# 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 III : rapport final

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec

Sous la direction de Pascal Bernatchez, Ph. D.

Novembre 2020

## CHAIRE DE RECHERCHE EN GÉOSCIENCE CÔTIÈRE



Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières | UQAR







### ÉQUIPE DE RÉALISATION

### DIRECTION ET RECHERCHE

Pascal Bernatchez, Ph. D., Géomorphologie côtière et télédétectionResponsable du projetProfesseur titulaire de la Chaire de recherche en géoscience côtièreLaboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)Département de biologie, chimie et géographieUniversité du Québec à RimouskiCourriel : pascal\_bernatchez@uqar.caSite web : <a href="https://ldgizc.uqar.ca/Web">https://ldgizc.uqar.ca/Web</a>

### ÉQUIPE DE RECHERCHE

**Marion Bandet**, Ph. D. Ocean and Resources Engineering, agente de recherche. Maintenance des AWACs, traitement et analyse des données hydrodynamiques; rédaction. Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

**Charles Caulet**, Ph. D. Océanographie, postdoctorant. Modélisation côtière et analyse des évènements historiques; rédaction. Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

**Jérémy Baudry**, M. Sc. Océanographie physique, auxiliaire de recherche. Simulations du modèle de vagues WW3 pour 2015-2017; validation du modèle de vagues; rédaction. Laboratoire de physique des océans, Institut des sciences de la mer, UQAR.

**David Didier**, Ph. D. Science de l'Environnement, Professeur. Relevés DGPS, caméra AXIS. Université du Québec à Rimouski.

**Denys Dubuc,** B. Sc. Géographie, auxiliaire de recherche. Relevés DGPS, gestion de l'équipement et installation de l'instrumentation. Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

**Nicholas Marion**, B. Sc. Géographie, auxiliaire de recherche. Relevés Lidars, traitement des données Lidar, Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

**Renaud McKinnon**, M. Sc., auxiliaire de recherche. Relevés DGPS, gestion de l'équipement et installation de l'instrumentation. Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

**Catherine Paul-Hus**, M. Env., auxiliaire de recherche. Intégration des données du modèle de vagues sur la plateforme SIGEC. Chaire de recherche en géoscience côtière (LDGIZC), UQAR.

James Caveen, B. Sc. Météorologie, analyste de l'informatique. Implémentation et gestion des ressources de calcul haute-performance dédiées au projet. Institut des sciences de la mer, UQAR.

**Caroline Sévigny**, Ph. D. Océanographie physique, Spécialiste en Sciences Physiques. Implémentation des interactions vague-glace dans le modèle de vagues WW3. Environnement et Changement Climatique Canada.

**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. Institut des sciences de la mer, UQAR.

**Dany Dumont**, Ph. D. Sciences de l'eau, professeur-chercheur. Océanographie physique, Laboratoire de physique des océans, Institut des sciences de la mer, 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**

Bandet, M., Caulet, C., Baudry, J., Didier, D., Dubuc, D., Marion, N., McKinnon, R., Paul-Hus, C., Caveen, J., Sévigny, C., Senneville, S., Dumont, D. et Bernatchez, P., 2020. 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 III : 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 2020, 259 p.

# Table des matières

1	MISE	EN CONT	TEXTE ET OBJECTIFS GÉNÉRAUX	1
2	QUANTIFIER LES PARAMÈTRES MORPHODYNAMIQUES SUR QUATRE AUTRES SECTEURS TÉMOINS REPRÉSENTATIFS DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE DU SAINT-LAURENT			
	2.1	SITES TÉN	/IOINS	3
	2.2	SUIVI DES	CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES	5
		2.2.1	Instruments hydrodynamiques	7
		2.2.2	Stratégie d'implantation des instruments	9
	2.3	Post-tra	AITEMENT DES DONNÉES HYDRODYNAMIQUES	9
		2.3.1	Post-traitement des données de profileurs de courants AWAC	9
		2.3.2	Post-traitement des données de capteurs de pression	
		2.3.3	Données hydrodynamiques récoltées aux sites instrumentés	
		2.3.4 courant	Données auxiliaires, angles d'inclinaison et intensités acoustiques de chaque omètre aux sites témoins	
		2.3.5	Climatologie des courants et des vagues aux sites témoins	39
		2.3.6	Exemple de données de capteur de pression	113
	2.4	Modèle	DE VAGUES WAVEWATCH III POUR 2015-2017	114
		2.4.1	Description de la méthode	114
		2.4.2	Description du modèle, forçages et conditions aux frontières	114
		2.4.3	Sorties et format de fichier	116
		2.4.4	Contexte des données	122
		2.4.5	Protocole de validation	125
		2.4.6	Résultats de la validation	129
		2.4.7	Synthèse générale	183
	2.5	CLIMATO	LOGIE DES TEMPÊTES PASSÉES ET FUTURES	184
		2.5.1	Description de la méthode	184
		2.5.2	Climatologie des tempêtes pour la période 1980-2017	185
		2.5.3	Climatologie des tempêtes pour la période 2041-2100	193
		2.5.4	Évolution de la couverture des glaces	194
		2.5.5	Synthèse	197
	2.6	SUIVI SAIS	SONNIER DE LA MORPHOLOGIE DE LA CÔTE	198
		2.6.1	Plateforme SMLT	198
		2.6.2	Levés DGPS	199
		2.6.3	Caméras vidéo	200
		2.6.4	Lidar bathymétrique	201

		2.6.5	Bathymétrie multifaisceaux	201
	2.7 QUANTIFICATION DES PARAMÈTRES MORPHODYNAMIQUES SUR LES SITES TÉMOINS			204
		2.7.1	Sites de la péninsule de Manicouagan	204
		2.7.2	Site de Maria	206
		2.7.3	Site de Chandler	207
		2.7.4	Site de Longue-Pointe-de-Mingan	208
		2.7.5	Sites des Îles-de-la-Madeleine	209
		2.7.6	Évolutions de l'état morphodynamique du littoral	212
3	VALIDER LA CAPACITÉ DE MODÈLES NUMÉRIQUES À REPRODUIRE LES VITESSES DE RECUL DU PASSÉ POUR S'ASSURER DE BIEN MODÉLISER LES ZONES EXPOSÉES À L'ÉROSION ET À LA SUBMERSION POUR LE FUTUR			R 214
3.1 MODÉLISATION NUMÉRIQUE MULTI-ÉCHELLE DU LITTORAL			ATION NUMÉRIQUE MULTI-ÉCHELLE DU LITTORAL	214
	3.2	VALIDATIO	DN HYDRODYNAMIQUE DU MODÈLE XBEACH SUR LES SITES MODESCO	216
		3.2.1	Protocole de validation, application à Pointe-Lebel	216
	3.3	SUIVI DES	ÉVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES	233
		3.3.1	Calibration du modèle et application à Pointe-Lebel	233
	3.4		ON	247
4	DÉVEL D'EAU	LOPPER U J ET DE V	IN ATLAS NUMÉRIQUE WEB POUR DIFFUSER LES DONNÉES MODÉLISÉES DE NIVEAUX AGUES DE L'EGSL	249
5	CONC	LUSION		253
RÉF	ÉRENC	ES		255
6	ANNE	XE		258
	6.1	DESCRIPT	ION DES PARAMÈTRES MORPHODYNAMIQUES	258
	6.2	Résumé d	DES PARAMÈTRES STATISTIQUES UTILISÉS	259

# Liste des figures

FIGURE 1 : LOCALISATION DES DIFFÉRENTS SITES D'ÉTUDE DU PROJET MODESCO
Figure 2 : Présentation d'un AWAC (a) prêt au déploiement et (b) dénudé de sa coquille protectrice anti-chalut en plastique propylène, montrant les deux caissons de batteries (en bleu) et la grille d'acier permettant le lestage de l'instrument au fond de l'eau
FIGURE 3 : A) SÉRIE DE CAPTEURS DE PRESSION RBR ET B) EXEMPLE D'INSTALLATION SUR ROC ET C) EN MILIEU SABLEUX
Figure 4 : Exemple de stratégie de placement de l'AWAC et des capteurs de pression entre le large et les zones prélittorale et intertidale
Figure 5 : Données de batteries, vitesse du son, pression et température des AWACs pour différentes périodes de déploiement aux sites témoins; a) Longue-Pointe-de-Mingan b) Pointe-Lebel c) Maria d) Chandler e) Baie-de- Plaisance f) Pointe-aux-Loups
FIGURE 6 : DONNÉES CAP, ROULIS ET TANGAGE DES AWACS (RÉF. NORD MAGNÉTIQUE) POUR DIFFÉRENTES PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT AUX SITES TÉMOINS; A) LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B) POINTE-LEBEL C) MARIA D) CHANDLER E) BAIE-DE-PLAISANCE F) POINTE-AUX- LOUPS
FIGURE 7 : INTENSITÉ ACOUSTIQUE DES TROIS FAISCEAUX DE L'AWAC DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN PENDANT SON DÉPLOIEMENT HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017
Figure 8 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Pointe-Lebel pendant son déploiement printemps - automne 2017
Figure 9 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Maria pendant son déploiement hiver 2017 – printemps 2018
Figure 10 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Chandler pendant son déploiement printemps - automne   2018
FIGURE 11 : INTENSITÉ ACOUSTIQUE DES TROIS FAISCEAUX DE L'AWAC DE BAIE-DE-PLAISANCE PENDANT SON DÉPLOIEMENT HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019
Figure 12 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Pointe-aux-Loups pendant son déploiement printemps - Automne 2019
FIGURE 13 : COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 14 : COMPOSANTES DU COURANT MOYEN (MOYENNÉ SUR LA HAUTEUR D'EAU) DANS CHAQUE PLAN 2D (NORD VS EST, VERTICALE VS EST ET VERTICALE VS NORD) ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 15 : ANOMALIES DES COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 16 : ZOOM SUR UNE PARTIE DES ANOMALIES DES COMPOSANTES DU COURANT POUR LA PÉRIODE FIN AVRIL À FIN MAI 2016 AU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN
Figure 17 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Longue-Pointe-de-Mingan; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019

FIGURE 18 : A) DÉTAIL DE LA POSITION DE L'AWAC DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN (TRIANGLE JAUNE) ET B) COURANTS MOYENS ANNUELS (MOYENNÉS SUR LA HAUTEUR D'EAU) À LA POSITION DE L'AWAC (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)
Figure 19 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Longue-Pointe-de- Mingan; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique)
FIGURE 20 : DISTRIBUTION ANNUELLE DES CARACTÉRISTIQUES DE VAGUES AINSI QUE LEURS FONCTIONS DE DISTRIBUTION CUMULÉES; A) HAUTEUR DE VAGUE SIGNIFICATIVE, B) PÉRIODE PIC, C) DIRECTION DU PIC (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE), D) PÉRIODE MOYENNE (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE), E) DIRECTION MOYENNE POUR LE SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN
Figure 21 : Distribution annuelle de TP et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Longue-Pointe-de- Mingan pour la période d'octobre 2015 à mai 2019
FIGURE 22 : CARACTÉRISTIQUES ANNUELLES DES VAGUES À L'AWAC DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN; A) HS (HAUTEUR SIGNIFICATIVE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES ET B) TP (PÉRIODE DU PIC D'ÉNERGIE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)
FIGURE 23 : DISTRIBUTION SAISONNIÈRE DE HS-TP ENTRE OCTOBRE 2015 ET MAI 2019 À L'AWAC DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN. 51
FIGURE 24 : CARACTÉRISTIQUES SAISONNIÈRES DES VAGUES À L'AWAC DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN; A) C) E) ET G) HS (HAUTEUR SIGNIFICATIVE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES; B) D) F) ET H) TP (PÉRIODE DU PIC D'ÉNERGIE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGR.)
Figure 25 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-Lebel; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019 54
FIGURE 26 : COMPOSANTES DU COURANT MOYEN (MOYENNÉ SUR LA HAUTEUR D'EAU) DANS CHAQUE PLAN 2D (NORD VS EST, VERTICALE VS EST ET VERTICALE VS NORD) ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE POINTE-LEBEL; A) HIVER 2016 - PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 27 : ANOMALIES DES COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE POINTE-LEBEL; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 - PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019 
Figure 28 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période mi-février à début avril 2018 au site de Pointe-Lebel
Figure 29 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Pointe-Lebel; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019
Figure 30 : A) Détail de la position de l'AWAC de Pointe-Lebel (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique)
Figure 31 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Pointe-Lebel; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique)
Figure 32 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; A) Hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique) d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique) pour le site de Pointe-Lebel
Figure 33 : Distribution annuelle de TP et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Pointe-Lebel pour la période de juin 2016 à mai 2019
Figure 34 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Pointe-Lebel; a) Hs (hauteur significative) en fonction de La direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique)

FIGURE 36 : CARACTÉRISTIQUES SAISONNIÈRES DES VAGUES À L'AWAC DE POINTE-LEBEL: A) C) E) ET G) HS (HAUTEUR SIGNIFICATIVE) EN
FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES: B) D) F) ET H) TP (PÉRIODE DU PIC D'ÉNERGIE) EN
FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE).

FIGURE 38 : COMPOSANTES DU COURANT MOYEN (MOYENNÉ SUR LA HAUTEUR D'EAU) DANS CHAQUE PLAN 2D (NORD VS EST, VERTICALE
vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-aux-Loups; a)
PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 B) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 C) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019

FIGURE 42 : A) DÉTAIL DE LA POSITION DE L'AWAC DE POINTE-AUX-LOUPS (TRIANGLE JAUNE) ET B) COURANTS MOYENS A	NNUELS
(MOYENNÉS SUR LA HAUTEUR D'EAU) À LA POSITION DE L'AWAC (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)	71
FIGURE 43 : COURANTS MOYENS SAISONNIERS (MOYENNÉS SUR LA HAUTEUR D'EAU) À LA POSITION DE L'AWAC DE POINTE-AUX-LO	OUPS; A)
HIVER B) PRINTEMPS C) ÉTÉ D) AUTOMNE (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)	71

FIGURE 46 : CARACTÉRISTIQUES ANNUELLES DES VAGUES À L'AWAC DE POINTE-AUX-LOUPS; A) HS (HAUTEUR SIGNIFICATIVE) EN FONCTION
DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES ET B) TP (PÉRIODE DU PIC D'ÉNERGIE) EN FONCTION DE LA DIRECTION
MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)

Figure 52 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes de courants pour la période juillet à début août 2018 au site de Baie-de-Plaisance
Figure 53 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Baie-de-Plaisance; a) hiver 2017 – printemps 2018 b) printemps – automne 2018 c) hiver 2018 – printemps 2019 d) printemps – automne 2019
FIGURE 54 : A) DÉTAIL DE LA POSITION DE L'AWAC DE BAIE-DE-PLAISANCE (TRIANGLE JAUNE) ET B) COURANTS MOYENS ANNUELS (MOYENNÉS SUR LA HAUTEUR D'EAU) À LA POSITION DE L'AWAC (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)
Figure 55 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Baie-de-Plaisance; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique)
FIGURE 56 : DISTRIBUTION ANNUELLE DES CARACTÉRISTIQUES DE VAGUES AINSI QUE LEURS FONCTIONS DE DISTRIBUTION CUMULÉES; A) HAUTEUR DE VAGUE SIGNIFICATIVE B) PÉRIODE PIC C) DIRECTION DU PIC (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE) D) PÉRIODE MOYENNE E) DIRECTION MOYENNE (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE POUR LE SITE DE BAIE-DE-PLAISANCE
FIGURE 57 : DISTRIBUTION ANNUELLE DE TP ET HS (RELATIVE À LA FRÉQUENCE D'OCCURRENCE) À L'AWAC DE BAIE-DE-PLAISANCE POUR LA PÉRIODE DE DÉCEMBRE 2017 À DÉCEMBRE 2019
FIGURE 58 : CARACTÉRISTIQUES ANNUELLES DES VAGUES À L'AWAC DE BAIE-DE-PLAISANCE; A) HS (HAUTEUR SIGNIFICATIVE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES ET B) TP (PÉRIODE DU PIC D'ÉNERGIE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)
FIGURE 59 : DISTRIBUTION SAISONNIÈRE DE HS-TP ENTRE OCTOBRE 2015 ET MAI 2019 À L'AWAC DE BAIE-DE-PLAISANCE
FIGURE 60 : CARACTÉRISTIQUES SAISONNIÈRES DES VAGUES À L'AWAC DE BAIE-DE-PLAISANCE; A) C) E) ET G) HS (HAUTEUR SIGNIFICATIVE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES; B) D) F) ET H) TP (PÉRIODE DU PIC D'ÉNERGIE) EN FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)
FIGURE 61 : COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE MARIA; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 62 : COMPOSANTES DU COURANT MOYEN (MOYENNÉ SUR LA HAUTEUR D'EAU) DANS CHAQUE PLAN 2D (NORD VS EST, VERTICALE VS EST ET VERTICALE VS NORD) ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE MARIA; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 63 : ANOMALIES DES COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE MARIA; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
Figure 64 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période fin octobre à fin novembre 2019 au site de Maria
FIGURE 65 : INTENSITÉ ET DIRECTION DU COURANT POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE MARIA; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019
FIGURE 66 : A) DÉTAIL DE LA POSITION DE L'AWAC DE MARIA (TRIANGLE JAUNE) ET B) COURANTS MOYENS ANNUELS (MOYENNÉS SUR LA HAUTEUR D'EAU) À LA POSITION DE L'AWAC (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)
Figure 67 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Maria; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique)
Figure 68 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) Hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique) d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique) pour le site de Maria
FIGURE 69 : DISTRIBUTION ANNUELLE DE TP ET HS (RELATIVE À LA FRÉQUENCE D'OCCURRENCE) À L'AWAC DE MARIA POUR LA PÉRIODE DE NOVEMBRE 2015 À JUIN 2018

FIGURE 70 : CARACTÉRISTIQUES ANNUELLES DES VAGUES À L'AWAC DE MARIA; A) HS (HAUTEUR SIGNIFICAT	IVE) EN FONCTION DE LA
direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique) et b) TP (périoi	de du pic d'énergie) en
FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES (RÉF. NORD GÉOGRAPHIQUE)	

FIGURE 73 : COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE CHANDLER; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019 ...... 102

FIGURE 75 : ANOMALIES DES COMPOSANTES DU COURANT DANS LES DIRECTIONS EST, NORD ET VERTICALE ENREGISTRÉES PAR L'AWAC POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE CHANDLER; A) HIVER 2016 – PRINTEMPS 2017 B) PRINTEMPS – AUTOMNE 2017 C) HIVER 2017 – PRINTEMPS 2018 D) PRINTEMPS – AUTOMNE 2018 E) HIVER 2018 – PRINTEMPS 2019 F) PRINTEMPS – AUTOMNE 2019 ... 104

FIGURE 76 : ZOOM SUR UNE PARTIE DES ANOMALIES DES COMPOSANTES DU COURANT POUR LA PÉRIODE DÉBUT SEPTEMBRE À M	I-OCTOBRE
2019 AU SITE DE CHANDLER	105

FIGURE 77 : INTENSITÉ ET DIRECTION DU COURANT POUR CHAQUE DÉPLOIEMENT AU SITE DE CHANDLER; A)	HIVER 2016 - PRINTEMPS 2017
в) printemps — automne 2017 c) hiver 2017 — printemps 2018 d) printemps — automne 20	018 e) HIVER 2018 – PRINTEMPS
2019 f) printemps – automne 2019	

### 

fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période d	U PIC D'ÉNERGIE) EN
FONCTION DE LA DIRECTION MOYENNE D'ARRIVÉE DES VAGUES INCIDENTES	

### 

FIGURE 87 : POSITION DES SORTIES PARAMÉTRIQUES ET SPECTRALES	117

FIGURE 88 : BOUÉE VIKING À LA STATION RIMOUSKI – SOURCE : HTTPS://OGSL.CA/FR/NAVIGATION/CONDITIONS-MARITIMES- BOUEES/MPO/INFORMATIONS-DE-DONNEES
Figure 89 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée IML7131
FIGURE 90 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSLCFSR, DROITE : WW3-EGSLHRDPS) ET MESURÉES À LA BOUÉE IML-10
Figure 91 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée IML-BA
Figure 92 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées à la bouée PMZA-RIKI
Figure 93 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cesr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée PMZA-VAS
Figure 94 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cesr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée AZMP-ESG
Figure 95 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées au site LPM
FIGURE 96 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , DROITE : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) ET MESURÉES AU SITE MAR
FIGURE 97 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , DROITE : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) ET MESURÉES AU SITE PTL
Figure 98 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées au site CDR
FIGURE 99 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSLCFSR, DROITE : WW3-EGSLHRDPS) ET MESURÉES AU SITE CHA
FIGURE 100 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES ET MESURÉES AU SITE LAR
FIGURE 101 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES (GAUCHE : CHA, DROITE : LPM) ET MESURÉES EN PÉRIODE HIVERNALE
FIGURE 102 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES ET MESURÉES AU SITE PTL EN PÉRIODE HIVERNALE
FIGURE 103 : REPRÉSENTATION SPATIALE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES HAUTEURS SIGNIFICATIVES SIMULÉES PAR WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> ET WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> (HRDPS - CFSR) POUR L'ANNÉE 2017
Figure 104 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée IML7
Figure 105 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée IML10
Figure 106 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées à la bouée IML-BA
FIGURE 107 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , DROITE : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) ET MESURÉES À LA BOUÉE PMZA-RIKI
FIGURE 108 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , DROITE : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) ET MESURÉES À LA BOUÉE PMZA-VAS

Figure 109 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées à la bouée AZMP-ESG
FIGURE 110 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , DROITE : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) ET MESURÉES AU SITE LPM
FIGURE 111 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) ET MESURÉES AU SITE MAR
Figure 112 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite: WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées au site PTL
Figure 113 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées au site CDR
Figure 114 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées au site CHA
FIGURE 115 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES SIMULÉES ET MESURÉES AU SITE LAR
Figure 116 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : CHA, droite : LPM) et mesurées en période hivernale
Figure 117 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées et mesurées au site PTL en période hivernale
FIGURE 118 : REPRÉSENTATION SPATIALE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES SIMULÉES PAR WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> ET WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> (HRDPS - CFSR) POUR L'ANNÉE 2017
Figure 119 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées au site LPM
FIGURE 120 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES DIRECTIONS MOYENNES SIMULÉES (GAUCHE : WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées au site MAR
Figure 121 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CESR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées au site PTL
Figure 122 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>CESR</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> ) et mesurées au site CDR
Figure 123 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> , droite : WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> ) et mesurées au site CHA
FIGURE 124 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES DIRECTIONS MOYENNES SIMULÉES PAR WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> ET MESURÉES AU SITE LAR
FIGURE 125 : GRAPHIQUES DE DISPERSION ENTRE LES DIRECTIONS MOYENNES SIMULÉES (GAUCHE : CHA, DROITE : LPM) ET MESURÉES EN PÉRIODE HIVERNALE
Figure 126 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées et mesurées au site PTL en période hivernale 
FIGURE 127 : REPRÉSENTATION SPATIALE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES DIRECTIONS MOYENNES SIMULÉES PAR WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> ET WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> (HRDPS - CFSR) POUR L'ANNÉE 2017
Figure 128 : Illustration de la méthode de détection des tempêtes utilisée pour analyser le climat de vagues sur les différents sites d'étude. L'évènement coïncide ici avec une marée de vive-eau. PMS : niveau moyen des pleines mers supérieures. Sur cet exemple, la durée de l'évènement a été de 32 heures. À droite : aperçu de la plage de Pointe-Lebel avant la marée haute lors de l'évènement

FIGURE 129 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE POINTE-AUX-OUTARDES. LA SÉRIE TEMPORELLE DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DE VAGUES AU LARGE EST EN GRIS, LA VALEUR SEUIL *Hs*, **99**% est indiquée par la ligne pointillée noire et

CELLE CORRESPONDANT À LA VALEUR HS, 95% PAR UNE LIGNE DE POINTS NOIRS. CHAQUE POINT ROUGE REPRÉSENTE UNE TEMPÊTE, SA TAILLE CORRESPOND À SA DURÉE. LES FONCTIONS DE DISTRIBUTION CUMULATIVE DU NOMBRE DE TEMPÊTES SONT TRACÉES EN TRAITS NOIR GRAS POINTILLÉ (TOUTES LES TEMPÊTES), GRAS POINTILLÉ BLEU (DURÉE COMPRISE ENTRE 12 ET 24 HEURES) ET EN GRAS POINTILLÉ VIOLET (DURÉE SUPÉRIEURE À 24 HEURES). LES VALEURS DES CDF ONT ÉTÉ NORMALISÉES POUR UNE MEILLEURE VISUALISATION. LES VALEURS DE 100 % (ATTEINTES À LA FIN DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE) CORRESPONDENT À LA VALEUR MAXIMALE EN FIGURE 130 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE POINTE-LEBEL. POUR LA DESCRIPTION COMPLÈTE DE LA FIGURE, FIGURE 131 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE MARIA. POUR LA DESCRIPTION COMPLÈTE DE LA FIGURE, SE FIGURE 132 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE CHANDLER. POUR LA DESCRIPTION COMPLÈTE DE LA FIGURE, FIGURE 133 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN. POUR LA DESCRIPTION FIGURE 134 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE POINTE-AUX-LOUPS. POUR LA DESCRIPTION COMPLÈTE DE LA FIGURE 135 : CLIMATOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS DE TEMPÊTE POUR LE SITE DE BAIE-DE-PLAISANCE. POUR LA DESCRIPTION COMPLÈTE DE LA FIGURE 136 : ÉVOLUTION DU NOMBRE D'ÉVÈNEMENTS AU COURS DE LA PÉRIODE 1980-2100. LES TEMPÊTES DONT LA DURÉE EST COMPRISE ENTRE 12 ET 24 H AINSI QUE CELLES DONT LA DURÉE DÉPASSE 24 H SONT DIFFÉRENCIÉES. LES TRAITS POINTILLÉS REPRÉSENTENT LA FIGURE 137 : DISTRIBUTION MENSUELLE DE LA COUVERTURE DE GLACE HIVERNALE MOYENNE POUR LA PÉRIODE 1980-2010. LA POSITION FIGURE 138 : DISTRIBUTION DES ANOMALIES MENSUELLES DE LA COUVERTURE DE GLACE HIVERNALE POUR L'ANNÉE 2000. LA POSITION DES FIGURE 139 : DISTRIBUTION DES ANOMALIES MENSUELLES DE LA COUVERTURE DE GLACE HIVERNALE POUR L'ANNÉE 2100. LA POSITION DES FIGURE 140 : ÉVOLUTION DES MOYENNES HIVERNALES DE LA COUVERTURE DE GLACE POUR LE SITE DE POINTE-AUX-OUTARDES SUR LA PÉRIODE 1980-2100. LES DROITES POINTILLÉES REPRÉSENTENT LA TENDANCE (RÉGRESSION LINÉAIRE) POUR LES PÉRIODES 1980-FIGURE 142 : EXEMPLE DE PROFIL SUIVI À L'ANSE-AU-LARD ET IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS MORPHOLOGIQUES ET MARÉGRAPHIQUES FIGURE 143 : EXEMPLE DE SUIVI VIDÉO POUR LA DÉTECTION DU JET DE RIVE SUR UN CYCLE DE MARÉE. LA LIGNE DE RIVAGE INSTANTANÉE (LIGNE EN BLEUE) EST DÉTECTÉE AUTOMATIQUEMENT SUR LES IMAGES ENREGISTRÉES PAR LA CAMÉRA, CE QUI PERMET D'ÉTUDIER LA FIGURE 144 : ILLUSTRATION D'UNE ACQUISITION PAR ÉCHOSONDEURS MULTIFAISCEAUX. LA GÉOMÉTRIE EN ÉVENTAIL DE L'ENSEMBLE DES FAISCEAUX PERMET DE COUVRIR UNE ÉTENDUE DONT LA SURFACE DÉPEND DE L'ÉPAISSEUR DE LA TRANCHE D'EAU. TIRÉE DE FIGURE 145 : EXEMPLE DE CARTE OBTENUE AVEC LES DONNÉES DU SONAR MULTIFAISCEAUX POUR LE SECTEUR DE LONGUE-POINTE-DE-FIGURE 147 : A) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LE SITE DE POINTE-AUX-OUTARDES. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS

Figure 147 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Pointe-aux-Outardes. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale

BLEU MARINE, LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, PAR UNE FIGURE 148 : A) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LE SITE DE POINTE-LEBEL. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS CLAIR ET LE PROFIL MOYEN EN NOIR. LE NIVEAU DES PLEINES MERS SUPÉRIEURES (PMS) EST INDIQUÉ PAR UNE LIGNE HORIZONTALE BLEU MARINE, LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, PAR UNE LIGNE POINTILLÉE FIGURE 149 : PHOTOGRAPHIES DU SITE DE MARIA: A) SECTEUR EST B) SECTEUR OUEST C) DÉTAIL DE LA MICROFALAISE PRÉSENTE SUR LE FIGURE 150 : A) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LE SITE DE MARIA. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS CLAIR ET LE PROFIL MOYEN EN NOIR. LE NIVEAU DES PLEINES MERS SUPÉRIEURES (PMS) EST INDIQUÉ PAR UNE LIGNE HORIZONTALE BLEU MARINE. LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, PAR UNE LIGNE POINTILLÉE FIGURE 151 : A) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LE SITE DE CHANDLER. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS CLAIR ET LE PROFIL MOYEN EN NOIR. LE NIVEAU DES PLEINES MERS SUPÉRIEURES (PMS) EST INDIQUÉ PAR UNE LIGNE HORIZONTALE BLEU MARINE, LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, PAR UNE LIGNE POINTILLÉE FIGURE 153 : A) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LE SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS CLAIR ET LE PROFIL MOYEN EN NOIR. LE NIVEAU DES PLEINES MERS SUPÉRIEURES (PMS) EST INDIQUÉ PAR UNE LIGNE HORIZONTALE BLEU MARINE, LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, FIGURE 154 : APERCU DES SECTEURS D'ÉTUDE DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE. À GAUCHE, LE SECTEUR DE POINTE-AUX-LOUPS ET À DROITE, FIGURE 155 : PHOTOGRAPHIES DES DEUX SECTEURS SUIVIS SUR LE SITE DE BAIE-DE-PLAISANCE; A) SECTEUR ANTHROPOMORPHISÉ AVEC UNE FIGURE 156 : A) ET C) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LES DEUX SECTEURS DE LA BAIE-DE-PLAISANCE. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS CLAIR ET LE PROFIL MOYEN EN NOIR. LE NIVEAU DES PLEINES MERS SUPÉRIEURES (PMS) EST INDIQUÉ PAR UNE LIGNE HORIZONTALE BLEU MARINE, LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, FIGURE 157 : A) VUE AÉRIENNE DU SITE DE POINTE-AUX-LOUPS ET B) PROFIL DE PLAGE DU SITE DE POINTE-AUX-LOUPS AVEC EN ARRIÈRE-FIGURE 158 : A) PROFILS DE PLAGE MESURÉS AU DGPS SUR LE SITE DE POINTE-AUX-LOUPS. LES PROFILS PONCTUELS SONT EN GRIS CLAIR ET LE PROFIL MOYEN EN NOIR. LE NIVEAU DES PLEINES MERS SUPÉRIEURES (PMS) EST INDIQUÉ PAR UNE LIGNE HORIZONTALE BLEU MARINE, LE NIVEAU MOYEN (NM) EN BLEU TURQUOISE ET LE ZÉRO DES CARTES (ZC), OU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE, PAR UNE LIGNE FIGURE 159 : DISTRIBUTION SPATIALE POUR L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU SAINT-LAURENT DU MARNAGE RELATIF MOYEN CALCULÉ SUR LA FIGURE 160 : DISTRIBUTION SPATIALE POUR L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU SAINT-LAURENT DES ANOMALIES DU MARNAGE RELATIF CONSTATÉES PAR RAPPORT À LA MOYENNE CALCULÉE ENTRE 1980 ET 2010 POUR LES ANNÉES 1980, 2000, 2050 ET 2100. PLUS L'ANOMALIE FIGURE 161 : LOCALISATION DES INSTRUMENTS DE MESURE LE LONG DE LA GRILLE DE CALCUL. LE NIVEAU MOYEN DES PLEINES MERS FIGURE 162 : VALIDATION DES VARIABLES HYDRODYNAMIQUES (HAUTEUR SIGNIFICATIVE, DANS DEUX BANDES DE FRÉQUENCE, ET NIVEAU D'EAU MOYEN) SIMULÉES DANS LE MODÈLE POUR DEUX PÉRIODES DIFFÉRENTES : UN CYCLE DE MORTE-EAU/VIVE-EAU ET UNE PÉRIODE 

CALCUL. LE NIVEAU MOYEN DES PLEINES MERS	gure 164 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille d
C (ÉTOILE BLEUE) EST ICI FICTIVE, CELUI-CI AYANT	SUPÉRIEURES EST INDIQUÉ PAR LE TRAIT POINTILLÉ BLEU. LA POSITION DE L'AWA
	ÉTÉ DÉPLOYÉ SUR LE SITE DE <b>P</b> OINTE-LEBEL

FIGURE 165 : COMPARAISON DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES OBSERVÉES (AXE Y) ET SIMULÉES (AXE X). [A, D, G] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE GRAVITAIRE (0,05 < F < 0,4 Hz). [B, E, H] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE INFRAGRAVITAIRE (0,0026 < F < 0,05 Hz). [C, F, I] : COMPARAISON DU NIVEAU MOYEN. .... 220

FIGURE 167 : LOCALISATION DES INSTRUMENTS DE MESURE LE LONG DE LA GRILLE DE CALCUL. LE NIVE	AU MOYEN DES PLEINES MERS
SUPÉRIEURES EST INDIQUÉ PAR LE TRAIT POINTILLÉ BLEU. LA POSITION DE L'AWAC (ÉTOILE BLEUE)	EST ICI FICTIVE, CELUI-CI AYANT
ÉTÉ DÉPLOYÉ UN PEU PLUS À L'OUEST	

Figure 170 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers
supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu. La position de l'AWAC (étoile bleue) est ici fictive, celui-ci ayant
ÉTÉ DÉPLOYÉ AU NIVEAU DU SECTEUR OUEST

CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES OBSERVÉES (AXE Y) ET SIMULÉES (AXE X). [A, D] : COMPARAISON DES	FIGURE
DANS LA BANDE GRAVITAIRE $(0,05 < r < 0,4 \text{ Hz})$ . [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives	F
ITAIRE (0,00026 < <i>F</i> < 0,05 Hz). [C, F] : COMPARAISON DU NIVEAU MOYEN	۵

FIGURE 174 : LOCALISATION DES GRILLES DE CALCUL ET DES INSTRUMENTS DE MESURE DÉPLOYÉS SUR LE SECTEUR DE CHANDLER ....... 226

FIGURE 175	: LOCALISATION	DES INST	RUMENTS	DE MESU	RE LE	LONG	DE LA	GRILLE	DE	CALCUL.	Le	NIVEAU	MOYEN	DES	PLEINES	MERS
SUPÉRI	EURES EST INDIC	QUÉ PAR LE	E TRAIT POI	NTILLÉ BI	EU											227

FIGURE 176 : COMPARAISON DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES OBSERVÉES (AXE Y) ET SIMULÉES (AXE X). [A, D] : COMPARAISON DES
HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE GRAVITAIRE (0,05 < <i>F</i> < 0,4 Hz). [B, E] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES
DANS LA BANDE INFRAGRAVITAIRE (0,00026 < <i>f</i> < 0,05 Hz). [C, F] : COMPARAISON DU NIVEAU MOYEN

FIGURE 177 : LOCALISATION DES GRILLES DE CALCUL ET DES INSTRUMENTS DE MESURE DÉPLOYÉS SUR LE SECTEUR DE POINTE-AUX-LOUPS

FIGURE 179 : COMPARAISON DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES OBSERVÉES (AXE Y) ET SIMULÉES (AXE X). [A, D] : COMPARAISON DES
HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE GRAVITAIRE (0,05 < F < 0,4 Hz). [B, E] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES
DANS LA BANDE INFRAGRAVITAIRE (0,00026 < <i>f</i> < 0,05 Hz). [C, F] : COMPARAISON DU NIVEAU MOYEN

```
FIGURE 180 : LOCALISATION DES GRILLES DE CALCUL ET DES INSTRUMENTS DE MESURE DÉPLOYÉS SUR LE SECTEUR DE BAIE-DE-PLAISANCE
```

Figure 181 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu
FIGURE 182 : COMPARAISON DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES OBSERVÉES (AXE Y) ET SIMULÉES (AXE X). [A] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE GRAVITAIRE (0,0026 < <i>f</i> < 0,05 Hz). [B] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE INFRAGRAVITAIRE (0,00026 < <i>f</i> < 0,05 Hz). [C] : COMPARAISON DU NIVEAU MOYEN
FIGURE 183 : COMPARAISON DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES OBSERVÉES (AXE Y) ET SIMULÉES (AXE X). [A, D] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE GRAVITAIRE (0,05 < <i>F</i> < 0,4 Hz). [B, E] : COMPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DANS LA BANDE INFRAGRAVITAIRE (0,00026 < <i>F</i> < 0,05 Hz). [C, F] : COMPARAISON DU NIVEAU MOYEN
Figure 184 : Images du site de Pointe-Lebel issues des observations vidéo prises lors des tempêtes du 16 novembre et du 30 décembre 2016
Figure 185 : A) Aperçu de la zone d'étude pour l'implémentation du modèle XBeach. B) Vue transversale de la plage (Beachface) au site d'étude avec identification des marqueurs morphologiques : crête de la microfalaise (MC <sub>crest</sub> ), base de la microfalaise (MC <sub>toe</sub> ) et de la flexure (Hinge line). C) La grille utilisée est à proximité d'une caméra vidéo et est située sur le profil des capteurs déployés sur le site
FIGURE 186 : SIMULATION AVEC LE MODÈLE XBEACH AVEC LES PARAMÈTRES PAR DÉFAUT DE L'ÉVOLUTION DU PROFIL DE PLAGE SUR LE SITE DE POINTE-LEBEL POUR DEUX TEMPÊTES DIFFÉRENTES AYANT EU LIEU EN NOVEMBRE ET DÉCEMBRE 2016
Figure 187 : Résultat de la calibration sur sept paramètres libres du modèle XBeach par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne finalement après calibration, une valeur de 0,82
Figure 188 : Simulation avec le modèle XBeach calibré de l'évolution du profil de plage sur le site de Pointe-Lebel pour deux tempêtes différentes ayant eu lieu en novembre et décembre 2016
Figure 189 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Pointe-aux-Outardes par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,42 après calibration
Figure 190 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Maria par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,24 après calibration
Figure 191 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Longue-Pointe-de- Mingan par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,12 après calibration
Figure 192 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,41 après calibration
Figure 193 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Baie-de-Plaisance par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de -0,15 après calibration
Figure 194 : Suivi vidéo du recul de plage lors de différents évènements entre août 2016 et décembre 2016. La grille du modèle XBeach utilisée est colocalisée avec les mesures vidéo
FIGURE 195 : IDENTIFICATION DES ÉVÈNEMENTS AYANT POTENTIELLEMENT ENTRAINÉ UN RECUL DE LA PLAGE ENTRE LA PÉRIODE D'AOÛT ET DÉCEMBRE 2016 SUR LE SITE DE POINTE-LEBEL
Figure 196 : Exemple d'intégration des données du modèle de vagues WW3 à la plateforme web SIGEC développée par CartoVista. Hauteurs de vagues sur le golfe et l'estuaire maritime en date du 6 janvier 1985 à 00:00 UTC 249
FIGURE 197 : LOCALISATION DES POINTS DE GRILLE OÙ LES DONNÉES DU MODÈLE DE VAGUES WW3 ONT ÉTÉ EXTRAITES. EXEMPLE DE MISE EN LIGNE SUR LA PLATEFORME SIGEC. VUE D'ENSEMBLE DES DONNÉES EXTRAITES DISPONIBLES

