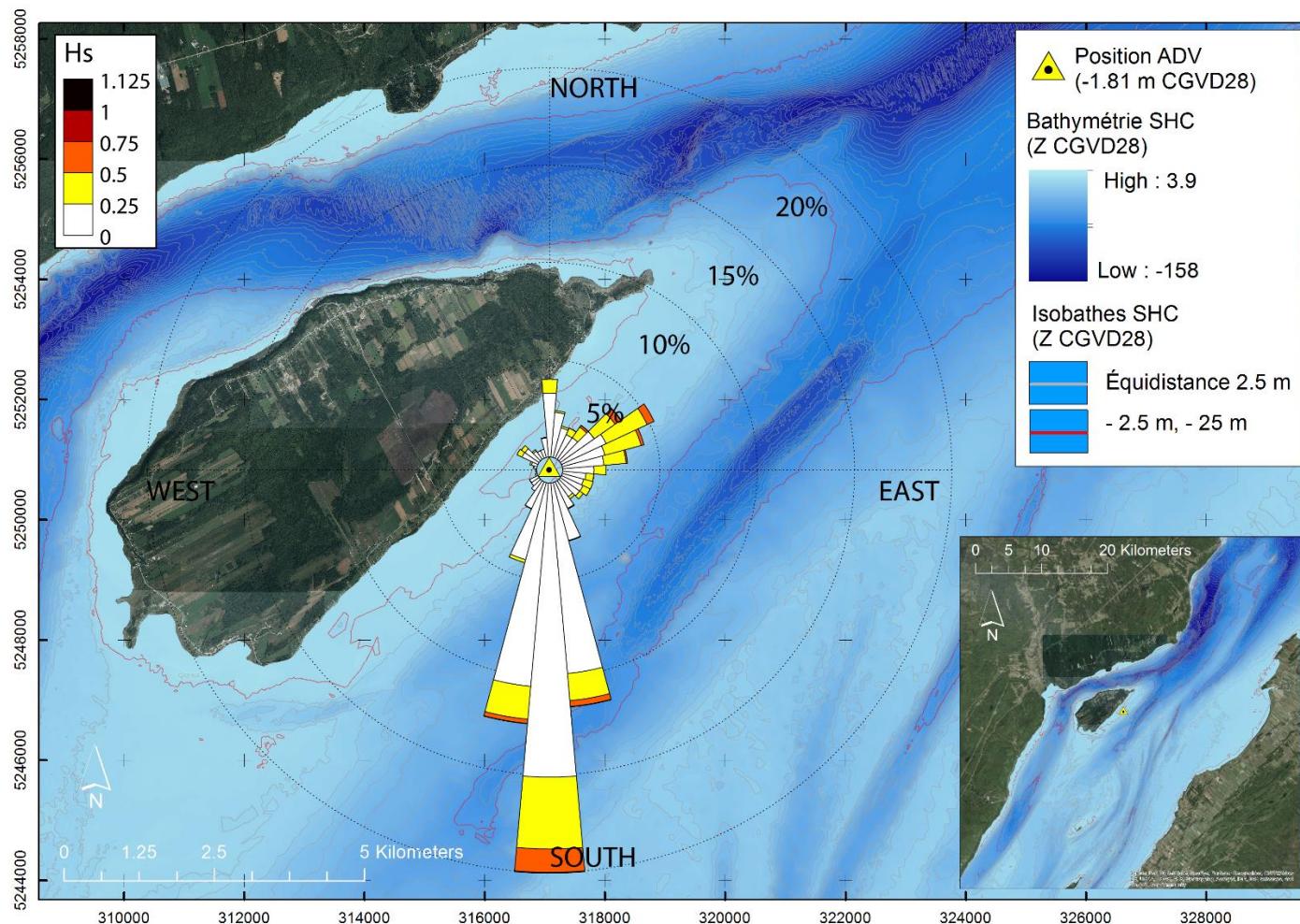


Figure 12 : Distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral sud-est de l'île, mesurée à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015.

Tableau 12 : Distribution croisée des hauteurs significatives et directions de vagues à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015 (9204 observations de 1024 s.).

Classes de directions (°)	Classes de hauteurs significatives (m.)					Occurrences	Pourcentages
	[0 - 0.25[	[0.25 - 0.5[	[0.5 - 0.75[	[0.75 - 1.0[	[1.0 - 1.125[
[355-5[	212	8	0	0	0	220	2.39
[15-25[	145	9	0	0	0	154	1.67
[25-35[	123	34	1	0	0	158	1.72
[35-45[	125	61	10	1	0	197	2.14
[45-55[	196	120	32	3	0	351	3.81
[55-65[	233	214	36	0	0	483	5.25
[65-75[	209	177	14	0	0	400	4.35
[75-85[	196	105	7	0	0	308	3.35
[85-95[	148	57	1	0	0	206	2.24
[95-105[	111	37	1	0	0	149	1.62
[105-115[	105	46	0	0	0	151	1.64
[115-125[	112	38	0	0	0	150	1.63
[125-135[	111	21	0	0	0	132	1.43
[135-145[	92	13	0	0	0	105	1.14
[145-155[	138	4	0	0	0	142	1.54
[155-165[	283	3	0	0	0	286	3.11
[165-175[	904	129	28	2	0	1063	11.55
[175-185[	1391	339	111	4	1	1846	20.06
[185-195[	965	156	20	2	0	1143	12.42
[195-205[	377	15	0	0	0	392	4.26
[205-215[	140	2	0	0	0	142	1.54
[215-225[	60	0	0	0	0	60	0.65
[225-235[	44	0	0	0	0	44	0.48
[235-245[	43	1	0	0	0	44	0.48
[245-255[	9	0	0	0	0	9	0.10
[255-265[	3	0	0	0	0	3	0.03
[265-275[	6	0	0	0	0	6	0.07
[275-285[	14	2	0	0	0	16	0.17
[285-295[	27	8	0	0	0	35	0.38
[295-305[	83	26	0	0	0	109	1.18
[305-315[	81	21	0	0	0	102	1.11
[315-325[	48	8	0	0	0	56	0.61
[325-335[	40	0	0	0	0	40	0.43
[335-345[	40	0	0	0	0	40	0.43
[345-355[	91	3	0	0	0	94	1.02
[355-5[	301	67	0	0	0	368	4.00
Occurrences	6905	1657	261	12	1	9204	100
Pourcentages	75.02	18.00	2.84	0.13	0.01	100	

La fréquence des vagues de hauteurs significatives inférieures à 0.25 m est plus élevée pour le secteur sud (80.45 %) que le secteur nord-est (56.92 %).

La fréquence des vagues de hauteurs significatives supérieures à 0.25 m est plus élevée pour le secteur sud (43 %) que pour le secteur nord-est (19.55 %).

Les vagues du secteur nord-est, bien que moins fréquentes que celles du secteur sud, sont en proportion plus hautes que celles provenant du sud. Néanmoins, en raison de la fréquence plus élevée des vagues de sud, le nombre d'occurrences de vagues supérieures à 0.25 m est quasiment égal pour les deux secteurs.

Synthèse

L'analyse des données de vagues et de niveaux d'eau met en évidence l'existence d'un double gradient spatial dans l'intensité des dynamiques qui affecte L'Isle-aux-Coudres – du large à la côte et du sud au nord.

L'intensité des dynamiques de vagues est faible, les moyennes des hauteurs significatives pour les capteurs les plus au large sont toutes inférieures à 0.16 m. Le climat de vagues est globalement calme, l'écart entre les valeurs moyennes et les extrêmes de la distribution illustre néanmoins l'existence de pics d'intensité.

Sur la côte est, les moyennes des distributions des capteurs au large situées à des profondeurs équivalentes (excepté le capteur 2.4 qui est localisé sur la face aval du cordon) augmentent néanmoins graduellement du nord au sud, allant de 0.11 m au niveau du profil 1 pour atteindre 0.15 m au niveau du profil 4. Cette tendance est confirmée par les moyennes des 10 % les plus forts et du 99^e percentile ainsi que les maxima. La hauteur significative maximum enregistrée sur le profil 1 (1 m) est 68 % en dessous du maximum enregistré sur le profil 4 (1.47 m). Le sud-est de l'île est donc globalement moins exposé que le nord-est : la figure 12 montre que le nord-est de l'île est soumis à la fois aux vagues des secteurs sud et nord-est, alors que le secteur sud-est est soumis principalement aux vagues de sud, les vagues de nord-est y étant plus amorties en raison de leur direction quasi parallèle à la côte, à l'origine d'une réfraction plus importante.

L'exposition de la pointe nord-est de l'île est renforcée par la géométrie de la zone intertidale, la plate-forme des plus basses mers étant moins étendue et plongeant plus vite que sur la section centrale de la côte est. Les vagues de nord-est atteignant la pointe nord-est de l'île sont non seulement moins dissipées par friction sur le fond, mais leur réfraction est également plus faible en raison de leur incidence à la côte plus forte.

Les sections centrale et sud de la côte sud-est bénéficient également de la présence d'un cordon de blocs et de galets formant un haut-fond de grand-axe perpendiculaire à la côte, à 800 m du littoral de l'île. Ce cordon contribue également à la dissipation de l'énergie des vagues, les mesures réalisées de part et d'autre montrant une atténuation des hauteurs significatives de vagues franchissant le cordon. Cette atténuation diminue néanmoins en conditions de hautes mers de vives-eaux, lorsque la hauteur d'eau au-dessus du cordon n'est plus suffisante pour permettre la dissipation des vagues par friction sur le fond ou déferlement.

D'une manière générale, les paramètres des distributions de vagues pour les différents capteurs d'un même profil montrent une atténuation des hauteurs significatives de vagues à mesure qu'elles se propagent vers la côte. Cette atténuation n'est cependant pas constante, elle est plus forte pour les vagues les plus faibles et son importance diminue avec l'augmentation de la hauteur des vagues. Cette observation contre-intuitive s'explique par l'étude des distributions jointes des niveaux d'eau et des hauteurs de vagues : les courbes de dépassement montrent que les vagues les plus fortes enregistrées par les capteurs positionnés à la flexure correspondent aux occurrences de niveaux d'eau les plus élevés. Or, lorsque la profondeur augmente, la dissipation par friction et la réfraction des vagues se font plus tardivement lors de leur trajet vers la côte, autorisant des niveaux d'énergie plus élevés à la côte sans pour autant modifier la distribution des vagues mesurées plus au large.

2.2 Suivi saisonnier de la morphologie de la côte

2.2.1 Problématique

Le protocole expérimental qui a été développé est destiné à répondre en particulier aux questions suivantes :

- a) Existe-t-il une relation entre la morphologie des fonds entre 0 et 5 m et les niveaux d'érosion/submersion mesurés à la côte? Quel est le rôle des fonds entre 0 et 5 m dans l'amortissement et la dissipation de l'énergie des vagues à la côte? Cet amortissement est-il différent d'un site à l'autre?
- b) Quel est le rôle de la modulation tidale en conjonction avec la morphologie des fonds dans l'amortissement et la dissipation de l'énergie des vagues à la côte? L'influence de cette modulation est-elle variable sur le climat des vagues à la côte et du run-up en fonction du régime tidal et de la morphologie des fonds?
- c) Existe-t-il une relation entre la présence/absence d'ondes d'infragravité à la côte (0.05-0.003 Hz) et l'érosion/submersion de la côte ou de l'arrière-plage? Quelle est la composition fréquentielle des oscillations du run-up en période de tempête? Existe-t-il des différences de composition entre les différents sites instrumentés?
- d) Quels paramètres morphologiques et hydrodynamiques doivent être utilisés pour élaborer une équation empirique pour calculer les niveaux de submersion? Ces paramètres peuvent-ils être différents d'un secteur à un autre?

2.2.2 Méthodologie

Le suivi morphologique de la zone instrumentée est effectué à partir de la plate-forme SMLT (Système Mobile de Lidar Terrestre) de la Chaire de Recherche du Québec en Géoscience Côtière (tableau 13) et de profils DGPS pour le domaine émergé et la zone intertidale.

Tableau 13 : Période des levés LiDAR mobile terrestre

Secteur d'étude	Période des levés LiDAR
Anse au Lard	12 juin 2015
	18 juin 2015
	24 septembre 2015
Isle-aux-Coudres	20-21 mai 2015
	1-2 août 2015
Longue-Pointe-de-Mingan	16 mai 2015
	30 août 2015
	28 septembre 2015
Maria	28 octobre 2015

Le suivi au DGPS des paramètres morphologiques de la zone intertidale et pré littorale peu profonde (position du pied de la terrasse de plage ou falaise, position de la ligne de rivage, de la flexure, extension maximale du runup, position des barres sableuses) a aussi été réalisé sous diverses conditions météo-marines (figure 13). Ce protocole permet de documenter à haute résolution et haute fréquence les évolutions morphologiques de la zone de mobilité sédimentaire (-5 m à la limite à terre de la zone de mobilité) et de les mettre en relation avec les dynamiques correspondantes.

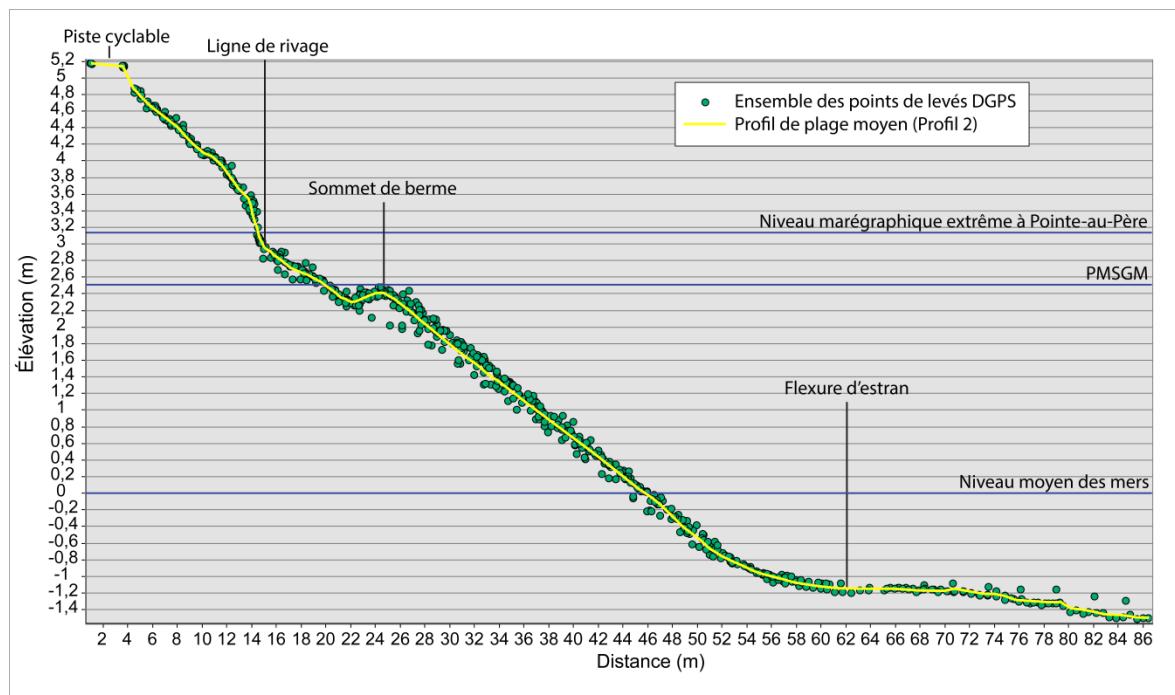


Figure 13 : Exemple de profil suivi à l'Anse au Lard et identification des éléments morphologiques et marégraphiques

La fréquence des relevés DGPS est différente selon les secteurs d'étude. Nous avons privilégié dans la première année de Modesco II, le secteur de l'Anse au Lard et de Longue-Pointe-de-Mingan. Le tableau 14 présente les dates des levés à l'Anse au Lard alors que le

tableau 15 présente les dates des levés pour Longue-Pointe-de-Mingan. Pour ce dernier secteur, il y a eu en plus des levés journaliers entre la période du 16 septembre au 22 octobre 2015 pour mesurer l'évolution topographique de la plage et le runup.

Tableau 14 : Levés au DGPS des profils topographiques de la plage et des levés de runup à l'Anse au Lard.

Levés	Dates
Profils	08 juin 2015
Profils/Runup	15 juin 2015
Profils/Runup	22 juin 2015
Profils/Runup	29 juin 2015
Profils/Runup	07 juillet 2015
Profils/Runup	13 juillet 2015
Profils/Runup	20 juillet 2015
Profils/Runup	27 juillet 2015
Profils	05 août 2015
Profils/Runup	07 septembre 2015
Profils/Runup	15 septembre 2015
Profils/Runup	21 septembre 2015
Profils/Runup	29 septembre 2015
Profils/Runup	05 septembre 2015
Profils/Runup	19 septembre 2015
Profils/Runup	26 septembre 2015
Profils/Runup	31 septembre 2015

Tableau 15 : Levés au DGPS des profils topographiques de la plage de Longue-Pointe-de-Mingan

Levés	Dates
Profils	19 avril 2015
Profils	16 mai 2015
Profils	29 juillet 2015
Profils	28 septembre 2015

La figure 14 présente un exemple de résultats de l'ensemble des points DGPS mesurés sur un profil de l'Anse au Lard pour la période de 2014 à 2016. On peut voir sur cette figure les niveaux atteints lors des tempêtes de décembre 2010, novembre 2014 et janvier 2016. La figure 14 présente le profil moyen de la plage à partir de l'ensemble des levés DGPS.

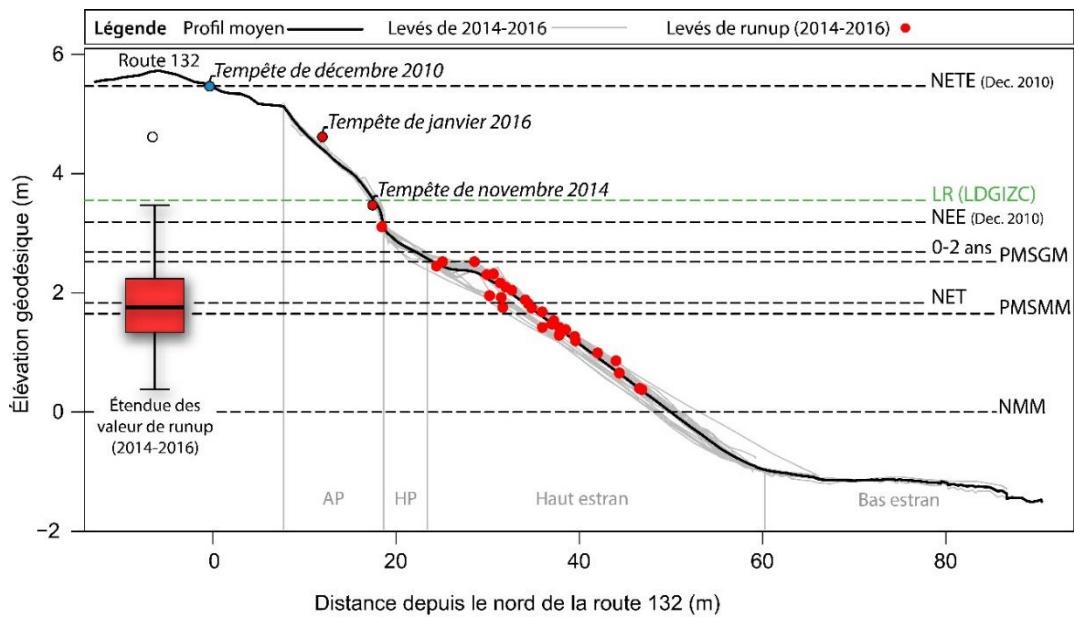


Figure 14 : Identification des limites atteintes par le runup au D-GPS

Pour le secteur de L’Isle-aux-Coudres et de Maria, une méthode développée en France par le Laboratoire Domaines Océaniques de l’Institut Universitaire Européen de la mer pour déterminer le runup et la morphologie de la plage est en cours d’expérimentation. Des caméras vidéo ont été installées en octobre 2015. Les systèmes de vidéo jusqu’à maintenant positionnés sur L’Isle-aux-Coudres et Maria (figure 15) sont une technologie novatrice en ce sens où ils permettent un suivi à très haute fréquence et à une échelle temporelle très fine (de l’ordre de la journée) des variations morphologiques et dynamiques de la zone intertidale. Le système de caméra (modèle AXIS P3367-VE) est conçu à l’origine pour la surveillance. Il s’agit donc d’une caméra réseau (fonctionnant via une connexion branchée dans un ordinateur via un port réseau et un fil de type RJ45), ce qui permet une acquisition directe sur un disque dur dans un ordinateur. La fréquence d’échantillonnage est de 4 images par secondes (4 Hz), soit la même que celle des capteurs de pression. L’angle de visée est de 84° et la résolution de 2592x1944 (5 mégapixels). Le traitement des images permet ensuite à l’aide d’algorithmes d’obtenir en continu le niveau du jet de rive (figure 16). Cette approche devrait permettre de développer et valider des modèles de runup servant à la submersion et l’érosion côtières.



Figure 15 : Système de caméra vidéo autonome à Maria

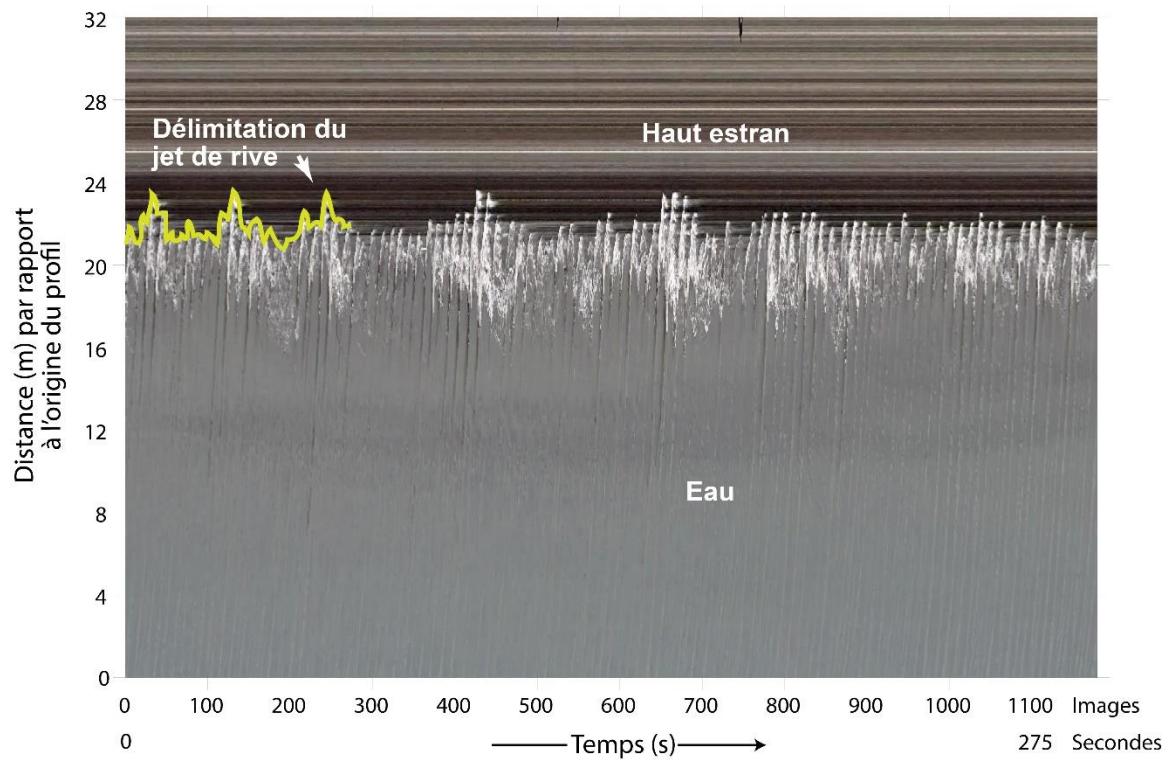


Figure 16 : Délimitation du jet de rive en continu sur le haut estran à Maria

2.2.3 Résultats

2.2.3.1 Évaluation de la modification du régime morphodynamique du haut-estran lié au positionnement des ouvrages sur L'Isle-aux-Coudres

2.2.3.1.1 Profil 1

Le profil 1 est positionné sur le secteur sud-ouest de l'île sur lequel un enrochement a été construit à l'automne 2014. Le pied d'ouvrage est situé à +3.71 m d'altitude (CGVD28). Trois levés topographiques ont été réalisés en août 2014 (avant l'implantation de l'ouvrage), novembre 2014 (immédiatement après l'implantation) et au printemps 2015.

Le runup (altitude maximale atteinte par les vagues sur la plage) est calculé selon la relation empirique établie pour les côtes à plate-forme rocheuse et haut-estran sableux du Bas-Saint-Laurent. Cette formulation intègre les données de hauteur de vagues incidentes, d'ondes longues et de niveaux d'eau mesurés au niveau du capteur situé à la flexure de chaque profil (rupture de pente marquant la limite entre haut-estran et plate-forme rocheuse, capteur x.2), pour chaque pas de temps.

La courbe de dépassement (figure 17) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4.4 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3.83 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Le runup a atteint ou dépassé le pied de l'ouvrage (+ 3.7 m NMM) durant 4 h 30 pour une durée de mesure de 2433 heures (durée de submersion du capteur situé à +1.3 m NMM). Le niveau le plus haut est situé 0.6 m au-dessus du pied de l'ouvrage.

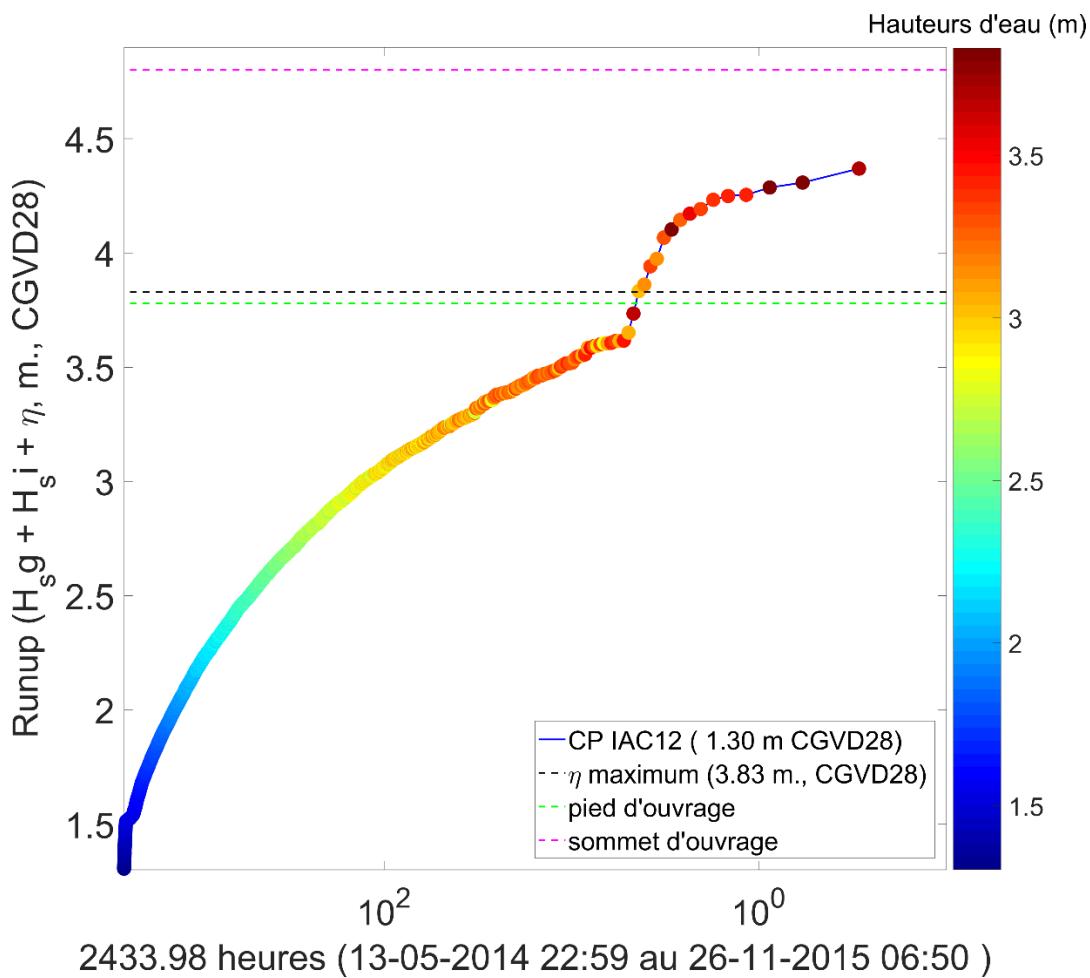


Figure 17 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteint par les vagues sur le haut-estran du profil 1 (Runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

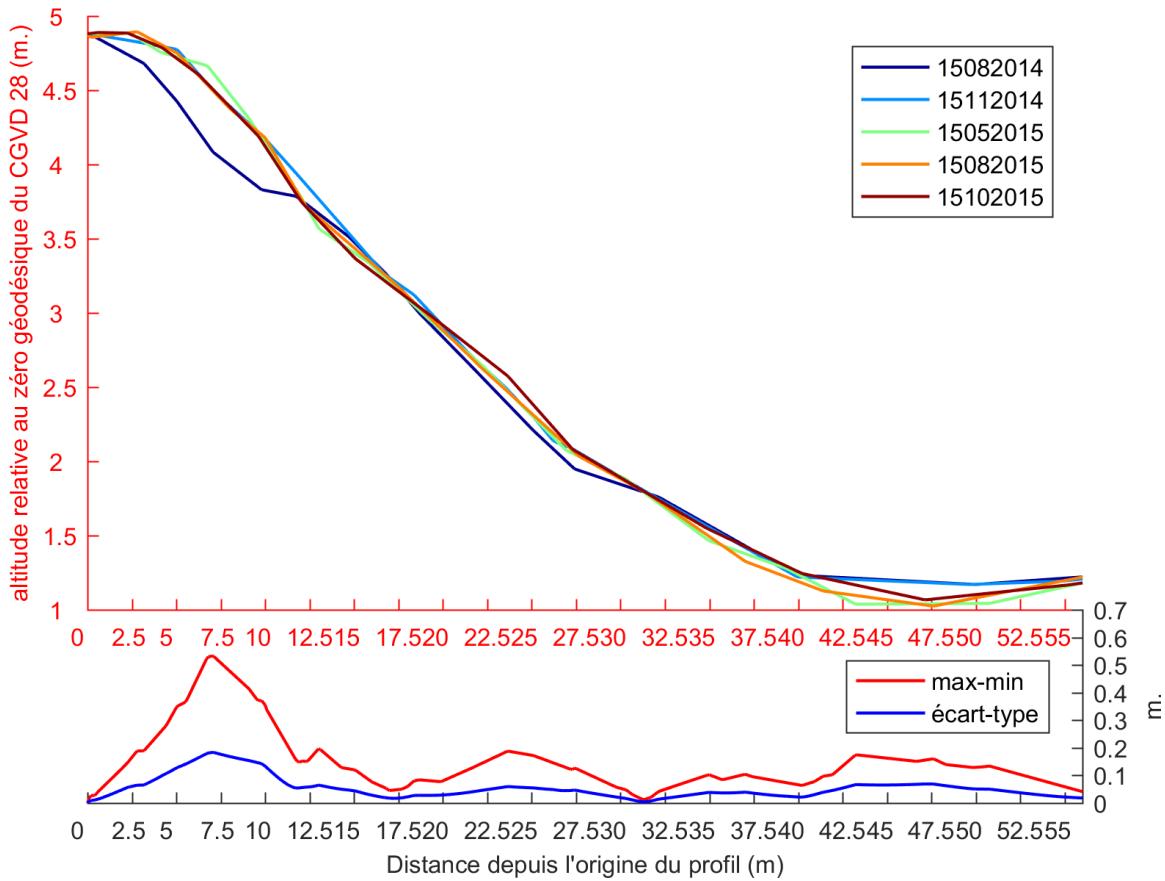


Figure 18 : Évolution verticale du haut-estran du profil 1 entre le printemps 2014 et l'automne 2015.

L'évolution verticale du haut-estran sableux du profil 1 (figure 18) met en évidence le remblai dû au positionnement de l'enrochement sur la section supérieure entre août et novembre 2014. Les évolutions verticales sont assez faibles entre novembre 2014 et mai 2015, elles correspondent principalement à un basculement du profil, avec un décaissement de la section supérieure non-aménagée pouvant atteindre -0.2 m au pied de l'ouvrage (7.5 m à 17.5 m depuis l'origine du profil), compensé par une accumulation de faible amplitude (<0.1 m) sur la section inférieure du haut-estran (17.5 à 30 m). La morphologie du profil demeure constante entre mai 2015 et août 2015. D'août 2015 à novembre 2015, on observe une accumulation de faible amplitude au centre de l'estran (entre 17 et 27 m), ainsi qu'une autre accumulation, plus importante au pied de l'estran (entre 32 et 47 m).

2.2.3.1.2 Profil 2

La courbe de dépassement (figure 19) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4.25 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3.83 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Le runup n'a pas atteint la base de la microfalaise d'érosion observée en haut de plage (+4.31 m).

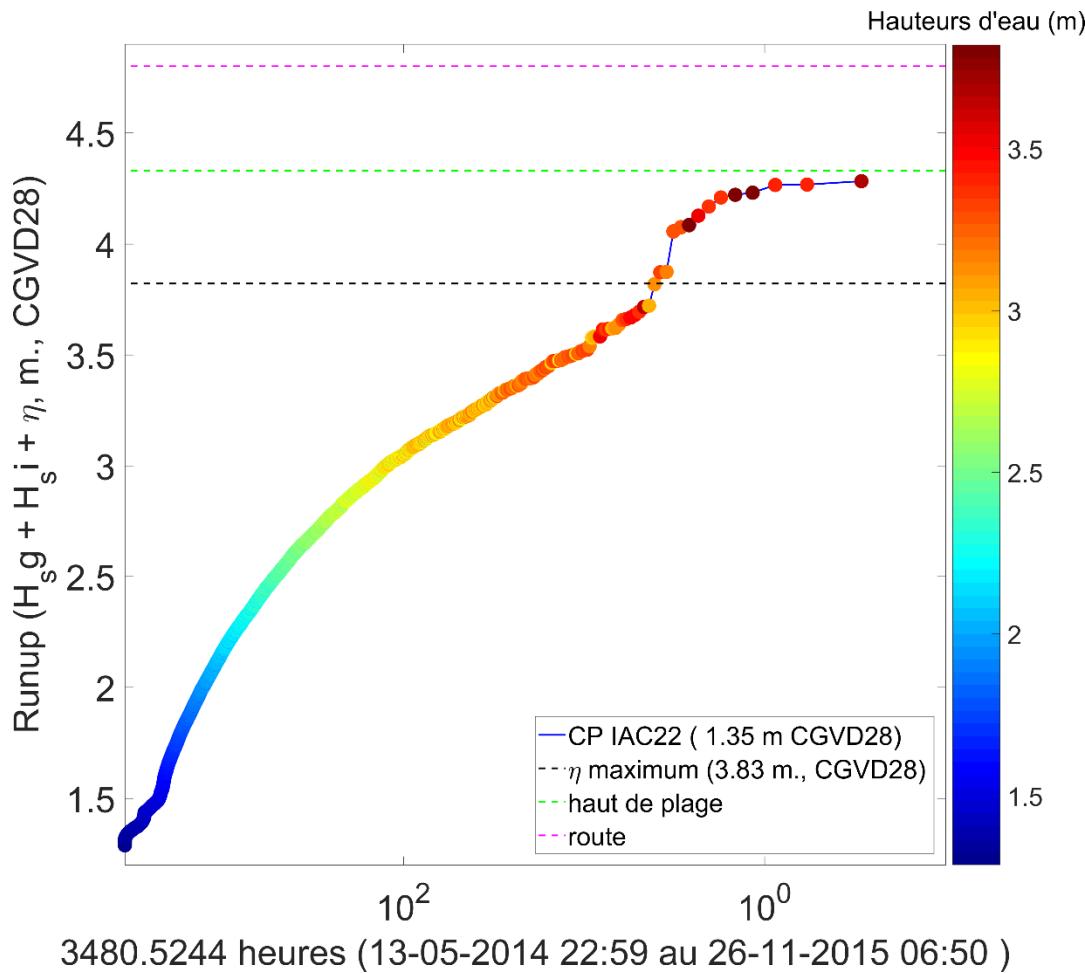


Figure 19 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 2 (Runup calculé intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

L'évolution verticale du profil 2 (figure 20) met en évidence une accumulation laminaire de faible amplitude (<0.1 m) affectant les sections centrale (12.5 à 27.5 m depuis l'origine du profil) et inférieure (> 42.5 m) du haut-estran entre les mois d'août et de novembre 2014. Cette tendance s'inverse pour les mêmes sections entre novembre 2014 et mai 2015, avec une érosion verticale supérieure à 0.15 m.

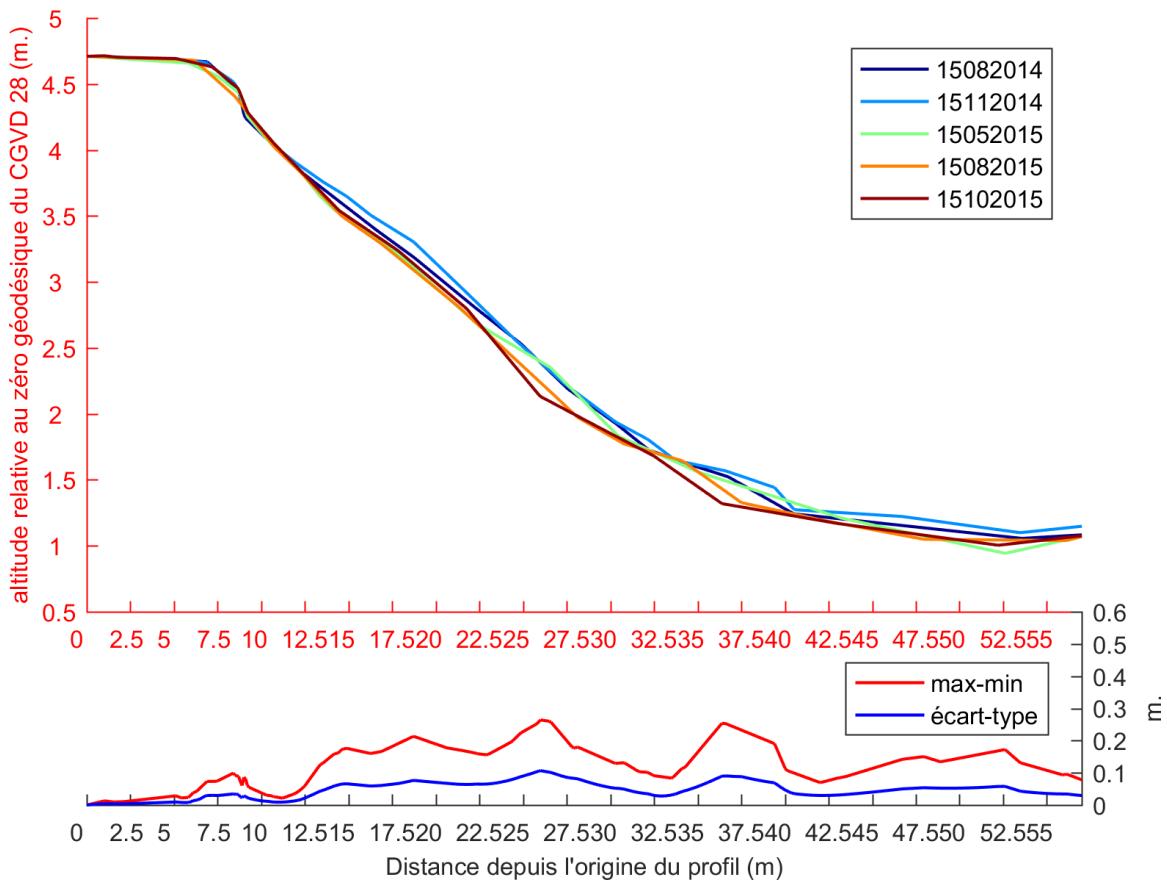


Figure 20 : Évolution verticale de l'estran du profil 2 entre l'été 2014 et l'automne 2015.

Le printemps et l'été 2015 (mai à août) correspondent à une érosion sur la partie basse de l'estran et la flexure, avec une évolution verticale négative pouvant atteindre -0.3 m entre 22.5 et 30 m depuis l'origine, et -0.2 m entre 30 et 42 m. Le profil reste stable entre août et novembre 2015.

2.2.3.1.3 Profil 3

La courbe de dépassement produite pour le profil 3 (figure 21) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4.46 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3.85 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Le runup a dépassé le sommet de la berme marquant la limite amont du haut-estrang (+4.2 m) durant 2 h sur 3723 heures d'immersion du capteur 3.2.

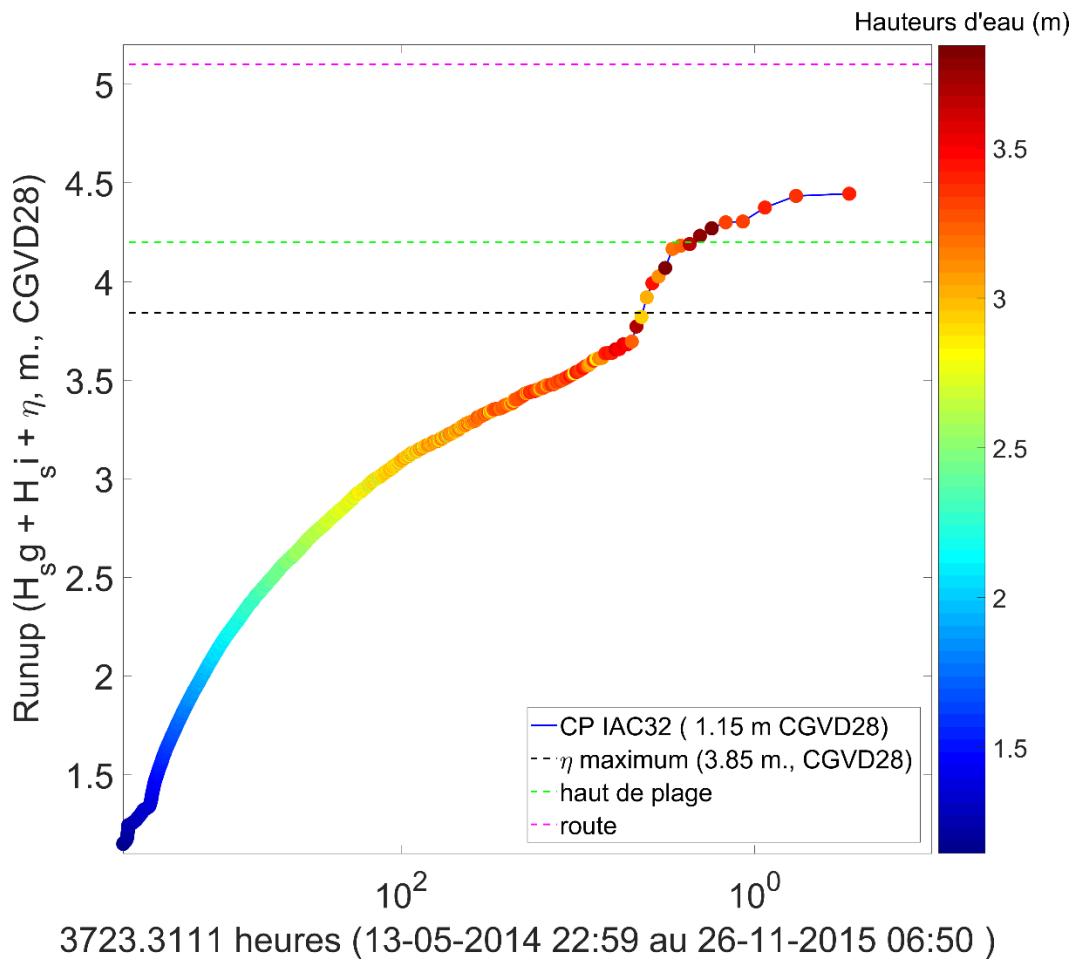
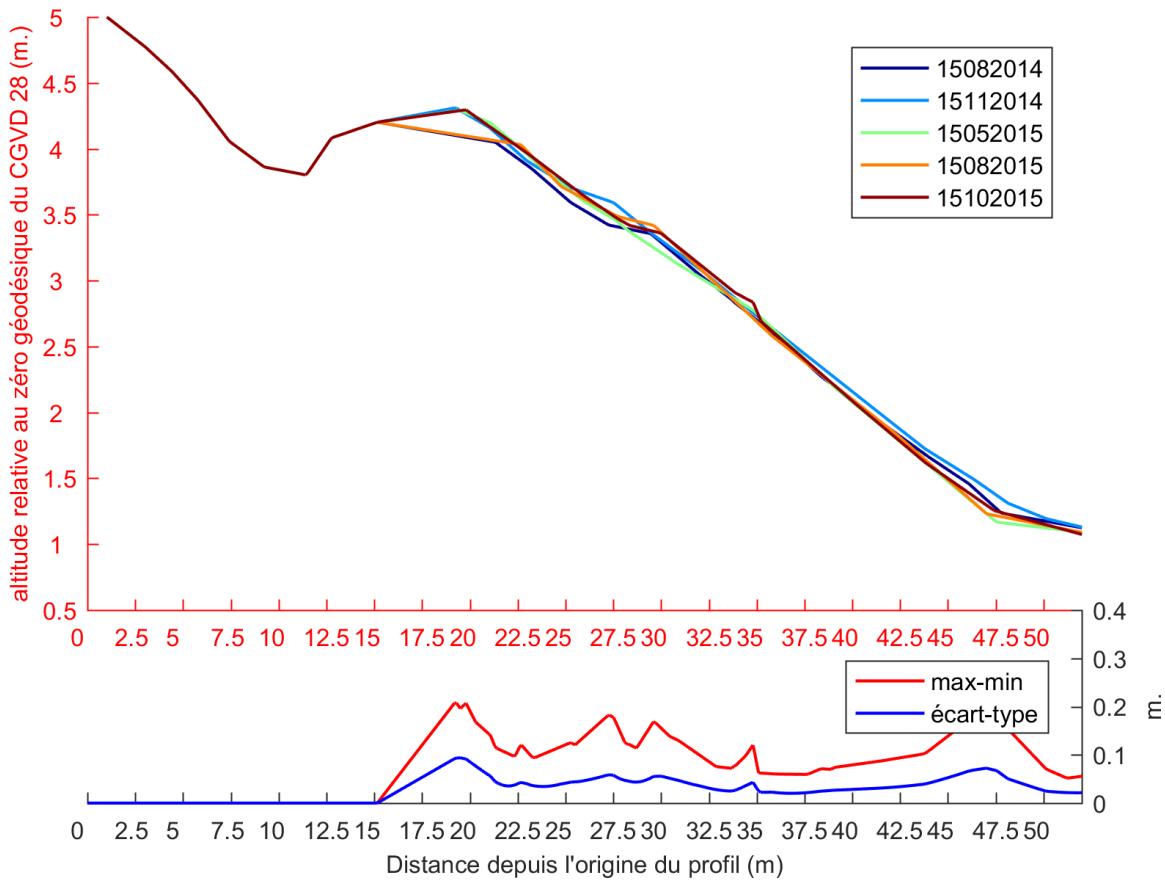


Figure 21 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estrang du profil 3 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

L'évolution du haut-estrang sableux du profil 3 (figure 22) met en évidence une accrédition verticale (+0.1 à 0.15 m) du sommet de l'estrang (15 m à 30 m depuis l'origine du profil) et de la base de l'estrang (37.5 à 52.5 m depuis l'origine du profil) entre août et novembre

2014. Cette tendance s'inverse entre novembre 2014 et mai 2015, avec une érosion verticale de plus forte amplitude à la base de l'estran (-0.2 m) et d'amplitude moins forte sur la section centrale supérieure (25 à 32.5 m depuis l'origine du profil). Une légère accrétion verticale (+0.15 m) se produit entre 27 et 35 m depuis l'origine du profil entre mai et août 2015. Le profil est stable entre août et novembre 2015.



2.2.3.1.4 Profil 4

La courbe de dépassement produite pour le profil 4 (figure 23) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4.64 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3.83 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Le runup a atteint le pied du muret de soutènement de la route situé au sommet du haut-estran sableux (+4.2 m) durant 2 h et 50 minutes sur 2497 heures d'immersion du capteur 4.2. Le niveau de runup le plus élevé a dépassé le pied du muret de plus de 0.4m.

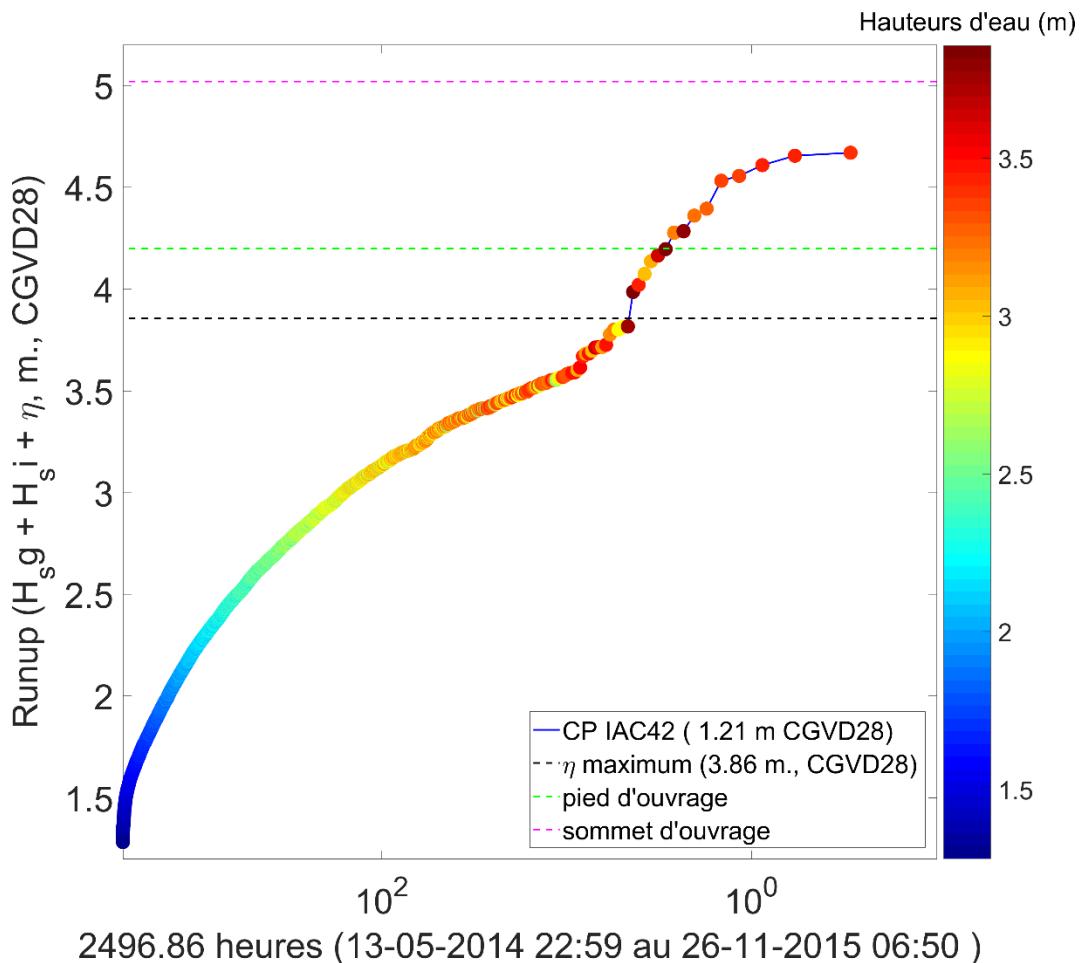


Figure 23 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 4 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

L'évolution morphologique du profil 4 (figure 24) met en évidence une accrétion verticale des sections centrale et inférieure du haut-estran (6 à 27.5 m depuis l'origine du profil) entre août et novembre 2014. Cette accrétion est plus marquée vers l'aval du profil (-0.2 m), son amplitude diminuant dans la section centrale (-0.1 m) constituant une transition vers la section supérieure du profil (2.5 à 7.5 m depuis l'origine du profil), caractérisée par une érosion faible (<0.1 m). La période de novembre 2014 à mai 2015 présente une tendance à l'érosion sur l'ensemble du profil, de faibles amplitudes à la base de l'estran (17.5 à 25 m depuis l'origine du profil), augmentant progressivement vers les sections centrales et supérieures pour dépasser 0.2 m entre 2.5 et 10 m.

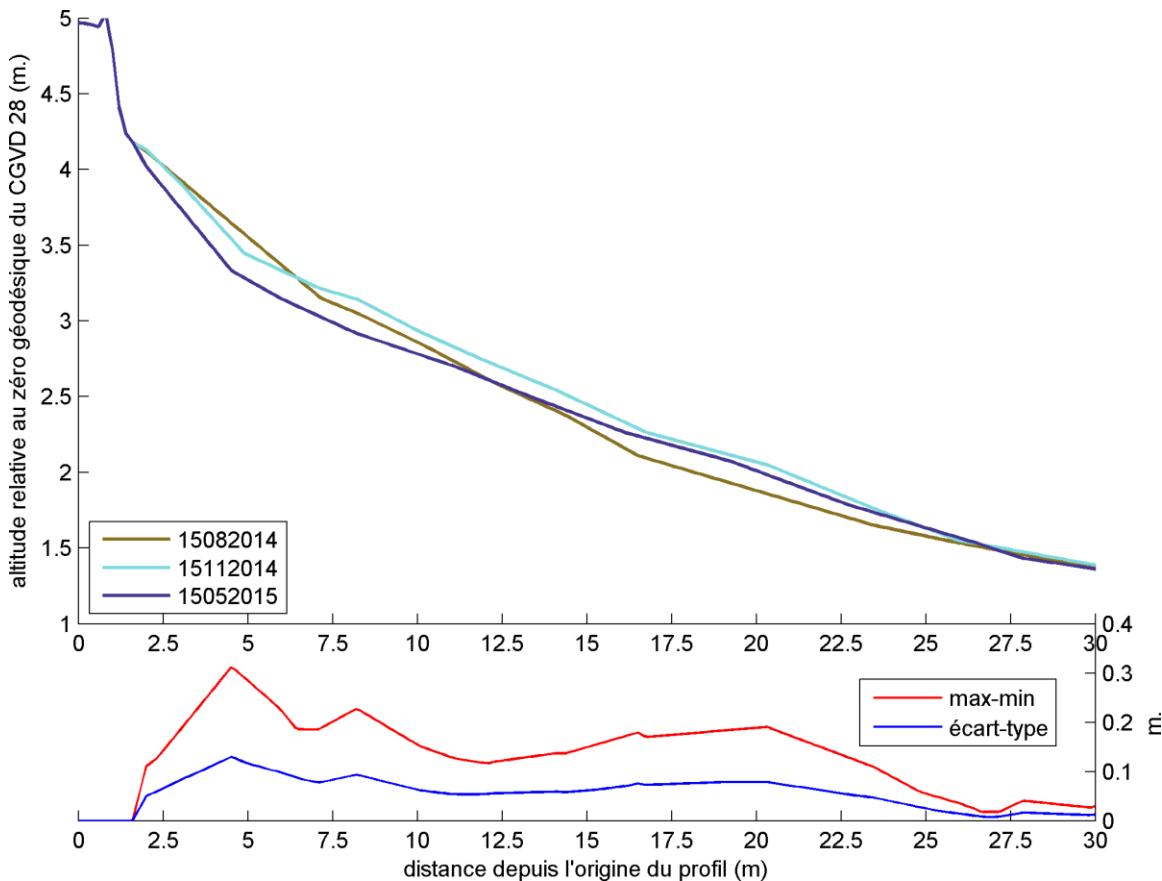


Figure 24 : Évolution verticale du haut-estran du profil 4 entre l'été 2014 et le printemps 2015.

2.2.3.1.5 Profil 5

La courbe de dépassement produite pour le profil 5 (figure 25) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4.72 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3.89 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Le runup a atteint le pied de l'enrochement qui protège la route positionnée sur la section supérieure du haut-estrang sableux (+ 3.5 m) durant 10 h sur 3180 heures d'immersion du capteur 5.2. Le niveau de plus élevé a dépassé le pied du muret de plus de 1.17 m.