FIGURE 198 : ILLUSTRATION DES INFORMATIONS QUI APPARAISSENT À L'ÉCRAN QUAND L'UTILISATEUR CLIQUE SUR UN POINT DE GRILL	le où
LES DONNÉES DE VAGUES SONT DISPONIBLES	. 251
FIGURE 199 : ZOOM SUR LA BAIE DE GASPE OU DES DONNEES DE VAGUES SONT DISPONIBLES (POINTS EN BLEU CLAIR). LES POINTS EN B	LANC
REPRÉSENTENT LES POINTS DE GRILLE WW3 AU 1 KM	. 251

Figure 200 : Exemple de solution pour la mise en ligne des données du modèle de vagues WW3 sur la plateforme de diffusion web (SIGEC web, UQAR) avec les extractions des points de grille à une profondeur inférieure à 50 m . 252

# Liste des tableaux

TABLEAU 1 : RÉCAPITULATIF DES SITES INSTRUMENTÉS LORS DES DIFFÉRENTES PHASES DE MODESCO ET LEURS CARACTÉRISTIQUES   MORPHODYNAMIQUES
TABLEAU 2 : LOCALISATION ET PROFONDEUR (COTE HYDROGRAPHIQUE) DES PROFILEURS DE COURANT AWAC
TABLEAU 3 : NOMENCLATURE DE LA PLACE DES CAPTEURS SUR LES PROFILS
Tableau 4 : Périodes de déploiement et de récupération de l'AWAC à Longue-Pointe-de-Mingan pendant la phase III de MoDESCo
TABLEAU 5 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES CAPTEURS DE PRESSION À LONGUE-POINTE-DE-MINGAN PENDANT LA   PHASE III DE MODESCO   13
TABLEAU 6 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES CAPTEURS DE PRESSION À POINTE-AUX-OUTARDES PENDANT LA PHASE   III DE MODESCO 16
TABLEAU 7 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DE L'AWAC À POINTE-LEBEL PENDANT LA PHASE III DE MODESCO 17
Tableau 8 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Pointe-Lebel pendant la phase III de MoDESCo   18
TABLEAU 9 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES INSTRUMENTS À MARIA PENDANT LA PHASE III DE MODESCO 20
TABLEAU 10 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES CAPTEURS DE PRESSION À MARIA PENDANT LA PHASE III DE MODESCO   21
TABLEAU 11 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES INSTRUMENTS À CHANDLER PENDANT LA PHASE III DE MODESCO. 23
Tableau 12 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Chandler pendant la phase III de MoDESCo   24
Tableau 13 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Pointe-aux-Loups pendant la phase III de MoDESCo 25
TABLEAU 14 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES CAPTEURS DE PRESSION À POINTE-AUX-LOUPS PENDANT LA PHASE III   DE MODESCO
Tableau 15 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Baie-de-Plaisance pendant la phase III de MoDESCo   27
TABLEAU 16 : PÉRIODES DE DÉPLOIEMENT ET DE RÉCUPÉRATION DES CAPTEURS DE PRESSION À BAIE-DE-PLAISANCE PENDANT LA PHASE III   DE MODESCO
TABLEAU 17 : PARAMÈTRES NUMÉRIQUES ET PARAMÉTRISATIONS UTILISÉES POUR LES SIMULATIONS
TABLEAU 18 : COORDONNÉES DES SORTIES SPECTRALES DU MODÈLE
TABLEAU 19 : COORDONNÉES DES BOUÉES OCÉANOGRAPHIQUES DU MINISTÈRE PÊCHES ET OCÉANS CANADA
TABLEAU 20 : COORDONNEES DES AWACS DU PROJET MODESCO
TABLEAU 21 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE HAUTEURS SIGNIFICATIVES OBSERVÉES PAR LES BOUÉES IML-7, IML-   10, IML-BA et simulées par WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> et WW3-EGSL <sub>hrdps</sub> 146
TABLEAU 22 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE HAUTEURS SIGNIFICATIVES OBSERVÉES PAR LES BOUÉES PMZA-RIKI,   PMZA-VAS, AZMP-ESG ET SIMULÉES PAR WW3-EGSLCFSR ET WW3-EGSLhrdps
TABLEAU 23 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE HAUTEURS SIGNIFICATIVES OBSERVÉES AUX SITES LPM, MAR, PTL   ET SIMULÉES PAR WW3-EGSLcfsr et WW3-EGSLhrdps   148
TABLEAU 24 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE HAUTEURS SIGNIFICATIVES OBSERVÉES AUX SITES CDR, CHA, LAR   ET SIMULÉES PAR WW3-EGSLcfsr et WW3-EGSLhrdps   149

TABLEAU 25 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE HAUTEURS SIGNIFICATIVES OBSERVÉES EN PÉRIODE HIVERNALE AUX   SITES CHA, LPM, PTL et simulées par WW3-EGSLcfsr   150
TABLEAU 26 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES OBSERVÉES PAR LES BOUÉES IML-7, IML-   10, IML-BA et simulées par WW3-EGSLcfsr et WW3-EGSLhrdps
TABLEAU 27 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES OBSERVÉES PAR LES BOUÉES PMZA-RIKI,   PMZA-VAS, AZMP_ESG et simulées par WW3-EGSL <sub>cfsr</sub> et WW3-EGSL <sub>hrdps</sub>
TABLEAU 28 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES OBSERVÉES AUX SITES LPM, MAR, PTL ET   SIMULÉES PAR WW3-EGSLcfsr et WW3-EGSLhrdps   169
TABLEAU 29 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES OBSERVÉES AUX SITES CDR, CHA, LAR ET   SIMULÉES PAR WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> ET WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> 170
TABLEAU 30 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES OBSERVÉES AUX SITES CHA, LPM ET PTL   EN PÉRIODE HIVERNALE ET SIMULÉES PAR WW3-EGSLCFSR   171
TABLEAU 31 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES DIRECTIONS MOYENNES OBSERVÉES AUX SITES LPM, MAR, PTL   ET SIMULÉES PAR WW3-EGSL <sub>CFSR</sub> ET WW3-EGSL <sub>HRDPS</sub> 182
TABLEAU 32 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES PÉRIODES MOYENNES OBSERVÉES AUX SITES CDR, CHA, LAR ET   SIMULÉES PAR WW3-EGSLCFSR ET WW3-EGSLHRDPS   182
TABLEAU 33 : PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA COMPARAISON ENTRE LES DIRECTIONS MOYENNES OBSERVÉES AUX SITES CHA, LPM ET PTL   EN PÉRIODE HIVERNALE ET SIMULÉES PAR WW3-EGSLcfsr   183
TABLEAU 34 : VALEURS DES SEUILS DE HAUTEUR DE VAGUE HS, 99% ET HS, 95% CALCULÉES POUR LA PÉRIODE 1980-2010 ET DEHAUTEUR D'EAU (PLEINES MERS SUPÉRIEURES) PAR RAPPORT AU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE FOURNIES PAR LE SHC ET UTILISÉES POURLA DÉTECTION DES TEMPÊTES SUR LES SITES D'ÉTUDE. LES DONNÉES DE MODÈLE SONT NON CORRIGÉES.185
TABLEAU 35 : COMPARAISON DE LA CLIMATOLOGIE DES TEMPÊTES POUR LES PÉRIODES PASSÉE (1980-2017) ET FUTURE (2041-2100).LES TENDANCES ANNUELLES DU NOMBRE DE TEMPÊTES CALCULÉES POUR LA PÉRIODE 1980-2017 SONT AUSSI INDIQUÉES 194
TABLEAU 36 : ÉVOLUTION DE LA COUVERTURE DE GLACE HIVERNALE POUR LES DIFFÉRENTS SITES D'ÉTUDES 197
TABLEAU 37 : PÉRIODE DES LEVÉS LIDAR MOBILE TERRESTRE PAR SITE D'ÉTUDE 199
TABLEAU 38 : ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UN MODÈLE HYDRODYNAMIQUE SELON LA VALEUR DE RMAE
TABLEAU 39 : PARAMÈTRES STATISTIQUES (CORRÉLATION, ERREURS ET PERFORMANCE) CALCULÉS APRÈS COMPARAISON ENTRE LES OBSERVATIONS IN SITU ET LES SÉRIES MODÉLISÉES POUR LE SITE DE POINTE-AUX-OUTARDES. LES DISTANCES (D) ENTRE CHAQUE CAPTEUR ET LE PREMIER POINT DE LA GRILLE À TERRE EST INDIQUÉ. LES VALEURS DE RMSE, DE BIAIS ET DE RMAE SONT EN MÈTRE.   220
TABLEAU 40 : PARAMÈTRES STATISTIQUES (CORRÉLATION, ERREURS ET PERFORMANCE) CALCULÉS APRÈS COMPARAISON ENTRE LES OBSERVATIONS IN SITU ET LES SÉRIES MODÉLISÉES POUR LE SITE DE MARIA. LES DISTANCES (D) ENTRE CHAQUE CAPTEUR ET LE PREMIER POINT DE LA GRILLE À TERRE EST INDIQUÉ. LES VALEURS DE RMSE, DE BIAIS ET DE RMAE SONT EN MÈTRE.222
TABLEAU 41 : PARAMÈTRES STATISTIQUES (CORRÉLATION, ERREURS ET PERFORMANCE) CALCULÉS APRÈS COMPARAISON ENTRE LES OBSERVATIONS IN SITU ET LES SÉRIES MODÉLISÉES POUR LE SECTEUR EST DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN. LES DISTANCES (D) ENTRE CHAQUE CAPTEUR ET LE PREMIER POINT DE LA GRILLE À TERRE EST INDIQUÉ. LES VALEURS DE RMSE, DE BIAIS ET DE RMAE SONT EN MÈTRE.   224
TABLEAU 42 : PARAMÈTRES STATISTIQUES (CORRÉLATION, ERREURS ET PERFORMANCE) CALCULÉS APRÈS COMPARAISON ENTRE LES   OBSERVATIONS IN SITU ET LES SÉRIES MODÉLISÉES POUR LE SECTEUR OUEST DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN. LES DISTANCES (D)   ENTRE CHAQUE CAPTEUR ET LE PREMIER POINT DE LA GRILLE À TERRE EST INDIQUÉ. LES VALEURS DE RMSE, DE BIAIS ET DE RMAE   SONT EN MÈTRE.   226
TABLEAU 43 : PARAMÈTRES STATISTIQUES (CORRÉLATION, ERREURS ET PERFORMANCE) CALCULÉS APRÈS COMPARAISON ENTRE LES OBSERVATIONS <i>IN SITU</i> ET LES SÉRIES MODÉLISÉES POUR LE SITE DE CHANDLER. LES DISTANCES (D) ENTRE CHAQUE CAPTEUR ET LE

PREMIER POINT DE LA GRILLE À TERRE EST INDIQUÉ. LES VALEURS DE RMSE, DE BIAIS ET DE RMAE SONT EN MÈTRE......228

- TABLEAU 44 : PARAMÈTRES STATISTIQUES (CORRÉLATION, ERREURS ET PERFORMANCE) CALCULÉS APRÈS COMPARAISON ENTRE LES OBSERVATIONS *IN SITU* ET LES SÉRIES MODÉLISÉES POUR LE SITE DE POINTE-AUX-LOUPS. LES DISTANCES (D) ENTRE CHAQUE CAPTEUR ET LE PREMIER POINT DE LA GRILLE À TERRE EST INDIQUÉ. LES VALEURS DE RMSE, DE BIAIS ET DE RMAE SONT EN MÈTRE. ...... 230

# Liste des abbréviations

EGSL:	Estuaire et Golfe du Saint-Laurent		
<b>WW3</b> :	WaveWatch III		
CFSR:	Climate Forecast System Reanalysis		
HRDPS:	High Resolution Deterministic Prediction System		
	Système de Prédiction Déterministique à Haute Résolution (SPDHS)		
RDPS:	Regional Deterministic Prediction System		
	Système de Prédiction Déterministique Régional (SPDR)		
MBE:	Mean Bias error		
	Biais moyen		
RMSE:	Root Mean Square Error		
	Erreur quadratique moyenne		
MAE:	Mean Absolute Error		
	Biais absolu		
STD:	Standard deviation		
	Écart-Type		
BSS:	Score de performance de Brier		
SPS:	Score de performance total		
SI:	Coefficient de dispersion		
LPM:	Longue-Pointe-de-Mingan		
MAR:	Maria		
CDR:	Cap-des-Rosiers		
PTL:	Pointe-Lebel		
PAO :	Pointe-aux-Outardes		
LAR:	Anse-au-Lard		
CHA:	Chandler		
PAL :	Pointe-aux-Loups		
BDP :	Baie-de-Plaisance		
AZMP-ESG:	Bouée océanographique, station Golfe Sud-Est		
PMZA-RIKI:	Bouée océanographique, station Rimouski		
PMZA-VAS:	Bouée océanographique, station Shédiac		
IML-10:	Bouée océanographique, station Old Harry		

- **IML-BA**: Bouée océanographique, station Banc des Américains
- **IML-7**: Bouée océanographique, station Courant de Gaspé

# 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 côtières du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Ces connaissances aideront à évaluer et à identifier des solutions durables mieux adaptées à la dynamique côtière. Les résultats de ce programme permettront aussi, 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 en plus de pertes de vies humaines. Ce projet s'inscrit dans les axes de recherche de la Chaire de recherche 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). Elle 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 de 5 km<sup>2</sup>; 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 période de retour.

La **phase II** s'est terminée en 2017 avec la remise du rapport final en mars (Bernatchez *et coll.*, 2017). Un chapitre additionnel sur les périodes de retour des conditions météo marines responsables de l'érosion et de la submersion côtières pour la période de 1979 à 2010 est venu compléter ce rapport en octobre 2018. La phase II visait à i) quantifier les paramètres morphodynamiques des grands types de littoraux représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent; ii) 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 km<sup>2</sup> et la comparer à celle d'une résolution de 5 km<sup>2</sup>; iii) produire les périodes de retour des évènements qui ont provoqué des dommages à la côte entre 1979 et 2010; iv) 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; et v) déterminer les périodes de retour des conditions météo marines responsables de l'érosion et de la submersion côtières pour le futur dans un contexte de changements climatiques (2041-2100).

La **phase III** du projet permettra de :

- I. Quantifier les paramètres morphodynamiques sur quatre autres sites témoins représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (EGSL);
- II. Valider la capacité de modèles numériques à reproduire les vitesses de recul du passé pour s'assurer de bien modéliser les zones exposées à l'érosion et la submersion pour le futur;
- III. Développer un atlas numérique web pour diffuser les données modélisées de niveaux d'eau et de vagues de l'EGSL.

Cette dernière phase est essentielle, puisqu'elle permettra d'obtenir un produit numérique uniforme et validé servant d'intrant notamment dans les domaines de la recherche sur les aléas côtiers, du génie côtier et maritime, ainsi que pour déterminer les zones exposées à l'érosion et à la submersion côtières. Le développement du module web permettra aux firmes de génie-conseil d'accéder aux séries chronologiques de paramètres de vagues et de niveaux d'eau pour concevoir non seulement des ouvrages de protection adaptés aux changements climatiques, mais aussi tous types d'infrastructures côtières et maritimes.

Les outils numériques développés dans MoDESCo contribueront ainsi à la mise en œuvre de la stratégie maritime du gouvernement du Québec, tout en s'inscrivant dans la stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques (2013-2020) et dans la *Politique québécoise de sécurité civile* (2014-2024).

Ce rapport présente la méthodologie du projet, les travaux de recherche effectués jusqu'à ce jour ainsi que les résultats. Ces derniers sont présentés selon les grands objectifs du projet.

# 2 Quantifier les paramètres morphodynamiques sur quatre autres secteurs témoins représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent

### 2.1 Sites témoins

Dans le cadre des phases I et II du projet, les sites de Pointe-au-Père, Sainte-Luce, L'Isle-aux-Coudres, Maria et Longue-Pointe-de-Mingan ont été instrumentés pour mesurer les conditions de vagues et de niveaux d'eau au large et à la côte. En 2016, les mêmes types d'instruments ont aussi été implantés à Pointe-Lebel et à Pointe-aux-Outardes sur la péninsule de Manicouagan, ainsi qu'à Chandler dans la baie des Chaleurs. La phase III de MoDESCo a permis de maintenir ces instruments sur la péninsule de Manicouagan et dans la baie des Chaleurs pour la durée du projet (2017-2020), mais aussi d'obtenir une série temporelle de mesures de vagues plus longue pour les sites de Longue-Pointe-de-Mingan et de Maria, afin de bien calibrer les modèles numériques. En effet, cette calibration requiert des séries temporelles de mesures *in situ* suffisamment longues pour pouvoir la valider de manière statistique. Il est donc nécessaire de mesurer le maximum de conditions météo marines possibles et tout particulièrement obtenir des mesures lors d'évènements de tempête.

Dans le cadre de la phase III de MoDESCo, les secteurs ouest (Pointe-aux-Loups) et est (Baie-de-Plaisance) des Îles-de-la-Madeleine ont également été instrumentés, permettant ainsi de couvrir les caractéristiques des milieux microtidaux fortement exposés aux ondes de tempêtes océaniques. De cette façon, la phase III de MoDESCo a permis de compléter la couverture des grands types de littoraux de la zone côtière de l'EGSL (figure 1).



Figure 1 : Localisation des différents sites d'étude du projet MoDESCo

À noter que les sites de Pointe-au-Père et de Sainte-Luce, qui ont été instrumentés les premiers, ainsi que de L'Isle-aux-Coudres (phase II de MoDESCo) ont été démantelés en 2016. Nous disposons d'assez de données pour la calibration du modèle. Les instruments ont été déplacés sur l'un des deux sites aux Îles-de-la-Madeleine, ce qui a permis de réduire le coût d'acquisition des données.

Il existe à l'heure actuelle très peu de connaissances 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 même atteint 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 de ses enjeux, notamment la présence de nombreuses résidences en bordure de mer, de la route 132, de nombreux commerces, de sites patrimoniaux, etc. Ce secteur présente un estran étroit à moyen de formation meuble, typique des côtes de la baie des Chaleurs. Les niveaux atteints 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 de recherche en géoscience côtière (Bernatchez *et coll.*, 2011; Quintin *et coll.*, 2013; Didier *et coll.*, 2015), ce qui est un atout pour le développement d'une méthode de cartographie du risque de submersion.

Les sites de Pointe-Lebel et de Pointe-aux-Outardes sont situés à l'est et à l'ouest de la péninsule de Manicouagan, respectivement. Ce complexe deltaïque est formé de couches successives d'argile marine, de limons prodeltaïques, de sable deltaïque et littoral et de tourbes (Bernatchez, 2003; Pratte *et coll.*, 2016). Durant les dernières décennies, le littoral de la péninsule a été exposé à des processus d'érosion particulièrement intenses, pouvant aller jusqu'à quelques mètres de retrait localement par évènement (Bernatchez et Dubois, 2004; Bernatchez et Dubois, 2008). Le littoral est bordé par une plage de sable généralement étroite et pentue ainsi qu'une très large batture sablo-limoneuse de plus de 2 km (Bernatchez, 2003).

Le secteur de Longue-Pointe-de-Mingan est caractéristique des estrans étroits et meubles, avec des cordons sableux de bas estran et prélittoraux 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 ainsi qu'une variabilité saisonnière et annuelle importante de la morphologie des plages. Ce secteur a déjà connu dans le passé des évènements importants de submersion lors de tempêtes, notamment au niveau de la municipalité. La route 138 est elle aussi menacée par le recul du littoral sableux (Corriveau et coll., 2016, 2018).

Enfin, le secteur de Pointe-aux-Loups et de la Baie-de-Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine sont caractérisées par des plages sablonneuses bordées par des milieux dunaires avec de courts estrans et des systèmes de barres de bas estran et prélittorales. Les valeurs de recul du littoral y sont importantes, particulièrement sur la façade ouest où elles peuvent atteindre 1 à 2 m/an (Bernatchez et coll., 2012). Ce milieu est en subsidence depuis plusieurs millénaires et présente les vitesses de hausse du niveau de la mer les plus élevées du Québec maritime atteignant plus de 4 mm/an au cours des dernières décennies (Barnett et coll., 2017).

En résumé, la phase III de MoDESCo a porté sur l'étude de sites témoins représentatifs de l'EGSL d'un point de vue hydro et morphodynamique, à savoir : les sites de Longue-Pointe-de-Mingan, en Minganie, de Pointe-Lebel et Pointe-aux-Outardes, sur la péninsule de Manicouagan, de Maria et Chandler, dans la baie des Chaleurs, et de Pointe-aux-Loups et Baie-de-Plaisance, aux Îles-de-la-Madeleine.

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

## 2.2 Suivi des conditions hydrodynamiques

### Synthèse

- Un suivi continu des conditions hydrodynamiques est effectué à six sites à l'aide de profileurs de courant pour obtenir les caractéristiques des vagues au large ainsi que les profils de courants, témoins de processus dynamiques dans la colonne d'eau.
- Un suivi des conditions hydrodynamiques en zones prélittorales et intertidales est effectué à l'aide de capteurs de pression pour obtenir les caractéristiques des vagues en zone côtière.
- Les changements morphologiques de la côte peuvent ainsi être mis en lien avec les conditions météo marines.
- Ces données hydrodynamiques sont également utilisées pour valider et calibrer les modèles numériques.

Une stratégie de déploiement a été mise en place pour effectuer les mesures des conditions hydrodynamiques au large de chaque site ainsi que dans les zones prélittorales et intertidales. Cette stratégie assure l'acquisition de données permettant de mettre en lien les changements morphologiques de la côte avec les conditions météo marines. Ces données seront également utilisées pour valider et calibrer les modèles numériques. La figure 1 présente la localisation des instruments de mesure sur les sept sites d'étude.

Nom du site / Statut	Années instrumentées	Caractéristiques morphodynamiques
Anse-au-Lard/ Pointe-au-Père Démantelé	2014-2016	Large estran meuble avec plages de sable grossier et gravier. Représentatif des types d'estrans retrouvés sur la rive sud du Saint-Laurent.
Sainte-Luce Démantelé	2014-2016	Large estran rocheux avec plages de sable grossier et gravier. Représentatif des types d'estrans retrouvés sur la rive sud du Saint-Laurent.
<b>Isle-aux-Coudres</b> <i>Démantelé</i>	2014-2016	Large estran rocheux avec une forte variabilité topographique, se terminant par un très bas estran de dépôts meubles côté mer. Représentatif d'une vaste majorité de côtes retrouvées dans les régions de Charlevoix, de Chaudière-Appalaches, du Bas-Saint-Laurent et du nord de la Gaspésie.
Longue-Pointe-de-Mingan	2015-présent	Estrans étroits et meubles avec des cordons sableux de bas estran et prélittoraux typiques du littoral du golfe du Saint- Laurent. Régime de marée micro à mésotidal.
Maria Actif	2015-présent	Estran étroit à moyen de formation meuble typique des côtes de la baie des Chaleurs. Sédiment moyen à grossier sur le haut estran. Certaines portions du site sont fortement anthropomorphisées.
Pointe-Lebel Actif	2016-présent	Larges estrans de sédiments fins, avec un haut estran sableux de pente forte, surmonté d'une microfalaise en érosion.
Pointe-aux-Outardes	2016-présent	Larges estrans de sédiments fins, avec un haut estran sableux de pente forte, surmonté d'une falaise en érosion.

Tableau 1 : Récapitulatif des sites instrumentés lors des différentes phases de MoDESCo et leurs caractéristiques morphodynamiques

<b>Chandler</b> Actif	2016-présent	Milieu mésotidal exposé aux ondes de tempêtes océaniques. Étroit bas estran sableux en bordure d'une flèche littorale.
Pointe-aux-Loups Actif	2018-présent	Présence de barres sableuses prélittorales et de courants sagittaux importants. Milieu microtidal fortement exposé aux ondes de tempêtes océaniques. Présence de recharges sédimentaires.
Baie-de-Plaisance Actif	2017-présent	Présence de barres sableuses prélittorales. Milieu microtidal fortement exposé aux ondes de tempêtes océaniques. Présence d'enrochements et de recharges sédimentaires ponctuelles.

## 2.2.1 Instruments hydrodynamiques

Six (6) profileurs de courant à effet doppler acoustique (ADCP) de la compagnie Nortek (AWAC 1 MHz) ont été mis en place au large de Pointe-Lebel, Longue-Pointe-de-Mingan, Maria, Chandler, Pointe-aux-Loups et Baie-de-Plaisance. 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, à une position considérée « au large » des côtes. Ces séries temporelles, qui s'étendent parfois à partir de 2016, ont fourni une climatologie de l'ensemble des paramètres de vagues lors de leur propagation du large vers la côte. Elles ont également servi à valider les modèles numériques de propagation de vagues en eau peu profonde ainsi que le modèle de vagues WaveWatch III (section 2.4).

Site	Latitude	Longitude	Profondeur
Longue-Pointe-de-Mingan	50,2433	-64,3134	14 m
Pointe-Lebel	49,0523	-68,2075	12 m
Maria	48,1214	-65,9727	19 m
Chandler	48,3225	-64,6734	21 m
Baie-de-Plaisance	47,3617	-61,7557	20 m
Pointe-aux-Loups	47,5798	-61,7021	23 m

Tableau 2 : Localisation et profondeur (cote hydrographique) des profileurs de courant AWAC

Les AWACs (figure 2) sont programmés de façon à enregistrer à une fréquence de 2 Hz les caractéristiques des vagues sur les 17 premières minutes de chaque heure. Les courants sont enregistrés puis moyennés sur deux minutes toutes les 20 minutes sur 40 couches de 50 cm d'épaisseur au-dessus de l'instrument. Chaque instrument est alimenté par quatre batteries alcalines de 13,5 V d'une capacité de 540 Wh chacune, ce qui permet une autonomie d'au moins 6 mois. La maintenance se fait deux fois par année pour chaque instrument. Les AWACs sont programmés depuis fin 2018 en heure UTC.



Figure 2 : Présentation d'un AWAC (a) prêt au déploiement et (b) dénudé de sa coquille protectrice anti-chalut en plastique propylène, montrant les deux caissons de batteries (en bleu) et la grille d'acier permettant le lestage de l'instrument au fond de l'eau

Pour obtenir des mesures de niveaux d'eau et de vagues près de la côte, des capteurs de pression *Virtuoso* (une soixantaine au total, modèles D|fast6 et D|wave de la compagnie RBR, figure 3a) ont été déployés sur chacun des sites d'étude, sur des profils perpendiculaires à la côte. Les capteurs de pression sont placés sur deux ou trois isobathes différentes, parallèles à la côte, 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 faisant l'acquisition de données de dénivellation de la surface libre en continu à une fréquence d'échantillonnage de 4 Hz.

Chaque capteur de pression est alimenté par huit batteries au lithium CR123 de 3 V chacune. L'autonomie de chaque instrument varie entre 2,5 et 3 mois selon leur autonomie. Trois à quatre tournées de maintenance sont nécessaires (changement des batteries) pour maintenir les capteurs entre le printemps et le début de l'hiver de chaque année. Les capteurs sont installés sur l'estran à l'aide d'une plaque en acier inoxydable 316 ancrée sur le roc (figure 3b) ou avec des pieux vissés dans le substrat meuble de l'estran (figure 3c). Les capteurs sont programmés depuis la fin 2018 en heure UTC.

Les capteurs sont implantés sur les sites au printemps, après la fonte de la glace et dès que les sédiments sont dégelés et maintenus en place jusqu'en décembre. Ils sont retirés pour l'hiver pour éviter les bris et les pertes à cause de la glace côtière et les impacts que celle-ci peut engendrer, et pour préserver les membranes des appareils qui sont sensibles aux grands froids.



Figure 3 : a) Série de capteurs de pression RBR et b) exemple d'installation sur roc et c) en milieu sableux

## 2.2.2 Stratégie d'implantation des instruments

La figure 4 montre un exemple de stratégie de déploiement entre un AWAC au large et des capteurs de pression à la côte. L'AWAC est placé en eau profonde avant le point de déferlement des plus grosses vagues de tempête. De cet appareil, nous obtenons des informations sur les vagues et les niveaux d'eau avant la phase de dissipation finale de l'énergie des vagues dans la zone prélittorale. Des capteurs de pression sont placés au large de la flexure, sur le bas estran, ou encore à la flexure, à la limite entre le bas estran et le haut estran sableux (plage). Ils permettent d'évaluer les paramètres de vagues et de niveaux d'eau et de courants avant la zone de jet de rive (*runup*) et d'évaluer la quantité d'énergie dissipée sur l'estran rocheux ou meuble par comparaison avec les données de l'AWAC. 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. Un autre capteur de pression est placé au centre du haut estran sableux, dans la zone de *swash*. Son rôle est 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 pouvant être directement corrélés aux aléas d'érosion et de submersion côtière.



Figure 4 : Exemple de stratégie de placement de l'AWAC et des capteurs de pression entre le large et les zones prélittorale et intertidale

## 2.3 Post-traitement des données hydrodynamiques

## 2.3.1 Post-traitement des données de profileurs de courants AWAC

L'AWAC utilise une méthode dynamique de données PUV. Il acquiert des données de pression ainsi que deux types de données de vitesse. Ces vitesses, une fois mises dans des axes est et nord, permettent de mesurer l'intensité et les directions de courants. Cette méthode permet donc d'obtenir les composantes des courants dans le système de coordonnées choisi (est-nord-vertical ou ENU) ainsi que l'intensité et la direction des courants dans la colonne d'eau, la période des vagues, les hauteurs de vagues et leurs directions. L'AWAC produit des fichiers *WPR* traités dans les logiciels *QuickWave*, pour obtenir les données de vagues, *AWAC AST*, pour obtenir les données de courant.

Une analyse spectrale (sp) ainsi qu'une analyse *zero-crossing* (zc) sont effectuées pour calculer les paramètres de vagues. Le fichier de sortie (.wap) est importé dans le logiciel *MATLAB*. Il est composé des variables suivantes : la hauteur significative ( $H_{m0} - sp$ ), la hauteur moyenne du tiers supérieur des plus fortes vagues ( $H_{1/3} - zc$ ), la hauteur moyenne des 10 % des plus fortes vagues ( $H_{1/10} - zc$ ), la hauteur maximum des vagues ( $H_{max} - zc$ ), la hauteur moyenne des vagues ( $H_{mean} - zc$ ), la période moyenne ( $T_{m02} - sp$ ), la période du pic d'énergie (Tp - sp), la direction moyenne du spectre ( $D_{moy} - sp$ ), la direction du pic ( $D_{peak} - sp$ ) et l'étalement directionnel (Sprd – sp). Puis, les périodes issues de l'analyse *zero-crossing* sont : la période moyenne du tiers supérieur des plus fortes vagues ( $T_{1/3} - zc$ ), la période moyenne des 10 % des plus fortes vagues ( $T_{1/3} - zc$ ), la période moyenne des 10 % des plus fortes vagues ( $T_{1/10} - zc$ ), la période maximum des vagues ( $T_{1/3} - zc$ ), la période moyenne des 10 % des plus fortes vagues ( $T_{1/10} - zc$ ), la période maximum des vagues ( $T_{1/3} - zc$ ), la période moyenne des 10 % des plus fortes vagues ( $T_{1/10} - zc$ ), la période maximum des vagues ( $T_{max} - zc$ ) et la période moyenne des vagues ( $T_{mean} - zc$ ).

Les niveaux d'eau sont obtenus par le biais du capteur de pression de l'appareil. Ils sont corrigés pour tenir compte des effets de la pression atmosphérique à partir des données de capteurs HOBO de pression atmosphérique enregistrées sur place par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) ou par des données de pression atmosphérique obtenues de stations météo d'Environnement Canada (climat.meteo.gc.ca/historical data/search historic data f.html) à proximité des sites.

Un contrôle qualité des données est effectué pour éliminer d'éventuelles données erratiques. Une comparaison avec des données de marées obtenues soit de houlographes à proximité (<u>waterlevels.gc.ca/fra/-</u> <u>trouver/region/4</u>), soit de prédictions de modèles (Xtide – <u>flaterco.com/xtide/</u>) le cas échéant, est effectuée pour assurer la coïncidence des pics de marées et, par conséquent, l'absence de décalage dans le temps des données.

Une dernière étape consiste à recaler les niveaux d'eau enregistrés. En effet, il est difficile de mesurer avec précision les coordonnées géographiques des AWACs. Pour ce faire, quand c'est possible, les niveaux d'eau enregistrés par l'AWAC sont comparés aux niveaux d'eau enregistrés par un capteur de pression implanté le plus au large possible lors de périodes combinant marée haute et petites hauteurs de vagues Hs (< 0,2 m). L'hypothèse admise ici est que, dans ces circonstances, les niveaux d'eau mesurés par les deux appareils devraient être sensiblement les mêmes. La différence de mesure est alors soustraite (ou ajoutée) aux niveaux d'eau de l'AWAC.

## 2.3.2 Post-traitement des données de capteurs de pression

Les données sont extraites avec le logiciel *Ruskin* qui génère un fichier *.rsk*. Ce dernier est par la suite importé dans le logiciel *MATLAB* avec la routine *RSK\_import* qui permet de convertir les fichiers RSK en fichiers MATLAB. Une seconde routine *MATLAB* est utilisée afin de transformer les données de pression en niveaux d'eau. Ce script retire les effets de la pression atmosphérique, qui a été mesurée à l'aide de HOBO sur le terrain, des données de pression enregistrées par le capteur submergé. La troisième routine utilisée permet de corriger les données avec la hauteur du capteur en rapport avec le fond (HAB) afin d'obtenir la hauteur de vague. La quatrième étape consiste à effectuer un filtrage visuel des points erratiques qui peuvent être causés par différents facteurs sur la membrane de pression (*e.g.* de la glace coincée dans la membrane).

La dernière étape est l'analyse spectrale, permettant de calculer les paramètres spectraux de hauteurs et des périodes des vagues. Pour ce faire, le signal de niveau d'eau est découpé en *burst* (rafales) d'environ 17 minutes (1024 secondes). Pour chaque rafale, la marée ainsi que les oscillations basses fréquences (de période supérieure à 180 secondes) sont filtrées et les vagues sont identifiées individuellement par *zero up-crossing* (passage au niveau moyen par période croissante). Cela permet de calculer les nombres d'ondes de chacune des vagues et de corriger l'atténuation de la pression avec la profondeur, laquelle est fonction de la fréquence selon la formule de Hunt (1979). Une fois le signal d'élévation de surface corrigé, les paramètres statistiques des vagues sont calculés : hauteur moyenne (Hm), période moyenne (T<sub>m</sub>), hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes (H<sub>1/3</sub>), période significative (T<sub>s</sub>), hauteur moyenne du dixième des vagues les plus hautes (H<sub>1/10</sub>), hauteur de la vague la plus haute (H<sub>max</sub>).

L'analyse spectrale est effectuée pour chaque rafale et permet d'obtenir les paramètres spectraux des vagues suivants : hauteur significative (m) Hs, période spectrale moyenne (s), Tm02, la période moyenne (s) Tm et la période du pic (s) Tp. Cette analyse spectrale est effectuée sur trois bandes de fréquences : le spectre entier (0,5-120 sec.), le spectre d'ondes d'infragravité (20-120 sec.) et le spectre d'ondes de gravité (0,5 – 20 sec.).

Comme pour les données d'AWAC, un contrôle de la qualité des données est effectué pour retirer d'éventuelles données erratiques. Une comparaison avec des données de marées est également

effectuée pour s'assurer de la coïncidence des pics de marées et de la bonne résolution temporelle des séries de données.

# 2.3.3 Données hydrodynamiques récoltées aux sites instrumentés

Les tableaux suivants présentent les périodes de déploiement et de récupération des instruments pour les sept sites d'étude de la phase III du projet MoDESCo.

En ce qui concerne les capteurs de pression, les profils ont la nomenclature suivante : P.nc. P fait référence au numéro du profil. Si deux profils ont été implantés sur un même site, les capteurs sur ce profil seront identifiés 1.x et 2.x; nc fait référence à la localisation du capteur sur le profil, tel qu'indiqué dans le tableau 3. Ainsi, le capteur 2.2 sera un capteur de pression placé à la flexure sur le profil numéro 2. Quand le profil est implanté devant une caméra vidéo AXIS (voir section 2.6.3), un « A » est ajouté dans la nomenclature du profil afin de faciliter son identification (par exemple pA1.2).

Numéro de capteur	Place sur le profil
0, 1	Haut estran
2	Flexure
3, 4	Au large de la flexure
5	Au large de la flexure, en eau de profondeur intermédiaire (5-7 m)

Tableau 3 : Nomenclature de la place des capteurs sur les profils

La maintenance des capteurs de pression déployés en zone côtière s'effectue généralement à marée basse pendant les marées de vives eaux. Les capteurs peuvent ainsi être atteints lors de niveaux d'eau relativement bas. Il se peut cependant que les vagues ou les courants soient tels que le capteur est inatteignable à cause de niveaux d'eau trop hauts (par exemple en cas de surcote) ou que l'environnement ne soit pas sécuritaire pour l'équipe terrain. Dans ce cas, d'autres essais sont effectués les jours suivants et, dans le pire des cas, la maintenance est reportée.

Il arrive également que les capteurs ne soient pas atteignables car enfouis sous une épaisseur de sédiments due à la migration de barres de sable. Dans ce cas, l'équipe sur le terrain, grâce aux données DGPS enregistrées lors de l'implantation des instruments au printemps, évalue la profondeur de l'appareil. Au-delà de 20 cm de profondeur, il est difficile d'atteindre le capteur dans son réceptacle et de remonter le pieu d'ancrage car le sédiment se liquéfie au fur et à mesure que l'on creuse. Le capteur est alors laissé en place. Si des capteurs non utilisés sont disponibles, un nouveau pieu et un nouveau capteur sont implantés à proximité du capteur enfoui pour maintenir la continuité de la collecte de données. En automne, et plus précisément en décembre lors du retrait de la totalité des capteurs, il arrive que des capteurs se retrouvent enfouis sous une épaisseur de sédiments gelés. Le capteur est alors inatteignable et laissé en place jusqu'à la prochaine tournée de terrain, en janvier et parfois n'est retrouvé qu'au printemps suivant. C'est le cas par exemple d'un capteur au site de Pointe-Lebel en décembre 2019. Il a dû être laissé en place car trouvé sous 20cm de sédiments gelés en décembre. Il a été retrouvé au printemps 2020. Le fait de laisser en place un capteur sous le sédiment pendant l'hiver n'a pas montré d'impact sur les données jusqu'à présent, même si c'est une pratique qui n'est pas encouragée. Nous avons plus de 70 capteurs de pression au laboratoire acquis depuis 2014. Nous avons donc plusieurs modèles et générations d'instruments qui ont des autonomies différentes. Nous essayons d'instrumenter les profils avec des capteurs d'autonomies similaires, dans le but d'optimiser au maximum le temps de déploiement, mais également les batteries. Il arrive cependant que des capteurs d'autonomie différentes soient sur un même profil. Dans ce cas, il arrive qu'un seul capteur ait besoin d'une maintenance, comme c'est le cas, par exemple au site de Pointe-Lebel lors du déploiement 4 de 2017 (voir Tableau 8). Un des capteurs du profil a été retiré et remplacé par un nouveau alors que les deux autres capteurs du profil avaient encore assez d'autonomie jusqu'au retrait en décembre. Cette opération n'a aucun impact sur la qualité des données recueillies.

Il arrive, enfin, que des capteurs ne soient pas retrouvés lors d'une campagne de maintenance, dû à un bris du pieu d'ancrage ou à un vol. Ce fut le cas par exemple au site de Chandler en 2017 (déploiement 3, tableau 12). Sur chacun des deux profils instrumentés, deux capteurs ont disparu en automne. Une telle perte est regrettable d'un point de vue des analyses des données, puisqu'une analyse fine des processus côtiers, notamment la transformation des vagues d'un capteur à l'autre d'un même profil, ne pourra pas être effectuée. Cependant, des équations empiriques peuvent être utilisées pour reconstituer les caractéristiques des vagues aux endroits des capteurs manquants. Dans le cas de Chandler en 2017, les capteurs les plus au large de la flexure ont été en place tout au long de l'année, ce qui n'a pas compromis les analyses du projet puisque des données de vagues au large (grâce au profileur de courant) et à la côte (grâce au capteurs au large de la flexure) ont pu être enregistrées en même temps.

## 2.3.3.1 Longue-Pointe-de-Mingan

### 2.3.3.1.1 <u>AWAC</u>

Pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan, un AWAC a été installé au large entre Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan à une profondeur de 14 m pour mesurer la hauteur des vagues et leur direction.

Tableau 4 : Périodes de déploiement et de récupération de l'AWAC à Longue-Pointe-de-Mingan pendant la phase III de MoDESCo

	AWAC de Longue-Pointe de Mingar	า
Période	Déploiement	Récupération
Hiver 2016	25 novembre 2016	15 juin 2017
Été 2017	15 juin 2017	28 novembre 2017
Hiver 2017	28 novembre 2017	22 juin 2018
Été 2018	22 juin 2018	31 octobre 2018
Hiver 2018	31 octobre 2018	29 mai 2019
Été 2019	6 juin 2019	24 novembre 2019
Hiver 2019	24 novembre 2019	23 juin 2020

### 2.3.3.1.2 Capteurs de pression

En 2017, quatre profils perpendiculaires à la côte ont été instrumentés avec chacun trois capteurs de pression. Ces profils ont une exposition différente aux vagues et des contextes morphologiques différents selon les secteurs d'implantation, avec présence et absence de barres sableuses prélittorales. À partir de 2018, les capteurs de haut estran n'ont pas été réimplantés. Le profil nº 1 n'a eu qu'un seul capteur à la flexure. En 2019, le profil nº 3 n'a pas été instrumenté. Un capteur au large de la flexure a été réinstallé sur le profil nº 1. Les dates de déploiement et de récupération sont présentées dans le tableau 5.
		Coor données		Dép	oloiement 1 - 2	017	Déploiement 2 - 2017			Déploiement 3 - 2017		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p1.1	320127.15138	5570685.36199	0.70288	120144			120144	23-05-2017	23-07-2017	120144	23-07-2017	18-09-2017
p1.2	320121.20128	5570674.53859	-0.52178	55102			55102	23-05-2017	22-07-2017	55102	22-07-2017	19-09-2017
p1.3	320090.12744	5570617.10084	-1.70063	55002			55002	23-05-2017	24-07-2017	55002	25-07-2017	enfoui
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 - 2	017	Dé	ploiement 2 - 2	017	Dé	oloiement 3 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p2.1	323669.26655	5569972.75171	0.72153	55092			55092	23-05-2017	22-07-2017	55092	22-07-2017	18-09-2017
p2.2	323668.95360	5569958.24667	-0.85825	55158			55158	23-05-2017	24-07-2017	55158	24-07-2017	18-09-2017
p2.4	323667.5209	5569881.94515	-1.15689	120149			120149	23-05-2017	24-07-2017	120149	24-07-2017	19-09-2017
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 - 2	017	Dé	ploiement 2 - 2	017	Dé	oloiement 3 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p3.1	331712.55898	5570988.10472	0.82265	120142			120142	23-05-2017	21-07-2017	120142	21-07-2017	18-09-2017
p3.2	331724.62890	5570977.11566	-0.68141	120145			120145	23-05-2017	21-07-2017	120145	21-07-2017	18-09-2017
p3.3	331793.247	5570849.507	-1.22597	55154						55154		18-09-2017
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 - 2	017	Dé	ploiement 2 - 2	017	Dé	oloiement 3 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
PA1	331965.54708	5571115.55378	-1.09148	120133	05-11-2016	25-05-2017	120133	25-05-2017	23-07-2017	120133	23-07-2017	19-09-2017
PA2	332013.42279	5571150.78650	-0.82781	55160	05-11-2016	25-05-2017	120141	23-05-2017	23-07-2017	120141	23-07-2017	18-09-2017
PA3	320107.9167	5570637.632	-1.23127									

Tableau 5 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Longue-Pointe-de-Mingan pendant la phase III de MoDESCo

		Coor données		Dé	ploiement 4 - 2	017	Dé	oloiement 5 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p1.1	320127.15138	5570685.36199	0.70288	120144	19-09-2017				04-12-2017
p1.2	320121.20128	5570674.53859	-0.52178	55102	20-09-2017				04-02-2019
p1.3	320090.12744	5570617.10084	-1.70063	55002	enfoui	10-29-17	55156	11-18-2017	04-12-2017
		Coordonnées		Dé	ploiement 4 - 2	017	Dé	oloiement 5 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p2.1	323669.26655	5569972.75171	0.72153	55092	19-09-2017	11-5-2017	55092	11-5-2017	03-12-2017
p2.2	323668.95360	5569958.24667	-0.85825	55158	19-09-2017				03-12-2017
p2.4	323667.5209	5569881.94515	-1.15689	120149	20-09-2017				03-12-2017
		Coordonnées		Dé	ploiement 4 - 2	017	Dé	oloiement 5 - 2	017
Profils	Est	Nord	Ζ	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p3.1	331712.55898	5570988.10472	0.82265	120142	19-09-2017				03-12-2017
p3.2	331724.62890	5570977.11566	-0.68141	120145	19-09-2017				03-12-2017
p3.3	331793.247	5570849.507	-1.22597	55154	19-09-2017				03-12-2017
		Coordonnées		Dé	ploiement 4 - 2	017	Dé	oloiement 5 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
PA1	331965.54708	5571115.55378	-1.09148	120133	19-09-2017				03-12-2017
PA2	332013.42279	5571150.78650	-0.82781	120141	19-09-2017				03-12-2017
PA3	320107.9167	5570637.632	-1.23127				55119	18-11-2017	05-12-2017

		Coor données		Dép	oloiement 1 – 2	2018	Dép	oloiement 2 – 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p1.2	320110.9235	5570657.494	-1.25673	120136	13-05-2018	13-07-2018	120136	13-07-2018	09-09-2018
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 – 2	2018	Dép	oloiement 2 – 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p2.2	323668.8923	5569970.464	-1.00903	120141	13-05-2018	13-07-2018	120141	13-07-2018	08-09-2018
P2.3	323667.5979	5569917.686	-0.94819	120143	14-05-2018	13-07-2018	120143	13-07-2018	08-09-2018
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 – 2	2018	Dép	oloiement 2 – 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p3.2	331730.1037	5570972.153	-0.95739	120127	14-05-2018	12-07-2018	120127	12-07-2018	08-09-2018
p3.3	331792.8071	5570849.609	-1.36156	120142	14-05-2018	12-07-2018	120142	12-07-2018	08-09-2018
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 – 2	2018	Dép	oloiement 2 – 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
PA1.2	319278.6836	5570928.427	-1.01987	120145	02-05-2018	13-07-2018	120145	14-07-2018	08-09-2018
PA1.3	319236.3973	5570825.097	-1.65435	120153	16-05-2018	13-07-2018	120153	13-07-2018	08-09-2018
DA 2	2210(0 7057	5571120.021	1 10124	120144	02 05 2018	12 07 2018	120144	12 07 2018	08 00 2018

		Coor données		Dé	oloiement 3 – 2	2018	Dép	oloiement 4 – 2	018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p1.2	320110.9235	5570657.494	-1.25673	55156	09-09-2018	07-11-2018	55156	07-11-2018	13-12-2018
		Coordonnées	-	Dé	oloiement 3 – 2	018	Dép	oloiement 4 – 2	018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p2.2	323668.8923	5569970.464	-1.00903	120141	09-09-2018	07-11-2018	120141	07-11-2018	13-12-2018
P2.3	323667.5979	5569917.686	-0.94819	120143	09-09-2018	07-11-2018	55093	07-11-2018	13-12-2018
		Coordonnées		Dé	oloiement 3 – 2	2018	Dép	oloiement 4 – 2	018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p3.2	331730.1037	5570972.153	-0.95739	120127	08-09-2018	06-11-2018	120127	06-11-2018	
p3.3	331792.8071	5570849.609	-1.36156	120142	08-09-2018	06-11-2018		07-11-2018	
		Coordonnées		Dé	oloiement 3 – 2	2018	Dép	oloiement 4 – 2	018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
PA1.2	319278.6836	5570928.427	-1.01987	120149	09-09-2018	07-11-2018	120149	07-11-2018	13-12-2018
PA1.3	319236.3973	5570825.097	-1.65435	120153	09-09-2018		55160	07-11-2018	13-12-2018
PA2	331960.7057	5571120.931	-1.10134	120144	08-09-2018	06-11-2018	120144	06-11-2018	13-12-2018

		Coordonnées		Dép	oloiement 1 – 2	019	Dép	oloiement 2 – 2	019	Dép	oloiement 3 – 2	019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p1.2	320103.5205	5570672.989	-0.663718				55090	03-05-2019	02-07-2019	55090	02-07-2019	29-08-2019
P1.3	320095.9126	5570655.59	-1.210986				55118	03-05-2019	02-07-2019	55118	02-07-2019	29-08-2019
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 – 2	019	Dép	oloiement 2 – 2	019	Dép	oloiement 3 – 2	019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p2.2	323690.5872	5569983.921	-0.656515				55142	03-05-2019	02-07-2019	55142	02-07-2019	29-08-2019
P2.3	323691.3098	5569891.51	-1.22727				55102	03-05-2019	02-07-2019	55102	02-07-2019	29-08-2019
		Coordonnées		Dép	oloiement 1 – 2	019	Dép	oloiement 2 – 2	019	Dép	oloiement 3 – 2	019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
PA1.2	319174.9385	5570985.812	0.06065	55156	18-04-2019	05-05-2019	55121	03-05-2019	02-07-2019	55121	02-07-2019	29-08-2019
PA1.3	319152.4741	5570914.219	-1.08042	55097	18-04-2019	05-05-2019	55120	03-05-2019	02-07-2019	55120	02-07-2019	29-08-2019
PA2.2	319345.9193	5570948.841	0.06851	55087	18-04-2019	05-05-2019	55089	03-05-2019	02-07-2019	55089	02-07-2019	29-08-2019
PA2.3	319315.1835	5570871.653	-1.14294	55123	18-04-2019	05-05-2019	55094	03-05-2019	02-07-2019	55094	02-07-2019	29-08-2019

		Coordonnées		Déj	oloiement 4 – 2	019	Dép	oloiement 5 – 2	019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p1.2	320103.5205	5570672.989	-0.663718	55090	29-08-2019	26-10-2019	55090	26-10-2019	14-12-2019
P1.3	320095.9126	5570655.59	-1.210986	55118	29-08-2019	26-10-2019	55118	26-10-2019	15-12-2019
		Coordonnées		Dép	oloiement 4 – 2	019	Dép	oloiement 5 – 2	019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
p2.2	323690.5872	5569983.921	-0.656515	55142	29-08-2019	26-10-2019	55142	26-10-2019	13-12-2019
P2.3	323691.3098	5569891.51	-1.22727	55102	29-08-2019	26-10-2019	120133	26-10-2019	13-12-2019
		Coordonnées		Dép	oloiement 4 – 2	019	Dép	oloiement 5 – 2	019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
PA1.2	319174.9385	5570985.812	0.06065	55121	29-08-2019	26-10-2019	55121	26-10-2019	enfoui
PA1.3	319152.4741	5570914.219	-1.08042	55120	29-08-2019	26-10-2019	55120	26-10-2019	disparu
PA2.2	319345.9193	5570948.841	0.06851	55089	29-08-2019	26-10-2019	55089	26-10-2019	15-12-2019
PA2.3	319315.1835	5570871.653	-1.14294	55094	29-08-2019	26-10-2019	55094	26-10-2019	18-12-2019

# 2.3.3.2 Pointe-aux-Outardes

#### 2.3.3.2.1 <u>AWAC</u>

Étant donné la configuration géographique des sites de Pointe-aux-Outardes et de Pointe-Lebel, un seul AWAC a été déployé au large des deux sites et les données hydrodynamiques enregistrées sont utilisées pour les sites de Pointe-aux-Outardes et de Pointe-Lebel (voir le tableau 7 du site de Pointe-Lebel pour les périodes de mise à l'eau et de récupération de l'appareil).

#### 2.3.3.2.2 Capteurs de pression

Sur le site de Pointe-Lebel, un seul profil est instrumenté de capteurs de pression. En 2017, quatre (4) capteurs ont été implantés entre le haut estran et au large de la flexure. A partir de 2018, le capteur de haut estran (p1.1) n'a plus été implanté.

Tableau 6 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Pointe-aux-Outardes pendant la phase III de MoDESCo

		Coor données		Dé	ploiement 1 - 2	017	Déploiement 2 - 2017			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.1	238003.01418	5434244.6972	1.4342	55099	27-05-2017	24-07-2017	55099	25-07-2017	19-09-2017	
P1.2	238013.236700	5434224.788	-0.2680	55115	27-05-2017	24-07-2017	55115	25-07-2017	19-09-2017	
P1.3	238101.246920	5434027.10691	-1.2844	120123	27-05-2017	24-07-2017	120123	25-07-2017	19-09-2017	
P1.4	238313.511700	5433552.26208	-1.6401	55159	27-05-2017	24-07-2017	55159	25-07-2017	19-09-2017	

		Coordonnées		Dé	ploiement 3 - 2	017	Déploiement 4 - 2017			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.1	238003.01418	5434244.6972	1.4342	55099	19-09-2017	03-11-2017	55099	03-11-2017	07-12-2017	
P1.2	238013.236700	5434224.788	-0.2680	55115	19-09-2017	19-09-2017	55115	19-09-2017	07-12-2017	
P1.3	238101.246920	5434027.10691	-1.2844	120123	19-09-2017	19-09-2017	120123	19-09-2017	06-12-2017	
P1.4	238313.511700	5433552.26208	-1.6401	55159	19-09-2017	19-09-2017	55159	19-09-2017	06-12-2017	

		Coor données	6	Dép	loiement 1 - 2	2018	Déploiement 2 - 2018			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	238011.752	5434221.51	-0.5291	55097	19-05-2018	16-07-2018	55097	16-07-2018	12-09-2018	
P1.3	238099.986	5434024.62	-1.229764	55092	19-05-2018	16-07-2018	55092	16-07-2018	12-09-2018	
P1.4	238312.065	5433550.31	-1.622264	120146	19-05-2018	16-07-2018	55002	16-07-2018	12-09-2018	

		Coor données	1	Dép	oloiement 3 - 2	2018	Déploiement 4 - 2018			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	238011.752	5434221.51	-0.5291	55097	12-09-2018	12-09-2018	55091	10-11-2018	08-12-2018	
P1.3	238099.986	5434024.62	-1.229764	55092	12-09-2018	12-09-2018	55090	10-11-2018	08-12-2018	
P1.4	238312.065	5433550.31	-1.622264	55002	12-09-2018	12-09-2018	55077	10-11-2018	08-12-2018	

		Coor données	;	Dép	oloiement 1 - 2	2019	Déploiement 2 - 2019			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	238013.851	5434217.05	-0.721754	55095	08-05-2019	06-07-2019	55095	06-07-2019	02-09-2019	
P1.3	238099.384	5434024.8	-1.123	55096	08-05-2019	06-07-2019	55091	06-07-2019	02-09-2019	
P1.4	238330.847	5433508.85	-1.890886	55160	08-05-2019	06-07-2019	55119	06-07-2019	02-09-2019	

		Coor données	1	Dép	oloiement 3 - 2	2019	Déploiement 4 - 2019			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	238013.851	5434217.05	-0.721754	55095	02-09-2019	30-10-2019	55095	30-10-2019	14-12-2019	
P1.3	238099.384	5434024.8	-1.123	55096	02-09-2019	30-10-2019	120148	30-10-2019	14-12-2019	
P1.4	238330.847	5433508.85	-1.890886	55160	02-09-2019	30-10-2019	55102	30-10-2019	14-12-2019	

# 2.3.3.3 Pointe-Lebel

#### 2.3.3.3.1 <u>AWAC</u>

Tableau 7 : Périodes de déploiement et de récupération de l'AWAC à Pointe-Lebel pendant la phase III de MoDESCo

AWAC de Pointe-Lebel										
Période	Déploiement	Récupération								
Hiver 2016	11 octobre 2016	20 avril 2017								
Été 2017	23 avril 2017	Perdu								
Hiver 2017	16 novembre 2017	9 mai 2018								
Été 2018	16 mai 2018	23 octobre 2018								
Hiver 2018	30 octobre 2018	20 avril 2019								
Été 2019	22 avril 2019	2 décembre 2019								
Hiver 2019	1 décembre 2019	16 mai 2020								

#### 2.3.3.3.2 Capteurs de pression

Deux profils ont été instrumentés à Pointe-Lebel avec chacun quatre capteurs de pression localisés sur le haut estran, à la flexure et au large de la flexure. À partir de 2018, le capteur du haut estran n'a pas été réimplanté (p1.1). Les dates de déploiement et de récupération sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Périodes	de déploiement et de	récupération des	s capteurs de pression à	Pointe-Lebel pendant la	phase III de MoDESCo
	•	•	•	•	•

		Coor données		Déploiement 1 - 2017			Dép	ploiement 2 - 2	2017	Déploiement 3 - 2017		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.1	251270.08216	5439355.7139	2.5999				120143	27-05-2017	26-07-2017	120143	25-07-2017	19-09-2017
P1.2	251276.265900	5439309.788	-0.6358				120148	27-05-2017	25-07-2017	120148	25-07-2017	18-09-2017
P1.3	251290.639020	5439205.11503	-1.1871				55121	27-05-2017	25-07-2017	55121	25-07-2017	18-09-2017
P1.4	251678.679890	5438579.09718	-1.6910				120154	27-05-2017	25-07-2017	120154	25-07-2017	18-09-2017
	Coor données			Déploiement 1 - 2017								
		Coor données		Dép	oloiement 1 - 2	2017	Dép	ploiement 2 - 2	2017	Dép	oloiement 3 - 2	2017
Profils	Est	Coor données Nord	Z	Dép num. Série	Diciement 1 - 2 Début	2017 Retrait	Dér num. Série	Diciement 2 - 2 Début	2017 Retrait	Dér num. Série	Début	2017 Retrait
Profils P2.1	Est 238003.01418	Coor données Nord 5434244.6972	Z 1.4342	Dép num. Série	Diciement 1 - 2 Début	2017 Retrait	<b>Dé</b> num. Série 120147	Début 27-05-2017	<b>Retrait</b> 25-07-2017	<b>Dé</b> num. Série 120147	Début 25-07-2017	<b>Retrait</b> 19-09-2017
Profils P2.1 P2.2	Est 238003.01418 5439440.45294	Coor données Nord 5434244.6972 251687.248	Z 1.4342 0.240361	<b>Dér</b> num. Série 120136	Début 04-12-2016	Retrait 27-05-2017	<b>Dér</b> num. Série 120147 120136	Diciement 2 - 2           Début           27-05-2017           27-05-2017	Retrait 25-07-2017 25-07-2017	<b>Dér</b> num. Série 120147 120136	Doiement 3 - 2           Début           25-07-2017           25-07-2017	Retrait 19-09-2017 18-09-2017
Profils P2.1 P2.2 P2.3	Est 238003.01418 5439440.45294 238101.246920	Nord           5434244.6972           251687.248           5434027.10691	Z 1.4342 0.240361 -1.2844	<b>Dér</b> num. Série 120136	Dioiement 1 - 2 Début 04-12-2016	2017 Retrait 27-05-2017	Dér num. Série 120147 120136 120146	Dioiement 2 - 2           Début           27-05-2017           27-05-2017           27-05-2017	Retrait           25-07-2017           25-07-2017           25-07-2017	Dér num. Série 120147 120136 120146	Doiement 3 - 2           Début           25-07-2017           25-07-2017           25-07-2017	Retrait 19-09-2017 18-09-2017 18-09-2017

		Coor données		Dép	oloiement 4 - 2	2017	Déploiement 5 - 2017			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.1	251270.08216	5439355.7139	2.5999	120143	19-09-2017				07-12-2017	
P1.2	251276.265900	5439309.788	-0.6358	120148	19-09-2017				07-12-2017	
P1.3	251290.639020	5439205.11503	-1.1871	55121	19-09-2017	03-11-2017	55121	03-11-2017	07-12-2017	
P1.4	251678.679890	5438579.09718	-1.6910	120154	20-09-2017				07-12-2017	
		Coordonnées		Dép	loiement 4 - 2	2017	Dép	oloiement 5 - 2	017	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P2.1	238003.01418	5434244.6972	1.4342	120147	19-09-2017				07-12-2017	
P2.2	5439440.45294	251687.248	0.240361	120136	18-09-2017				07-12-2017	
P2.3	238101.246920	5434027.10691	-1.2844	120146	19-09-2017				07-12-2017	
P2.4	238313.511700	5433552.26208	-1.6401	55098	19-09-2017	04-11-2017	55093	04-11-2017	07-12-2017	

		Coordonnées		Déploiement 1 - 2018			Déploiement 2 - 2018			Déploiement 3 - 2018		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.2	251274.568966	5439317.499	-0.4662				55091	18-05-2018	17-07-2018	55091	17-07-2018	11-09-2018
P1.3	251291.358549	5439201.53506	-1.1411				55090	18-05-2018	17-07-2018	55090	17-07-2018	11-09-2018
P1.4	251677.123650	5438575.60506	-1.7828				55077	18-05-2018	17-07-2018	55077	17-07-2018	11-09-2018
		Coor données		Déploiement 1 - 2018			Déploiement 2 - 2018			Dép	loiement 3 - 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	251677.22672	5439449.34354	0.457087	55095	11-04-2018	31-05-2018	55142	31-05-2018	17-07-2018	55095	17-07-2018	11-09-2018
P2.3	251950.6041	5439185.863	-1.429372				55089	18-05-2018	17-07-2018	55089	17-07-2018	11-09-2018
P2.4	252150.309	5438896.737	-1.64861				55087	18-05-2018	16-07-2018	55087	17-07-2018	11-09-2018

		Coordonnées		Dép	loiement 4 - 2	2018	Déploiement 5 - 2018			
Profils	Est	Nord	Ζ	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	251274.568966	5439317.499	-0.4662	55091	11-09-2018	09-11-2018	120136	09-11-2018	05-12-2018	
P1.3	251291.358549	5439201.53506	-1.1411	55090	11-09-2018	09-11-2018	55158	09-11-2018	05-12-2018	
P1.4	251677.123650	5438575.60506	-1.7828	55077	11-09-2018	09-11-2018	55117	09-11-2018	05-12-2018	
		Coor données		Dép	loiement 4 - 2	2018	Déploiement 5 - 2018			
Profils	Est	Nord	Ζ	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P2.2	251677.22672	5439449.34354	0.457087	55095	11-09-2018	09-11-2018	55142	09-11-2018	05-12-2018	
P2.3	251950.6041	5439185.863	-1.429372	55089	11-09-2018	09-11-2018	55101	09-11-2018	05-12-2018	
P2.4	252150.309	5438896.737	-1.64861	55087	11-09-2018	09-11-2018	120143	09-11-2018	05-12-2018	

		Coor données		Dép	oloiement 1 - 2	2019	Déploiement 2 - 2019			
Profils	Est	Nord	Ζ	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	251274.052058	5439315.509	-0.5730	55099	07-05-2019	05-07-2019	55099	05-07-2019	31-08-2019	
P1.3	251326.453054	5439202.67824	-1.1607	55093	07-05-2019	05-07-2019	55093	05-07-2019	31-08-2019	
P1.4	251677.598261	5438572.08069	-1.7061	55119	07-05-2019	05-07-2019	120145	05-07-2019	31-08-2019	
		Coor données		Dép	loiement 1 - 2	2019	Déploiement 2 - 2019			
Profils	Est	Nord	Ζ	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P2.2	251677.92924	5439446.44517	0.408389	55092	07-05-2019	05-07-2019	55092	05-07-2019	31-08-2019	
P2.3	251951.1484	5439184.525	-1.422906	55101	07-05-2019	05-07-2019	55101	05-07-2019	31-08-2019	
P2.4	252149.9667	5438896.155	-1.560584	55091	07-05-2019	05-07-2019	55154	05-07-2019	31-08-2019	

		Coordonnées		Dép	oloiement 3 - 2	2019	Dép	oloiement 4 - 2	2019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.2	251274.052058	5439315.509	-0.5730	55099	01-09-2019	29-10-2019	55099	29-10-2019	14-12-2019
P1.3	251326.453054	5439202.67824	-1.1607	55093	01-09-2019	29-10-2019	55093	29-10-2019	14-12-2019
P1.4	251677.598261	5438572.08069	-1.7061	120145	01-09-2019	29-10-2019	120145	29-10-2019	14-01-2020 *
		Coordonnées		Dép	oloiement 3 - 2	2019	Dép	oloiement 4 - 2	2019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	251677.92924	5439446.44517	0.408389	55092	01-09-2019	29-10-2019	55092	29-10-2019	Voir note
P2.3	251951.1484	5439184.525	-1.422906	55101	01-09-2019	29-10-2019	55101	29-10-2019	15-12-2019
P2.4	252149.9667	5438896.155	-1.560584	55154	01-09-2019	29-10-2019	55154	29-10-2019	14-01-2020 *
Note: p2.2: er	nfoui de 20cm sou	is sédiment gelé lo	ors du retrait e	n décembre 20	020. Retrouvé	au printemps	2020.		
*	n attaionahlar lan	der netwolt en diese		nation diana					

\* capteurs non atteignables lors du retrait en décembre 2020 en raison d'une surcôte majeure

# 2.3.3.4 Maria

## 2.3.3.4.1 <u>AWAC</u>

Tableau 9 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Maria pendant la phase III de MoDESCo

AWAC de Maria										
Période	Déploiement	Récupération								
Hiver 2016	19 novembre 2016	3 juin 2017								
Été 2017	3 juin 2017	22 novembre 2017								
Hiver 2017	25 novembre 2017	1er juin 2018								
Été 2018	2 juin 2018	30 novembre 2018								
Hiver 2018	2 décembre 2018	21 juin 2019								
Été 2019	21 juin 2019	17 novembre 2019								
Hiver 2019	17 novembre 2019	12 avril 2020								

### 2.3.3.4.2 Capteurs de pression

À Maria, en 2017, quatre profils ont été munis de capteurs de pression. À partir de 2018, trois profils ont été implantés (tableau 10).

		Coor données		Dép	oloiement 1 - 2	2017	Dép	oloiement 2 - 2	2017	Dép	Déploiement 3 - 20	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.1	192394.2369	5336231.049	0.50495	55097	25-06-2017	19-08-2017	55097	20-08-2017	17-10-2017	55097	17-10-2017	02-12-2017
P1.2	192401.6123	5336224.492	-0.65703	55101	25-06-2017	19-08-2017	55101	20-08-2017	17-10-2017	55101	17-10-2017	02-12-2017
P1.3	192473.7477	5336150.599	-1.39905	55103	25-06-2017	20-08-2017	55103	21-08-2017	17-10-2017	120127	17-10-2017	02-12-2017
		Coordonnées	-	Dép	loiement 1 - 2	ent 1 - 2017 Déploiement 2			2017	Dép	loiement 3 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.1	193563.8774	5337408.293	0.58927	55091	25-06-2017	19-08-2017	55091	20-08-2017	17-10-2017	55091	18-10-2017	02-12-2017
P2.2	193573.2559	5337394.247	-0.72351	55095	25-06-2017	19-08-2017	55095	20-08-2017	17-10-2017	55095	17-10-2017	02-12-2017
P2.3	193612.2205	5337323.304	-1.51848	55096	25-06-2017	20-08-2017	55096	21-08-2017	17-10-2017	120151	17-10-2017	02-12-2017
		Coordonnées	-	Dép	loiement 1 - 2	2017	Dép	loiement 2 - 2	2017	Dép	Déploiement 3 - 20	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P3.1	194575.2163	5338253.009	0.88392	55089	24-06-2017	19-08-2017	55089	20-08-2017	17-10-2017	55089	18-10-2017	02-12-2017
		Coor données		Dép	oloiement 1 - 2	2017	Dép	oloiement 2 - 2	2017	Dép	loiement 3 - 2	017
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P4.1	194924.1807	5338575.307	0.42364	55077	24-06-2017	19-08-2017	55077	20-08-2017	17-10-2017	55088	18-10-2017	02-12-2017
P4.2	194931.3215	5338566.643	-0.59121	55087	24-06-2017	19-08-2017	55087	20-08-2017	17-10-2017	55087	17-10-2017	02-12-2017
P4.3	195007.5745	5338476.39	-1.36674	55088	24-06-2017	20-08-2017	55088	21-08-2017	17-10-2017	55077	17-10-2017	02-12-2017
	Coordonnées			Dér	oloiement 1 - 2	2018	Dér	ploiement 2 - 2	2018	Dér	ploiement 3 - 2	2018
Profils	Fet	Nord	7	num Série	Début	Retrait	num Série	Début	Retrait	num Série	Début	Retrait
P1 2	194931 6332	5338566 365	-0 7094	55118	14-06-2018	14-08-2018	55118	14-08-2018	07-10-2018	55118	08-10-2018	08-12-2018
P1 3	195009 8876	5338476 33	-1 3721	55119	14-06-2018	14-08-2018	55119	14-08-2018	07-10-2018	55119	08-10-2018	08-12-2018
1110	19000910070	Coordonnées	110/21	Dép	ploiement 1 - 2	2018	Dép	ploiement 2 - 2	2018	Dér	ploiement 3 - 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	193570.7217	5337399.703	-0.6192	55120	14-06-2018	14-08-2018	55120	14-08-2018	07-10-2018	55120	08-10-2018	08-12-2018
P2.3	193618.6033	5337331.05	-1.2938	55121	14-06-2018	14-08-2018	55121	14-08-2018	07-10-2018	55121	08-10-2018	08-12-2018
		Coordonnées	-	Dép	Déploiement 1 - 2018 Déploiement 2 -		2018	Dép	Déploiement 3 - 2018			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P3.2	192401.5088	5336224.354	-0.7926	55088	14-06-2018	14-08-2018	55088	14-08-2018	07-10-2018	55088	08-10-2018	08-12-2018
P3.3	192471.1037	5336154.297	-1.3384	55123	14-06-2018	14-08-2018	55123	14-08-2018	07-10-2018	55123	08-10-2018	08-12-2018

Tableau 10 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Maria pendant la phase III de MoDESCo

		Coor données		Dép	loiement 1 - 2	2019	Dép	loiement 2 - 2	2019	Déploiement 3 - 2019		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.2	194928.9374	5338565.476	-0.6054	55117	06-05-2019	03-06-2019	120152	03-06-2019	31-07-2019	55123	01-08-2019	27-09-2019
P1.3	195027.5208	5338462.06	-0.8791				55156	03-06-2019	31-07-2019	55156	01-08-2019	27-09-2019
	Coordonnées			Dép	loiement 1 - 2	2019	Dép	loiement 2 - 2	2019	Dép	loiement 3 - 2	2019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	193572.8592	5337398.494	-0.5524				55097	03-06-2019	31-07-2019	55097	01-08-2019	27-09-2019
P2.3	193619.1138	5337331.78	-1.0048				120155	03-06-2019	31-07-2019	120155	01-08-2019	27-09-2019
		Coordonnées		Déploiement 1 - 2019			Dép	Déploiement 2 - 2019			loiement 3 - 2	2019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P3.2	192403.1471	5336222.993	-0.6915				55087	03-06-2019	31-07-2019	55087	01-08-2019	27-09-2019
P3.3	192466.6812	5336172.894	-0.6238				120134	03-06-2019	31-07-2019	120134	01-08-2019	27-09-2019

		Coordonnées		Dép	oloiement 4 - 2	2019	Déploiement 5 - 2019			
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P1.2	194928.9374	5338565.476	-0.6054	55123	27-09-2019	26-11-2019	55097	26-11-2019	12-12-2019	
P1.3	195027.5208	5338462.06	-0.8791	55156	27-09-2019	26-11-2019	55156	26-11-2019	12-12-2019	
		Coor données		Dép	oloiement 4 - 2	2019	Dép	oloiement 5 - 2	2019	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P2.2	193572.8592	5337398.494	-0.5524	55097	27-09-2019	26-11-2019	55097	26-11-2019	12-12-2019	
P2.3	193619.1138	5337331.78	-1.0048	120155	27-09-2019	26-11-2019	120155	26-11-2019	12-12-2019	
		Coor données		Déploiement 4 - 2019			Déploiement 5 - 2		2019	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	
P3.2	192403.1471	5336222.993	-0.6915	55087	28-09-2019	26-11-2019	55087	26-11-2019	12-12-2019	
P3.3	192466.6812	5336172.894	-0.6238	120134	28-09-2019	26-11-2019	120134	26-11-2019	12-12-2019	

# 2.3.3.5 Chandler

# 2.3.3.5.1 <u>AWAC</u>

Tableau 11 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Chandler pendant la phase III de MoDESCo

	AWAC de Chandler	
Période	Déploiement	Récupération
Hiver 2016	19 novembre 2016	3 juin 2017
Été 2017	3 juin 2017	21 novembre 2017
Hiver 2017	22 novembre 2017	1er juin 2018
Été 2018	1er juin 2018	1er décembre 2018
Hiver 2018	2 décembre 2018	24 juin 2019
Été 2019	24 juin 2019	17 novembre 2019
Hiver 2019	17 novembre 2019	13 juin 2020

#### 2.3.3.5.2 Capteurs de pression

		Coor données		Déploiement 1 - 2017			Dép	oloiement 2 - 2	2017	Déploiement 3 - 2017		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.1	290676.3878	5354559.852	0.712179	55116	26-06-2017	21-08-2017	55116	22-08-2017	18-10-2017	55116	18-10-2017	perdu
P1.2	290692.4577	5354554.157	-1.183301	55117	26-06-2017	22-08-2017	55117	22-08-2017	18-10-2017	55117	18-10-2017	perdu
P1.3	290697.5535	5354552.528	-1.151383	55119	26-06-2017	22-08-2017	55119	22-08-2017	19-10-2014	55103	18-10-2017	inatteignable
		Coor données		Dép	loiement 1 - 2	2017	Dép	oloiement 2 - 2	2017	Dép	2017	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.1	290998.1818	5355203.78	0.261633	55122	26-06-2017	perdu						
P2.2	291007.1067	5355199.651	-0.681586	55137	26-06-2017	21-08-2017	55137	22-08-2017	18-10-2017	55137	18-10-2017	perdu
P2.3	291015.6858	5355195.732	-1.24306	55142	26-06-2017	21-08-2017	55142	22-08-2017	18-10-2017	55096	18-10-2017	03-12-2017

Tableau 12 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Chandler pendant la phase III de MoDESCo

		Coordonnées		Dép	loiement 1 - 2	2018	Déploiement 2 - 2018			Déploiement 3 - 2018		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.3	291017.1853	5355195.951	-0.99223	55155	15-06-2018	13-08-2018	55093	13-08-2018	07-10-2018	55055	07-10-2018	06-12-2018
		Coordonnées		Dép	loiement 1 - 2	018	Dép	oloiement 2 - 2	018	Dép	2018	
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	290690.705	5354555.044	-0.87772	55158	15-06-2018	13-08-2018	55158	13-08-2018	07-10-2018	55159	07-10-2018	04-06-2019
P2.3	290695.3187	5354553.165	-0.99299	55159	15-06-2018	13-08-2018	55159	13-08-2018	10-10-2018			

		Coordonnées		Déploiement 1 - 2019			Déploiement 2 - 2019			Déploiement 3 - 2019		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.2	291012.8825	5355198.049	-0.78496	120151	04-06-2019	02-08-2019	120151	02-08-2019	28-09-2019	120151	28-09-2019	15-01-2020
	Coordonnées			Dép	oloiement 1 - 2	2019	Déploiement 2 - 2019			Dép	loiement 3 - 2	2019
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	290692.9348	5354553.678	-0.89524	55155	04-06-2019	02-08-2019	55155	02-08-2019	28-09-2019	55155	28-09-2019	15-01-2020

# 2.3.3.6 Pointe-aux-Loups

# 2.3.3.6.1 <u>AWAC</u>

Tableau 13 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Pointe-aux-Loups pendant la phase III de MoDESCo

	AWAC de Pointe-aux-Loups	
Période	Déploiement	Récupération
Hiver 2016	Pas d'instrur	nent
Été 2017	Pas d'instrur	nent
Hiver 2017	Pas d'instrur	nent
Été 2018	19 mai 2018	26 novembre 2018
Hiver 2018	26 novembre 2018	13 mai 2019
Été 2019	13 mai 2019	5 décembre 2019
Hiver 2019	5 décembre 2019	Pas retrouvé

#### 2.3.3.6.2 Capteurs de pression

		Coor données		Déploiement 1 - 2017			Déploiement 2 - 2017			Déploiement 3 - 2017		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P3.1	292658.1192	5268656.689	0.3404	120128	26-05-2017	19-08-2017	120128	19-08-2017	10-11-2017	120129	10-11-2017	06-12-2017
P3.2	292651.6467	5268664.794	-0.3258	120130	26-05-2017	19-08-2017	120130	19-08-2017	10-11-2017	120138	10-11-2017	06-12-2017
P3.3	292636.4382	5268682.197	-0.8040	120131	26-05-2017	19-08-2017	120131	19-08-2017	11-11-2017	120150	10-11-2017	perdu

Tableau 14 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Pointe-aux-Loups pendant la phase III de MoDESCo

		Coor données		Dép	oloiement 1 - 2	2018	Dép	oloiement 2 - 2	2018	Déploiement 3 - 2018		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.2	292658.1192	5268656.689	0.3404	120130	17-05-2018	09-08-2018	120130	09-08-2018	26-11-2018	120125	26-11-2018	22-12-2018
P1.3	292651.6467	5268664.794	-0.3258	120128	17-05-2018	09-08-2018	120128	09-08-2018				22-12-2018
		Coor données		Déploiement 1 - 2018			Déploiement 2 - 2018			Déploiement 3 - 2018		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.3	292658.1192	5268656.689	0.3404	120129	17-05-2018	09-08-2018	120129	09-08-2018				perdu

		Coordonnées		Dép	loiement 1 - 2	2019	Déploiement 2 - 2019			Déploiement 3 - 2019		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.2	292437.2452	5268480.868	-0.7148	120132	07-05-2019	30-07-2019	120130	30-07-2019				enfoui
P1.3	292190.3404	5268227.228	-0.8638	120123	07-05-2019	30-07-2019	120128	30-07-2019	03-12-2019	120125	03-12-2019	31-12-2019
	Coordonnées			Déploiement 1 - 2019			Déploiement 2 - 2019			Déploiement 3 - 2019		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.2	272146.3641	5244030.904	-0.9262	120128	17-05-2018	30-07-2019	120129	30-07-2019	03-12-2019	120123	03-12-2019	31-12-2019

# 2.3.3.7 Baie-de-Plaisance

## 2.3.3.7.1 <u>AWAC</u>

Tableau 15 : Périodes de déploiement et de récupération des instruments à Baie-de-Plaisance pendant la phase III de MoDESCo

AWAC de Baie-de-Plaisance											
Période	Déploiement	Récupération									
Hiver 2016	Pas d'instrur	ment									
Été 2017	Pas d'instrur	nent									
Hiver 2017	3 décembre 2017	15 mai 2018									
Été 2018	15 mai 2018	20 novembre 2018									
Hiver 2018	7 décembre 2018	6 mai 2019									
Été 2019	15 juillet 2019 <sup>*</sup>	2 décembre 2019									
Hiver 2019	28 décembre 2019 <sup>**</sup>	27 mai 2020									

\* La mise à l'eau de l'appareil a été retardée pour la période « Été 2019 » par manque de disponibilité de plongeur lors de la période de la pêche aux homards.