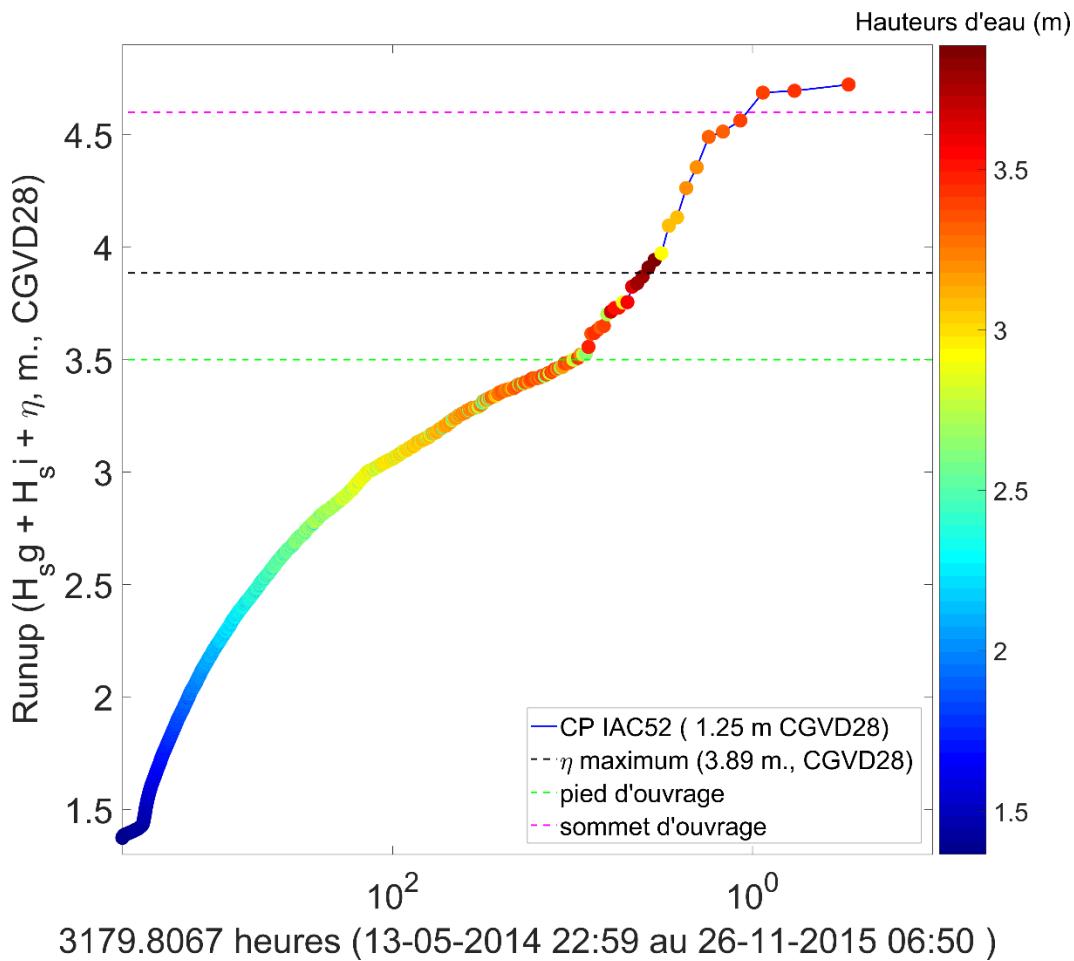


Figure 25 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estrang du profil 5 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

L'évolution de la morphologie du profil 5 (figure 26) met en évidence le remblai dû au positionnement de l'enrochement sur la section supérieure entre août et novembre 2014. Les évolutions verticales sont assez faibles durant cette période, excepté une accrédition

verticale artificielle sur le pied de l'ouvrage (10 à 15 m depuis l'origine du profil), correspondant à l'épandage du matériel excavé lors la construction de la claire.

Entre novembre 2014 et mai 2015, le matériel disposé sur le pied de l'enrochement est érodé (8 à 15 m depuis l'origine du profil) sur une profondeur pouvant atteindre 0.3 m, avec une mise à nue de l'enrochement. Ce matériel est redistribué sur la section centrale et inférieure de l'estran (15 à 27.5 m) sous forme d'un dépôt laminaire de faible épaisseur (<0.1 m). Entre mai 2015 et août 2015, le profil est stable. Les données montrent une accrétion sur l'ouvrage, il s'agit d'un artefact lié à la nature irrégulière du glacis qui induit des variations lorsque les profils réalisés ne passent pas exactement sur la trace suivie au levé précédent. Le levé suivant (novembre 2015) permet de confirmer cette observation. Les sections centrales et basses du profil sont néanmoins en érosion entre août et novembre 2015, avec une perte laminaire verticale de 0.07 m de 10 m à 32 m de l'origine du profil.

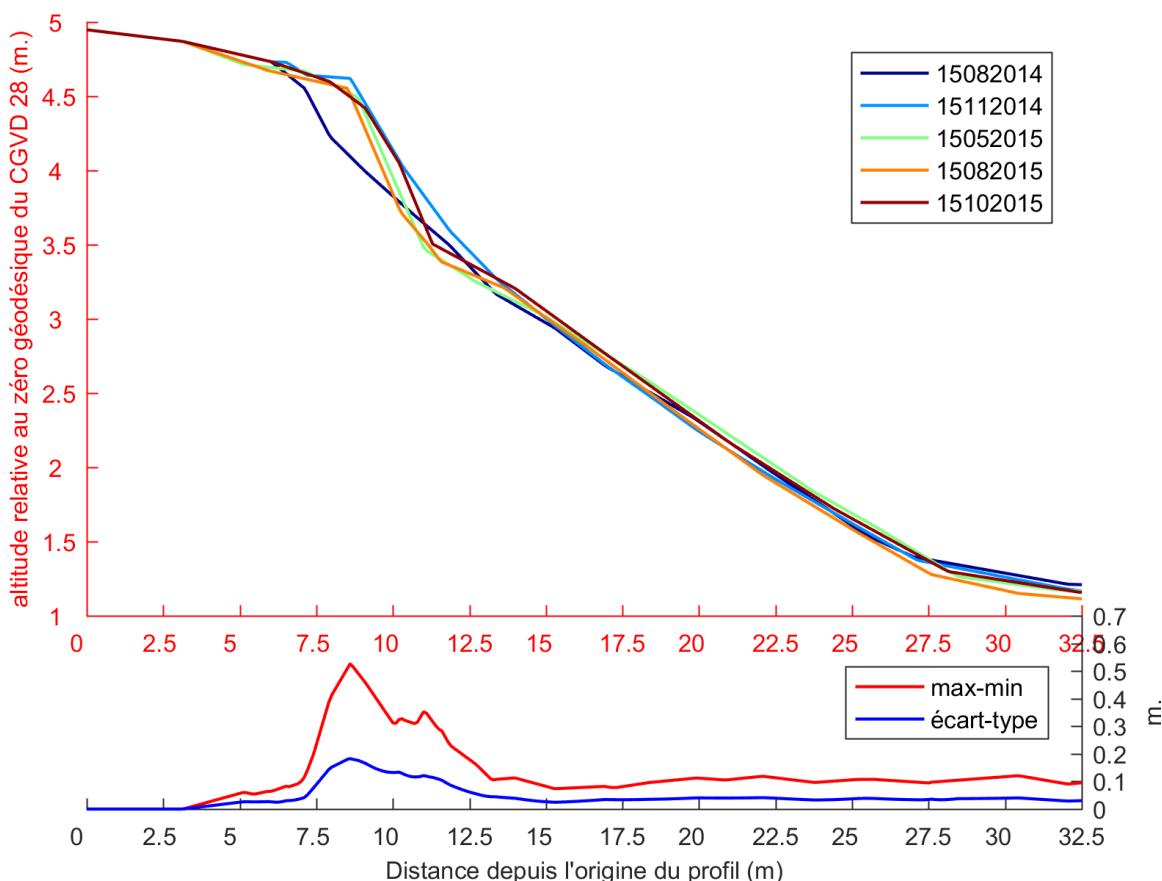


Figure 26 : Évolution verticale du haut-estran du profil 5 entre l'été 2014 et l'automne 2015.

2.2.3.1.6 Profil 6

La courbe de dépassement produite pour le profil 6 (figure 27) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4.5 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3.88 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Les calculs montrent que le runup a quasiment atteint l'arrière-plage, située en amont du sommet de l'estran (+ 4.6 m). Les observations de laisse de tempête faites sur place montrent un épandage de débris sur l'arrière-plage, jusqu'à une distance de trois mètres en amont du sommet de l'estran. Quelques événements de runup ont donc dépassé la limite calculée, néanmoins, compte tenu de l'absence de pente de l'arrière-plage, la faible extension de la zone submergée suggère une tranche d'eau relativement mince. Il est possible que le runup associé au jet de rive des vagues les plus fortes ait dépassé nos estimations de 0.1 à 0.3 m.

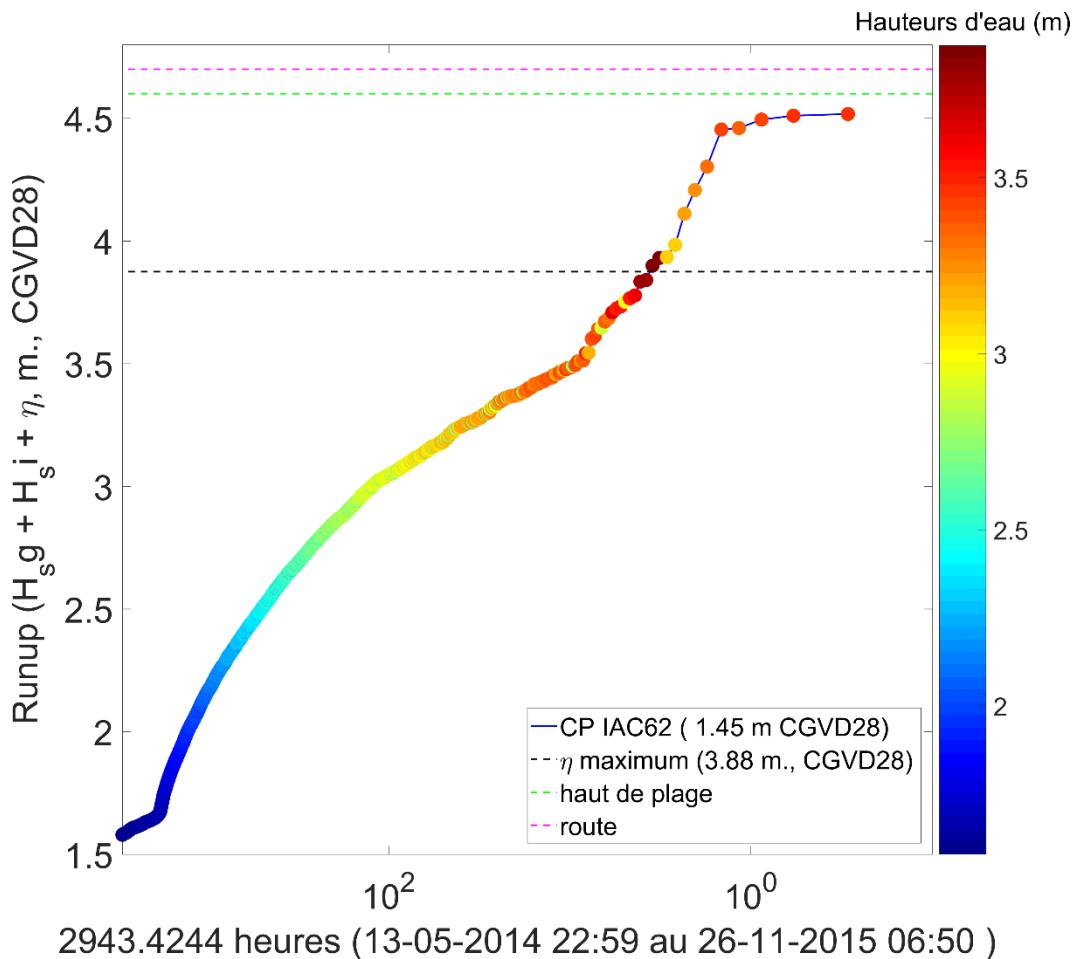


Figure 27 : Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 6 (runup calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

L'évolution de la morphologie du profil 6 (figure 28) met en évidence un basculement de l'estran entre août 2014 et mai 2015. La section supérieure (13 à 18 m depuis l'origine du profil) présente une tendance faible à l'érosion (<0.1 m) alors que la section inférieure est en accréition légère sur la période, avec une accumulation verticale augmentant du centre vers le bas de l'estran. Le profil est stable entre mai et août 2015. Entre août et novembre 2015, une berme se constitue au sommet de l'estran entre 10 et 15 m depuis l'origine du profil (+0.3 m d'accumulation verticale maximum). Le reste du profil ne présente pas d'évolution.

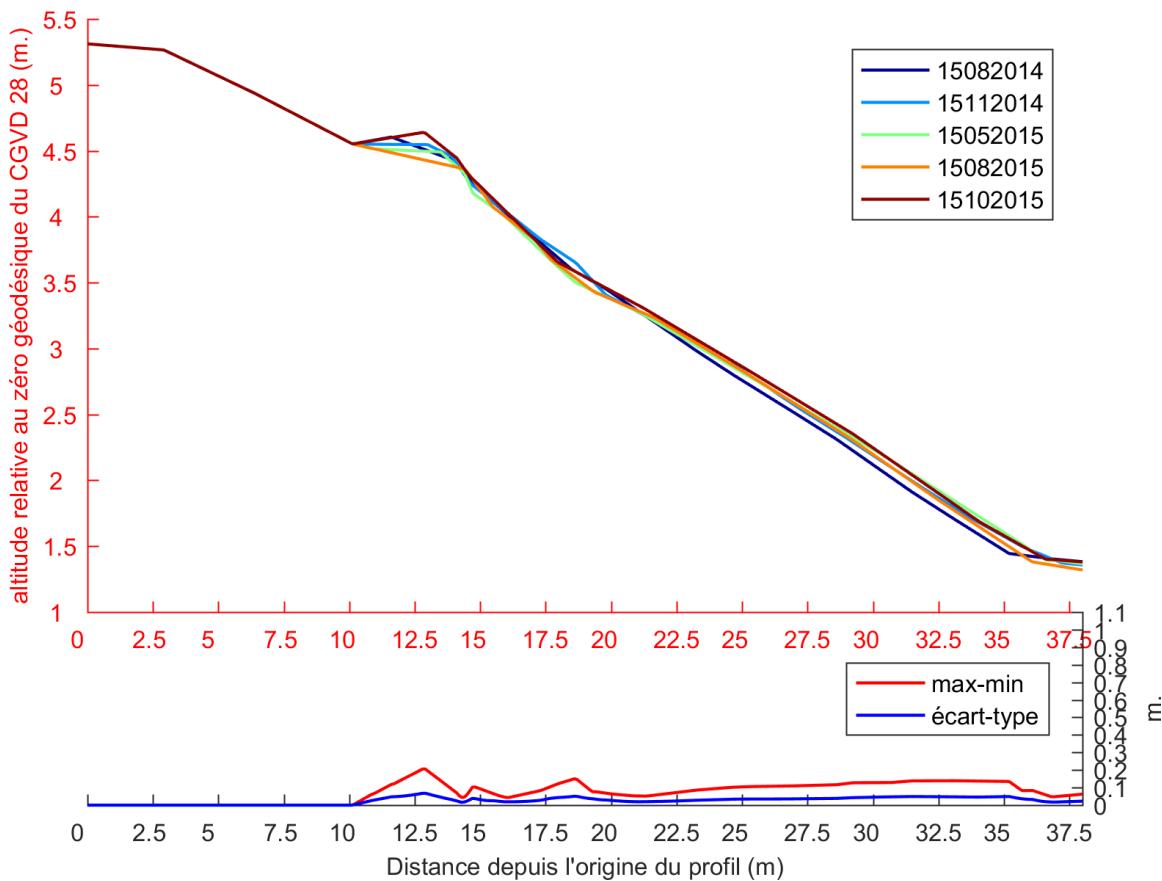


Figure 28 : Évolution verticale du haut-estran du profil 6 entre l'été 2014 et l'automne 2015.

2.2.3.1.7 Synthèse

Pour les six profils suivis, les plus fortes valeurs d'érosion verticales sont observées devant les trois profils équipés d'un ouvrage de défense construit sur la section supérieure du haut-estran. Les données hydrodynamiques montrent que si les aménagements des profils P2 et P4 ne sont pas atteints par les variations statiques (marée astronomique + surcote) du plan d'eau, l'addition des dynamiques de vagues permet d'expliquer les évolutions observées au pied de ces aménagements, particulièrement lors des tempêtes du 27 novembre 2014.

La conjonction d'une surcote barométrique, des hautes mers de vives-eaux et de fortes vagues est à l'origine de l'érosion observée en pied des ouvrages. Cet événement a contribué à redistribuer sur le bas de l'estran les sédiments excavés lors de la construction qui avaient été déposés au pied de l'ouvrage (profil 1 et 5).

Même si l'on ne peut pas évoquer un effet dommageable des ouvrages sur la stabilité des profils 1 et 5 (les sédiments érodés étant issus d'apports externes lors de la construction) il est à noter que les profils témoins, non aménagés, n'ont pas montré d'évolutions aussi importantes.

Il est également important de noter que les évolutions observées au pied des ouvrages sont le fait d'événements statistiquement rares. Cela démontre la fragilité d'un milieu adapté à un fonctionnement morphodynamique de faible intensité.

Les évolutions négatives observées ont principalement lieu entre novembre 2014 et mai 2015. Les variations morphologiques négatives observées durant cette période ne sont pas compensées lors de l'été 2015. Néanmoins, sur les sites aménagés, ces évolutions négatives sont principalement imputables à la redistribution du matériel sédimentaire positionné artificiellement sur les ouvrages et en pied d'ouvrage lors des travaux de l'automne 2014.

2.2.3.2 Quantification des effets de la géomorphologie de l'estran sur les conditions de niveaux d'eau et de vagues à la côte

La variabilité de la distribution des hauteurs significatives de vagues ($Hm0$) entre le large et la côte est due à plusieurs phénomènes physiques :

- la réfraction des vagues sur le fond,
- la dissipation de l'énergie des vagues par friction sur le fond puis déferlement,
- les transferts d'énergie non linéaires entre les différentes bandes de fréquence du spectre,
- l'effet de la modulation tidale sur ces phénomènes.

La réfraction est un phénomène linéaire lié à la géométrie des fonds (pente et orientation) qui affecte les ondes courtes de la même manière, quelle que soit la profondeur, dès que la profondeur est inférieure à $\frac{1}{2}$ longueur d'onde ($L0/2$). La dissipation par friction sur le fond est variable en fonction des paramètres de vagues et du niveau d'eau. Des modélisations montrent que ce phénomène devient sensible à partir de -2 m de profondeur pour des vagues de $Hm0 = 1.5$ m, $Tp = 6$ s. On considère que la dissipation par déferlement devient active à partir d'une profondeur limite telle que $d = 0.73 Hm0$.

Pour évaluer le rôle de la morphologie des fonds de l'avant-côte proximale, on compare donc de proche en proche, du large vers la côte, les valeurs des données de hauteur significative ($Hm0$) produites simultanément par les différents capteurs d'un même profil morphodynamique. Cette section présente les résultats obtenus pour les ondes incidentes (ondes courtes, $1 \text{ s} < T < 18 \text{ s}$), les résultats obtenus pour les ondes d'infragravité (ondes longues, $18 \text{ s} < T < 200 \text{ s}$) seront présentés ultérieurement.

Les horloges internes des instruments étant synchronisées lors du déploiement, les séries chronologiques de vagues issues de chaque capteur sont également synchronisées. Pour un pas de temps donné, chaque caractéristique de $Hm0$ pour chaque instrument et position est issue exactement de l'analyse du même échantillon de 1024 s. Les distances entre les instruments aux différentes positions étant petites relativement à la vitesse de propagation des vagues, on peut donc suivre l'évolution des caractéristiques de vagues du large vers la côte pour chaque pas de temps.

Afin de mesurer l'influence de la morphologie des fonds sur la variabilité du climat de $Hm0$, on compare les distributions statistiques des données de $Hm0$ produites simultanément pour chaque couple d'instruments adjacents, pour les deux bandes de fréquences considérées (gravitaires et infragravitaires). Les distributions sont ordonnées sous forme de courbe de fréquences cumulées, aussi appelées courbes de dépassement. Des régressions linéaires sont ensuite calculées à partir de diagrammes quantile-quantile (mise en relation graphique des distributions de $Hm0$ à la position de chaque capteur), les coefficients des droites de régression permettant de quantifier la probabilité d'amortissement des $Hm0$ d'une position à

l'autre. Cette approche intègre donc la totalité des termes physiques affectant l'évolution des hauteurs de vagues du large à la côte (réfraction, dissipation par friction sur le fond, par déferlement et effet de la modulation tidale sur ces termes).

2.2.3.2.1 Amortissement des hauteurs de vagues sur la plate-forme des basses mers (-2 à -1 m CGVD28)

La plate-forme des basses mers (PFBM) correspond à la surface d'estran seulement découverte durant les basses mers. Elle constitue une surface subhorizontale de pente très faible (0.3 - 0.125 %). En raison de sa profondeur importante et du climat modéré de vague qui affecte L'Isle-aux-Coudres, cette surface contribue principalement à l'amortissement par réfraction des hauteurs de vagues. En raison de son extension (plus de 800 m par endroit sur l'île), elle contribue majoritairement à une dissipation non — turbulente de l'énergie des vagues atteignant la côte.

Au niveau du profil 2 (figure 29), là où l'extension de la PFBM est la plus importante, l'amortissement de la distribution des Hm_0 est quantifié entre le capteur 2.4 situé à -1.98 m CGVD28 (NMM) à l'extrême sud-est (vers le large) du profil, et le capteur 2.3 (-0.97 m CGVD 28) situé au pied de l'escarpement du niveau marin moyen. Cet amortissement est de 18 %. Cette valeur est homogène pour toute la distribution (figure 29b).

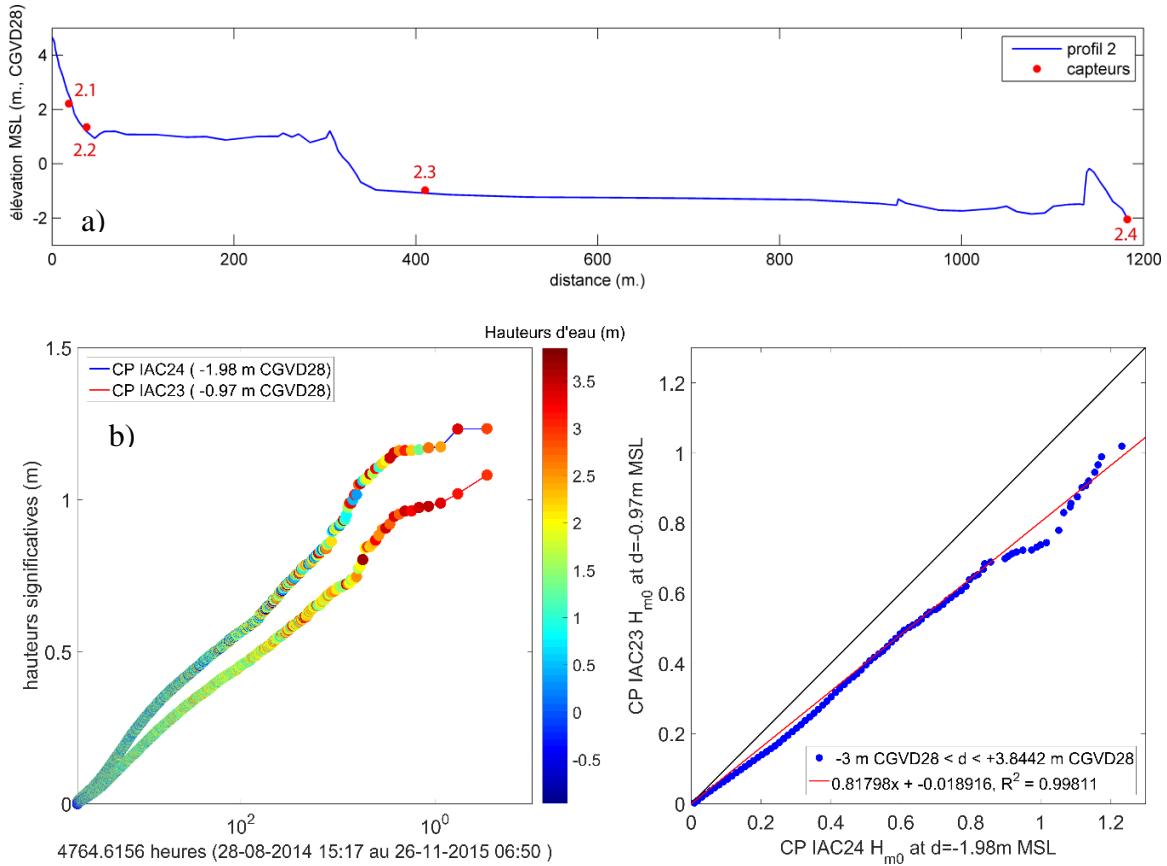


Figure 29 : a) morphologie et position des capteurs du profil 2, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 2.4 et 2.3 pour les années 2014 et 2015.

2.2.3.2.2 Effet de l'escarpement du niveau marin moyen

La PFBM est connectée à la plate-forme des hautes mers par un escarpement rocheux présent sur la quasi-totalité du littoral sud de l'île. Cet escarpement est caractérisé par une cambrure forte (2.4 % en moyenne), potentiellement responsable de la réflexion vers le large d'une proportion de l'énergie des ondes incidentes. Afin d'isoler ses effets sur la distribution de l'énergie des vagues se propageant vers la côte, des capteurs ont été positionnés immédiatement à l'amont et à l'aval de cette structure.

Au niveau du profil 1 (figure 30a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 1.3 b, situé à -1.32 m CGVD28 (NMM) en aval de l'escarpement, et le capteur 1.3a (1.13 m CGVD 28), distant de 165 m, situé au sommet de l'escarpement du niveau marin moyen. Cet amortissement est de 21 %. Cette valeur est homogène pour toute la distribution (figure 30b).

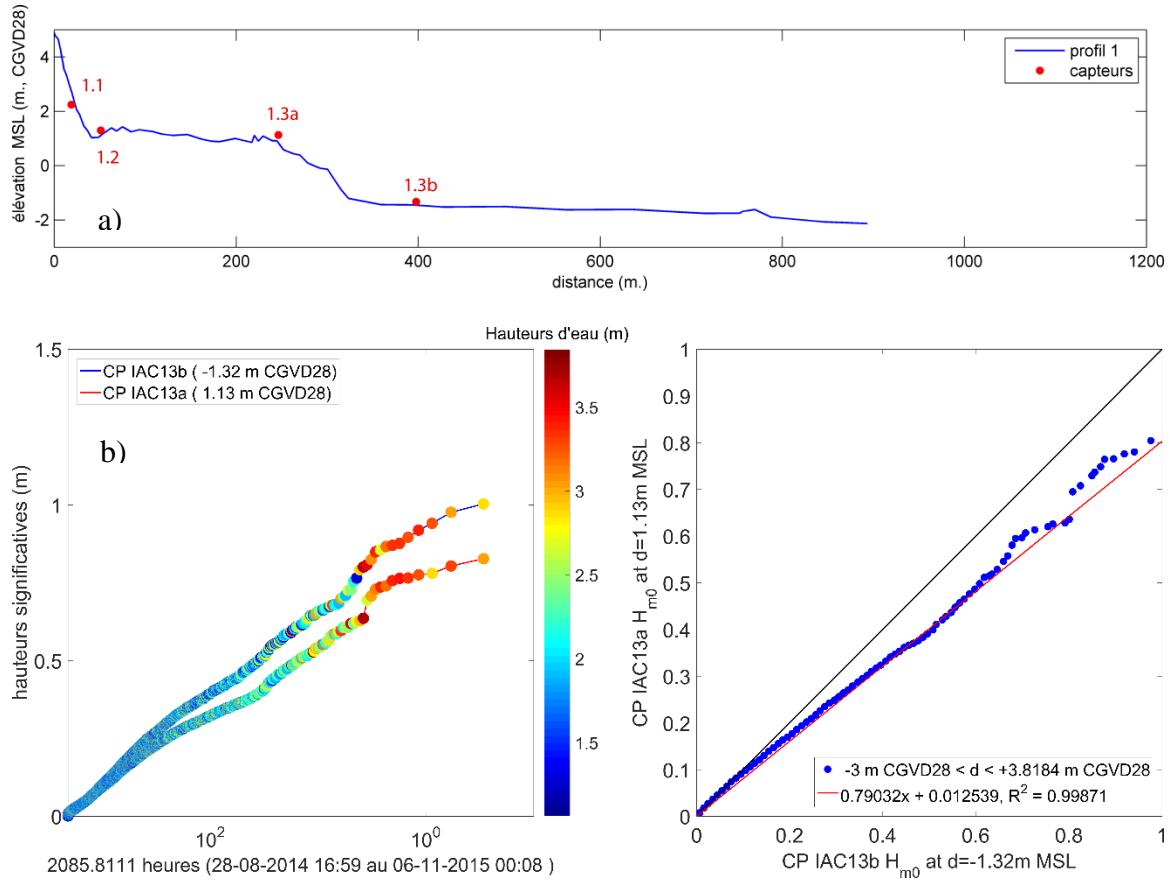


Figure 30 : a) morphologie et position des capteurs du profil 1, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3b et 1.3a pour les années 2014 et 2015.

Au niveau du profil 3 (figure 31a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 3.3b, situé à -1.8 m CGVD28 (NMM) en aval de l'escarpement, et le capteur 3.3a (1.16 m CGVD 28), distant de 180 m, situé au sommet de l'escarpement du niveau marin moyen. L'amortissement est hétérogène, il est de 32.5 % pour les vagues inférieures à 0.7 m mesurées au capteur 3.3 b, les vagues supérieures à 0.7 m présentant un amortissement plus faible, de 20 % en moyenne (figure 31b).

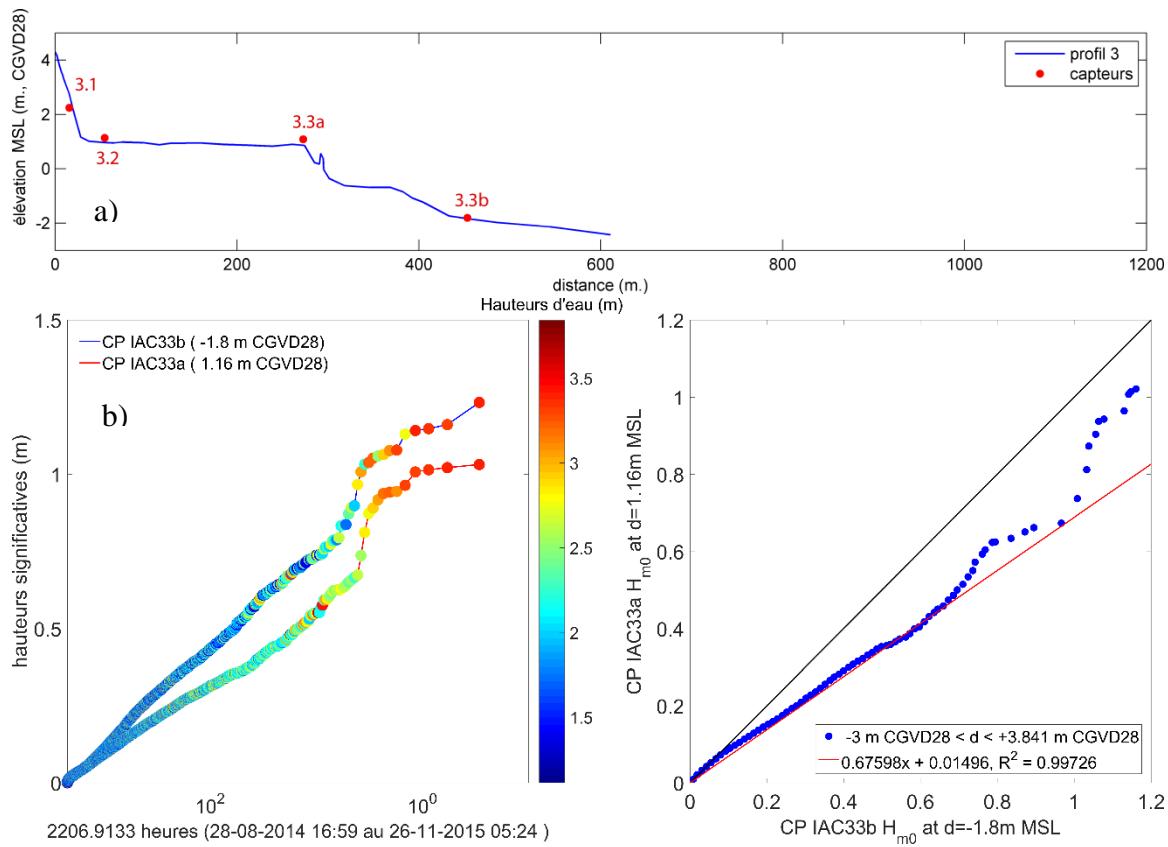


Figure 31 : a) morphologie et position des capteurs du profil 3, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3b et 3.3a pour les années 2014 et 2015.

2.2.3.2.3 Amortissement des hauteurs de vagues sur la plate-forme des hautes mers (+ 1 m CGVD 28)

La plate-forme des hautes mers (PFHM) correspond à la surface d'estran seulement recouverte durant les hautes mers. Elle constitue une surface subhorizontale de pente très faible, voire nulle. En raison de sa profondeur faible, cette surface contribue à l'amortissement par réfraction des vagues les plus faibles et à l'amortissement par friction sur le fond des vagues les plus fortes.

Au niveau du profil 1 (figure 32a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 1.3a situé à 1.3 m CGVD28 (NMM), au sommet de l'escarpement du niveau marin moyen, et le capteur 1.2 (1.16 m CGVD 28), distant de 220 m et situé au niveau de la flexure (rupture de pente entre le haut-estran et la PFHM). L'amortissement est hétérogène, il est de 50 % pour les vagues inférieures à 0.5 m mesurées au capteur 1.3a, les vagues supérieures à 0.7 m présentant un amortissement plus faible, de 13 % en moyenne (figure 32 b).

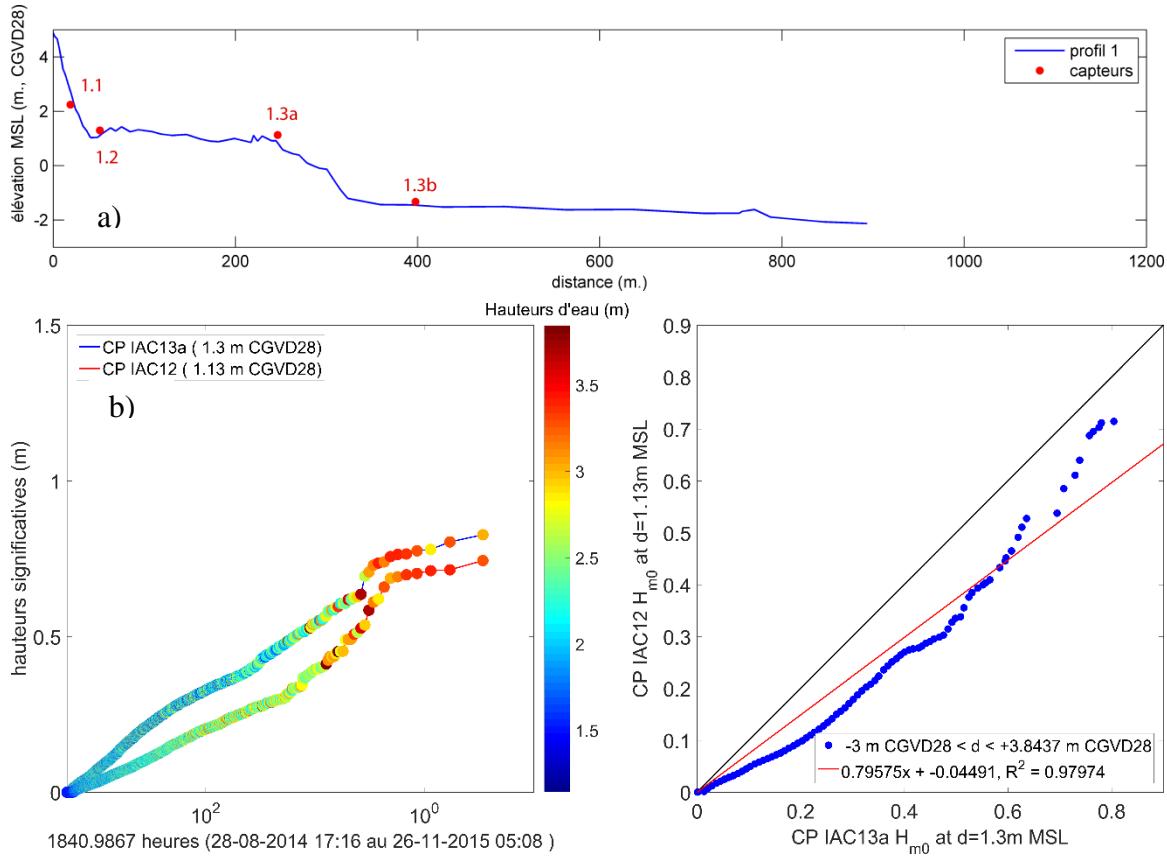


Figure 32 : a) morphologie et position des capteurs du profil 1, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3b et 1.3a pour les années 2014 et 2015.

Au niveau du profil 2 (figure 33a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 3.3a situé à 1.16 m CGVD28 (NMM), au sommet de l'escarpement du niveau marin moyen, et le capteur 3.2 (1.15 m CGVD 28) situé au niveau de la flexure (rupture de pente entre le haut-estrang et la PFHM), distant de 200 m. L'amortissement de la distribution est globalement homogène, il est de 16 % (figure 33 b).

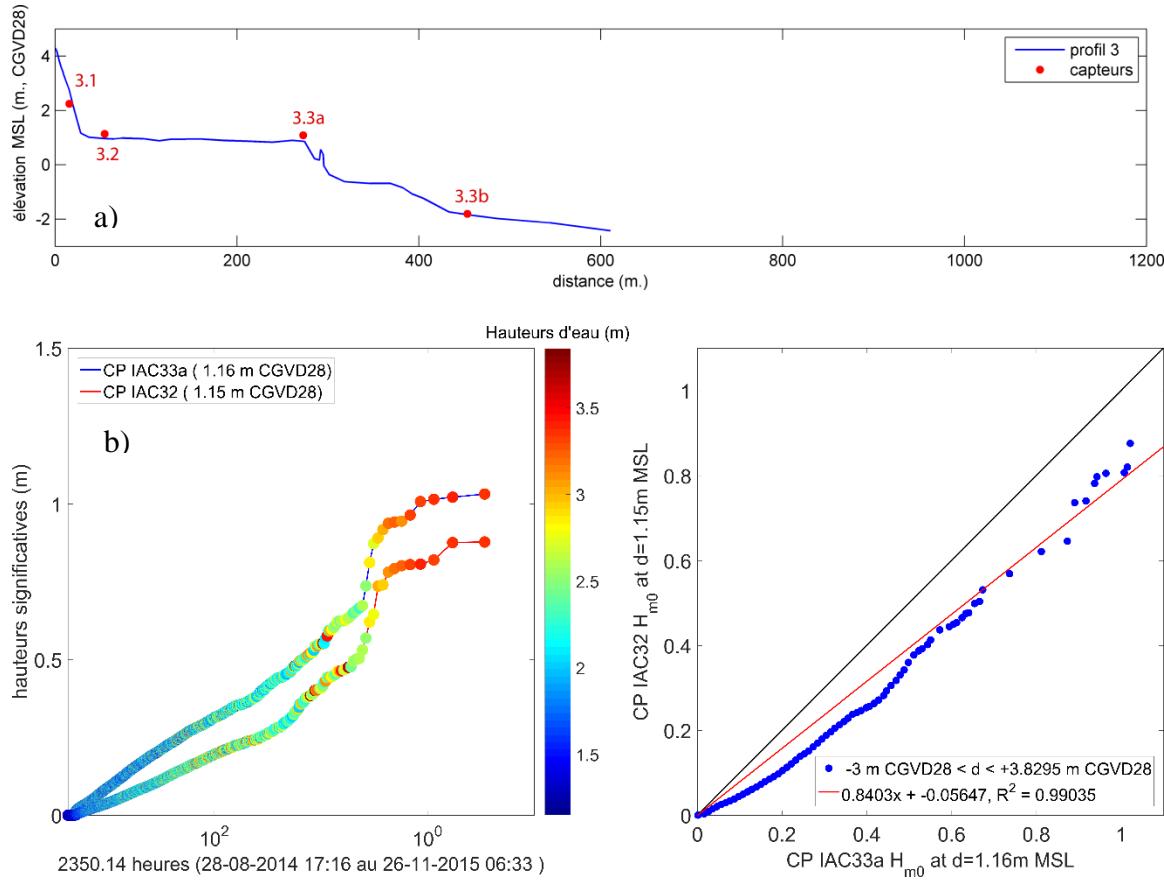


Figure 33 : a) morphologie et position des capteurs du profil 3, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3b et 3.3a pour les années 2014 et 2015.

2.2.3.2.4 Amortissement des hauteurs de vagues sur l'estran

Le haut-estran des plages de L'Isle-aux-Coudres est totalement recouvert uniquement durant les pleines mers de vives-eaux. Il constitue une surface plane de pente forte, 10 %, fortement réfléctrice. En raison de sa forte pente et de la faible hauteur des vagues, les vagues y dissipent leur énergie principalement lors du déferlement. Durant les pleines mers de vives eaux, en raison du fort marnage et du climat de vague modéré, il n'y a pas de déferlement avant l'estran, ce qui rend le déferlement très énergétique en raison de la dissipation turbulente sur une distance très courte de l'énergie de vagues faiblement amorties. On observe généralement des déferlements plongeant (plunging breaker) directement sur le haut estran (shore break). En cas de très haut niveau d'eau et de hauteur de vagues fortes, la dissipation de l'énergie des vagues sur le haut de plage ou les infrastructures peut causer des dégâts importants.

Au niveau du profil 4 (figure 34), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 4.2 situé à 1.21 m CGVD28 (NMM), au niveau de la rupture de pente entre la PFHM et le haut-estran (flexure), et le capteur 4.1 situé au centre du haut estran sableux, à une altitude de 2.22 m. Les deux instruments sont distants de 22.5 m.

L'estran est responsable de la dissipation terminale de l'énergie des vagues, le taux d'amortissement de la distribution est très élevé et homogène, de l'ordre de 48 % (figure 34b).

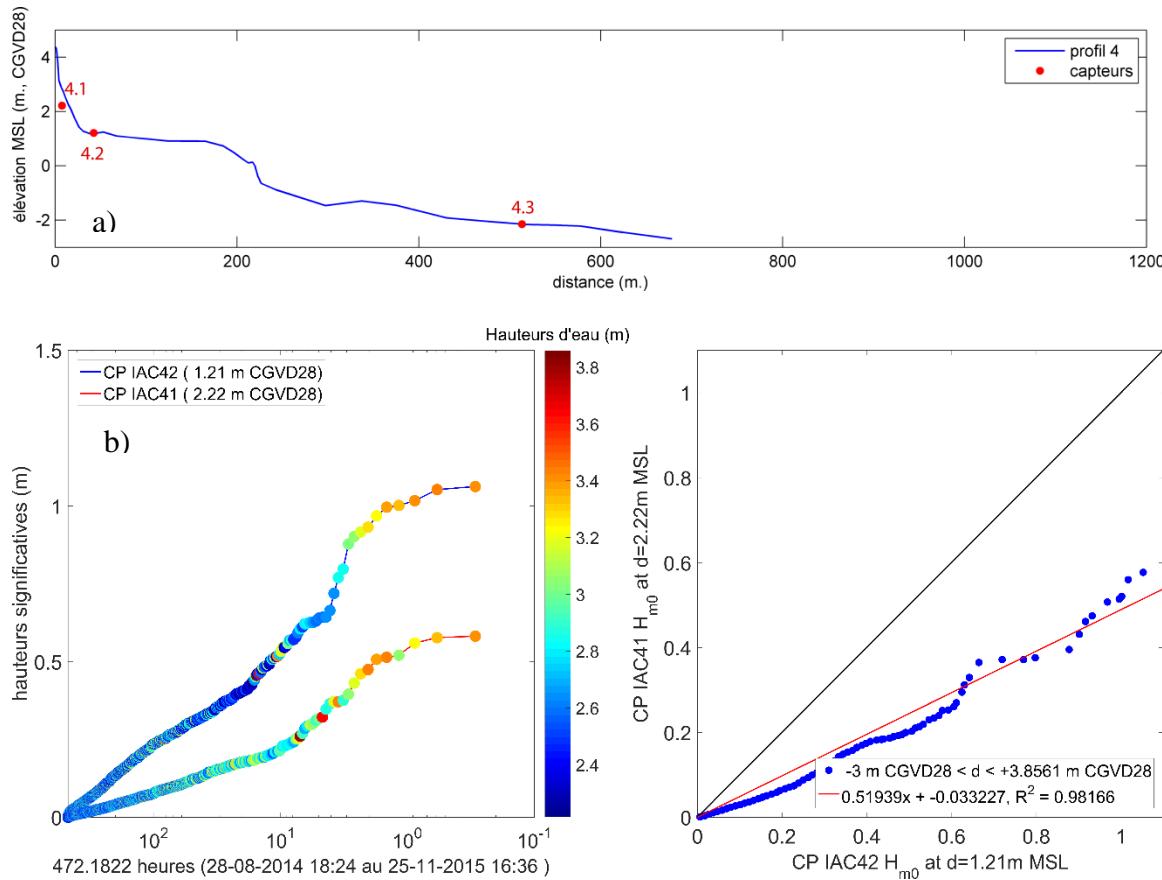


Figure 34 : a) morphologie et position des capteurs du profil 4, b) courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 4.3 b et 4.3a.

2.2.3.2.5 Synthèse

Les plus fortes contributions à l'atténuation des dynamiques de vagues à la côte sont dues aux secteurs présentant les plus fortes pentes, malgré leurs faibles extensions (tableau 16). L'escarpement du Niveau Marin Moyen (NMM), connectant les plates-formes des hautes mers et basses mers, présente les taux d'amortissement ramenés à leur extension les plus élevés de l'ensemble des unités.

Tableau 16 : Influence des différents secteurs morphologiques de la zone intertidale sur l'amortissement des distributions de hauteurs significatives pour les années 2014 et 2015.

	PFBM		EscarpeNMM				PFHM				Haut-estran		
Capteurs	2.4	2.3	1.3 b	1.3a	3.3 b	3.3a	1.3a	1.2	3.3a	3.2	4.2	4.1	
Profondeur	-1.98	-0.97	-1.32	1.30	-1.80	1.16	1.30	1.13	1.16	1.15	1.21	2.22	
Hm0 moyenne (m)	0.16	0.12	0.12	0.09	0.14	0.11	0.12	0.06	0.10	0.05	0.15	0.05	
Hm0 max (m)	1.23	1.08	1.00	0.82	1.23	1.03	0.83	0.74	1.03	0.87	1.06	0.59	
distance entre les instruments (m)	800.00		165.00		180.00		220.00		200.00		22.50		
différence de profondeur entre les instruments (m)	1.01		2.62		2.96		-0.17		-0.01		1.01		
coefficients d'amortissement (petites vagues)	0.82	0.79	0.67		0.60		0.84		0.51				
coefficients d'amortissement (grandes vagues)			0.84		0.90								
Taux d'amortissement ramené à la distance (%/m)	-0.10		-0.48		-0.37		-0.27		-0.42		-2.27		

3 Produire la climatologie des vagues et des niveaux d'eau pour la période 1979-2015 pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent

La production de séries chronologiques fiables des paramètres de vagues décrivant heure à heure l'évolution de la surface du large jusqu'à la côte (-10 m) sur le domaine de l'EGSL requiert l'utilisation d'un modèle vent-vague spectral de nouvelle génération. Le modèle pleinement spectral WaveWatch III comporte les formulations nécessaires pour résoudre la propagation des vagues en domaine hauturier et côtier. Il permet de sauvegarder les paramètres de vagues sur l'ensemble de sa grille spatiale et les données spectrales à des positions côtières prédéterminées afin d'alimenter des modèles morphodynamiques côtiers. Les schémas numériques de ce modèle permettent une implémentation sur des serveurs (ou grappe) de calcul à mémoire distribuée autorisant des temps de calcul faibles en comparaison d'autres modèles vent-vague. Ce modèle est utilisé de manière opérationnelle dans les centres de prévision météorologique et océanique de plusieurs régions du monde, notamment aux États-Unis, en Europe et en Australie (NOAA, Centre de Météorologie Canadienne, Météo-France/Ifremer, etc.) et maintenant au Canada.

3.1 Périodes modélisées, conditions aux limites et paramétrisation

Dans le cadre de la phase I de Modesco, la grille de calcul du Saint-Laurent utilisée pour simuler les conditions de vagues et de niveaux d'eau pour la période de 1979 à 2010 avait une résolution de 5 km^2 .

Dans le cadre de la phase II, une grille de calcul à 1 km de résolution a été implémentée (figure 35).

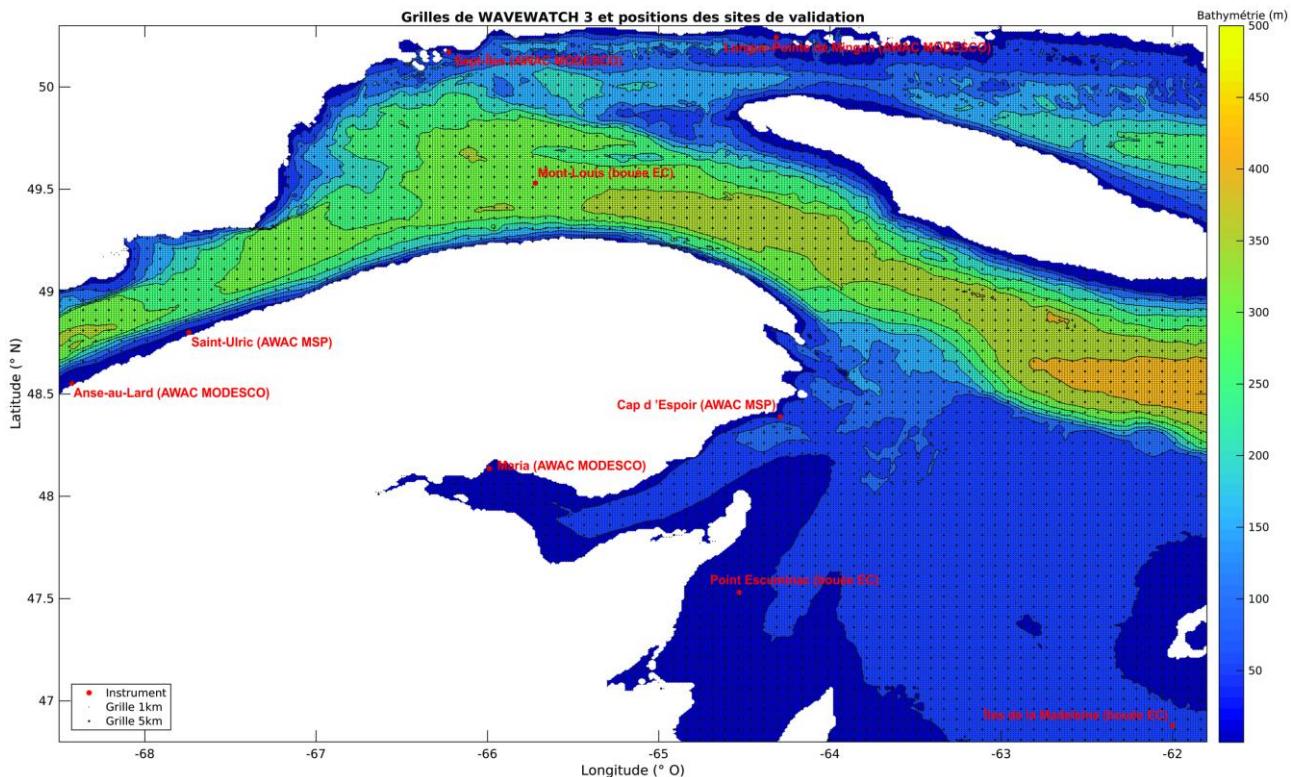


Figure 35. Grilles de calcul de WAVEWATCH 3 (1 km et 5 km de résolution), et positions des sites de validation.

Deux exécutions du modèle ont été réalisées en 2016 pour la période 1979-2015, une à 1 km et une à 5 km de résolution.

Chaque exécution comporte une simulation pour le « passé récent » (1979-2010) et une pour l’« actuel » (2010-2015). La simulation « passé récent » sert à établir un climat de vague de référence à l'échelle de toute cette région, tandis que l’« actuel » permet la validation du modèle grâce aux données disponibles sur cette même période.

- Pour la simulation « actuel », WW3 est alimenté par des forçages atmosphériques provenant de *The Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR, NCEP/NOAA), et des forçages océaniques du Modèle Océanique Régional (MOR), opéré à l'ISMER pour l'EGSL (Senneville et St-Onge-Drouin).
- Pour la simulation « passé récent », MOR est alimenté par les réanalyses climatiques de *The North American Regional Reanalysis* (NARR, NCEP/NOAA), alors que pour l’« actuel », il est alimenté par les réanalyses climatiques du *Global Environmental Multiscale Model* (GEM), NARR n’étant plus disponible après 2010.

3.2 Paramétrisations et sorties

Les paramétrisations physiques utilisées dans le modèle correspondent au forfait de termes-sources ST4, utilisées par la NOAA.

Les sorties de grilles à 1 km (242 200 points actifs) ont été sauvegardées pour l'ensemble de la période, pour les paramètres de hauteur significative (H_s), période spectrale moyenne d'ordre 2 (T_{m02}), direction spectrale moyenne (Dir_m).

Afin de disposer de paramètres supplémentaires à proximité des sites d'intérêt, des sorties paramétriques de hauteur significative (H_s), longueur d'onde (L_o), période spectrale moyenne d'ordre 2 (T_{m02}), période de pic (T_p), direction spectrale moyenne (Dir_m), direction du pic (Dir_p) et étalement spectral directionnel ($DrSp$) ont été également été produites et sauvegardées pour les points suivants (tableau 17, figure 36).

Tableau 17 : Coordonnées des positions des sorties paramétriques interpolées du modèle (degrés décimaux).

FID	Localité	X	Y	Profondeur
1	Sainte-Anne-des-Monts	-66.49150085	49.13700104	-17.49419975
2	Matane	-67.62550354	48.83100128	-18.64279938
3	Rimouski	-68.51650238	48.50699997	-10.56439972
4	Trois-Pistoles	-69.20500183	48.18299866	-15.69439983
5	La Pocatière	-70.1230011	47.45399857	-20.28339958
6	Kamouraska	-69.90699768	47.5890007	-16.07379913
7	Rivière-du-Loup	-69.59649658	47.86800003	-11.26780033
8	Saint-Fabien	-68.90799713	48.32699966	-12
9	Anse au Lard	-68.42199707	48.56100082	-13.24450016
10	Longue-Rive-Pointe-à-Boisvert	-69.15100098	48.54299927	-17.50659943
11	Portneuf-sur-Mer	-69.0565033	48.62400055	-36.43119812
12	Escoumins	-69.38050079	48.35400009	-45.78430176
13	Pointe-aux-Outardes	-68.39499664	49.02000046	-65.09829712
14	Pointe-Lebel	-68.1115036	49.10100174	-44.97140121
15	Godbout	-67.53099823	49.30799866	-90.59649658
16	Rivière-Pentecôte	-67.09899902	49.76699829	-57.55720139
17	Port-Cartier	-66.85600281	50.00099945	-14.77390003
18	Sept-Îles — Rivière-Moisie	-66.18099976	50.17200089	-33.84859848
19	Sept-Îles Baie Sainte-Marguerite	-66.55899811	50.1269989	-26.31290054
20	Longue-Pointe-de-Mingan	-64.1289978	50.25299835	-38.8423996
21	Havre-Saint-Pierre	-63.57550049	50.23500061	-12.41139984
22	Aguanish	-62.19850159	50.21699905	-17.31439972
23	Kegaska	-61.67200089	50.08200073	-12.74839973
24	Natashquan	-61.82049942	50.15399933	-15.75389957
25	Blanc Sablon	-57.17649841	51.39599991	-14.51420021
26	Chevrey	-59.60649872	50.45100021	-10.94760036
27	Carleton	-66.09999847	48.08399963	-10.55749989
28	Saint-Omer	-66.22149658	48.08399963	-11.2755003
29	Maria	-65.99199677	48.13800049	-11.1892004
30	Saint-Siméon — Bonaventure	-65.54650116	48.04800034	-10.81970024
31	Paspébiac	-65.26300049	47.99399948	-36.36460114
32	Port Daniel-Gascon	-64.92549896	48.15599823	-29.20560074
33	Chandler	-64.68250275	48.30899811	-21.24189949
34	Cap d'Espoir	-64.29100037	48.40800095	-28.52070045
35	Percé	-64.19650269	48.50699997	-29.48760033
36	Barachois	-64.22350311	48.57899857	-35.04550171
37	Fond de la baie de Gaspé	-64.34500122	48.80400085	-23.61919975
38	Entrée de la baie de Gaspé	-64.18299866	48.70500183	-100.3619995
39	Cap-Des-Rosiers	-64.19650269	48.84000015	-13.62170029
40	Rivière-au-Renard	-64.37200165	49.01100159	-33.43769836
41	Grande-Vallée	-65.12799835	49.24499893	-58.31990051
42	Mont-Louis	-65.64099884	49.26300049	-59.55870056
43	Pointe-aux-Loups	non disponible	non disponible	non disponible
44	La Martinique	non disponible	non disponible	non disponible
45	Rivière Saint-Jean	non disponible	non disponible	non disponible

Des sorties spectrales directionnelles ont été produites et sauvegardées pour des points d'intérêt permettant le forçage ultérieur de modèles de vagues à plus haute résolution et du modèle morphodynamique XBEACH (tableau 18, figure 36). Ces données permettent la conservation de la totalité de l'information contenue dans la distribution de l'énergie en fonction de la fréquence et de la direction des vagues.

Tableau 18 : Coordonnées des positions de sorties spectrales du modèle (degrés décimaux).

Fid	Nom	X	Y
1	AAL_SL_1	-68.503	48.561
2	AAL_SL_10	-68.233	48.642
3	AAL_SL_2	-68.4625	48.579
4	AAL_SL_3	-68.422	48.597
5	AAL_SL_4	-68.3815	48.615
6	AAL_SL_5	-68.341	48.633
7	AAL_SL_6	-68.3005	48.651
8	AAL_SL_7	-68.26	48.669
9	AAL_SL_8	-68.5435	48.543
10	AAL_SL_9	-68.584	48.525
11	AQUA_sept îles	-66.2611833	50.20665
12	AWAC_AAL	-68.42668	48.55222
13	AWAC_CPE	-64.2890333	48.3893666
14	AWAC_IDLM	-61.8617	47.3459667
15	AWAC_LPM	-64.3153381	50.2391052
16	AWAC_maria	-65.9877938	48.1350018
17	AWAC_saint_ulric	-67.7433666	48.8001833
18	AWAC_sept_iles	-66.2251986	50.1716955
19	baie_comeau	-68.017	49.263
20	BDC_centre_1	-65.695	48.084
21	BDC_centre_2	-65.695	48.039
22	BDC_centre_3	-65.695	47.994
23	BDC_centre_4	-65.695	47.949
24	BDC_centre_5	-65.695	47.904
25	BDC_centre_6	-65.695	47.859
26	BDC_centre_7	-65.695	47.814
27	BDC_est_1	-64.5205	48.372
28	BDC_est_2	-64.5205	48.327
29	BDC_est_3	-64.5205	48.282
30	BDC_est_4	-64.5205	48.237
31	BDC_est_5	-64.5205	48.192
32	BDC_est_6	-64.5205	48.147
33	BDC_est_7	-64.5205	48.102
34	BDC_est_8	-64.5205	48.057
35	betsiamites_est	-68.5435	48.912
36	betsiamites_sud	-68.665	48.822

Fid	Nom	X	Y
37	betsiamites_sud_est	-68.5435	48.822
38	colombier	-68.8	48.822
39	CP_LPM	-64.2041667	50.2405556
40	CPE_G_P_1	-64.129	48.75
41	CPE_G_P_10	-64.129	48.345
42	CPE_G_P_11	-64.129	48.3
43	CPE_G_P_12	-64.1965	48.3
44	CPE_G_P_13	-64.264	48.3
45	CPE_G_P_14	-64.3315	48.3
46	CPE_G_P_15	-64.399	48.3
47	CPE_G_P_16	-64.4665	48.3
48	CPE_G_P_2	-64.129	48.705
49	CPE_G_P_3	-64.129	48.66
50	CPE_G_P_4	-64.129	48.615
51	CPE_G_P_5	-64.129	48.57
52	CPE_G_P_6	-64.129	48.525
53	CPE_G_P_7	-64.129	48.48
54	CPE_G_P_8	-64.129	48.435
55	CPE_G_P_9	-64.129	48.39
56	estuaire_1	-67.018	49.812
57	estuaire_10	-67.018	49.452
58	estuaire_11	-67.018	49.407
59	estuaire_12	-67.018	49.362
60	estuaire_13	-67.018	49.317
61	estuaire_14	-67.018	49.272
62	estuaire_15	-67.018	49.227
63	estuaire_16	-67.018	49.182
64	estuaire_17	-67.018	49.137
65	estuaire_18	-67.018	49.092
66	estuaire_19	-67.018	49.047
67	estuaire_2	-67.018	49.767
68	estuaire_3	-67.018	49.722
69	estuaire_4	-67.018	49.677
70	estuaire_5	-67.018	49.632
71	estuaire_6	-67.018	49.587
72	estuaire_7	-67.018	49.542
73	estuaire_8	-67.018	49.497
74	estuaire_9	-67.018	49.011
75	Forestville	-69.0025	48.723
76	godbout	-67.5985	49.272
77	grand_metis	-68.1115	48.669
78	gros_cacouna	-69.5425	47.949
79	IAC_1	-70.204	47.481
80	IAC_2	-70.177	47.445

Fid	Nom	X	Y
81	IAC_3	-70.15	47.409
82	IAC_4	-70.123	47.373
83	IAC_5	-70.5145	47.31
84	IAC_6	-70.4875	47.274
85	IAC_7	-70.4605	47.238
86	IAC_8	-70.4335	47.202
87	IAC_9	-70.393	47.148
88	IDLM_1	-61.969	46.923
89	IDLM_10	-61.3345	47.841
90	IDLM_11	-61.5235	47.202
91	IDLM_12	-61.8745	47.706
92	IDLM_13	-62.023	47.616
93	IDLM_14	-62.158	47.526
94	IDLM_15	-61.726	47.796
95	IDLM_16	-61.2535	47.373
96	IDLM_17	-61.3885	47.283
97	IDLM_18	-61.672	47.112
98	IDLM_19	-61.807	47.022
99	IDLM_2	-62.293	47.445
100	IDLM_20	-61.5775	47.886
101	IDLM_3	-62.212	47.31
102	IDLM_4	-62.131	47.184
103	IDLM_5	-62.0635	47.049
104	IDLM_6	-61.105	47.463
105	IDLM_7	-61.4155	47.976
106	IDLM_8	-61.2535	47.706
107	IDLM_9	-61.186	47.589
108	les_mechins	-67.1395	48.975
109	longue_rive	-69.2185	48.525
110	LPM_1	-64.8445	50.046
111	LPM_10	-64.507	50.046
112	LPM_11	-64.4395	50.046
113	LPM_12	-64.372	50.046
114	LPM_13	-64.3045	50.046
115	LPM_14	-64.237	50.046
116	LPM_15	-64.1695	50.046
117	LPM_16	-64.102	50.046
118	LPM_17	-64.0345	50.046
119	LPM_18	-63.967	50.046
120	LPM_19	-63.967	50.091
121	LPM_2	-64.8445	50.091
122	LPM_20	-63.967	50.136
123	LPM_21	-63.967	50.181
124	LPM_22	-63.967	50.226

Fid	Nom	X	Y
125	LPM_23	-63.967	50.271
126	LPM_3	-64.8445	50.136
127	LPM_4	-64.8445	50.181
128	LPM_5	-64.8445	50.226
129	LPM_6	-64.777	50.046
130	LPM_7	-64.7095	50.046
131	LPM_8	-64.642	50.046
132	LPM_9	-64.5745	50.046
133	manic_est	-68.071	49.155
134	manic_sud	-68.3275	49.002
135	manic_sud_est	-68.071	49.002
136	manic_sud_ouest	-68.5435	48.993
137	maria_1	-66.1	48.084
138	maria_2	-66.0325	48.084
139	maria_3	-65.965	48.084
140	maria_4	-65.8975	48.084
141	maria_5	-65.83	48.084
142	maria_6	-65.7625	48.084
143	matane	-67.5715	48.876
144	metis	-67.936	48.741
145	pointe_aux_peres	-68.4895	48.534
146	port_neuf_est	-69.0025	48.624
147	port_neuf_sud	-69.1105	48.525
148	port_neuf_sud_est	-69.0025	48.525
149	rimouski	-68.5435	48.507
150	riviere_aux_graines_1	-65.587	50.199
151	riviere_aux_graines_2	-65.452	50.199
152	riviere_aux_graines_3	-65.317	50.199
153	riviere_aux_graines_4	-65.182	50.199
154	riviere_aux_graines_5	-65.047	50.199
155	riviere_aux_graines_6	-64.912	50.199
156	riviere_du_loup	-69.61	47.868
157	saguenay_seuil	-69.394	48.219
158	saint_simon	-69.0835	48.246
159	saint_ulric	-67.7353031	48.7897825
160	saint_ulric_large	-67.7875	48.849
161	sainte_felicite	-67.3555	48.921
162	sept_iles_1	-66.775	50.001
163	sept_iles_10	-66.1675	50.001
164	sept_iles_11	-66.1	50.001
165	sept_iles_12	-66.0325	50.001
166	sept_iles_13	-65.965	50.001
167	sept_iles_14	-65.8975	50.001
168	sept_iles_15	-65.83	50.001

Fid	Nom	X	Y
169	sept_iles_16	-65.7625	50.001
170	sept_iles_17	-65.695	50.001
171	sept_iles_18	-65.695	50.046
172	sept_iles_19	-65.695	50.091
173	sept_iles_2	-66.7075	50.001
174	sept_iles_20	-65.695	50.136
175	sept_iles_21	-65.695	50.181
176	sept_iles_22	-65.695	50.226
177	sept_iles_3	-66.64	50.001
178	sept_iles_4	-66.5725	50.001
179	sept_iles_5	-66.505	50.001
180	sept_iles_6	-66.4375	50.001
181	sept_iles_7	-66.37	50.001
182	sept_iles_8	-66.3025	50.001
183	sept_iles_9	-66.235	50.001

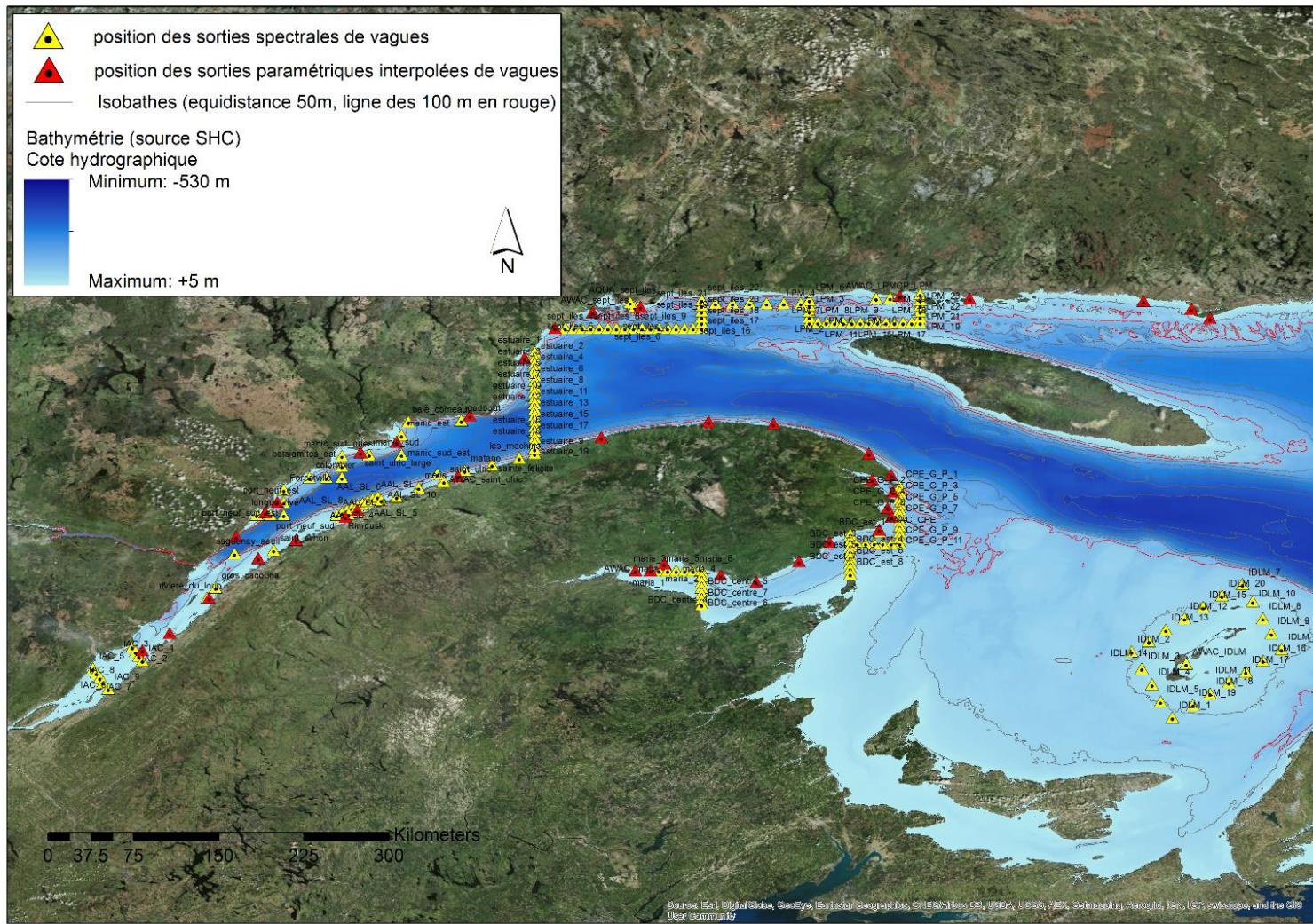


Figure 36 : Localisation spatiale des points de sauvegarde des sorties spectrales et paramétriques du modèle.

3.3 Protocole de validation

La validation du modèle est réalisée en comparant les sorties du modèle avec des données expérimentales de vagues côtières.

Trois jeux de données sont disponibles pour la validation de WW3 dans l'EGSL, pour un total de 9 sites de validation (figure 35).

3.3.1 Données expérimentales

3.3.1.1 Bouées d'Environnement Canada

Trois bouées d'Environnement Canada fournissent des données de hauteurs significatives de vagues aux heures pour la période de validation (2010-2015). Ces trois bouées sont des bouées non directionnelles SADO du SMC (type 6 m NOMAD, 12 m Discus, 3 m Discus ou 1.7 m Watchkeeper : <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/waves-vagues/formats-fra.html>).

La première est située au large de Mont-Louis (MTL) en Gaspésie ($49^{\circ}31,8' N$, $-65^{\circ}43,2' O$, 335 m de profondeur, couvrant les périodes du 17-04-2013 au 27-10-2013, du 16-06-2014 au 04-11-2014, et du 25-05-2015 au 17-11-2015), la deuxième à Point Escuminac (ESC), au sud de l'entrée de la baie des Chaleurs ($47^{\circ}31,8' N$, $-64^{\circ}31,8' O$, 35 m de profondeur, couvrant la période du 12-05-2014 au 01-12-2014), et la troisième au sud des Îles-de-la-Madeleine (IDM, $46^{\circ}52,8' N$, $-60^{\circ} 0' -1" O$, 60 m de profondeur, couvrant la période du 8-05-2012 au 31-12-2012).

3.3.1.2 Données du projet « Suivi de l'érosion côtière » du Ministère de la Sécurité Publique (MSP)

Les données AWAC du projet MSP « Suivi de l'érosion côtière », produites entre 2010 et 2014 à 30 m de fond sur Sept-Îles, Cap-d'Espoir et Saint-Ulric sont aussi utilisées.

Trois houlographes de type AWAC-AST 600 kHz de Nortek ont été déployés de mai 2010 à octobre 2012 par l'ISMER (Urs Neumeier), au large de Saint-Ulric (ULR, 48°48,0' N 67°44,6' O, profondeur 34m), Cap-d'Espoir (ESP, 48°23,35' N 64°17,35' O, profondeur 38m) et Sept-Îles (SIL, 50°10,3' N 66°13,5' O, profondeur 32m).

La position verticale de la surface est enregistrée à 2 Hz par un faisceau acoustique vertical, et la vitesse orbitale des vagues est mesurée à 1 Hz grâce à trois faisceaux acoustiques obliques en utilisant l'effet Doppler.

Ces données sont enregistrées durant des périodes de 17 minutes à chaque heure, et une analyse spectrale est effectuée avec le logiciel QuickWave pour calculer la hauteur significative H_{m0} , la période moyenne T_{02} ainsi que la direction moyenne Dir .

3.3.1.3 Données du projet « Modesco »

Des données d'AWAC côtières ont été produites durant les deux phases de Modesco (phase I : Anse au Lard (octobre 2014 — présent); phase II : Longue-Pointe-de-Mingan (octobre 2015— présent), Maria (octobre 2015 — présent))

Les houlographes de type AWAC-AST 1 MHz de Nortek ont été déployés à l'Anse au Lard (LAR, 48°33,1' N -68°25,6' O, profondeur 15m), à Maria (MAR, 48°8,1' N -65°59,3' O profondeur 15m) et Longue-Pointe-de-Mingan (LPM, 50°14,6' N -64°18,8' O profondeur 15m). Ces appareils enregistrent de la même manière que ceux du MSP, mais n'ont pas subi de traitement de qualité aussi poussé, seules les données marquées d'un indicateur de mauvaise qualité ont été filtrées.

3.3.2 Protocole statistique

3.3.2.1 Statistiques pour données linéaires :

Biais moyen (MBE, Mean Bias Error)

Le biais moyen est défini tel que :

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - Y_i$$

Le biais moyen indique l'écart moyen entre les variables X et Y, soit la tendance à surestimer ou sous-estimer l'une par rapport à l'autre. C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y). La valeur idéale est 0.

Biais absolu (MAE, mean absolute error)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|$$

Le biais absolu indique la magnitude de l'erreur entre les variables X et Y. C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y). La valeur idéale est 0.

Erreur quadratique moyenne (RMSE, Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

L'erreur quadratique moyenne est, comme la MAE, une indication de la magnitude de l'erreur, mais donne plus de poids aux erreurs extrêmes. C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y). La valeur idéale est 0.

Écart type de l'erreur (STD, Standard Deviation)

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i - MBE)^2}$$

L'écart type mesure la dispersion des erreurs autour de la moyenne (MBE). Donne une indication de l'erreur aléatoire. C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y). La valeur idéale est 0.

Coefficients de l'équation de la droite de régression

En admettant qu'il existe une relation linéaire entre les variables X et Y, on peut appliquer un modèle de régression linéaire tel que :

$$\hat{Y} = a_1 X + a_2$$

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon$$

Les coefficients a_1 (coefficients directeur) et a_2 (ordonnée à l'origine) de la droite de régression sont obtenus utilisant la méthode des moindres carrés ordinaires :

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

et

$$a_2 = \bar{Y} - a_1 \bar{X}$$

avec $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ et $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ respectivement la moyenne empirique des X_i et Y_i

Le coefficient directeur de la droite donne une indication sur la tendance à surestimer ou sous-estimer X par rapport à Y (équivalent au biais moyen). C'est un paramètre adimensionnel. Sa valeur idéale est 1. L'ordonnée à l'origine indique un décalage entre X et Y. C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y). Sa valeur idéale est 0.

Coefficient de détermination

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right)^2$$

Le coefficient de détermination indique la fraction de la variance totale qui est expliquée par la relation linéaire

Part systématique et non systématique de la RMSE

La part systématique de la RMSE, notée $RMSE_s$ est la part d'erreur qui pourrait être corrigée avec une transformation X par rapport à Y. Elle correspond à la déviation entre la droite de régression et la droite 1:1. C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y).

$$RMSE_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - X_i)^2}$$

La part non systématique de la RMSE ($RMSE_u$) correspond aux écarts aléatoires (imprévisibles) entre X et Y (équivalent aux résidus de la régression linéaire). C'est un paramètre dimensionnel (mêmes unités que X et Y).

$$RMSE_u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}$$

Indice d'agrément

L'index d'agrément calcule le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et « l'erreur potentielle » (Willmott, 1984). Paramètre adimensionnel.

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{X}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right)$$

Il fournit une mesure standardisée du degré d'erreur de prédiction du modèle. D est particulièrement sensible aux valeurs extrêmes. D = 1 indique un accord parfait entre valeurs prédictes et mesurées, 0 n'indique aucun accord

Critère de performance global

Indice synthétique d'appréciation de la qualité du modèle basé sur des critères de dispersion, et d'erreur (Hanson et coll., 2009). Plus le score est faible, moins bonne est la prévision, un score de 1 indiquant une prédiction parfaite.

$$P_s = \frac{RMSE + a_2 + SI}{3}$$

$$RMSE = 1 - \frac{RMSE}{X_{RMS}}$$

$$a_2 = 1 - \frac{|a_2|}{X_{RMS}}$$

$$SI = 1 - \frac{STD}{\bar{X}}$$

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

3.3.2.2 Statistiques pour données directionnelles :

Pour des données directionnelles, X et Y correspondent à des angles exprimés en degrés.

Biais angulaire absolu (MAE°)

Le biais angulaire absolu moyen est une mesure de l'erreur moyenne équivalente à celle du MAE pour des valeurs linéaires.

$$MAE^\circ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$$

$$D_i = \begin{cases} |X_i - Y_i| & \text{si } 0 < |X_i - Y_i| \leq 180 \\ 360 - |X_i - Y_i| & \text{si } 180 < |X_i - Y_i| \leq 360 \end{cases}$$

Coefficient de corrélation linéaire

Indique le degré de corrélation positive ou négative entre deux variables circulaires. Même indice que r (coefficient de corrélation linéaire), en remplaçant les différences angulaires par leurs sinus.

$$cor = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(X - \bar{X}) \sin(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sin(X - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n \sin(Y - \bar{Y})^2}}$$

3.3.3 Protocole de comparaison

3.3.3.1 Validation modèle vs données

La validation de WW3 est basée sur la comparaison des sorties du modèle (hauteur significative H_{m0} , période moyenne T_{02} , et direction moyenne Dir) avec les séries temporelles de vagues enregistrées aux neuf sites présentés à la figure 35 (les bouées EC n'indiquent que la hauteur significative H_{m0}). Cette comparaison directe permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire correctement les conditions de vagues dans l'EGSL par une approche statistique, à chaque pas de temps du modèle (aux heures). Les sorties du modèle sont interpolées de manière bilinéaire à la position de chaque instrument de mesure. Les résultats sont présentés avec la simulation de WW3 à 1 km et à 5 km, afin d'évaluer la sensibilité du modèle à la résolution comparativement aux données mesurées.

3.3.3.2 Intercomparaison 1km vs 5 km

La comparaison entre les simulations à 1 km et 5 km de résolution a pour but d'évaluer la pertinence d'utiliser une plus faible résolution, notamment en terme de précision des prédictions en milieu côtier, par rapport à l'augmentation significative de temps de calcul. En effet, les simulations utilisant une résolution de 1 km visent à représenter de façon plus fidèle les processus se déroulant dans des régions de faibles profondeurs, notamment à la côte, où les variations à fine échelle de la topographie du fond peuvent influencer de façon importante les conditions de vagues. Toutefois ces simulations sont très demandant en temps de calcul comparativement aux simulations utilisant une grille de calcul à 5 km de résolution. Il est donc nécessaire de quantifier le gain réel sur les conditions de vagues obtenues en utilisant des simulations à plus haute résolution.

Pour ce faire, les tests statistiques complets ont été effectués pour WW3-1km vs données et WW3-5km vs données, pour évaluer quelle simulation est la plus performante comparativement aux données. Ces résultats sont présentés dans la partie 2.4.

De plus, les différences spatiales sont aussi présentées sous forme de carte pour l'année 2010, en utilisant les résultats des simulations 1km décimés sur la grille 5km. Les différences sont exprimées en terme d'erreur (MBE, RMSE, MAE, STD) entre les valeurs de H_{m0} , T_{02} et direction moyenne des vagues prédites par chacune des simulations ainsi que par les paramètres de la droite de régression (coefficients directeur, ordonné à l'origine, coefficient de détermination). Les résultats sont présentés spatialement sur tout le domaine pour : 1) l'ensemble des vagues ; 2) les 10 % des vagues les plus hautes.

3.3.3.3 Intercomparaison forçages MOR-GEM vs MOR-NARR

Comme indiqué, les forçages océaniques de WW3 ne sont pas identiques entre la simulation « passé récent » et « actuel », car MOR est alimenté par NARR (1980-2010), puis par GEM (2010-2015). Pour évaluer l'impact d'un tel changement, WW3 a été roulé pour l'année 2010 avec ces deux différents forçages. Comme pour l'intercomparaison 1km vs 5 km, les sorties MOR-NARR et MOR-GEM ont été comparées de manière spatiale pour l'année 2010. Les différences entre les deux sont représentées en terme d'erreur (MBE, RMSE, MAE, STD) et de corrélation (coefficients de la droite de régression, r^2) entre les valeurs de H_{m0} , T_{02} et Dir des vagues prédites par chacune des simulations. Les résultats sont présentés spatialement sur toute la région du golfe du Saint-Laurent pour : 1) toutes les vagues ; 2) les 10 % des vagues les plus hautes.

3.4 Résultats de la validation

3.4.1 Modèle vs données

Les figures présentées ici concernent la validation du modèle à 1 km et 5 km de résolution. Les tableaux de paramètres statistiques présentent les résultats pour les deux résolutions afin de comparer la performance de chacune.

3.4.1.1 Hauteurs significatives

De manière générale, les séries temporelles de H_{m0} issues des instruments et du modèle montrent une bonne représentation de chaque événement de vagues moyen à fort, sans déphasage important. Néanmoins, ces événements sont souvent sous-estimés par le modèle, qui a tendance à prévoir des vagues moins hautes que celles mesurées, et ce, pour tous les sites sauf Cap-d'Espoir, où les hauteurs sont très légèrement surestimées. Cette tendance à la sous-évaluation se retrouve dans les graphiques de dispersion et les paramètres statistiques. La performance du modèle est très variable selon les sites, particulièrement entre les sites du golfe et les sites de l'estuaire, mais aussi entre les sites au large et les sites proches de la côte.

Pour les sites au large (plus de 50 m de profondeur : Mont-Louis (MTL) et Îles-de-la-Madeleine (IDM)), les prédictions sont globalement satisfaisantes figure 37 et figure 38.

À 1 km, les biais moyens concernant toutes les vagues sont relativement faibles ((1), respectivement -8,6 cm et -1,8 cm). Ces valeurs indiquent une légère sous-estimation du modèle, tendance confirmée par les coefficients directeurs des droites de régression (MTL : 0,792, IDM : 0,912) tableau 19, qui indiquent une sous-estimation linéaire d'un facteur 0,79 et 0,91 respectivement. Le biais absolu moyen indique que l'erreur absolue de la prédition du modèle est en moyenne inférieure à 20 cm. L'erreur quadratique moyenne est quant à elle plus importante d'un facteur de 1,3 à 1,4 au biais absolu moyen, ce qui met en évidence la

présence d'erreurs fortes, principalement de nature aléatoire, la part non systématique de la RMSE (RMSEu) étant plus importante que la part systématique (RMSEs). Ceci indique une certaine imprécision du modèle, confirmée par la dispersion importante de l'erreur autour de la moyenne ((6); MTL : 0,26, IDM : 0,227), malgré des coefficients de détermination supérieurs à 0,8 pour ces deux sites, qui indiquent une corrélation significative.

WW3 est toutefois moins performant en ce qui concerne la prévision des vagues les plus hautes, qui sont plus fortement sous-estimées, comme le confirment les valeurs de biais moyen ((1) ; MTL : -40,6 cm, IDM : -13,8 cm) et les coefficients directeurs des droites de régression ((7a) ; MTL : 0,768, IDM : 0,682). Le biais absolu ainsi que l'erreur quadratique moyenne sont environ 2 fois plus importants pour cette classe de vagues que pour toutes les vagues. Les proportions de part aléatoire ou systématique de la RMSE sont moins nettes, cette erreur étant à la fois liée à la sous-évaluation systématique, et à une dispersion autour de la moyenne relativement élevée (6) ; MTL : 0,378, IDM : 0,416).

Pour ces deux sites au large, le modèle est très peu sensible à la résolution spatiale. Tous les paramètres statistiques sont très proches entre 1 km et 5 km, autant pour toutes les vagues que pour les 10 % les plus hautes.

Pour les sites côtiers de profondeur intermédiaire (de 30 à 40 m de profondeur : Point Escuminac (ESC), Saint-Ulric (ULR), Sept-Îles (SIL) et Cap-d'Espoir (ESP)), les prévisions de WW3 sont plutôt bonnes dans le golfe du Saint-Laurent, mais le sont moins dans l'estuaire figure 39 à 42.

À 1km, le biais moyen est relativement faible (1), inférieur à 10 cm en valeur absolue pour les sites du golfe (ESC, SIL et ESP), mais plus important dans l'estuaire ((1) ; ULR ; -20,9 cm). Ces valeurs ainsi que celles de la pente de la droite de régression indiquent, comme pour les sites au large, que le modèle sous-estime les hauteurs significatives des vagues, excepté à ESC où le biais moyen est positif. Pour ce site, la tendance à la surévaluation montrée par le biais est contredite par la pente de régression (0,85), qui suggère aussi une sous-estimation du modèle. Les graphiques de dispersion de ESC (Figure 37) montrent que les hauteurs des vagues les plus faibles sont surestimées par le modèle, ce qui est confirmé par l'ordonnée à l'origine de la droite de régression: (0,17) (tableau 20). Le graphique de dispersion par moyenne de classes montre par contre que les vagues intermédiaires (H_m entre 1 et 1,5 m) sont légèrement sous-estimées, ce qui explique le coefficient directeur inférieur à 1. Les vagues les plus fortes semblent quant à elles légèrement surestimées, mais elles ne représentent pas un nombre d'échantillons suffisant pour affecter la droite de régression sur toutes les vagues. Néanmoins, les pentes des droites de régression sont très proches de 1 pour les sites du golfe, ce qui montre que le modèle représente assez bien toutes les classes de vagues, même si les graphiques de dispersion indiquent une légère surévaluation à ESC et ESP des 10 % des vagues les plus hautes. Au contraire, les vagues prédictes par le modèle dans l'estuaire sont fortement sous-évaluées, d'un facteur de 0,68 ; (ULR). La RMSE de ces 4 sites est plus grande d'un facteur de 1,3 à 1,4 à la MAE, montrant

la présence d'erreurs importantes. Ces erreurs sont de nature aléatoire pour les sites du golfe, mais systématique à ULR, à cause de la sous-estimation importante de toutes les classes de vagues.

Pour les sites du golfe, les paramètres statistiques et les graphiques de dispersion montrent que le modèle est relativement peu sensible à la résolution, comme pour les sites au large. Par contre, la sous-évaluation notable dans l'estuaire est encore plus marquée à 5 km, comme le montrent les graphiques de dispersion de ULR (Figure 38). Le biais négatif est aussi plus grand en valeur absolue à 5 km qu'à 1 km, et la part systématique de la RMSE est aussi plus importante, quasiment 2 fois plus importante que la part aléatoire. Les 10 % des vagues les plus fortes sont aussi encore plus sous-estimées à 5 km qu'à 1 km, le coefficient directeur de la droite de régression passant de 0,81 (à 1 km) à 0,66 (à 5 km).

Pour les sites côtiers de faible profondeur (profondeur inférieure à 30 m : Anse au Lard (LAR), Longue-Pointe-de-Mingan (LPM) et Maria (MAR)), le modèle est moins performant que pour les autres sites. Ces résultats sont néanmoins à analyser en gardant en tête que les séries comparées sont beaucoup plus courtes, notamment à LPM (45 jours) et MAR (21 jours) (figure 43 à 45).

Les biais moyens inférieurs à -25 cm, ainsi que les faibles pentes des droites de régression indiquent une sous-estimation importante des hauteurs prédites par le modèle, particulièrement à LAR et MAR ((7a) ; LAR : 0,546, MAR : 0,416), qui ont en commun d'être situés dans une portion étroite du Saint-Laurent (dans l'estuaire et au fond de la baie des Chaleurs). Pour LPM, la sous-estimation est moins importante, avec une pente de 0,773. Pour les 3 sites, l'erreur quadratique moyenne est importante (supérieure à 30 cm), et de nature plutôt systématique, ce qui confirme la tendance générale à la sous-évaluation. Malgré une dispersion autour de la moyenne importante, la corrélation entre hauteurs prédites et mesurées est tout de même significative pour LAR et LPM (tableau 21); 0,72 et 0,905 respectivement), indiquant que le modèle reproduit les événements avec synchronisme, même s'il les sous-évalue. Pour MAR, l'observation des séries temporelles montre que certains événements sont bien reproduits par WW3, mais avec une sous-évaluation si importante que la corrélation est statistiquement très faible.

À LPM, la sensibilité du modèle à la résolution est assez faible, même s'il est statistiquement légèrement plus performant à 1 km qu'à 5 km. En revanche, pour les sites ULR et MAR, la sous-évaluation des hauteurs significatives est encore plus marquée à 5 km qu'à 1 km, comme le montrent les graphiques de dispersion à ULR et MAR.

WAVEWATCH 3 reproduit donc les événements météo-marins avec synchronisme en terme de hauteurs, dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Par contre, sa capacité à évaluer les hauteurs significatives de vagues est très spatialisée. En effet, les hauteurs prédites sont satisfaisantes dans le golfe, aux Îles-de-la-Madeleine, Point Escuminac, Cap-d'Espoir, Mont-Louis, Sept-Îles et Longue-Pointe-de-Mingan, malgré une légère tendance générale à la sous-évaluation, comprise entre 5 % (IDM) et 23 % (LPM). Pour les sites de l'estuaire (Saint-

Ulric et Anse au Lard), cette tendance est nettement plus marquée (32 % et 45 % respectivement), de même que dans la baie des Chaleurs, où les hauteurs de vagues sont sous-estimées de 59 % (MAR). L'explication privilégiée pour le manque de performance des prédictions du modèle dans ces régions d'échelle spatiale moins importante est le manque de représentativité des vents, la résolution des forçages atmosphérique étant trop grossière par rapport à la dimension de fetch. Pour les sites où le modèle est moins performant, il semble qu'une amélioration de la résolution spatiale permette une prédition légèrement meilleure d'environ 7 % pour toutes les vagues, et 11 % pour les vagues les plus hautes.

Tableau 19. Paramètres statistiques entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 et mesurées aux sites au large (plus de 50 mètres de fond, Mont-Louis et Îles-de-la-Madeleine).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues			
	Mont-Louis	Îles-de-la-Madeleine	1 km	5 km
Résolution de WW3	1 km	5 km	1 km	5 km
(1) biais	-0,086	-0,096	-0,018	-0,024
(2) biais absolu MAE	0,195	0,195	0,177	0,182
(3) RMSE	0,274	0,275	0,243	0,248
(4) RMSEs	0,157	0,164	0,063	0,067
(5) RMSEu	0,225	0,221	0,235	0,239
(6) sd des différences	0,26	0,258	0,242	0,247
(7a) a1 (régression robuste)	0,792	0,789	0,912	0,908
(7 b) a2 (régression robuste)	0,091	0,084	0,069	0,068
(8) coefficient de détermination	0,831	0,835	0,875	0,87
(9) score de performance général	0,751	0,751	0,803	0,798
(10) indice d'accord	0,944	0,943	0,966	0,965
Nombre d'échantillons	11 016	11 016	4705	4705
Paramètres \ Sites				
10 % des vagues les plus hautes				
(1) biais	-0,406	-0,423	-0,138	-0,157
(2) biais absolu MAE	0,464	0,472	0,325	0,332
(3) RMSE	0,555	0,563	0,438	0,448
(4) RMSEs	0,426	0,441	0,272	0,285
(5) RMSEu	0,355	0,349	0,343	0,345
(6) sd des différences	0,378	0,372	0,416	0,42
(7a) a1 (régression robuste)	0,768	0,771	0,682	0,676
(7 b) a2 (régression robuste)	0,116	0,092	0,661	0,655
(8) coefficient de détermination	0,593	0,604	0,682	0,676
(9) score de performance général	0,798	0,796	0,847	0,845
(10) indice d'accord	0,77	0,766	0,887	0,881
Nombre d'échantillons	1102	1102	471	471

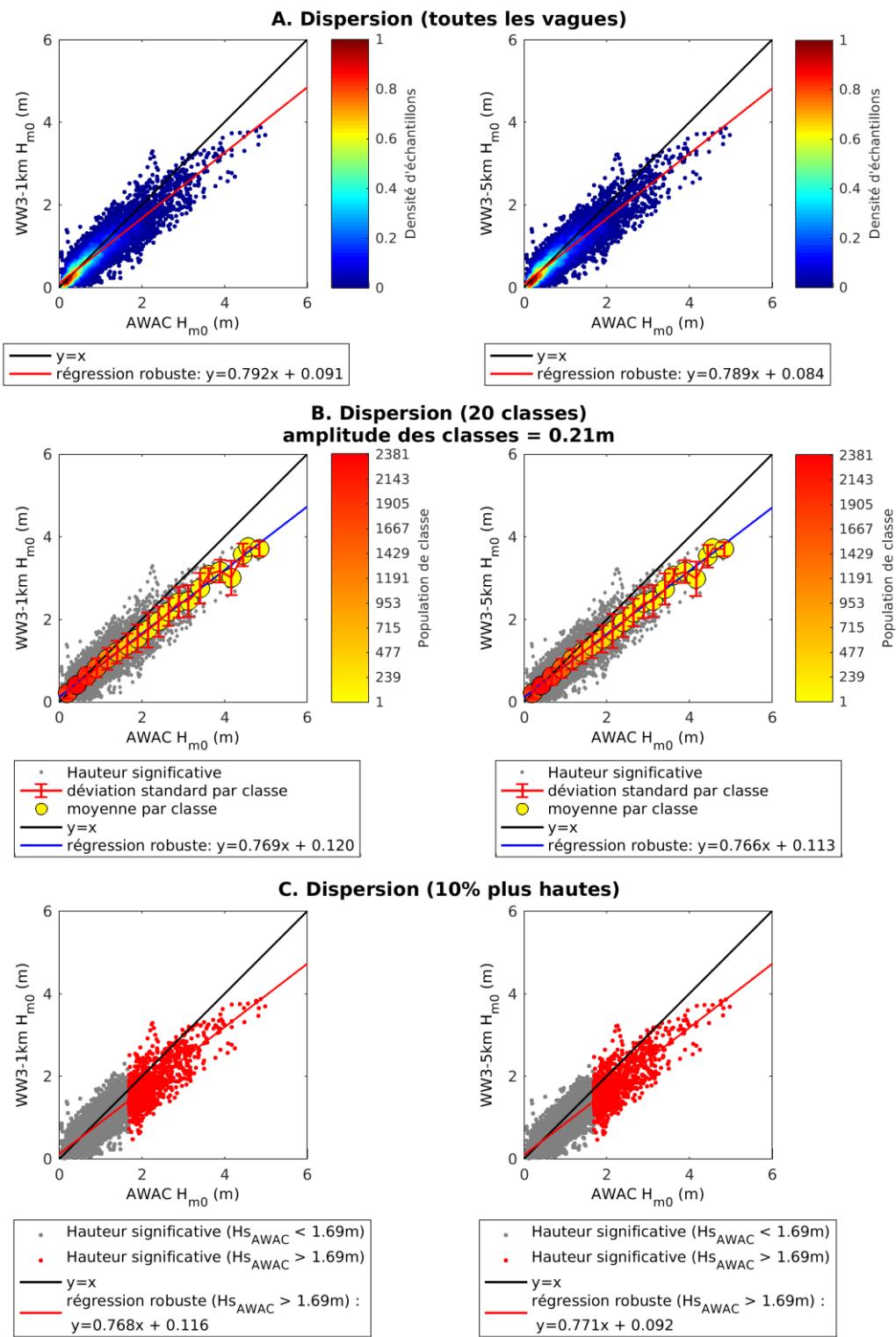


Figure 37 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à la bouée de Mont-Louis, entre le 17 avril 2013 et le 30 novembre 2015.

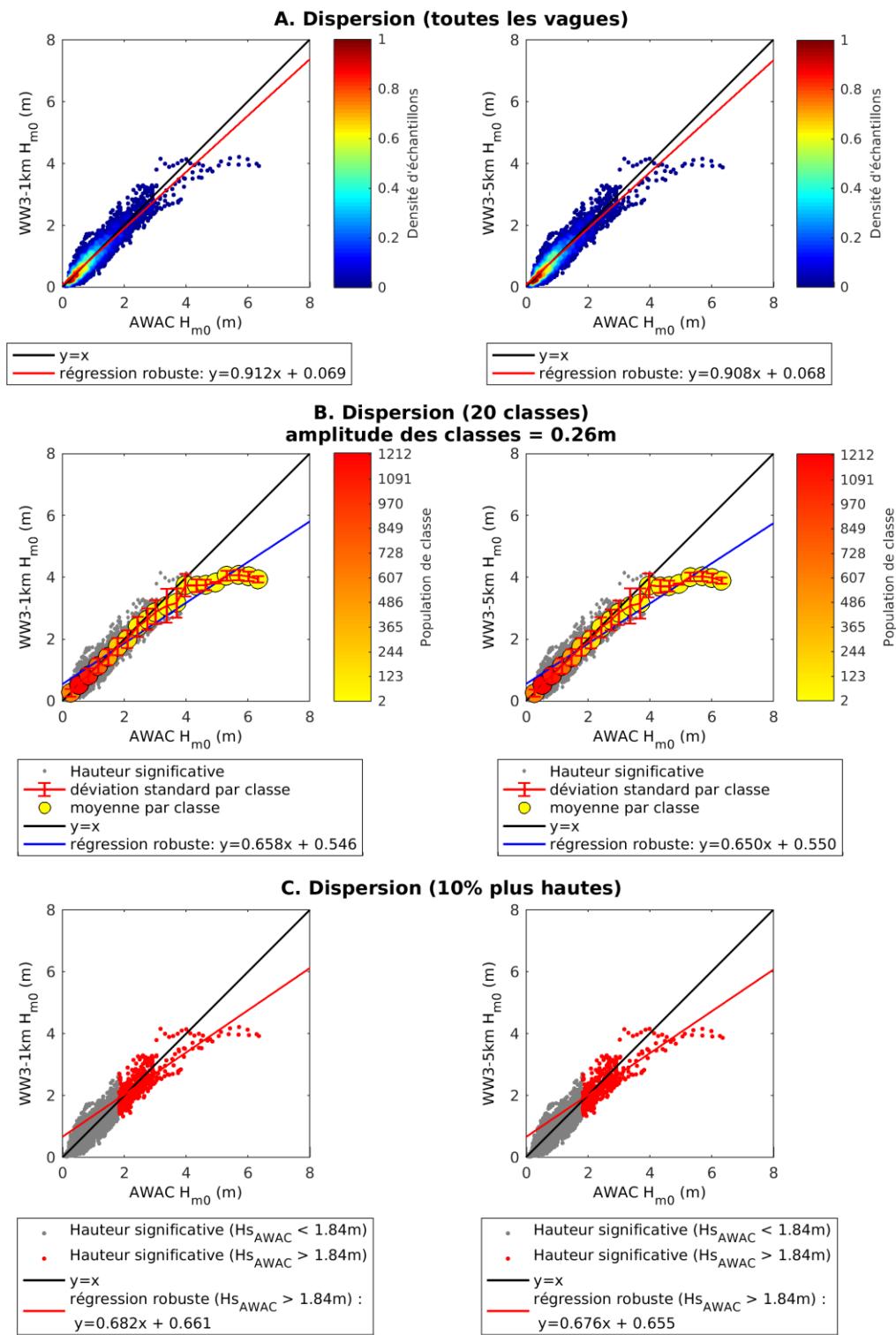


Figure 38 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à la bouée des Îles-de-la-Madeleine, entre le 8 mai 2012 et le 31 décembre 2012.

Tableau 20 : Paramètres statistiques entre les hauteurs significatives prédites par WW3 et mesurées aux sites de profondeur intermédiaire (entre 30 et 40 mètres de fond, Point Escuminac, Saint-Ulric, Sept-Îles et Cap-d'Espoir).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues							
	Point Escuminac		Saint-Ulric		Sept-Îles		Cap-d'Espoir	
Résolution de WW3	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km
(1) biais	0.094	0.116	-0.209	-0.268	-0.048	-0.093	-0.034	-0.072
(2) biais absolu MAE	0.163	0.173	0.238	0.284	0.153	0.159	0.202	0.199
(3) RMSE	0.21	0.22	0.324	0.378	0.213	0.219	0.272	0.266
(4) RMSEs	0.106	0.125	0.263	0.333	0.061	0.107	0.035	0.084
(5) RMSEu	0.181	0.181	0.19	0.178	0.204	0.19	0.269	0.252
(6) sd des différences	0.188	0.187	0.248	0.266	0.207	0.198	0.269	0.256
(7a) a1 (régression robuste)	0.85	0.865	0.679	0.601	0.916	0.881	1.005	0.933
(8 b) a2 (régression robuste)	0.17	0.185	-0.001	-0.009	0	-0.025	-0.039	-0.011
(8) coefficient de détermination	0.704	0.712	0.757	0.735	0.803	0.812	0.861	0.859
(9) score de performance général	0.671	0.661	0.643	0.593	0.712	0.712	0.761	0.769
(10) indice d'accord	0.896	0.889	0.87	0.818	0.943	0.938	0.961	0.959
Nombre d'échantillons	3807	3807	11 193	11 193	14 353	14 353	10 742	10 742
Paramètres \ Sites	10 % des vagues les plus hautes							
(1) biais	-0.014	0.016	-0.514	-0.67	-0.09	-0.173	-0.002	-0.151
(2) biais absolu MAE	0.168	0.168	0.53	0.673	0.307	0.328	0.363	0.346
(3) RMSE	0.227	0.229	0.602	0.74	0.384	0.404	0.455	0.438
(4) RMSEs	0.025	0.026	0.521	0.688	0.093	0.176	0.108	0.152
(5) RMSEu	0.226	0.228	0.3	0.273	0.373	0.364	0.442	0.411
(6) sd des différences	0.227	0.229	0.312	0.314	0.374	0.366	0.455	0.411
(7a) a1 (régression robuste)	1.155	1.149	0.809	0.656	0.953	0.942	1.149	1.022
(8 b) a2 (régression robuste)	-0.192	-0.155	-0.181	-0.07	-0.016	-0.081	-0.368	-0.206
(8) coefficient de détermination	0.329	0.323	0.592	0.535	0.649	0.654	0.779	0.764
(9) score de performance général	0.821	0.82	0.73	0.678	0.784	0.777	0.832	0.842
(10) indice d'accord	0.66	0.656	0.665	0.555	0.882	0.87	0.922	0.919
Nombre d'échantillons	381	381	1120	1120	1436	1436	1075	1075

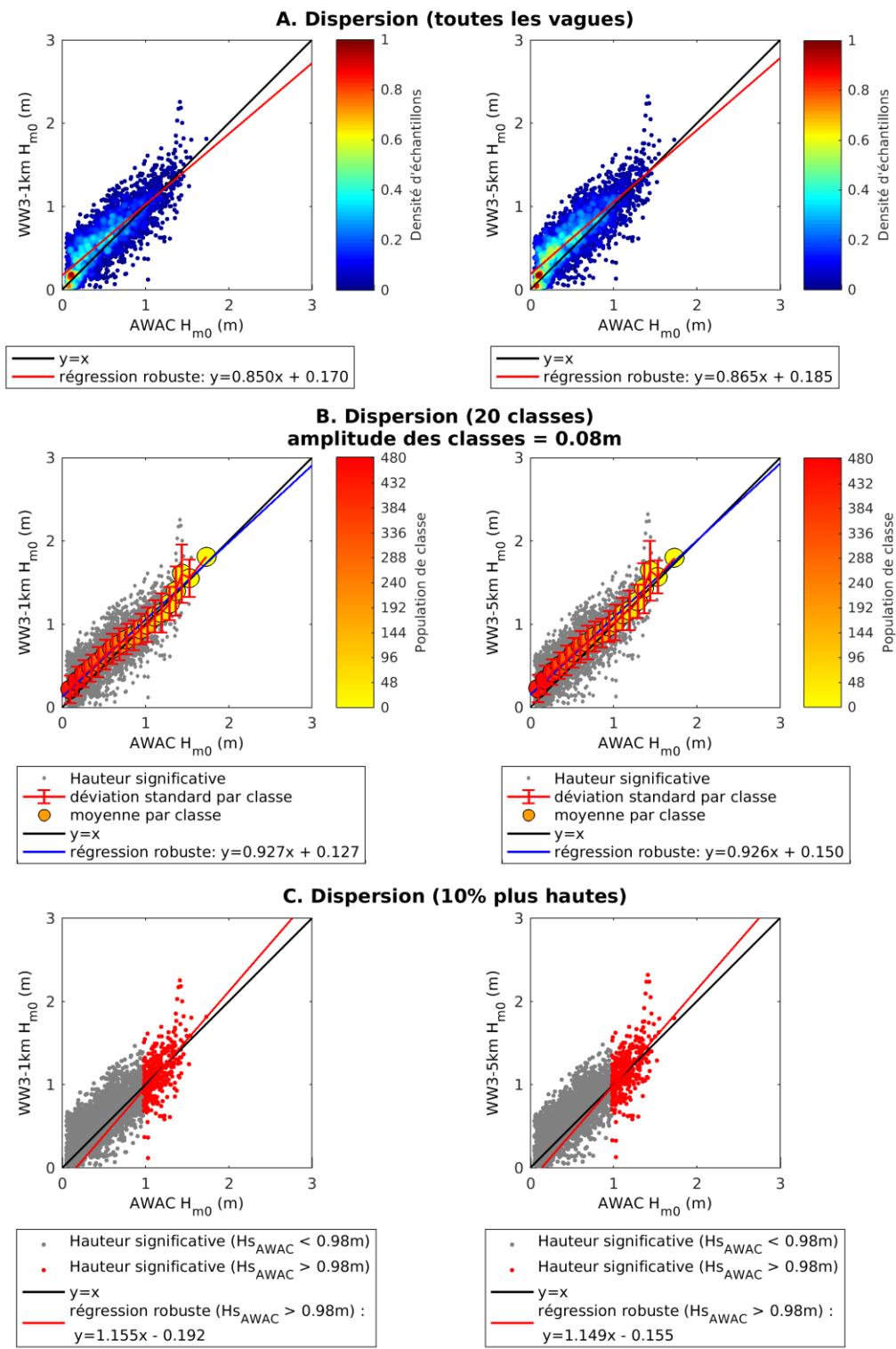


Figure 39 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à la bouée de Point Escuminac, entre le 12 mai 2014 et le 1er décembre 2014.

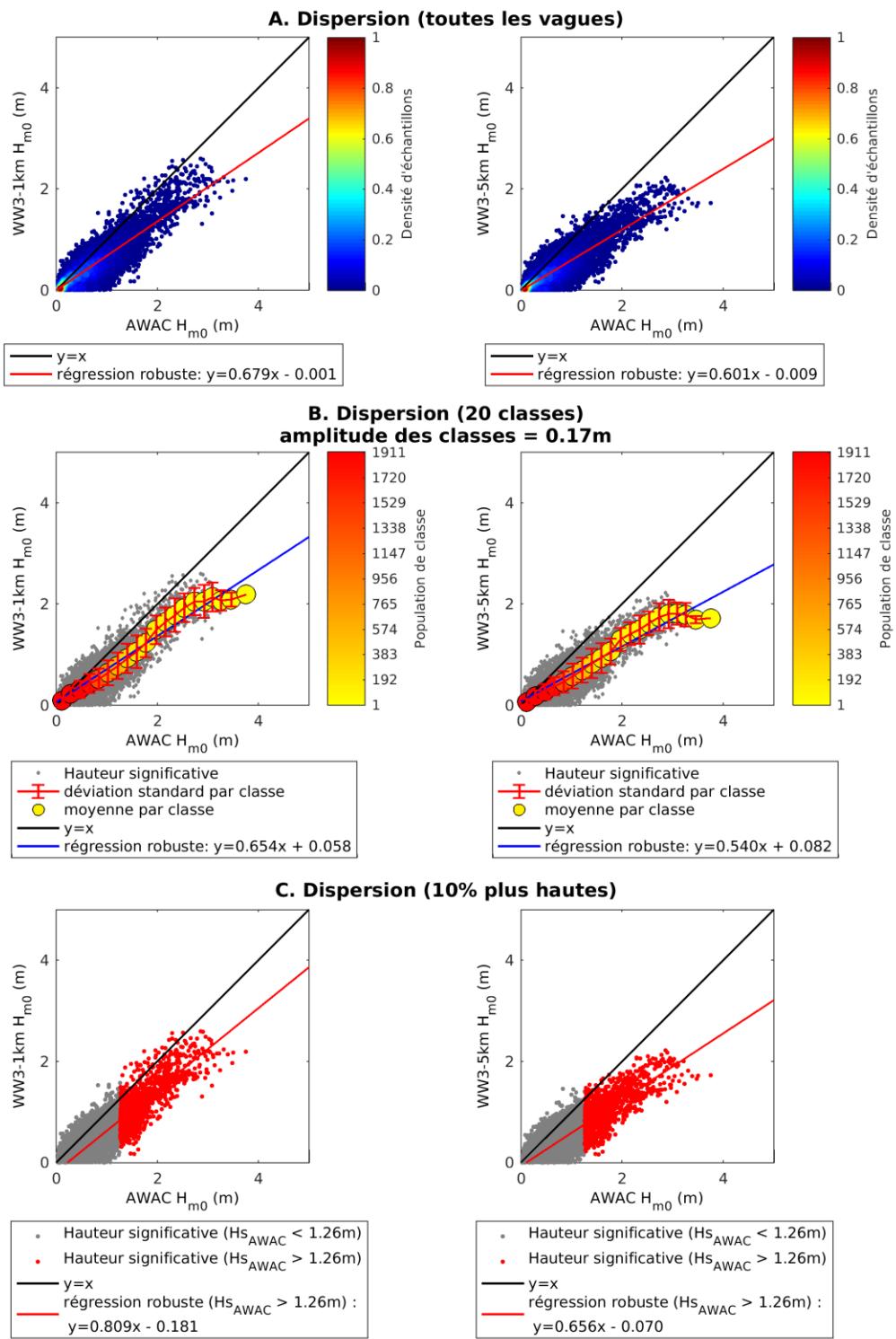


Figure 40 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Saint-Ulric, entre le 3 mai 2010 et le 29 octobre 2012.

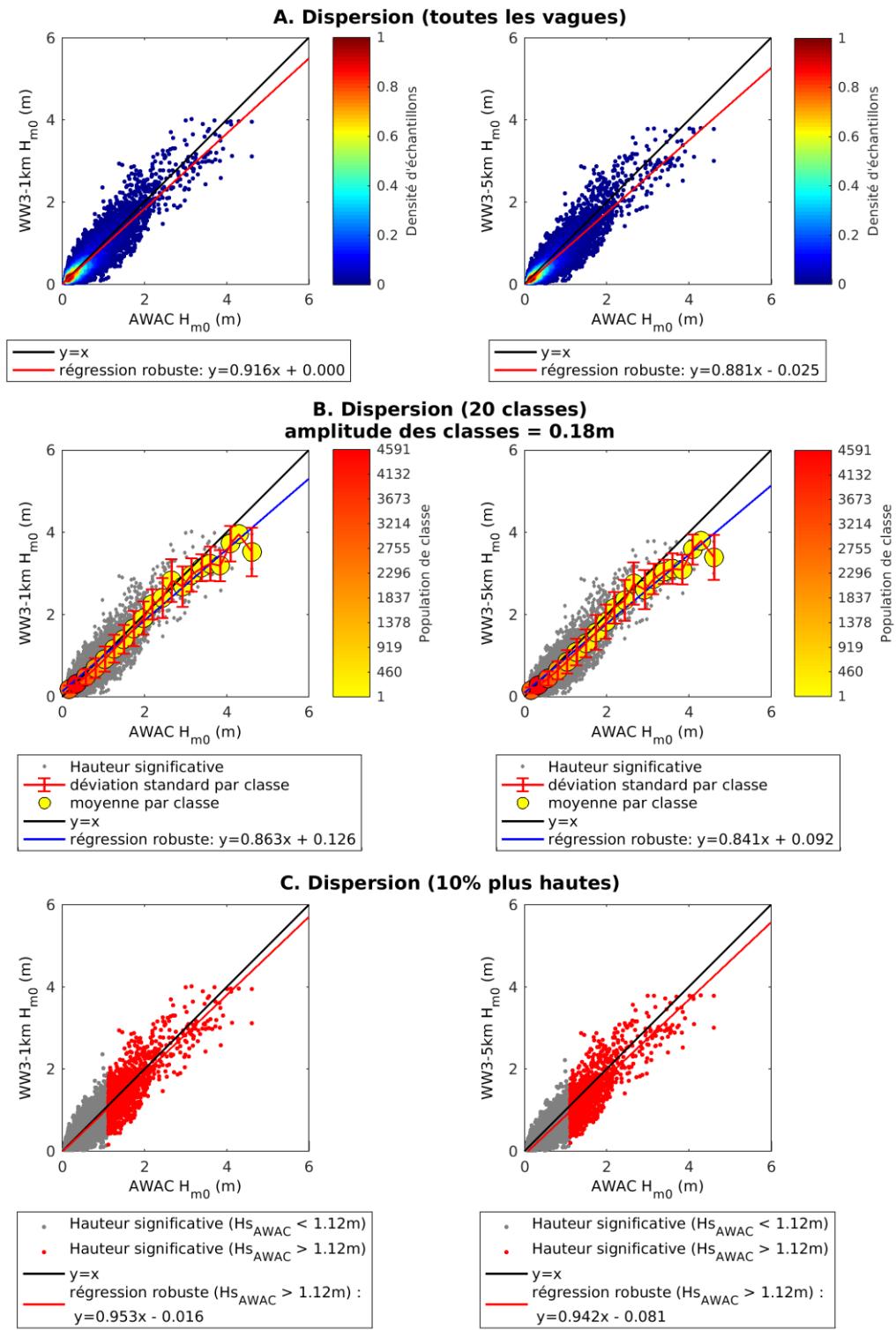


Figure 41 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Sept-Îles, entre le 5 mai 2010 et le 11 octobre 2012.