\*\* La mise à l'eau de l'appareil a été retardée pour la période « Hiver 2019 » à cause de mauvaises conditions météo en décembre 2019 empêchant une sortie en mer sécuritaire.

#### 2.3.3.7.2 Capteurs de pression

		Coor données		Déploiement 1 - 2017			Dép	oloiement 2 - 2	2017	Déploiement 3 - 2017		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P1.1	271957.7146	5240942.171	0.1163	120132	28-05-2017	20-08-2017	120132	21-08-2017	07-11-2017	55123	07-11-2017	02-12-2017
P1.2	271988.7314	5240948.067	-0.7149	120134	28-05-2017	20-08-2017	120134	21-08-2017	07-11-2017	55090	07-11-2017	02-12-2017
P1.3	272005.332	5240950.531	-1.1705	120137	28-05-2017	20-08-2017	120137	21-08-2017	07-11-2017	55118	07-11-2017	02-12-2017

Tableau 16 : Périodes de déploiement et de récupération des capteurs de pression à Baie-de-Plaisance pendant la phase III de MoDESCo

		Coor données		Déploiement 1 - 2018			Déploiement 2 - 2018			Déploiement 3 - 2018		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P3.2	272488.974	5238841.378	-0.1577	120131	17-05-2018	12-08-2018	120131	12-08-2018				24-12-2018
P3.3	272523.6505	5238853.008	-0.9160	120132	17-05-2018	12-08-2018	120132	12-08-2018				24-12-2018
		Coor données			Déploiement 1 - 2018			Déploiement 2 - 2018			oloiement 3 - 2	2018
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.3	272144.7863	5244031.198	-1.0684	120137	17-05-2018	12-08-2018	120154	12-08-2018				24-12-2018

		Coor données		Déploiement 1 - 2019			Déploiement 2 - 2019			Déploiement 3 - 2019		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P3.2	272516.7827	5238850.65	-0.5021	55158	10-05-2019	29-07-2019	55158	29-07-2019	26-11-2019	55158	26-11-2019	23-12-2019
P3.3	272547.2681	5238860.771	-0.5146	120125	10-05-2019	29-07-2019	120125	29-07-2019	26-11-2019	120125	26-11-2019	
	Coordonnées			Déploiement 1 - 2019			Déploiement 2 - 2019			Déploiement 3 - 2019		
Profils	Est	Nord	Z	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait	num. Série	Début	Retrait
P2.3	272146.308	5244030.903	-0.4537	120149	10-05-2019	29-07-2019	120149	29-07-2019	26-11-2019	120149	26-11-2019	23-12-2019

# 2.3.4 Données auxiliaires, angles d'inclinaison et intensités acoustiques de chaque courantomètre aux sites témoins

#### 2.3.4.1.1 Données auxiliaires

La figure 5 donne un exemple de données auxiliaires (voltage des batteries, vitesse du son, pression et température) enregistrées aux senseurs situés sur la tête de l'appareil pendant différents déploiements (entre l'automne 2016 et l'automne 2019) pour chacun des sites témoins. Afin de ne pas alourdir ce rapport, les données pour chaque déploiement et chaque site ne sont pas montrées ici mais disponibles sur demande.

Les données du voltage des batteries permettent de monitorer la consommation d'énergie de l'appareil et de déceler d'éventuelles anomalies lors des déploiements. La consommation d'énergie montrée ici pour chaque site est tout à fait dans les normes, débutant avec 13,5 V ou plus et atteignant au moins 10 V en fin de déploiement.

Les variations de température illustrent le cycle saisonnier hiver-été : un refroidissement de l'eau en hiver suivi d'un réchauffement en été, avec des variations temporelles journalières ou hebdomadaires liées à des événements sporadiques d'échelle temporelle variable (débâcle, tempêtes, etc.).

La vitesse du son est déduite à partir de la température et montre, de ce fait, les mêmes variations. La vitesse du son est importance ici car elle a une influence sur la propagation de l'énergie acoustique dans la colonne d'eau et, par conséquent, sur les mesures de courants. Les données recueillies montrent des variations cohérentes à chaque site, variant entre 1435 et 1500 m/s selon la salinité (non mesurée) de chaque site.

Les données de pression montrent les variations du poids de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument. On y voit les variations du niveau d'eau liées à des processus d'échelles temporelles diverses : très rapides, telles les vagues (de l'ordre de la seconde à la dizaine de secondes), jusqu'aux différentes composantes des marées (de l'ordre de quelques heures à quelques semaines).





Figure 5 : Données de batteries, vitesse du son, pression et température des AWACs pour différentes périodes de déploiement aux sites témoins; a) Longue-Pointe-de-Mingan b) Pointe-Lebel c) Maria d) Chandler e) Baie-de-Plaisance f) Pointe-aux-Loups

#### 2.3.4.1.2 Angles d'inclinaison

La figure 6 illustre les données d'inclinaison de l'appareil : l'angle de cap, qui désigne la direction vers laquelle l'appareil pointe par rapport au nord magnétique, puis le roulis et le tangage (oscillations dans les plans horizontaux 'x' et 'y', par rapport au nord magnétique également). Il est important de surveiller ces angles d'inclinaison pour s'assurer qu'ils restent dans des limites respectables. Pour avoir des données de mesure de la surface de bonne qualité, il est important que les angles de roulis et de tangage restent inférieurs à 10 degrés en valeur absolue. Ces données d'inclinaison servent également à déterminer si l'appareil est resté stable pendant son déploiement.

Dans les exemples montrés ici, les appareils sont restés stables de manière générale pendant leurs déploiements à tous les sites. On peut noter des variations plus importantes pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan (figure 6 panel a) : l'appareil a changé de cap à plusieurs reprises pendant son déploiement. Les petites variations peuvent être attribuées au passage de navires au-dessus de l'appareil. En effet les navires, qui sont généralement en métal, vont induire des changements dans le champ magnétique, ce qui aura une influence sur le compas interne de l'appareil et, par conséquent, les données de cap, roulis et tangage peuvent être perturbées. Les changements plus soudains et permanents peuvent être attribués à des évènements de tempêtes, lors desquels l'énergie des vagues et les vitesses des courants sont tellement fortes que l'appareil peut bouger, voire être soulevé. De tels changements peuvent aussi être dus à des incidents de chalutage.



Figure 6 : Données cap, roulis et tangage des AWACs (réf. nord magnétique) pour différentes périodes de déploiement aux sites témoins; a) Longue-Pointe-de-Mingan b) Pointe-Lebel c) Maria d) Chandler e) Baie-de-Plaisance f) Pointe-aux-Loups.

#### 2.3.4.1.3 Intensité acoustique

Les figures 7 à 12 illustrent l'intensité des trois faisceaux acoustiques (en unité de comptes) sur l'épaisseur de la colonne d'eau pour chaque instrument déployé aux sites témoins pour des périodes de temps variées, couvrant l'ensemble des périodes de déploiement des appareils.

L'intensité acoustique ambiante dans l'eau de mer claire au repos est autour de 30 comptes. Plus l'eau est turbide, plus le signal acoustique va être fort. Cela est dû au fait que les ondes acoustiques sont réfléchies sur les particules en suspension dans l'eau.

Dans un premier temps, il est important de vérifier que les trois faisceaux retournent des signaux cohérents entre eux. C'est en effet la combinaison de ces trois faisceaux qui retourne les données de courants dans la colonne d'eau découpée en tranches horizontales (cellules). Une des hypothèses principales du calcul des courants est que les couches d'eau sont homogènes dans chaque tranche de colonne d'eau ou volume de cellule. Si un des faisceaux est défectueux ou devient obstrué pendant le déploiement, une des composantes du courant ne pourra pas être calculée. Dans les figures ci-dessous, et dans tous les déploiements effectués jusqu'à maintenant, tous les faisceaux ont été fonctionnels en tout temps.

Ces données d'intensité acoustique servent également à estimer de manière **qualitative** la concentration de matière en suspension dans la colonne d'eau. Par exemple, la couleur jaune, illustrant une forte intensité acoustique dans les premières cellules de courant (2-4 m au-dessus du fond), pourrait indiquer des événements de mise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau. Il nous est impossible de quantifier cette matière en suspension sans avoir de données de concentration dans les cellules au temps d'enregistrement de l'appareil. Cela serait nécessaire pour calibrer les retours acoustiques avec une concentration de matière en suspension.

Dans toutes les figures ci-dessous, on peut visualiser des événements durant lesquels l'intensité acoustique est relativement élevée (autour de 160 comptes) dans les premières cellules au-dessus de l'appareil, atteignant 2-3 m au-dessus du fond (figure 8 à figure 12), et parfois 5-6 m au-dessus du fond (figure 11) de façon régulière, ce qui pourrait correspondre à une mise en suspension de matière, voire de sédiments fins. On peut également distinguer des événements plus intenses, durant lesquels l'intensité acoustique est très forte dans toute la colonne d'eau. Dans la figure 12, un tel événement correspond au passage de la tempête post-tropicale Dorian aux Îles-de-la-Madeleine, le 7 septembre 2019 au site de Pointe-aux-Loups.



Figure 7 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan pendant son déploiement hiver 2016 – printemps 2017



Figure 8 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Pointe-Lebel pendant son déploiement printemps - automne 2017



Figure 9 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Maria pendant son déploiement hiver 2017 – printemps 2018



Figure 10 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Chandler pendant son déploiement printemps - automne 2018



Figure 11 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Baie-de-Plaisance pendant son déploiement hiver 2018 – printemps 2019



Figure 12 : Intensité acoustique des trois faisceaux de l'AWAC de Pointe-aux-Loups pendant son déploiement printemps - automne 2019

## 2.3.5 Climatologie des courants et des vagues aux sites témoins

Dans cette section, les données de courants et de vagues sont présentées site par site. Les données seront visualisées avec les mêmes graphiques décrits ici afin de simplifier la lecture.

Dans un premier temps, les séries temporelles des composantes des **courants** enregistrées dans le repère ENU (East North Up) seront présentées en fonction de la distance depuis le fond, telles qu'enregistrées par l'appareil pour tous les déploiements. Il est à noter que la composante « Est » indique la partie des courants se propageant dans la direction est (positive vers l'est, négative vers l'ouest) et la composante « Nord » indique la partie des courants se propageant des courants se propageant dans la direction est propageant dans la direction nord (positive vers le nord, négative vers le sud). La composante verticale est positive vers le haut et négative vers le bas.

Ces courants sont ensuite moyennés sur la hauteur d'eau pour avoir les courants moyens. Ces composantes moyennées dans chaque plan horizontal et vertical sont montrées ici. Cela permet de voir la direction principale des courants et de notamment vérifier que la composante verticale des courants est mineure.

Dans un troisième temps, les courants moyens sont soustraits des courants dans la colonne d'eau (anomalies), ce qui permet de montrer les zones de la colonne d'eau où les courants sont plus forts ou moins forts.

Ensuite, les composantes des courants ENU sont combinées entre elles en tenant compte des angles de tangage et roulis pour donner l'intensité et la direction des courants par rapport au nord magnétique. Enfin, toutes les données de courant moyenné sur la hauteur de la colonne d'eau sont assemblées et moyennées pour tous les déploiements effectués, de manière à obtenir les courants moyens annuels et saisonniers. Pour les saisons, les données ont été réparties comme suit : les mois de janvier, février et mars constituent l'hiver; avril, mai et juin constituent le printemps; juillet, août et septembre correspondent à l'été; et octobre, novembre et décembre correspondent à l'automne. Rappelons que ces courants ont été enregistrés par l'AWAC au centre de cellules situées au-dessus de l'appareil. Le nez de l'appareil est situé à environ 50 cm du fond. Il existe une distance « tampon » (*blanking distance*) de 40 cm au-dessus de la tête de l'appareil où l'instrument ne prend pas de mesure. Le centre de la première cellule se situe donc à environ 115 cm au-dessus du fond. Le reste de la colonne d'eau est découpé en tranche de 50 cm d'épaisseur.

Pour caractériser le **climat de vagues** à chaque site, on présente ici le régime moyen annuel des vagues enregistré au large à l'AWAC de chaque site ainsi que le régime moyen saisonnier. Les paramètres de vagues présentés sont la hauteur significative des vagues (Hs), la période du pic d'énergie (Tp), la période moyenne (Tm02), la direction du pic d'énergie (PeakDir) ainsi que la direction moyenne des vagues (meanDir). Malgré les contrôles qualités apportés aux données, il est probable que des valeurs aberrantes subsistent. Il est rappelé au lecteur que ces valeurs font partie des jeux de <u>données d'observation</u>. Par exemple, dans la figure 20 a), qui présente des données en fonction de leur occurrence, les valeurs de Hs supérieure à 4,5m sont à peine visibles alors qu'elles sont présentes dans la figure 21 de manière plus flagrante, même si on peut voir, en se référant à la légende, que le poids de ces données est très faible. Dans cet exemple, les valeurs de Hs supérieures à 4.5m représentent 88 données sur un total de 26240, ce qui correspond à 0,33%.

Il est à noter que les conventions diffèrent quant aux directions des courants et des vagues. La direction des courants est la direction VERS laquelle ils se propagent tandis que la direction des vagues fait référence à leur provenance.

Le profileur de courant enregistre les directions des courants par rapport au nord magnétique. Par convention, les fonds de carte utilisés sont référencés par rapport au nord géographique. Par souci de clarté et de cohérence, les graphiques présentés sous forme de rose dans la suite de ce rapport seront référencés par rapport au nord géographique. Une déviation moyenne de 20 degrés ouest a été prise en compte pour passer du référentiel « nord magnétique » au référentiel « nord géographique ».

# 2.3.5.1 Longue-Pointe-de-Mingan

#### 2.3.5.1.1 Courants dans la colonne d'eau

La figure 13 montre les trois composantes des courants dans les directions est, nord et verticale pour six déploiements. De manière générale, la composante verticale est un ordre de magnitude plus petit que les composantes est et nord, variant entre -0,05 et 0,01 m/s, et elle est principalement orientée vers le bas (voir figure 14), bien que des flux verticaux vers le haut soient davantage présents dans le panel b (figure 13 et figure 14). Des alternances dans les directions est-ouest et nord-sud sont présentes et corrélées avec les marées. Les amplitudes des composantes est et nord varient respectivement entre 0,5 et -1,0 m/s ainsi qu'entre 0,8 et -1,0 m/s.

La figure 15 montre les anomalies des composantes du courant avec le courant moyenné sur la hauteur d'eau. Des zones de vitesse et de direction différentes sont présentes sur la colonne d'eau : le bleu indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants moyens alors que le rouge indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants sont plus rapides que les courants moyens.

De manière globale, il apparait que les courants sont plus forts près du fond et que les courants sous la surface sont plus faibles que les courants moyens (figure 15 panels a, c, e), bien que ces zones de cisaillement (direction opposée) s'inversent régulièrement (figure 15 panels b, d, f). Un zoom sur une de ces périodes (figure 16) montre une corrélation possible avec les marées (marée montante vs marée descendante) mais pas de façon systématique. Des analyses plus fines et/ou sur des évènements spécifiques pourraient être effectuées pour mieux comprendre la dynamique des courants à cet endroit. La figure 16 illustre la complexité et la richesse des processus hydrodynamiques à cet endroit.



Figure 13 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Longue-Pointe-de-Mingan; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 14 : Composantes du courant moyen (moyenné sur la hauteur d'eau) dans chaque plan 2D (nord vs est, verticale vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Longue-Pointe-de-Mingan; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 15 : Anomalies des composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Longue-Pointe-de-Mingan; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 16 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période fin avril à fin mai 2016 au site de Longue-Pointe-de-Mingan

La figure 17 montre l'intensité des courants et leur direction pour chaque déploiement. L'alternance des directions et des marées montantes/descendantes est mise en évidence dans le panel du bas de chaque graphe. Les directions de propagation des courants sont dominantes vers 150 et 310 degrés par rapport au nord magnétique. L'intensité des courants est également assez forte, pouvant atteindre 1,2 m/s sous la surface et sur une bonne partie de la colonne d'eau. Ces informations corroborent ce que les plongeurs rapportent lors de la maintenance de l'instrument.













Figure 17 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Longue-Pointe-de-Mingan; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019.

La figure 18 présente le régime de courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) et la figure 19, le régime de courants moyens saisonniers.

Dans ces figures, ainsi que les figures similaires dans la suite du rapport, les courants sont représentés sur un graphique similaire à une rose des vents. La « rose des courants » montre la direction générale de propagation et la vitesse des courants pour chaque période d'échantillonnage (moyenne annuelle ou saisonnière selon les graphiques). Le format circulaire de la rose montre la direction où les courants se propagent et la longueur de chaque « rayon » autour du cercle montre à quelle fréquence les courants ont été observés se propageant dans cette direction. Ensuite, par direction, on peut voir quelles vitesses ont été observées et à quelle fréquence. Par exemple, la rose des courants moyens annuels ci-dessous (figure 18) montre que, en moyenne sur une année, les courants se propagent vers l'ouest-nord-ouest 27% du temps, vers le plein ouest 20% du temps et vers le sud-est environ 18% du temps, etc. Les différentes couleurs de chaque rayon donnent des détails sur la vitesse des courants de chaque direction. En utilisant l'exemple ci-dessus, le rayon le plus long montre que les courants se dirigent vers l'ouest-nordouest à des vitesses comprises entre 0,1 et 0,2 m/s (bleu moyen) environ 1% du temps, entre 0,2 et 0,3 m/s (bleu clair) environ 2% du temps, entre 0,3 et 0,4 m/s (vert) environ 4% du temps, entre 0,4 et 0,5 m/s (orange) environ 5% du temps et à plus de 0,5 m/s (jaune) environ 14% du temps.

Les courants sont, de manière générale, orientés parallèlement à la côte avec une prédominance de direction vers l'ouest-nord-ouest et l'ouest. Les vitesses sont moyennes à relativement fortes, entre 0,25 et 1 m/s. Le régime saisonnier est assez constant, sans changement majeur d'une saison à l'autre, et similaire au régime annuel.



Figure 18 : a) Détail de la position de l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique).



Figure 19 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Longue-Pointede-Mingan; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique).

#### 2.3.5.1.2 Régime moyen : distributions annuelles et saisonnières des caractéristiques de vagues

La distribution annuelle des périodes pic (Tp) et hauteurs significatives de vagues (Hs) est illustrée sur les figure 20 à figure 22. Au large, la hauteur significative la plus fréquente se situe entre 0,3 et 0,7 m, avec une période pic de 3 à 6 secondes. La direction des vagues est bimodale; elles proviennent majoritairement du quadrant 220-250 degrés (OSO et SO) mais également du quadrant 120-140 (SE). En raison de l'orientation et de la géographie de la côte, le site est exposé principalement à des *fetchs* longs venant de l'estuaire moyen du Saint-Laurent (OSO et SO) et de temps à autre à des *fetchs* courts venant du détroit de Jacques-Cartier (SE).

La distribution saisonnière des périodes pic et hauteurs significatives de vagues est présentée dans les figure 23 et figure 24. De manière générale le climat de vagues ne varie pas énormément d'une saison à l'autre. Durant l'automne et l'hiver, le climat de vagues le plus fréquent est de l'ordre de 4 à 8 secondes pour les périodes pic et entre 0,5 et 2 m pour les hauteurs de vague. La glace présente en hiver atténue fortement les vagues et sert de filtre passe-bas dans la propagation des vagues à la côte. C'est aussi à ces saisons que se remarquent des évènements de tempête avec des hauteurs significatives de vagues de plus de 3 m et des périodes de plus de 8 secondes. Au printemps et en été, le régime de vagues le plus fréquent est constitué de vagues de 4 à 6 secondes et de hauteur de 0,5 à 1 m.


Figure 20 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) hauteur de vague significative, b) période pic, c) direction du pic (réf. nord géographique), d) période moyenne (réf. nord géographique), e) direction moyenne pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan.



Figure 21 : Distribution annuelle de Tp et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan pour la période d'octobre 2015 à mai 2019.



Figure 22 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan; a) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).



Figure 23 : Distribution saisonnière de Hs-Tp entre octobre 2015 et mai 2019 à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan



Figure 24 : Caractéristiques saisonnières des vagues à l'AWAC de Longue-Pointe-de-Mingan; a) c) e) et g) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géogr.).

# 2.3.5.2 Pointe-Lebel et Pointe-aux-Outardes

## 2.3.5.2.1 Courants dans la colonne d'eau

La figure 25 montre les trois composantes des courants dans les directions est, nord et verticale pour 6 déploiements entre octobre 2016 et décembre 2019. La composante verticale est généralement un ordre de magnitude plus petit que les composantes est et nord, variant entre -0,04 et -0,06 m/s. Elle est orientée principalement vers le bas (voir figure 26), bien que des flux verticaux vers le haut soient plus présents dans les panels c et d (figure 25 et figure 26).

Lors du dernier déploiement, entre mai et décembre 2019, il semblerait que des interférences aient eu lieu entre la mi-juin et la mi-octobre 2019. Ces interférences sont également visibles dans les composantes est et nord du panel f de la figure 25 ainsi que dans le panel f de la figure 26, où on voit clairement que les données sont bruitées. Avant et après cette période les données semblent correctes. Ces interférences pourraient être dues à une augmentation de l'activité de pêche ou touristique (perturbation du champ magnétique par des navires) dans cette région à cette période de l'année. Les données de tangage et roulis à cette période montrent des oscillations fréquentes (non montrées ici).

Des alternances dans les directions est-ouest et nord-sud sont présentes et corrélées avec les oscillations des marées quotidiennes. Les amplitudes des composantes est et nord varient respectivement entre 1,0 et -1,0 m/s et 0,4 et -0,5 m/s.

La figure 27 montre les anomalies des composantes du courant avec le courant moyenné sur la hauteur d'eau. Des zones de vitesses différentes sur la colonne d'eau sont observées : le bleu indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants moyens alors que le rouge indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants sont plus rapides que les courants moyens.

Contrairement au site de Longue-Pointe-de-Mingan, où les zones de plus faibles ou plus fortes vitesses étaient identifiables près de la surface et près du fond, respectivement, on observe ici une alternance entre les courants faibles et les courants forts près de la surface et près du fond, en opposition de phase. Les échelles temporelles de ces alternances de cisaillement sont variables, allant de quelques heures à quelques jours.

Un zoom sur une de ces périodes montre une corrélation possible avec les marées de vives eaux (courants plus faibles que la moyenne en surface et courants plus forts que la moyenne au fond) mais cette tendance n'apparait pas de façon systématique (figure 28). Des analyses plus poussées pourraient être effectuées pour mieux comprendre la dynamique des courants à cet endroit.



Figure 25 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-Lebel; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 26 : Composantes du courant moyen (moyenné sur la hauteur d'eau) dans chaque plan 2D (nord vs est, verticale vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-Lebel; a) hiver 2016 - printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 27 : Anomalies des composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-Lebel; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 - printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 28 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période mi-février à début avril 2018 au site de Pointe-Lebel

La figure 29 montre l'intensité des courants et leur direction pour chaque déploiement. L'alternance des directions avec les marées montantes/descendantes est mise en évidence dans le panel du bas de chaque graphe. Les directions de propagation des courants sont dominantes vers l'ESE (120 degrés par rapport au nord magnétique) et l'ouest (270 degrés par rapport au nord magnétique). L'intensité des courants est également assez forte, pouvant atteindre 0,8 m/s sous la surface et sur une bonne partie de la colonne d'eau.



Figure 29 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Pointe-Lebel; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019

La figure 30 présente le régime de courants moyens annuels et la figure 31, le régime de courants moyens saisonniers enregistrés à l'AWAC de Pointe-Lebel. Les courants sont, de manière générale, orientés parallèlement à la côte (OSO et E) avec une alternance entre les directions OSO et E-ESE. Les vitesses sont d'intensité faible à moyenne, soit entre 0,25 et 1 m/s en moyenne. L'étalement directionnel est modéré, variant entre une trentaine de degrés autour de la direction OSO et d'une quarantaine de degrés autour de la direction E-ESE. Le régime saisonnier montre une tendance similaire au régime annuel, à savoir des courants parallèles à la côte. En automne, l'étalement directionnel est un peu plus large, avec des propagations additionnelles vers le sud-ouest. Dans la direction SE, deux pics sont un peu plus apparents en hiver, dans la direction ESE et E, avec des intensités entre 0,25 et 0,75 m/s et des pics à plus de 1 m/s.



Figure 30 : a) Détail de la position de l'AWAC de Pointe-Lebel (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique).



Figure 31 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Pointe-Lebel; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique).

#### 2.3.5.2.2 Régime moyen : distributions annuelles et saisonnières des caractéristiques de vagues

La distribution annuelle des périodes pic (Tp) et hauteurs significatives de vagues (Hs) est illustrée sur les figure 32 à figure 34. Au large, la hauteur significative la plus fréquente se situe entre 0,3 et 0,7 m, avec une période pic de 3 à 6 secondes. La direction des vagues est principalement bimodale. Les vagues proviennent majoritairement du quadrant 190-240 degrés (SSO-SO), mais également du quadrant 80-100 (E -ESE) par rapport au nord géographique. Le site est exposé à des vagues générées par des *fetchs* longs, venant de l'estuaire moyen du Saint-Laurent (provenant de la direction SO) et de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (direction ESE). Les vagues de tempêtes atteignent des Hs de 2 à 3 m avec des périodes pic de 8 à 10 secondes.

La distribution saisonnière des périodes pic et hauteurs significatives de vagues est présentée dans les figures 35**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et 36. Au printemps, le climat de vagues se démarque de c elui des autres saisons avec la prédominance des vagues provenant de la direction ESE, donc principalement de l'estuaire maritime et du golfe. Les vagues les plus fréquentes varient entre 0,1 et 0,5 m, avec des périodes pic de 4 à 6 secondes. En hiver, été et automne, le régime de vagues change et les vagues proviennent plus souvent de l'O-OSO (hiver) et du SO (été). Le climat de vagues le plus fréquent est de l'ordre de 4 à 6 secondes pic et entre 0,1 et 0,75 m pour les hauteurs de vagues. Les évènements de tempête sont présents principalement en hiver et en automne.



Figure 32 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique) d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique) pour le site de Pointe-Lebel.



Figure 33 : Distribution annuelle de Tp et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Pointe-Lebel pour la période de juin 2016 à mai 2019



Figure 34 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Pointe-Lebel; a) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).



Figure 35: Distribution saisonnière de Hs-Tp entre octobre 2015 et mai 2019 à l'AWAC de Pointe-Lebel



Figure 36 : Caractéristiques saisonnières des vagues à l'AWAC de Pointe-Lebel; a) c) e) et g) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).

## 2.3.5.3 Pointe-aux-Loups

## 2.3.5.3.1 Courants dans la colonne d'eau

La figure 37 montre les trois composantes des courants dans les directions est, nord et verticale pour trois déploiements effectués entre mai 2018 et décembre 2019. De manière générale, la composante verticale se distingue des deux autres composantes en étant d'un ordre de magnitude plus petit, variant entre - 0,05 et 0,01 m/s, et orientée principalement vers le bas.

Des alternances dans les directions est-ouest et nord-sud sont présentes et corrélées avec les marées. Les amplitudes des composantes est et nord varient entre 0,5 et -0,5 m/s et 0,3 et -0,2 m/s respectivement. Les courants sont horizontaux de manière générale.

La figure 39 montre les anomalies des composantes du courant avec le courant moyenné sur la hauteur d'eau. De manière générale, les courants sont assez homogènes sur l'ensemble de la colonne d'eau, avec parfois des zones de vitesse et direction différentes sur la verticale. Le bleu indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants moyens alors que le rouge indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants sont plus rapides que les courants moyens et en directions opposées. Il existe toutefois des périodes de temps durant lesquelles le cisaillement est plus fort, comme illustré sur la figure 40. La composante verticale est très peu affectée par ces cisaillement entre les courants de directions est-ouest et nord-sud. On distingue une alternance du cisaillement est marqué sont identifiables sur la figure 39 : entre la mi-juillet et le début octobre ainsi qu'en février et mars. Les déploiements ne sont pas assez longs pour tirer des conclusions mais des analyses plus fines et/ou sur des évènements spécifiques pourraient être effectuées pour mieux comprendre la dynamique des courants à cet endroit. La figure 41 illustre la complexité et la richesse des processus hydrodynamiques dans cette région.





Figure 37 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-aux-Loups; a) printemps – automne 2018 b) hiver 2018 – printemps 2019 c) printemps – automne 2019





Figure 38 : Composantes du courant moyen (moyenné sur la hauteur d'eau) dans chaque plan 2D (nord vs est, verticale vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-aux-Loups; a) printemps – automne 2018 b) hiver 2018 – printemps 2019 c) printemps – automne 2019



Figure 39 : Anomalies des composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Pointe-aux-Loups; a) printemps – automne 2018 b) hiver 2018 – printemps 2019 c) printemps – automne 2019



Figure 40 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période août à début septembre 2019 au site de Pointe-aux-Loups

La figure 41 montre l'intensité des courants et leur direction pour chaque déploiement. L'alternance des directions avec les marées montantes/descendantes est mise en évidence dans le panel du bas de chaque graphe. Les directions de propagation des courants sont dominantes vers 70 degrés (ENE) et 250 degrés (OSO) par rapport au nord magnétique. L'intensité des courants est également modérée, pouvant atteindre 0,5 m/s sous la surface.





Figure 41 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Pointe-aux-Loups; a) printemps – automne 2018 b) hiver 2018 – printemps 2019 c) printemps – automne 2019

La figure 42 présente le régime de courants moyens annuels et la figure 43, le régime de courants moyens saisonniers enregistrés à l'AWAC de Pointe-aux-Loups.

Les courants sont orientés parallèlement à la côte (axe NE – SO). Les vitesses sont relativement modérées, le plus fréquemment jusqu'à 0,5 m/s. L'étalement directionnel est faible, variant d'une quinzaine de degrés seulement de part et d'autre de l'axe dominant.

Le régime saisonnier montre une tendance similaire au régime annuel, à savoir des courants parallèles à la côte et d'intensité semblable (entre 0,2 et 0,5 m/s). Seulement en été, les courants ont une légère tendance à s'accentuer vers le NE avec un étalement directionnel qui reste faible, d'une quarantaine de degrés et des vitesses un peu plus élevées atteignant 0,75 m/s.



Figure 42 : a) Détail de la position de l'AWAC de Pointe-aux-Loups (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique).



Figure 43 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Pointe-aux-Loups; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique).

## 2.3.5.3.2 Régime moyen : distributions annuelles et saisonnières des caractéristiques de vagues

La distribution annuelle des périodes pic (Tp) et hauteurs significatives de vagues (Hs) est illustrée sur les figures 44 à 46. La hauteur significative la plus fréquente se situe entre 0,4 et 1,2 m, avec une période pic de 3 à 7 secondes. La direction des vagues est principalement trimodale. Les vagues proviennent majoritairement du quadrant 310-320 degrés (NO), mais également du quadrant 20-40 (NE) et du quadrant 220-240 (OSO) par rapport au nord géographique. Le site est exposé à des vagues générées par des *fetchs* longs venant de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (de la direction NO) et de la partie ouest du golfe. Les vagues de tempêtes atteignent des Hs de plus de 2-3 m avec des périodes pic de 8 à plus de 10 secondes. La disposition des Îles-de-la-Madeleine dans le golfe fait que ce site est ouvertement exposé à tous types de régime de vagues venant de toutes les directions (240 à 60 degrés). Il est également exposé au phénomène de diffraction des vagues venant des tempêtes du secteur est qui « tournent » par le côté nord des îles.

La distribution saisonnière des périodes pic et hauteurs significatives de vagues est présentée dans les figures 47 et 48. Le site est exposé à un régime de vagues assez variable selon la saison : en automne et en hiver, les vagues proviennent essentiellement du NO-ONO avec des hauteurs de 1-2 m, mais pouvant dépasser 3 m, et des périodes de 6 à 10 secondes (hiver). Au printemps, des vagues du secteur NNE d'intensité similaire viennent s'ajouter à ce régime. En été, des vagues du SO et OSO viennent s'ajouter à celles venant du NO. Elles sont en moyenne plus petites, avec un Hs de l'ordre de 0,5 m et une période de 4 à 6 secondes. Les vagues provenant du secteur NNE ne sont pas très présentes en été.



Figure 44 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique).d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique).pour le site de Pointe-aux-Loups.



Figure 45 : Distribution annuelle de Tp et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Pointe-aux-Loups pour la période de mai 2018 à décembre 2019.



Figure 46 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Pointe-aux-Loups; a) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).



Figure 47 : Distribution saisonnière de Hs-Tp entre octobre 2015 et mai 2019 à l'AWAC de Pointe-aux-Loups



Figure 48 : Caractéristiques saisonnières des vagues à l'AWAC de Pointe-aux-Loups; a) c) e) et g) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).

## 2.3.5.4 Baie-de-Plaisance

## 2.3.5.4.1 Courants dans la colonne d'eau

La figure 49 montre les trois composantes des courants dans les directions est, nord et verticale pour quatre déploiements effectués entre décembre 2017 et décembre 2019. Il est à noter que lors du premier déploiement entre décembre 2017 et mai 2018, l'appareil était mouillé à un endroit moins profond et sujet au passage de navires, ce qui augmentait considérablement les risques d'interférence et de chalutage accidentel. Il a été par la suite déplacé à un endroit plus profond et davantage protégé.

De manière générale, la composante verticale se distingue des deux autres composantes en étant d'un ordre de magnitude plus petit, variant entre -0,05 et 0,01 m/s, et orientée principalement vers le bas.

Des alternances dans les directions est-ouest et nord-sud sont présentes et corrélées avec les marées. Les amplitudes des composantes est et nord varient entre 0,2 et -0,3 m/s, avec des maxima respectifs de 0,4 m/s ainsi que 0,2 et -0,2 m/s (figure 50). Les courants sont horizontaux de manière générale.