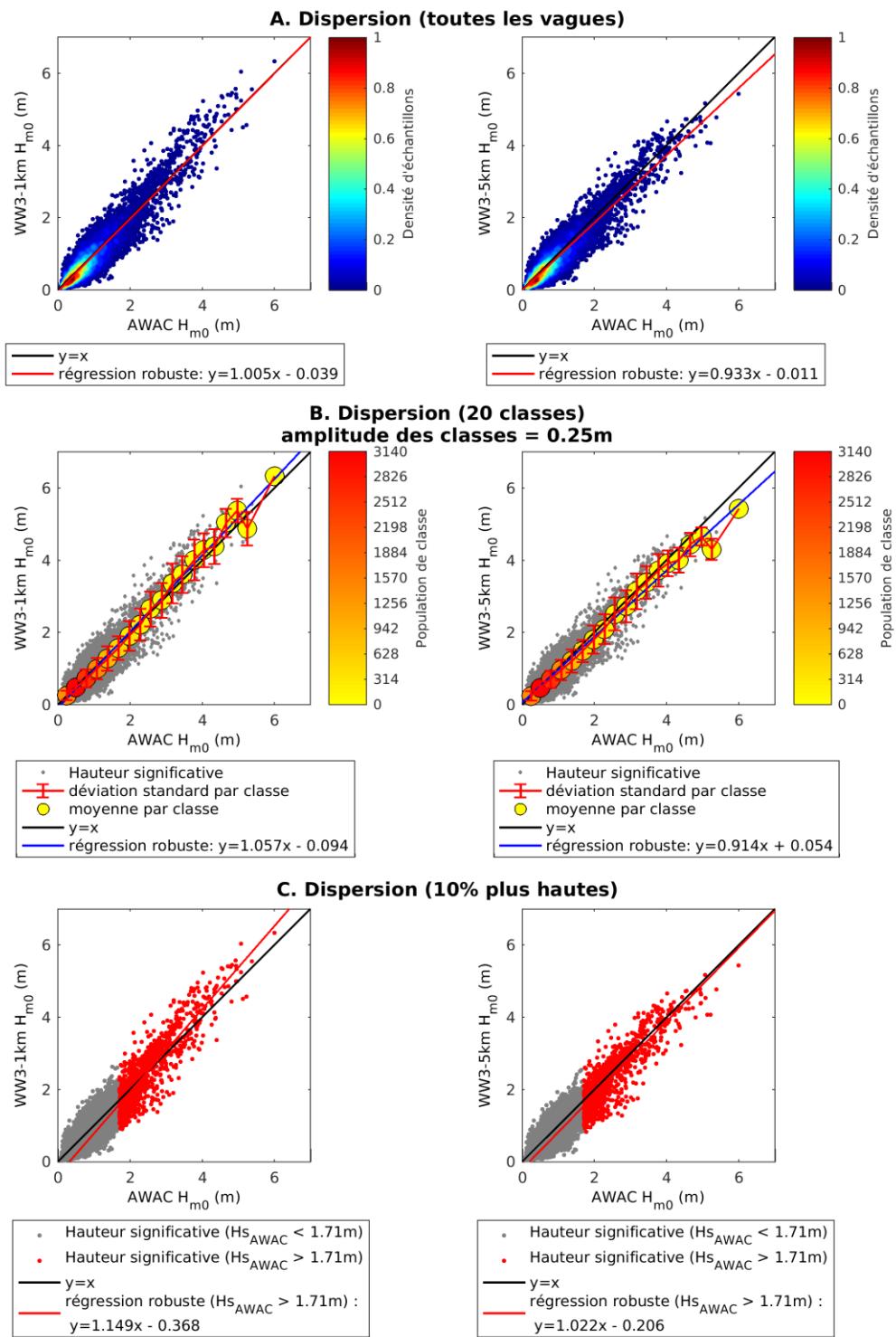


Figure 42 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Cap-d'Espoir, entre le 6 octobre 2010 et le 12 octobre 2012.

Tableau 21 : Paramètres statistiques entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 et mesurées aux sites côtiers (Anse au Lard, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	Anse au Lard		Longue-Pointe-de-Mingan		Maria	
Résolution de WW3	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km
(1) biais	-0.276	-0.301	-0.253	-0.295	-0.253	-0.252
(2) biais absolu MAE	0.282	0.304	0.276	0.311	0.253	0.253
(3) RMSE	0.353	0.376	0.362	0.404	0.297	0.303
(4) RMSEs	0.327	0.356	0.307	0.36	0.283	0.291
(5) RMSEu	0.132	0.122	0.192	0.183	0.089	0.084
(6) sd des différences	0.22	0.226	0.259	0.276	0.156	0.169
(7a) a1 (régression robuste)	0.546	0.509	0.773	0.73	0.416	0.332
(8 b) a2 (régression robuste)	-0.035	-0.04	-0.043	-0.045	-0.039	-0.007
(8) coefficient de détermination	0.72	0.723	0.904	0.903	0.512	0.43
(9) score de performance général	0.54	0.513	0.729	0.702	0.428	0.412
(10) indice d'accord	0.748	0.716	0.933	0.914	0.582	0.556
Nombre d'échantillons	6231	6231	995	995	300	300
Paramètres \ Sites		10 % des vagues les plus fortes				
(1) biais	-0.643	-0.694	-0.629	-0.75	-0.475	-0.513
(2) biais absolu MAE	0.643	0.694	0.643	0.753	0.475	0.513
(3) RMSE	0.674	0.728	0.728	0.832	0.492	0.527
(4) RMSEs	0.652	0.709	0.643	0.769	0.477	0.514
(5) RMSEu	0.169	0.164	0.341	0.318	0.122	0.117
(6) sd des différences	0.204	0.219	0.368	0.362	0.129	0.126
(7a) a1 (régression robuste)	0.687	0.602	0.766	0.705	0.46	0.316
(8 b) a2 (régression robuste)	-0.213	-0.148	0.021	0.07	-0.041	0.038
(8) coefficient de détermination	0.685	0.639	0.625	0.619	0.053	0.028
(9) score de performance général	0.642	0.613	0.795	0.771	0.547	0.518
(10) indice d'accord	0.515	0.468	0.673	0.609	0.189	0.176
Nombre d'échantillons	624	624	100	100	31	31

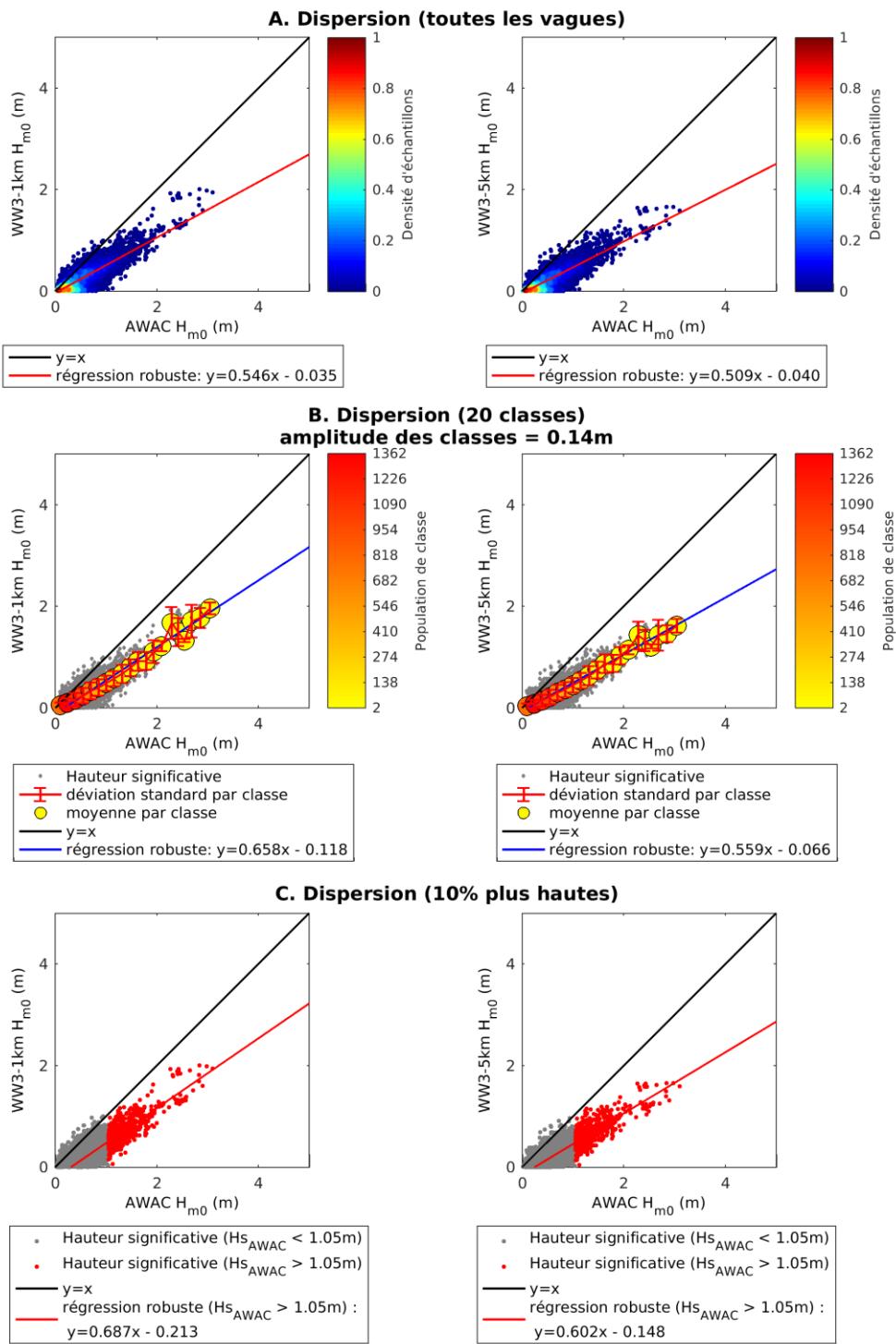


Figure 43 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de l'Anse au Lard, entre le 31 octobre 2014 et le 30 novembre 2015.

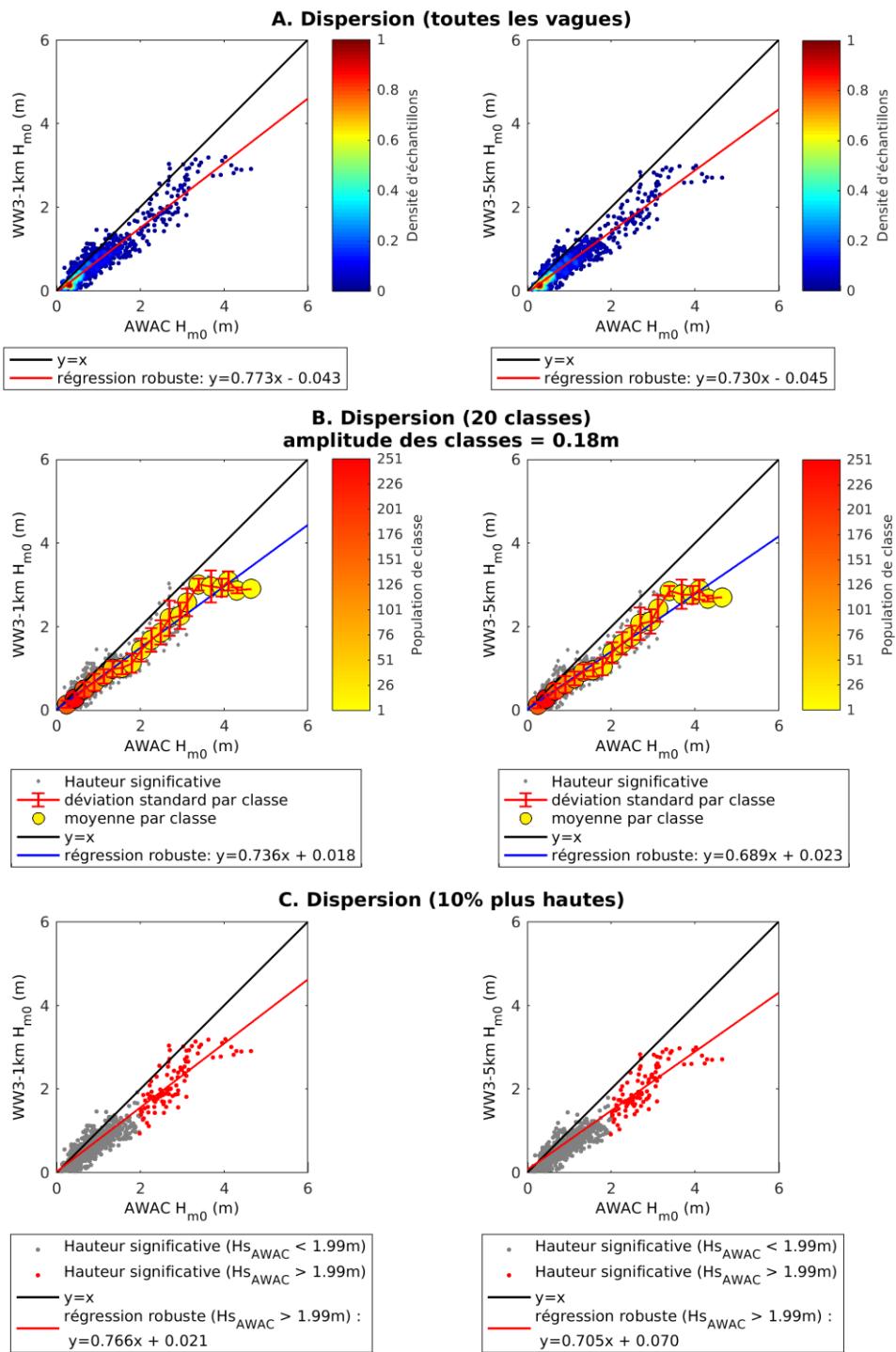


Figure 44 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan, entre le 16 octobre et le 30 novembre 2015.

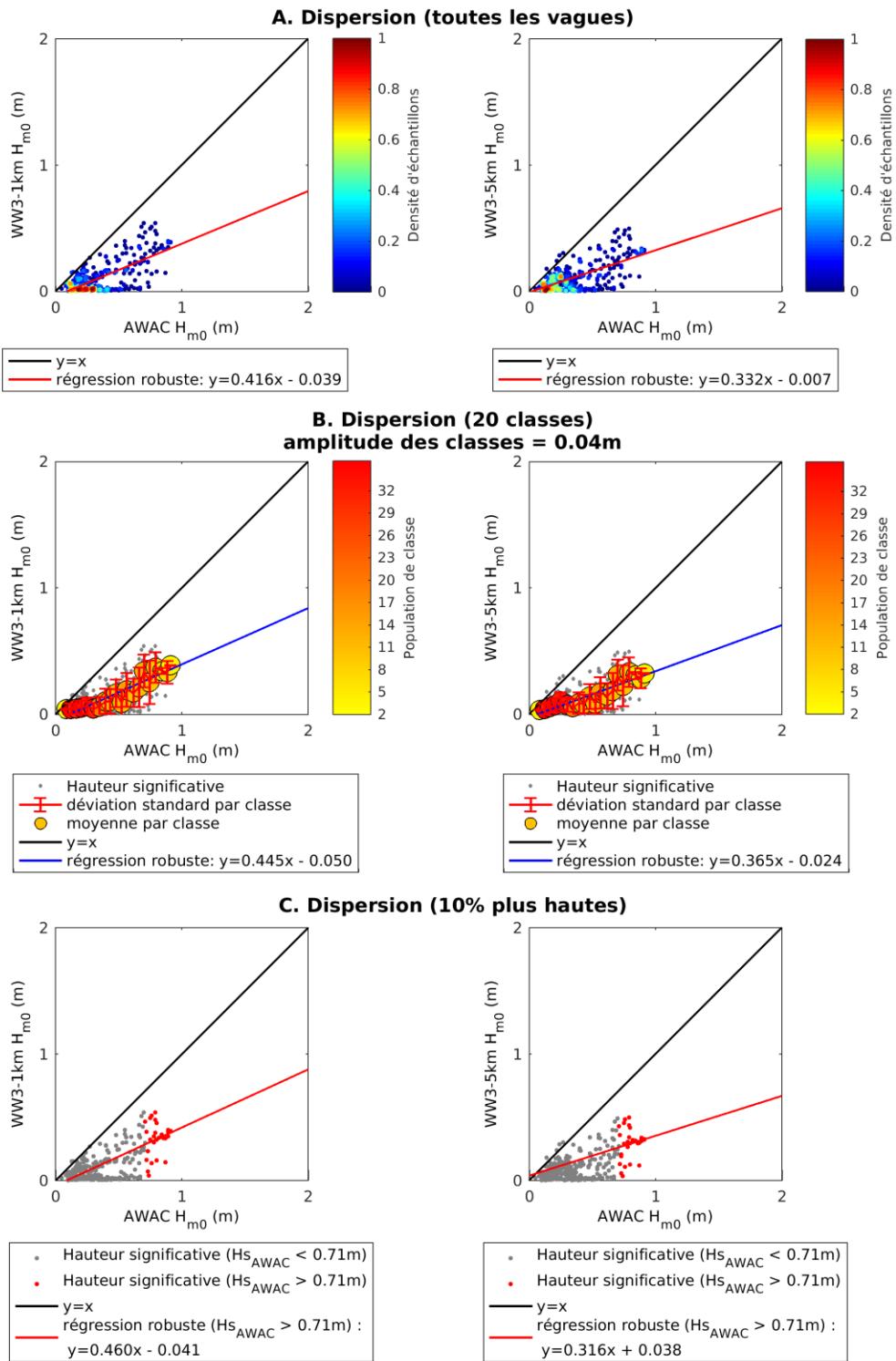


Figure 45 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Maria, entre le 9 et le 30 novembre 2015.

3.4.1.2 Périodes moyennes

Les séries temporelles issues des AWAC et du modèle WW3 montrent une sensibilité variable du modèle pour la prédiction des périodes moyennes des vagues. Pour tous les sites, certains événements de moyennes à longues périodes sont représentés, et même bien reproduits, alors que d'autres ne le sont pas du tout. Parmi les événements reproduits avec synchronisme, certains le sont avec une sous-évaluation de la période, alors que d'autres sont surestimés. De plus, le modèle prédit aussi certains événements de périodes plutôt longues qui ne sont pas mesurés par les instruments.

Pour ce qui est des courtes périodes, le modèle semble très imprécis. À ULR (figure 46), les plus courtes vagues sont très nettement sous-évaluées par WW3, les valeurs de période les plus basses mesurées par l'AWAC étant d'environ 3 secondes, alors qu'elles sont prédites à une période inférieure à 2 secondes. La même mauvaise représentation des périodes les plus courtes se retrouve au site ESP (figure 48). Cette tendance se retrouve dans les ordonnées à l'origine des droites de régression, qui sont négatives pour ces deux sites ((7 b) ; ULR : -0,102, ESP : -0,668). Néanmoins, la plupart des épisodes de périodes moyennes à longues (entre 5 et 7 secondes) sont plutôt bien représentés pour ces deux sites, voire même légèrement surestimés, ce qui permet de rapprocher la pente de la droite de régression de 1 ((7a) ; ULR : 0,896, ESP : 1,104).

Pour tous les sites, les périodes prédominantes (entre 3,5 et 4,5 secondes, groupes de forte densité dans les graphiques de dispersion totale) sont légèrement sous-estimées par WW3, sauf pour SIL (figure 47) où elles semblent correctement évaluées. Cette observation est bien marquée sur les graphiques de dispersion par moyenne de classes, qui montre que les points des classes aux populations les plus fortes (couleur rouge à orange) sont très proches de la courbe 1:1 et très légèrement dessous.

La corrélation entre valeurs prédites et mesurées est très faible, comme le montrent les coefficients de détermination, compris entre 0,091 (LAR) (figure 49) et 0,793 (ESP). Les biais absolus moyens sont importants, de l'ordre de 0,6 seconde ou plus (1,2 seconde pour MAR) (figure 51). Les fortes valeurs de RMSE (0,73 seconde (ESP) ou plus) indiquent la présence d'erreurs importantes de nature plutôt aléatoire, même si la part systématique de cette erreur est relativement importante pour ULR, LPM (figure 50) et MAR. Néanmoins, la dispersion autour de la moyenne est très forte pour tous les sites (tableau 22 et 23) ; au minimum 0,65 seconde pour ULR. Si on ne considère que les 10 % des vagues les plus hautes, la corrélation est un peu meilleure graphiquement, ce qui est confirmé par les coefficients de détermination globalement plus élevés. Les biais moyen et absolu demeurent toutefois importants, de même que l'erreur quadratique moyenne. Néanmoins, cette erreur est moins aléatoire pour les plus hautes vagues.

Pour tous les sites, il y a très peu de différences entre les résultats des comparaisons avec WW3 à 1 km et WW3 à 5 km, et tout ce qui est observé à 1 km est valable à 5 km.

Globalement, le modèle WW3 est donc peu performant en ce qui concerne les périodes moyennes, et ce, quel que soit l'emplacement dans l'EGSL. Il n'y a pas de tendance générale qui se dégage des comparaisons entre prédictions et mesures. Le seul élément positif est que WW3 semble tout de même bien représenter les périodes moyennes prédominantes, comprises entre 3 et 5 secondes, avec tout de même une légère tendance à la sous-estimation. Les différences entre WW3-1km et WW3-5km sont négligeables.

Tableau 22 : Paramètres statistiques entre les périodes moyennes prédictes par WW3 et mesurées aux sites de profondeur intermédiaire (entre 30 et 40 mètres de fond : Saint-Ulric, Sept-Îles et Cap-d'Espoir).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	Saint-Ulric		Sept-Îles		Cap-d'Espoir	
Résolution de WW3	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km
(1) biais	-0.507	-0.673	0.145	-0.12	-0.219	-0.258
(2) biais absolu MAE	0.723	0.797	0.691	0.699	0.574	0.629
(3) RMSE	0.875	0.94	0.996	0.969	0.734	0.809
(4) RMSE _s	0.512	0.685	0.206	0.225	0.232	0.266
(5) RMSE _u	0.709	0.643	0.975	0.942	0.697	0.763
(6) sd des différences	0.713	0.656	0.986	0.962	0.701	0.766
(7a) a ₁ (régression robuste)	0.896	0.822	0.798	0.737	1.104	1.086
(8 b) a ₂ (régression robuste)	-0.102	0.019	0.972	0.959	-0.668	-0.631
(8) coefficient de détermination	0.455	0.46	0.26	0.242	0.588	0.535
(9) score de performance général	0.804	0.797	0.785	0.788	0.846	0.832
(10) indice d'accord	0.733	0.692	0.674	0.673	0.831	0.803
Nombre d'échantillons	11 193	11 195	14 353	14 353	10 742	10 742
Paramètres \ Sites						
10 % des vagues les plus hautes						
(1) biais	-0.635	-0.816	0.14	-0.239	0.093	0.049
(2) biais absolu MAE	0.752	0.884	0.532	0.562	0.627	0.679
(3) RMSE	0.859	0.989	0.703	0.744	0.788	0.863
(4) RMSE _s	0.65	0.816	0.141	0.241	0.291	0.322
(5) RMSE _u	0.562	0.558	0.689	0.704	0.733	0.801
(6) sd des différences	0.579	0.559	0.69	0.705	0.783	0.862
(7a) a ₁ (régression robuste)	1.167	1.015	1.028	0.952	1.443	1.51
(8 b) a ₂ (régression robuste)	-1.465	-0.888	0	-0.003	-2.417	-2.842
(8) coefficient de détermination	0.755	0.702	0.481	0.432	0.601	0.58
(9) score de performance général	0.855	0.839	0.871	0.865	0.871	0.859
(10) indice d'accord	0.823	0.762	0.788	0.76	0.79	0.767
Nombre d'échantillons	1120	1120	1436	1436	1075	1075

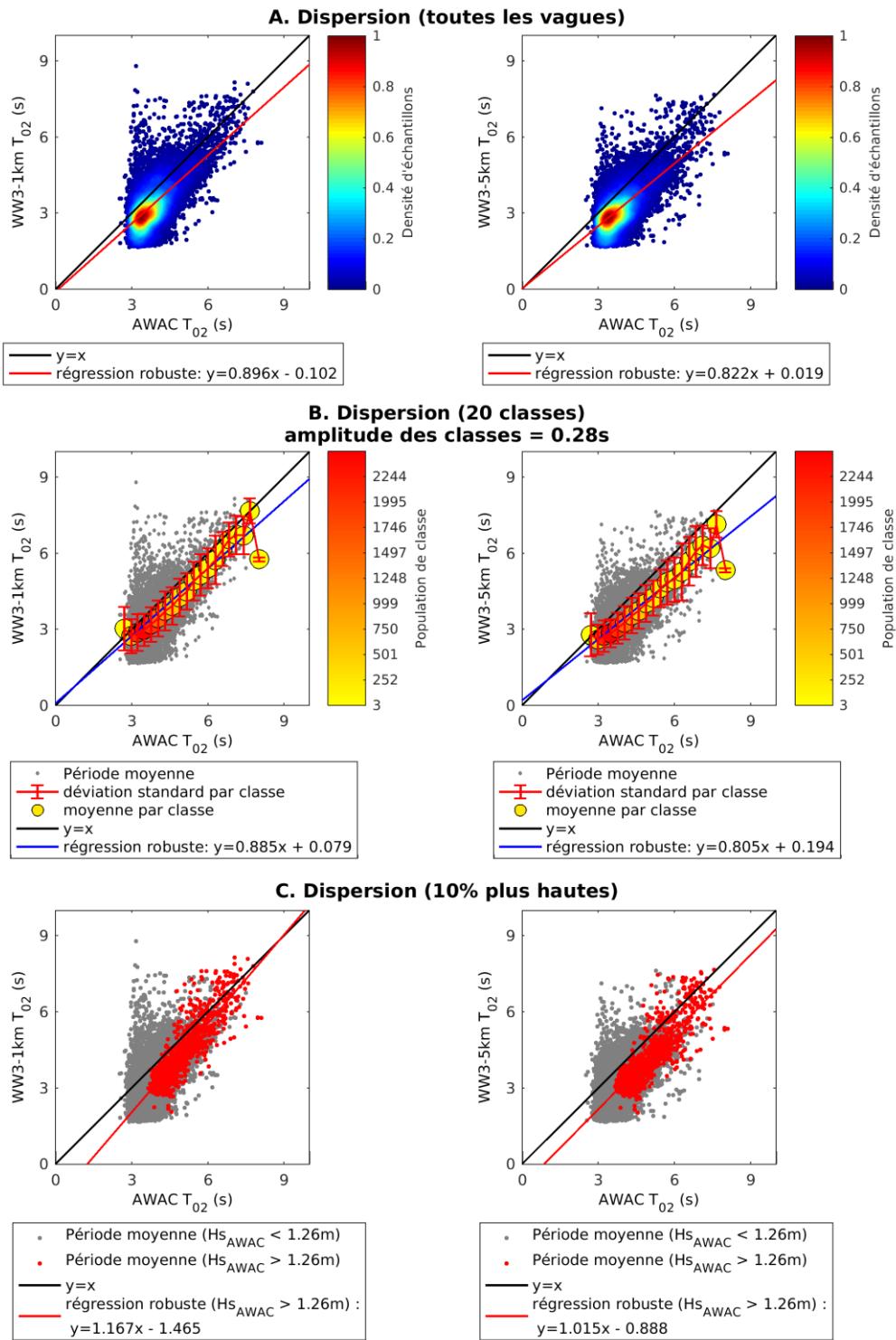


Figure 46 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Saint-Ulric, entre le 3 mai 2010 et le 29 octobre 2012.

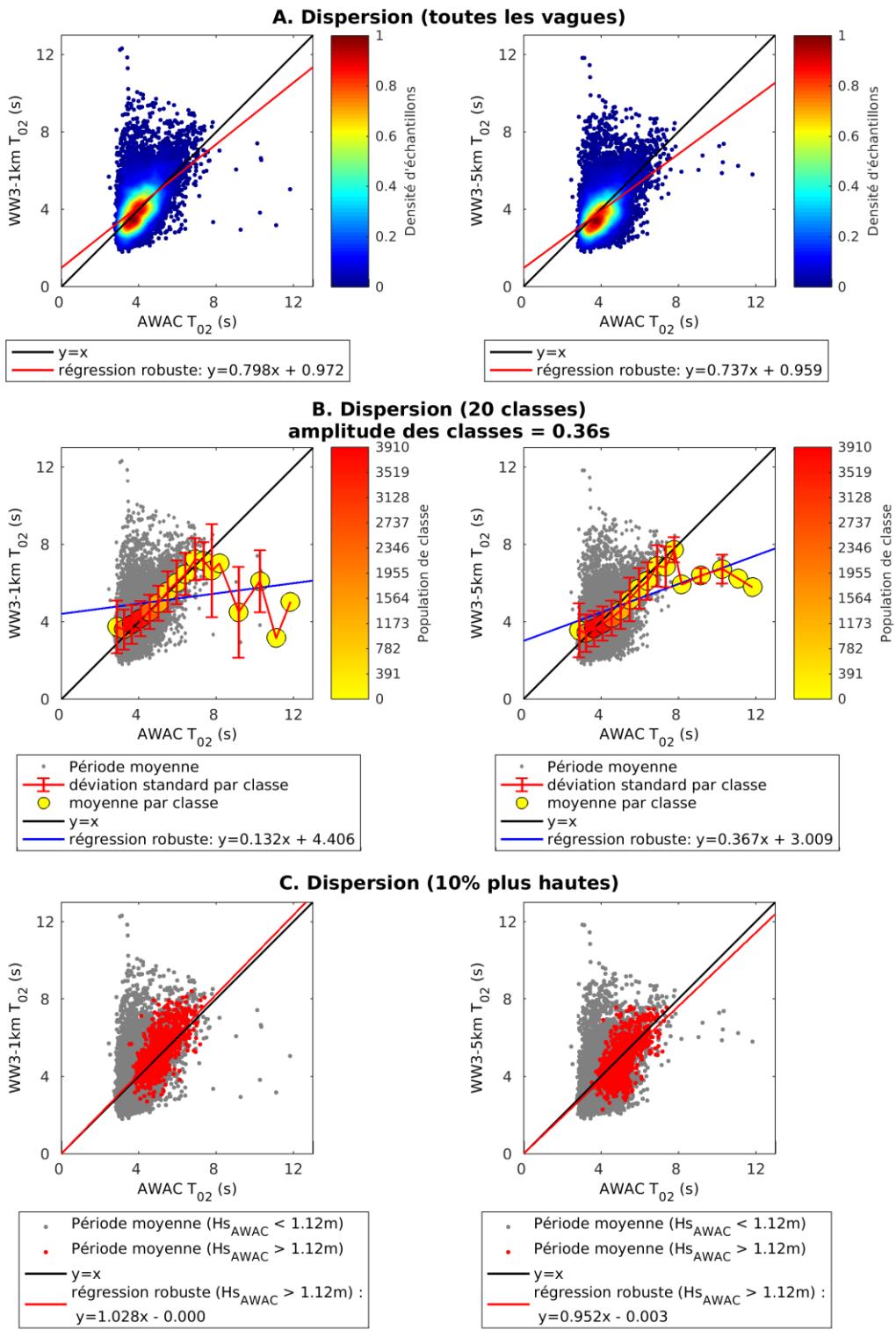


Figure 47 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Sept-Îles, entre le 5 mai 2010 et le 11 octobre 2012.

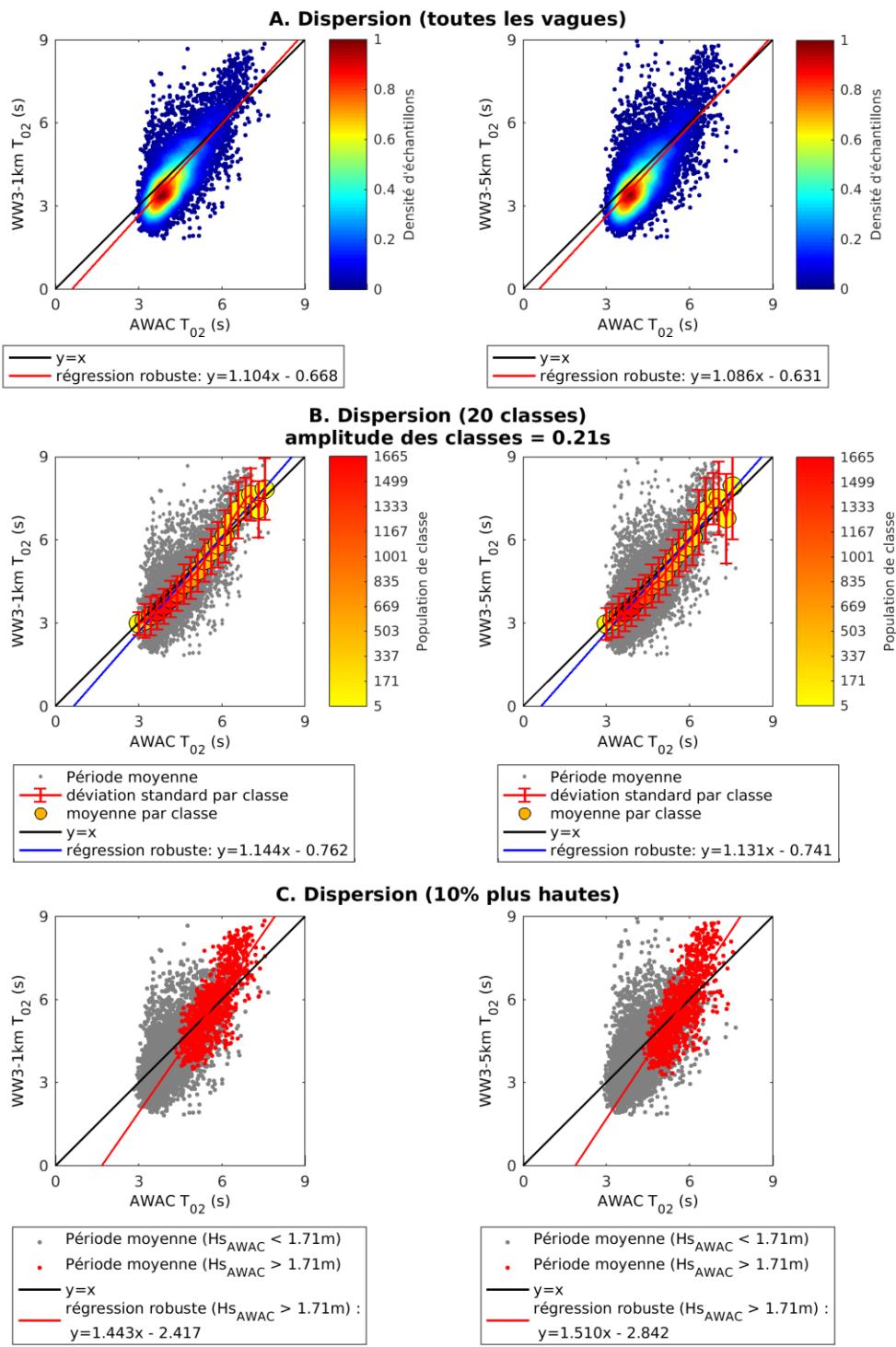


Figure 48 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Cap-d'Espoir, entre le 6 octobre 2010 et le 12 octobre 2012.

Tableau 23 : Paramètres statistiques entre les périodes moyennes prédictes par WW3 et mesurées aux sites côtiers (moins de 30 mètres de fond : Anse au Lard, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	Anse au Lard		Longue-Pointe-de-Mingan		Maria	
	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km
Résolution de WW3						
(1) biais	0.091	0.026	0.334	0.161	0.905	0.421
(2) biais absolu MAE	0.603	0.588	0.596	0.523	1.373	1.047
(3) RMSE	0.844	0.805	0.851	0.715	2.237	1.923
(4) RMSE _s	0.381	0.343	0.47	0.367	1.416	0.995
(5) RMSE _u	0.753	0.729	0.71	0.614	1.733	1.646
(6) sd des différences	0.839	0.805	0.783	0.697	2.05	1.879
(7a) a ₁ (régression robuste)	0.392	0.437	0.657	0.658	-1.394	-0.981
(8 b) a ₂ (régression robuste)	1.826	1.633	1.538	1.361	6.827	5.322
(8) coefficient de détermination	0.091	0.117	0.443	0.516	0.118	0.069
(9) score de performance général	0.737	0.747	0.793	0.82	0.245	0.353
(10) indice d'accord	0.57	0.6	0.8	0.841	0.072	0.076
Nombre d'échantillons	6231	6231	995	995	300	300
Paramètres \ Sites	10 % des vagues les plus hautes					
	-0.475	-0.511	0.211	0.019	-0.491	-0.563
(1) biais	0.569	0.603	0.488	0.494	0.491	0.563
(2) biais absolu MAE	0.632	0.666	0.656	0.646	0.583	0.642
(3) RMSE	0.475	0.512	0.385	0.341	0.495	0.566
(4) RMSE _u	0.417	0.427	0.532	0.549	0.307	0.303
(6) sd des différences	0.418	0.427	0.625	0.649	0.319	0.313
(7a) a ₁ (régression robuste)	1.03	1.034	0.387	0.35	0.571	0.635
(8 b) a ₂ (régression robuste)	-0.588	-0.638	3.289	3.285	0.843	0.571
(8) coefficient de détermination	0.573	0.564	0.127	0.1	0.078	0.097
(9) score de performance général	0.857	0.85	0.883	0.882	0.851	0.837
(10) indice d'accord	0.712	0.693	0.605	0.606	0.296	0.291
Nombre d'échantillons	624	624	100	100	31	31

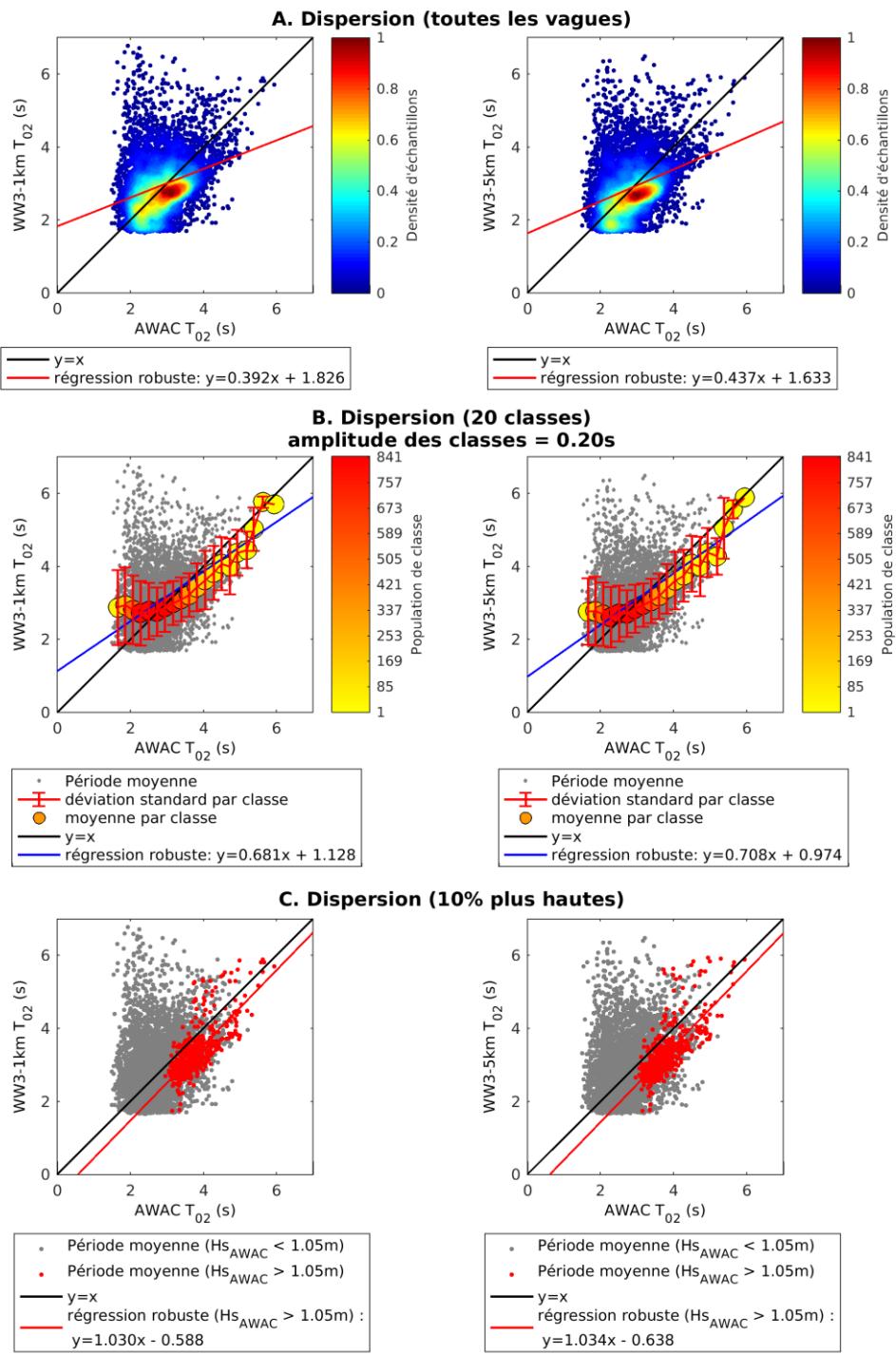


Figure 49 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de l'Anse au Lard, entre le 31 octobre 2014 et le 30 novembre 2015.

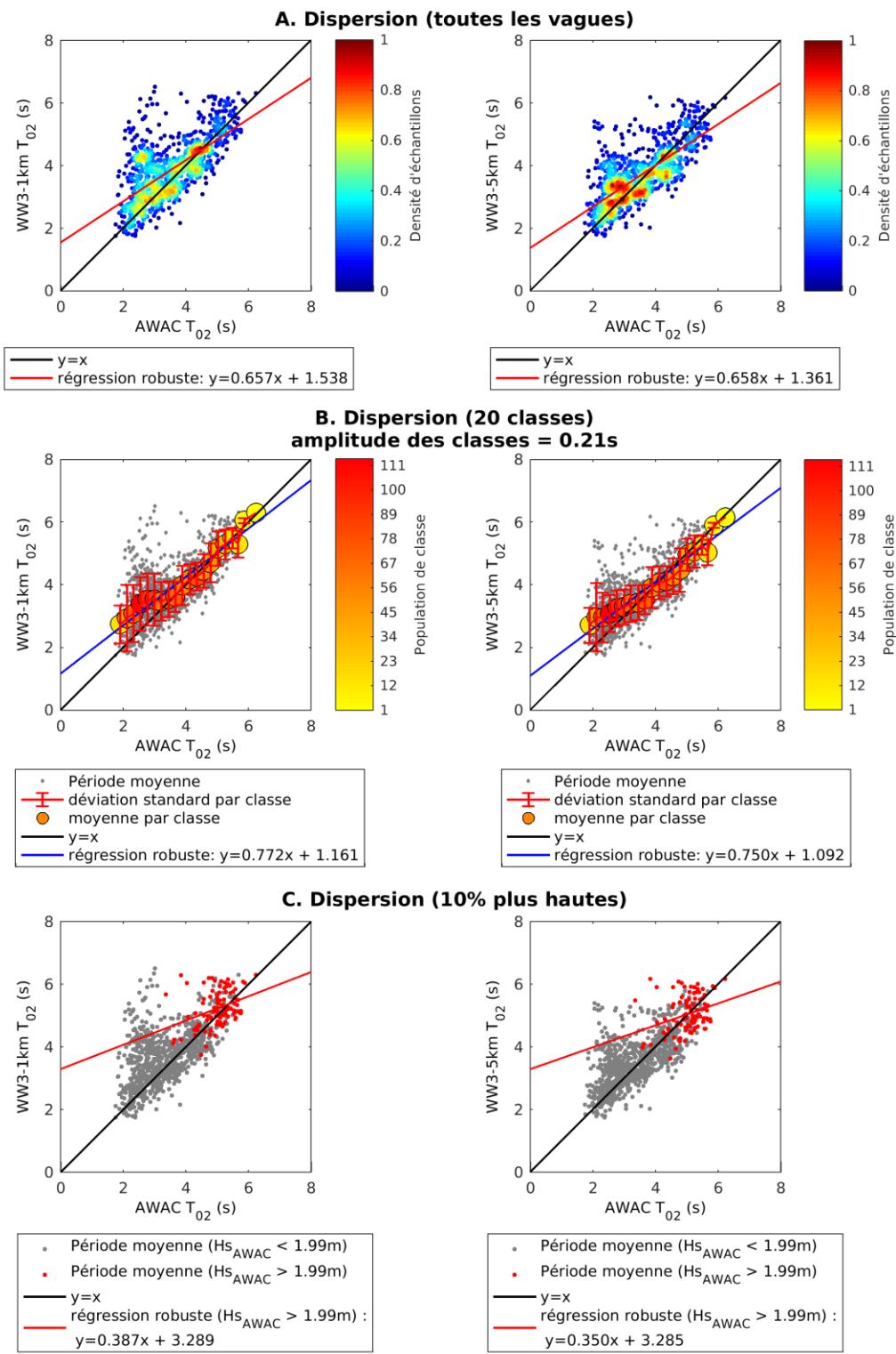


Figure 50 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan, entre le 16 octobre et le 30 novembre 2015.

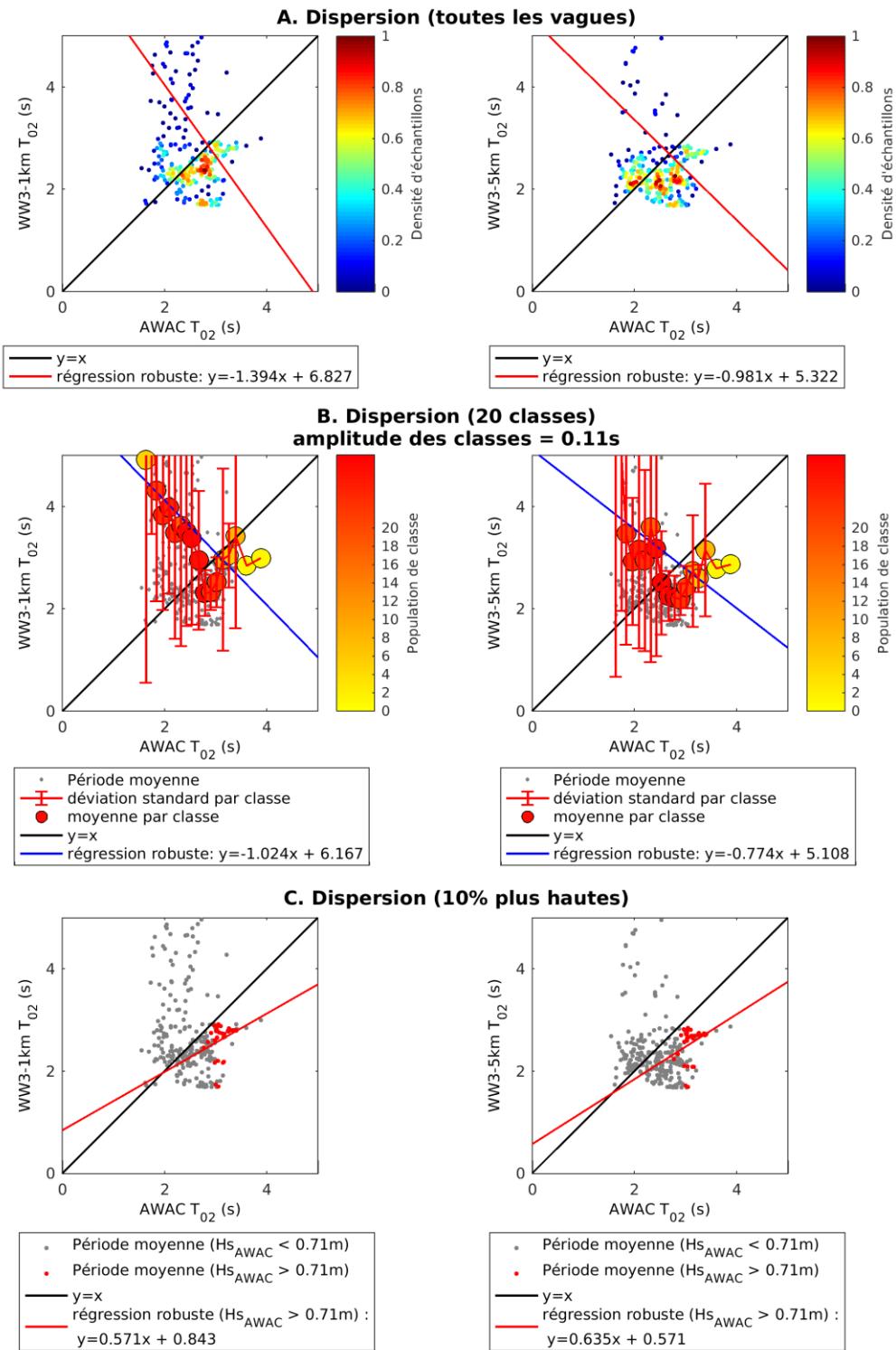


Figure 51 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Maria, entre le 9 et le 30 novembre 2015.

3.4.1.3 Directions moyennes

De manière générale, WW3 reproduit les directions moyennes prédominantes de manière satisfaisante. La plupart des sites présentent une distribution bimodale, suggérant deux directions moyennes prédominantes par sites du Golfe (SIL et LPM, (figure 53 et 56)), excepté à ESP (Figure 54) où les vagues semblent provenir de tout le quart Est de la rose des vagues. Les graphiques de dispersion pour toutes les vagues montrent que ces zones de forte densité d'échantillons sont systématiquement situées sur, ou très proche, de la droite $y=x$.

Dans l'estuaire (ULR et LAR) (figure 52 et 55), les deux directions principales des vagues incidentes sont Nord-Ouest et Est. Ces directions-là sont en majorité bien représentée, mais des vagues mesurées provenant de l'Est sont prédites par WW3 comme provenant du Nord-Ouest, et inversement, suggérant un potentiel déphasage du modèle par rapport aux mesures. Cette tendance est moins marquée aux autres sites, car les directions prédominantes y sont moins éloignées, mais est tout de même présente.

Pour tous les sites, la dispersion autour de la moyenne est assez élevée, entre 26° à SIL et 53° à LAR, ce qui indique une certaine imprécision du modèle et affecte la corrélation. La dispersion est systématiquement plus faible à 1 km qu'à 5 km, à part pour MAR (figure 57), mais le peu de points disponibles pour ce site le rend statistiquement peu fiable. Ceci peut mettre en évidence une meilleure représentation des directions en milieu côtier à 1 km, où les reliefs bathymétriques sont mieux représentés.

A 1 km comme à 5 km de résolution, WW3 semble reproduire de manière cohérente les directions moyennes prédominantes pour chaque site, même si les graphiques de dispersion laissent supposer un potentiel déphasage entre mesures et prédictions, particulièrement pour les sites où la direction moyenne présente une distribution bimodale. Néanmoins, la dispersion autour de la moyenne étant systématiquement plus faible à 1 km qu'à 5 km, il est cohérent de supposer que la direction moyenne des vagues est mieux reproduite par le modèle lorsque la bathymétrie est mieux résolue.

Tableau 24 : Paramètres statistiques entre directions moyennes prédites par WW3 et mesurées aux sites de profondeur intermédiaire (entre 30 et 40 mètres de fond : Saint-Ulric, Sept-Îles et Cap-d’Espoir).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	Saint-Ulric		Sept-Îles		Cap-d’Espoir	
Résolution de WW3	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km
(1) biais	1.325	-2.097	-7.298	-8.163	4.755	8.037
(2) biais absolu MAE	34.32	36.497	18.826	21.092	21.285	23.678
(3) RMSE	50.474	54.594	27.312	30.16	33.721	36.355
(6) sd des différences	50.459	54.556	26.32	29.035	33.385	35.458
(7a) a_1 (régression robuste)	0.61	0.613	0.563	0.668	0.767	0.759
(8 b) a_2 (régression robuste)	49.555	53.591	61.063	43.886	35.509	41.742
(8) coefficient de détermination	0.42	0.415	0.529	0.486	0.556	0.482
Nombre d'échantillons	11 193	11 193	14 353	14 353	10 742	10 742
Paramètres \ Sites						
10 % des vagues les plus hautes						
(1) biais	-8.928	-9.645	-4.303	-8.591	-1.989	0.69
(2) biais absolu MAE	21.882	27.524	10.15	11.797	9.301	10.008
(3) RMSE	27.55	41.694	14.032	14.963	12.112	12.729
(6) sd des différences	26.075	40.582	13.361	12.255	11.953	12.716
(7a) a_1 (régression robuste)	0.857	0.876	0.722	0.895	1.014	0.991
(8 b) a_2 (régression robuste)	6.854	12.386	35.364	6.331	-3.739	1.874
(8) coefficient de détermination	0.767	0.743	0.834	0.85	0.915	0.901
Nombre d'échantillons	1120	1120	1436	1436	1075	1075

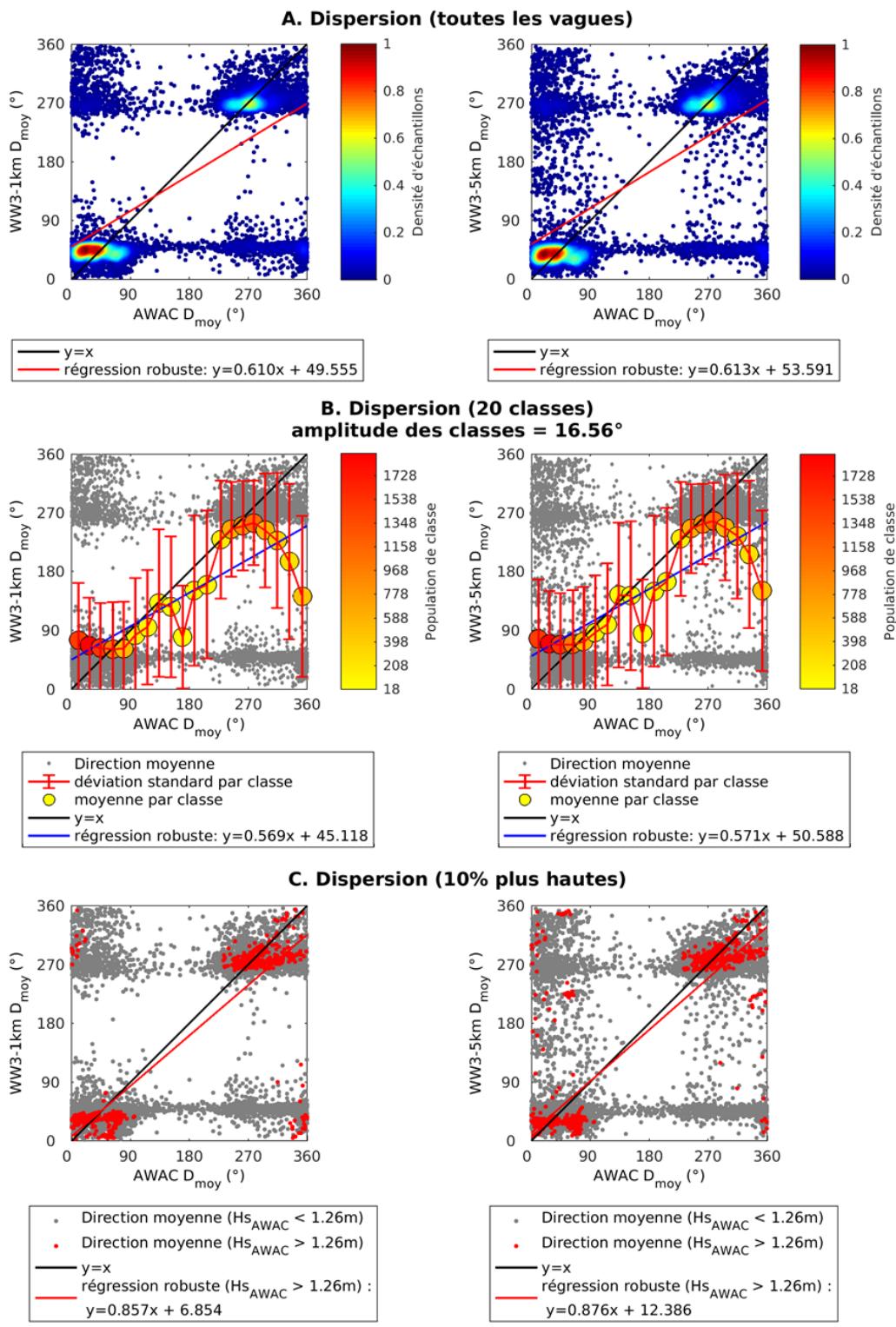


Figure 52 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Saint-Ulric, entre le 3 mai 2010 et le 29 octobre 2012.

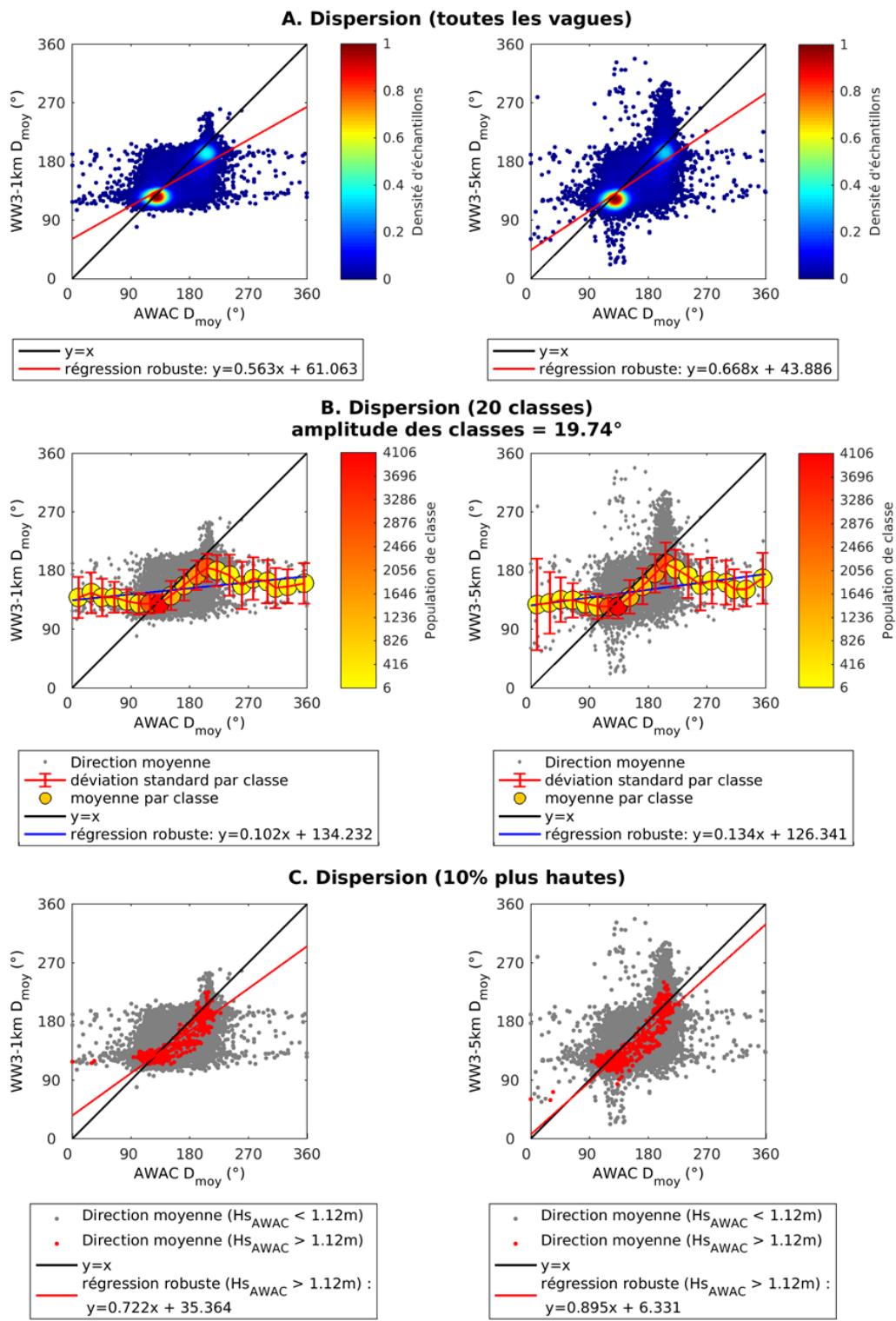


Figure 53 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Sept-Îles, entre le 5 mai 2010 et le 11 octobre 2012.

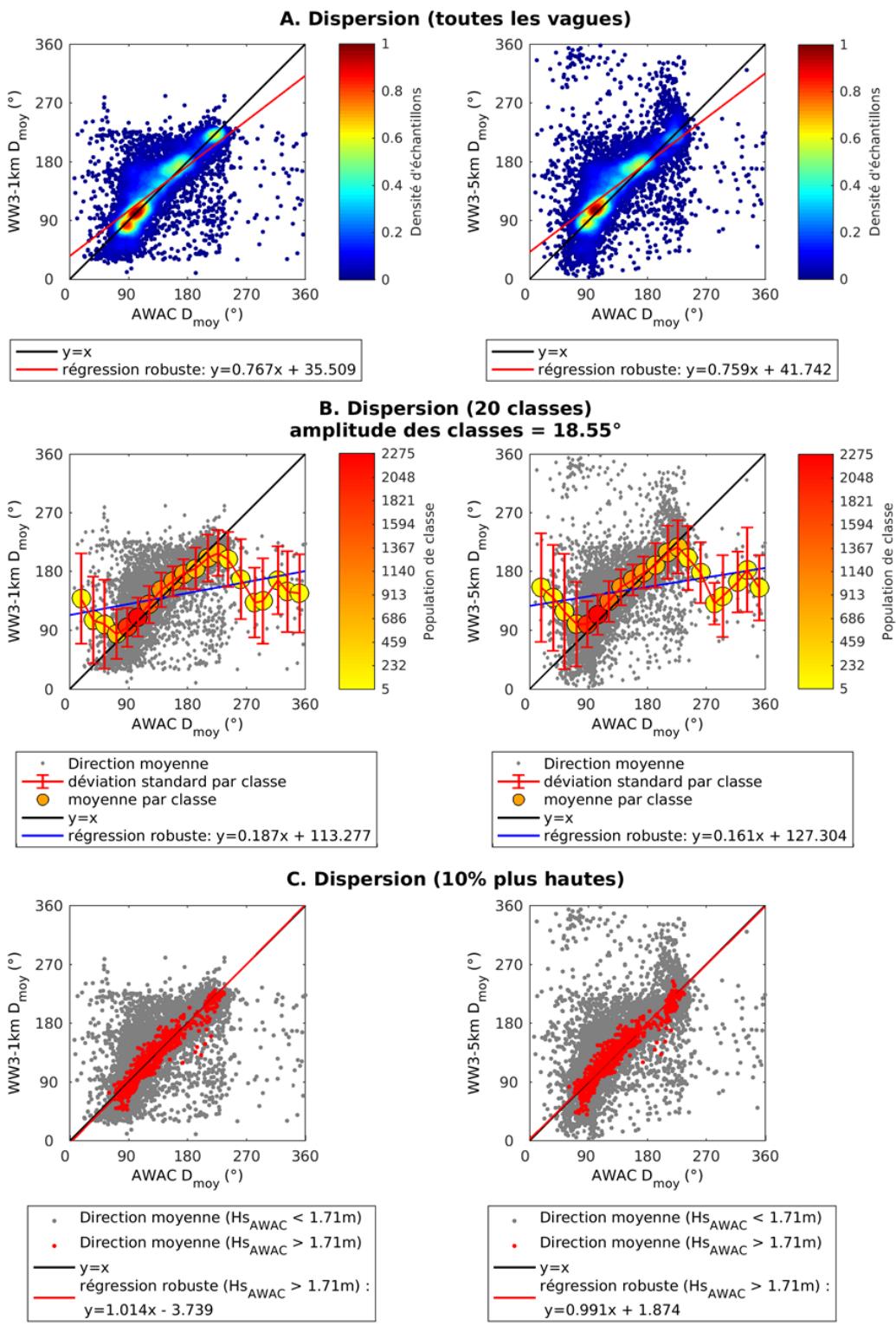


Figure 54 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Cap-d'Espoir, entre le 6 octobre 2010 et le 12 octobre 2012.

Tableau 25 : Paramètres statistiques entre directions moyennes prédictes par WW3 et mesurées aux sites côtiers (moins de 20 mètres de fond : Anse au Lard, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria).

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	Anse au Lard		Longue-Pointe-de-Mingan		Maria	
Résolution de WW3	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km
(1) biais	0.301	0.754	-30.021	-28.477	-49.413	-29.025
(2) biais absolu MAE	33.898	35.055	32.736	32.657	51.064	36.258
(3) RMSE	53.67	55.198	44.346	43.599	67.589	50.316
(6) sd des différences	53.673	55.198	32.655	33.031	46.192	41.169
(7a) a (régression robuste)	0.607	0.627	0.869	0.876	0.107	0.52
(8 b) b (régression robuste)	37.85	42.409	-0.333	-1.103	113.76	58.635
(8) coefficient de détermination	0.395	0.425	0.567	0.572	0.059	0.33
Nombre d'échantillons	6231	6231	995	995	300	300
Paramètres \ Sites		10 % des vagues les plus hautes				
(1) biais	-8.404	-2.338	-13.921	-17.381	-18.829	-16.74
(2) biais absolu MAE	13.2	14.928	14.227	17.651	18.902	16.942
(3) RMSE	26.453	28.688	16.336	19.764	23.181	21.699
(6) sd des différences	25.102	28.616	8.591	9.456	13.745	14.034
(7a) a (régression robuste)	0.838	0.81	0.202	0.174	-0.088	-0.083
(8 b) b (régression robuste)	37.333	47.541	185.013	188.531	141.516	142.918
(8) coefficient de détermination	0.755	0.743	0.289	0.126	0.171	0.065
Nombre d'échantillons	624	624	100	100	31	31

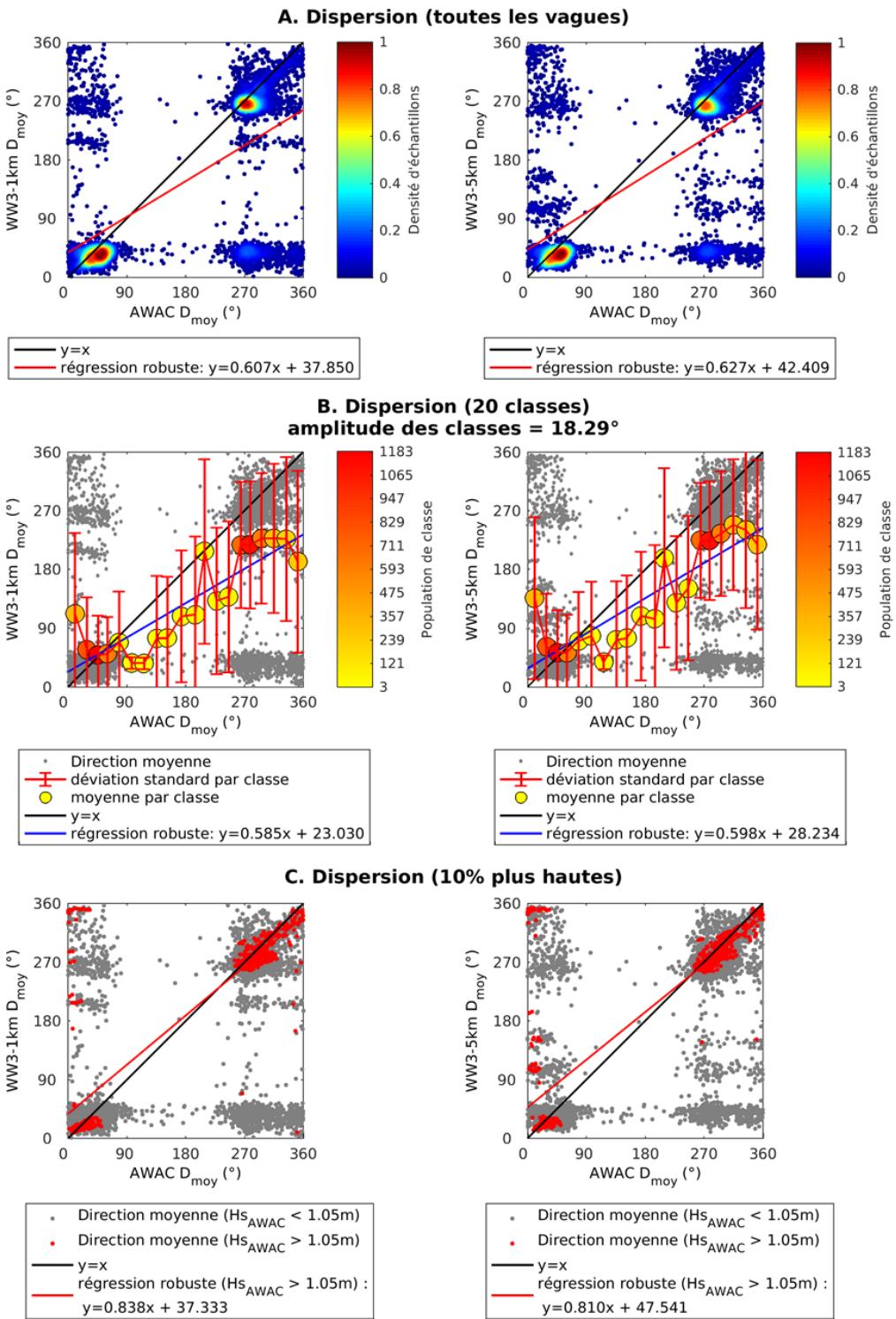


Figure 55 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédites par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de l'Anse au Lard, entre le 31 octobre 2014 et le 30 novembre 2015.

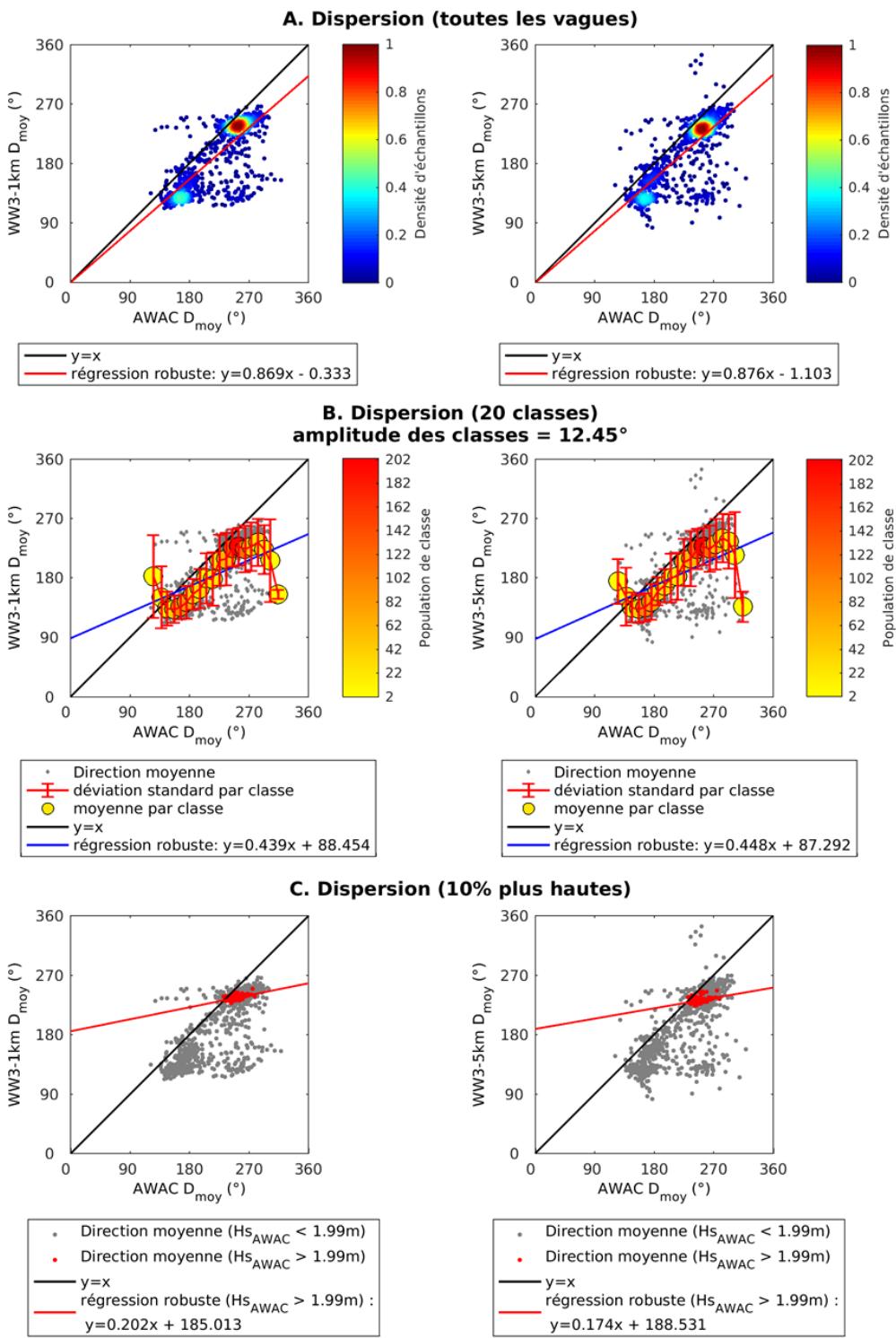


Figure 56 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan, entre le 16 octobre et le 30 novembre 2015.

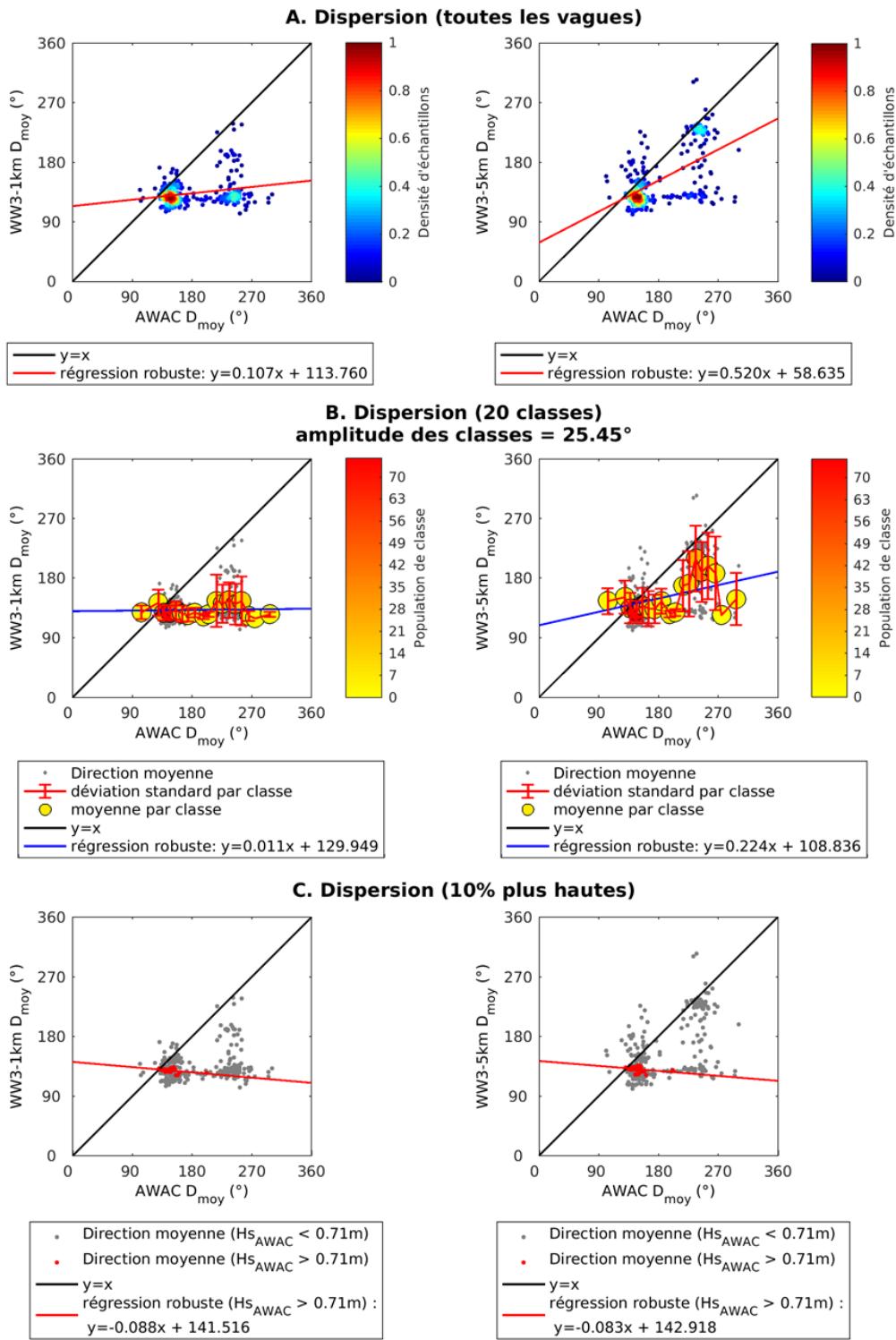


Figure 57 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes prédictes par WW3 (résolution : 1km à gauche, 5km à droite) et mesurées à l'AWAC de Maria, entre le 9 et le 30 novembre 2015.

3.4.2 Intercomparaison 1km vs 5 km

3.4.2.1 Hauteurs significatives

3.4.2.1.1 Comparaison pour l'ensemble des vagues

Les résultats mettent en évidence une très bonne concordance entre les hauteurs significatives prédites par les deux résolutions. Le biais moyen est très proche de 0 de façon homogène sur l'ensemble du domaine, de même que pour l'erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne (inférieures à 0.05). Toutefois on observe une accentuation de l'erreur proche des côtes ($0.05 < \text{MAE}, \text{RMSE} < 0.1$). Cette augmentation est corrélée avec une plus forte dispersion des erreurs autour de la moyenne, caractérisée par une déviation standard comprise entre 0.05 et 0.1 proche des côtes contre ~0.025 au large. Dans certaines régions très localisées telles que les Îles-de-la-Madeleine ainsi qu'au large de l'île du Cap-Breton, l'erreur est localement plus importante que pour le reste du domaine (MAE:0.15, RMSE 0.15, MBE:0.12, STD:0.16). Le coefficient directeur de la droite de régression est très proche de 1 pour l'ensemble du domaine, plus faible (~0.95) dans la baie des Chaleurs ainsi que le long de l'île du Prince-Édouard et plus élevé (~1.05) le long des côtes notamment autour de l'île d'Anticosti et entre l'archipel Mingan et Blanc-Sablon. L'ordonnée à l'origine est globalement proche de 1 au large et légèrement négative le long des côtes citées ci-dessus (~ -0.05). Ceci met en évidence une légère tendance à la surestimation de la hauteur significative dans les simulations à 5 km de résolution. Le coefficient directeur est très proche de 1 sur l'ensemble du domaine ce qui montre une très bonne corrélation entre les simulations.

3.4.2.1.2 Comparaison pour les 10 % des vagues les plus hautes

Les résultats mettent en évidence des patrons très similaires à ceux pour l'ensemble des vagues avec des erreurs relativement faibles dans le golfe (MAE et RMSE inférieure à 0.05), plus importants proche des côtes ($0.05 < \text{MAE}, \text{RMSE} < 0.1$) ainsi que localement aux Îles-de-la-Madeleine, à l'extérieur du détroit de Cabot, à l'île de Saint-Paul et le long de la Basse-Côte-Nord ($0.1 < \text{MAE}, \text{RMSE} < 0.15$). Dans ces régions, le biais moyen est généralement positif ($0.1 < \text{MBE} < 0.15$) ce qui indique une sous-estimation des hauteurs significatives dans les simulations à 5 km hormis en face de Glace Bay où le biais est négatif (~0.15). La dispersion de l'erreur absolue autour de la moyenne est aussi relativement faible dans la majorité du domaine, caractérisée par une déviation standard inférieure à 0.05. Dans les régions de plus grandes erreurs citées ci-dessus, la dispersion de l'erreur autour de la moyenne est aussi plus importante ($0.1 < \text{STD} < 0.15$).

Le coefficient directeur de la droite de régression suit aussi le même patron, avec des valeurs proches de 1 dans le golfe et légèrement plus élevées (~1.05) dans les régions citées ci-dessus. Le coefficient de détermination est quant à lui très proche de 1 dans l'ensemble du domaine.

3.4.2.1.3 Synthèse sur les hauteurs significatives

Les simulations aux deux résolutions concordent globalement bien entre elles pour la majorité du domaine. Les différences entre les deux sont plus importantes proche des côtes et des régions à faible profondeur telles que les îles et archipels qui ne sont pas résolus dans les simulations à 5km (figure 58 et 61).

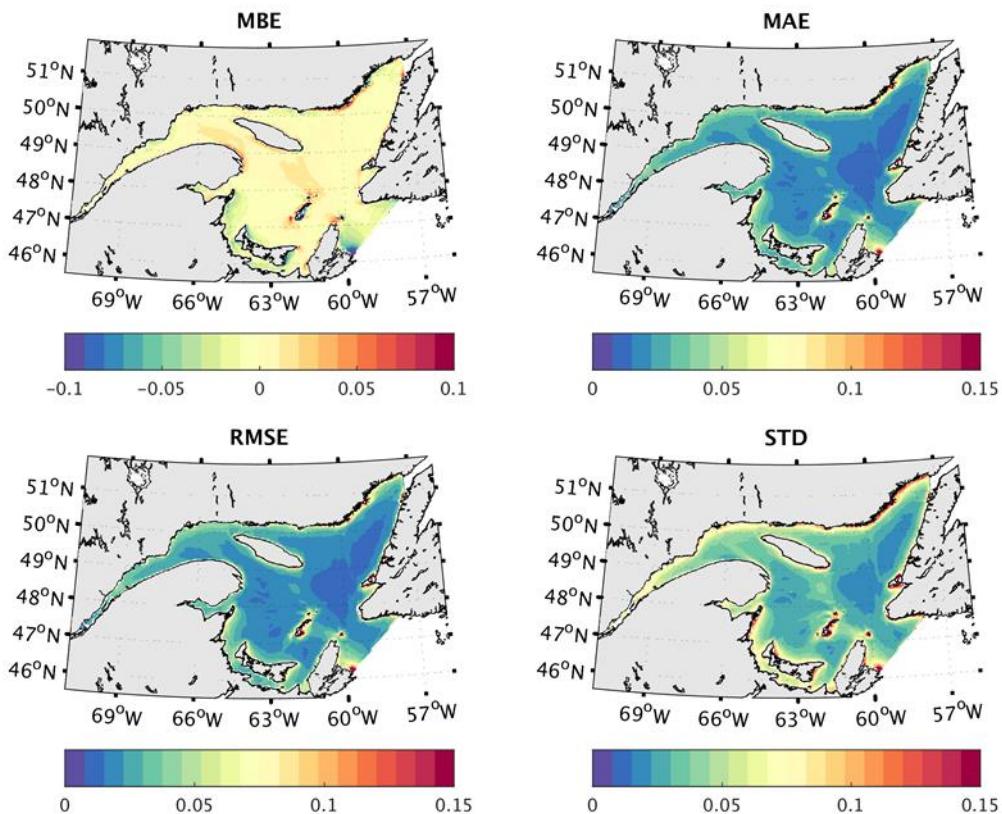


Figure 58 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

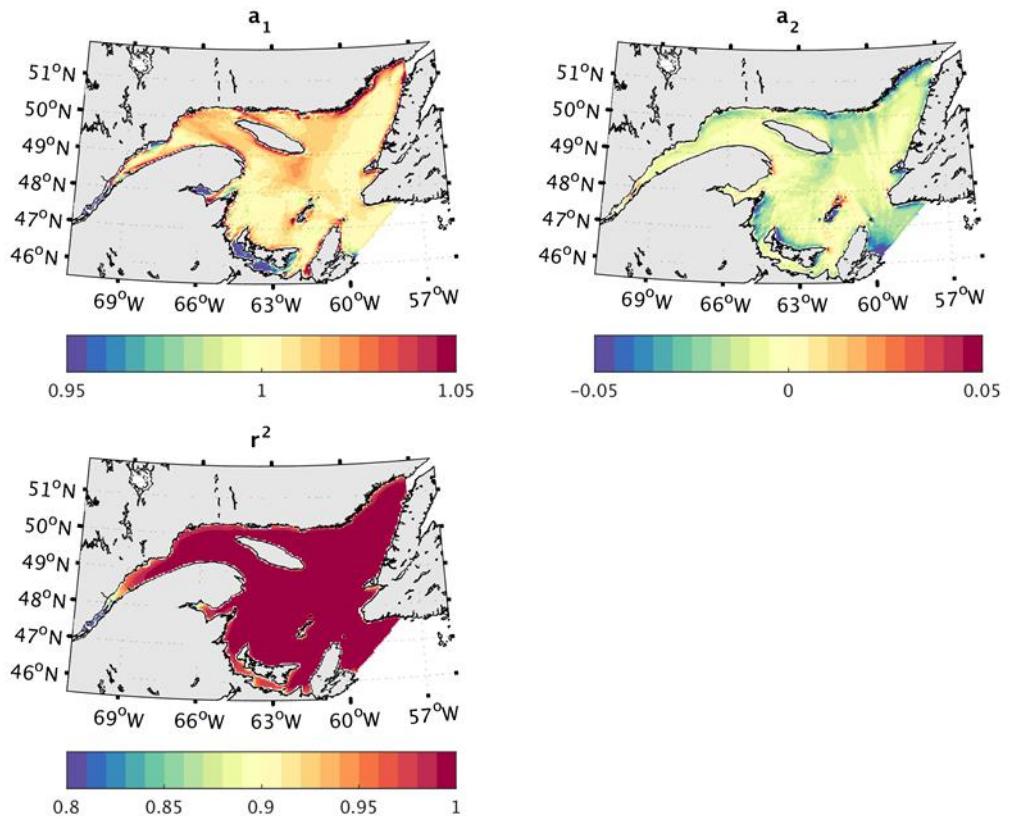


Figure 59 : Représentation des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

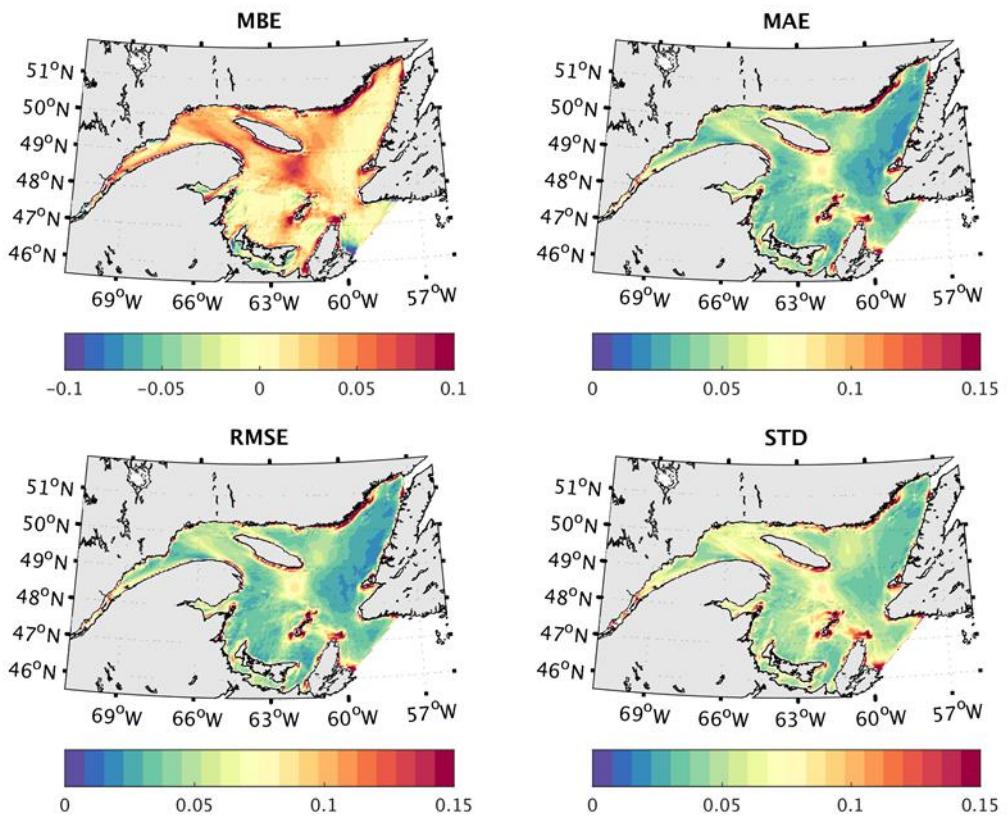


Figure 60 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

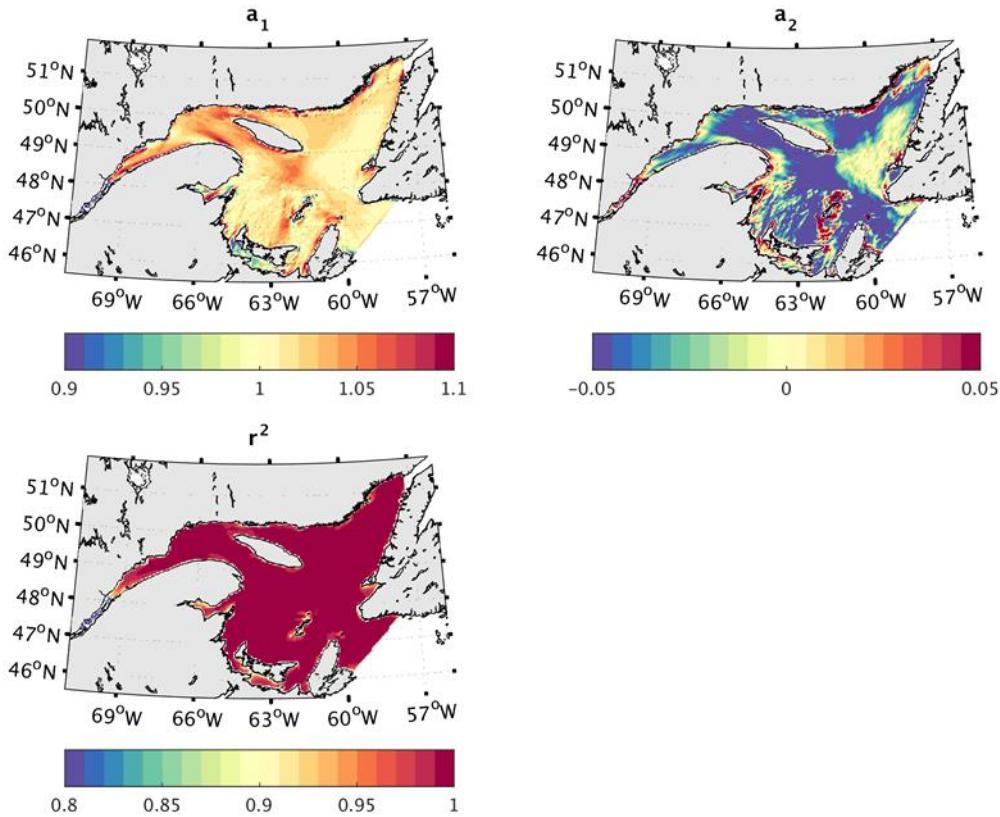


Figure 61 : Représentation des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes WW3-1km et WW3-5km pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

3.4.2.2 Périodes moyennes

3.4.2.2.1 Comparaison pour l'ensemble des vagues

Le biais moyen est très homogène et proche de 0 sur l'ensemble du domaine. L'erreur absolue moyenne et quadratique moyenne est très faible au large ($MAE, RMSE < 0.1$) et augmente proche des côtes ($0.2 < MAE, RMSE < 0.3$) avec des maximums dans la baie des Chaleurs et autour des Îles-de-la-Madeleine (~ 0.5). Le long des côtes, la dispersion des erreurs autour de la moyenne est très élevée ($STD : \sim 0.5$).

De même, le coefficient directeur de la droite de régression est très proche de 1 dans la majorité du golfe et diminue le long des côtes (~ 0.9) ce qui montre une surestimation des périodes dans les simulations à 5 km. L'ordonnée à l'origine est aussi très proche de 0 au large et devient positif à la côte (~ 0.2) excepté au large de l'île Cap-Breton en face de Glace Bay, où l'ordonnée à l'origine est négative ($-0.2 < a_2 < -0.1$). La corrélation entre les données est très bonne au large, caractérisée par un coefficient de détermination proche de 1. En revanche celui-ci est beaucoup plus faible proche des côtes (< 0.8).

3.4.2.2.2 Comparaison pour les 10 % des vagues les plus hautes

Les erreurs pour les plus hautes vagues suivent les mêmes patrons que précédemment, mais sont beaucoup plus faibles que pour l'ensemble des vagues avec des erreurs absolues et quadratiques moyennes maximums de l'ordre de 0.2 à la côte. De même pour la dispersion de l'erreur absolue caractérisée par une déviation standard de l'ordre de 0.15 proche des côtes. Le coefficient directeur de la droite de régression est proche de 1 dans le golfe et légèrement plus élevé (~1.1) dans l'estuaire. L'ordonnée à l'origine est quant à elle légèrement négative dans l'estuaire (-0.2) et proche de 0 dans le golfe. Le coefficient de détermination est globalement très homogène et proche de 1 sur l'ensemble du domaine.

Les différences entre les simulations à 1 km et 5 km de résolutions semblent donc s'atténuer pour les plus hautes vagues.

3.4.2.2.3 Synthèse sur les périodes

Les résultats indiquent que la simulation à 5 km de résolution à une forte tendance à surévaluer les périodes d'environ 10 à 15 % par rapport à celle à 1 km. En revanche les périodes des plus hautes vagues semblent être mieux représentées (figure 62 à 65).

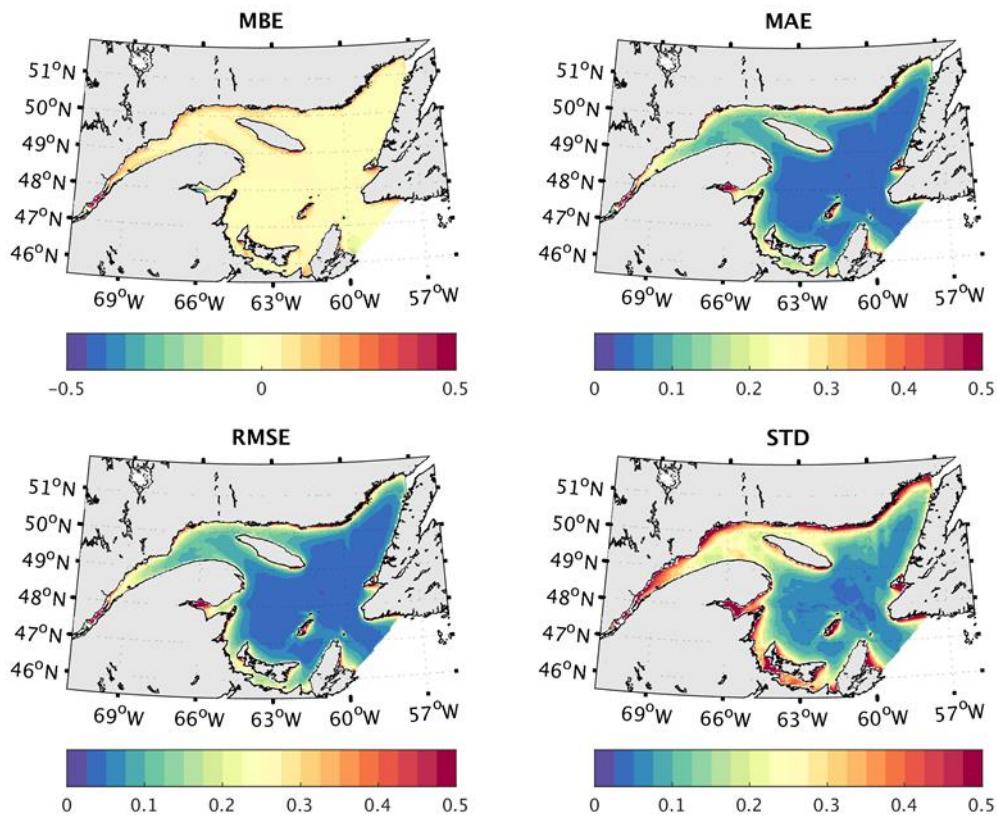


Figure 62 : Représentation spatiale de l'erreur entre les périodes moyennes prédites par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

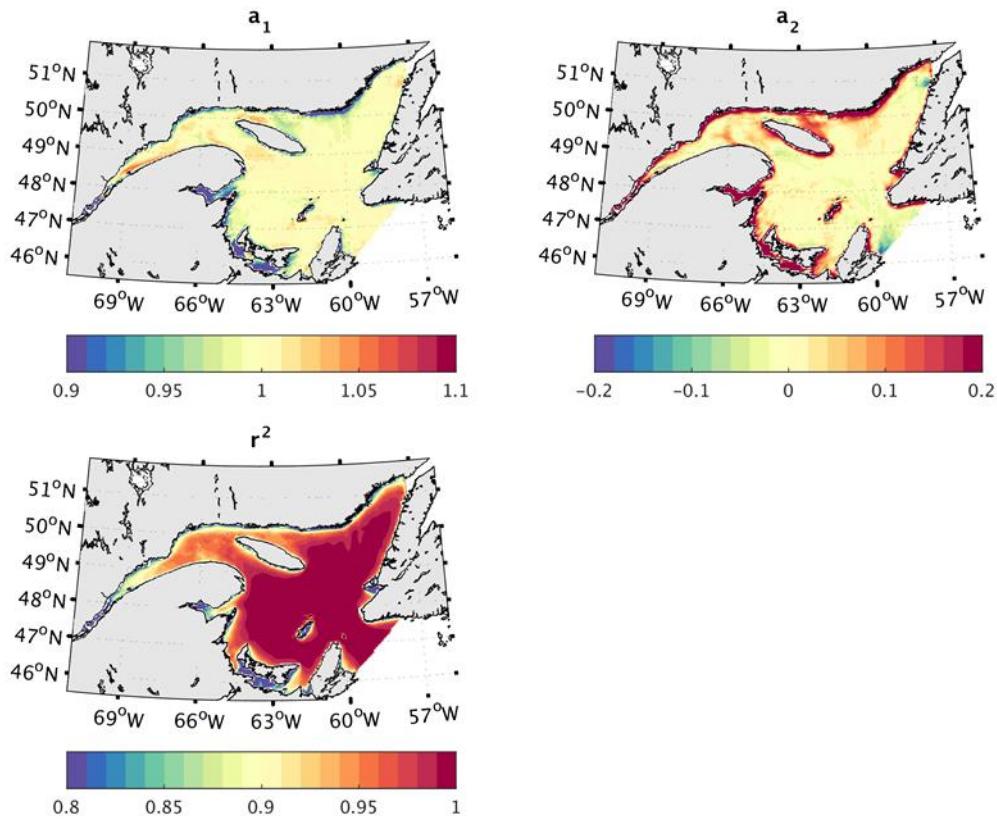


Figure 63 : Représentation des paramètres de régression entre les périodes moyennes prédites par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

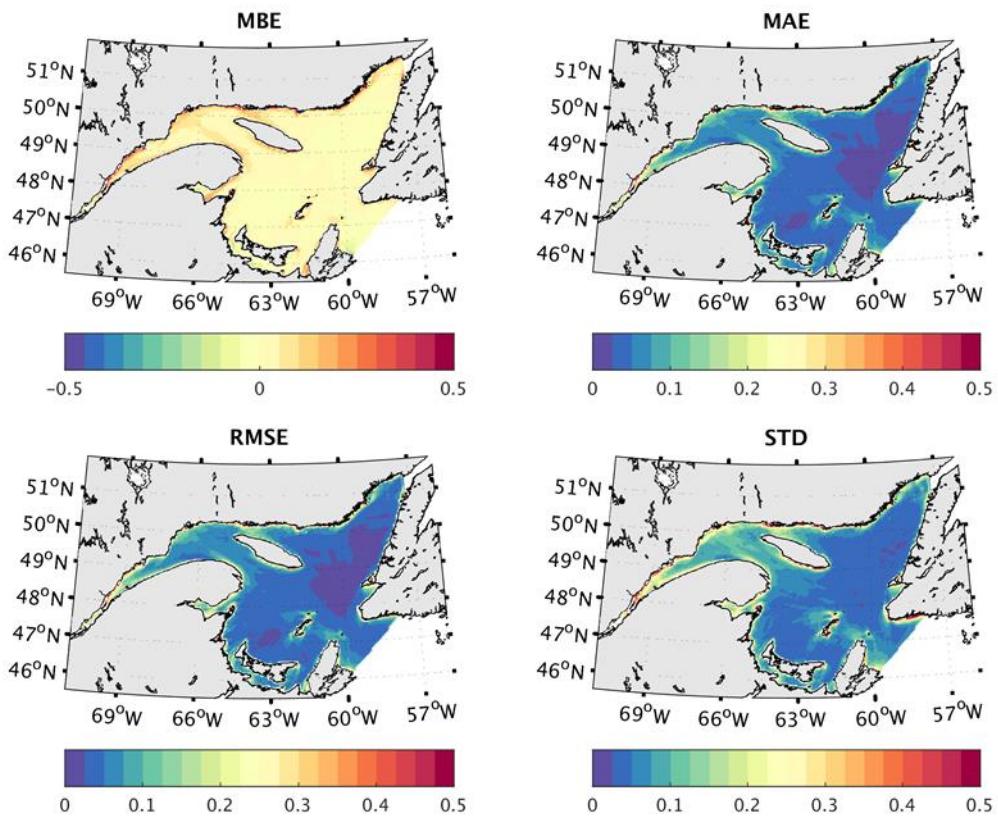


Figure 64 : Représentation spatiale de l'erreur entre les périodes moyennes prédites par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

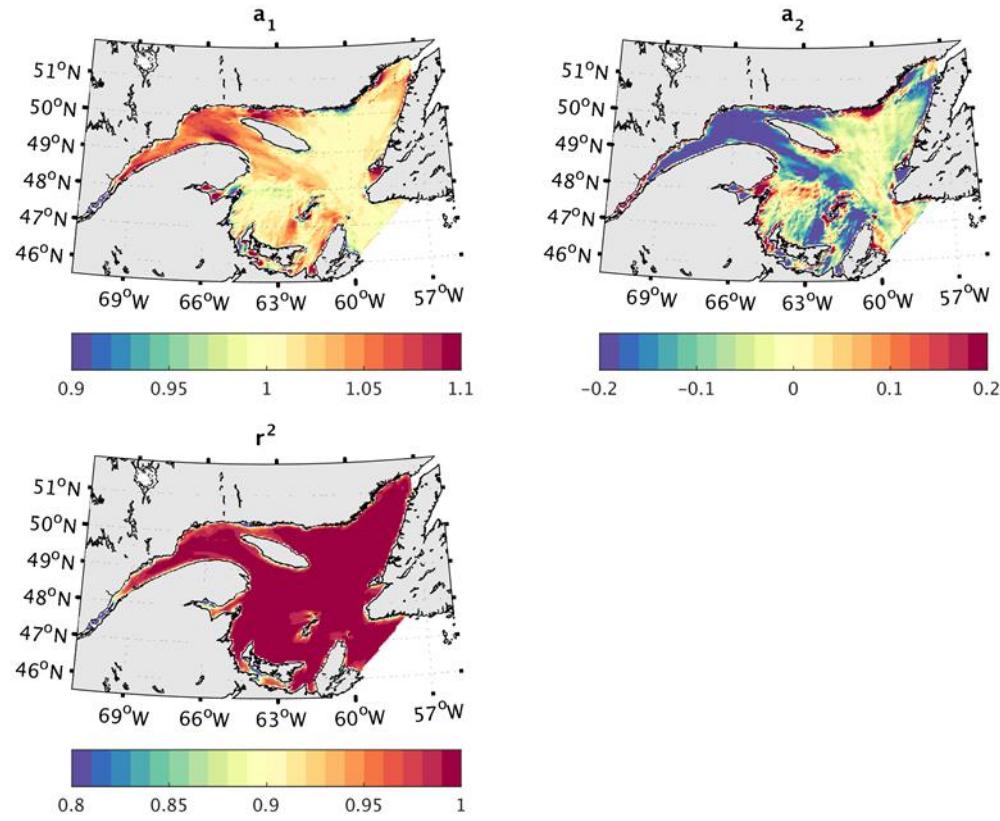


Figure 65 : Représentation spatiale des paramètres de régression entre les périodes moyennes prédites par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

3.4.2.3 Directions moyennes

3.4.2.3.1 Comparaison pour l'ensemble des vagues

Les résultats montrent peu de différences entre les deux simulations au large ($MAE < 5$). En revanche, à mesure que l'on se rapproche de la côte l'erreur devient significative ($10 < MAE < 15$). Ceci se traduit aussi par un coefficient directeur de la droite de régression très proche de 1 au large et fortement négatif ($0.7 < a_1 < 0.8$) le long des côtes. L'ordonnée à l'origine est quant à elle proche de 0 au large, mais relativement élevée (> 20) à la côte. Le coefficient de détermination est proche de 1 au large, mais très faible à la côte (< 0.6). Ceci indique que les directions des vagues à la côte sont moins bien représentées dans le modèle à 5 km.

3.4.2.3.2 Comparaison pour les 10 % des vagues les plus hautes

Les directions des vagues les plus hautes prédites par les deux simulations donnent des résultats très similaires avec des erreurs beaucoup plus faibles que pour l'ensemble des vagues. Les différences à la côte sont plus estompées ($MAE: \sim 5$, $a_1: \sim 0.9$, $a_2: \sim 15$, $r^2: \sim 0.95$).

3.4.2.3.3 Synthèse sur les directions

Les résultats indiquent que les deux simulations représentent aussi bien les vagues les plus hautes, mais que les différences entre les deux sont plus importantes pour l'ensemble des vagues (figure 66 et 67).

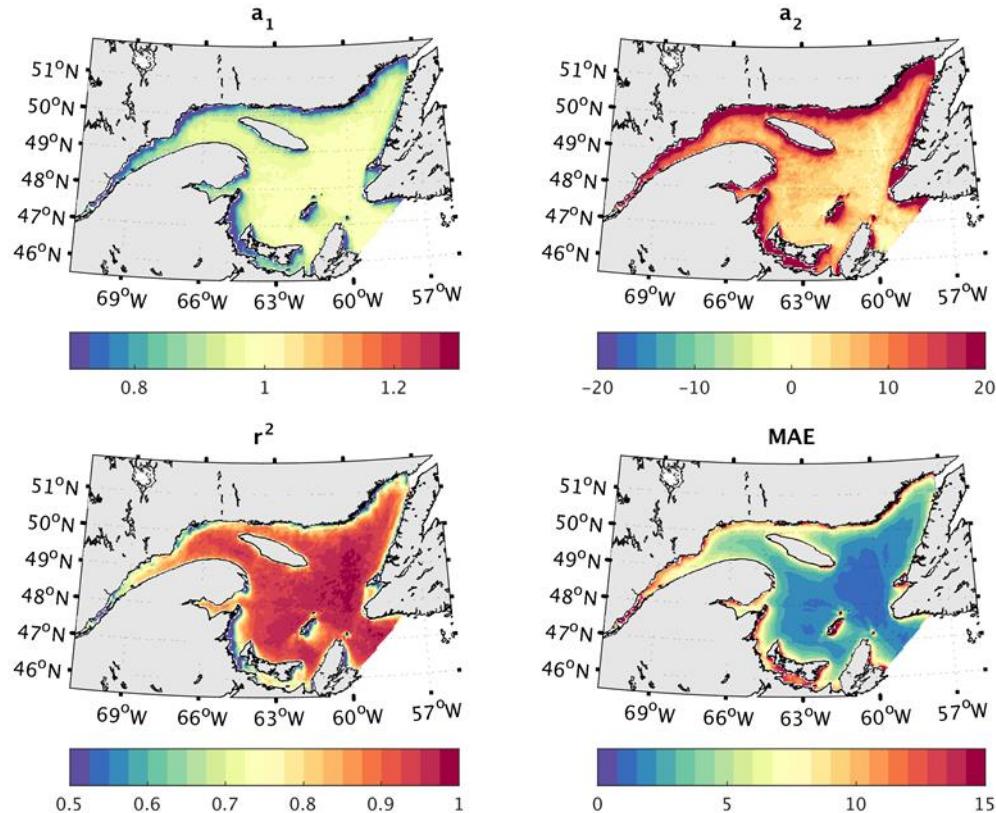


Figure 66 : Représentation spatiale de l'erreur absolue moyenne et des paramètres de régression entre les directions moyennes prédites par WW3-1km et WW3-5km pour toutes les vagues entre le 1er janvier 2010 et le 31 décembre 2010

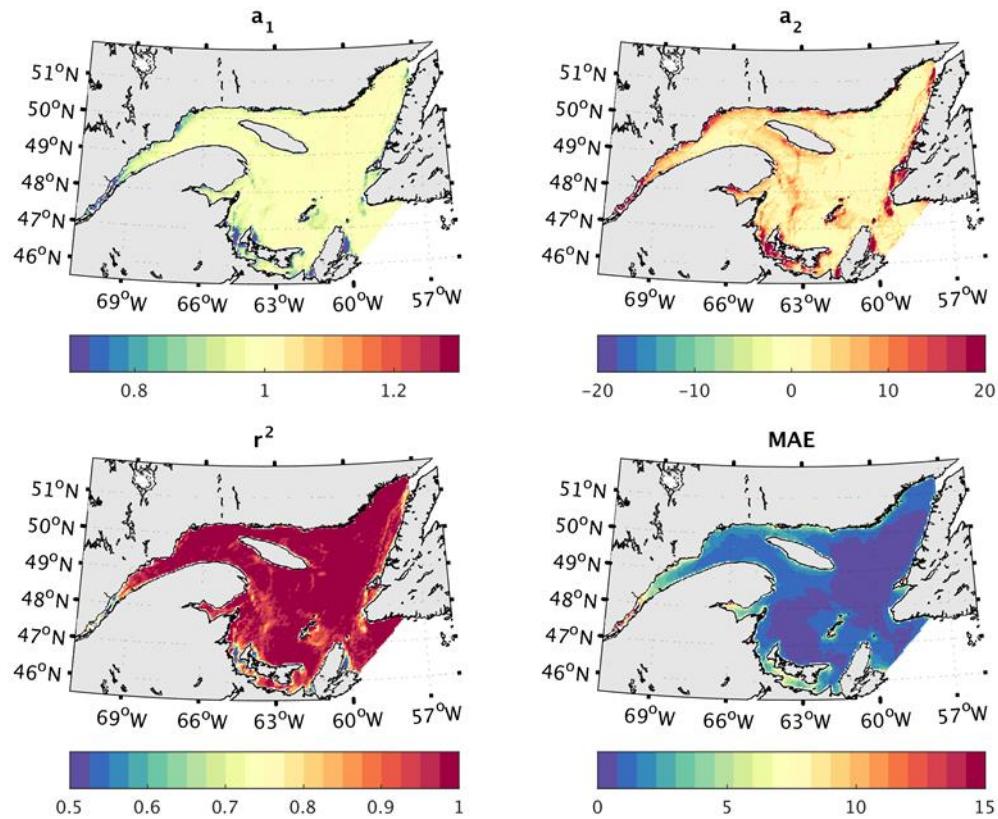


Figure 67 : Représentation spatiale de l'erreur absolue moyenne et des paramètres de régression entre les directions moyennes prédites par WW3-1km et WW3-5km pour les 10 % des vagues les plus fortes entre le 1er janvier 2010 et le 31 décembre 2010.

3.4.3 Intercomparaison forcages MOR-GEM vs MOR-NARR

3.4.3.1 Hauteurs significatives

3.4.3.1.1 Comparaison pour l'ensemble des vagues

L'erreur absolue moyenne ainsi que l'erreur quadratique moyenne sont relativement faibles pour l'ensemble de la région. Toutefois celle-ci est très spatialisée, avec un maximum dans l'estuaire, le long de la côte entre la pointe de Gaspé et l'île du Prince-Édouard ainsi que dans la région entre l'île d'Anticosti et Terre-Neuve ($0.06 < \text{MAE}, \text{RMSE} < 0.08$).

Dans l'estuaire et le long de la côte entre la pointe de Gaspé et l'île du Prince-Édouard, le biais moyen est faiblement négatif (-0.04), ce qui montre que les simulations forcées par NARR ont une tendance à sous-évaluer les hauteurs significatives comparativement aux simulations forcées par GEM. Ces régions sont aussi caractérisées par une dispersion importante de l'erreur autour de la moyenne ($\text{STD} > 0.1$). Les paramètres de la droite de

régression mettent en évidence une très bonne corrélation entre les résultats de NARR et GEM avec un coefficient de détermination très proche de 1 dans le golfe et légèrement plus faible (0.9) dans l'estuaire. Le coefficient directeur de la droite de régression est à certains endroits de l'estuaire faiblement plus grand que 1 (~ 1.05) et faiblement plus petit que 1 à d'autres endroits (~ 0.95). En revanche dans le Golfe, celui-ci est très proche de 1. Quant à l'ordonnée à l'origine, elle est positive dans l'estuaire (~ 0.05) et proche de 0 dans le golfe.

3.4.3.1.2 Comparaison pour les 10 % des vagues les plus hautes

Des patrons identiques sont observables pour les 10 % des vagues les plus hautes avec un biais faiblement négatif (-0.05) dans l'estuaire et un biais beaucoup plus faible dans le golfe. L'erreur absolue moyenne ainsi que l'erreur quadratique moyenne mettent plus en évidence les erreurs dans le golfe notamment dans la région entre l'île d'Anticosti et Terre-Neuve (RMSE, MAE > 0.1). Les paramètres de la droite de régression mettent aussi en évidence des patrons similaires à ceux observés pour l'ensemble des vagues avec des valeurs toutefois plus élevées que précédemment.