La figure 51 montre les anomalies des composantes du courant avec le courant moyenné sur la hauteur d'eau. De manière générale, les courants sont assez homogènes sur l'ensemble de la colonne d'eau, comme pour le site de Pointe-aux-Loups, avec parfois des zones de vitesse et direction différentes sur la verticale. Le bleu indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants moyens alors que le rouge indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants moyens alors que les courants moyens et en directions opposées. Il existe toutefois des périodes de temps durant lesquelles le cisaillement est plus fort, comme illustré sur la figure 52. La composante verticale est très peu affectée par ces cisaillements entre les courants se dirigeant sur les axes est-ouest et nord-sud. On ne distingue pas d'alternance du cisaillement entre les marées hautes et les marées basses comme à d'autres sites mais plutôt entre les périodes de mortes eaux et de vives eaux. D'autres périodes durant lesquelles ce cisaillement est marqué sont identifiables sur la figure 51 mais avec moins de spécificité que pour le site de Pointe-aux-Loups. Les déploiements ne sont pas assez longs pour tirer des conclusions mais des analyses plus fines et/ou sur des évènements spécifiques pourraient être effectuées pour mieux comprendre la dynamique des courants à cet endroit.



Figure 49 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Baie-de-Plaisance; a) hiver 2017- printemps 2018 b) printemps – automne 2018 c) hiver 2018 – printemps 2019 d) printemps – automne 2019



Figure 50 : Composantes du courant moyen (moyenné sur la hauteur d'eau) dans chaque plan 2D (nord vs est, verticale vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Baie-de-Plaisance; a) hiver 2017- printemps 2018 b) printemps – automne 2018 c) hiver 2018 – printemps 2019 d) printemps – automne 2019



Figure 51 : Anomalies des composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Baie-de-Plaisance; a) hiver 2017 – printemps 2018 b) printemps – automne 2018 c) hiver 2018 – printemps 2019 d) printemps – automne 2019



Figure 52 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes de courants pour la période juillet à début août 2018 au site de Baie-de-Plaisance

La figure 53 montre l'intensité des courants et leur direction pour chaque déploiement. L'alternance des directions avec les marées montantes/descendantes est mise en évidence dans le panel du bas de chaque graphe. Les directions de propagation des courants sont dominantes vers 260 degrés par rapport au nord magnétique avec un large étalement directionnel. L'intensité des courants est également modérée, pouvant atteindre 0,4 m/s sous la surface mais 0,2 m/s en moyenne sur la colonne d'eau.



Figure 53 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Baie-de-Plaisance; a) hiver 2017 – printemps 2018 b) printemps – automne 2018 c) hiver 2018 – printemps 2019 d) printemps – automne 2019

La figure 54 présente le régime de courants moyens annuels et la figure 55, le régime de courants moyens saisonniers enregistrés à l'AWAC de Baie-de-Plaisance. Les courants sont très variables en orientation avec une intensité assez faible, en moyenne de moins de 0,25 m/s. La direction principale est orientée dans l'axe ENE-OSO/SO avec une nette dominance dans la direction OSO (vers la baie). Le régime saisonnier montre une tendance similaire au régime annuel, avec une variabilité des directions peut-être plus importantes en été et une nette dominance pour une propagation dans la direction OSO/SO, mais avec des intensités de vitesse restant autour de 0,25 m/s. Cette grande variabilité peut s'expliquer par l'emplacement de l'AWAC, à l'entrée de la Baie-de-Plaisance et à proximité de Pointe-Basse. Les courants de marée entrent dans la baie selon l'axe ENE-OSO et la géographie/bathymétrie du lieu en font un endroit où la circulation se fait selon cet axe principal. Elle suit les isobathes qui varient rapidement à l'emplacement de l'AWAC en raison de la proximité de la côte.



Figure 54 : a) Détail de la position de l'AWAC de Baie-de-Plaisance (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique).



Figure 55 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Baie-de-Plaisance; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique).

## 2.3.5.4.2 Régime moyen : distributions annuelles et saisonnières des caractéristiques de vagues

La distribution annuelle des périodes pic (Tp) et hauteurs significatives de vagues (Hs) est illustrée sur les figures 56 à 58. La hauteur significative la plus fréquente se situe entre 0,3 et 0,6 m, avec une période pic de 2 à 5 secondes. La direction des vagues est principalement unimodale. Les vagues proviennent majoritairement du quadrant 60-100 degrés (ESE-E) par rapport au nord géographique, ce qui correspond à des houles venant du détroit de Cabot et de l'océan Atlantique. Les vagues les plus fortes atteignent des Hs de 2 à 3 m avec des périodes pic de 8 à 10 secondes.

La distribution saisonnière des périodes pic et des hauteurs significatives de vagues est présentée dans la figure 59 et figure 60. Les régimes moyens saisonniers sont assez semblables au régime moyen annuel. Les vagues proviennent en moyenne de la direction E-ESE. En hiver, les vagues venant de l'est sont plus importantes que lors des autres saisons. Les hauteurs moyennes de vagues varient entre 0,20 et 1 m, avec des périodes de 4 à 10 secondes. Ce site est exposé à la houle formée lors de tempêtes en Atlantique toute l'année. Par conséquent, le régime moyen de vagues met en évidence la présence de vagues plus longues et plus fortes qu'aux autres sites MoDESCo exposés à des *fetchs* beaucoup plus limités.

Des vagues provenant du secteur 150-300 degrés sont présentes sur les distributions annuelles et saisonnières et dues à la présence de la Baie-de-Plaisance à proximité, qui est source de réflexion des ondes incidentes venant du secteur est.


Figure 56 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique) d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique pour le site de Baie-de-Plaisance.



Figure 57 : Distribution annuelle de Tp et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Baie-de-Plaisance pour la période de décembre 2017 à décembre 2019



Figure 58 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Baie-de-Plaisance; a) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).



Figure 59 : Distribution saisonnière de Hs-Tp entre octobre 2015 et mai 2019 à l'AWAC de Baie-de-Plaisance



Figure 60 : Caractéristiques saisonnières des vagues à l'AWAC de Baie-de-Plaisance; a) c) e) et g) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).

### 2.3.5.5 Maria

#### 2.3.5.5.1 Courants dans la colonne d'eau

La figure 61 montre les trois composantes des courants dans les directions est, nord et verticale pour six déploiements effectués entre décembre 2016 et décembre 2019. Il est à noter que lors des trois premiers déploiements faits entre décembre 2016 et mai 2018, l'appareil était mouillé à environ 15 m de profondeur. Il a été déplacé à un endroit plus profond (20 m) pour les déploiements suivants.

De manière générale, comme pour les autres sites, la composante verticale est plus faible que les deux autres composantes, d'un ordre de magnitude plus petit, variant entre -0,05 et 0,01 m/s, et orientée principalement vers le bas.

Des alternances dans les directions est-ouest et nord-sud sont présentes et corrélées avec les marées, mais de façon prédominante dans la direction est-ouest. Les amplitudes des composantes est et nord varient respectivement entre 0,3 et -0,3 m/s ainsi qu'entre 0,2 et -0,2 m/s (figure 62). Les courants sont horizontaux de manière générale.

La figure 63 montre les anomalies des composantes du courant avec le courant moyenné sur la hauteur d'eau. Les courants sont assez homogènes sur l'ensemble de la colonne d'eau à certaines périodes (par exemple entre janvier et mars 2016, 2017 et 2018), avec parfois des zones de vitesse et direction différentes sur la verticale. Le bleu indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants moyens alors que le rouge indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants sont plus rapides que les courants moyens et en directions opposées. Il existe toutefois des périodes de temps durant lesquelles le cisaillement est plus fort, comme illustré sur la figure 64. La composante verticale est très peu affectée par ces cisaillements entre les courants se dirigeant dans les axes est-ouest et nord-sud.

Des oscillations dans le cisaillement semblent en phase avec les variations des hauteurs de marées. D'autres périodes durant lesquelles ce cisaillement est marqué sont identifiables sur la figure 63 mais les déploiements ne sont pas assez longs pour tirer des conclusions. Des analyses plus fines et/ou sur des évènements spécifiques pourraient être effectuées pour mieux comprendre la dynamique des courants à cet endroit.



Figure 61 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Maria; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 62 : Composantes du courant moyen (moyenné sur la hauteur d'eau) dans chaque plan 2D (nord vs est, verticale vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Maria; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 63 : Anomalies des composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Maria; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019.



Figure 64 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période fin octobre à fin novembre 2019 au site de Maria

La figure 65 montre l'intensité des courants et leur direction pour chaque déploiement. L'alternance des directions avec les marées montantes/descendantes est mise en évidence dans le panel du bas de chaque graphe. Les directions de propagation des courants sont dominantes vers 120 degrés par rapport au nord magnétique avec un large étalement directionnel entre 120 et 270 degrés. L'intensité des courants est également modérée, pouvant atteindre 0,4 m/s sous la surface mais 0,25 m/s en moyenne sur la colonne d'eau.



Figure 65 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Maria; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019

La figure 66 présente le régime de courants moyens annuels et la figure 67, le régime de courants moyens saisonniers enregistrés à l'AWAC de Maria. Les courants sont très variables en orientation avec une intensité assez faible, en moyenne de moins de 0,25 m/s. La direction principale est orientée dans l'axe E-ONO, qui est l'axe principal de la baie des Chaleurs dans cette région, avec une dominance dans la direction E et de façon dominante dirigés vers l'extérieur de la baie.

Le régime saisonnier montre une tendance similaire au régime annuel, avec une variabilité dans les directions peut-être plus importante au printemps, mais des intensités de vitesse restant autour de 0,25 m/s. En hiver, les courants semblent moins forts mais la présence de la glace atténue probablement la propagation des courants dans la baie.

Cette grande variabilité peut s'expliquer par l'emplacement de l'AWAC à l'entrée de la baie de Maria. Les courants de marée entrent dans la baie des Chaleurs selon l'axe ESE-ONO et la géographie/bathymétrie du lieu en font un endroit où la circulation se fait parallèlement aux isobathes, qui varient rapidement à l'emplacement de l'AWAC en raison de la proximité de la côte.



Figure 66 : a) Détail de la position de l'AWAC de Maria (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique).



Figure 67 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Maria; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique).

#### 2.3.5.5.2 Régime moyen : distributions annuelles et saisonnières des caractéristiques de vagues

La distribution annuelle des périodes pic (Tp) et des hauteurs significatives de vagues (Hs) est illustrée sur les figures 68 à 70. La hauteur significative la plus fréquente se situe entre 0,1 et 0,4 m, avec une période pic de 2 à 3 secondes. La direction des vagues est principalement bimodale. Les vagues proviennent majoritairement du quadrant 140-100 degrés (SE-ESE) par rapport au nord géographique, ce qui correspond à des houles venant du golfe du Saint-Laurent et se propageant dans la baie des Chaleurs. L'autre axe de provenance des vagues est le secteur 210-240 degrés (SO). Ces vagues sont générées au fond de la baie des Chaleurs et ont un *fetch* limité par la configuration naturelle de la géographie environnante. Ce sont de petites vagues, la Hs variant entre 0,2 et 0,5 m avec un Tp de 2 à 4 secondes.

La distribution saisonnière des périodes pic et des hauteurs significatives de vagues est présentée sur les figures 71 et 72. En hiver et en automne, les deux régimes de vagues décrits plus haut sont présents. En hiver, les vagues provenant du secteur SO sont majoritaires tandis qu'en automne, les vagues proviennent de façon équivalente des secteurs SO et ESE, avec des hauteurs de vagues allant de 0,1 à 1 m et un Tp de 2 à 6 secondes. Au printemps et en été, le régime de vagues dominant provient du SE-ESE par rapport au nord géographique, avec un étalement directionnel assez réduit, d'environ 40 degrés. Les hauteurs de vagues sont modérées, allant également de 0,1 à 1 m et un Tp de 2 à 6 secondes.



Figure 68 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique) d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique) pour le site de Maria.



Figure 69 : Distribution annuelle de Tp et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Maria pour la période de novembre 2015 à juin 2018



Figure 70 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Maria; a) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique) et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).



Figure 71 : Distribution saisonnière de Hs-Tp entre octobre 2015 et mai 2019 à l'AWAC de Maria



Figure 72 : Caractéristiques saisonnières des vagues à l'AWAC de Maria; a) c) e) et g) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).

### 2.3.5.6 Chandler

#### 2.3.5.6.1 Courants dans la colonne d'eau

La figure 73 montre les trois composantes des courants dans les directions est, nord et verticale pour six déploiements effectués entre décembre 2016 et décembre 2019. Il est à noter que lors des trois premiers déploiements faits entre décembre 2016 et mai 2018, l'appareil était mouillé à environ 17 m de profondeur. Il a été déplacé à un endroit plus profond (20 m) pour les déploiements suivants.

De manière générale, comme pour les autres sites, la composante verticale est plus faible comparée aux deux autres composantes, d'un ordre de magnitude plus petit, variant entre -0,05 et 0,01 m/s, et orientée principalement vers le bas.

Des alternances dans les directions est-ouest et nord-sud sont présentes et corrélées avec les marées. Les amplitudes des composantes est et nord varient entre 0,3 et -0,4 m/s et entre 0,3 et -0,3 m/s respectivement (figure 74); elles varient avec la même intensité pour ces deux composantes. Les courants sont horizontaux de manière générale.

La figure 75 montre les anomalies des composantes du courant avec le courant moyenné sur la hauteur d'eau. Le bleu indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus faibles que les courants moyens alors que le rouge indique les périodes de temps et la région de la colonne d'eau où les courants sont plus rapides que les courants moyens et en directions opposées. Un cisaillement est présent dans la colonne d'eau de manière régulière dans tous les déploiements. Il existe toutefois des périodes de temps durant lesquelles le cisaillement est plus fort, comme illustré sur la figure 76. La composante verticale est peu affectée par ces cisaillements sauf en hiver, alors qu'un cisaillement net est observé entre 5 mètres sous la surface et le reste de la colonne. Il serait intéressant de regarder si ce cisaillement est dû à la présence de glace ou de frasil. Des analyses plus fines et/ou sur des évènements spécifiques pourraient être effectuées pour mieux comprendre la dynamique des courants à cet endroit.



Figure 73 : Composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Chandler; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 74 : Composantes du courant moyen (moyenné sur la hauteur d'eau) dans chaque plan 2D (nord vs est, verticale vs est et verticale vs nord) enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Chandler; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 75 : Anomalies des composantes du courant dans les directions est, nord et verticale enregistrées par l'AWAC pour chaque déploiement au site de Chandler; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019



Figure 76 : Zoom sur une partie des anomalies des composantes du courant pour la période début septembre à mioctobre 2019 au site de Chandler

La figure 77 montre l'intensité des courants et leur direction pour chaque déploiement. L'alternance des directions avec les marées montantes/descendantes est mise en évidence dans le panel du bas de chaque graphe. Les directions de propagation des courants sont dominantes vers 230 degrés par rapport au nord magnétique avec un large étalement directionnel entre 60 et 230 degrés. L'intensité des courants est également modérée, pouvant atteindre 0,4 m/s sous la surface mais 0,25 m/s en moyenne sur la colonne d'eau.



Figure 77 : Intensité et direction du courant pour chaque déploiement au site de Chandler; a) hiver 2016 – printemps 2017 b) printemps – automne 2017 c) hiver 2017 – printemps 2018 d) printemps – automne 2018 e) hiver 2018 – printemps 2019 f) printemps – automne 2019

La figure 78 présente le régime de courants moyens annuels et la figure 79, le régime de courants moyens saisonniers enregistrés à l'AWAC de Chandler. Les courants sont orientés parallèlement à la côte, le long d'un axe NE-SSO, avec une intensité assez faible (moins de 0,25 m/s en moyenne). Le régime saisonnier montre une tendance de direction et d'intensité similaire au régime annuel. En automne et en hiver, les courants se propagent de façon prédominante vers le SSO et le NE/ENE avec un large étalement directionnel, les courants se dirigeant hors de la baie des Chaleurs. Au printemps et en été, une tendance à se diriger de façon prédominante vers le SSO est observée.



Figure 78 : a) Détail de la position de l'AWAC de Chandler (triangle jaune) et b) courants moyens annuels (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC (réf. nord géographique).



Figure 79 : Courants moyens saisonniers (moyennés sur la hauteur d'eau) à la position de l'AWAC de Chandler; a) hiver b) printemps c) été d) automne (réf. nord géographique).

#### 2.3.5.6.2 Régime moyen : distributions annuelles et saisonnières des caractéristiques de vagues

La distribution annuelle des périodes pic (Tp) et des hauteurs significatives de vagues (Hs) est illustrée sur les figures 80 à 82. La hauteur significative la plus fréquente se situe entre 0,1 et 0,4 m, avec une période pic de 3 à 5 secondes. La direction des vagues est principalement unimodale. Les vagues proviennent majoritairement du quadrant 100-130 degrés (ESE) par rapport au nord géographique, ce qui correspond à des houles venant du golfe du Saint-Laurent. Des vagues du SSE et S sont également présentes. Ce sont de petites vagues de vent, la Hs variant entre 0,2 et 0,5 m avec un Tp de 2 à 6 secondes, générées entre le Nouveau-Brunswick et l'embouchure de la baie des Chaleurs. Les vagues les plus grosses sont par contre générées par la houle de l'Atlantique, avec une hauteur entre 1 et 2 m et une période de pic entre 6 et 10 secondes.

La distribution saisonnière des périodes pic et hauteurs significatives de vagues est présentée à la figure 83 et figure 84. En hiver et automne, les deux régimes de vagues décrits plus haut sont présents. C'est en hiver et en automne que les vagues de vent (du secteur S) sont les plus présentes, avec un Hs de 0,2 à 0,5 m et un Tp de 4 à 6 secondes. À toutes les saisons, les vagues de houle venant du SE sont présentes. Les vagues les plus grosses arrivent à l'hiver et au printemps, générées par les tempêtes dans l'Atlantique Nord. Les hauteurs de vagues atteignent alors 2 à 3 m et le Tp, 8 à 10 secondes.



Figure 80 : Distribution annuelle des caractéristiques de vagues ainsi que leurs fonctions de distribution cumulées; a) hauteur de vague significative b) période pic c) direction du pic (réf. nord géographique) d) période moyenne e) direction moyenne (réf. nord géographique) pour le site de Chandler



Figure 81 : Distribution annuelle de Tp et Hs (relative à la fréquence d'occurrence) à l'AWAC de Chandler pour la période de novembre 2016 à décembre 2018



Figure 82 : Caractéristiques annuelles des vagues à l'AWAC de Chandler; a) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique) et b) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes (réf. nord géographique).



Figure 83 : Distribution saisonnière de Hs-Tp entre octobre 2015 et mai 2019 à l'AWAC de Chandler



Figure 84 : Caractéristiques saisonnières des vagues à l'AWAC de Chandler; a) c) e) et g) Hs (hauteur significative) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes; b) d) f) et h) Tp (période du pic d'énergie) en fonction de la direction moyenne d'arrivée des vagues incidentes

## 2.3.6 Exemple de données de capteur de pression

La figure 85 présente un exemple de comparaison qui peut être effectuée entre les AWACs et les capteurs de pression RBR implantés à la côte, comme mentionné lors de la stratégie d'implantation à la section 2.2.2. Cette figure illustre (a) les hauteurs de vagues significatives Hs et (b) les niveaux d'eau moyens enregistrés simultanément à l'AWAC de la Baie-de-Plaisance au large et par deux capteurs de pression implantés sur la plage de la Martinique, juste après la flexure (RBR3.2) et un peu plus au large (RBR3.3), lors de l'évènement de tempête DORIAN du 8 septembre 2019. Les hauteurs de vagues Hs ont atteint 5,6 m au large au pic de la tempête ainsi que 1,56 m (RBR3.3) et 1,44 m (RBR3.2) à la côte.



Figure 85 : Série temporelle a) des hauteurs de vagues et b) des niveaux d'eau moyens de l'AWAC de Baie-de-Plaisance et de deux capteurs de pression RBR installés à La Martinique, aux Îles-de-la-Madeleine, alignés sur un même profil au moment du passage de la tempête Dorian. La courbe en noir fait référence aux prédictions de marées provenant du modèle Xtide.

Le panel b) présente les niveaux d'eau moyens enregistrés à l'AWAC, aux RBR3.3 et RBR3.2 ainsi que les niveaux d'eau prédits par un modèle de marées (Xtide : <u>flaterco.com/xtide/index.html</u>). En date du 7 et 8 septembre 2019, au passage de Dorian, l'onde de tempête produite par le passage de la tempête a créé une montée du niveau d'eau moyen de 1,5 m environ à l'AWAC (différence entre le niveau d'eau prédit, en noir, et le niveau d'eau à l'AWAC, en bleu) ainsi qu'une surélévation du niveau moyen due aux vagues déferlantes (*setup*) d'environ 50 cm à la côte (différence entre le niveau d'eau à l'AWAC, en bleu, et les niveaux d'eau aux RBRs, en orange/jaune).

# 2.4 Modèle de vagues WaveWatch III pour 2015-2017

# 2.4.1 Description de la méthode

Dans le cadre de la phase II du projet, des simulations du climat de vagues pour la période 1979-2015, représentant le passé récent, ainsi que pour la période future 2041-2100, basée sur différents scénarios climatiques, ont été produites pour l'EGSL à l'aide du modèle WAVEWATCH III<sup>TM</sup> (WW3). Une validation du modèle a également été réalisée en s'appuyant sur des observations s'échelonnant sur la période 2010-2015. Cette première étude a permis d'une part de mettre en évidence la capacité du modèle à correctement reproduire le climat de vagues dans l'ESGL et, d'autre part, de caractériser la sensibilité des résultats à la résolution spatiale du modèle ainsi qu'au forçage océanique utilisé. Toutefois, elle a aussi révélé que le modèle sous-estimait la hauteur des vagues dans l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs. Ces résultats avaient été interprétés comme étant une conséquence de la faible résolution spatiale des forçages atmosphériques utilisés par le modèle, ne permettant pas de représenter correctement les vents marins dans des zones où le *fetch* est court.

Dans la phase III du projet MoDESCo, de nouvelles simulations ont été produites sur la période 2015-2017. Afin de compléter l'étude débutée dans la phase II, une deuxième validation a été réalisée. Celle-ci s'articule selon deux objectifs principaux :

1. Évaluer la sensibilité du modèle à la résolution spatiale des forçages atmosphériques

Cet objectif vise à valider l'hypothèse émise lors du précédent rapport de l'impact de la résolution des forçages atmosphériques sur la qualité des résultats de la modélisation dans l'estuaire et la baie des Chaleurs. Il s'agit d'effectuer une comparaison entre deux versions du modèle utilisant chacune des forçages à différentes résolutions, ceci étant rendu possible par la récente mise en place du système de prévision atmosphérique à haute résolution HRDPS (2,5 km) par le Centre météorologique canadien (CMC).

### 2. Évaluer la capacité du modèle à représenter le climat de vagues en période hivernale

Les conditions extrêmes de tempête impactant la côte se produisant principalement à l'automne et à l'hiver, il devient important de caractériser la capacité du modèle à simuler le climat de vagues en période hivernale et notamment en présence de glace.

Le modèle permet de tenir compte de l'effet de la glace de mer sur l'atténuation de l'énergie des vagues et utilise l'état de l'art de nos connaissances actuelles pour représenter ces processus. Toutefois, aucune validation du modèle dans ces conditions n'a été effectuée lors de précédentes phases du projet. L'acquisition de nouvelles observations sur certains sites d'intérêt en période hivernale faite dans le cadre de la phase III nous permet de pouvoir réaliser cet objectif.

## 2.4.2 Description du modèle, forçages et conditions aux frontières

Le système WW3-EGSL opéré à l'ISMER utilise la version 5.16 du modèle de vague WAVEWATCH III<sup>™</sup> implémenté sur une grille curvilinéaire de 1 km de résolution dans l'EGSL. Les améliorations apportées à cette version du modèle en comparaison avec la version antérieure (4.16) utilisée dans la phase II du projet concernent principalement les schémas numériques d'intégration et n'affectent donc pas la physique du modèle. Les paramètres numériques du modèle ainsi que les différentes paramétrisations physiques utilisées pour les simulations sont compilés dans le tableau 17.



Figure 86 : Domaine WW3-NA et WW3-EGSL et position des observations utilisées pour la validation du modèle

WW3-EGSL est alimenté par des forçages océaniques provenant du modèle couplé NEMO-CICE5 opéré à l'ISMER (S. Senneville) permettant de fournir les courants et niveaux d'eau ainsi que les conditions de glace (concentration, épaisseur). Le système NEMO-CICE5 utilise des forçages atmosphériques provenant du système RDPS (*Regional Deterministic Prediction System*) opéré par le Centre météorologique canadien (CMC) d'Environnement et changement climatique Canada (ECCC).

Deux sous-versions du modèle de vagues utilisant différents forçages atmosphériques ont été mises en place afin de caractériser la sensibilité du modèle à la résolution spatiale de ceux-ci. Une première version utilise des forçages identiques à ceux utilisés dans la phase II du projet, provenant du système CFSR, (*Climate Forecast System Reanalysis*, NCEP/NOAA) d'une résolution spatiale de 35 km. Cette version a été utilisée pour établir une climatologie de vagues sur la période 2015-2017. La deuxième version est forcée quant à elle par le modèle à haute résolution spatiale de 2,5 km. Toutefois, aucune réanalyse sur une longue période temporelle n'est disponible à l'heure actuelle avec ce système et les données ne sont pas archivées par ECCC. Du fait de cette limitation, cette version du modèle de vagues a été utilisée pour produire une simulation de vagues uniquement pour l'année 2017.

Les conditions aux frontières du domaine EGSL aux détroits de Cabot et de Belle-Isle sont obtenues à l'aide d'une configuration du modèle WW3 sur un domaine couvrant l'Atlantique Nord (WW3-NA) de résolution de 45 km. Ce dernier utilise lui-même des forçages atmosphériques et océaniques provenant de CFSR.

Tableau 17 : Paramètres numériques et paramétrisations utilisées pour les simulations

Paramètres	Valeur		
Version WW3	5.16		
Intervalle de fréquence	0.05-1.1 Hz (25 catégories)		
Intervalle de direction	0-360 ° (36 catégories)		
Pas de temps	300 s		
Résolution	1 km (1006 x 640 points)		
Termes sources	Paramétrisation	SWITCH WW3	
Génération et dissipation	WAM cycle 4	ST3	
Interactions non linéaires quadruplets	Discrete Interaction Approximation	NL1	
	(Hasselman et al, 1985)		
Dissipation par le fond	Linear JONSWAP parameterization		
	(Hasselman et al, 1973)		
Déferlement	Battjes et Janssen (1978)	DB1	
Interactions non linéaires triades	Non activé	TR0	
Réflexion par le fond	Non activé	BSO	
Atténuation par la glace	Floe size dependant scattering	IS2	
Réflexion à la côte	Ardhuin et Roland (2012) REF1		

## 2.4.3 Sorties et format de fichier

Les sorties de la grille sont disponibles au format NetCDF4 pour l'ensemble de la période 2015-2017 pour les paramètres de vagues suivants :

- Hauteur significative (H<sub>m0</sub>)
- Direction moyenne (DIR)
- Période moyenne (T<sub>02</sub>)
- Période du pic spectral (Tp)
- Étalement directionnel (Spr)
- Hauteur moyenne des vagues infragravitaires (H<sub>ig</sub>)

Des séries temporelles de ces paramètres ont aussi été extraites à des positions spécifiques de la grille correspondant à certains sites d'intérêt (figure 87). La position de ces points est indiquée dans le tableau 18. À noter qu'il est possible d'extraire sur demande de nouveaux points de grille.

Pour chacun de ces points d'intérêt, des sorties spectrales directionnelles ont aussi été produites et sauvegardées. Ces données permettent de conserver la totalité de l'information concernant la distribution

de l'énergie en fonction de la fréquence et de la direction des vagues et peuvent ainsi être utilisées comme intrant pour d'autres modèles (Mike21, Xbeach). Il est toutefois impossible de générer ce type de données à postériori pour de nouveaux points de façon indépendante. Si, a posteriori, de nouveaux points venaient à être identifiés, il faudrait refaire complètement les simulations, ce qui a un coût énorme en temps machine et de simulation. Il est donc primordial d'avoir une réflexion approfondie des variables souhaitées en sortie de modèle, et de faire des tests de performance pour évaluer les coûts, tant en temps machine qu'en stockage, que ces simulations induisent.



Figure 87 : Position des sorties paramétriques et spectrales

Tableau 18 : Coordonnées des sorties spectrales du modèle

Site	Longitude	Latitude
Sainte-Anne-des-Monts	-66.49150085	49.13700104
Matane	-67.62550354	48.83100128
Rimouski	-68.51650238	48.50699997
Trois-Pistoles	-69.20500183	48.18299866
La Pocatière	-70.1230011	47.45399857
Kamouraska	-69.90699768	47.5890007
Rivière-du-Loup	-69.59649658	47.86800003
Saint-Fabien	-68.90799713	48.32699966
Anse au Lard	-68.42199707	48.56100082
Longue-Rive-Pointe-à-Boisvert	-69.15100098	48.54299927
Portneuf-sur-Mer	-69.0565033	48.62400055
Escoumins	-69.38050079	48.35400009
Pointe-aux-Outardes	-68.39499664	49.02000046
Pointe-Lebel	-68.1115036	49.10100174
Godbout	-67.53099823	49.30799866
Rivière-Pentecôte	-67.09899902	49.76699829
Port-Cartier	-66.85600281	50.00099945
Sept-Îles — Rivière-Moisie	-66.18099976	50.17200089
Sept-Îles Baie Sainte-Marguerite	-66.55899811	50.1269989
Longue-Pointe-de-Mingan	-64.1289978	50.25299835
Havre-Saint-Pierre	-63.57550049	50.23500061
Aguanish	-62.19850159	50.21699905
Kegaska	-61.67200089	50.08200073
Natashquan	-61.82049942	50.15399933
Blanc Sablon	-57.17649841	51.39599991
Chevery	-59.60649872	50.45100021
Carleton	-66.09999847	48.08399963
Saint-Omer	-66.22149658	48.08399963
Maria	-65.99199677	48.13800049
Saint-Siméon — Bonaventure	-65.54650116	48.04800034
Paspébiac	-65.26300049	47.99399948
Port Daniel-Gascon	-64.92549896	48.15599823
Chandler	-64.68250275	48.30899811
Cap d'Espoir	-64.29100037	48.40800095
Percé	-64.19650269	48.50699997
Barachois	-64.22350311	48.57899857
Fond de la baie de Gaspé	-64.34500122	48.80400085
Entrée de la baie de Gaspé	-64.18299866	48.70500183
Cap-Des-Rosiers	-64.19650269	48.84000015
Rivière-au-Renard	-64.37200165	49.01100159
Grande-Vallée	-65.12799835	49.24499893
Mont-Louis	-65.64099884	49.26300049
AAL_SL_1	-68.503	48.561
AAL_SL_10	-68.233	48.642
AAL_SL_2	-68.4625	48.579
AAL_SL_3	-68.422	48.597
AAL_SL_4	-68.3815	48.615
AAL_SL_5	-68.341	48.633
AAL_SL_6	-68.3005	48.651
AAL_SL_7	-68.26	48.669
AAL_SL_8	-68.5435	48.543
AAL_SL_9	-68.584	48.525
AQUA_sept îles	-66.2611833	50.20665
AWAC_AAL	-68.42668	48.55222
AWAC_CPE	-64.2890333	48.3893666
AWAC_IDLM	-61.8617	47.3459667
AWAC LPM	-64.3153381	50.2391052

Site	Longitude	Latitude
AWAC maria	-65.9877938	48.1350018
AWAC saint ulric	-67.7433666	48.8001833
AWAC sept iles	-66.2251986	50.1716955
baie comeau	-68.017	49.263
BDC centre 1	-65.695	48.084
BDC centre 2	-65.695	48.039
BDC centre 3	-65.695	47.994
BDC centre 4	-65.695	47.949
BDC_centre_5	-65.695	47.904
BDC centre 6	-65.695	47.859
BDC_centre_7	-65.695	47.814
BDC_est_1	-64.5205	48.372
BDC_est_2	-64.5205	48.327
BDC_est_3	-64.5205	48.282
BDC_est_4	-64.5205	48.237
BDC_est_5	-64.5205	48.192
BDC_est_6	-64.5205	48.147
BDC_est_7	-64.5205	48.102
BDC_est_8	-64.5205	48.057
betsiamites_est	-68.5435	48.912
betsiamites_sud	-68.665	48.822
betsiamites_sud_est	-68.5435	48.822
colombier	-68.8	48.822
CP_LPM	-64.2041667	50.2405556
CPE_G_P_1	-64.129	48.75
CPE_G_P_10	-64.129	48.345
CPE_G_P_11	-64.129	48.3
CPE_G_P_12	-64.1965	48.3
CPE_G_P_13	-64.264	48.3
CPE_G_P_14	-64.3315	48.3
CPE_G_P_15	-64.399	48.3
CPE_G_P_16	-64.4665	48.3
CPE_G_P_2	-64.129	48.705
CPE_G_P_3	-64.129	48.66
CPE_G_P_4	-64.129	48.615
CPE_G_P_5	-64.129	48.57
CPE_G_P_6	-64.129	48.525
CPE_G_P_7	-64.129	48.48
CPE_G_P_8	-64.129	48.435
CPE_G_P_9	-64.129	48.39
estuaire_1	-67.018	49.812
estuaire_10	-67.018	49.452
estuaire_11	-67.018	49.407
estuaire_12	-67.018	49.362
estuaire_13	-67.018	49.317
estuaire_14	-67.018	49.272
estuaire_15	-67.018	49.227
estuaire_16	-67.018	49.182
estuaire_17	-67.018	49.137
estuaire_18	-67.018	49.092
estuaire_19	-67.018	49.047
estuaire_2	-67.018	49.767
estuaire_3	-67.018	49.722
estuaire_4	-67.018	49.677
estuaire_5	-67.018	49.632
estuaire_6	-67.018	49.587
estuaire_/	-67.018	49.542
estuaire_8	-67.018	49.497
estuaire_9	-67.018	49.011

Site	Longitude	Latitude
Forestville	-69.0025	48.723
godbout	-67.5985	49.272
grand_metis	-68.1115	48.669
gros_cacouna	-69.5425	47.949
IAC_1	-70.204	47.481
IAC_2	-70.177	47.445
IAC_3	-70.15	47.409
IAC_4	-70.123	47.373
IAC_5	-70.5145	47.31
IAC_6	-70.4875	47.274
IAC_7	-70.4605	47.238
IAC_8	-70.4335	47.202
IAC_9	-70.393	47.148
IDLM_1	-61.969	46.923
IDLM_10	-61.3345	47.841
IDLM_11	-61.5235	47.202
IDLM_12	-61.8745	47.706
IDLM_13	-62.023	47.616
IDLM_14	-62.158	47.526
IDLM_15	-61.726	47.796
IDLM_16	-61.2535	4/.373
IDLM_17	-61.3885	47.283
IDLM_18	-61.672	47.112
IDLM_19	-61.807	47.022
IDLM_2	-62.293	47.445
IDLM_20	-61.5775	47.886
IDLM_3	-62.212	47.31
	-62.131	47.184
	-62.0635	47.049
	-01.105	47.403
	-01.4155	47.970
	-01.2555	47.700
les mechins	-67 1305	47.365
	-60 2185	48.575
IPM 1	-64 8445	50.046
IPM 10	-64 507	50.046
IPM 11	-64,4395	50.046
IPM 12	-64.372	50.046
LPM 13	-64.3045	50.046
LPM 14	-64.237	50.046
 LPM_15	-64.1695	50.046
LPM_16	-64.102	50.046
LPM_17	-64.0345	50.046
LPM_18	-63.967	50.046
LPM_19	-63.967	50.091
LPM_2	-64.8445	50.091
LPM_20	-63.967	50.136
LPM_21	-63.967	50.181
LPM_22	-63.967	50.226
LPM_23	-63.967	50.271
LPM_3	-64.8445	50.136
LPM_4	-64.8445	50.181
LPM_5	-64.8445	50.226
LPM_6	-64.777	50.046
LPM_7	-64.7095	50.046
LPM_8	-64.642	50.046
LPM_9	-64.5745	50.046
manic_est	-68.071	49.155
Site	Longitude	Latitude
-----------------------	-------------	------------
manic_sud	-68.3275	49.002
manic_sud_est	-68.071	49.002
manic_sud_ouest	-68.5435	48.993
maria_1	-66.1	48.084
maria_2	-66.0325	48.084
maria 3	-65.965	48.084
maria 4	-65.8975	48.084
maria 5	-65.83	48.084
maria 6	-65.7625	48.084
matane	-67.5715	48.876
metis	-67.936	48.741
pointe aux peres	-68.4895	48.534
port neuf est	-69.0025	48.624
port neuf sud	-69.1105	48.525
port neuf sud est	-69.0025	48.525
rimouski	-68.5435	48.507
riviere aux graines 1	-65.587	50.199
riviere aux graines 2	-65.452	50.199
riviere aux graines 3	-65.317	50.199
riviere aux graines 4	-65.182	50.199
riviere aux graines 5	-65.047	50.199
riviere aux graines 6	-64.912	50.199
riviere du loup	-69.61	47.868
saguenay seuil	-69.394	48.219
saint simon	-69.0835	48.246
saint ulric	-67.7353031	48.7897825
saint_ulric_large	-67.7875	48.849
sainte felicite	-67.3555	48.921
sept iles 1	-66.775	50.001
sept_iles_10	-66.1675	50.001
sept_iles_11	-66.1	50.001
sept iles 12	-66.0325	50.001
sept_iles_13	-65.965	50.001
sept_iles_14	-65.8975	50.001
sept iles 15	-65.83	50.001
sept iles 16	-65.7625	50.001
sept_iles_17	-65.695	50.001
sept_iles_18	-65.695	50.046
sept_iles_19	-65.695	50.091
sept_iles_2	-66.7075	50.001
sept_iles_20	-65.695	50.136
sept_iles_21	-65.695	50.181
sept_iles_22	-65.695	50.226
sept_iles_3	-66.64	50.001
sept_iles_4	-66.5725	50.001
sept_iles_5	-66.505	50.001
sept_iles_6	-66.4375	50.001
sept_iles_7	-66.37	50.001
sept_iles_8	-66.3025	50.001
sept_iles_9	-66.235	50.001

# 2.4.4 Contexte des données

Le modèle a été comparé à des observations issues de différents secteurs possédant des caractéristiques hydrodynamiques variées (milieu côtier, estuarien, hauturier). Au total, **12 sites instrumentés** ont été utilisés pour réaliser cette étude. Six d'entre eux sont munis de bouées océanographiques mises en place par le ministère Pêches et Océans Canada (MPO) et six autres sont munis d'AWAC déployés par la Chaire de recherche en géoscience côtière dans le cadre de ce projet (phases II et III).

## 2.4.4.1 Bouées Pêches et Océans Canada

Six bouées océanographiques mises en place dans le cadre du Programme de Monitorage de la Zone Atlantique (PMZA, Pêches et Océans Canada, exemple à la figure 88) fournissent des données de hauteur significative et de période moyenne des vagues à différents sites d'intérêt dans l'EGSL. Ces données sont disponibles via la plateforme de partage de données de l'Observatoire Global du Saint-Laurent (OGSL, <u>https://ogsl.ca/conditions/</u>). Les informations sur la position et la profondeur de la colonne d'eau associées à chaque bouée ainsi que la période temporelle utilisée pour la validation sont compilées dans le tableau 19.



Figure 88 : Bouée viking à la station Rimouski – Source : <u>https://ogsl.ca/fr/navigation/conditions-maritimes-bouees/mpo/informations-de-donnees</u>

Tableau 19 : Coordonnées des bouées océanographiques du ministère Pêches et Océans Canada

Station	Abréviation	Position (Lat, Lon)	Profondeur (m)	Période (utilisée pour la validation)
Courant de Gaspé	IML-7	49° 14.50' N 66° 12.00' W	181	27-05-2017 au 01-11-2017
Old Harry	IML-10	48° 00.00' N 60° 30.00' W	445	04-06-2017 au 21-10-2017
Banc des Américains	IML-BA	48° 35.00' N 63° 53.00' W	180	29-06-2017 au 28-10-2017
Rimouski	PMZA-RIKI	48° 40.000' N 68° 35.000' W	335	29-04-2017 au 13-11-2017
Shédiac	PMZA-VAS	47° 47.00' N 64° 02.00' W	84	16-06-2017 au 28-10-2017
Golfe sud-est	AZMP-ESG	46° 48.00' N 62° 00.00' W	70	29-06-2017 au 15-11-2017

# 2.4.4.2 Données du projet MoDESCo

Six courantomètres acoustiques de type AWAC (*Acoustic Wave And Current profiler*) installés sur différents sites d'intérêt dans le cadre du projet MoDESCo (phases II et III) fournissent des données horaires de hauteur significative, période moyenne et direction moyenne des vagues. Une description complète des données et de leur traitement est disponible dans la section 2.2. Le tableau 20 fournit des informations sur la position et la profondeur associées à chaque instrument ainsi que la période utilisée pour la validation du modèle. À noter que, comme les simulations utilisant les forçages atmosphériques issus du modèle à haute résolution HRDPS ne couvrent que l'année 2017, les périodes temporelles utilisées pour valider le modèle forcé par CFSR et HRDPS peuvent différer.

Tableau 20 : Coordonnées des AWACs du projet MoDESCo

Station	Δhr	Position	Prof.	Période (utilisée pour la validation)				
		(Lat <i>,</i> Lon)	(m)	Été (CFSR)	Été (HRDPS)	Hiver (CFSR)		
Longue-Pointe- de-Mingan	LPM	50° 14.598' N 64° 18.804' W	14	20-05-2016 au 14-12-2016 et 15-04-2017 au 14-12-2017	15-04-2017 au 14-12-2017	01-01-2017 au 14-042017		
Maria	MAR	48° 7.284' N 65° 58.362' W	19.5	03-06-2017 au 14-12-2017	03-06-2017 au 14-12-2017	-		
Pointe-Lebel	PTL	49° 3.138′ N 68° 12.450′W	11	23-06-2016 au 14-12-2016 et 16-11-2017 au 14-12-2017	16-11-2017 au 14-12-2017	15-12-2016 au 14-04-2017		
Cap-des-Rosiers	CDR	48° 50.634' N 64° 11.214' W	15	21-11-2017 au 14-12-2017	21-11-2017 au 14-12-2017	-		
Chandler	СНА	48° 50.634' N 64° 11.214' W	20.4	19-11-2016 au 14-12-2016 et 15-04-2017 au 14-12-2017	15-04-2017 au 14-12-2017	15-12-2016 au 14-04-2017		
Anse-au-Lard	LAR	48° 33.140' N 68° 25.584' W	15	24-05-2016 au 14-12-2016	-	-		

## 2.4.5 Protocole de validation

La validation du modèle consiste à effectuer une comparaison basée sur une approche statistique entre les séries temporelles de différents paramètres de vagues issus des observations et celles obtenues par le modèle. Cette comparaison est effectuée sur trois paramètres moyens de vague, couramment utilisés en océanographie pour décrire le climat de vagues :

La hauteur significative (m):

$$H_{\mathbf{m}_{\mathbf{0}}} = 4\sqrt{m_0}$$
 avec  $m_0 = \int_0^{2\pi} \int_{\omega min}^{\omega max} E(\omega, \theta) d\omega d\theta$ 

Où  $m_0$  correspond à l'énergie totale des vagues,  $E(\omega, \theta)$  est le spectre d'énergie des vagues,  $\theta$  la direction et  $\omega$  la fréquence.

• La période moyenne (s):

$$T_{02} = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$
 avec  $m_2 = \int_0^{2\pi} \int_{\omega min}^{\omega max} \omega^2 E(\omega, \theta) d\omega d\theta$ 

• La direction moyenne (°):

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{\int_0^{2\pi} \int_{\omega min}^{\omega max} \sin\theta E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_{\omega min}^{\omega max} \cos\theta E(\omega, \theta) d\omega d\theta}\right)$$

La comparaison entre les observations et le modèle a été effectuée pour chacune des deux versions du modèle WW3-EGSLCFSR et WW3-EGSLHRDPS en été, mais uniquement pour la version WW3-EGSLCFSR en période hivernale. Pour chacun des paramètres de vagues, les résultats sont présentés pour 1) toutes les vagues, 2) par classe de hauteur de vagues et 3) pour les 10 % des vagues les plus hautes.

En complément de la comparaison avec les observations, une comparaison spatiale a été effectuée entre les deux versions WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub> afin de caractériser les secteurs dans lesquels le modèle est le plus sensible à la résolution des forçages atmosphériques.

## 2.4.5.1 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 sousestimer 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). Il 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  $a_1$  (coefficient directeur) et  $a_2$  (ordonnée à l'origine) de la droite de régression sont obtenus en 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 (même unités que X et Y). Sa valeur idéale est 0.

#### Coefficient de détermination

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

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<sub>s</sub>, 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 (même 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<sub>u</sub>) correspond aux écarts aléatoires (imprévisibles) entre X et Y (équivalent aux résidus de la régression linéaire). C'est un paramètre dimensionnel (même 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'indice d'agrément évalue le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et « l'erreur potentielle » (Willmott, 1984). C'est un paramètre adimensionnel.

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

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 prédites et mesurées, 0 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.

$$P_s = \frac{R\hat{MSE} + d_2 + \hat{SI}}{3}$$

$$RMSE = 1 - \frac{RMSE}{X_{RMS}}$$
$$d_2 = 1 - \frac{|a_2|}{X_{RMS}}$$
$$SI = 1 - \frac{STD}{\bar{X}}$$
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i^2}$$
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i$$

# 2.4.5.2 Statistiques pour données directionnelles

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

### Biais angulaire absolu (MAE en °)

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

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

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

# 2.4.6 Résultats de la validation

## 2.4.6.1 Hauteur significative

### Synthèse

- À l'instar des résultats de la première validation, le modèle utilisant les forçages atmosphériques basse résolution (CFSR) représente bien les hauteurs de vagues en été dans le golfe du Saint-Laurent mais sous-évalue de façon importante les hauteurs dans l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs.
- L'utilisation des forçages atmosphériques haute résolution (HRDPS) permet de supprimer totalement le biais présent dans l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs.
- Le modèle ne permet pas de résoudre correctement la hauteur des vagues en présence de glace en période hivernale.

Pour les simulations réalisées avec les forçages CFSR à basse résolution, on observe les mêmes tendances que rapportées dans la première validation du modèle de la phase II du projet. Pour les sites du golfe ou ceux étant directement affectés par le climat de vagues dans le golfe (IML10, IMLBA, PMZA-VAS, AZMP-ESG, CDR, CHA), les hauteurs de vagues sont bien représentées par le modèle avec un biais relativement faible (MBE = [-0,15, 0,15]). Ceci est aussi nettement visible avec la pente de la droite de régression se situant systématiquement dans un intervalle 0,95-1,05. L'erreur moyenne (RMSE, MAE), de l'ordre de 0,25-0,30 m est donc principalement de nature aléatoire (RMSE<sub>u</sub>=[0,25, 0,30], RMSE<sub>s</sub> = [0,05, 0,15]).

En revanche, pour les sites de l'estuaire maritime et de la baie des Chaleurs (PMZA-RIKI, IML7, PTL, MAR, LAR), un biais systématique est présent (MBE = [0,15, 0,75]) et visible avec le coefficient de la droite de régression de l'ordre de  $a_1 = [0,45, 0,6]$ . Pour ces sites, la part systématique de l'erreur moyenne RMSE<sub>s</sub> = [0,25, 0,35] contre RMSE<sub>u</sub> = [0,10, 0,15].

En ce qui concerne les simulations utilisant les forçages à haute résolution HRDPS, les résultats sont très semblables à ceux utilisant CFSR pour les sites du golfe avec une erreur moyenne MAE = [0,25-0,30] de nature essentiellement aléatoire (RMSE<sub>u</sub> = [0,25, 0,30], RMSE<sub>s</sub> = [0,05, 0,10]). Toutefois, une nette amélioration est visible pour les sites de l'estuaire et de la baie des Chaleur avec une forte réduction du biais MBE = [-0,05, 0,05]. Cette réduction du biais systématique est clairement visible avec la pente de la droite de régression a<sub>1</sub> = [0,85, 0,95]. La part de l'erreur restante est donc uniquement de nature aléatoire (RMSE<sub>u</sub> = [0,25, 0,30], RMSE<sub>s</sub> = [0,05, 0,10]) et les résultats deviennent donc semblables à ceux des sites dans le golfe.

Parmi tous ces résultats, seul le site de Longue-Pointe-de-Mingan (LPM) semble se détacher du lot avec un biais moyen MBE = 0,18 m pour les simulations avec CFSR contre 0,10 m pour les simulations avec HRDPS ainsi qu'un coefficient directeur de la droite de régression  $a_1 = 0,73$  pour CFSR contre 0,79 pour HRDPS. À l'inverse des autres sites, l'utilisation des forçages à haute résolution ne permet pas totalement d'enlever le biais présent. Ceci met en évidence que les conditions hydrodynamiques et topographiques de ce site, notamment avec la présence de nombreuses îles et d'un long plateau peu profond constitué d'un substrat sableux susceptible de se déplacer rapidement, sont les sources principales de la moins bonne représentation des vagues dans ce secteur.

À l'instar de la comparaison avec les données, la comparaison spatiale des simulations utilisant les forçages à basse et haute résolutions (figure 103) montre que les différences se retrouvent principalement dans l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs ainsi qu'entre le continent et l'Île-du-Prince-Édouard, soit des secteurs où le *fetch* est plutôt court.

Ces résultats sont donc très encourageants et permettent de valider l'hypothèse formulée dans la phase Il quant à l'impact de la résolution des forçages atmosphériques sur la capacité du modèle à représenter correctement le climat de vagues.

En ce qui concerne la comparaison du modèle avec les données en période hivernale, celle-ci a été réalisée uniquement sur trois sites (CHA, LPM, PTL). Globalement, le modèle est totalement incapable de représenter les vagues en présence de glace. Le modèle a une très forte tendance à sous-estimer,voire à totalement non représenter,les vagues. Pour chacun de ces sites, le biais moyen est de 0,30, 0,68 et 0,38 m et les coefficients directeurs de la droite de régression sont de 0,63, 0,28 et 0,43 respectivement. De plus, une très grande dispersion des données est visible avec notamment un coefficient de détermination  $r^2$  de 0,57, 0,37 et 0,53.



Figure 89 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée IML7



Figure 90 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSLCFSR, droite : WW3-EGSLHRDPS) et mesurées à la bouée IML-10



Figure 91 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée IML-BA



Figure 92 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée PMZA-RIKI



Figure 93 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée PMZA-VAS



Figure 94 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée AZMP-ESG



Figure 95 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site LPM



Figure 96 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site MAR



Figure 97 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site PTL



Figure 98 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site CDR



Figure 99 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : WW3-EGSLCFSR, droite : WW3-EGSLHRDPS) et mesurées au site CHA



B. Dispersion (10% des vagues les plus hautes)



Figure 100 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées et mesurées au site LAR



Figure 101 : Graphiques de dispersion entre les hauteurs significatives simulées (gauche : CHA, droite : LPM) et mesurées en période hivernale











Figure 103 : Représentation spatiale des différences entre les hauteurs significatives simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub> (HRDPS - CFSR) pour l'année 2017

Tableau 21 : Paramètres statistiques de la comparaison entre hauteurs significatives observées par les bouées IML-7, IML-10, IML-BA et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres / sites	Toutes les vagues						
	IN	1L-7	IM	L-10	IML	-BA	
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	
Biais moyen (MBE)	0,12	-0,03	-0,1	-0,01	-0,13	-0,1	
Biais moyen absolu (MAE)	0,17	0,17	0,22	0,21	0,23	0,19	
Erreur quadratique (RMSE)	0,23	0,24	0,29	0,27	0,32	0,26	
RMSEs	0,17	0,04	0,1	0,02	0,13	0,1	
RMSE <sub>u</sub>	0,16	0,23	0,28	0,27	0,29	0,24	
Écart type (STD)	0,19	0,23	0,28	0,27	0,29	0,24	
<i>a</i> <sub>1</sub> (régression robuste)	0,67	0,95	1,02	0,97	0,99	0,99	
<i>a</i> <sub>2</sub> (régression robuste)	0,02	0,06	0,06	0,05	0,13	0,11	
Coefficient de détermination	0,68	0,65	0,83	0,82	0,74	0,8	
Score de performance général	0,71	0,64	0,83	0,84	0,7	0,74	
Indice d'accord	0,86	0,88	0,94	0,95	0,9	0,93	
Nombre d'échantillons	3464	3464	3290	3290	2638	2638	
Paramètres		10	% des vag	ues les plus	hautes		
Biais moyen (MBE)	0,37	0	-0,1	0,02	-0,10	-0,05	
Biais moyen absolu (MAE)	0,38	0,31	0,3	0,3	0,38	0,32	
Erreur quadratique (RMSE)	0,46	0,38	0,38	0,36	0,47	0,4	
RMSEs	0,39	0,12	0,1	0,02	0,14	0,07	
RMSEu	0,24	0,36	0,36	0,36	0,45	0,39	
Écart type (STD)	0,27	0,38	0,36	0,36	0,46	0,39	
a1 (régression robuste)	0,55	0,56	0,91	1,01	1,28	1,14	
a2 (régression robuste)	0,18	0,55	0,3	-0,06	-0,4	-0,21	
Coefficient de détermination	0,3	0,16	0,4	0,46	0,51	0,52	
Score de performance général	0,75	0,65	0,85	0,89	0,75	0,81	
Indice d'accord	0,54	0,61	0,75	0,78	0,76	0,8	
Nombre d'échantillons	346	346	329	329	263	263	

Tableau 22 : Paramètres statistiques de la comparaison entre hauteurs significatives observées par les bouées PMZA-RIKI, PMZA-VAS, AZMP-ESG et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	PMZ	A-RIKI	PMZ	A-VAS	AZMP-ESG	
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	0,21	-0,05	-0,1	-0,07	0	0,05
Biais moyen absolu (MAE)	0,25	0,17	0,19	0,17	0,16	0,16
Erreur quadratique (RMSE)	0,36	0,23	0,25	0,23	0,22	0,21
RMSEs	0,32	0,07	0,1	0,07	0,03	0,07
RMSE <sub>u</sub>	0,16	0,21	0,25	0,22	0,22	0,2
Écart type (STD)	0,29	0,22	0,25	0,22	0,22	0,21
a1 (régression robuste)	0,48	0,87	1	0,98	0,95	0,93
a <sub>2</sub> (régression robuste)	0,02	0,11	0,1	0,08	0,04	0,01
Coefficient de détermination	0,65	0,77	0,76	0,79	0,89	0,91
Score de performance général	0,6	0,67	0,73	0,77	0,85	0,86
Indice d'accord	0,78	0,93	0,91	0,93	0,97	0,97
Nombre d'échantillons	4562	4562	3206	3206	3280	3280
Paramètres		10 %	des vague	s les plus l	hautes	
Biais moyen (MBE)	0,75	0,1	-0,04	-0,03	0,08	0,16
Biais moyen absolu (MAE)	0,75	0,29	0,28	0,24	0,27	0,27
Erreur quadratique (RMSE)	0,8	0,36	0,36	0,3	0,34	0,35
RMSEs	0,77	0,13	0,07	0,04	0,12	0,18
RMSEu	0,22	0,33	0,36	0,3	0,32	0,3
Écart type (STD)	0,28	0,34	0,36	0,3	0,33	0,31
<i>a</i> 1 (régression robuste)	0,57	0,79	1,2	1,11	0,86	0,88
a2 (régression robuste)	-0,1	0,22	-0,3	-0,14	0,25	0,11
Coefficient de détermination	0,55	0,5	0,47	0,51	0,75	0,79
Score de performance général	0,75	0,8	0,79	0,84	0,87	0,89
Indice d'accord	0,51	0,82	0,76	0,79	0,93	0,93
Nombre d'échantillons	456	456	320	320	328	328

Tableau 23 : Paramètres statistiques de la comparaison entre hauteurs significatives observées aux sites LPM, MAR, PTL et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	LF	PM	Μ	AR	PTL	
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	0,18	0,1	0,22	0,04	0,25	0,06
Biais moyen absolu (MAE)	0,22	0,18	0,22	0,11	0,26	0,18
Erreur quadratique (RMSE)	0,3	0,25	0,27	0,15	0,36	0,24
RMSEs	0,24	0,16	0,25	0,04	0,31	0,08
RMSE <sub>u</sub>	0,18	0,19	0,1	0,14	0,17	0,23
Écart type (STD)	0,24	0,23	0,16	0,14	0,26	0,23
a1 (régression robuste)	0,73	0,79	0,5	0,94	0,58	0,9
a2 (régression robuste)	0,01	0,05	-0,05	-0,02	-0,02	0
Coefficient de détermination	0,84	0,87	0,56	0,7	0,69	0,79
Score de performance général	0,77	0,79	0,56	0,71	0,66	0,79
Indice d'accord	0,91	0,95	0,66	0,9	0,8	0,93
Nombre d'échantillons	9319	5157	2114	2114	4638	748
Paramètres		10 %	des vague	es les plus l	nautes	
Biais moyen (MBE)	0,55	0,41	0,45	0,05	0,68	0,25
Biais moyen absolu (MAE)	0,56	0,44	0,45	0,17	0,68	0,33
Erreur quadratique (RMSE)	0,65	0,52	0,49	0,22	0,78	0,4
RMSEs	0,6	0,45	0,45	0,06	0,71	0,25
RMSEu	0,26	0,27	0,18	0,21	0,32	0,3
Écart type (STD)	0,35	0,32	0,19	0,22	0,38	0,31
a1 (régression robuste)	0,69	0,77	0,62	0,79	0,6	1,09
a2 (régression robuste)	0,08	0,06	-0,12	0,13	-0,05	-0,42
Coefficient de détermination	0,8	0,84	0,29	0,32	0,49	0,73
Score de performance général	0,82	0,86	0,69	0,78	0,75	0,79
Indice d'accord	0,79	0,88	0,41	0,71	0,57	0,85
Nombre d'échantillons	931	515	211	211	463	74

Tableau 24 : Paramètres statistiques de la comparaison entre hauteurs significatives observées aux sites CDR, CHA, LAR et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	C	DR	C	HA	L	AR
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	-0,02	0	0,06	0,04	0,27	-
Biais moyen absolu (MAE)	0,19	0,17	0,13	0,12	0,27	-
Erreur quadratique (RMSE)	0,27	0,24	0,19	0,17	0,35	-
RMSEs	0,06	0,06	0,07	0,05	0,33	-
RMSEu	0,26	0,23	0,17	0,16	0,12	-
Écart type (STD)	0,27	0,24	0,18	0,16	0,23	-
<i>a</i> <sub>1</sub> (régression robuste)	1,08	1,08	0,92	0,92	0,46	-
<i>a</i> <sub>2</sub> (régression robuste)	-0,05	-0,06	-0,03	0	0	-
Coefficient de détermination	0,89	0,91	0,86	0,87	0,65	-
Score de performance général	0,79	0,81	0,78	0,8	0,64	-
Indice d'accord	0,96	0,97	0,95	0,96	0,7	-
Nombre d'échantillons	549	549	5977	5391	4236	-
Paramètres		10 %	des vague	es les plus l	hautes	
Biais moyen (MBE)	-0,21	-0,2	0,14	0,12	0,69	-
Biais moyen absolu (MAE)	0,41	0,43	0,23	0,22	0,69	-
Erreur quadratique (RMSE)	0,54	0,5	0,31	0,27	0,73	-
RMSEs	0,23	0,2	0,15	0,12	0,71	-
RMSE <sub>u</sub>	0,49	0,45	0,27	0,25	0,18	-
Écart type (STD)	0,5	0,46	0,28	0,25	0,24	-
a1 (régression robuste)	0,84	0,93	0,86	0,94	0,5	-
a2 (régression robuste)	0,63	0,38	0,09	-0,04	-0,03	-
Coefficient de détermination	0,55	0,63	0,77	0,83	0,49	-
Score de performance général	0,8	0,84	0,86	0,88	0,74	-
Indice d'accord	0,83	0,86	0,92	0,94	0,44	-
Nombre d'échantillons	54	54	597	539	423	-

Tableau 25 : Paramètres statistiques de la comparaison entre hauteurs significatives observées en période hivernale aux sites CHA, LPM, PTL et simulées par WW3-EGSLCFSR

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues (HIVER)		
	СНА	LPM	PTL
Biais moyen (MBE)	0,3	0,68	0,38
Biais moyen absolu (MAE)	0,32	0,68	0,39
Erreur quadratique (RMSE)	0,5	0,93	0,53
RMSEs	0,38	0,89	0,49
RMSEu	0,34	0,29	0,21
Écart type (STD)	0,41	0,64	0,37
<i>a</i> <sub>1</sub> (régression robuste)	0,63	0,28	0,43
a <sub>2</sub> (régression robuste)	-0,07	-0,07	-0,02
Coefficient de détermination	0,57	0,37	0,53
Score de performance général	0,55	0,46	0,58
Indice d'accord	0,81	0,58	0,68
Nombre d'échantillons	2860	1860	2248
Paramètres	10 % des	vagues les pl	lus hautes
		(HIVER)	
Biais moyen (MBE)	0,89	2,05	1,12
Biais moyen absolu (MAE)	0,92	2,05	1,12
Erreur quadratique (RMSE)	1,21	2,2	1,27
RMSEs	0,9	2,08	1,18
RMSEu	0,81	0,72	0,46
Écart type (STD)	0,83	0,8	0,6
a1 (régression robuste)			
	0,77	0,41	0,28
a2 (régression robuste)	0,77 -0,4	0,41 -0,41	0,28 0,23
a <sub>2</sub> (régression robuste) Coefficient de détermination	0,77 -0,4 0,38	0,41 -0,41 0,1	0,28 0,23 0,09
a1 (régression robuste)   a2 (régression robuste)   Coefficient de détermination   Score de performance général	0,77 -0,4 0,38 0,62	0,41 -0,41 0,1 0,6	0,28 0,23 0,09 0,63
a1 (régression robuste)   a2 (régression robuste)   Coefficient de détermination   Score de performance général   Indice d'accord	0,77 -0,4 0,38 0,62 0,64	0,41 -0,41 0,1 0,6 0,31	0,28 0,23 0,09 0,63 0,39

# 2.4.6.2 Période moyenne

### Synthèse

- Le modèle utilisant les forçages atmosphériques basse résolution (CFSR) représente globalement de façon satisfaisante la période dominante des vagues, bien que les résultats soient inégaux d'un site à l'autre. Le modèle a généralement tendance à surestimer la période pour les courtes vagues.
- L'utilisation des forçages atmosphériques haute résolution (HRDPS) ne semble pas avoir d'impact sur les résultats du modèle pour la période moyenne des vagues.
- De même que pour les hauteurs, le modèle représente très mal la période des vagues en hiver.

En ce qui concerne les simulations utilisant des forçages à basse résolution (CFSR), bien que les résultats soient assez différents d'un site à l'autre, on peut remarquer que les périodes prédominantes, entre 3 et 6 secondes, sont globalement bien représentées par le modèle avec une légère tendance à la surestimation (MBE = [-0,70, -0,05]). Ceci est visible notamment sur les graphiques de dispersion où la plus grande densité de points se trouve proche de la courbe 1:1. Toutefois, sur la plupart des sites, il existe une grande dispersion des résultats entraînant une erreur moyenne de l'ordre de RMSE = [0,6, 1,15]. Dans la majeure partie des cas, sauf PMZA-RIKI et IML7, cette imprécision est d'autant plus prononcée pour les courtes vagues. Ceci est visible sur les graphiques de dispersion par classe de période où les moyennes par classe sont nettement au-dessus de la courbe 1:1 pour les classes de vagues courtes mais tendent à se rapprocher de la courbe 1:1 pour de plus longues périodes (PTL, CHA, LPM, LAR, MAR).

De plus, on peut voir graphiquement que les périodes des 10 % des vagues les plus hautes sont globalement mieux représentées notamment pour les sites PTL, MAR, CHAR et LAR avec des coefficients directeurs de la droite de régression de respectivement 0,26, -0,31, 0,81 et 0,53 pour la totalité des vagues contre 0,84, 0,93, 1,03 et 1,05 en considérant uniquement les 10 % des vagues les plus hautes. Le site AZMP-ESG semble avoir un comportement différent des autres sites. Bien que les résultats soient moins dispersés, il semble que le modèle sous-estime fortement et de façon systématique les périodes de vagues (MBE = 1,23,  $a_1 = 0,43$ ).

À contrario des résultats sur la hauteur significative des vagues, la comparaison entre observations et simulations utilisant les forçages à haute résolution (HRDPS) ne montre pas de différence avec celles réalisées avec les forçages à basse résolution (CFSR). L'utilisation de forçages à haute résolution semble donc avoir peu - voire pas - d'impact sur la période des vagues. De faibles différences se retrouvent encore spatialement dans l'estuaire maritime, la baie des Chaleurs et proche de l'Île-du-Prince-Édouard.

La comparaison des simulations avec les observations en période hivernale montre que le modèle ne permet pas de représenter la période des vagues en présence de glace. Les erreurs moyennes sont très importantes (RMSE = [0,98, 1,70]), les périodes simulées sont très sous-estimées ( $a_1$  = [0,23, 0,40]) et la corrélation entre les observations et le modèle est quasiment nulle ( $r^2$  = [0,08, 0,16]).



Figure 104 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée IML7



Figure 105 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée IML10



Figure 106 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée IML-BA



Figure 107 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée PMZA-RIKI



Figure 108 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée PMZA-VAS


Figure 109 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées à la bouée AZMP-ESG



Figure 110 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site LPM



Figure 111 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site MAR



Figure 112 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite: WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site PTL



Figure 113 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site CDR



Figure 114 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site CHA



C. Dispersion (10% des vagues les plus hautes)



Figure 115 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées et mesurées au site LAR



Figure 116 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées (gauche : CHA, droite : LPM) et mesurées en période hivernale



C. Dispersion (10% des vagues les plus hautes)



Figure 117 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées et mesurées au site PTL en période hivernale



Figure 118 : Représentation spatiale des différences entre les périodes moyennes simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub> (HRDPS - CFSR) pour l'année 2017

Tableau 26 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les périodes moyennes observées par les bouées IML-7, IML-10, IML-BA et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	IML-7		IM	L-10	IMI	-BA
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	0,31	0,17	-0,15	-0,13	-0,13	-0,1
Biais moyen absolu (MAE)	0,7	0,73	0,45	0,45	0,46	0,42
Erreur quadratique (RMSE)	0,97	0,95	0,65	0,65	0,61	0,55
RMSEs	0,72	0,72	0,17	0,15	0,22	0,19
RMSE <sub>u</sub>	0,64	0,63	0,63	0,64	0,57	0,52
Écart type (STD)	0,91	0,94	0,64	0,64	0,6	0,54
a1 (régression robuste)	0,25	0,2	0,91	0,9	0,75	0,78
a <sub>2</sub> (régression robuste)	2,14	2,46	0,53	0,56	1	0,89
Coefficient de détermination	0,1	0,07	0,51	0,5	0,48	0,55
Score de performance général	0,6	0,57	0,86	0,85	0,79	0,81
Indice d'accord	0,59	0,56	0,82	0,82	0,82	0,85
Nombre d'échantillons	3464	3464	3290	3290	2638	2638
Paramètres		10 %	des vague	es les plus l	nautes	
Biais moyen (MBE)	0,18	-0,12	-0,18	-0,1	-0,23	-0,16
Biais moyen absolu (MAE)	0,47	0,64	0,35	0,37	0,51	0,43
Erreur quadratique (RMSE)	0,63	0,78	0,44	0,46	0,62	0,53
RMSEs	0,42	0,58	0,26	0,2	0,26	0,23
RMSEu	0,47	0,51	0,35	0,41	0,56	0,48
Écart type (STD)	0,6	0,77	0,40	0,45	0,58	0,5
a1 (régression robuste)	0,51	0,27	0,53	0,57	0,78	0,71
a <sub>2</sub> (régression robuste)	1,72	3	2,16	2,34	1,24	1,5
Coefficient de détermination	0,42	0,14	0,28	0,24	0,4	0,4
Score de performance général	0,75	0,62	0,78	0,79	0,82	0,82
Indice d'accord	0,78	0,6	0,7	0,7	0,75	0,79
Nombre d'échantillons	346	346	329	329	263	263

Tableau 27 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les périodes moyennes observées par les bouées PMZA-RIKI, PMZA-VAS, AZMP\_ESG et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	PMZA-RIKI		PMZA-VAS		AZM	P-ESG
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	0,73	0,97	0,018	0,05	1,23	1,26
Biais moyen absolu (MAE)	1,48	1,18	0,36	0,31	1,3	1,32
Erreur quadratique (RMSE)	1,97	1,7	0,6	0,45	1,57	1,58
RMSEs	1,6	1,54	0,15	0,12	1,48	1,5
RMSE <sub>u</sub>	1,13	0,72	0,58	0,43	0,5	0,5
Écart type (STD)	1,83	1,4	0,6	0,45	0,97	0,95
a <sub>1</sub> (régression robuste)	0,15	0,23	0,77	0,82	0,43	0,44
a <sub>2</sub> (régression robuste)	2,64	2,15	0,75	0,54	1,52	1,46
Coefficient de détermination	0,05	0,2	0,43	0,61	0,61	0,63
Score de performance général	0,49	0,59	0,81	0,86	0,73	0,73
Indice d'accord	0,5	0,57	0,8	0,88	0,67	0,67
Nombre d'échantillons	4562	4562	3206	3206	3280	3280
Paramètres		10 %	des vague	s les plus l	nautes	
Biais moyen (MBE)	1,97	1,45	0,15	0,1	1,97	2
Biais moyen absolu (MAE)	2	1,47	0,36	0,3	1,98	2
Erreur quadratique (RMSE)	2,1	1,73	0,44	0,37	2,1	2,11
RMSEs	2,08	1,67	0,15	0,1	2,06	2,07
RMSE <sub>u</sub>	0,67	0,45	0,41	0,35	0,42	0,39
Écart type (STD)	0,96	0,95	0,41	0,36	0,72	0,67
a1 (régression robuste)	0,4	0,25	0,95	0,94	0,46	0,49
a <sub>2</sub> (régression robuste)	1,33	2,69	0,03	0,14	1,84	1,58
Coefficient de détermination	0,31	0,28	0,48	0,55	0,58	0,65
Score de performance général	0,73	0,68	0,93	0,93	0,78	0,79
Indice d'accord	0,47	0,51	0,78	0,83	0,5	0,5
Nombre d'échantillons	456	456	320	320	328	328

Tableau 28 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les périodes moyennes observées aux sites LPM, MAR, PTL et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	LPM		М	MAR		TL
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	-0,35	-0,33	-0,57	-0,32	-0,44	-0,24
Biais moyen absolu (MAE)	0,58	0,52	0,96	0,48	0,85	0,45
Erreur quadratique (RMSE)	0,82	0,71	1,66	0,91	1,26	0,64
RMSEs	0,43	0,39	0,8	0,39	0,67	0,31
RMSEu	0,69	0,59	1,46	0,82	1,07	0,56
Écart type (STD)	0,74	0,63	1,56	0,85	1,18	0,59
a1 (régression robuste)	0,7	0,74	-0,31	0,49	0,26	0,73
a <sub>2</sub> (régression robuste)	1,3	1,14	3,61	1,48	2,49	1,04
Coefficient de détermination	0,41	0,51	0,01	0,06	0,02	0,44
Score de performance général	0,71	0,74	0,02	0,53	0,42	0,75
Indice d'accord	0,77	0,81	0,16	0,43	0,45	0,78
Nombre d'échantillons	9319	5157	2114	2114	4638	748
Paramètres		10 %	des vague	s les plus l	nautes	
Biais moyen (MBE)	-0,08	-0,12	0,4	-0,02	0,41	-0,14
Biais moyen absolu (MAE)	0,38	0,36	0,51	0,23	0,7	0,52
Erreur quadratique (RMSE)	0,53	0,5	0,67	0,31	0,85	0,88
RMSEs	0,14	0,15	0,4	0,07	0,42	0,27
RMSEu	0,51	0,48	0,54	0,3	0,74	0,84
Écart type (STD)	0,52	0,49	0,54	0,31	0,75	0,87
a1 (régression robuste)	0,8	0,82	0,93	0,77	0,84	0,49
a2 (régression robuste)	1	0,9	-0,21	0,71	0,22	2,16
Coefficient de détermination	0,48	0,51	0,22	0,39	0,26	0,07
Score de performance général	0,85	0,86	0,84	0,86	0,84	0,83
Indice d'accord	0,82	0,83	0,5	0,78	0,62	0,68
Nombre d'échantillons	931	515	211	211	463	74

Tableau 29 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les périodes moyennes observées aux sites CDR, CHA, LAR et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	CDR		СНА		L	AR
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen (MBE)	-0,7	0,75	-0,51	-0,4	-0,18	-
Biais moyen absolu (MAE)	0,81	0,84	0,71	0,64	0,61	-
Erreur quadratique (RMSE)	1,12	1,14	0,99	0,91	0,92	-
RMSEs	0,74	0,79	0,54	0,48	0,36	-
RMSE <sub>u</sub>	0,85	0,81	0,83	0,77	0,84	-
Écart type (STD)	0,88	0,85	0,85	0,82	0,9	-
a1 (régression robuste)	1,2	1,24	0,81	0,71	0,55	-
a <sub>2</sub> (régression robuste)	-0,07	-0,16	1,16	1,37	1,43	-
Coefficient de détermination	0,67	0,71	0,46	0,39	0,17	-
Score de performance général	0,85	0,81	0,71	0,69	0,62	-
Indice d'accord	0,82	0,81	0,77	0,76	0,63	-
Nombre d'échantillons	549	549	5977	5391	4236	-
Paramètres		10 %	des vague	s les plus l	nautes	
Biais moyen (MBE)	-1,66	-1,6	-0,43	-0,1	0,32	-
Biais moyen absolu (MAE)	1,68	1,63	0,55	0,36	0,53	-
Erreur quadratique (RMSE)	1,95	1,84	0,67	0,46	0,64	-
RMSEs	1,68	1,62	0,43	0,11	0,32	-
RMSEu	1	0,88	0,5	0,45	0,55	-
Écart type (STD)	1,03	0,9	0,51	0,45	0,56	-
a1 (régression robuste)	1,22	1,14	1,03	0,94	1,05	-
a2 (régression robuste)	0,43	0,82	0,38	0,38	-0,51	-
Coefficient de détermination	0,67	0,69	0,77	0,76	0,59	-
Score de performance général	0,79	0,79	0,9	0,91	0,85	-
Indice d'accord	0,65	0,66	0,88	0,93	0,81	-
Nombre d'échantillons	54	54	597	539	423	-

Tableau 30 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les périodes moyennes observées aux sites CHA, LPM et PTL en période hivernale et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues (HIVER)			
	СНА	LPM	PTL	
Biais moyen (MBE)	0,59	1,12	0,47	
Biais moyen absolu (MAE)	1,19	1,29	0,75	
Erreur quadratique (RMSE)	1,7	1,62	0,98	
RMSEs	0,99	1,39	0,7	
RMSEu	1,38	0,83	0,69	
Écart type (STD)	1,6	1,17	0,86	
a1 (régression robuste)	0,4	0,23	0,37	
a <sub>2</sub> (régression robuste)	1,66	1,49	1,4	
Coefficient de détermination	0,13	0,08	0,16	
Score de performance général	0,58	0,59	0,64	
Indice d'accord	0,63	0,53	0,6	
Nombre d'échantillons	2860	1860	2248	
Paramètres	10 % des vagues les plus hautes			
r di difici co	10 /0 0.03	vagues ies p	nus nautes	
	10 /0 403	(HIVER)	nus nautes	
Biais moyen (MBE)	0,95	(HIVER) 1,82	0,89	
Biais moyen (MBE) Biais moyen absolu (MAE)	0,95 1,65	(HIVER) 1,82 1,98	0,89 1,07	
Biais moyen (MBE) Biais moyen absolu (MAE) Erreur quadratique (RMSE)	0,95 1,65 2,32	(HIVER) 1,82 1,98 2,25	0,89 1,07 1,24	
Biais moyen (MBE) Biais moyen absolu (MAE) Erreur quadratique (RMSE) RMSEs	0,95 1,65 2,32 1,09	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89	0,89 1,07 1,24 0,97	
Biais moyen (MBE) Biais moyen absolu (MAE) Erreur quadratique (RMSE) RMSEs RMSEu	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77	
Biais moyen (MBE) Biais moyen absolu (MAE) Erreur quadratique (RMSE) RMSEs RMSEu Écart type (STD)	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04 2,11	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22 1,33	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77 0,86	
Biais moyen (MBE)   Biais moyen absolu (MAE)   Erreur quadratique (RMSE)   RMSEs   RMSEu   Écart type (STD)   a1 (régression robuste)	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04 2,11 0,52	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22 1,33 0,15	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77 0,86 0,4	
Biais moyen (MBE)   Biais moyen absolu (MAE)   Erreur quadratique (RMSE)   RMSEs   RMSEu   Écart type (STD)   a1 (régression robuste)   a2 (régression robuste)	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04 2,11 0,52 1,76	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22 1,33 0,15 2,42	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77 0,86 0,4 1,56	
Biais moyen (MBE)   Biais moyen absolu (MAE)   Erreur quadratique (RMSE)   RMSEs   RMSEu   Écart type (STD)   a1 (régression robuste)   a2 (régression robuste)   Coefficient de détermination	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04 2,11 0,52 1,76 0,07	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22 1,33 0,15 2,42 0	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77 0,86 0,4 1,56 0,1	
Biais moyen (MBE)   Biais moyen absolu (MAE)   Erreur quadratique (RMSE)   RMSEs   RMSEu   Écart type (STD)   a1 (régression robuste)   a2 (régression robuste)   Coefficient de détermination   Score de performance général	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04 2,11 0,52 1,76 0,07 0,63	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22 1,33 0,15 2,42 0 0,6	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77 0,86 0,4 1,56 0,1 0,7	
Biais moyen (MBE)   Biais moyen absolu (MAE)   Erreur quadratique (RMSE)   RMSEs   RMSEu   Écart type (STD)   a1 (régression robuste)   a2 (régression robuste)   Coefficient de détermination   Score de performance général   Indice d'accord	0,95 1,65 2,32 1,09 2,04 2,11 0,52 1,76 0,07 0,63 0,68	(HIVER) 1,82 1,98 2,25 1,89 1,22 1,33 0,15 2,42 0 0,6 0,26	0,89 1,07 1,24 0,97 0,77 0,86 0,4 1,56 0,1 0,7 0,45	

#### 2.4.6.3 Direction moyenne

#### **Synthèse**

- Le modèle utilisant les forçages atmosphériques basse résolution (CFSR) représente de façon satisfaisante la direction moyenne des vagues, principalement pour les plus hautes vagues.
- L'utilisation des forçages atmosphériques haute résolution (HRDPS) ne semble pas avoir d'impact sur les résultats du modèle pour la direction moyenne des vagues.
- À contrario de la hauteur significative et de la période moyenne, le modèle est capable, avec toutefois plus d'incertitude qu'en été, à simuler la direction des vagues en période hivernale.