3.4.3.1.3 Synthèse sur les hauteurs significatives

Les différences entre les hauteurs significatives prédites par les simulations forcées par GEM et NARR sont très spatialisées. Les maximums de différences se situent principalement dans l'estuaire, le long de la côte entre la pointe de Gaspé jusqu'à l'île du Prince-Édouard ainsi que dans la région du Golfe entre l'île d'Anticosti et Terre-Neuve. La magnitude de ces différences reste toutefois relativement faible avec des erreurs absolue moyenne et quadratiques moyennes de l'ordre de 0.08 m pour l'ensemble des vagues dans les régions citées ci-dessus ainsi que de 0.1 m pour les 10 % des vagues les plus hautes (figure 68 à 71), ce qui est très bon et comparable.

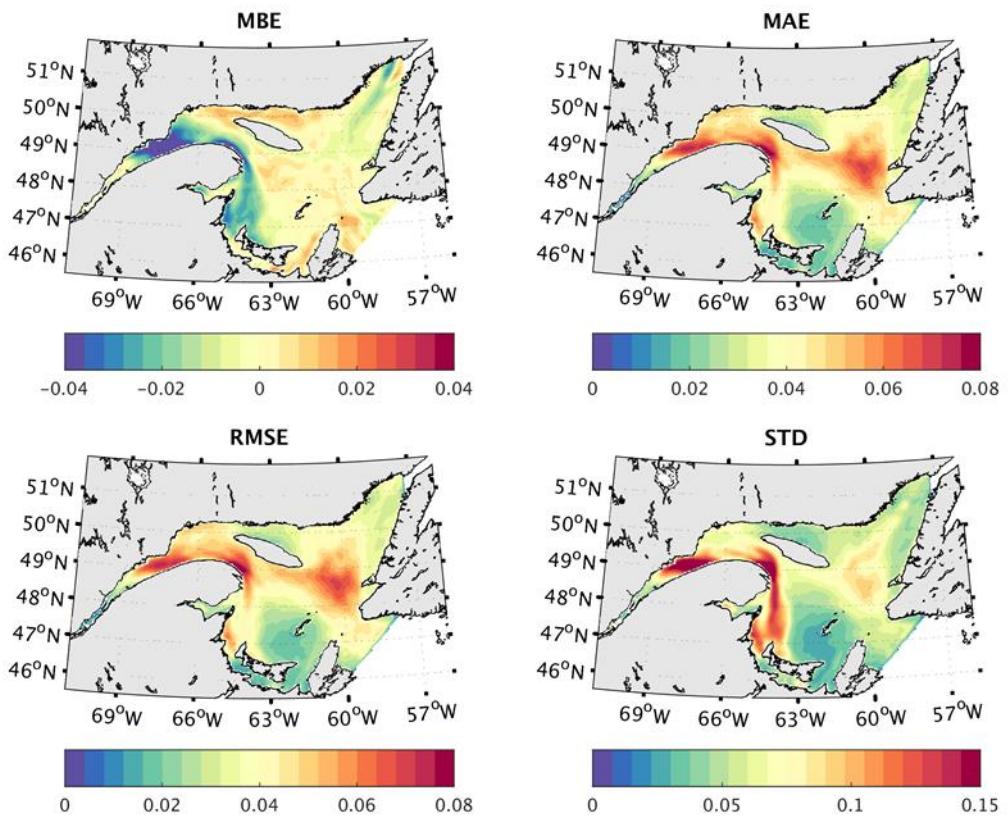


Figure 68 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

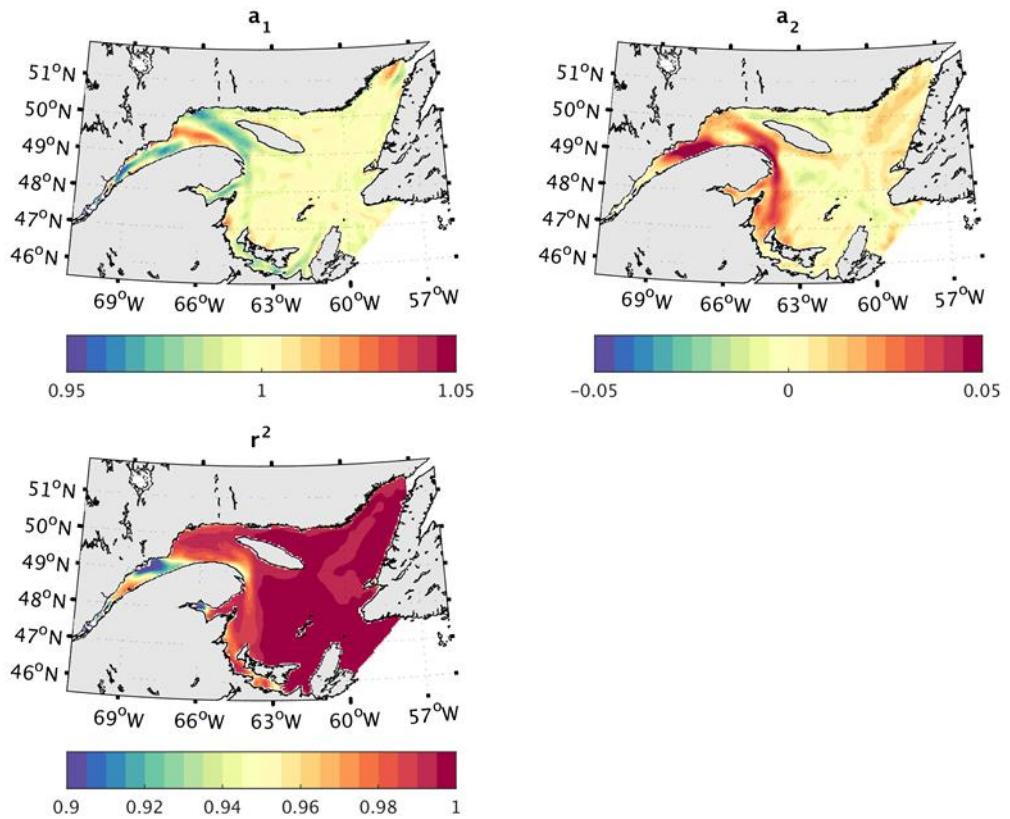


Figure 69 : Représentation spatiale des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

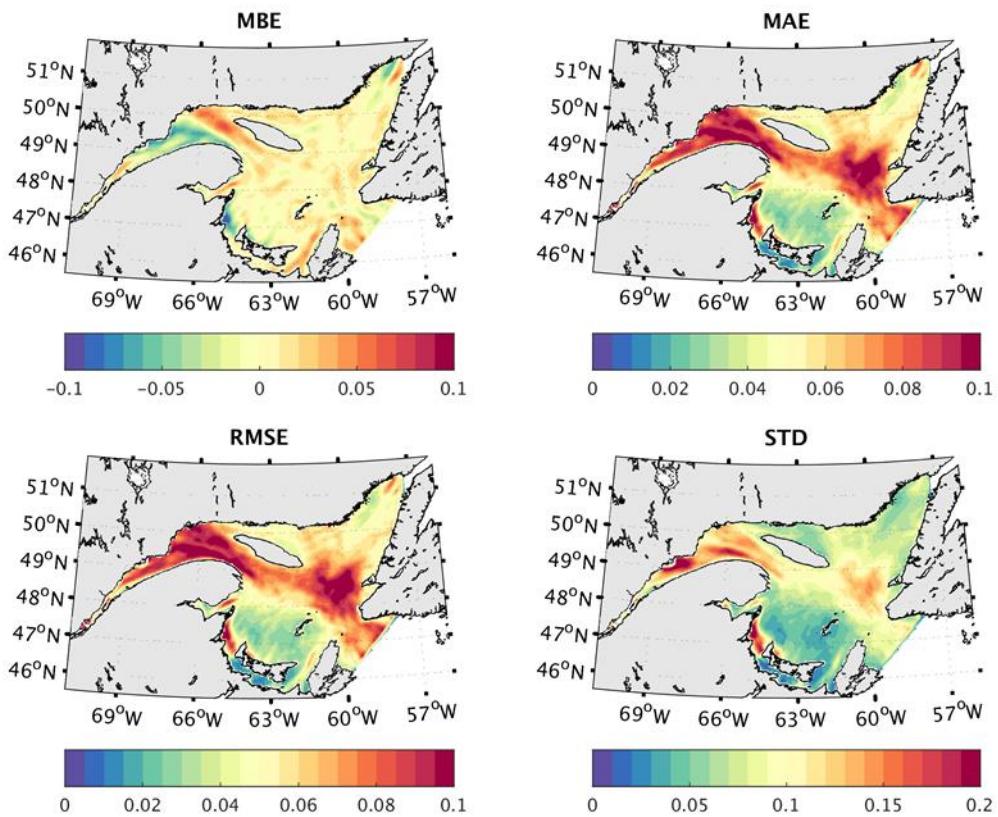


Figure 70 : Représentation spatiale de l'erreur entre les hauteurs significatives prédictes par NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus fortes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

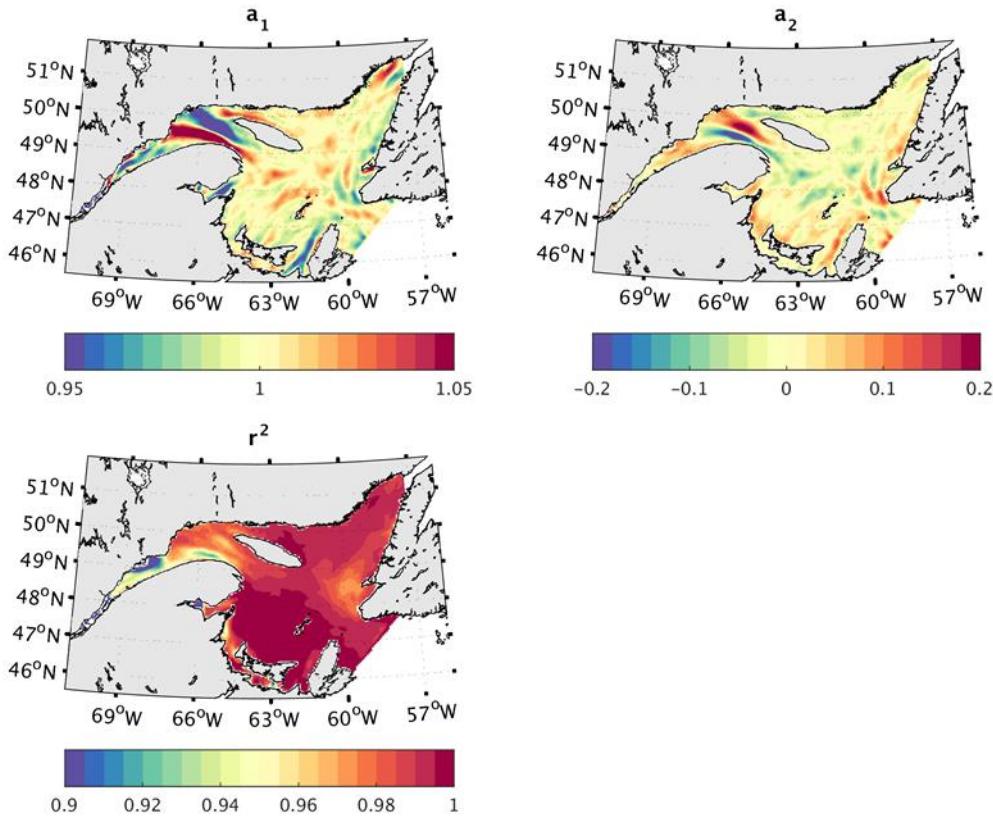


Figure 71 : Représentation spatiale des paramètres de régression entre les hauteurs significatives prédites par NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

3.4.3.2 Périodes moyennes

Comparaison pour l'ensemble des vagues

Les erreurs entre les périodes prédictives par GEM et NARR suivent les mêmes patrons que pour les hauteurs significatives, avec une erreur principalement située dans l'estuaire et le long de la côte entre la pointe de Gaspé et l'île du Prince-Édouard. Toutefois la magnitude de l'erreur est significativement plus importante avec un biais moyen négatif dans l'estuaire (-0.2) qui dénote d'une sous-estimation des périodes dans l'estuaire pour les simulations forcées par NARR comparativement à GEM. L'erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne sont importantes dans l'estuaire (0.5) avec une très grande dispersion autour de la moyenne dans ces zones (STD : ~1). Le coefficient directeur de la droite de régression est de 0.85 dans l'estuaire, et proche de 1 dans le golfe, ce qui montre une tendance à surévaluer les périodes dans l'estuaire pour les simulations forcées par NARR. Le coefficient de détermination est faible (<0.8) dans l'estuaire et proche de 1 dans le golfe.

3.4.3.2.1 Comparaison pour les 10 % des vagues les plus hautes

Les résultats pour les 10 % des vagues les plus hautes montrent beaucoup moins de différences entre GEM et NARR, avec des erreurs divisées de moitié dans l'estuaire (MBE : +/- 0.1, MAE : 0.16, RMSE : 0.16) et sont beaucoup moins dispersées (STD : 0.25). De la même façon, le coefficient de détermination est beaucoup plus élevé dans l'estuaire (>0.95) pour les plus hautes vagues que pour l'ensemble des vagues.

3.4.3.2.2 Synthèse sur les périodes

Les maximums de différence entre les périodes prédictes par les simulations forcées par GEM et NARR sont situés principalement dans l'estuaire et le long de la côte entre la pointe de Gaspé et l'île du Prince-Édouard. La magnitude de l'erreur est forte avec des erreurs absolue et quadratique moyennes de l'ordre de 0.5 seconde dans les régions citées ci-dessus. Toutefois les différences diminuent pour les plus hautes vagues (figure 72 à 75).

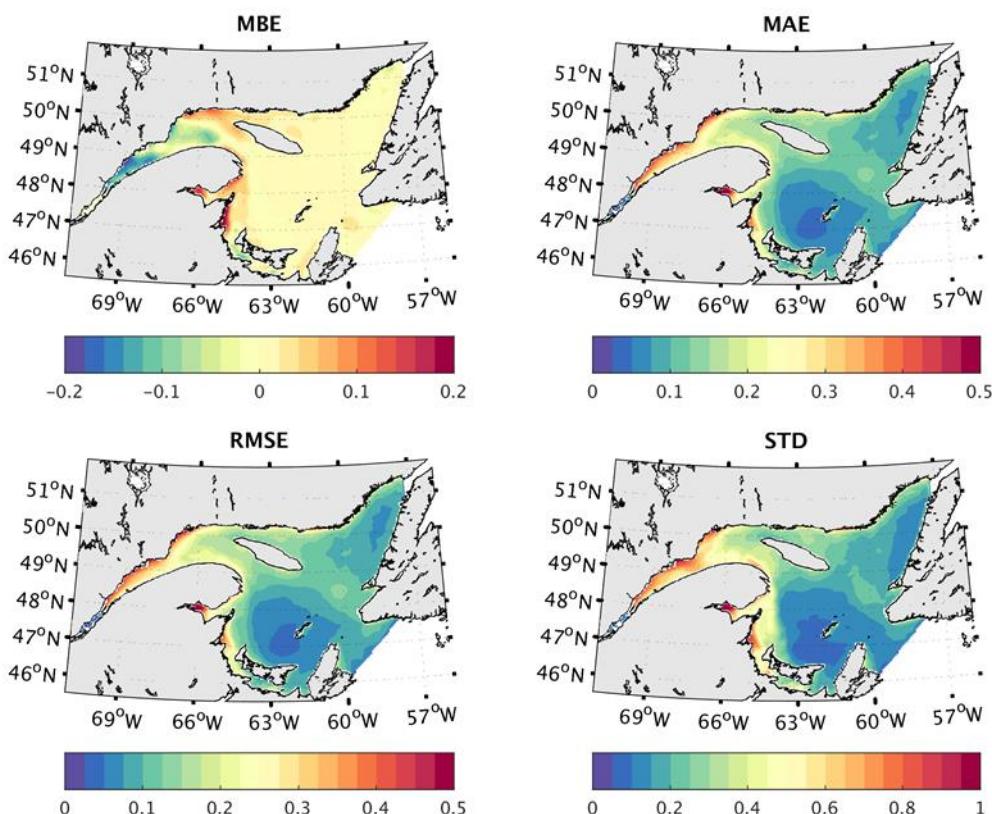


Figure 72 : Représentation spatiale de l'erreur pour les périodes moyennes prédictes avec NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

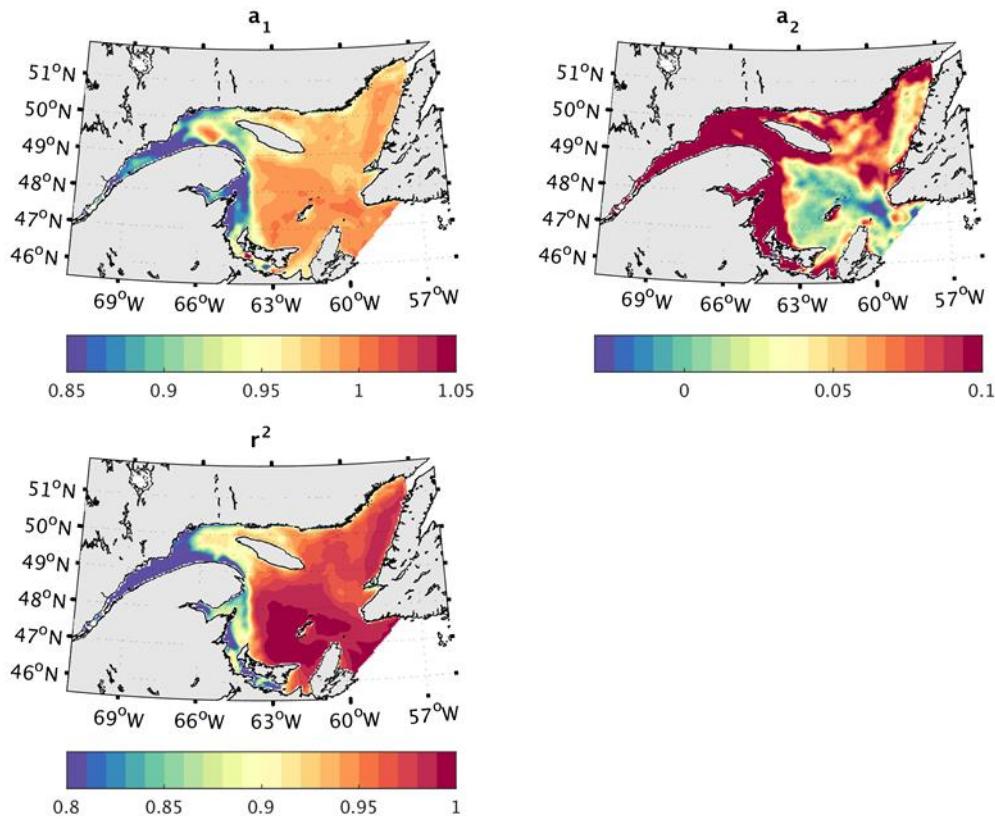


Figure 73 : Représentation spatiale des paramètres de régression pour les périodes moyennes prédites avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

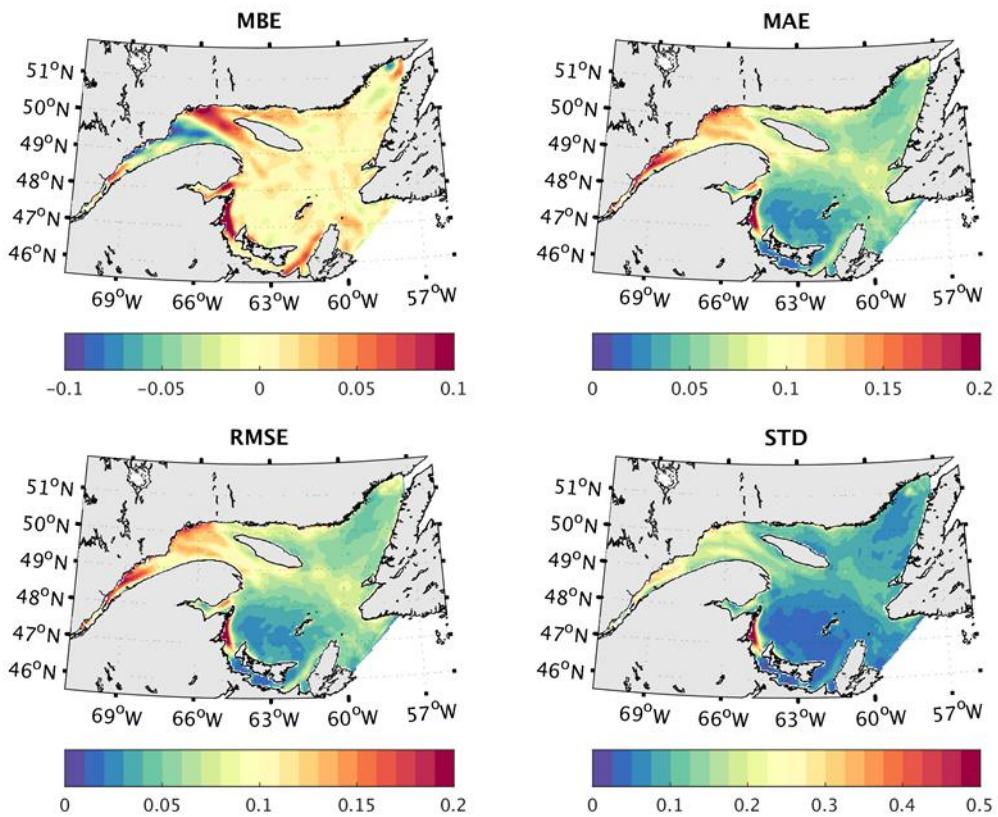


Figure 74 : Représentation spatiale de l'erreur pour les périodes moyennes prédites avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

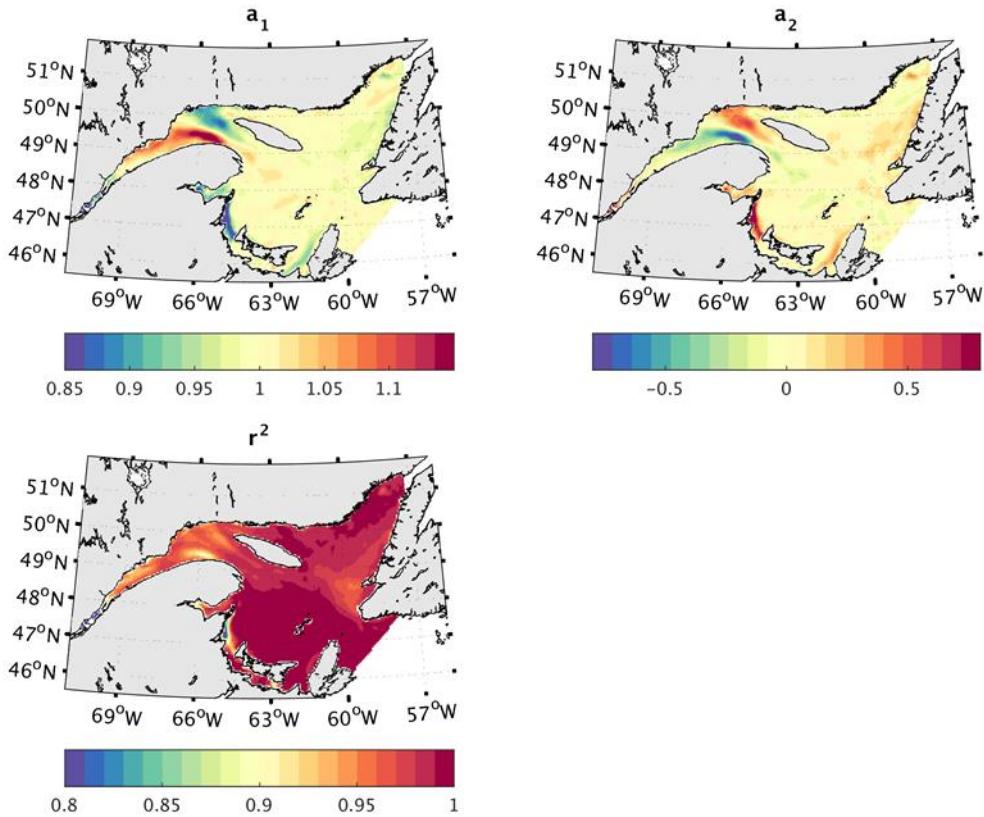


Figure 75 : Représentation spatiale des paramètres de régression pour les périodes moyennes prédites avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

3.4.3.3 Directions moyennes

3.4.3.3.1 Comparaison pour l'ensemble des vagues

Les différences les plus importantes entre les directions prédictes par les deux simulations sont localisées principalement dans l'estuaire, ce qui se caractérise par une erreur absolue moyenne de l'ordre de 10 alors qu'elle est inférieure à 5 dans le golfe. Le coefficient directeur de la droite de régression est relativement faible le long des côtes (<0.9) comparativement au reste du domaine ($0.95 < a_1 < 1$). De même, l'ordonnée à l'origine est élevée le long des côtes (>20) et plus faible au large (<10). La corrélation entre les données est aussi relativement faible le long des côtes avec un coefficient de détermination <0.8 .

3.4.3.3.2 Comparaison pour les 10 % des vagues les plus hautes

Des patrons similaires sont observables pour les 10 % des plus hautes vagues, toutefois les magnitudes des différences sont nettement plus faibles (MAE : <5) dans l'estuaire. La corrélation entre les données et elle aussi beaucoup plus forte avec un coefficient de détermination très proche de 1 sur l'ensemble du domaine.

3.4.3.3.3 Synthèse sur les directions

La corrélation entre les deux simulations est nettement meilleure pour les vagues les plus hautes que pour l'ensemble des vagues. Ceci peut provenir d'une moins bonne représentation de la couverture de glace d'un des deux modèles atmosphériques, qui influencent beaucoup la formation et la propagation des vagues les plus courtes (figure 76 à 77).

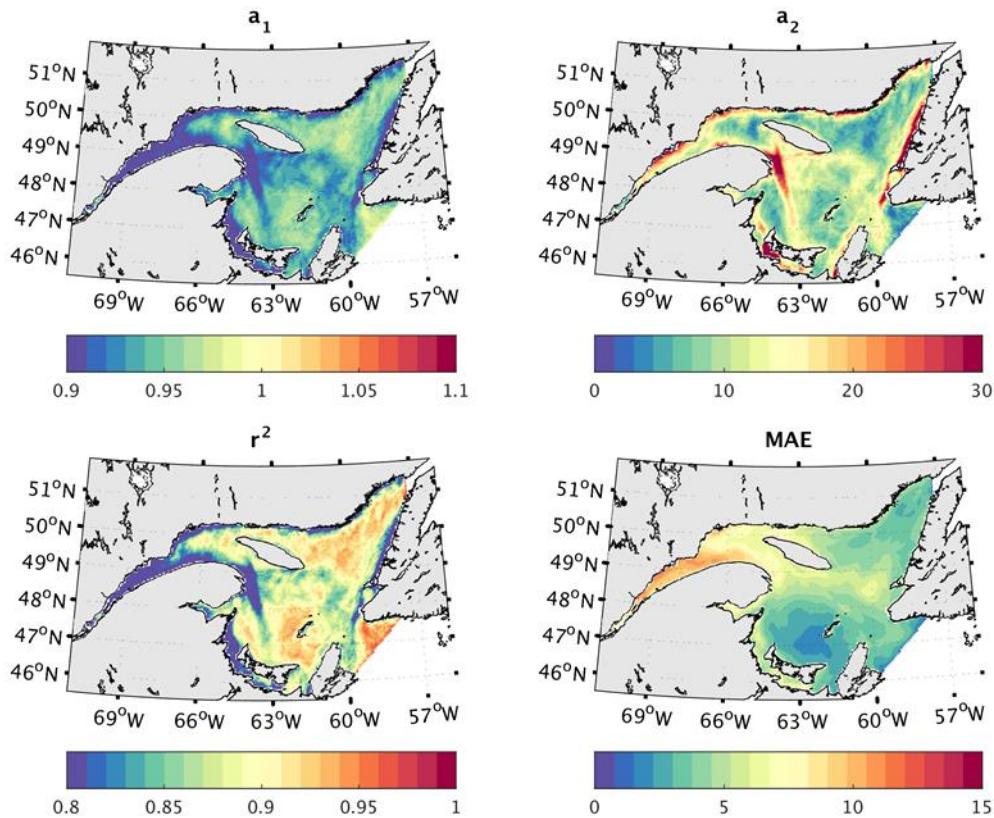


Figure 76 : Représentation spatiale des paramètres de régression et du biais absolu moyen pour les directions moyennes prédites avec NARR et GEM pour toutes les vagues entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

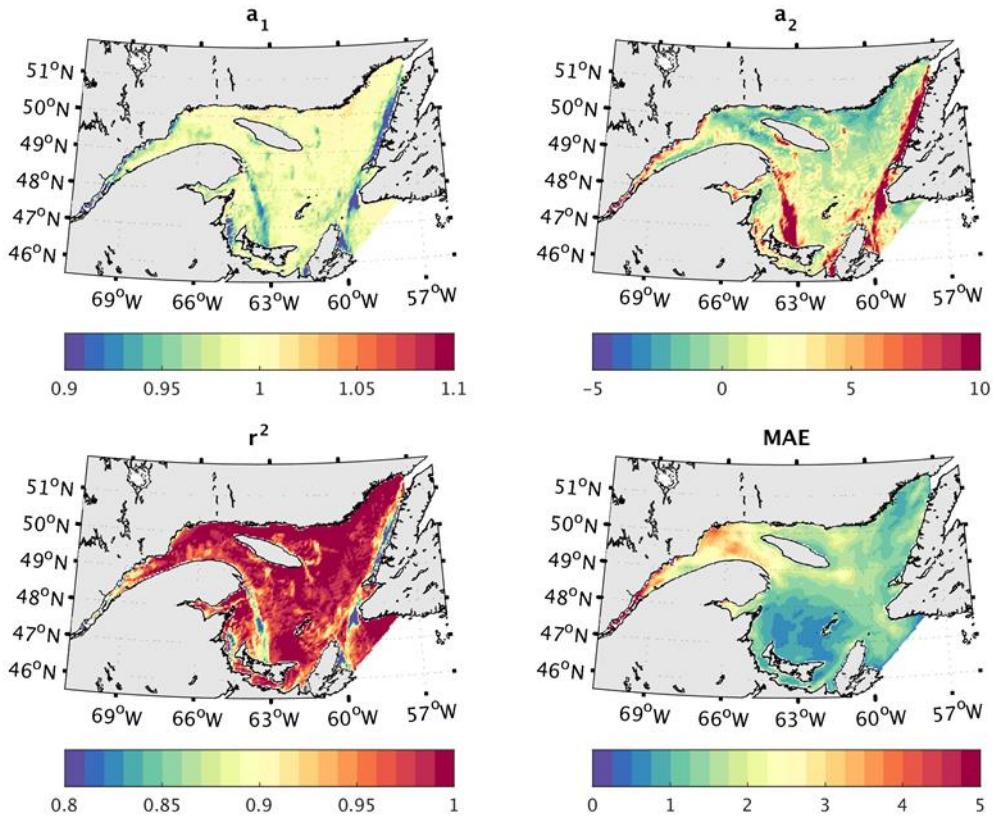


Figure 77 : Représentation spatiale des paramètres de régression et du biais absolu moyen pour les directions moyennes prédites avec NARR et GEM pour les 10 % des vagues les plus hautes entre le 1er janvier et le 31 décembre 2010.

3.5 Conclusion sur la production de la climatologie des vagues et des niveaux d'eau

Hauteurs significatives à la position des instruments : WW3 représente de manière satisfaisante la variabilité temporelle pour tous les sites. Néanmoins, sa performance est nettement meilleure aux sites dans le golfe, malgré une légère sous-estimation systématique des hauteurs significatives. Pour les sites de l'estuaire (Saint-Ulric et Anse au Lard) et de la baie des Chaleurs (Maria), le modèle sous-estime de manière importante les hauteurs. Il est probable que cette limite provienne principalement de la mauvaise représentation des vents dans ces deux régions par CFSR à 45 km, résolution qui n'est pas assez bonne pour appréhender la variabilité du vent dans ces régions d'échelles spatiales réduites.

Périodes moyennes à la position des instruments : de manière générale, WW3 représente bien les périodes moyennes prédominantes (autour de 4-5 secondes), avec tout de même une légère sous-estimation de celles-ci à certains sites. Cette tendance est beaucoup moins spatialisée que pour les hauteurs significatives.

Directions moyennes à la position des instruments : le modèle représente globalement bien les directions moyennes prédominantes des vagues, mais la forte dispersion des erreurs suggère un déphasage occasionnel entre valeurs mesurées et prédictes.

Sensibilité à la résolution : la comparaison directe des simulations avec les données montre peu de différences induites par la résolution de WW3 ; les mêmes biais pour la hauteur significative se retrouvent dans l'estuaire et la baie des Chaleurs et les périodes prédominantes sont aussi bien représentées à 1 km et à 5 km. C'est seulement pour les directions moyennes que la dispersion de l'erreur à 5 km est systématiquement plus importante qu'à 1 km, ce qui laisse supposer une meilleure précision à plus faible résolution. Les directions étant largement influencées par la bathymétrie, particulièrement en milieu côtier, cette observation est cohérente. La comparaison spatiale des deux simulations indique des différences très faibles et principalement localisées au niveau des côtes ou des régions ayant une topographie variant beaucoup (îles, archipels, etc.), ce qui s'explique logiquement par la meilleure résolution de la bathymétrie à 1 km qu'à 5 km.

Sensibilité aux forçages océaniques : les différences entre les simulations alimentées par des forçages issus de NARR ou de GEM sont principalement localisées dans l'estuaire. Les conditions atmosphériques qui influencent l'hydrodynamisme complexe de cette région (courant de Gaspé, gyre d'Anticosti, etc.) peuvent être plus ou moins bien représentées par les modèles atmosphériques. De plus, cette région est aussi couverte de glace plus longtemps durant l'année (l'eau y est plus douce, donc gèle plus facilement), et la différence de représentation de la glace de mer par les modèles atmosphériques a d'importantes conséquences sur la prévision des conditions vagues, notamment en atténuant préférentiellement les vagues courtes, et en limitant la formation locale de vagues. Néanmoins, la magnitude des erreurs liées à la sensibilité aux forçages océaniques est faible par rapport aux erreurs obtenues en comparant les prédictions aux données expérimentales.

4 Déterminer les temps de retour des conditions météo-marines responsables de l'érosion et de la submersion côtière pour la période de 1979 à 2010

4.1 Identification des temps de retour des événements relatés dans les archives

Tout d'abord, l'inventaire des événements de tempête qui ont provoqué des dommages à la côte tant par érosion que par submersion depuis 1960 (Bernatchez *et coll.*, 2012a) a été utilisé pour déterminer les caractéristiques de vagues et de niveau d'eau associés à ces sinistres côtiers à partir des sorties des conditions de vagues modélisées pour la période 1979-2010. Cette analyse avait d'ailleurs été réalisée pour la région du Bas-Saint-Laurent dans le cadre de la phase I de Modesco (Lambert *et coll.*, 2015). Cette démarche est ici légèrement modifiée pour être étendue aux autres régions de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et utilise cette fois-ci les simulations du climat de vagues à une résolution de 1 km pour l'ensemble du domaine EGSL.

4.1.1 Méthodologie

4.1.1.1 Sélection des événements dans les archives et extraction des données météo-marines qui y sont associées

Afin de déterminer les événements météo-marins survenus entre 1960 et 2010, la base de données d'archives sur les événements ayant causé des dommages sur les côtes a été utilisée. Celle-ci compte 392 événements recensés dans l'ensemble du Québec maritime pour la période 1880-2010. Les archives sélectionnées pour l'analyse étaient relatives aux événements où les aléas étaient liés aux vagues, à l'élévation du niveau d'eau et, dans certains cas, aux vents lorsque des dommages aux infrastructures côtières ont été mentionnés.

Pour certains événements, les archives sont multiples puisque plusieurs médias les ont relatés et que ceux-ci ont parfois généré des dommages sur plus d'une localité voire même sur plusieurs régions. Ainsi un même événement a pu être identifié et analysé en plusieurs lieux. Au total, 45 sites ont été sélectionnés en fonction de la proximité de sites côtiers que l'équipe de recherche savait touchés occasionnellement par des événements de tempêtes côtières de même que par les localités relatées dans les archives consultées (figure 78 et tableau 26). Finalement, ce sont 79 événements qui ont été retenus en divers lieux, soit un total de 381 sites/événements.

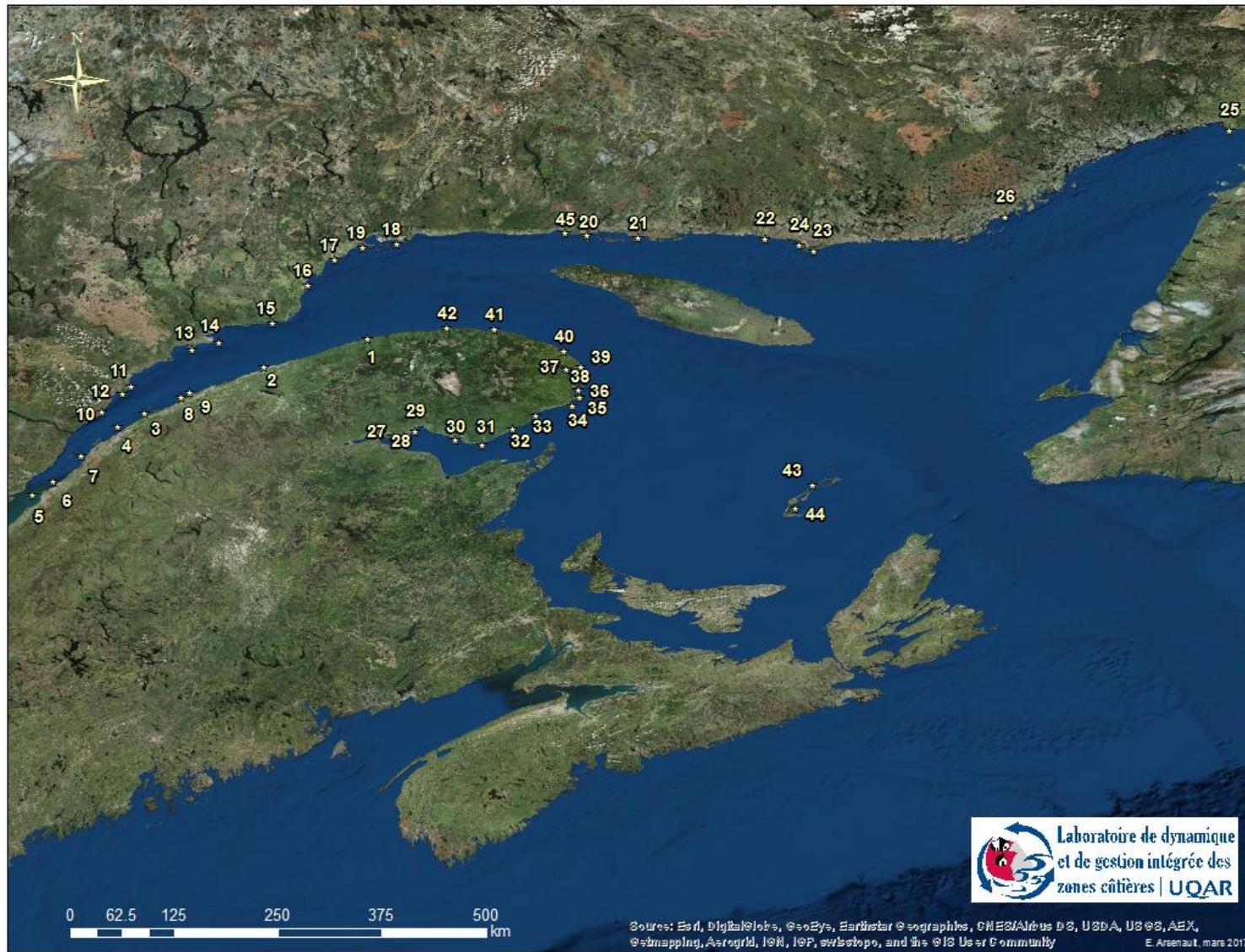


Figure 78 : Localisation des sites

Tableau 26 : Numéros de sites et localité

Localité	No. Site	Localité	No. Site
Sainte-Anne-des-Monts	1	Natashquan	24
Matane	2	Blanc Sablon	25
Rimouski	3	Chevery	26
Trois-Pistoles	4	Carleton	27
La Pocatière	5	Saint-Omer	28
Kamouraska	6	Maria	29
Rivière-du-Loup	7	Saint-Siméon/Bonaventure	30
Saint-Fabien	8	Paspébiac	31
Anse-au-Lard	9	Port-Daniel-Gascons	32
Longue-Rive-Pointe-à-Boisvert	10	Chandler	33
Portneuf-sur-Mer	11	Cap d'Espoir	34
Escoumins	12	Percé	35
Pointe-aux-Outardes	13	Barachois	36
Pointe-Lebel	14	Fond de la Baie de Gaspé	37
Godbout	15	Entrée de la Baie de Gaspé	38
Rivière Pentecôte	16	Cap-des Rosiers	39
Port-Cartier	17	Rivière-au-Renard	40
Sept-Îles-Rivière Moisie	18	Grande-Vallée	41
Sept-Îles-Baie Sainte Marguerite	19	Mont-Louis	42
Longue-Pointe-de-Mingan	20	Pointe-aux-Loups	43
Havre-Saint-Pierre	21	La Martinique	44
Aguanish	22	Rivière Saint-Jean	45
Kégaska	23		

Les différentes données associées à la modélisation des vagues produite dans le cadre du présent projet ont été extraites pour chacun des sites (45) choisis pour l'ensemble de la période 1979-2010. Afin de limiter la déformation des vagues par le fond, les points de vagues étaient situés à une profondeur minimale de 10 m. Aussi, la présence de morphologies sous-marines particulières ou d'îles était évitée autant que possible afin de diminuer le risque d'erreur associée à la réfraction, la réflexion ou la diffraction des vagues. Les variables issues de la modélisation utilisées pour la caractérisation sont : la hauteur significative (H_s), la période (T_{02}) et la direction des vagues (DirVagues). Les données de niveau d'eau de même que de vitesse et de direction des vents (issues de NARR) utilisées en entrée dans le modèle ont également été utilisées pour la caractérisation des événements.

Il faut ici préciser que le niveau d'eau fournie par le modèle est un niveau relatif pour l'ensemble du golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. Par conséquent, les valeurs utilisées ne doivent pas être interprétées comme une élévation par rapport au zéro niveau géodésique ou marégraphique. De plus, le niveau d'eau ici utilisé inclut le niveau astronomique et la surcote associée au vent. Ainsi, la surcote associée à l'effet de baromètre inverse n'a pu être ajoutée au niveau d'eau utilisé malgré les efforts tentés en ce sens.

4.1.1.2 Détermination de la durée des événements

Comme le niveau d'eau n'incluait pas l'effet de baromètre inverse, il a été impossible de déterminer la durée des événements en fonction de la durée de la surcote (barométrique) comme réalisée dans la phase I de ce projet (Lambert et coll. 2015). Ainsi, contrairement à la méthode utilisée lors de Modesco I, la durée des événements a été déterminée à partir des

conditions météo-marines à l'endroit des points de vagues choisis, plutôt qu'à partir des niveaux d'eau et des surcotes observés aux marégraphes.

Par conséquent, la durée des événements a été déterminée visuellement à l'aide de graphique présentant l'évolution de la hauteur significative des vagues et celle du niveau d'eau modélisé au large (NEML), c'est-à-dire le niveau d'eau fournie par les sorties du modèle additionné de la Hs des vagues. Les graphiques présentent la période de tempête (dates) relatée dans les archives à laquelle 5 jours avant et 5 jours après ont été ajoutés (figure 79).

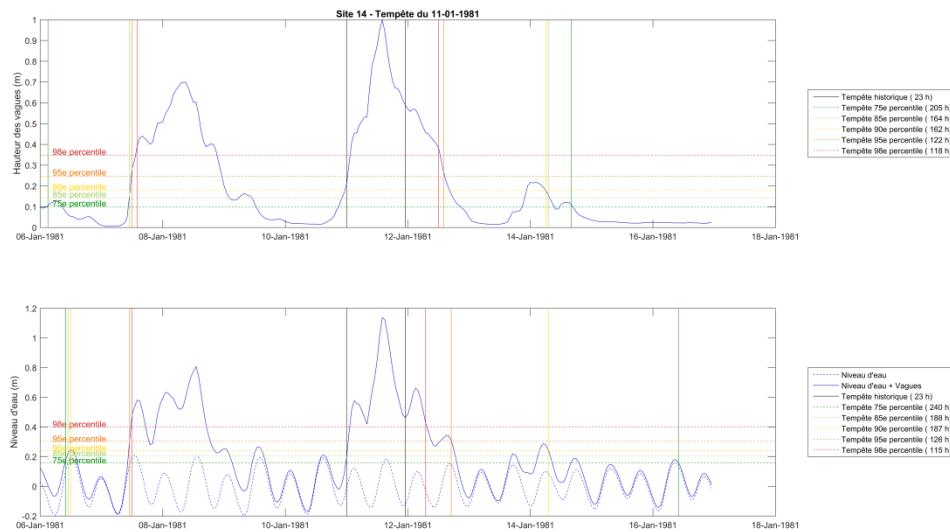


Figure 79 : Exemple de graphique utilisé pour déterminer la durée des événements

L'identification de la durée des événements était basée, dans un premier temps, sur les dates d'événements relatées dans les archives (Tempête historique; trait noir).

Afin de préciser la durée des événements en fonction des conditions météo-marines les plus effectives sur les côtes, d'autres règles de décision ont été appliquées. Le début de l'événement est défini à partir du moment où soit la Hs des vagues ou le NEML des niveaux les plus élevés d'un cycle de marée dépassent le seuil du 95^epercentile. À l'inverse, la fin de l'événement était déterminée à partir du moment où la Hs ou le NEML d'au moins 1 cycle de marée redescendaient sous ce seuil établi (figure 80). Ce seuil a été déterminé à l'aide d'une première observation des graphiques lors d'événements connus des chercheurs et où les dommages à la côte étaient bien documentés (ex. 6 décembre 2010).

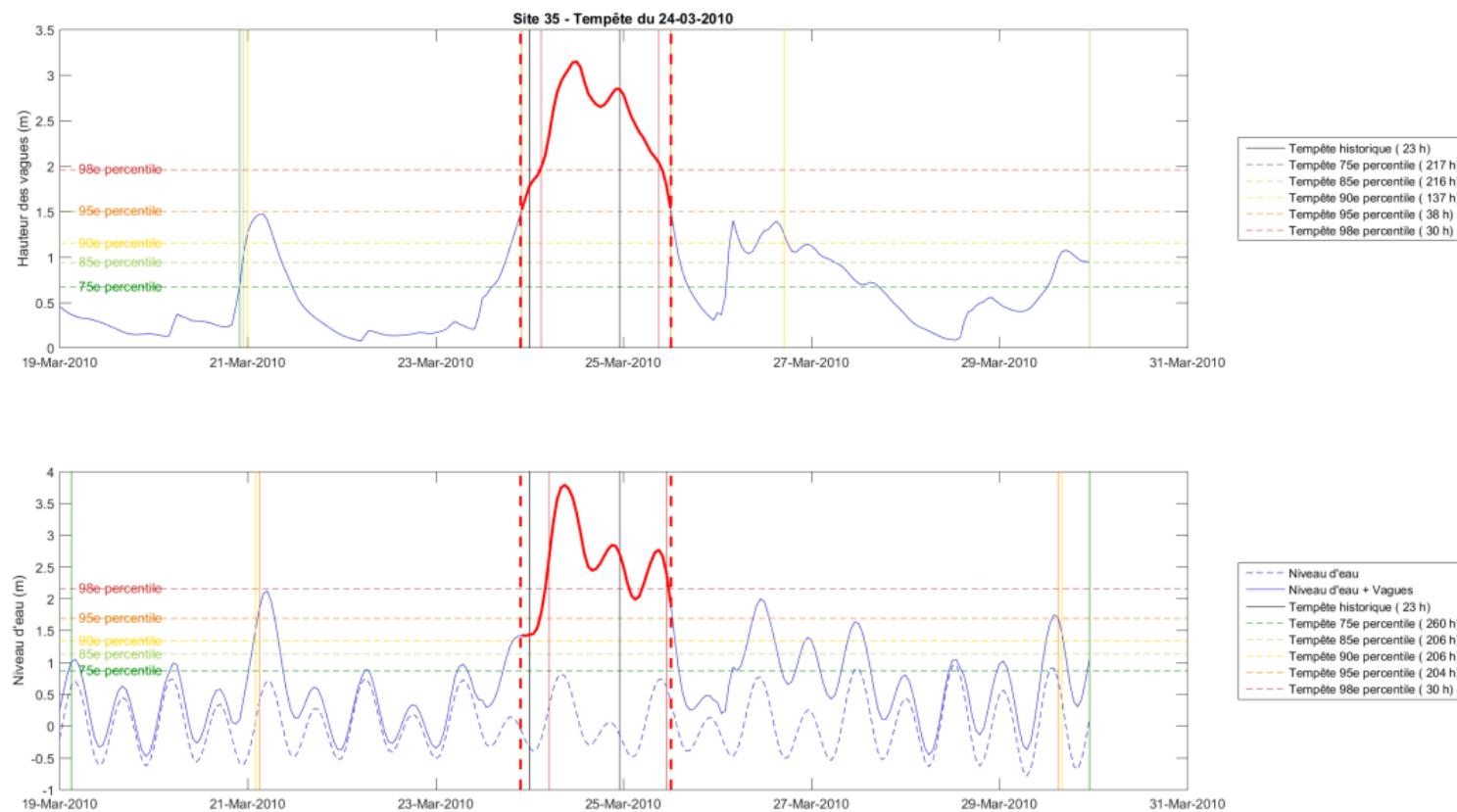


Figure 80 : Délimitation du début et la fin des événements météo-marins en fonction du seuil de 95^epercentile

Dans certains cas, ni les dates relatées dans les archives, ni la Hs des vagues, ni le NEML ne pouvaient donner d'indications sur le début ou la fin de l'événement. Dans ces cas, la période historique, soit les périodes correspondantes aux dates relatées étaient alors sélectionnées. Toutefois si une certaine élévation de la Hs était observée, la période pouvait être légèrement ajustée. Ces événements pourraient alors s'expliquer peut-être par l'ajout de l'effet de baromètre inverse au niveau d'eau analysée (figure 81).

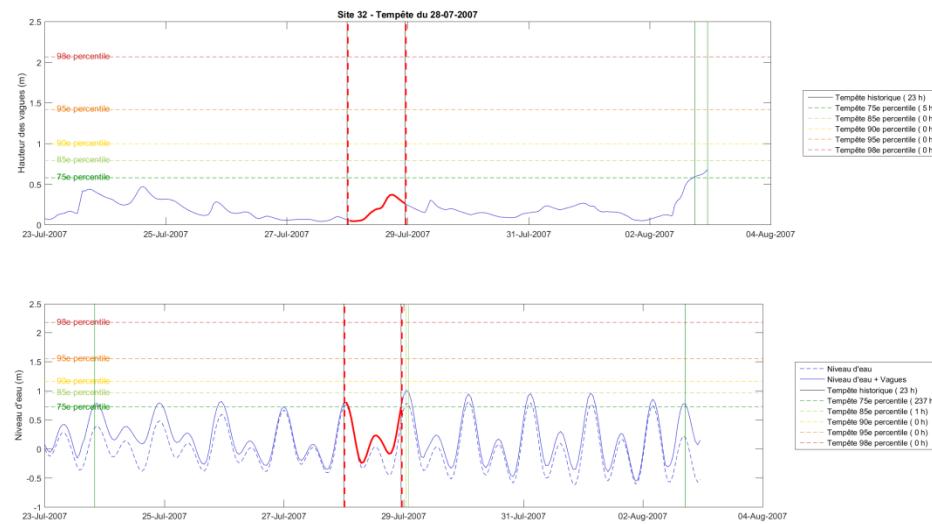


Figure 81 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision

Lorsque deux pointes de Hs ou de NEML étaient observées au-dessus du seuil établi, celle étant la plus près de la période de tempêtes historique était choisie. Lorsque ce premier critère ne pouvait être appliqué, les archives correspondantes étaient consultées pour vérifier si des précisions sur les dates pouvaient être obtenues. Finalement, si cette première vérification ne pouvait préciser la période à choisir, les pointes les plus importantes étaient favorisées et la période sélectionnée sur les sites voisins pouvait être considérée. Par exemple, sur les figure 82 à 85, malgré que plusieurs pointes de vagues et de NEML dépassent le seuil du 95^epercentile, c'est la pointe la plus importante sur les sites 30, 33 et 34 qui a été retenue soit celle correspondant environ au 29 octobre. Par conséquent, sur le graphique du site 31, bien que la pointe du 29 octobre était moins importante que les précédentes, elle a quand même été sélectionnée afin d'analyser le même événement sur tous les sites.

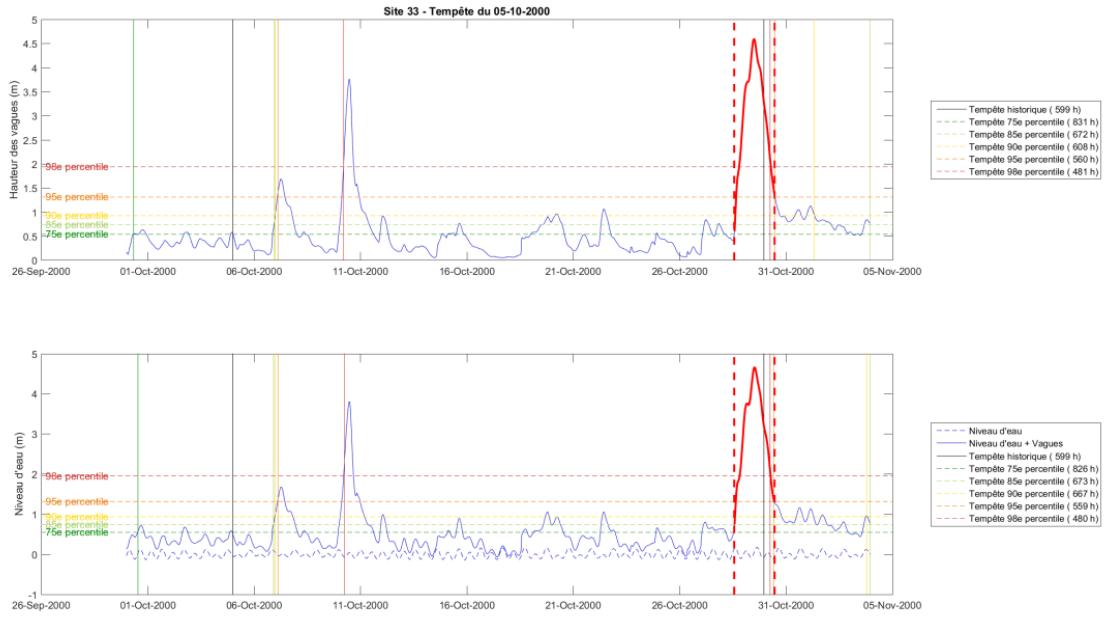


Figure 82 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 33, 2000-10-05)

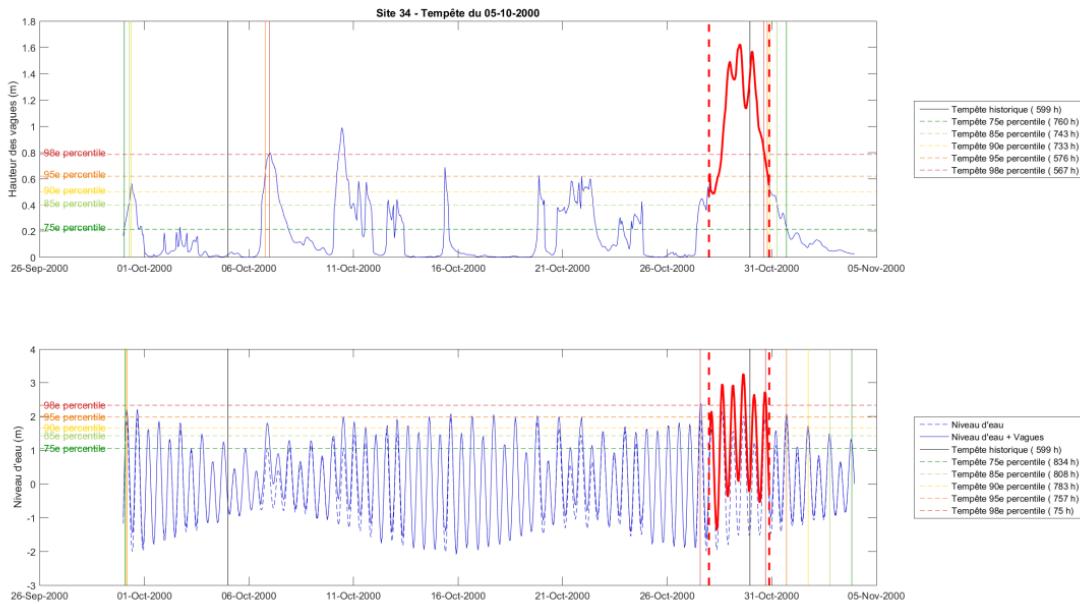


Figure 83 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 34, 2000-10-05)

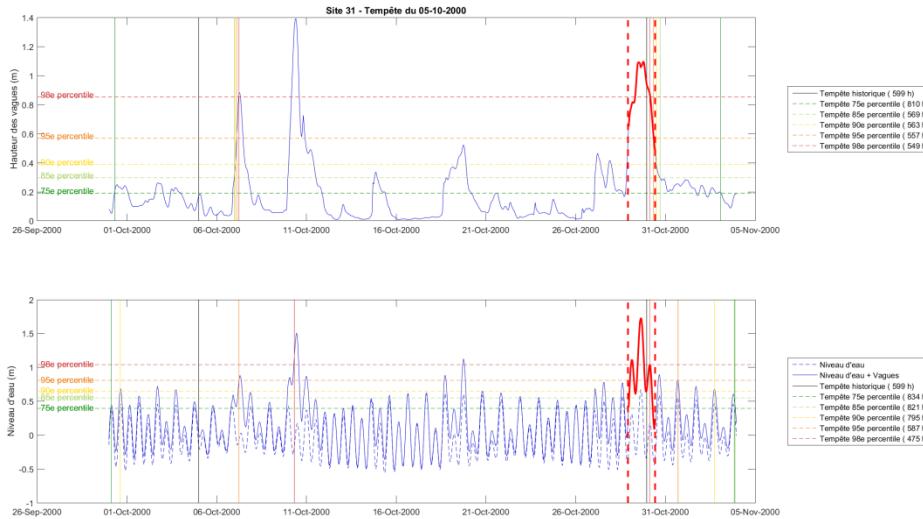


Figure 84 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 31 , 2000-10-05)

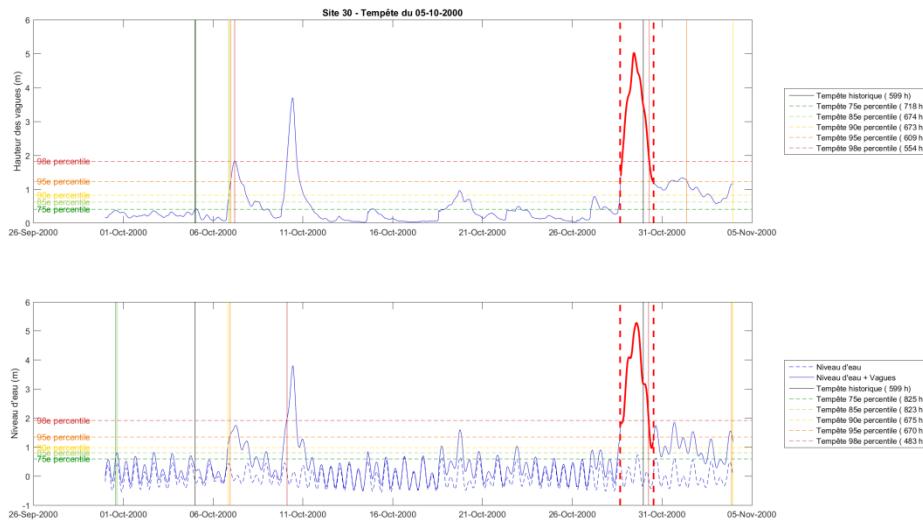


Figure 85 : Définition du début et la fin des événements météo-marins en fonction de valeurs inférieures au seuil de décision (exemple du site 30, 2000-10-05)

4.1.1.3 Extraction des variables maximales pour chacun des sites/événements

Une fois la durée des événements déterminée, les valeurs maximales des différents paramètres ont été identifiées pour chacun d'entre eux, soit pour la hauteur significative (H_s), la période (T_{02}), le niveau d'eau (Niv. eau), le niveau d'eau modélisé au large (NEML) et la vitesse des vents (WS). Rappelons que le niveau d'eau utilisé inclue le niveau astronomique et la surcote par le vent seulement excluant l'effet de baromètre inverse. Par

conséquent, cette particularité s'applique également au NEML, qui est lui, calculé à partir de l'addition du niveau d'eau et de la Hs des vagues.