De manière générale, le modèle représente correctement la direction moyenne des vagues pour les simulations réalisées avec les forçages atmosphériques à basse résolution (CFSR). Les résultats montrent que les directions suivent généralement un régime bimodal excepté pour CHA. On peut voir graphiquement que les plus fortes densités de points se retrouvent proches de la courbe 1:1, indiquant un bon accord entre le modèle et les observations. Il y a toutefois une certaine dispersion avec une erreur moyenne MBE = [20, 50] et un coefficient de détermination  $r^2 = [0,30, 0,96]$ . Le modèle représente d'autant mieux la direction des vagues les plus hautes avec une erreur moyenne MBE = [8, 32] et un coefficient de détermination  $r^2 = [0,64, 0,99]$ .

Les résultats des simulations utilisant les forçages atmosphériques à haute résolution (HRDPS) ne présentent pas de différence notable avec ceux utilisant les forçages à basse résolution.

Les résultats de la comparaison avec les observations pour la période hivernale montrent que le modèle reste, dans une certaine mesure, relativement capable de représenter les directions moyennes, malgré une dispersion plus importante, avec une erreur moyenne de l'ordre de MBE~45° et un  $r^2 = [0,13,0,48]$  pour l'ensemble des trois sites.



Figure 119 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site LPM



Figure 120 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site MAR



Figure 121 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site PTL



Figure 122 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site CDR



Figure 123 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : WW3-EGSL<sub>CFSR</sub>, droite : WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>) et mesurées au site CHA



C. Dispersion (10% des vagues les plus hautes)







Figure 125 : Graphiques de dispersion entre les directions moyennes simulées (gauche : CHA, droite : LPM) et mesurées en période hivernale



C. Dispersion (10% des vagues les plus hautes)



Figure 126 : Graphiques de dispersion entre les périodes moyennes simulées et mesurées au site PTL en période hivernale



Figure 127 : Représentation spatiale des différences entre les directions moyennes simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub> (HRDPS - CFSR) pour l'année 2017

Tableau 31 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les directions moyennes observées aux sites LPM, MAR, PTL et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	LPM		MAR		PTL	
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen absolu (MAE)	28,04	27,04	40,6	29,59	49,06	29,44
a1 (régression robuste)	0,85	0,89	0,56	0,69	0,68	0,76
a <sub>2</sub> (régression robuste)	10,8	1,05	59,7	37,28	16,22	26,42
Coefficient de détermination	0,69	0,72	0,3	0,55	0,48	0,71
Nombre d'échantillons	9319	5157	2114	2114	4638	748
Paramètres		10 %	des vague	s les plus l	nautes	
Biais moyen absolu (MAE)	21,6	21,22	21,26	16,41	26,27	21,44
a1 (régression robuste)	0,99	0,99	0,87	1,02	0,98	0,91
a <sub>2</sub> (régression robuste)	-19,4	-20	0,71	-19,61	-22,43	-5,94
Coefficient de détermination	0,92	0,95	0,82	0,94	0,96	0,98
Nombre d'échantillons	931	515	211	211	463	74

Tableau 32 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les périodes moyennes observées aux sites CDR, CHA, LAR et simulées par WW3-EGSL<sub>CFSR</sub> et WW3-EGSL<sub>HRDPS</sub>

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues					
	CDR		СНА		LAR	
Forçage atmosphérique	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS	CFSR	HRDPS
Biais moyen absolu (MAE)	28,31	26,27	20,25	18,85	40,37	-
a1 (régression robuste)	1,03	1,01	0,72	0,79	1,03	-
a <sub>2</sub> (régression robuste)	-24,83	20,56	30,4	26,15	-29,45	-
Coefficient de détermination	0,75	0,77	0,38	0,42	0,96	-
Nombre d'échantillons	549	549	5977	5391	4236	-
Paramètres		10 %	des vague	s les plus l	nautes	
Biais moyen absolu (MAE)	8,87	10,25	13,57	12,03	32,04	-
a <sub>1</sub> (régression robuste)	0,76	0,79	0,94	1,07	1,06	-
a <sub>2</sub> (régression robuste)	20,11	15,89	-4,83	-18,98	-38,33	-
Coefficient de détermination	0,77	0,67	0,64	0,64	0,99	-
Nombre d'échantillons	54	54	597	539	423	-

Tableau 33 : Paramètres statistiques de la comparaison entre les directions moyennes observées aux sites CHA, LPM et PTL en période hivernale et simulées par WW3-EGSLCFSR

Paramètres \ Sites	Toutes les vagues (HIVER)				
	СНА	LPM	PTL		
Biais moyen absolu (MAE)	49,76	44,48	48,31		
a1 (régression robuste)	0,74	0,93	0,68		
a <sub>2</sub> (régression robuste)	55,7	4,4	43,06		
Coefficient de détermination	0,13	0,48	0,42		
Nombre d'échantillons	2860	1860	2248		
Paramètres	10 % des	vagues les p (HIVER)	olus hautes		
Biais moyen absolu (MAE)	34,88	25,72	25,03		
a1 (régression robuste)	1,12	1,29	0,99		
a <sub>2</sub> (régression robuste)	-27,69	-93,16	-21,77		
Coefficient de détermination	0,11	0,8	0,92		

#### 2.4.7 Synthèse générale

L'étude de validation du système WW3-EGSL avait pour objectifs 1) d'évaluer la sensibilité du modèle à la résolution spatiale des forçages atmosphériques et 2) d'évaluer la capacité du modèle à représenter le climat de vagues en période hivernale.

En ce qui concerne le premier objectif, la comparaison réalisée entre les simulations utilisant les forçages à basse résolution CFSR et les simulations à haute résolution HRDPS a permis de démontrer le gain important apporté par l'utilisation des forçages à haute résolution notamment sur la représentation de la hauteur des vagues. Dans le cadre du projet MoDESCo, une réanalyse utilisant le système HRDPS sur une longue période de temps permettrait d'améliorer les résultats des simulations du passé récent servant à calculer des statistiques de période de retour de tempête.

Pour ce qui est du deuxième objectif, les résultats montrent de façon claire l'incapacité du modèle à représenter adéquatement le climat de vagues en période hivernale. Généralement, le modèle sousestime, voire ne représente pas du tout, la hauteur ainsi que la période des vagues observées.

Une explication probable à ce résultat est que le modèle NEMO-CICE5 utilisé pour forcer les champs d'épaisseur et de concentration de glace dans le modèle de vagues ne permet pas de simuler fidèlement la répartition spatio-temporelle de la glace, à laquelle les conditions de vagues sont très sensibles. Les études de Bismuth (2015) ou de Dugas (2020) mettent en évidence cette forte sensibilité. Les raisons expliquant que le modèle NEMO-CICE5 ne simule pas fidèlement l'évolution du couvert de glace sont multiples. De manière générale, il faut reconnaître que les modèles de glace sont loin d'être aussi avancés que le sont les modèles de circulation atmosphérique ou océanique en matière de prévision. Plusieurs processus physiques qui ont trait à la dynamique (contraintes, déformation, dérive, fracture, épaississement, etc.) ou à la thermodynamique (formation, porosité, profil thermique, fonte, etc.) sont représentés d'une manière approximative qui se base sur des observations parcellaires, indirectes ou incomplètes d'un matériau hétérogène et de structure complexe. Cette situation est héritée en partie par le fait que les observations de la banquise sont elles-mêmes incomplètes et parcellaires. Il est à noter, à © LDGIZC 2020

titre d'exemple, que l'effet des vagues sur la banquise n'est pas pris en compte par le modèle. Par conséquent, la fragmentation de la glace par les vagues, qui provoque des changements significatifs dans la réponse de la glace aux forçages par le vent, les vagues et les courants, n'est pas représentée, ce qui peut introduire des erreurs importantes dans l'évolution du couvert de glace.

Or, aucun modèle n'étant parfait, comme c'est aussi le cas des modèles océaniques et atmosphériques, les systèmes de prévision environnementale ont recours à l'assimilation de données qui a pour effet de diminuer les écarts entre la prévision d'un modèle et les observations. Or, le modèle opéré à l'ISMER utilisé dans ce projet ne fait pas d'assimilation de données. Le système de prévision d'Environnement Canada pour le golfe et l'estuaire utilise quant à lui les données du Service canadien des glaces pour substituer les observations de glace aux prévisions faites par le modèle. L'impact de cette stratégie sur la prévision des vagues n'est toutefois pas nécessairement positif, car ces cartes ne représentent pas avec suffisamment de détail la répartition de la banquise à concentration intermédiaire (0,2 < A < 0,8). Augmenter la résolution et mieux représenter les processus couplés entre l'océan, les vagues, la glace et l'atmosphère sont des avenues de recherche pouvant potentiellement améliorer les performances des systèmes de prévision des vagues en présence d'un couvert de glace partiel.

#### 2.5 Climatologie des tempêtes passées et futures

À partir des séries temporelles du forçage de vagues issu du modèle WaveWatch III, une méthode de détection des évènements de tempête a été mise en place. Celle-ci permet alors de compter les évènements et de caractériser les évolutions du climat de vagues passé et futur pour chacun des sites d'étude.

# 2.5.1 Description de la méthode

La méthode se base sur la détection de franchissement de seuil (Masselink *et coll.*, 2016). Un évènement de tempête est caractérisé par le franchissement de la valeur seuil du 99<sup>e</sup> percentile de la hauteur de vague. La durée de l'évènement est calculée comme étant la période durant laquelle les hauteurs significatives des vagues restent au-dessus du 95<sup>e</sup> percentile. L'évènement de tempête est pris en compte lorsque cette durée dépasse 6 heures (figure 128). Enfin, une différentiation est faite entre les évènements dont le niveau d'eau moyen dépasse le niveau d'eau des pleines mers supérieures (PMS), ce qui correspond à un évènement de tempête ayant pu avoir un effet important sur le site d'étude, comme une phase particulièrement intense d'érosion ou bien une submersion marine.



Figure 128 : Illustration de la méthode de détection des tempêtes utilisée pour analyser le climat de vagues sur les différents sites d'étude. L'évènement coïncide ici avec une marée de vive-eau. PMS : niveau moyen des pleines mers supérieures. Sur cet exemple, la durée de l'évènement a été de 32 heures. À droite : aperçu de la plage de Pointe-Lebel avant la marée haute lors de l'évènement.

# 2.5.2 Climatologie des tempêtes pour la période 1980-2017

La première étape consiste à calculer les valeurs seuils ( $H_{s,99\%}$  et  $H_{s,95\%}$ ) qui seront utilisées pour réaliser la détection des évènements (tableau 34). Pour cela, les données du modèle WaveWatch III sont utilisées pour la période 1980-2010. Les valeurs des pleines mers supérieures (PMS) sont celles données par le Service hydrographique du Canada (niveaux marégraphiques des stations, révision 2019-04-04).

Les séries temporelles de hauteurs de vagues et de niveau d'eau sont ensuite analysées en fonction de ces paramètres pour chacun de nos sites d'étude. Le nombre d'évènements, leur durée ainsi que leurs dates d'occurrence sont enregistrés afin de calculer les fonctions de distribution cumulative (CDF) des tempêtes au cours du temps : i) pour l'ensemble des tempêtes; ii) pour celles dont la durée est comprise entre 12 et 24 heures; et iii) pour celles dont la durée dépasse 24 heures, ce qui correspond à des évènements exceptionnels, comme ce fut le cas lors de la submersion marine du 6 décembre 2010 dans la municipalité de Maria (baie des Chaleurs).

Tableau 34 : Valeurs des seuils de hauteur de vague  $H_{s,99\%}$  et  $H_{s,95\%}$  calculées pour la période 1980-2010 et de hauteur d'eau (pleines mers supérieures) par rapport au zéro hydrographique fournies par le SHC et utilisées pour la détection des tempêtes sur les sites d'étude. Les données de modèle sont non corrigées.

Site	<i>H<sub>s,99%</sub></i> (m)	$H_{s,95\%}$ (m)	PMS (ZH, m)
ΡΑΟ	1,34	0,88	4,2
PTL	1,50	0,97	4,2
MAR	0,73	0,40	2,8
СНА	2,38	1,30	2,0
LPM	2,30	1,50	2,4
PAL	4,48	3,16	1,4
BDP	2,91	1,82	1,4

## 2.5.2.1 Pointe-aux-Outardes

Le nombre total d'évènements détectés sur la période 1980-2017 est de 160. Cela représente en moyenne un peu plus de quatre épisodes par an. Parmi ces évènements, 74 ont duré entre 12 et 24 h et 50 ont duré plus de 24 heures. Parmi ces évènements, 22 sont corrélés avec un niveau d'eau suffisamment important pour qu'un impact significatif puisse être observé à la côte, soit environ un évènement tous les deux ans.

Les tendances d'évolution du nombre de tempêtes sont données par les fonctions de distribution cumulative. Pour le site de Pointe-aux-Outardes, les CDF sont bien corrélés, c'est-à-dire que les tendances d'évolution sont à peu près similaires, quelle que soit la durée des tempêtes considérée. On observe une légère augmentation du nombre de tempêtes à partir de la fin des années 1990. En moyenne, une augmentation d'un peu plus de 2 % est enregistrée annuellement pour l'ensemble des évènements, +3 %/an pour les tempêtes d'une durée comprise entre 12 et 24 heures et +1,8 %/an pour les tempêtes de plus de 24 heures.



Figure 129 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Pointe-aux-Outardes. La série temporelle des hauteurs significatives de vagues au large est en gris, la valeur seuil  $H_{s,99\%}$  est indiquée par la ligne pointillée noire et celle correspondant à la valeur  $H_{s,95\%}$  par une ligne de points noirs. Chaque point rouge représente une tempête, sa taille correspond à sa durée. Les fonctions de distribution cumulative du nombre de tempêtes sont tracées en traits noir gras pointillé (toutes les tempêtes), gras pointillé bleu (durée comprise entre 12 et 24 heures) et en gras pointillé violet (durée supérieure à 24 heures). Les valeurs des CDF ont été normalisées pour une meilleure visualisation. Les valeurs de 100 % (atteintes à la fin de la période d'étude) correspondent à la valeur maximale en ordonnée.

## 2.5.2.2 Pointe-Lebel

Situé à l'est de la péninsule de Manicouagan, le site de Pointe-Lebel présente un forçage de vagues similaire à celui de Pointe-aux-Outardes. On observe 158 évènements sur la période 1980-2017; 70 ont duré entre 12 et 24 heures et 62 ont duré plus de 24 heures. Sur l'ensemble, 19 évènements ont coïncidé avec une marée de vive-eau.

Les tendances sont légèrement différentes de celles observées pour Pointe-aux-Outardes. Une augmentation moins importante, d'environ 1,5 % par an, du nombre de tempêtes est observée en moyenne pour la période 1980-2017 et celle-ci est de +3 %/an pour les tempêtes d'une durée comprise entre 12 et 24 heures. Le nombre de tempêtes ayant duré plus de 24 h a été stable.



Figure 130 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Pointe-Lebel. Pour la description complète de la figure, se référer à la figure 129.

#### 2.5.2.3 Maria

La plage de Maria, située en fond de baie, constitue un environnement protégé où le forçage des vagues est généralement faible. Néanmoins, c'est un site où des évènements particulièrement énergétiques peuvent avoir lieu. On observe en effet une grande différence entre la valeur moyenne des hauteurs de vagues et la valeur du 99<sup>e</sup> percentile, qui est 10 fois plus importante.

On observe 168 évènements sur la période 1980-2017, soit un peu plus de quatre épisodes par an; 76 ont duré entre 12 et 24 heures et 21 plus de 24 heures. On observe une brusque augmentation du nombre de tempêtes entre 2005 et 2010, où l'on a compté respectivement 13 et 9 épisodes énergétiques, soit 3 et 2 fois plus d'épisodes énergétiques que la moyenne. Néanmoins, sur la période 1980-2017, le nombre de tempêtes de moins de 24 h est resté particulièrement stable alors que celles dont la durée est supérieure à 24 h ont augmenté significativement (+2,1 %/an).



Figure 131 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Maria. Pour la description complète de la figure, se référer à la figure 129.

#### 2.5.2.4 Chandler

Le site de Chandler fait face au golfe du Saint-Laurent et est particulièrement exposé au forçage des vagues. Le nombre d'épisodes particulièrement énergétiques reste pour autant similaire à ce qui est observé sur les autres sites d'étude : au total 153 évènements se sont produits sur la période 1980-2017, dont 75 d'une durée comprise entre 12 et 24 h et 65 d'une durée supérieure à 24 h.

De même que pour Maria, un nombre particulièrement important de tempêtes est détecté pour les années 2005 et 2010. Les tendances d'évolution du climat de vagues pour le site de Chandler montrent une légère augmentation du nombre de tempêtes d'environ +1,5 %/an, et ce, sans différence de durée.



Figure 132 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Chandler. Pour la description complète de la figure, se référer à la figure 129.

# 2.5.2.5 Longue-Pointe-de-Mingan

Le nombre total d'évènements détectés sur la période 1980-2017 est de 166. Cela représente en moyenne un peu plus de quatre épisodes par an. Parmi ces évènements, 77 ont duré entre 12 et 24 h et 49 ont duré plus de 24 heures. Au total, 18 épisodes sont corrélés avec un niveau d'eau suffisamment important pour qu'un impact significatif puisse être observé à la côte, soit environ un évènement tous les deux ans.

Au niveau des tendances, on observe une légère augmentation des tempêtes d'une durée inférieure à 24 h (+1 %/an toutes durées confondues et +0,3 %/an pour des durées comprises entre 12 et 24 h). Les tempêtes dont la durée dépasse 24 h ont significativement augmenté (+2,5 %/an).



Figure 133 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan. Pour la description complète de la figure, se référer à la figure 129.

## 2.5.2.6 Pointe-aux-Loups

Le nombre total d'évènements détectés sur la période 1980-2017 est de 137. Cela représente en moyenne un peu moins de quatre épisodes par an. Parmi ces évènements, 55 ont duré entre 12 et 24 h et 65 ont duré plus de 24 heures. Il est important de souligner que pour ce site, les tempêtes sont particulièrement longues avec en moyenne une durée de 25 h, soit 2 cycles de marée.

Les tendances d'évolution montrent de légères augmentations du nombre d'évènements, plus importantes pour des durées faibles : +0,75 %/an pour toutes tempêtes, +0,6 %/an pour des durées entre 12 et 24 h et enfin seulement +0,3 %/an pour des évènements dont la durée dépasse 24 h.



Figure 134 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Pointe-aux-Loups. Pour la description complète de la figure, se référer à la figure 129.

#### 2.5.2.7 Baie-de-Plaisance

Le nombre total d'évènements détectés sur la période 1980-2017 est de 155. Cela représente en moyenne un peu moins de quatre épisodes par an. Parmi ces évènements, 72 ont duré entre 12 et 24 h et 30 ont duré plus de 24 heures. Au total, 12 coïncident avec une marée de vive-eau, soit en moyenne un évènement tous les trois ans.

Le nombre de tempêtes a été stable sur la période 1980-2017, sauf pour celles dont la durée dépasse 24 h, qui a baissé au cours des années 90 avant de repartir à la hausse à partir de 2005. Pour ces tempêtes, l'augmentation a été en moyenne d'un peu moins de 2 %/an. Lors de l'année 2010, une brusque augmentation du nombre de tempêtes, avec un nombre total de 11 évènements lors de cette seule année.



Figure 135 : Climatologie des évènements de tempête pour le site de Baie-de-Plaisance. Pour la description complète de la figure, se référer à la figure 129.
# 2.5.3 Climatologie des tempêtes pour la période 2041-2100

La même analyse a été réalisée pour la période 2041-2100 afin d'anticiper les évolutions futures du climat de vagues et de quantifier les tendances associées. Lors de la phase II du projet MoDESCo (Bernatchez et al., 2017, Rapport final, MoDESCo Phase II), les états de mers futurs (i.e. 2041-2100) pour l'ensemble de l'EGSL ont été simulés. Pour obtenir ces données, le modèle de vague WaveWatch III a été forcé avec des vents du modèle climatique globale CanESM2 (simulation 3.3.3.1 du MRCC5 (Modèle Régional Climatique Canadien, simulation *BBHI*)). Dans ce modèle, la prévision la plus pessimiste à l'époque quant au réchauffement climatique avait été prise en compte (scénario RCP 8.5 du GIEC, *IPCC 5<sup>ème</sup> Rapport*, 2007). Ces simulations ont été effectuées par le consortium OURANOS. Par ailleurs, le modèle océanique utilisé est le modèle MOR couplé au modèle de glace le plus performant à l'époque, CICE5 (5<sup>ème</sup> génération du simulateur de glace CICE).

Pour cette période, le nombre d'évènements durant lesquels la hauteur des vagues dépassera le 99<sup>e</sup> percentile de 1980-2010 est beaucoup plus important. En effet, le nombre de tempêtes annuelles sera généralement supérieur à ce qui a été observé entre 1980 et 2017. En plus de cette augmentation du nombre d'évènements, une intensification du forçage des vagues est nettement visible, avec une valeur du 99<sup>e</sup> percentile 30 % plus importante en moyenne par rapport à celle de la période 1980-2010 et pouvant être plus que doublée pour certains sites (+60 % pour la péninsule de Manicouagan). Ces observations sont particulièrement vraies pour les sites d'étude localisés dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Pointe-aux-Outardes, Pointe-Lebel), mais aussi pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan.

Les évolutions du climat de vagues pour l'estuaire et le golfe sont bien expliquées par la diminution importante de la couverture de glace en hiver. Cet aspect est détaillé dans la section 2.5.4.



Figure 136 : Évolution du nombre d'évènements au cours de la période 1980-2100. Les tempêtes dont la durée est comprise entre 12 et 24 h ainsi que celles dont la durée dépasse 24 h sont différenciées. Les traits pointillés représentent la tendance d'évolution (régression linéaire pour l'ensemble des données).

Une illustration de l'augmentation de la fréquence des tempêtes est présentée à la figure 136. En effet, pour le site de Pointe-aux-Outardes pris ici comme exemple, le nombre d'épisodes énergétiques annuels pour la période 2041-2100 est d'un peu moins de 20. Cela représente cinq fois plus d'évènements par an, en moyenne, par rapport à la période 1980-2017, qui était de quatre par an. Cette observation est faite sur l'ensemble des sites, à un degré plus ou moins important (*e.g.* sur les sites des Îles-de-la-Madeleine, où l'augmentation reste faible).

Tableau 35 : Comparaison de la climatologie des tempêtes pour les périodes passée (1980-2017) et future (2041-2100). Les tendances annuelles du nombre de tempêtes calculées pour la période 1980-2017 sont aussi indiquées.

Site d'étude	Nombre d'évènements [1980-2017]	Nombre d'évènements [2041-2100]	Tendance annuelle (évènement/an) [1980-2017]
Pointe-aux-Outardes	4,3	18,8	+2,35 %
Pointe-Lebel	4,3	15,6	+1,65 %
Maria	4,5	6,0	+0,35 %
Chandler	4,1	7,6	+1,50 %
Longue-Pointe-de-Mingan	4,5	8,1	+1,00 %
Pointe-aux-Loups	3,7	4,4	+0,75 %
Baie-de-Plaisance	4,2	5,9	+0,10 %

# 2.5.4 Évolution de la couverture des glaces

Afin d'expliquer la variabilité du climat de vagues au cours de la période 1980-2100, l'évolution de la couverture des glaces dans l'EGSL a été examinée. Les couvertures de glace ont été extraites des données de sortie du modèle WaveWatch III pour l'ensemble de l'EGSL (sur une grille 10 x 10 km). Les moyennes mensuelles ont ensuite été calculées pour l'ensemble des années modélisées. La moyenne pour la période 1980-2010 est utilisée comme référence (figure 137) afin de tracer les anomalies de la couverture de glace pour les années 2000 et 2100. En décembre, la couverture de glace n'est pas encore formée. La fraction de glace sur chaque point ne dépasse pas 25 %, sauf à la côte et dans des zones particulièrement bien protégées. La couverture de glace culmine en février, où elle atteint en moyenne 40 %. Elle diminue fortement en mars avant de devenir négligeable à partir du mois d'avril. La distribution des moyennes hivernales pour la période 1980-2010 est utilisée comme référence et a été comparée à celle observée pour les années 2000 et 2100 (figure 138 et figure 139).



Figure 137 : Distribution mensuelle de la couverture de glace hivernale moyenne pour la période 1980-2010. La position des sites d'étude MoDESCo est indiquée par une étoile jaune.



Figure 138 : Distribution des anomalies mensuelles de la couverture de glace hivernale pour l'année 2000. La position des sites d'étude MoDESCo est indiquée par une étoile jaune.



Figure 139 : Distribution des anomalies mensuelles de la couverture de glace hivernale pour l'année 2100. La position des sites d'étude MoDESCo est indiquée par une étoile jaune.

De fortes anomalies négatives sont observées pour l'année 2100. Celles-ci atteignent 100 % en plusieurs endroits de l'estuaire et du golfe, ce qui indique une complète disparition de la couverture de glace hivernale. Les tendances d'évolution de la couverture de glace hivernale ont été calculées pour l'ensemble des sites d'étude (tableau 36). De façon générale, la couverture de glace diminue nettement à partir des années 2000 pour devenir négligeable à partir de l'année 2070.

Les travaux de Ruest *et coll*. (2016) amènent à des observations similaires. Dans cette étude, la diminution progressive de la couverture de glace hivernale entraine une diminution de l'atténuation de l'énergie des vagues, jusqu'à ce que celle-ci devienne négligeable à l'horizon 2100.

Cette diminution de couverture de glace hivernale est directement corrélée avec l'augmentation du nombre de tempêtes observée sur les différents sites d'étude ( $\overline{\rho^2} = 0,52$ ). La corrélation est d'autant plus importante pour les sites dominés par le forçage des vagues (avec un marnage relatif RTR < 3, cf. section 2.7).



Figure 140 : Évolution des moyennes hivernales de la couverture de glace pour le site de Pointe-aux-Outardes sur la période 1980-2100. Les droites pointillées représentent la tendance (régression linéaire) pour les périodes 1980-2017 (en bleu), 2041-2100 (en rouge) et pour l'ensemble des données (en noir).

Site d'étude	Anomalie (%) 2000	Anomalie (%) 2100	Tendance annuelle [1980-2100]	
Pointe-aux-Outardes	-0,3	-47,4	-1,3 %	
Pointe-Lebel	-2,0	-35,8	-1,0 %	
Maria	-10,6	-14,8	-0,6 %	
Chandler	-1,1	-20,1	-0,5 %	
Longue-Pointe-de-Mingan	1,5	-24,5	-0,7 %	
Pointe-aux-Loups	-4,4	-45,6	-0,9 %	
Baie-de-Plaisance	-6,4	-46,1	-1,2 %	

#### Tableau 36 : Évolution de la couverture de glace hivernale pour les différents sites d'études

#### 2.5.5 Synthèse

Les séries temporelles de hauteur de vague ainsi que les couvertures de glaces hivernales modélisées par le modèle WaveWatch III ont été analysées afin de connaitre les évolutions futures possibles du climat de vague de l'EGSL. Une méthode de détection des évènements énergétiques (i.e. épisodes de tempête) a été mise en place pour analyser ces séries. Il apparait qu'en moyenne, un peu plus de quatre tempêtes par an sont observées sur chacun des sites. Selon les mêmes critères, à partir de 2041, ce seront presque dix évènements qui seront observés annuellement, avec des quantités d'énergie transportée par les vagues plus importantes. Cette intensification des tempêtes et de leur occurrence est liée à un changement du climat de vagues, lui-même dû à une diminution de l'atténuation de l'énergie des vagues en hiver par la couverture de glace moins importante. En effet, en moyenne une perte annuelle de 0,7 % de la couverture de glace hivernale est observée sur les sites d'étude. En plus de cette perte d'atténuation, une longueur de fetch plus grande est à prévoir, ce qui accentuera la quantité d'énergie transmise à l'interface air-mer par le vent. À noter que le modèle ne prend en compte ni la surélévation du plan d'eau par la pression, le vent ou les vagues, ni l'augmentation du niveau marin due à la modification du climat. Une fois ces facteurs pris en compte, il est fort possible que le forçage des vagues devienne encore plus important, du fait d'une dissipation plus faible de l'énergie par frottement avec le fond. Il est cependant important de remarquer que les simulations des états de mer par le modèle WaveWatch III est moins réaliste lorsque la couverture de glace devient trop importante (cf. section 2.4.6). Le modèle sous-estime en effet les hauteurs de vague lorsque de la glace est présente. Les tempêtes apparaissent principalement en hiver, ainsi, le modèle peut sous-estimer le nombre d'évènements observés lors de ces périodes. Or pour les simulations du climat futur, la baisse progressive de la couverture de glace rend le modèle plus réaliste quant à l'occurrence observée du nombre de tempêtes. La méthode de détection a été appliquée aux séries temporelles des vagues mesurées avec les AWACs. Statistiquement on obtient le même résultat que pour WaveWatch III pour la période 1980-2010 : on observe en moyenne de 2 à 6 tempêtes par an selon les sites, mais réalisé sur des séries plus courtes (i.e. de 2 à 3 ans).

# 2.6 Suivi saisonnier de la morphologie de la côte

Le suivi morphologique de la zone instrumentée est effectué à partir de la plateforme SMLT (Système mobile de Lidar terrestre) de la Chaire de recherche en géoscience côtière (Van Wierts *et coll.,* 2017) et de profils DGPS pour le domaine émergé et la zone intertidale.

#### 2.6.1 Plateforme SMLT

Une nouvelle plateforme a été développée dans le cadre des travaux de la Chaire de recherche en géoscience côtière pour réaliser des levés terrestres à l'aide d'un véhicule tout-terrain. Ce système mobile de Lidar terrestre (SMLT) est constitué de trois composantes principales : un balayeur laser, un système de navigation inertiel GPS-INS (composé d'un IMU et d'un récepteur GPS) et une caméra.

Il permet de produire des nuages de points à une résolution spatiale de quelques cm avec une précision inférieure à 5 cm, ce qui permet de produire des modèles numériques d'élévation à très haute résolution. Cette adaptation permet de réduire les coûts des relevés comparativement aux relevés aériens, ce qui permet de faire des levés répétitifs d'un même secteur. Le déploiement du SMLT de manière pluriannuelle dans des zones névralgiques et à la suite de tempêtes permet de mesurer de manière précise leur impact réel sur différents types de systèmes côtiers et d'assurer un suivi des zones soumises aux aléas côtiers. Ces relevés permettent aussi de déterminer le temps mis par le système côtier pour retrouver éventuellement son état pré-tempête et/ou de déterminer les changements irréversibles et les effets post-tempêtes. Ces cartes spatiotemporelles en 3D permettent de calculer des variations volumétriques afin d'établir le bilan sédimentaire de la zone côtière. L'utilisation du SMLT pour le relevé de profils de plages avant, pendant et après la saison glacielle permet aussi d'évaluer le rôle morphosédimentologique des glaces. Ces levés avec le Lidar sont essentiels pour la cartographie des zones de contraintes relatives à la submersion côtière.



Figure 141 : Photographie de la plateforme SMLT du laboratoire

Tableau 37 : Période des levés Lidar mobile terrestre par site d'étude

Dates des levés réalisés	
Longue-Pointe-de-Mingan	Pointe-Lebel
<ul> <li>5 mai 2016</li> <li>5 juin 2016</li> <li>16 septembre 2016</li> <li>15-17 novembre 2016</li> <li>15 décembre 2016</li> </ul>	<ul> <li>7 juin 2016</li> <li>3 août 2016</li> <li>19 novembre 2016</li> <li>27 mai 2017</li> </ul>
<ul> <li>- 15 decembre 2016</li> <li>- 25 mai 2017</li> <li>- 23 juin 2017</li> <li>- 23 juillet 2017</li> </ul>	<ul> <li>27 juin 2017</li> <li>26 juillet 2017</li> <li>22 septembre 2017</li> <li>7 novembre 2017</li> </ul>
<ul> <li>20 septembre 2017</li> <li>4-5 novembre 2017</li> <li>4 décembre 2017</li> </ul>	<ul> <li>27 juillet 2018</li> <li>12 septembre 2018</li> <li>20 payembre 2010</li> </ul>
- 16 mai 2018 - 13 juillet 2018 - 8 septembre 2018	- 29 hovembre 2019 Maria - 31 août 2016
<ul> <li>5 mai 2019</li> <li>31 août 2019</li> <li>28 octobre 2019</li> <li>27 novembre 2019</li> </ul>	Chandler - Pas de levé effectué Pointe-aux-Loups
Pointe-aux-Outardes	- 13 août 2018
- 8 juin 2016	Baie-de-Plaisance
- 4 août 2016	- 12-17 août 2018
- 13 septembre 2018	

### 2.6.2 Levés DGPS

Le DGPS (Differential Global Positioning System), ou GPS différentiel, utilise un réseau de stations fixes de référence qui transmet l'écart entre les positions indiquées par les satellites et leurs positions réelles connues, permettant ainsi d'obtenir une position horizontale et verticale avec une précision souvent inférieure à 2 cm. Le DGPS est utilisé en mode RTK (*Real Time Kinematic*) qui produit un positionnement cinématique en temps réel avec une base positionnée à proximité de la zone des levés. Les levés DGPS, réalisés à pied, permettent ensuite par interpolation des données de générer des profils de plage et/ou des modèles numériques de terrain.

Le suivi au DGPS des paramètres morphologiques de la zone intertidale et prélittorale peu profonde (position du pied de la terrasse de plage ou falaise, position de la ligne de rivage et de la flexure, extension maximale du *runup*, position des barres sableuses) a aussi été réalisé sous diverses conditions météo marines. 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.

La fréquence des relevés DGPS est différente selon les secteurs d'étude. Ils se font cependant de manière saisonnière, ou à une fréquence plus élevée selon les projets en cours au sein de la Chaire de recherche et les secteurs d'intérêt à l'étude.





# 2.6.3 Caméras vidéo

L'ensemble des sites d'études de MoDESCo est équipé d'un système de suivi optique, soit par un appareil Reconyx, soit par une caméra de surveillance de type Axis.

Les caméras de suivi permettent de quantifier la dynamique des aléas côtiers, d'identifier des processus, de comprendre la réponse des systèmes côtiers aux processus d'érosion et de submersion, de caractériser les conditions environnementales lorsque des évènements d'érosion et de submersion se produisent ainsi que de modéliser le couvert de glace à la côte. Les caméras utilisées sont de marque Reconyx (modèle PC800, HC500, PC85 et XP9) et SpyPoint (Live 3G). Nous favorisons l'utilisation des caméras de marque Reconyx puisqu'elles s'avèrent très fiables et robustes.

Les caméras sont configurées pour prendre des photos toutes les 15 minutes, ce qui permet d'obtenir une bonne couverture temporelle des différents processus côtiers. L'analyse des images se fait grâce au logiciel à licence libre *VirtualDub*, qui permet de faire des vidéos accélérées à partir des images enregistrées. Un inventaire exhaustif des systèmes de vidéo mis en place au sein du LDGIZC est disponible dans le rapport de suivi environnemental des côtes du Québec maritime (2019-2022) (Dubuc *et coll.,* 2020).

Les systèmes de vidéo 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 (branchée dans un ordinateur via un port réseau et un fil de type RJ45), ce qui permet une acquisition directe sur un disque dur. La fréquence d'échantillonnage est de 4 images/sec (4 Hz), soit la même que celle des capteurs de pression avec une résolution de 2592 x 1944 (5 mégapixels). Le traitement des images permet ensuite, à l'aide d'algorithmes, d'obtenir en continu le niveau du jet de rive (figure 143). Cette approche a permis de développer et de valider des modèles de *runup* servant à la submersion et l'érosion côtières (*e.g.* Didier *et coll.*, 2020).



Figure 143 : Exemple de suivi vidéo pour la détection du jet de rive sur un cycle de marée. La ligne de rivage instantanée (ligne en bleue) est détectée automatiquement sur les images enregistrées par la caméra, ce qui permet d'étudier la variabilité des niveaux d'eau en fonction des facteurs environnementaux du site.