Il a aussi été possible d'identifier la valeur de chacun des paramètres au moment des maximums enregistrés pour les autres paramètres. Par exemple, le NEML au moment où la Hs était la plus élevée ou la direction des vagues au moment des vitesses maximales de vents, etc.

4.1.1.4 Classification de la direction des vagues

Dans le cas présent, on ne peut encore connaître l'angle d'incidence des vagues directement à la côte. Dans le but d'obtenir un premier portrait du régime directionnel des vagues de tempêtes, la direction des vagues au large au moment du NEML le plus élevé a été évaluée. La direction à ce moment a été choisie puisque c'est le moment où le niveau de l'eau devrait être à son maximum tant au large qu'à la côte et par conséquent être le plus susceptible de causer des dommages côtiers.

Afin de comparer la direction des vagues d'un site à l'autre et d'en faciliter l'interprétation, celles-ci ont été classifiées de 1 à 5 en fonction de l'angle d'incidence par rapport à l'orientation de la côte. L'angle d'incidence des vagues a été déterminé par rapport à des segments rectilignes numérisés sous Arc GIS, sur le fond de carte Basemap de ESRI. Il s'agit d'une droite tracée visuellement, le plus parallèle possible à la côte et dans le même sens que la dérive littorale (interprétée par le LDGIZC, (Drejza et coll., 2014)). Le sens de cette dernière a été interprété visuellement à l'aide de l'image fond de carte d'ESRI pour les sites de Blanc-Sablon et Chevery. Leur longueur est arbitraire et déterminée en fonction du segment de côte potentiellement exposé aux vagues décrit par les données du point de vagues situé à proximité. Les numéros de segments sont les mêmes que les numéros de points associés au point de vagues. Lorsque plusieurs segments ont dû être tracés pour un même site en raison d'un changement de direction de la dérive littorale ou de l'exposition très variable d'un site, ceux-ci portent le numéro du point de vagues complété d'une lettre séquentielle (figure 86). Par conséquent, pour un même site, il est possible d'obtenir plusieurs classes de direction de vagues.



Figure 86 : Numérisation des segments côtiers (orientation de la côte)

À l'aide de l'outil « Add geometry Attribut » (ArcToolbox/Data Management Tools/Features), l'azimut du segment (line Bearing) a pu être évalué. Cet azimut correspond finalement à l'orientation de la côte en fonction du sens de la dérive littorale principale. De plus, la position de l'eau par rapport au segment (gauche ou droite) a été indiquée dans la base de données associée à ces segments.

Par la suite, l'azimut perpendiculaire à la côte a été déterminé en fonction de la position de l'eau (gauche ou droite). Cet azimut perpendiculaire correspond à la position « 0 » d'un spectre directionnel d'exposition de la côte allant de -90° à $+90^\circ$ (figure 87). L'angle d'incidence absolu des vagues a ensuite pu être calculé. Leur direction absolue a finalement été classifiée comme indiqué dans le tableau 27. Ainsi, dans l'exemple de la figure 87, on remarque que pour ce segment côtier, l'incidence des vagues en entrée serait assignée à la classe 3.

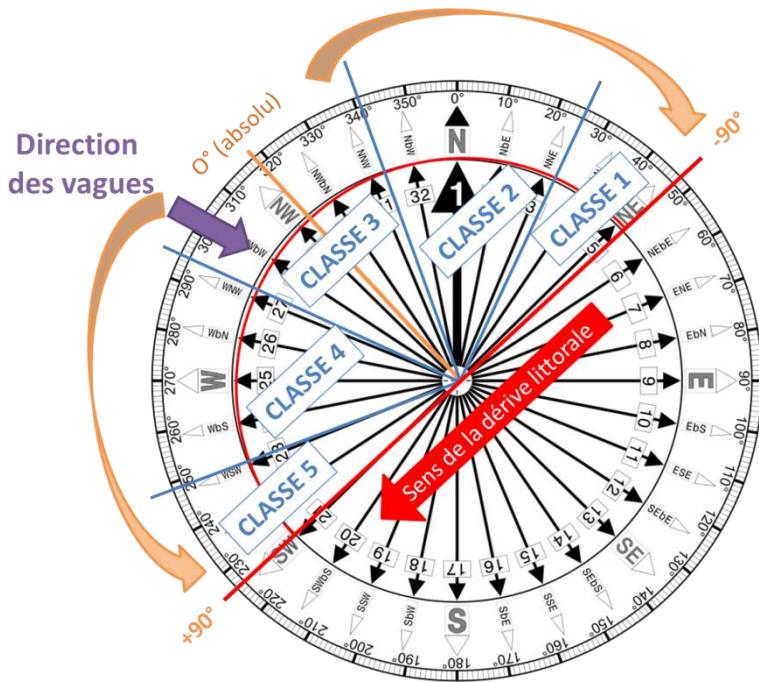


Figure 87 : Schéma montrant un exemple de classification de vagues de direction 303° (NO) sur un segment côtier orienté entre 226° (SO) à 46° (NE) et dont l'angle d'incidence 0° en absolu correspond à 316° (NO).

Tableau 27 : Classification des directions de vagues par rapport à l'orientation de la côte

Classe	Description
1	Vagues parallèles à la côte dans le sens de la dérive
2	Vagues obliques à la côte dans le sens de la dérive
3	Vagues perpendiculaires
4	Vagues obliques à la côte dans le sens INVERSE de la dérive
5	Vagues parallèles à la côte dans le sens INVERSE de la dérive

Cette classification est basée sur la prémissse que l'action des vagues sur le transit littoral augmente entre 0 et 45° et diminue entre 45 et 90° ((Charles et coll., 2012, Falqués et coll. 2011) figure 88). On peut en déduire que leur potentiel d'érosion s'en trouve également accentué lorsque l'angle d'incidente est près de 45°. Ainsi, en fonction de l'azimut des segments côtiers (« Orientation de la côte AVAL dérive »), de la position de l'eau et de la direction des vagues à un moment donné (Date/Heure), l'angle d'incidence absolu des vagues a été calculé et associé à la classe correspondante.

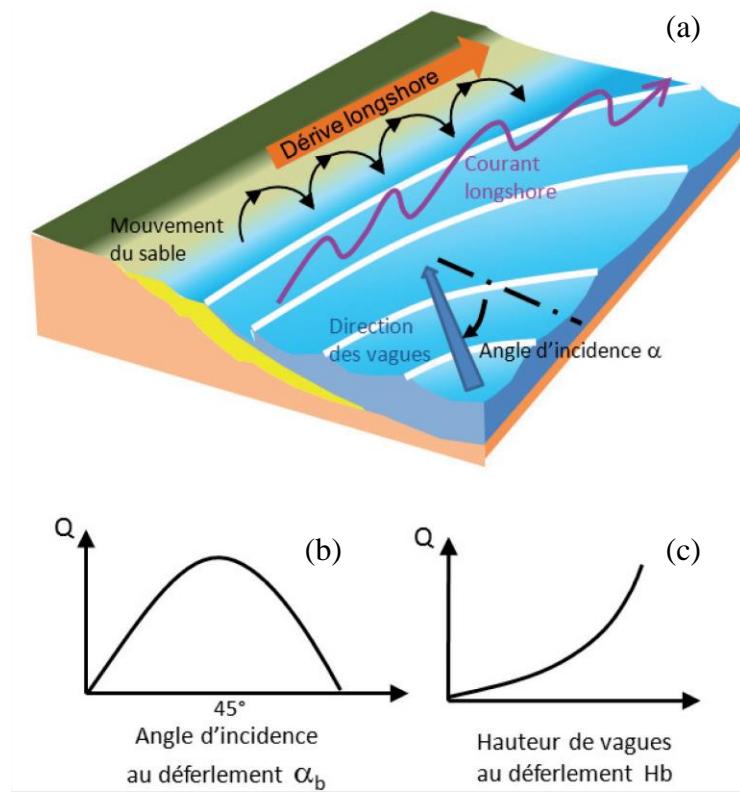


Figure 88 : Adapté de Charles et coll., 2012 : a) Schéma des mécanismes induisant le transport longshore des sédiments*, adapté des schémas du cours d'océanographie physique de The University of Western Ontario ([http : //instruct.uwo.ca](http://instruct.uwo.ca)) (b, c) : schémas traduisant la dépendance des flux de sédiment longshore** Q en fonction de l'angle d'incidence (b) et de la hauteur (c) des vagues au déferlement, respectivement à hauteur et à angles constants.

*Transit sédimentaire longitudinal

**dérive littorale

4.1.1.5 Identification des temps de retour des événements météo-marins pour chacun des sites

Finalement, les temps de retour ont été calculés pour les valeurs maximales des paramètres : Hs, T02, NEML, Niv. eau et WS identifiées lors des événements retenus pour chacun des sites. Pour ce faire, la distribution de Gumbel a été utilisée, dont les paramètres ont été estimés à partir de la méthode des moments (Gumbel, 1958). Cette distribution est largement utilisée pour l'analyse des valeurs extrêmes et des périodes de retour dans le domaine de l'hydrologie, de la météorologie et de l'ingénierie (Tank *et coll.*, 2009).

4.2 Résultats

4.2.1 Identification des événements pour chacun des sites

Les écrits recensés dans les archives faisaient initialement mention de 79 événements correspondant à des aléas de vagues tempêtes ou de forts vents. En fonction des secteurs relatés, les 45 sites choisis auraient pu être affectés 419 fois par des conditions de tempêtes. Toutefois, l'identification des événements effectuée à l'aide des Hs ou du NEML supérieur au 95^e percentile a permis d'identifier un total de 381 événements sur les 45 sites sélectionnés. On observe alors que 9 % des événements ont dû être exclus de la présente étude, mais ont pourtant fait l'objet de mentions journalistiques. Il faut par contre rappeler que la mention d'un tel ou tel secteur peut parfois être généralisée dans ce genre d'écrit. Par exemple, « la côte gaspésienne » peu parfois signifier le long de la péninsule « entre Matane et Mont-Louis » alors qu'une autre fois la même mention peut indiquer « entre Saint-Anne-des-Monts et Bonaventure ».

La répartition du nombre d'événements par site identifié via les Hs ou le NEML est présentée à la figure 89. On remarque qu'ils sont plus nombreux pour les sites situés sur la pointe de la Gaspésie, au fond de la baie des Chaleurs de même qu'au secteur de Rimouski et de Sept-Îles.

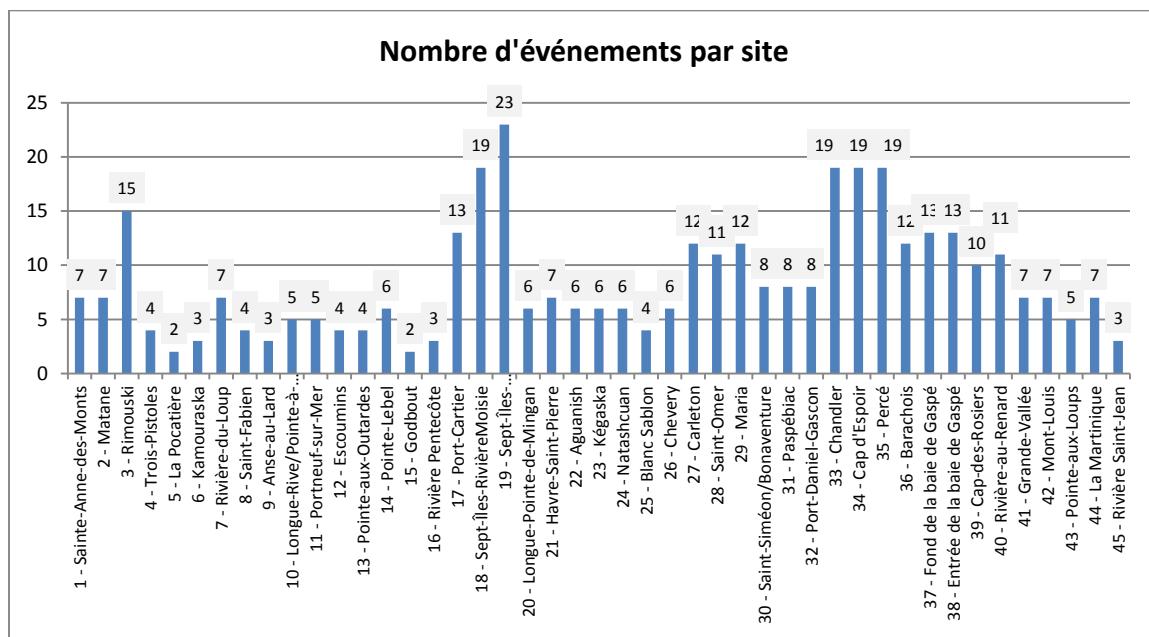


Figure 89 : Nombre d'événements par site identifié à partir des Hs ou du NEML supérieur au 95^e percentile

4.2.2 Variables maximales pour chacun des événements par sites

Pour chaque événement ainsi identifié, les variables maximales ont été retenues pour chacun des paramètres étudiés (Hs, NEML, T02, Niv.Eau et WS), à partir des données issues du modèle. Aussi, le moment où ce maximum s'est produit au cours de ces événements a également été noté pour chacun des sites. Par le fait même, les conditions météo-marines ont été déterminées pour chaque moment où un maximum était identifié pour une ou l'autre des variables. Par exemple, le tableau suivant présente un aperçu des valeurs obtenues pour l'événement du 20 décembre 2010 à Chandler. On peut ainsi savoir qu'au moment où la hauteur significative des vagues était à son maximum (2,73 m à 11 h le 21 décembre 2010), la période était de 9 s, la direction des vagues était de 103° (~Est-Sud-Est), le niveau d'eau modélisé au large était de 3,03 m alors que les vents étaient du Nord-Est (35°) et soufflaient à une vitesse de 57 km/h.

Tableau 28 : Aperçu des valeurs maximales des différents paramètres de même que la valeur des autres paramètres au moment des maximums

Début	2010-12-20 14 h							
Fin	2010-12-23 21 h							
Durée (h)	204							
Variable max	Heure	Hs (m)	T02 (s)	Dir Vagues (°)	Niv. eau (m)	NEML (m)	WS (km/h)	WD (°)
Hs max	2010-12-21 11 h	2,73	9	103	0,30	3,03	57	35
Niv. eau max	2010-12-23 16 h	1,39	8	100	0,70	2,09	43,2	7
NEML max	2010-12-21 14 h	2,69	9	106	0,70	3,38	57	33
T02 max	2010-12-22 1 h	2,49	10	104	0,14	2,63	50,4	23
WS max	2010-12-21 14 h	2,69	9	106	0,70	3,38	57	33

xx Valeur maximale

4.2.3 Identification des temps de retour des événements météo-marins pour chacun des sites

À partir des valeurs maximales retenues pour chacun des événements/sites, les temps de retour ont été calculés pour les paramètres : Hs, T02, Niv. eau, NEML et WS. Ainsi, pour chacun des sites, l'annexe A présente le numéro d'événement et la date de début de la période d'analyse suivit des valeurs maximales de chacun des paramètres analysés durant l'événement et le temps de retour associé à cette valeur. Une attention particulière a été portée aux événements dont le temps de retour était \geq à 10 ans (cases grises dans les tableaux de l'annexe A) pour au moins un des paramètres.

Ceci permet entre autres de voir que pour l'ensemble des paramètres analysés, NEML est le paramètre qui présente le plus souvent des temps de retour \geq à 10 ans (31) ou même \geq à 5 ans (58). Les événements dont les temps de retour sont \geq à 2 ans sont quant à eux caractérisés à la fois par des NEML (112) plus importants de même que par la Hs (97).

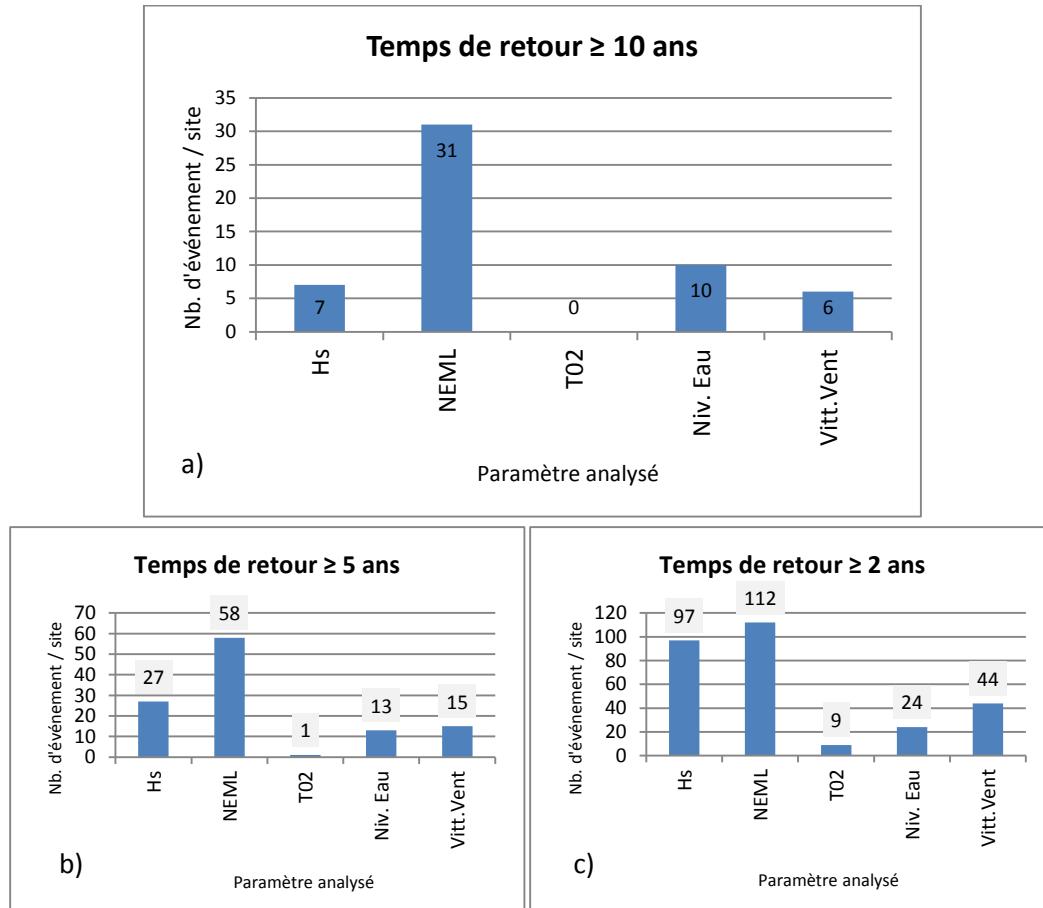


Figure 90 : Nombre d'événements ayant un temps de retour supérieur aux seuils établis a) \geq à 10 ans; b) \geq à 5 ans; c) \geq à 2 ans

Plus spécifiquement, le tableau 29 montre que la Hs des vagues a atteint un temps de retour \geq à 10 ans lors de 4 événements (octobre 1980, décembre 2008, de même que janvier et décembre 2010) sur 7 sites différents. Ces derniers sont surtout situés sur la pointe de la Gaspésie et la baie des Chaleurs de même qu'à La Martinique (Îles-de-la-Madeleine) lors de la tempête de décembre 2008.

Bien que l'on puisse penser que les sinistres côtiers coïncident généralement avec des niveaux d'eau astronomiques particulièrement élevés, les temps de retour pour ce paramètre sont \geq à 10 ans pour seulement 3 événements. On observe que les niveaux d'eau ont été particulièrement élevés pour les sites situés à la pointe de la Gaspésie lors des

événements de juin 1991 et de la fin de décembre 2010. Les temps de retour étaient aussi \geq à 10 ans sur les secteurs de l'est de la Côte-Nord et dans la baie des Chaleurs au début décembre 2010. Ce dernier événement, notons-le, a particulièrement endommagé les côtes de la rive sud de l'estuaire. Il faut noter que le temps de retour le plus important (132,1 ans) est survenu à Percé à la fin de décembre 2010 alors que le niveau de l'eau a atteint 1,1 m.

L'addition de ces deux derniers paramètres utilisée pour établir le NEML semble lui caractériser davantage les sinistres côtiers recensés. En effet, 9 événements ont généré des NEML dont le temps de retour était \geq à 10 ans sur 24 sites différents. Les sites sont répartis sur l'ensemble du territoire à l'étude.

Finalement, la vitesse des vents s'est avérée particulièrement élevée, soit ayant des temps de retour \geq à 10 ans, lors de 3 événements. Notamment, celui de janvier 1981, à Havre-Saint-Pierre, celui de janvier 1996 à Gaspé (entrée et fond de la baie) et celui de décembre 2008 sur la partie sud de la pointe Gaspésienne.

Tableau 29 : Répartition par sites des événements dont le temps de retour est \geq à 10 ans pour un ou plusieurs paramètres

Nom du site	No. du site	Date du début de l'événement	No. d'événement	Hauteur significative de vagues maximale (Hs Max) (m)	Temps de retour de la Hs-Max (\geq à 10 ans)
Percé	35	1980-10-26	6	3.4	12.4
Fond de la baie de Gaspé	37	1980-10-26	6	2.7	11.7
Port-Daniel-Gascon	32	2008-12-21	69	4.1	14.5
La Martinique	44	2010-01-02	73	3.62	12.8
Chandler	33	2010-12-12	77	4.5	10.8
Cap d'Espoir	34	2010-12-12	77	4.5	10.8
Barachois	36	2010-12-13	77	5.3	12.2
Nom du site	No. du site	Date du début de l'événement	No. d'événement	Niveau d'eau maximal (Niv. Eau Max) (m)	Temps de retour du Niv. eau — Max (\geq à 10 ans)
Barachois	36	1991-06-13	24	1.0	25.4
Fond de la baie de Gaspé	37	1991-06-13	24	1.0	10.7
Entrée de la baie de Gaspé	38	1991-06-13	24	1.1	18.1
Longue-Pointe-de-Mingan	20	2010-12-01	76	1.1	11.2
Havre-Saint-Pierre	21	2010-12-01	76	0.3	14.3
Saint-Omer	28	2010-12-01	76	1.0	10.1
Chandler	33	2010-12-20	79	0.7	56.3
Cap d'Espoir	34	2010-12-20	79	0.7	56.3
Percé	35	2010-12-20	79	1.1	132.1
Nom du site	No. du site	Date du début de l'événement	No. d'événement	Vitesse de vent maximale (WS-Max) (km/h)	Temps de retour de la WS-Max (\geq à 10 ans)
Havre-Saint-Pierre	21	1981-01-11	7	64	10.5
Fond de la baie de Gaspé	37	1996-01-27	34	65	42.7
Entrée de la baie de Gaspé	38	1996-01-28	34	72	38.0
Port-Daniel-Gascon	32	2008-12-21	69	76	29.3
Chandler	33	2008-12-21	69	74	21.8
Cap d'Espoir	34	2008-12-21	69	74	21.8

Nom du site	No. du site	Date du début de l'événement	No. d'événement	Niveau d'eau modélisé au large maximal (NEML-Max) (m)	Temps de retour du NEML-Max (\geq à 10 ans)
Havre-Saint-Pierre	21	1981-01-11	7	1.1	10.6
Carleton	27	1996-12-07	36	3.1	15.3
Saint-Omer	28	1996-12-07	36	2.5	19.6
Maria	29	1996-12-07	36	2.1	14.1
Carleton	27	1999-10-22	43	3.1	16.1
Saint-Omer	28	1999-10-22	43	2.4	14.5
Port-Daniel-Gascon	32	2000-10-28	47	4.4	13.6
Carleton	27	2003-10-15	50	3.1	14.9
Saint-Omer	28	2003-10-15	50	2.4	14.1
Port-Cartier	17	2004-10-15	53	4.9	10.6
Sept-Îles/Rivière Moisie	18	2004-10-15	53	5.2	13.6
Sept-Îles/Baie-Sainte-Marguerite	19	2004-10-15	53	4.6	16.1
Pointe-Lebel	14	2005-12-02	60	4.7	11.3
Matane	2	2010-12-04	76	4.3	17.5
Rimouski	3	2010-12-04	76	4.2	37.9
Trois-Pistoles	4	2010-12-04	76	4.1	39.8
Anse au Lard	9	2010-12-06	76	4.4	39.5
Longue-Rive/Pointe-à-Boisvert	10	2010-12-06	76	3.8	41.6
Portneuf-sur-Mer	11	2010-12-04	76	4.4	27.6
Escoumins	12	2010-12-02	76	3.8	47.7
Pointe-aux-Outardes	13	2010-12-04	76	4.4	75.0
Pointe-Lebel	14	2010-12-04	76	5.1	30.9
Godbout	15	2010-12-04	76	4.4	67.8
Carleton	27	2010-12-01	76	3.2	18.5
Saint-Omer	28	2010-12-01	76	2.4	13.3
Chandler	33	2010-12-12	77	4.7	12.7
Cap d'Espoir	34	2010-12-12	77	4.7	12.7
Percé	35	2010-12-13	77	3.7	17.3
Barachois	36	2010-12-13	77	5.7	14.9
Fond de la baie de Gaspé	37	2010-12-13	77	3.1	17.1
Entrée de la baie de Gaspé	38	2010-12-13	77	6.2	10.8

Au total ce sont 16 événements qui sont caractérisés par au moins un paramètre dont la valeur maximale a connu un temps de retour \geq à 10 ans. Ces derniers sont listés dans le tableau suivant en précisant la date du début de l'événement sur le site concerné.

Tableau 30 : Événements dont au moins un des paramètres présente un temps de retour \geq à 10 ans

No. d'événement	Date	No. de site	No. d'événement	Date	No. de site
6	1980-10-26	35	76	2010-12-01	20
		37			21
7	1981-01-11	21			27
24	1991-06-13	36			28
		37		2010-12-02	12
		38		2010-12-04	2
34	1996-01-27	37			3
	1996-01-28	38			4
36	1996-12-07	27			11
		28			13
		29			14
43	1999-10-22	27			15
		28		2010-12-06	9
47	2000-10-28	32			10
50	2003-10-15	27	77	2010-12-12	33
		28			34
53	2004-10-15	17		2010-12-13	35
		18			36
		19			37
60	2005-12-02	14			38
69	2008-12-21	32	78	2010-12-20	35
		33	79	2010-12-20	33
		34			34
73	2010-01-02	44			35

4.2.4 Analyse de la direction des vagues

Les résultats de la classification des directions de vagues au moment du NEML maximal sur l'ensemble des événements/site (figure 91) montrent que l'angle d'incidence lors du NEML maximal était majoritairement (36 %) perpendiculaire à la côte, soit de classe 3 (entre 67,5° et 112,5° par rapport à l'orientation générale de la côte). En seconde position on retrouve également les vagues de classe directionnelle 2 dans une proportion de 28 %. La classe 2 représente les vagues d'incidence oblique à la côte, soit entre 22,5 et 67,5°. Étant dans le même sens que la dérive littorale, les vagues de classe 2 seraient les plus susceptibles d'accentuer le transit sédimentaire littoral (Charles *et coll.*, 2012) suivi des vagues de classe 4, qui pour les sites suivis par cette étude, représentent 19 % des cas. Une augmentation du transit sédimentaire et de la mobilisation du matériel de plage peuvent notamment entraîner l'érosion des côtes ou favoriser le déficit sédimentaire des milieux côtier les rendant ainsi plus vulnérables aux événements météo-marin ultérieurs.

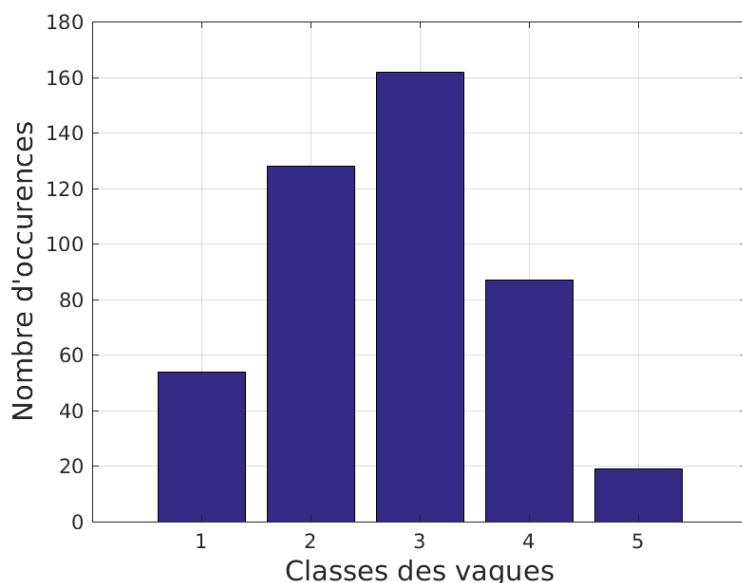


Figure 91 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal sur l'ensemble des sites

Les figures 92 à 96 présentent les occurrences de direction de vagues pour chacun des sites pour l'ensemble des événements connus à chaque endroit. Même si la direction des vagues obtenue par cette analyse ne permet pas de connaître la direction des vagues à la côte, elle permet néanmoins de voir que certains sites sont affectés par des événements où la direction des vagues est associée à une ou des directions préférentielles. C'est le cas par exemple des sites de Longue-Rive/Pointe-à-Boisvert, Port-Cartier, Sept-Îles/Moisie, Sept-Îles/Baie Sainte-Marguerite, Havre-Saint-Pierre, Aguanish, Kegaska, Carleton, Maria, Chandler, Barachois, le fond et l'entrée de la baie de Gaspé et Cap-des-Rosiers où les vagues lors des événements recensés étaient majoritairement associées à une seule classe. À l'inverse d'autres sites sont affectés par des événements où la direction des vagues est variable comme Port-Daniel/Gascons, Cap-d'Espoir et Percé.

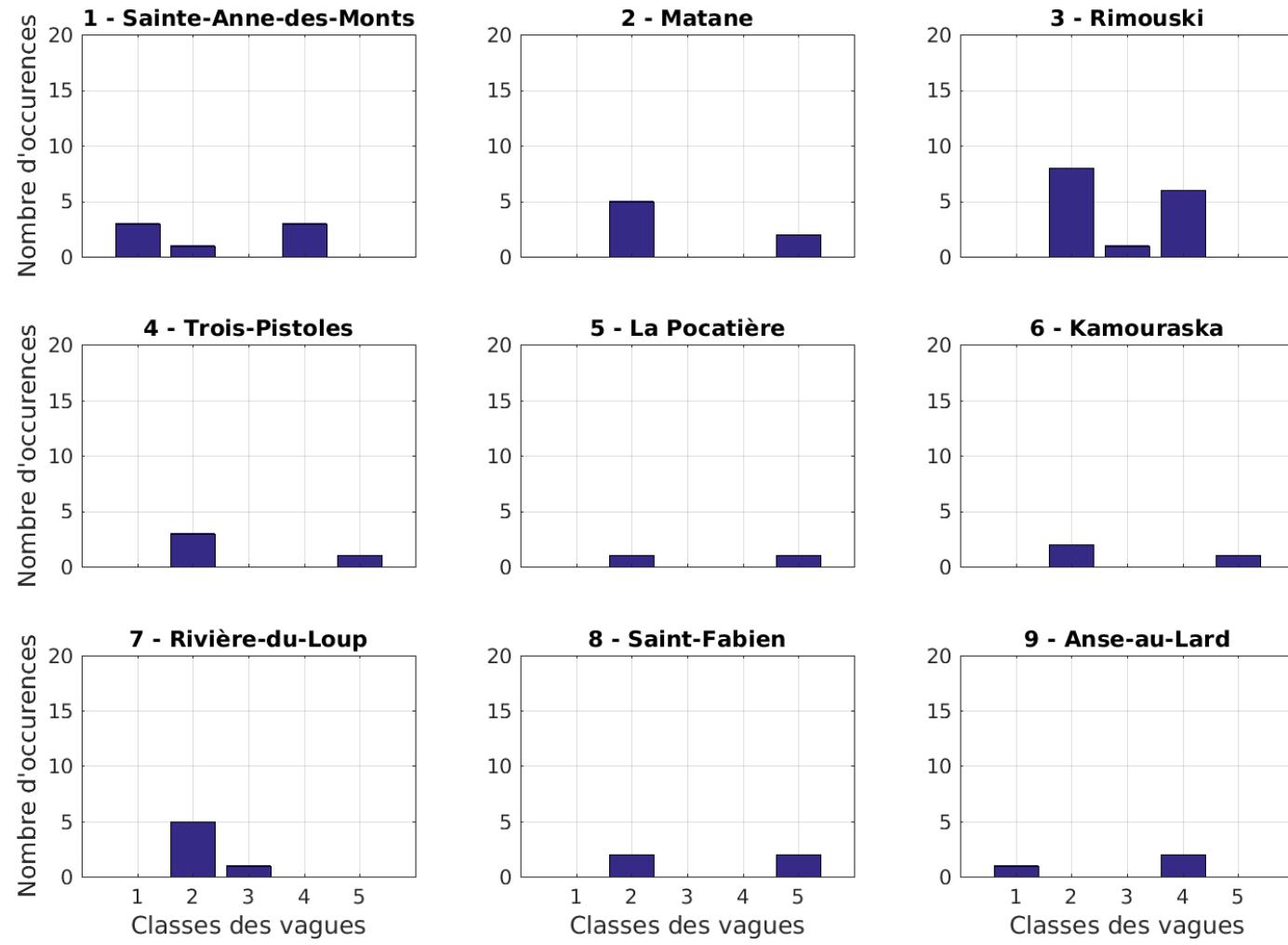


Figure 92 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 1 à 9

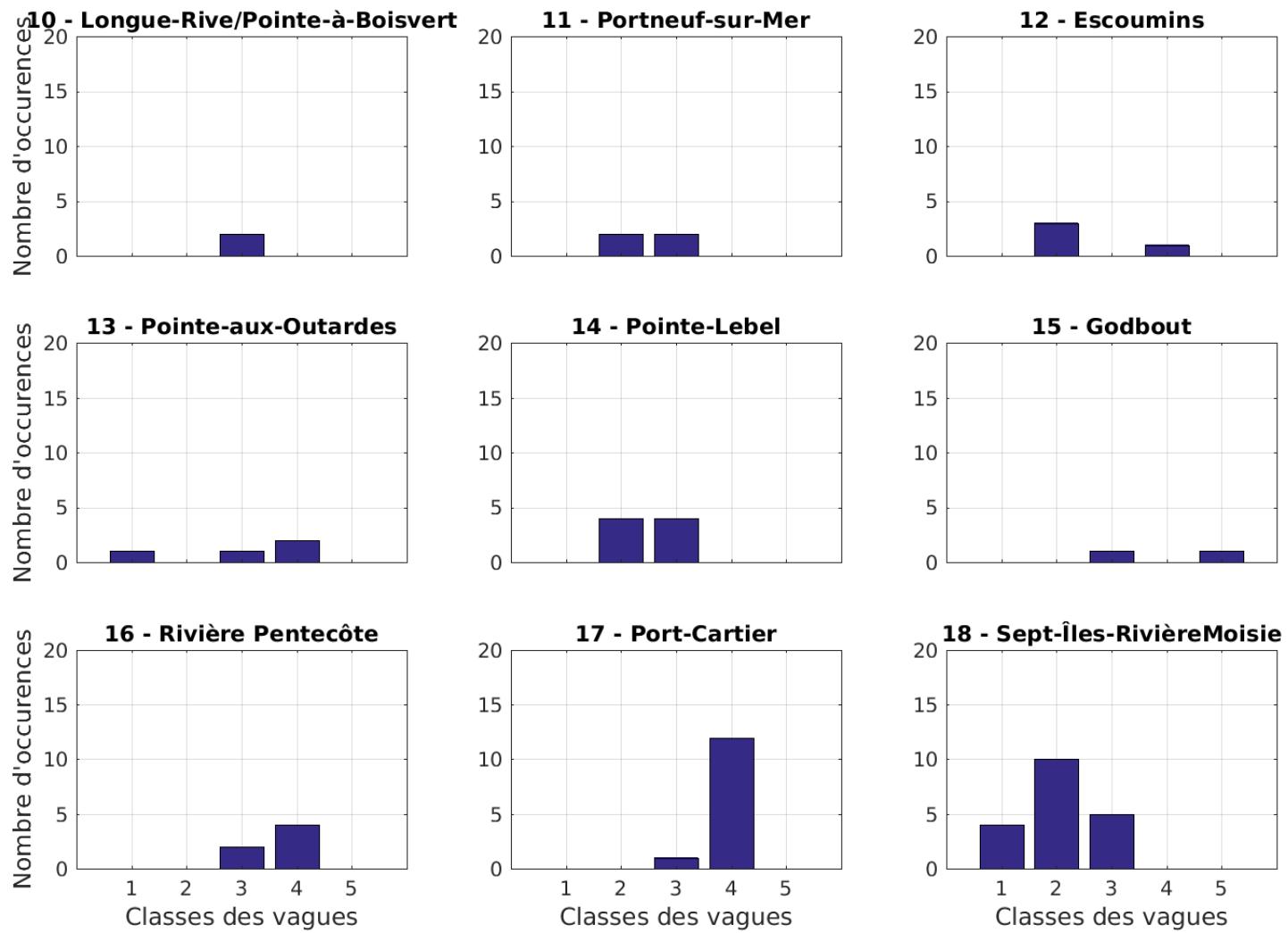


Figure 93 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 10 à 18

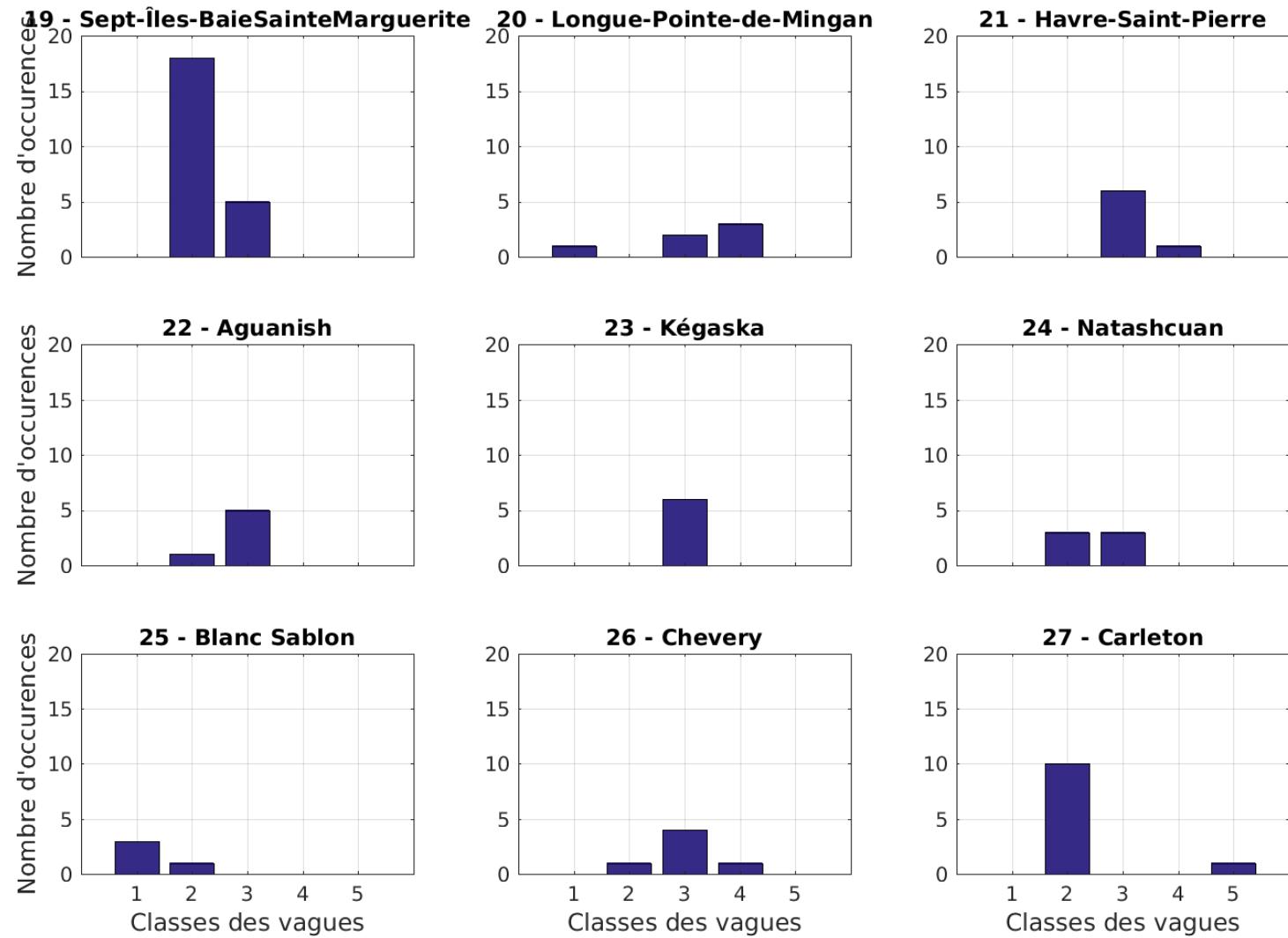


Figure 94 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 19 à 27

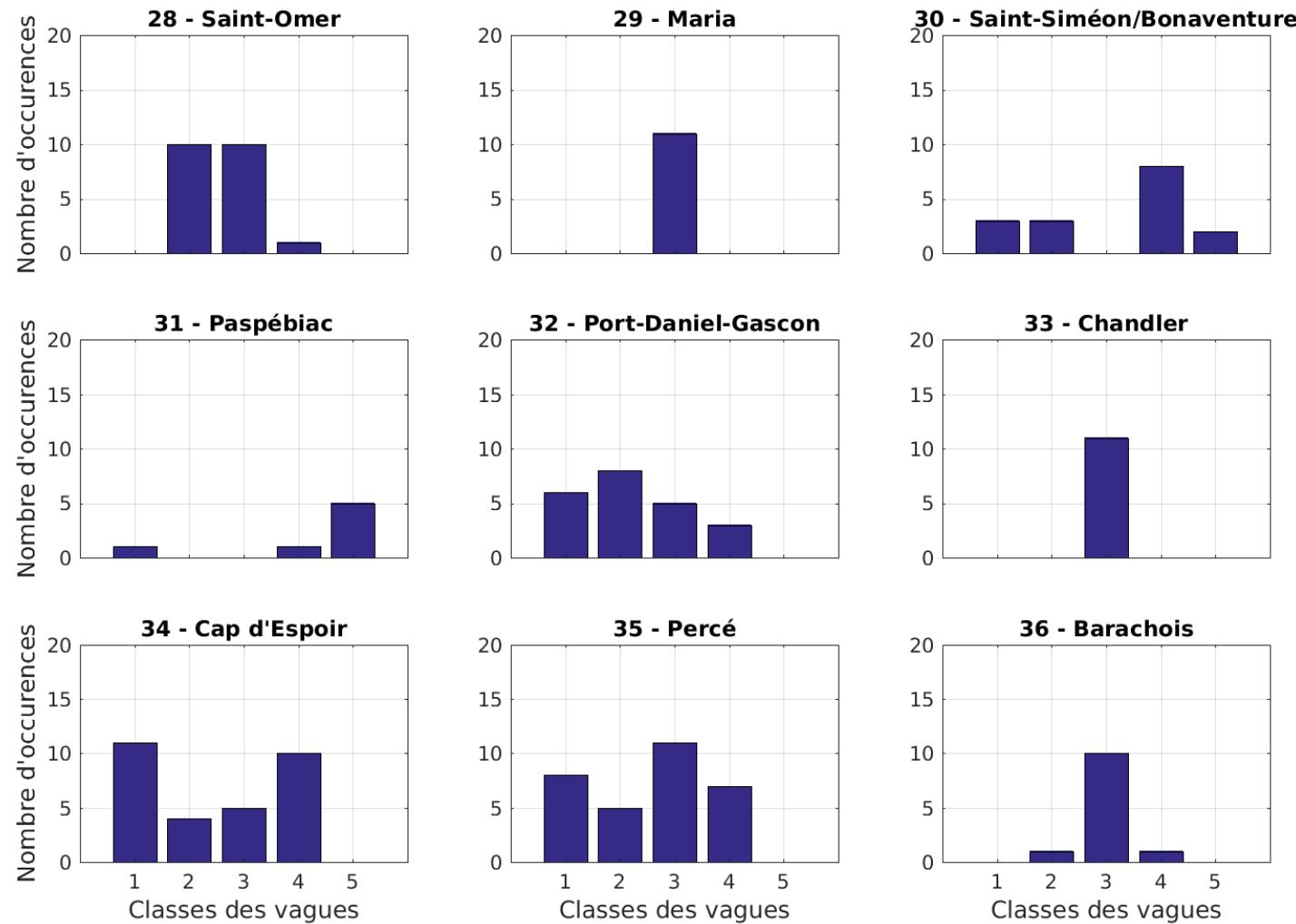


Figure 95 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 28 à 36

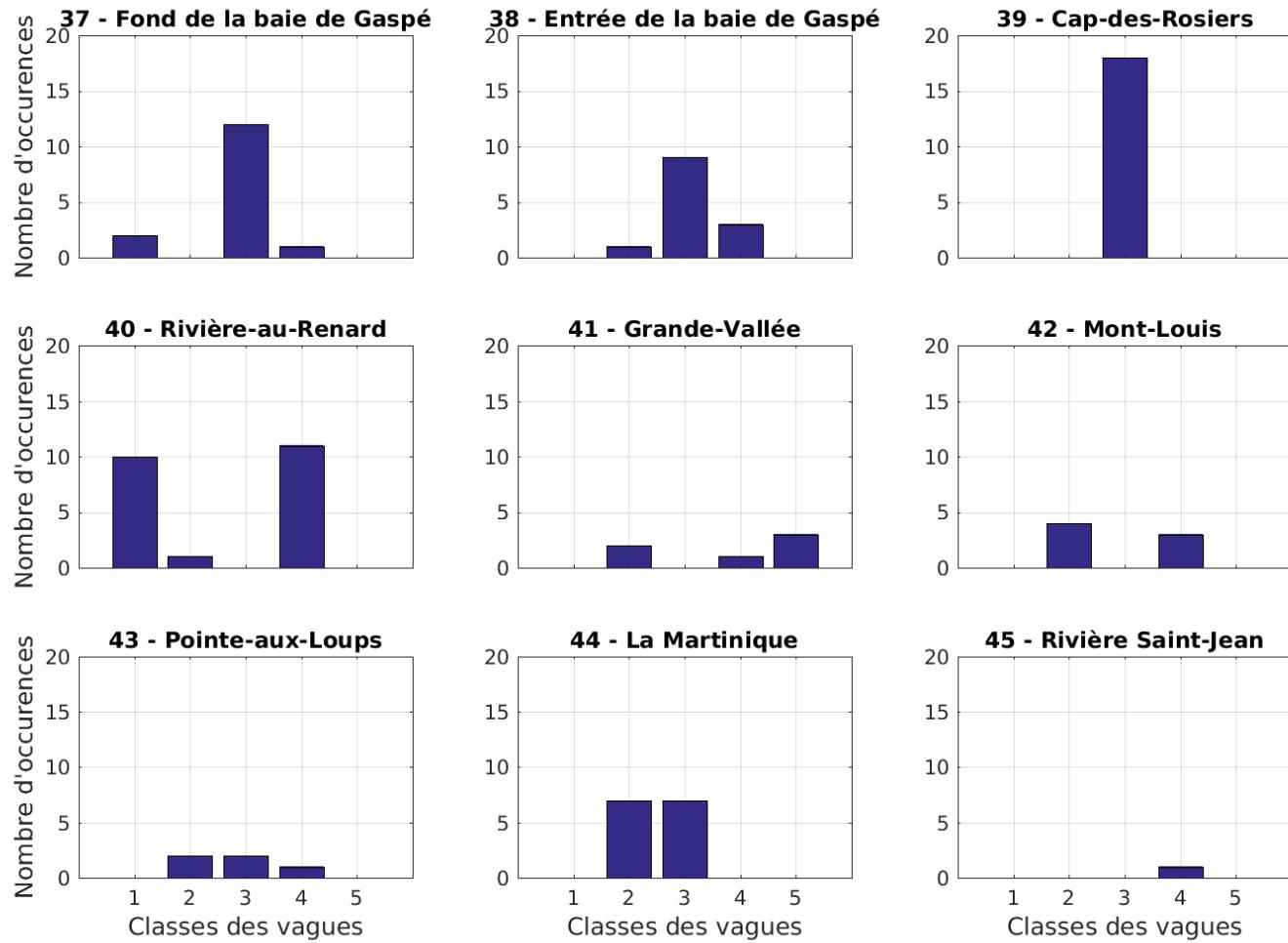


Figure 96 : Répartition des classes de direction des vagues au moment du NEML maximal pour les sites 37 à 45

4.3 Discussion et conclusion relative aux temps de retour des conditions météo-marines responsables de l'érosion et de la submersion côtière

En somme, la caractérisation des vagues et niveaux d'eau lors des événements météo-marins ayant affecté la côte durant la période récente (1980-2010) a été réalisée pour 45 sites répartis sur l'ensemble de l'estuaire et du golfe Saint-Laurent. Les temps de retour des valeurs maximales de ces événements ont été calculés pour les paramètres suivants : la hauteur significative, la période, le niveau d'eau, le niveau d'eau modélisé au large (niveau d'eau + hauteur significative de vagues) et la vitesse des vents. La direction des vagues au moment du NEML maximal a également été investiguée pour chaque événement recensé à l'endroit des 45 différents sites étudiés.

4.3.1 Identification des événements

L'identification des sinistres côtiers à partir des archives a su montrer que certains événements ne peuvent être identifiés qu'à partir d'un seuil établi de hauteur de vagues. Dans le cadre de la présente étude, ce sont 9 % des événements qui n'atteignaient pas le seuil choisi, mais qui ont pourtant fait l'objet de mention journalistique. En ce sens, plusieurs facteurs devraient être considérés et la combinaison souhaitée pour cet exercice d'identification mérite d'être encore approfondie.

Aussi, l'identification de la durée des événements gagnerait à être bonifiée en intégrant la surcote barométrique. Celle-ci nécessite toutefois une donnée de niveau d'eau qui intègre l'effet de baromètre inverse (surcote barométrique) et celle associée à la propagation des ondes de tempêtes de l'Atlantique (surcote Atlantique). Du même coup, les moments de début ou de fin des événements qui étaient basés sur l'occurrence du 95^e percentile du NEML s'en trouveraient probablement modifiés.

4.3.2 Caractérisation des événements

La caractérisation des événements en fonction des hauteurs de vagues maximales est également à faire attention dans le cadre d'une caractérisation des tempêtes ayant affecté les zones côtières (surtout dans les secteurs méso et macrotidal) puisque le niveau d'eau le plus élevé, et donc le plus susceptible d'affecter la côte, ne survient pas nécessairement au moment des vagues les plus hautes. Par exemple dans l'exemple montré au tableau 28, les Hs maximaux sont survenus 3 h avant le NEML. Conséquemment, le calcul du NEML s'avère un paramètre des plus pertinents pour évaluer les événements ayant affecté la côte.

En ce sens une bonification des niveaux d'eau avec les surcotes barométriques et Atlantique favoriserait également une meilleure précision du NEML et, de ce fait, améliorerait la caractérisation des conditions météo marines ayant causé des dommages à la côte.

Les événements qui n'atteignaient pas les seuils établis (H_s ou NEML $> 95^{\text{e}}$ percentile) dans l'étude actuelle pourraient se voir intégrés à une analyse ultérieure qui intégrerait les surcotes barométriques et Atlantique. Aussi une investigation de l'ensemble des paramètres météo-marins lors de ces événements afin de mieux définir les paramètres à considérer pour caractériser les sinistres côtiers est souhaitable.

Par ailleurs, une représentation spatiale pour chacun des événements étudiés, notamment sur les 45 sites, de l'effet de chacun des paramètres serait également une option à envisager. Cet exercice permettrait non seulement de mieux caractériser les événements recensés, mais potentiellement aussi de mieux définir les caractéristiques représentatives des sinistres côtiers. Enfin, il serait aussi important de calculer le runup lors de ces événements permettant ainsi de mieux représenter la propagation des vagues du large à la côte et de préciser les niveaux réellement atteints sur le littoral.

4.3.3 Les temps de retour

L'analyse des temps de retour sur les différents paramètres semble indiquer que le NEML caractérise davantage les événements météo-marins ayant causé des dommages à la côte que les autres paramètres régulièrement utilisés dans la littérature pour les décrire, tels la vitesse des vents, la hauteur des vagues, leur période ou les niveaux d'eau. Ce constat va dans le même sens que Ciavola *et coll.* (2017) et Bernatchez *et coll.* (2012) voulant que ce soit plutôt la conjoncture de paramètres météo-marins (forts vents ou basse pression atmosphérique et de niveaux d'eau supérieurs à la moyenne) qui permet d'identifier la majorité des événements de vagues de tempête et de submersion ayant causé des dommages à la côte au Québec maritime entre 1960 et 2010.

Il serait toutefois souhaitable de réévaluer les temps de retour des différents événements pour l'ensemble des paramètres en appliquant plutôt la distribution généralisée de Pareto. En effet, la méthode des moments de Gumble est basée sur une analyse des maxima par bloc, soit dans le cas présent, sur les maximums annuels. Une analyse plutôt basée sur le dépassement d'un seuil élevé (POT : Peak-Over Threshold), telle une distribution généralisée de Pareto, permettrait alors d'exploiter davantage de données et ainsi de considérer l'ensemble des valeurs extrêmes de toute la série de données et non pas seulement les maxima d'une période définie (ici une année). Cette méthode implique toutefois la détermination d'un seuil au-dessus duquel seront considérés les extrêmes. Cette démarche mérite cependant de s'attarder plus longuement sur le seuil à définir pour chacun

des paramètres étudiés étant donné que ce choix repose souvent sur certains compromis. Il serait aussi important d'améliorer les intrants climatiques, notamment en ce qui a trait aux vents pour l'estuaire du Saint-Laurent et la baie des Chaleurs.

5 Conclusion

La phase II de MODESCO a permis de déployer des instruments de mesure sur quatre secteurs représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent pour quantifier, de la côte jusqu'à la zone pré littorale, les conditions météo-marines. Conjointement à l'analyse des paramètres hydrodynamiques, les mesures topographiques et des limites atteintes par le jet de rive a permis de développer des modèles empiriques de submersion côtière (Didier et coll., 2015, 2016). La phase II de MODESCO a permis aussi de produire une climatologie des vagues à une résolution de 1 km sur l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent pour la période de 1979 à 2015. La phase de validation a permis de montrer l'efficacité de WW3 à reproduire les différents paramètres de vagues pour le golfe du Saint-Laurent. Pour l'estuaire et la baie des Chaleurs, un débiaisage des vents servant d'intrants au modèle sera nécessaire pour améliorer les résultats de la modélisation des vagues. De plus, la calibration du modèle de vagues nécessite de maintenir les instruments de mesure au large pour obtenir une série temporelle plus longue des spectres de vague puisqu'actuellement l'échantillon comporte que très peu de hauteur de vagues de tempête alors que ce sont ces vagues qui sont les plus importantes dans la gestion des risques côtiers. Les conditions météo-marines responsables des événements qui ont provoqué des dommages au littoral dans le passé pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et leur temps de retour ont été caractérisées. Il est clair qu'il faudra ultérieurement intégrer à l'analyse des vagues, les surcotes barométriques et les ondes de tempête provenant de l'Atlantique pour bien quantifier les paramètres responsables des sinistres côtiers. Enfin, il n'a pas été possible de déterminer les valeurs des paramètres de vagues et de niveaux d'eau sur la période 2041-2100. Dans la simulation climatique, un changement à la grille numérique a fait en sorte qu'une des extrémités de la frontière (détroits de Belle Isle et de Cabot) s'est trouvée en milieu terrestre et, par conséquent, était prescrite à zéro au lieu de sa valeur réelle. Ceci a eu pour effet de diminuer l'énergie transmise par les marées à cette frontière, et donc priver l'ensemble du domaine d'une partie de l'énergie des marées. Ceci a eu pour effet de diminuer les niveaux d'eau sur l'ensemble du domaine. Les nouvelles simulations seront disponibles en juillet 2017 et nous pourrons alors finaliser la modélisation des vagues pour le futur et produire un nouveau rapport pour l'automne 2017.

6 Références

- Aagaard, T. and Masselink, G., 1999. The Surf Zone. dans: A.D.Short (ed) Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Wiley Interscience, pp.72-118.
- Bernatchez, P. Boucher-Brossard, G., et Sigouin-Cantin, M. 2012. Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, 140 p.
- Bernatchez, P., Drejza, S. et Dugas, S. 2012. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des Îles-de-la-Madeleine. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. et annexes + recueil de 100 cartes
- Bernatchez, P., Fraser, C., Dugas, S. et Drejza, S. 2012 b. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 49 p. et annexes.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavire, D. et Dugas, S., 2011. Integrating anthropogenic factor, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. Oceans and Coastal Management, no. 54, p. 621-632.
- Bernatchez, P., Quintin, C., Fraser, C., Jolivet, Y., Neumeier, U., Houde-Poirier, M., Hétu, B., Gibeault, C. et Boucher-Brossard, G. 2013. Dynamique de l'écosystème côtier de la péninsule de Penouille dans un contexte de changements climatiques, Parc national du Canada Forillon : Rapport final. Rapport remis au Parc national du Canada Forillon. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, mars 2013, 335 p.
- Bernatchez, P., Toubal, T., Van-Wiertz, S., Drejza, S. et Friesinger, S. 2010. Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, Îles-de-la-Madeleine. Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, 177 p.

Burcharth, H.F., Hughes, S. A., 2002. Fundamentals of design. In: Vincent, L., and Demirbilek, Z. (editors), Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter VI-5-6, Scour and Scour Protection. Engineer Manual 1110-2-1110, US Army Corps of Engineers, Washiungton D.C., U.S.

Charles, Élodie, Idier, Déborah, Delecluse, Pascale, et coll. Impact du changement climatique sur les vagues et la dérive littorale le long du littoral aquitain. La Houille Blanche, 2012, no 6, p. 26-33.

Ciavola, Paolo, and Giovanni Coco, eds. Coastal Storms: Processes and Impacts. John Wiley & Sons, 2017.

Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R.L., Van-Wiertz, S. 2015. Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. *Journal of Marine Science and Engeneering* 3, 560-590.

Didier, D., Bernatchez, P., Marie, G., Boucher-Brossard, G. (accepté) Wave runup estimations on a rock coast for flood hazard assessment. Natural Hazards.

Dingemans, M.W., 1997a, Water Wave Propagation over Uneven Bottoms. Part 1 — Linear Wave Propagation. Singapore: World Scientific Publishing Co.

Dingemans, M.W., 1997b, Water Wave Propagation over Uneven Bottoms. Part 2 — Non-Linear Wave Propagation. Singapore: World Scientific Publishing Co.

Drejza, S., Friesinger, S. et Bernatchez, P. (2014). Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est-du-Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est-du-Québec, Volume I, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 226 p. + annexes.

Dumont, D., A. L. Kohout, and L. Bertino (2011) A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization, J. Geophys. Res., 116(C4), C04001, doi:10.1029/2010JC006682.

Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S. et Drejza, S. 2012. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 50 p. et annexes.

Gumbel, E.J. (1958) Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York, 375 p.

Herbers, T. H. C., S. Elgar, and R. T. Guza, 1995, Generation and propagation of infragravity waves, *J. Geophys. Res.*, 100(C12), 24 863–24 872, doi:10.1029/95JC02680.

Holthuijsen, L.H., 2007, Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press.

Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W. et Zhang, X. (2009). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WMO-TD No 1500, 56 p.

Lambert, A., 2012, Modélisation des tempêtes de décembre 2010 sur le littoral de Sept-Îles, Golfe du Saint-Laurent. Communication, Assemblée Générale de Québec Océan, Montréal, Canada Octobre 2012.

Lambert, A., Bernatchez, P., Didier, D., Arsenault, E., Dumont, D., Senneville, S. et Bismuth, E. (2015) Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO) Phase I : rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Novembre 2015, 122 p. et annexe.

Longuet-Higgins, M.S., Steward R.W., 1962, Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to « surf beats ». *Journal of Fluid Mechanics*, 13, pp 481-504

Pape, L., Ruessink, B. G., Kuriyama, Y., 2010, Models and scales for nearshore sandbar migration. *Journal of Geophysical Research*, 115, F03043.

Price, T.D., 2013, Morphological coupling in a double sandbar system. PhD thesis. Utrecht University.

Quintin, C., Bernatchez, P., Jolivet, Y. 2013. Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Février 2013, Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A.P., 2009, van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009, Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering* 56 (11), 1133-1152

Ruessink, B.G., Wijnberg, K.M., Holman, R.A., Kuriyama, Y. & van Enckevort, I.M.J., 2003, Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C8), 3249-.

Ruessink, B.G., Pape, L., Turner, I. L., 2009, Daily to interannual cross-shore sandbar migration: observations from a double sandbar system. *Continental Shelf Research*, 29, 1663-1677.

Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A., 2001. Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research* 17 (2), 407–419.

Ruggiero, P., Holman, R.A., Beach, R.A., 2004. Wave run-up on a high-energy dissipative beach. *Journal of Geophysical Research—Oceans* 109 (C6).

Tolman, H. L., 1991: A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 782-797

Williams, T. D., L. G. Bennetts, V. A. Squire, D. Dumont and L. Bertino (2013) Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part 1 : Theoretical foundations, *Ocean Model.*, 71, 81-91.

Williams, T. D., L. G. Bennetts, V. A. Squire, D. Dumont and L. Bertino (2013) Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part 2 : Numerical implementation and sensitivity studies along 1D transects of the ocean surface, *Ocean Model.*, 71, 92-101.

WAMDIG, 1988, The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775–1810.

Wright L.D., Thom B.G., 1977, Coastal depositionnal landforms : a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography* 1, 412-159.

Walstra, D.J.R., Reniers, A.J.H.M., Ranasinghe, R., Roelvink, J.A., Ruessink, B.G., 2012, On bar growth and decay during interannual net offshore migration. *Coastal Engineering*, 60, 190-200.

Annexe A

Temps de retour des paramètres choisis
calculé pour chaque événement/site identifié

Site	Date	Numéro d'événement	Hauteur significative (Hs)		Niveau d'eau modélisé au large (NEML)		Période (T02)		Niveau d'eau (Dpt)		Vitesse des vent max (WS)	
			Max (m)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (s)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (km/h)	Temps de retour
1	1980-10-09	5	1.8	1.0	2.4	1.0	5.3	1.0	0.8	1.0	51.5	1.0
1	1980-10-17	6	2.2	1.2	2.8	1.4	5.8	1.0	1.0	1.0	57.2	1.0
1	1996-10-14	35	2.5	2.2	3.3	4.0	5.9	1.0	0.9	1.0	57.8	1.0
1	1998-10-30	41	2.2	1.4	2.6	1.1	6.3	1.0	0.7	1.0	56.2	1.0
1	1999-03-16	42	1.3	1.0	2.1	1.0	4.5	1.0	1.0	1.0	48.4	1.0
1	2005-12-02	60	2.0	1.1	2.9	1.6	7.6	1.8	1.1	1.0	56.3	1.0
1	2010-12-04	76	2.0	1.1	3.1	2.3	7.8	2.2	1.2	1.0	55.3	1.0
2	1980-10-09	5	1.4	1.0	2.6	1.0	4.6	1.0	1.4	1.0	43.4	1.0
2	1980-10-25	6	1.9	1.3	3.3	1.2	8.0	1.4	2.2	1.0	51.2	1.0
2	1980-05-22	22	0.8	1.0	2.5	1.0	5.3	1.0	2.2	1.0	26.5	1.0
2	1998-10-30	41	2.1	1.6	3.0	1.0	6.9	1.0	1.1	1.0	49.7	1.0
2	1999-03-16	42	0.7	1.0	2.4	1.0	4.0	1.0	1.8	1.0	41.5	1.0
2	2005-12-02	60	1.6	1.0	3.5	1.9	8.2	1.7	2.0	1.0	46.7	1.0
2	2010-12-04	76	2.2	2.0	4.3	17.5	8.8	3.4	2.3	1.0	55.4	1.3
3	1980-01-24	1	1.0	1.0	1.6	1.0	4.5	1.0	1.5	1.0	49.8	1.1
3	1980-07-05	3	1.4	1.0	2.7	1.0	4.8	1.0	1.3	1.0	46.2	1.0
3	1980-08-09	4	1.5	1.1	3.0	1.0	4.4	1.0	2.0	1.0	47.5	1.0
3	1980-10-15	6	1.4	1.0	3.1	1.0	7.1	1.1	2.5	1.0	48.1	1.0
3	1981-01-11	7	0.4	1.0	2.3	1.0	4.5	1.0	1.9	1.0	45.3	1.0
3	1982-04-30	9	1.0	1.0	2.3	1.0	5.0	1.0	1.7	1.0	32.3	1.0
3	1987-11-21	15	1.1	1.0	2.9	1.0	3.9	1.0	2.1	1.0	38.8	1.0
3	1989-04-07	19	1.4	1.1	3.6	2.8	4.6	1.0	2.4	1.0	53.4	2.0
3	1989-12-03	21	1.9	3.3	3.3	1.4	5.6	1.0	1.8	1.0	52.0	1.5
3	2000-07-19	45	0.6	1.0	2.5	1.0	3.3	1.0	1.9	1.0	28.9	1.0
3	2004-10-15	53	0.9	1.0	3.1	1.0	7.7	1.7	2.3	1.0	39.8	1.0
3	2005-09-19	57	1.5	1.1	2.8	1.0	4.7	1.0	1.3	1.0	53.3	2.0
3	2005-12-02	60	1.0	1.0	3.2	1.1	7.7	1.7	2.3	1.0	41.1	1.0
3	2006-10-18	62	1.3	1.0	2.3	1.0	8.9	8.8	1.7	1.0	46.9	1.0
3	2010-12-04	76	1.8	2.3	4.2	37.9	8.0	2.5	2.6	1.0	49.1	1.1
4	1980-10-26	6	1.0	1.0	3.2	1.1	5.3	1.0	2.6	1.0	43.4	1.0
4	1981-01-11	7	1.1	1.0	2.7	1.0	3.9	1.0	1.9	1.0	44.9	1.0
4	1986-01-20	13	1.1	1.0	2.0	1.0	4.3	1.0	1.4	1.0	39.1	1.0
4	2010-12-04	76	1.4	1.4	4.1	39.8	7.0	4.2	2.7	1.0	44.8	1.0
5	1980-10-25	6	0.8	1.4	3.7	2.4	3.6	1.0	2.9	1.0	37.1	1.0
5	2010-12-04	76	0.7	1.0	3.7	1.9	5.8	4.2	3.3	1.0	41.0	1.1
6	1980-10-15	6	0.8	1.2	3.5	2.7	3.8	1.0	2.7	1.0	35.2	1.0
6	1981-01-11	7	0.0	1.0	2.4	1.0	0.0	1.0	2.3	1.0	27.8	1.0
6	2010-12-04	76	0.7	1.0	3.3	1.5	6.0	2.5	3.0	1.0	41.1	1.2
7	1980-10-25	6	0.6	1.0	2.9	1.4	4.8	1.0	2.3	1.0	31.5	1.0
7	1981-01-11	7	0.2	1.0	2.0	1.0	3.7	1.0	1.9	1.0	35.8	1.0
7	1986-01-11	13	0.4	1.0	0.2	1.0	4.6	1.0	-0.2	1.0	28.1	1.0
7	2000-12-12	48	0.6	1.0	3.1	3.8	3.2	1.0	2.5	1.0	34.5	1.0
7	2004-12-11	54	0.7	1.2	2.7	1.0	6.8	1.7	2.5	1.0	26.4	1.0
7	2010-12-06	76	0.7	1.0	3.0	2.4	3.9	1.0	2.6	1.0	33.0	1.0
7	2010-12-20	78	0.7	1.2	3.1	3.0	6.6	1.4	2.7	1.2	30.0	1.0
8	1980-10-15	6	1.3	1.1	3.1	1.0	5.9	1.0	2.6	1.0	45.4	1.0
8	1981-01-11	7	0.8	1.0	2.6	1.0	3.9	1.0	1.9	1.0	45.5	1.0
8	1986-01-21	13	0.7	1.0	0.8	1.0	3.6	1.0	0.1	1.0	40.0	1.0
8	2010-12-06	76	1.1	1.0	3.8	8.6	6.0	1.0	2.7	1.0	47.1	1.1
9	1980-10-25	6	1.6	1.1	3.2	1.0	7.1	1.2	2.4	1.0	48.9	1.0
9	1981-01-11	7	0.4	1.0	2.3	1.0	4.9	1.0	1.8	1.0	47.1	1.0
9	2010-12-06	76	1.9	2.3	4.4	39.5	7.1	1.2	2.6	1.0	50.5	1.2
10	1980-10-15	6	1.1	1.3	3.5	8.7	5.4	1.0	2.5	1.0	44.3	1.0
10	1981-01-11	7	0.6	1.0	2.4	1.0	3.7	1.0	1.8	1.0	43.1	1.0
10	2005-08-31	56	0.8	1.0	1.9	1.0	5.2	1.0	1.5	1.0	42.0	1.0
10	2005-12-02	60	0.9	1.0	3.1	1.5	7.2	1.0	2.3	1.0	31.5	1.0
10	2010-12-06	76	1.2	2.2	3.8	41.6	6.7	1.0	2.6	1.1	44.4	1.0
11	1980-10-15	6	1.5	1.0	3.6	2.3	7.0	1.0	2.3	1.0	44.2	1.0
11	1981-01-11	7	0.6	1.0	2.2	1.0	3.9	1.0	1.7	1.0	42.7	1.0
11	2005-08-31	56	1.5	1.0	2.3	1.0	5.5	1.0	1.4	1.0	41.8	1.0
11	2005-12-02	60	1.6	1.1	3.8	3.7	7.6	1.0	2.1	1.0	32.8	1.0
11	2010-12-04	76	2.1	2.6	4.4	27.6	7.9	1.0	2.4	1.2	45.3	1.0
12	1980-10-15	6	0.9	1.0	3.2	2.1	7.2	1.0	2.3	1.0	41.8	1.0
12	1981-01-11	7	0.2	1.0	2.0	1.0	3.6	1.0	1.7	1.0	36.8	1.0
12	2005-08-31	56	1.0	1.1	1.9	1.0	5.5	1.0	1.4	1.0	38.9	1.0
12	2010-12-02	76	1.5	2.5	3.8	47.7	8.0	1.2	2.5	1.2	40.8	1.0
13	1980-10-15	6	1.3	1.1	3.6	2.9	5.0	1.0	2.5	1.0	47.1	1.0
13	1981-01-11	7	0.2	1.0	2.0	1.0	5.0	1.0	1.8	1.0	46.0	1.0
13	2003-11-28	52	1.5	1.2	2.8	1.0	5.8	1.0	2.1	1.0	47.2	1.0
13	2010-12-04	76	1.8	2.9	4.4	75.0	7.0	1.0	2.6	1.3	51.3	1.3

Annexe A

* Les temps de retour en caractère gras sont supérieurs ou égaux à 10 ans

Site	Date	Numéro d'événement	Hauteur significative (Hs)		Niveau d'eau modélisé au large (NEML)		Période (T02)		Niveau d'eau (Opt)		Vitesse des vent max (WS)	
			Max (m)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (s)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (km/h)	Temps de retour
14	1980-10-25	6	1.7	1.0	3.7	1.3	3.9	1.0	2.4	1.0	51.7	1.0
14	1981-01-11	7	0.5	1.0	2.3	1.0	3.6	1.0	1.8	1.0	51.2	1.0
14	1985-06-12	29	0.4	1.0	2.6	1.0	6.3	1.0	2.5	1.4	27.7	1.0
14	2005-12-02	60	2.7	2.9	4.7	11.3	7.6	1.0	2.2	1.0	37.8	1.4
14	2008-08-01	67	1.6	1.0	3.9	2.1	3.5	1.0	2.5	1.1	37.7	1.0
14	2010-12-04	76	2.6	2.1	5.1	30.9	7.7	1.0	2.5	1.3	56.8	1.3
15	1980-10-25	6	1.9	1.3	3.3	2.1	3.8	1.0	2.0	1.0	52.1	1.0
15	2010-12-04	76	2.4	3.9	4.4	67.8	7.9	1.0	2.1	1.2	58.6	1.4
16	1980-10-26	6	3.0	1.3	4.0	1.3	8.8	1.0	1.6	1.0	52.7	1.4
16	1981-01-11	7	1.5	1.0	2.6	1.0	13.1	1.0	1.1	1.0	48.9	1.1
16	2010-12-01	76	3.8	2.8	5.3	6.9	8.7	1.0	1.8	4.6	55.9	1.9
17	1980-10-26	6	2.6	1.6	3.7	2.0	9.4	1.0	1.6	1.0	50.0	1.5
17	1981-01-11	7	1.8	1.0	2.9	1.1	13.7	1.0	1.1	1.0	41.4	1.0
17	1983-04-17	10	1.4	1.0	2.5	1.0	8.7	1.0	1.8	1.0	40.6	1.0
17	1986-09-12	14	2.3	1.3	3.2	1.3	7.1	1.0	1.0	1.0	42.5	1.0
17	1989-09-23	20	1.7	1.0	1.8	1.0	5.4	1.0	0.3	1.0	38.6	1.0
17	1989-11-21	31	1.8	1.0	2.9	1.1	10.2	1.0	1.5	1.0	30.5	1.0
17	1995-12-10	32	2.9	2.3	3.6	1.8	11.3	1.0	1.3	1.0	49.8	1.3
17	1996-12-08	36	3.0	2.5	3.6	1.8	11.7	1.0	1.4	1.0	51.2	1.7
17	1996-12-24	37	1.9	1.1	3.2	1.3	9.1	1.0	1.3	1.0	40.7	1.0
17	1997-01-10	38	1.6	1.0	2.6	1.0	7.8	1.0	1.6	1.1	41.8	1.0
17	2004-10-15	53	3.4	4.0	4.9	10.6	9.9	1.0	1.5	1.0	57.6	3.9
17	2005-08-31	55	2.2	1.2	3.2	1.3	7.1	1.0	1.0	1.0	47.2	1.2
17	2010-12-01	76	3.1	2.9	4.6	6.3	10.3	1.0	1.7	2.6	52.1	1.9
18	1980-10-26	6	3.2	2.4	4.3	3.4	9.3	1.0	1.7	1.0	64.0	2.4
18	1981-01-11	7	1.4	1.0	2.3	1.0	12.7	1.0	1.2	1.0	51.0	1.0
18	1983-04-18	10	1.3	1.0	2.4	1.0	9.2	1.0	1.5	1.0	49.4	1.0
18	1986-09-12	14	2.4	1.1	3.5	1.2	7.0	1.0	1.1	1.0	54.0	1.1
18	1988-12-07	18	1.4	1.0	2.5	1.0	5.3	1.0	1.1	1.0	40.3	1.0
18	1989-09-23	20	2.1	1.0	2.0	1.0	7.3	1.0	0.9	1.0	46.9	1.0
18	1995-11-21	31	2.0	1.0	3.2	1.1	9.5	1.0	1.7	1.0	41.0	1.0
18	1995-12-10	32	3.4	3.0	4.3	3.3	8.6	1.0	1.4	1.0	62.1	1.9
18	1996-12-08	36	3.5	3.5	3.9	1.8	10.6	1.0	1.5	1.0	64.4	2.5
18	1996-12-24	37	2.8	1.5	4.2	2.7	7.8	1.0	1.4	1.0	57.8	1.3
18	1997-01-10	38	1.4	1.0	3.0	1.0	8.2	1.0	1.8	1.1	47.8	1.0
18	2003-10-15	50	3.9	6.1	3.7	1.5	8.9	1.0	1.2	1.0	71.2	5.9
18	2004-10-15	53	3.5	3.7	5.2	13.6	9.5	1.0	1.6	1.0	64.9	2.6
18	2005-08-31	55	2.5	1.2	3.4	1.2	7.5	1.0	1.2	1.0	57.2	1.3
18	2005-09-29	57	3.0	2.0	3.6	1.3	7.5	1.0	0.9	1.0	55.2	1.1
18	2005-11-24	58	2.9	1.7	3.0	1.0	7.9	1.0	0.9	1.0	57.0	1.3
18	2005-12-02	60	3.0	1.8	4.3	3.2	8.3	1.0	1.6	1.0	57.8	1.3
18	2006-12-06	63	1.4	1.0	2.7	1.0	5.5	1.0	1.7	1.0	31.0	1.0
18	2010-12-01	76	3.4	2.9	4.9	8.4	10.0	1.0	1.8	3.0	58.9	1.4
19	1980-10-26	6	2.4	1.8	3.5	2.0	8.9	1.0	1.8	1.0	54.8	1.8
19	1981-01-11	7	1.9	1.1	3.1	1.3	13.4	1.0	1.2	1.0	43.0	1.0
19	1981-08-07	8	1.0	1.0	0.6	1.0	6.2	1.0	-0.3	1.0	27.8	1.0
19	1983-04-17	10	1.4	1.0	2.6	1.0	9.1	1.0	1.5	1.0	43.9	1.0
19	1986-09-12	14	2.0	1.2	3.1	1.3	6.8	1.0	1.2	1.0	47.0	1.1
19	1988-11-07	18	1.1	1.0	2.2	1.0	4.9	1.0	1.1	1.0	32.9	1.0
19	1989-09-23	20	1.9	1.1	1.9	1.0	6.3	1.0	0.3	1.0	36.6	1.0
19	1994-09-27	27	1.8	1.1	2.4	1.0	10.9	1.0	1.0	1.0	41.1	1.0
19	1994-11-28	28	2.3	1.6	3.2	1.3	8.8	1.0	0.9	1.0	47.9	1.1
19	1995-11-21	31	1.6	1.0	2.9	1.1	9.8	1.0	1.7	1.0	35.5	1.0
19	1995-12-10	32	2.9	4.0	3.8	3.3	9.0	1.0	1.5	1.0	54.9	1.8
19	1995-12-20	33	0.8	1.0	2.3	1.0	8.5	1.0	1.9	1.2	33.6	1.0
19	1996-12-08	36	2.8	3.2	3.2	1.5	11.3	1.0	1.6	1.0	57.6	2.5
19	1996-12-24	37	2.2	1.4	3.7	2.6	7.8	1.0	1.5	1.0	49.4	1.2
19	1997-01-10	38	1.3	1.0	2.8	1.1	8.5	1.0	1.8	1.1	43.9	1.0
19	2003-10-15	50	3.2	6.2	3.7	2.7	8.6	1.0	1.3	1.0	63.6	7.3
19	2004-10-15	53	2.9	3.8	4.6	16.1	9.8	1.0	1.7	1.0	59.4	3.1
19	2005-08-31	55	2.1	1.3	3.2	1.4	6.7	1.0	1.2	1.0	49.8	1.2
19	2005-09-29	57	2.5	2.1	3.3	1.5	7.0	1.0	1.0	1.0	47.6	1.1
19	2005-11-24	58	2.5	2.1	2.6	1.0	7.8	1.0	0.9	1.0	0.0	0.0
19	2005-12-02	60	2.6	2.4	4.2	6.3	9.0	1.0	1.7	1.0	0.0	0.0
19	2006-12-06	63	1.3	1.0	2.8	1.1	5.4	1.0	1.8	1.0	0.0	0.0
19	2010-12-01	76	2.7	2.5	4.3	7.7	10.9	1.0	1.9	2.8	0.0	0.0
20	1980-10-26	6	1.7	1.4	2.7	1.8	7.1	1.0	1.1	1.3	46.3	1.0
20	1981-01-11	7	1.7	1.7	2.3	1.6	7.2	1.0	0.7	1.0	37.6	4.9
20	1989-09-23	20	1.3	1.0	1.4	1.0	7.1	1.0	0.6	1.0	43.0	1.0
20	2004-10-15	53	1.8	2.1	2.8	7.3	7.5	1.0	1.0	1.0	48.6	1.1
20	2005-08-31	55	1.3	1.0	1.5	1.0	6.6	1.0	0.7	1.0	44.4	1.0
20	2010-12-01	76	1.8	1.8	2.8	8.8	6.8	1.0	1.1	11.2	46.4	1.0

Annexe A

* Les temps de retour en caractère gras sont supérieurs ou égaux à 10 ans

Site	Date	Numéro d'événement	Hauteur significative (Hs)		Niveau d'eau modélisé au large (NEML)		Période (T02)		Niveau d'eau (Dpt)		Vitesse des vents max (WS)	
			Max (m)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (s)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (km/h)	Temps de retour
21	1980-10-26	6	0.8	2.3	1.0	4.8	6.3	1.0	0.3	4.2	48.0	1.0
21	1981-01-11	7	1.0	8.7	1.1	10.6	6.8	1.0	0.2	1.0	64.0	10.5
21	1989-09-22	20	0.7	1.7	0.7	1.0	2.1	1.0	0.2	1.0	43.4	1.0
21	1990-07-31	23	0.3	1.0	0.4	1.0	3.8	1.0	0.1	1.0	23.6	1.0
21	2004-10-13	33	0.7	1.6	0.9	2.5	8.2	1.0	0.2	1.0	50.9	1.1
21	2005-08-31	33	0.6	1.2	0.6	1.0	8.0	1.0	0.2	1.0	44.7	1.0
21	2010-12-01	76	0.7	1.3	1.0	3.0	6.4	1.0	0.3	14.3	48.1	1.0
22	1980-10-26	6	4.1	3.3	4.7	5.6	10.1	1.0	0.8	4.2	61.6	2.3
22	1981-01-11	7	4.6	6.2	4.9	8.5	11.3	1.0	0.5	1.0	58.0	1.3
22	1989-09-23	20	2.4	1.0	2.2	1.0	7.2	1.0	0.4	1.0	48.2	1.0
22	2004-10-16	33	3.0	1.1	2.9	1.0	9.1	1.0	0.7	1.0	50.8	1.0
22	2005-09-01	35	2.6	1.0	2.9	1.0	8.2	1.0	0.5	1.0	50.4	1.0
22	2010-12-04	76	2.6	1.0	3.3	1.1	9.7	1.0	0.8	3.2	51.5	1.0
23	1980-10-26	6	3.5	2.6	6.0	3.3	10.7	1.0	1.0	7.3	60.5	1.3
23	1981-01-10	7	6.1	4.6	6.5	6.0	11.6	1.0	0.7	1.0	57.4	1.0
23	1989-09-23	20	3.0	1.0	2.7	1.0	8.4	1.0	0.4	1.0	51.6	1.0
23	2004-10-16	33	3.8	1.0	3.8	1.0	9.4	1.0	0.9	1.0	48.1	1.0
23	2005-09-01	35	3.2	1.0	3.6	1.0	8.8	1.0	0.6	1.0	49.8	1.0
23	2010-12-04	76	3.4	1.0	4.3	1.0	10.0	1.0	1.0	3.6	53.4	1.0
24	1980-10-26	6	2.6	2.0	3.1	2.9	10.3	1.0	0.9	2.1	59.3	1.3
24	1981-01-11	7	2.1	1.0	2.7	1.2	13.5	1.0	0.7	1.0	55.8	1.0
24	1989-09-24	20	2.2	1.1	2.6	1.1	5.9	1.0	0.4	1.0	56.6	1.0
24	2004-10-16	33	1.3	1.0	1.4	1.0	10.2	1.0	0.8	1.0	49.1	1.0
24	2005-09-01	35	1.0	1.0	1.3	1.0	6.6	1.0	0.3	1.0	47.5	1.0
24	2010-12-05	76	1.0	1.0	1.8	1.0	12.6	1.0	0.9	2.1	52.2	1.0
25	1980-10-27	6	3.4	1.1	3.6	1.1	7.9	1.0	0.7	1.0	48.1	1.0
25	1981-01-11	7	3.8	1.7	3.9	1.4	9.3	1.0	0.5	1.0	52.5	1.0
25	1989-09-22	20	4.1	2.7	4.5	3.3	8.9	1.0	0.5	1.0	55.2	1.0
25	2010-12-09	76	2.1	1.0	2.7	1.0	7.0	1.0	0.6	1.0	37.4	1.0
26	1980-10-26	6	2.1	1.0	2.1	1.0	9.1	1.0	0.8	1.2	46.8	1.0
26	1981-01-10	7	3.2	2.5	3.8	4.8	10.4	1.0	0.6	1.0	64.6	1.4
26	1989-09-22	20	2.2	1.0	2.1	1.0	8.8	1.0	0.4	1.0	59.4	1.0
26	2004-10-16	33	1.0	1.0	1.4	1.0	8.0	1.0	0.7	1.0	35.7	1.0
26	2005-09-01	35	1.8	1.0	2.1	1.0	7.8	1.0	0.6	1.0	47.6	1.0
26	2010-12-04	76	1.1	1.0	1.6	1.0	7.7	1.0	0.8	1.5	52.3	1.0
27	1980-10-25	6	1.5	2.5	2.5	2.8	4.9	1.0	1.5	1.1	49.2	1.2
27	1981-08-19	25	1.0	1.0	1.4	1.0	5.7	1.0	0.9	1.0	42.5	1.0
27	1996-10-14	35	0.6	1.0	1.4	1.0	3.3	1.0	1.2	1.0	47.9	1.1
27	1996-12-07	36	1.7	3.4	3.1	15.3	5.2	1.0	1.4	1.0	51.3	1.6
27	1999-10-22	43	1.7	6.0	3.1	16.1	5.4	1.0	1.4	1.0	50.2	1.3
27	2000-01-25	44	0.4	1.0	1.2	1.0	4.1	1.0	1.2	1.0	33.6	1.0
27	2000-10-28	47	1.0	1.0	2.2	1.4	5.7	1.0	1.4	1.0	36.8	1.0
27	2003-10-15	50	1.7	6.0	3.1	14.9	5.5	1.0	1.4	1.0	56.7	6.3
27	2003-11-13	51	1.3	1.7	2.6	3.9	8.4	1.2	1.3	1.0	46.2	1.0
27	2005-12-01	59	1.3	1.5	2.4	2.0	4.6	1.0	1.5	1.0	40.0	1.0
27	2005-12-02	60	1.3	1.5	2.4	2.0	4.6	1.0	1.5	1.0	40.0	1.0
27	2010-12-01	76	1.5	2.6	3.2	18.5	8.2	1.1	1.7	7.1	43.4	1.0
28	1980-10-25	6	1.4	3.5	2.0	3.8	4.7	1.0	0.9	1.2	48.4	1.2
28	1981-08-19	25	0.8	1.0	1.0	1.0	5.5	1.0	0.6	1.0	40.0	1.0
28	1996-10-14	35	0.3	1.0	0.8	1.0	3.2	1.0	0.7	1.0	46.5	1.1
28	1996-12-07	36	1.7	9.1	2.5	19.6	5.0	1.0	0.8	1.0	52.1	2.7
28	1999-10-22	43	1.6	7.1	2.4	14.5	5.2	1.0	0.8	1.0	48.2	1.2
28	2000-10-18	47	0.7	1.0	1.4	1.1	3.5	1.0	0.8	1.0	34.4	1.0
28	2003-10-15	50	1.6	8.7	2.4	14.1	5.3	1.0	0.8	1.0	55.6	7.2
28	2003-11-13	51	1.2	1.9	1.9	3.3	4.9	1.0	0.8	1.0	44.9	1.0
28	2005-12-02	59	1.1	1.4	1.7	1.9	4.4	1.0	0.9	1.0	39.2	1.0
28	2005-12-02	60	1.1	1.4	1.7	1.9	4.4	1.0	0.9	1.0	39.2	1.0
28	2010-12-01	76	1.4	3.6	2.4	13.3	6.6	1.0	1.0	10.1	42.6	1.0
29	1980-10-25	6	1.5	4.0	1.8	5.9	4.8	1.0	0.5	1.0	48.4	1.1
29	1981-08-19	25	0.9	1.0	0.9	1.0	5.4	1.0	0.3	1.0	42.9	1.0
29	1996-10-14	35	0.5	1.0	0.6	1.0	3.3	1.0	0.3	1.0	37.7	1.0
29	1996-12-07	36	1.6	6.0	2.1	14.1	9.6	2.1	0.5	1.0	50.2	1.4
29	1997-12-30	40	0.8	1.0	0.8	1.0	4.6	1.0	0.4	1.0	41.2	1.0
29	2000-01-25	44	0.4	1.0	0.4	1.0	4.1	1.0	0.4	1.0	33.1	1.0
29	2000-10-29	47	0.7	1.0	1.1	1.0	6.1	1.0	0.5	1.0	36.3	1.0
29	2003-09-28	49	0.6	1.0	1.0	1.0	8.0	1.0	0.4	1.0	26.6	1.0
29	2005-12-02	59	1.1	1.2	1.4	1.5	4.3	1.0	0.5	1.0	39.3	1.0
29	2005-12-02	60	1.1	1.2	1.4	1.5	4.3	1.0	0.5	1.0	39.3	1.0
29	2010-12-01	76	1.4	3.0	2.0	10.0	9.3	1.6	0.6	5.3	42.8	1.0
29	2010-12-12	77	1.7	8.0	1.9	7.7	7.5	1.0	0.3	1.0	51.2	1.7

Annexe A

* Les temps de retour en caractère gras sont supérieurs ou égaux à 10 ans

Site	Date	Numéro d'événement	Hauteur significative (Hs)		Niveau d'eau modélisé au large (NEML)		Période (T02)		Niveau d'eau (Dpt)		Vitesse des vent max (WS)	
			Max (m)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (s)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (km/h)	Temps de retour
30	1980-10-25	6	1.2	1.1	1.7	1.1	4.2	1.0	1.0	1.0	51.3	1.0
30	1981-01-11	7	0.8	1.0	1.0	1.0	3.5	1.0	0.6	1.0	55.5	1.4
30	1991-08-20	25	0.7	1.0	0.9	1.0	6.2	1.0	0.3	1.0	54.7	1.2
30	1996-10-14	35	1.1	1.0	1.7	1.0	4.2	1.0	0.8	1.0	51.3	1.0
30	2000-10-28	46	0.7	1.0	1.6	1.0	9.1	1.0	1.0	1.0	49.6	1.0
30	2000-10-28	47	0.7	1.0	1.6	1.0	9.1	1.0	1.0	1.0	49.6	1.0
30	2005-12-02	60	0.6	1.0	1.5	1.0	3.7	1.0	1.0	1.0	39.8	1.0
30	2010-12-04	76	0.9	1.0	2.0	3.6	11.2	4.2	1.1	2.6	51.4	1.0
31	1980-10-25	6	1.9	1.3	2.3	1.1	6.0	1.0	1.2	1.0	55.3	1.0
31	1981-01-10	7	1.4	1.0	1.5	1.0	6.1	1.0	0.9	1.0	57.6	1.1
31	1991-08-19	25	2.5	3.7	2.6	1.3	6.8	1.0	0.8	1.0	65.8	3.0
31	1996-10-14	35	1.1	1.0	1.8	1.0	4.5	1.0	1.0	1.0	55.2	1.0
31	2000-10-28	46	2.6	4.6	3.5	9.3	7.9	1.0	1.2	1.0	61.1	1.9
31	2000-10-28	47	2.6	4.6	3.5	9.3	7.9	1.0	1.2	1.0	61.1	1.9
31	2005-12-02	60	1.5	1.0	2.4	1.0	6.8	1.0	1.2	1.0	46.1	1.0
31	2010-12-02	76	2.5	3.6	3.1	3.1	8.7	1.0	1.3	1.8	59.0	1.2
32	1980-10-26	6	3.0	2.4	2.9	1.3	8.2	1.0	0.9	1.0	54.5	1.1
32	1981-01-10	7	1.7	1.0	1.7	1.0	10.1	1.0	0.7	1.0	62.9	2.4
32	1991-08-19	25	3.0	2.3	3.0	1.4	7.7	1.0	0.6	1.0	67.1	4.9
32	1996-10-14	35	1.0	1.0	0.7	1.0	4.0	1.0	-0.3	1.0	36.1	1.0
32	2000-10-28	47	3.7	7.7	4.4	13.6	9.6	1.0	0.9	1.0	63.9	2.8
32	2005-12-02	60	2.1	1.0	2.9	1.3	7.6	1.0	0.9	1.0	43.7	1.0
32	2008-12-21	69	4.1	14.5	4.1	8.6	9.6	1.0	0.6	1.0	76.5	29.3
32	2010-12-01	76	3.5	4.9	3.8	5.1	9.3	1.0	1.0	1.4	58.3	1.4
33	1980-10-09	5	1.4	1.0	1.6	1.0	6.2	1.0	0.2	1.0	38.7	1.0
33	1980-10-26	6	4.1	5.7	3.8	2.9	8.8	1.0	0.5	1.0	58.8	1.3
33	1981-01-11	7	1.7	1.0	1.9	1.0	10.9	1.0	0.3	1.0	66.4	4.3
33	1983-10-25	11	1.6	1.0	1.7	1.0	8.7	1.0	0.5	1.0	31.5	1.0
33	1988-09-03	16	2.1	1.0	2.0	1.0	7.8	1.0	0.3	1.0	41.0	1.0
33	1988-11-21	17	2.3	1.0	2.8	1.1	9.0	1.0	0.4	1.0	55.6	1.1
33	1990-05-21	22	2.1	1.0	2.4	1.0	8.3	1.0	0.5	1.0	37.3	1.0
33	1991-08-19	25	3.0	1.3	3.0	1.2	7.7	1.0	0.3	1.0	66.6	4.4
33	1991-11-11	26	3.1	1.4	3.2	1.4	8.8	1.0	0.5	1.0	58.4	1.3
33	1996-10-14	35	1.4	1.0	1.4	1.0	6.4	1.0	0.3	1.0	38.5	1.0
33	1998-10-30	41	3.3	1.7	3.4	1.7	8.8	1.0	0.3	1.0	66.8	4.6
33	1999-03-16	42	0.9	1.0	1.2	1.0	11.7	1.0	0.5	1.0	39.3	1.0
33	2000-10-28	46	3.5	2.3	3.8	2.9	9.8	1.0	0.5	1.0	65.6	3.7
33	2008-12-21	69	4.0	4.9	4.1	4.7	10.0	1.0	0.3	1.0	74.4	21.8
33	2009-12-21	72	1.9	1.0	2.2	1.0	8.1	1.0	0.4	1.0	35.7	1.0
33	2010-12-02	76	3.8	3.6	4.2	5.2	9.4	1.0	0.6	1.1	58.2	1.3
33	2010-12-12	77	4.5	10.8	4.7	12.7	9.8	1.0	0.3	1.0	59.6	1.4
33	2010-12-20	79	2.7	1.1	3.4	1.7	9.9	1.0	0.7	56.3	59.2	1.4
34	1980-10-09	5	1.4	1.0	1.6	1.0	6.1	1.0	0.2	1.0	38.7	1.0
34	1980-10-26	6	4.1	5.7	3.8	2.9	8.8	1.0	0.5	1.0	58.8	1.3
34	1981-01-11	7	1.7	1.0	1.9	1.0	10.9	1.0	0.3	1.0	66.4	4.3
34	1983-10-25	11	1.6	1.0	1.7	1.0	8.7	1.0	0.5	1.0	31.5	1.0
34	1988-09-03	16	2.1	1.0	2.0	1.0	7.8	1.0	0.3	1.0	41.0	1.0
34	1988-11-21	17	2.3	1.0	2.8	1.1	9.0	1.0	0.4	1.0	55.6	1.1
34	1990-05-21	22	2.1	1.0	2.4	1.0	8.3	1.0	0.5	1.0	37.3	1.0
34	1991-08-19	25	3.0	1.3	3.0	1.2	7.7	1.0	0.3	1.0	66.6	4.4
34	1991-11-11	26	3.1	1.4	3.2	1.4	8.8	1.0	0.5	1.0	58.4	1.3
34	1996-10-14	35	1.4	1.0	1.4	1.0	6.4	1.0	0.3	1.0	38.5	1.0
34	1998-10-30	41	3.3	1.7	3.4	1.7	8.8	1.0	0.3	1.0	66.8	4.6
34	1999-03-16	42	0.9	1.0	1.2	1.0	11.7	1.0	0.5	1.0	39.3	1.0
34	2000-10-28	46	3.5	2.3	3.8	2.9	9.8	1.0	0.5	1.0	65.6	3.7
34	2000-10-28	47	3.5	2.3	3.8	2.9	9.8	1.0	0.5	1.0	65.6	3.7
34	2008-12-21	69	4.0	4.9	4.1	4.7	10.0	1.0	0.3	1.0	74.4	21.8
34	2009-12-21	72	1.9	1.0	2.2	1.0	8.1	1.0	0.4	1.0	35.7	1.0
34	2010-12-02	76	3.8	3.6	4.2	5.2	9.4	1.0	0.6	1.1	58.2	1.3
34	2010-12-12	77	4.5	10.8	4.7	12.7	9.8	1.0	0.3	1.0	59.6	1.4
34	2010-12-20	79	2.7	1.1	3.4	1.7	9.9	1.0	0.7	56.3	59.2	1.4

Annexe A

* Les temps de retour en caractère gras sont supérieurs ou égaux à 10 ans

Site	Date	Numéro d'événement	Hauteur significative (Hs)		Niveau d'eau modélisé au large (NEML)		Période (T02)		Niveau d'eau (Opt)		Vitesse des vents max (WS)	
			Max (m)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (s)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (km/h)	Temps de retour
35	1980-10-08	5	1.9	1.0	2.1	1.0	7.0	1.0	0.3	1.0	42.5	1.0
35	1980-10-26	6	3.4	12.4	2.9	2.0	9.2	1.0	0.8	1.0	66.7	3.7
35	1981-01-11	7	1.2	1.0	1.5	1.0	5.8	1.0	0.5	1.0	48.8	1.0
35	1983-10-25	11	0.8	1.0	1.4	1.0	6.8	1.0	0.8	1.0	32.4	1.0
35	1983-11-17	12	2.4	1.4	2.5	1.1	8.8	1.0	0.4	1.0	51.0	1.0
35	1990-05-21	22	1.0	1.0	1.4	1.0	7.5	1.0	0.5	1.0	33.7	1.0
35	1991-08-20	25	1.3	1.0	1.2	1.0	7.3	1.0	0.1	1.0	59.9	1.4
35	1995-10-15	30	2.2	1.1	1.8	1.0	7.1	1.0	0.4	1.0	49.3	1.0
35	1995-12-10	32	2.8	3.3	3.4	8.2	8.9	1.0	0.8	1.0	51.5	1.0
35	1996-10-14	35	1.8	1.0	2.1	1.0	7.0	1.0	0.5	1.0	40.6	1.0
35	1998-10-27	41	2.1	1.1	2.0	1.0	7.7	1.0	0.6	1.0	61.0	1.7
35	2000-10-28	47	2.2	1.1	2.7	1.4	8.9	1.0	0.7	1.0	64.5	3.4
35	2006-10-28	61	3.2	8.4	3.4	7.6	9.3	1.0	0.6	1.0	66.2	5.1
35	2007-12-16	65	1.9	1.0	2.1	1.0	9.2	1.0	0.3	1.0	39.0	1.9
35	2010-03-24	74	1.4	1.0	2.1	1.0	8.2	1.0	0.7	1.0	47.6	1.0
35	2010-12-04	76	2.1	1.0	2.8	1.7	8.6	1.0	0.9	1.0	56.0	1.0
35	2010-12-13	77	3.2	7.4	3.7	17.3	9.4	1.0	0.5	1.0	61.0	1.7
35	2010-12-20	78	1.8	1.0	2.7	1.6	7.9	1.0	1.1	1.0	58.2	1.2
35	2010-12-20	79	1.8	1.0	2.7	1.6	7.9	1.0	1.1	1.0	58.2	1.2
36	1980-10-26	6	4.0	1.8	3.7	1.2	9.8	1.0	0.8	1.0	64.1	7.0
36	1981-01-11	7	2.7	1.0	2.9	1.0	11.2	1.0	0.2	1.0	59.4	2.3
36	1983-10-25	11	2.0	1.0	2.1	1.0	8.9	1.0	0.7	1.0	30.4	1.0
36	1990-05-21	22	2.7	1.0	3.1	1.0	8.5	1.0	0.8	1.0	30.7	1.0
36	1991-06-13	24	1.7	1.0	2.5	1.0	6.9	1.0	1.0	1.0	25.4	4.0
36	1991-08-20	25	3.5	1.2	3.4	1.1	8.1	1.0	0.4	1.0	55.4	1.2
36	1996-10-14	35	0.9	1.0	1.4	1.0	7.4	1.0	0.5	1.0	21.4	1.0
36	1997-03-16	39	4.2	2.5	4.1	1.7	9.1	1.0	0.5	1.0	59.0	2.1
36	1998-10-29	41	4.2	2.4	4.5	2.7	9.3	1.0	0.5	1.0	56.4	1.4
36	1999-03-16	42	1.6	1.0	1.9	1.0	12.8	1.2	0.7	1.0	47.9	1.0
36	2010-12-02	76	4.3	2.7	4.8	3.8	9.9	1.0	0.9	1.0	52.1	1.0
36	2010-12-13	77	5.3	12.2	5.7	14.9	10.5	1.0	0.5	1.0	58.2	1.8
37	1980-10-09	5	0.6	1.0	0.9	1.0	7.6	1.0	0.3	1.0	35.1	1.0
37	1980-10-26	6	2.7	11.7	2.3	2.0	9.2	1.0	0.8	1.0	57.7	4.7
37	1981-01-11	7	0.8	1.0	1.0	1.0	11.3	1.0	0.5	1.0	53.2	1.5
37	1983-10-25	11	0.6	1.0	1.2	1.0	9.7	1.0	0.7	1.0	26.5	1.0
37	1990-05-21	22	0.8	1.0	1.2	1.0	8.6	1.0	0.6	1.0	24.5	1.0
37	1991-06-13	24	0.6	1.0	1.2	1.0	7.2	1.0	1.0	1.0	10.7	4.3
37	1991-08-20	25	1.4	1.1	1.4	1.0	8.0	1.0	0.1	1.0	43.6	1.0
37	1996-01-27	34	1.6	1.2	2.0	1.2	10.3	1.0	0.3	1.0	64.7	42.7
37	1996-10-14	35	0.7	1.0	1.1	1.0	7.3	1.0	0.5	1.0	33.8	1.0
37	1998-10-29	41	1.4	1.0	1.8	1.0	9.4	1.0	0.5	1.0	48.3	1.0
37	1999-03-16	42	0.4	1.0	1.0	1.0	12.2	1.3	0.7	1.0	46.1	1.0
37	2010-12-01	76	2.1	2.5	2.7	3.8	9.2	1.0	0.8	1.0	43.3	1.0
37	2010-12-13	77	2.6	8.7	3.1	17.1	9.4	1.0	0.5	1.0	53.3	1.6
38	1980-10-09	5	1.4	1.0	1.6	1.0	7.9	1.0	0.3	1.0	41.1	1.0
38	1980-10-26	6	3.1	3.7	4.6	1.7	10.0	1.0	0.8	1.0	66.2	7.4
38	1981-01-11	7	3.0	1.0	3.1	1.0	11.4	1.0	0.2	1.0	38.8	1.4
38	1983-10-25	11	2.3	1.0	2.5	1.0	8.9	1.0	0.8	1.0	31.0	1.0
38	1990-05-21	22	2.9	1.0	3.4	1.0	8.7	1.0	0.8	1.0	30.6	1.0
38	1991-06-13	24	2.1	1.0	2.9	1.0	6.3	1.0	1.1	1.0	49.2	1.0
38	1991-08-20	25	3.6	1.1	3.6	1.0	8.0	1.0	0.6	1.0	54.0	1.0
38	1996-01-28	34	3.7	1.1	4.1	1.2	11.0	1.0	0.4	1.0	72.0	38.0
38	1996-10-14	35	1.5	1.0	2.0	1.0	7.7	1.0	0.6	1.0	38.8	1.0
38	1998-10-30	41	4.6	2.0	4.9	2.2	9.1	1.0	0.5	1.0	56.7	1.1
38	1999-03-16	42	2.1	1.0	2.3	1.0	12.9	1.3	0.8	1.0	49.4	1.0
38	2010-12-02	76	4.7	2.3	4.9	2.2	9.9	1.0	0.9	1.0	51.2	1.0
38	2010-12-13	77	5.8	9.0	6.2	10.8	10.5	1.0	0.6	1.0	60.0	1.7
39	1980-05-08	2	3.7	1.2	3.7	1.2	10.7	1.0	0.1	1.0	43.3	1.0
39	1980-10-26	6	4.8	2.9	4.7	2.6	10.7	1.0	0.2	1.0	65.7	5.3
39	1981-01-11	7	3.0	1.0	3.0	1.0	12.1	1.0	0.1	1.0	36.7	1.1
39	1983-10-25	11	2.4	1.0	2.3	1.0	10.0	1.0	0.2	1.0	30.1	1.0
39	1990-05-21	22	2.7	1.0	2.8	1.0	8.9	1.0	0.2	1.0	28.5	1.0
39	1995-12-10	32	4.5	2.2	4.7	2.6	12.0	1.0	0.2	1.0	51.8	1.0
39	1996-10-15	35	1.4	1.0	1.5	1.0	6.5	1.0	0.1	1.0	58.5	1.2
39	1998-10-30	41	4.4	1.8	4.4	1.9	9.7	1.0	0.1	1.0	55.0	1.0
39	1999-03-16	42	2.7	1.0	2.7	1.0	13.3	1.0	0.2	1.0	47.4	1.0
39	2010-12-02	76	4.6	2.3	4.6	2.2	10.5	1.0	0.2	1.0	48.0	1.0

Annexe A

* Les temps de retour en caractère gras sont supérieurs ou égaux à 10 ans

Site	Date	Numéro d'événement	Hauteur significative (Hs)		Niveau d'eau modélisé au large (NEML)		Période (T02)		Niveau d'eau (Dpt)		Vitesse des vent max (WS)	
			Max (m)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (s)	Temps de retour	Max (m)	Temps de retour	Max (km/h)	Temps de retour
40	1980-05-08	2	3.0	1.0	3.4	1.0	10.8	1.0	0.8	1.0	44.9	1.0
40	1980-10-09	3	1.7	1.0	2.0	1.0	6.9	1.0	0.7	1.0	44.2	1.0
40	1980-10-26	6	2.96	1.0	3.77	1.3	11	1.0	1.00	1.0	62.7	1.3
40	1981-01-11	7	2.45	1.0	2.32	1.0	12	1.0	0.71	1.0	54.2	1.0
40	1983-10-25	11	2.07	1.0	2.57	1.0	9	1.0	0.94	1.0	29.3	1.0
40	1990-05-21	22	2.07	1.0	2.73	1.0	8	1.0	0.86	1.0	27.1	1.0
40	1995-12-10	32	3.09	1.1	4.00	1.8	11	1.0	0.98	1.0	52.4	1.0
40	1996-10-13	35	3.04	1.0	3.79	1.4	7	1.0	0.92	1.0	63.1	1.6
40	1998-10-30	41	3.78	2.5	4.14	2.2	9	1.0	0.60	1.0	54.0	1.0
40	1999-03-16	42	2.04	1.0	2.20	1.0	13	1.1	0.95	1.0	52.2	1.0
40	2010-12-02	76	3.48	1.5	4.16	2.3	10	1.0	1.07	1.0	47.0	1.0
41	1980-05-09	2	1.65	1.0	2.28	1.0	7	1.0	0.75	1.0	40.7	1.0
41	1980-10-09	3	2.41	1.0	2.77	1.0	6	1.0	0.78	1.0	48.9	1.0
41	1980-10-26	6	1.52	1.0	2.14	1.0	9	1.0	1.11	1.0	48.9	1.0
41	1980-05-21	22	1.26	1.0	1.87	1.0	8	1.0	0.79	1.0	26.6	1.0
41	1996-10-13	35	3.42	2.4	4.25	5.1	7	1.0	0.96	1.0	59.8	1.3
41	1998-10-30	41	2.72	1.0	3.01	1.0	7	1.0	0.71	1.0	48.0	1.0
41	2010-12-04	76	2.20	1.0	3.12	1.0	10	1.0	1.18	1.0	47.6	1.0
42	1980-04-23	2	1.46	1.0	2.10	1.0	5	1.0	0.93	1.0	38.9	1.0
42	1980-10-09	5	2.21	1.0	2.93	1.0	6	1.0	1.00	1.0	48.8	1.0
42	1980-10-26	6	2.26	1.1	3.33	1.1	7	1.0	1.00	1.0	51.5	1.0
42	1996-10-13	35	3.18	2.7	4.29	3.7	7	1.0	1.25	1.0	55.8	1.1
42	1998-10-30	41	2.61	1.1	2.98	1.0	7	1.0	0.96	1.0	47.0	1.0
42	1999-03-16	42	0.71	1.0	2.01	1.0	5	1.0	1.33	1.0	41.9	1.0
42	2010-12-04	76	2.28	1.0	3.47	1.3	6	1.0	1.56	1.0	49.2	1.0
43	1980-10-27	6	3.76	1.0	3.89	1.0	7	1.0	0.14	1.0	65.6	1.0
43	2008-02-02	66	2.70	1.0	2.46	1.0	6	1.0	-0.18	1.0	61.4	1.0
43	2008-12-22	68	3.09	1.9	5.16	1.0	8	1.0	0.11	1.0	83.8	1.1
43	2009-08-27	71	3.62	1.0	3.71	1.0	7	1.0	0.11	1.0	56.6	1.0
43	2010-01-03	73	3.41	1.0	3.47	1.0	7	1.0	0.20	1.0	67.6	1.0
44	1980-10-26	6	2.09	1.0	2.29	1.0	4	1.0	0.29	1.0	78.9	1.0
44	1981-01-10	7	2.08	1.0	2.32	1.0	9	1.0	0.26	1.0	76.3	1.0
44	2008-02-02	66	1.32	1.0	1.41	1.0	8	1.0	0.15	1.0	56.4	1.0
44	2008-12-21	68	3.39	5.9	3.80	1.0	9	1.0	0.41	1.0	89.4	2.0
44	2010-01-02	73	3.62	12.8	4.26	1.0	8	1.0	0.64	1.0	90.3	2.1
44	2010-03-31	75	1.75	1.0	1.91	1.0	4	1.0	0.33	1.0	51.3	1.0
44	2010-12-02	76	3.00	1.9	3.21	1.0	9	1.0	0.32	1.0	75.1	1.0
45	1980-10-26	6	2.46	1.3	3.30	1.0	6	1.0	1.33	1.0	47.0	1.0
45	1981-01-11	7	1.67	1.0	2.51	1.0	5	1.0	0.90	1.0	47.9	1.1
45	2010-12-04	76	1.35	1.0	2.60	1.0	5	1.0	1.43	1.0	46.0	1.0

Annexe A

* Les temps de retour en caractère gras sont supérieurs ou égaux à 10 ans