Cette méthode a notamment été utilisée afin de mener une étude sur la variabilité des niveaux d'eau côtiers (*i.e.* du jet de rive et de la surélévation du niveau moyen due aux vagues déferlantes) dans l'EGSL. Des formulations empiriques permettant de calculer les niveaux d'eau ont été définies et validées sur différents sites d'étude (Isle-aux-Coudres, Pointe-Lebel, Maria, Cap-des-Rosiers et Longue-Pointe-de-Mingan). Ces formulations empiriques sont particulièrement adaptées aux conditions environnementales observées sur le littoral québécois et permettent d'estimer plus efficacement les niveaux d'eau côtiers dans cet environnement que celles utilisées usuellement (*e.g.* Holman, 1986; Stockdon *et coll.*, 2006; Atkinson *et coll.*, 2017). Cette étude a fait l'objet d'une publication scientifique internationale avec comité de lecture dans le journal *Continental Shelf Research*, sous le titre « Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system » (DOI: 10.1016/j.csr.2019.104024).

### 2.6.4 Lidar bathymétrique

Des données de Lidar bathymétriques du Service hydrographique du Canada (SHC) ont été livrées au laboratoire en février 2020. Ces données couvrent une partie de la Côte-Nord. Des données supplémentaires couvrant les autres sites du projet devraient être livrées au cours de cette année (automne 2020).

### 2.6.5 Bathymétrie multifaisceaux

Les échosondeurs multifaisceaux permettent d'imager la surface du fond marin en utilisant les propriétés de la propagation du son dans l'eau. Une série de transducteurs envoient vers le fond un faisceau d'ondes acoustiques, dont la géométrie en éventail couvre une large bande perpendiculairement à la direction d'avancée du navire. Les échos sur le fond marin sont captés également par des transducteurs et traités par un système d'acquisition afin de reconstruire la géométrie du fond.



Figure 144 : Illustration d'une acquisition par échosondeurs multifaisceaux. La géométrie en éventail de l'ensemble des faisceaux permet de couvrir une étendue dont la surface dépend de l'épaisseur de la tranche d'eau. Tirée de Makowski et Finkl (2016)

Les levés bathymétriques multifaisceaux des sites de Chandler (Gaspésie) et Longue-Pointe-de-Mingan (Côte-Nord) ont été acquis durant l'été 2018 à bord du Louis-Edmond-Hamelin, navire de recherche du Centre d'études nordiques. Le système d'acquisition est composé d'un sonar multifaisceaux (EM 2040C de Kongsberg), d'une centrale inertielle (système Seapath 330+ de Kongsberg), d'une station de base GNSS (Trimble R10) et d'un profileur de vitesse du son dans l'eau (Base-X de AML Oceanographic). Ce dernier permet de tenir compte des apports d'eau douce à l'embouchure des rivières et de corriger la vitesse de propagation du son utilisée dans le calcul de la profondeur. Les données des différents capteurs sont intégrées en temps réel lors des levés avec le logiciel *SIS* de Kongsberg (Makowski *et coll.,* 2016).

Les données bathymétriques ont été ajustées verticalement au zéro des cartes marines à l'aide du modèle *Estuaire 2012* fourni par le Service hydrographique du Canada. Les levés et le traitement des données, effectué avec le logiciel *HIPS and SIPS* 10.4 de *TeledyneCARIS*, ont été réalisés par le Laboratoire de géosciences marines de l'Université Laval.

Les surfaces sondées ont été prévues pour être comprises dans la zone bathymétrique entre 5 et 20 mètres par rapport au zéro des cartes marines. Toutefois, les profondeurs obtenues au final peuvent varier en fonction des conditions de navigation et du niveau d'eau lors des opérations.

Pour plus de détails sur les caractéristiques techniques du navire, du système d'acquisition, des conditions de levés et des étapes de traitement, le lecteur est invité à consulter le rapport méthodologique produit pour le levé de Chandler (Labarre, Bernier et Lajeunesse, 2019).

Les cartes qui suivent ont été réalisées avec le logiciel *QGIS* à partir des données raster (format .tif) traitées par le Laboratoire de géosciences marines de l'Université Laval et fournies par le ministère de la Sécurité publique. Les données sont projetées dans le système NAD 83 (CSRS)/MTM Zone 5.

Afin de mieux visualiser les variations de ces surfaces bathymétriques peu accidentées et globalement continues, les isobathes ont été extraites à l'aide de l'outil « contour » du logiciel *QGIS*. Le pas d'extraction est de 2 m pour le secteur de Chandler et de 5 m pour Longue-Pointe-de-Mingan. Ces choix sont basés sur le seul critère de lisibilité des cartes.



Figure 145 : Exemple de carte obtenue avec les données du sonar multifaisceaux pour le secteur de Longue-Pointede-Mingan



Figure 146 : Exemple de carte obtenue avec les données du sonar multifaisceaux pour le secteur de Chandler

# 2.7 Quantification des paramètres morphodynamiques sur les sites témoins

#### Synthèse

 Les paramètres morpho-dynamiques usuels (annexe 6.1, Tableau 50) ont été calculés à partir des données obtenues lors des différentes campagnes de mesure (AWAC, RBR, DGPS, etc.) ; les dynamiques des sites ont ainsi pu être caractérisées.

Dans cette partie, les différents sites d'étude du projet sont décrits au regard des paramètres morphodynamiques calculés grâce aux relevés topographiques (profils de plage), granulométriques et hydrodynamiques (RBR, AWAC). Les paramètres morphodynamiques usuels (cf. annexe 6.1, tableau 50) ont été calculés à partir des données moyennes des variables hydrodynamiques, de pente locale en bas et haut d'estran, quand la donnée était disponible, et à partir des données de diamètre médian (d50) lorsque des relevés granulométriques ont été réalisés.

### 2.7.1 Sites de la péninsule de Manicouagan

Les sites de Pointe-aux-Outardes et de Pointe-Lebel sont caractérisés par de larges estrans de sédiments fins, de pente faible ( $\bar{\beta} = 0,002$ ) et par un haut estran plus réflectif ( $\bar{\beta} = 0,06, \bar{\beta} = 0,08$  pour Pointe-aux-Outardes et Pointe-Lebel respectivement), surmontés par une microfalaise meuble très réflective ( $\bar{\beta} = 0,16$ ) (figure 147 et figure 148). Les sédiments sur la zone active de la plage (ce qui correspond généralement à la section comprise entre le niveau moyen, noté NM, et le niveau des pleines mers supérieures, noté PMS) sont caractérisés par un diamètre médian (d50) de 0,25 mm. La zone active de la plage est particulièrement dynamique comparée aux autres sections du profil de plage. En bas estran, une forte variabilité peut être observée localement à Pointe-aux-Outardes (figure 148b), ce qui atteste de la présence de barres sableuses.

En ce qui concerne l'hydrodynamique, la péninsule de Manicouagan est soumise à un régime de marée semi-diurne à inégalité diurne mésotidal/macrotidal (le marnage des pleines mers supérieures est de 4,4 m). Les conditions sont assez énergétiques avec des hauteurs significatives moyennes au large (~50 m de profondeur) qui atteignent 0,60 m. Le 99<sup>e</sup> percentile des hauteurs significatives est de 1,8 m, calculé sur une série de 30 ans de données modélisées (1980-2010).

Le marnage relatif (RTR) est de 6,4 et la vitesse de chute adimensionelle ( $\Omega$ ) est de 0,79. On a donc un site particulièrement réflectif où s'exerce une dominance intermédiaire entre le forçage de marée et des vagues. D'après la classification de Masselink et Short (1993), les sites de Pointe-Lebel et de Pointe-aux-Outardes peuvent être caractérisés comme étant des plages avec terrasse de basse mer et avec la présence de courants sagittaux et de barres sableuses, ce qui est en accord avec les observations terrain.



Figure 147 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Pointe-aux-Outardes. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) Écart-type ( $\sigma$ ) des profils de plage



Figure 148 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Pointe-Lebel. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) Écart-type (σ) des profils de plage

#### 2.7.2 Site de Maria

La plage de Maria est située au fond de la baie des Chaleurs. La partie est de la plage est délimitée par la rivière Verte, dont le delta forme un marais maritime. Le site de Maria est particulièrement anthropomorphisé, avec une alternance de zones où l'arrière-plage est délimitée par des murs de béton ou bien de bois (figure 149a) et des sections dont l'arrière-plage naturelle est faite de débris ligneux abondants (figure 149b) et d'une microfalaise en érosion de quelques dizaines de centimètres (figure 149c).



Figure 149 : Photographies du site de Maria; a) secteur est b) secteur ouest c) détail de la microfalaise présente sur le secteur ouest

Le haut estran est constitué d'un mélange de sédiments grossiers et de galets. En surface, le diamètre médian des sédiments est de 14,7 mm. Cette section de plage est réflective, avec une pente moyenne de 0,11 et est relativement courte (app. quelques dizaines de mètres). Le bas estran est composé de sédiments plus fins (d50 = 6,6 mm) et possède une pente faible de 0,01. Les deux sections de plage sont délimitées par une flexure bien marquée (figure 150). Le site est sous l'influence d'une marée semi-diurne à inégalité diurne mésotidale (marnage moyen des pleines mers supérieures de 2,8 m). Du fait de l'environnement bien protégé du site, en fond de baie, le régime des vagues est assez faible avec une hauteur significative moyenne annuelle de 0,10 m. La valeur du marnage relatif pour ce site est de 14. La plage est caractérisée par une vitesse de chute adimensionnelle de 0,025. Le site est classifié comme étant une plage réflective avec terrasse de basse mer (Masselink et Short, 1993).



Figure 150 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Maria. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) Écart-type ( $\sigma$ ) des profils de plage

### 2.7.3 Site de Chandler

Le site de Chandler est localisé sur le littoral est de la Gaspésie et est exposé au forçage des vagues provenant du golfe du Saint-Laurent. Celui-ci est relativement important comparativement au forçage de marée (RTR = 2,8).

Le profil de plage relevé au DGPS est relativement court et une forte variabilité du profil de plage est observée (figure 151b). La pente moyenne dans la zone active de la plage est de 0,10.



Figure 151 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Chandler. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) Écart-type (σ) des profils de plage

### 2.7.4 Site de Longue-Pointe-de-Mingan

Le secteur de Longue-Pointe-de-Mingan est caractéristique des estrans étroits et meubles avec des cordons sableux de bas estran et prélittoraux, typiques du littoral du golfe du Saint-Laurent (figure 152).



Figure 152 : Photographie de l'estran de Longue-Pointe-de-Mingan prise lors des relevés du profil de plage.

Ce secteur présente un régime micro à mésotidal. Il s'agit aussi d'un secteur fort dynamique, avec un transit sédimentaire très important ainsi qu'une forte variabilité saisonnière et annuelle. Ce secteur a déjà connu dans le passé des évènements de submersion lors de tempêtes, notamment au niveau de la municipalité. La route 138 est aussi menacée par le recul du littoral sableux.

Le site est sous l'action dominante des vagues (RTR = 2,3) et présente une section active de plage réflective ( $\Omega$  = 0,67), mais une section plus dissipative en bas de plage. La variabilité des profils est importante, comme on peut le voir sur la figure 153b. Le paramètre de Sunamara (Sunamara, 1988; Short et Aagaard, 1993) est de 5,6. La plage peut être classifiée comme étant une plage réflective avec présence de barres sableuses.



Figure 153 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) Écart-type ( $\sigma$ ) des profils de plage

# 2.7.5 Sites des Îles-de-la-Madeleine

Les sites témoins des Îles-de-la-Madeleine sont les secteurs de Pointe-aux-Loups, exposé au nord-ouest, et celui de la Baie-de-Plaisance, exposé à l'est. Sur ces deux secteurs, la route 199 borde l'arrière-plage et peut être endommagée par les aléas côtiers lors des épisodes extrêmes (figure 154). Situées au centre du golfe du Saint-Laurent, les îles font face aux ondes de tempêtes océaniques. Elles sont, de ce fait, situées dans un environnement particulièrement énergétique.



Figure 154 : Aperçu des secteurs d'étude des Îles-de-la-Madeleine. À gauche, le secteur de Pointe-aux-Loups et à droite, les secteurs nord et sud de la Baie-de-Plaisance

### 2.7.5.1 Baie-de-Plaisance

Le secteur de Baie-de-Plaisance est suivi en deux zones distinctes : à l'extrémité nord de la baie et au sud. Le secteur du nord est anthropomorphisé avec la présence d'un enrochement sur près d'un kilomètre (figure 155a) protégeant la route 199. Des recharges sédimentaires épisodiques ont aussi été réalisées à l'extrémité sud de l'enrochement. Le secteur du centre est naturel, avec la présence de talus dunaires végétalisés sur l'arrière-plage (figure 155b) et de brèches ouvertes sur l'étang de la Martinique.

Le secteur nord montre un profil avec un haut estran réflectif ( $\bar{\beta} = 0,12$ ) et une petite terrasse dissipative ( $\bar{\beta} = 0,02$ ; figure 156a). Le secteur sud présente un profil de faible pente subhorizontale ( $\bar{\beta} = 0,007$ ; figure 156c), délimité à l'arrière-plage par une zone humide ouverte sur l'étang de la Martinique. La Baie-de-Plaisance est soumise à un régime de marée microtidal (marnage = 1,1 m), alors que le climat de vagues dans la baie est particulièrement énergétique ( $\bar{Hs} = 0,7 \text{ m}$ ;  $Hs_{99\%} = 2,9 \text{ m}$ ).

Le site est ainsi fortement dominé par les vagues (RTR = 1,2). Le secteur nord, du fait de son caractère réflectif, peut être classifié comme étant une plage réflective sans terrasse de basse mer avec présence de croissants de plage importants en haut de plage et de courants sagittaux intenses. Le secteur sud est une plage dissipative avec présence de barres sableuses actives en bas estran.



Figure 155 : Photographies des deux secteurs suivis sur le site de Baie-de-Plaisance; a) secteur anthropomorphisé avec une arrière-plage délimitée par un enrochement et des recharges sédimentaires et b) secteur naturel



Figure 156 : a) et c) Profils de plage mesurés au DGPS sur les deux secteurs de la Baie-de-Plaisance. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) et d) Écart-type ( $\sigma$ ) des profils de plage

### 2.7.5.2 Pointe-aux-Loups

Le site d'étude de Pointe-aux-Loups est exposé au forçage des vagues venant du nord-ouest. L'environnement du site est énergétique avec une moyenne annuelle des hauteurs significatives de l'ordre de 1,2 m, ce qui est relativement important.



Figure 157 : a) Vue aérienne du site de Pointe-aux-Loups et b) profil de plage du site de Pointe-aux-Loups avec en arrière-plage des dunes sédimentaires végétalisées

La période des vagues est aussi plus longue que celle mesurée sur les autres sites du projet. Le site est délimité à l'arrière-plage par des talus dunaires végétalisés importants (figure 157b). Le site est fortement dominé par les vagues (RTR = 0,75) et est caractérisé par un profil de pente forte ( $\bar{\beta}$  = 0,25 sur le haut estran et 0,03 sur le bas estran; figure 158).

Le site peut être caractérisé comme une plage réflective ( $\Omega = 0,88$ ) sans terrasse de basse mer avec la présence de barres sableuses actives.



Figure 158 : a) Profils de plage mesurés au DGPS sur le site de Pointe-aux-Loups. Les profils ponctuels sont en gris clair et le profil moyen en noir. Le niveau des pleines mers supérieures (PMS) est indiqué par une ligne horizontale bleu marine, le niveau moyen (NM) en bleu turquoise et le zéro des cartes (ZC), ou zéro hydrographique, par une ligne pointillée noire. b) Écart-type ( $\sigma$ ) des profils de plage

# 2.7.6 Évolutions de l'état morphodynamique du littoral

Les caractéristiques morphodynamiques du littoral de l'EGSL sont le résultat d'un équilibre entre les forçages météo marins et les particularités morphologiques du littoral (*e.g.* de la nature du substrat). Or, dans le contexte de modification du climat, les forçages météo marins sont amenés eux aussi à évoluer.

Dans l'EGSL, le changement principal sera la modification de la couverture de glace hivernale. En effet, celle-ci sera de moins en moins importante au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Son impact sur le climat de vagues en hiver est important; sa disparition donnera lieu à un climat de vagues différent, plus énergétique en hiver (cf. section 2.5.4).

La montée des eaux pourrait jouer un rôle sur ce climat de vagues (par le biais d'une modification des interactions vagues-topobathymétrie), mais aussi sur le régime de marée. En effet, bien qu'au premier ordre ce forçage n'est dû qu'aux interactions gravitationnelles astronomiques, la propagation de l'onde de marée dans les environnements de faibles profondeurs pourrait être modifiée par des effets de résonnance dans une baie, par exemple. Par hypothèse, dans l'EGSL, la modification du climat de vagues par la disparition des glaces hivernales sera la source la plus importante, à l'avenir, des changements possibles sur le forçage hydrodynamique.

La distribution spatiale du marnage relatif dans l'EGSL a été examinée à différentes dates (1980, 2000, 2050 et 2100; figure 159) afin d'évaluer l'évolution possible des états morphodynamiques du littoral dans le contexte d'un changement de climat de vagues. L'anomalie des valeurs de marnage relatif a été calculée par rapport à la moyenne du marnage relatif sur la période 1980-2010 (figure 160).

Ces projections montrent que la modification du climat de vagues, avec une augmentation de l'énergie en hiver, induit une baisse significative du marnage relatif. Cette baisse sera sensible notamment à la côte. Dans le golfe, caractérisé par un régime de marée microtidal, le climat de vagues domine déjà la dynamique. Cette diminution du RTR est particulièrement visible dans les zones dites à *fetch* limité (*e.g.* baie des Chaleurs, fond de l'estuaire, détroit de Northumberland).

Les sites de Maria, Pointe-aux-Outardes et Pointe-Lebel seront particulièrement sensibles à ces modifications avec, à l'avenir, un régime de plus en plus dominé par les vagues. Si aucune modification du substrat sédimentaire n'est considérée, ces sites seront caractérisés par un état morphodynamique de plus en plus réflectif, une disparition progressive des terrasses de basse mer dissipatives et un raccourcissement progressif de la largeur de plage.



Figure 159 : Distribution spatiale pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent du marnage relatif moyen calculé sur la période 1980-2010



Figure 160 : Distribution spatiale pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent des anomalies du marnage relatif constatées par rapport à la moyenne calculée entre 1980 et 2010 pour les années 1980, 2000, 2050 et 2100. Plus l'anomalie observée est négative (positive) plus la dynamique est dominée par les vagues (la marée).

# 3 Valider la capacité de modèles numériques à reproduire les vitesses de recul du passé pour s'assurer de bien modéliser les zones exposées à l'érosion et à la submersion pour le futur

#### Synthèse

- Le modèle numérique XBeach (Roelvink *et coll.*, 2009) est utilisé sur les différents sites de MoDESco afin d'étudier la dynamique de l'érosion lors d'évènements énergétiques. La capacité du modèle à reproduire les phases d'érosion passées est évaluée et validée.
- Dans un premier temps, les conditions hydrodynamiques modélisées par le modèle sont comparées avec des données *in situ* et validées. Une validation de plusieurs variables hydrodynamiques sur une période plus longues (14 jours) est ensuite réalisée pour chaque site.
- Une calibration morphodynamique de plusieurs paramètres interne au modèle est ensuite réalisée sur chacun des sites de MoDESco afin d'obtenir un modèle efficace pouvant reproduire le recul du trait de côte et l'intensité des phases d'érosion selon les caractéristiques du site choisi.
- Une méthode exploratoire est proposée pour modéliser sur le long terme (plusieurs mois) l'impact d'évènements énergétiques successifs (passés ou futurs) sur le site de Pointe-Lebel.

### 3.1 Modélisation numérique multi-échelle du littoral

Afin de reproduire les évolutions hydrodynamiques et morphologiques associées aux forçages de nos sites d'études, le modèle numérique XBeach a été utilisé. C'est un modèle sous licence libre, développé par l'ONU par l'entremise de l'UNESCO-IHE, du centre de recherche Deltares, de l'Université Technologique de Delft, de l'Université de Miami et du US Army Corps of Engineers.

Dans ce modèle, la dynamique est principalement gouvernée par l'équation de l'action des vagues. Différents modules sont dédiés à la résolution de chacune des parties de l'équation d'action :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma}$$

Où

- $x, y, \theta$  et t sont les variables d'espace et de temps;
- $D_w$  est le terme dissipatif lié aux vagues;
- D<sub>f</sub> est celui lié à la dissipation par le fond;
- $D_v$  est celui lié à la dissipation par la présence de végétation;
- $c_{x,y,t,\theta}$  est la vitesse de propagation de l'action des vagues;
- Et enfin  $\sigma$  est la pulsation.

Ainsi, l'action des vagues A est définie comme :

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}$$

Où  $S_w(x, y, t, \theta)$  correspond à la distribution de densité d'énergie.

À partir de cette équation, l'ensemble des variables liées à la propagation des vagues et des courants sont calculées. Le modèle permet alors de résoudre les transports sédimentaires associés et de modifier la topographie locale à chaque incrémentation en temps dans le modèle. Le modèle peut être utilisé selon trois modes : stationnaire, instationnaire hydrostatique (*surf-beat* ou modèle à phase moyennée) et instationnaire non hydrostatique (modèle à phase résolue). Une description plus complète du modèle est donnée dans Roelvink *et coll.*, 2009.

### 3.2 Validation hydrodynamique du modèle XBeach sur les sites MoDESCo

#### 3.2.1 Protocole de validation, application à Pointe-Lebel

Les variables hydrodynamiques du modèle (hauteurs de vagues dans deux gammes de fréquence et niveaux d'eau moyen) ont été comparées à celles enregistrées par les différents capteurs présents sur le site (figure 161).



Figure 161 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué. La position de l'AWAC correspond à l'étoile bleue.

Dans le cas de Pointe-Lebel, deux types de validation ont été faits. L'une porte sur une période relativement longue d'un cycle de morte-eau/vive-eau, soit environ 15 jours (validation 1). Dans ce cas, les changements morphologiques n'ont pas été pris en compte. L'autre période de validation s'étend sur 4 jours, du 15 au 19 novembre 2016, et comprend un épisode de tempête (validation 2). Pour cette seconde validation, les changements morphologiques sont pris en compte. La validation est effectuée sur la hauteur significative des vagues, dans la bande gravitaire et infragravitaire, ainsi que sur le niveau d'eau moyen (figure 162).

Les hauteurs de vagues dans les bandes infragravitaires sont déterminées de façon indirecte, le modèle numérique étant un modèle à phase moyennée ne permettant pas de déterminer l'énergie dans des gammes de fréquences différentes. Pour cela, une simulation supplémentaire avec une très haute résolution temporelle est faite ( $\Delta t = 10$  s au lieu de 3600 s) puis une analyse spectrale par transformée de Fourier est réalisée sur le niveau d'eau instantané, ce qui permet de retrouver l'énergie dans la bande basse fréquence (0,00026 < f < 0,05 Hz).

Les valeurs du modèle sont bien corrélées avec les observations *in situ*. En moyenne, par comparaison avec trois capteurs situés sur l'estran, les hauteurs significatives des vagues dans la bande gravitaire du modèle ont un coefficient de détermination de 0,73 et 0,85.



Figure 162 : Validation des variables hydrodynamiques (hauteur significative, dans deux bandes de fréquence, et niveau d'eau moyen) simulées dans le modèle pour deux périodes différentes : un cycle de morte-eau/vive-eau et une période de tempête

Les erreurs quadratiques moyennes associées sont de 11 et 9 cm pour les périodes 1 et 2 respectivement. Dans la bande infragravitaire, les coefficients de détermination sont de 0,44 et 0,77 et les erreurs de 3,5 et 2,7 cm pour les validations 1 et 2 respectivement. Enfin, le niveau d'eau moyen du modèle présente un coefficient de détermination de 0,98 et de 0,96, avec une erreur associée de 8,2 et 18 cm pour les validations 1 et 2 respectivement. Pour l'ensemble des variables hydrodynamiques, les valeurs de l'indice de performance SPS (Melby *et coll.*, 2012; défini dans l'annexe 6.2), qui prend en compte les erreurs, la variabilité et la corrélation entre deux sets de données, est supérieur à 0,70. Cela traduit une simulation efficace des variables hydrodynamiques dans notre modèle.

De plus les valeurs d'erreur relative absolue (RMAE) calculées permettent de qualifier la performance du modèle pour reproduire les conditions hydrodynamiques (tableau Van Rijn *et coll.*, 2003). Pour une valeur de RMAE inférieure à 0,05 les performances du modèle sont qualifiées d'excellentes. Lorsque la valeur est négative, cela indique que les erreurs du modèle sont inférieures à celles de l'instrument (0,10 m pour une hauteur significative de vague; Van Rijn *et coll.*, 2000; Van Rijn *et coll.*, 2003). Jusqu'à une valeur de 0,20, les performances sont considérées comme raisonnables. Enfin, au-dessus de 0,30, le modèle ne reproduit pas les conditions hydrodynamiques de façon satisfaisante. Pour les hauteurs significatives dans la bande infragravitaire et pour le niveau moyen, le RMAE n'est pas calculé car nous n'avons pas d'informations suffisamment précises sur les erreurs instrumentales de ces variables.

Tableau 38 : Évaluation de la performance d'un modèle hydrodynamique selon la valeur de RMAE

<i>RMAE</i> (m)	Performance
< 0,05	Excellente
0,05–0,1	Bonne
0,1–0,2	Raisonnable – Correcte
0,2–0,3	Faible
> 0,30	Mauvaise

On peut donc, dans le cas de Pointe-Lebel, considérer que le modèle permet de reproduire correctement les conditions hydrodynamiques sur le site. Les valeurs de RMAE sont inférieures à 0,05 et les biais sont faibles (< 0,10 cm). Les valeurs de corrélations sont elles aussi assez élevées ( $\rho^2 > 0.70$ ). En revanche, dans la bande infragravitaire, les hauteurs significatives sont moins bien reproduites avec des corrélations faibles dues à une forte surestimation des  $H_s$  (IG) lors de certaines marées. Les niveaux d'eau moyens sont correctement reproduits avec de légers biais négatifs (quelques centimètres).

Une validation (type 1 sur un cycle morte-eau/vive-eau de 14 jours) sur l'ensemble des sites de MoDESCo a été réalisée le long de la grille 1D afin de vérifier si le modèle XBeach permettait de reproduire le forçage hydrodynamique sur chacun de nos sites d'étude. Cette période de validation permet d'obtenir une comparaison des séries suffisamment longue pour contenir une variabilité des conditions hydrodynamiques satisfaisantes. De plus, chaque période de validation est choisie selon la variabilité des conditions hydrodynamiques observées sur la série.

Chacune des grilles 1D du modèle est obtenue à partir des relevés topo-bathymétriques *in situ* (cf. section 2.6). Dans la mesure du possible, la grille est générée de la côte jusqu'à la position de l'AWAC. Lorsque ce n'est pas possible, par exemple dans le cas où l'AWAC n'est pas directement en face du site, on considère que les conditions hydrodynamiques enregistrées sont similaires que sur le dernier point de grille. Néanmoins, si la topo-bathymétrie varie et que le dernier point de la grille se situe à une profondeur très différente, les conditions de vagues sont alors corrigées selon la théorie linéaire (soit par levage lorsque la profondeur est plus faible ou bien en inversant le levage si le point est plus profond, comme c'est le cas à Pointe-aux-Outardes, par exemple).

#### 3.2.1.1 Pointe-aux-Outardes

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par trois capteurs de pression (figure 163 et figure 164), déployés en 2018 entre le 19 mai et le 9 décembre. La période de validation est comprise entre le 17 novembre et le 1<sup>er</sup> décembre.



Figure 163 : Localisation des grilles de calcul et des instruments de mesure déployés sur le secteur de la péninsule de Manicouagan. Deux modèles sont générés, pour le site de Pointe-aux-Outardes et celui de Pointe-Lebel.



Figure 164 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu. La position de l'AWAC (étoile bleue) est ici fictive, celui-ci ayant été déployé sur le site de Pointe-Lebel.

Pointe-aux-Outardes



Figure 165 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D, G] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E, H] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande infragravitaire (0,0026 < f < 0,05 Hz). [C, F, I] : Comparaison du niveau moyen.

Les performances du modèle (figure 165) sont évaluées à partir des paramètres statistiques usuels (p<sup>2</sup>, RMSE et biais). Deux variables supplémentaires sont calculées (RMAE et SPS) et permettent de qualifier la qualité du modèle (Van Rijn *et coll.*, 2003) (tableau 39). Dans le cas de Pointe-aux-Outardes les performances du modèle sont satisfaisantes. Les valeurs de RMAE pour la hauteur significative des vagues pour les trois capteurs sont de 0,09, 0,18 et 0,12 m. Les valeurs sont inférieures à 0,20 m. Le modèle montre une meilleure performance proche de la côte (capteur 1) avec une valeur de RMAE en dessous de 0,10.

Tableau 39 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le site de Pointe-aux-Outardes. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

Capteur 1 (d = 280 m)							Capteur 2 (d = 480 m)						Capteur 3 (d = 980 m)			
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	
<i>H</i> ₅ (G)	0,56	0,11	-0,09	0,09	0,79	0,54	0,12	-0,10	0,18	0,76	0,60	0,12	-0,08	0,12	0,80	
<i>H</i> ₅ (IG)	0,54	0,12	0,08	х	0,63	0,47	0,08	0,12	х	0,25	0,57	0,08	0,17	х	0,05	
NM	0,93	0,18	0,04	х	0,90	0,95	0,22	0,00	Х	0,91	0,96	0,20	0,02	Х	0,91	

#### 3.2.1.2 Maria

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par deux capteurs de pression (figure 166 et figure 167), déployés en 2018 entre le 14 juin et le 8 décembre. La période de validation s'étend du 17 septembre au 1<sup>er</sup> octobre.



Figure 166 : Localisation de la grille de calcul et des instruments de mesure déployés sur le secteur de Maria







Figure 168 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande f < 0,0026 < f < 0,05 Hz). [C, F] : Comparaison du niveau moyen.

Dans le cas du site de Maria (tableau 40), bien que le modèle présente une assez forte dispersion par rapport aux observations (corrélations significatives mais relativement faible  $\rho^2 < 0,60$ ), les erreurs restent acceptables (RME < 0,10 et un bais de l'ordre de 10 cm pour les hauteurs de vagues).

Ici, les erreurs un peu plus importantes apportés par le modèle peuvent s'expliquer par une moins bonne estimation des niveaux d'eau, avec une forte variabilité (figure 168 C-F), bien que la corrélation entre les observations et les simulations restent fortes.

Tableau 40 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le site de Maria. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

		Capte	eur 1 (d =	95 m)	Capteur 2 (d = 200 m)						
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	
<i>H</i> ₅ (G)	0,48	0,06	-0,08	-0,08	0,75	0,52	0,08	-0,09	0,08	0,75	
H₅ (IG)	0,65	0,03	-0,02	х	0,72	0,60	0,03	-0,02	Х	0,70	
NM	0,65	0,26	0,04	х	0,63	0,68	0,27	0,05	Х	0,66	

#### 3.2.1.3 Longue-Pointe-de-Mingan

Pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan, deux régions distinctes sont étudiées. En effet, le site étant particulièrement étendu et soumis à une exposition aux forçages marins différentes, il a semblé intéressant de distinguer ces deux régions et de confronter les résultats du modèle obtenus de part et d'autre du littoral. Ainsi, on distingue la région ouest où l'AWAC est déployé et la région est (figure 169).



Figure 169 : Localisation des grilles de calcul et des instruments de mesure déployés sur le secteur de Longue-Pointede-Mingan. Deux modèles sont générés pour le site, à l'ouest et à l'est.

#### 3.2.1.3.1 Secteur Est

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par deux capteurs de pression (figure 170 et figure 171), déployés en 2018 entre le 16 mai et le 6 novembre. La période de validation s'étend du 3 au 17 juin.



Figure 170 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu. La position de l'AWAC (étoile bleue) est ici fictive, celui-ci ayant été déployé au niveau du secteur ouest.

Longue-Pointe-de-Mingan (Est)



Figure 171 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande f < 0,0026 < f < 0,05 Hz). [C, F] : Comparaison du niveau moyen.

Sur le secteur est de Longue-Pointe-de-Mingan, le modèle montre une bonne performance; les corrélations entre les observations et les simulations sont satisfaisantes pour chacune des variables et les erreurs restent faibles (tableau 41). Un léger biais de 20 cm est tout de même observé sur le niveau d'eau moyen. Le RMAE est négatif, ce qui indique que les erreurs du modèle sont de l'ordre de l'erreur des capteurs.

Tableau 41 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le secteur est de Longue-Pointe-de-Mingan. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

		Capte	eur 1 (d = 2	.70 m)	Capteur 2 (d = 430 m)					
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS
<i>H</i> ₅ (G)	0,55	0,08	-0,06	-0,18	0,78	0,70	0,08	-0,06	-0,13	0,81
<i>H</i> ₅ (IG)	0,69	0,03	-0,001	х	0,77	0,62	0,02	-0,001	х	0,77
NM	0,85	0,22	0,18	Х	0,72	0,85	0,22	0,19	х	0,71

#### 3.2.1.3.2 Secteur Ouest

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par deux capteurs de pression (figure 172 et figure 173), déployés en 2018 entre le 16 mai et le 7 novembre. La période de validation s'étend du 10 au 24 juin.



Figure 172 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu.



Longue-Pointe-de-Mingan (Ouest)

Figure 173 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,0026 < f < 0,05 Hz). [C, F] : Comparaison du niveau moyen.

Tableau 42 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le secteur ouest de Longue-Pointe-de-Mingan. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

		Capte	eur 1 (d = 2	40 m)	Capteur 2 (d = 355 m)					
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS
<i>H</i> ₅ (G)	0,55	0,14	-0,07	0,00	0,82	0,84	0,08	-0,04	-0,10	0,90
<i>H</i> ₅ (IG)	0,70	0,02	-0,01	х	0,84	0,73	0,02	0,001	х	0,81
NM	0,77	0,30	0,15	х	0,70	0,74	0,32	0,16	Х	0,66

Sur le secteur ouest de Longue-Pointe-de-Mingan, le modèle montre une bonne performance; les corrélations entre les observations et les simulations sont très satisfaisantes pour chacune des variables et les erreurs restent faibles.

#### 3.2.1.4 Chandler

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par trois capteurs de pression (figure 174, figure 175 et figure 176), déployés en 2017 entre le 26 juin et le 19 octobre. La période de validation s'étend du 3 au 17 septembre.



Figure 174 : Localisation des grilles de calcul et des instruments de mesure déployés sur le secteur de Chandler

Pour le secteur de Chandler, un problème d'altitude dans le modèle numérique de terrain utilisé est observé (valeur à 0 m sur la partie terrestre). En effet, un écart est observé entre les valeurs topographiques et d'autres mesures faites *in situ* (profil de plage au DGPS). Cet écart n'est pas présent sur les données bathymétriques. Avant d'être utilisé la donnée a donc été corrigée par ajout d'une valeur constante sur l'ensemble du domaine non maritime.



Figure 175 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu.



Figure 176 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande f < 0,0026 < f < 0,05 Hz). [C, F] : Comparaison du niveau moyen.

Pour le site de Chandler, le modèle reproduit mal la dynamique du niveau d'eau moyen. Une forte dispersion des valeurs est observée, associée à un biais important (jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres; tableau 43). En revanche, la hauteur des vagues est bien reproduite dans les deux bandes de fréquence, sauf pour le capteur 1 pour lequel l'erreur de relation RMAE montre que le modèle n'est pas en accord avec les observations. Pour le site de Chandler, l'incapacité du modèle à reproduire le niveau

d'eau et la dynamique observée au capteur 1 peut être expliquée par l'erreur observée sur la donnée topo-bathymétrique utilisée en entrée. En effet, à cause de la correction introduite, la position du capteur 1 ne se retrouve plus à la bonne altitude dans le modèle.

Tableau 43 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le site de Chandler. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

Capteur 1 (d = 190 m)						Capteur 2 (d = 205 m)						Capteur 3 (d = 2015 m)			
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS
<i>H</i> ₅ (G)	0,50	0,14	-0,23	1,0	0,66	0,76	0,07	0,03	-0,08	0,81	0,80	0,07	0,006	-0,13	0,87
<i>H</i> ₅ (IG)	0,60	0,08	-0,04	х	0,71	0,83	0,04	-0,03	х	0,80	0,82	0,04	-0,03	х	0,77
NM	0,17	0,31	-0,64	х	-0,19	0,3	0,30	0,14	х	0,30	0,30	0,29	0,21	х	0,24

# 3.2.1.5 Pointe-aux-Loups

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par deux capteurs de pression (figure 177, figure 178 et figure 179), déployés en 2018 entre le 19 mai et le 22 décembre. La période de validation s'étend du 7 au 21 octobre.



Figure 177 : Localisation des grilles de calcul et des instruments de mesure déployés sur le secteur de Pointe-aux-Loups


Figure 178 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu.



Figure 179 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande f < 0,0026 < f < 0,05 Hz). [C, F] : Comparaison du niveau moyen.

Pour le site de Pointe-aux-Loups, les résultats obtenus sur la simulation de la hauteur des vagues dans la bande gravitaire sont acceptables (RMAE < 0,20; tableau 44) mais un biais négatif important est observé (~20 cm). La variabilité de la hauteur des vagues reste bien reproduite par le modèle ( $\rho^2$  > 0,55). Les

résultats sont moins satisfaisants dans la bande infragravitaire. En effet, une faible corrélation ( $\rho^2 < 0,43$ ) est observée, associée à une erreur forte et un biais positif significatif (RMSE > 0,20 cm; biais > 10 cm). Le score de performance pour la bande gravitaire est élevé (SPS > 0,80) mais faible dans la bande infragravitaire (SPS < 0,62). Le niveau d'eau moyen est quant à lui correctement reproduit.

	Capteur 1 (d = 190 m)				Capteur 2 (d = 205 m)					
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS
<i>H</i> ₅ (G)	0,55	0,17	-0,19	0,22	0,80	0,68	0,15	-0,17	0,18	0,82
H₅ (IG)	0,30	0,30	0,13	Х	0,62	0,43	0,24	0,20	х	0,60
NM	0,74	0,11	0,10	Х	0,78	0,76	0,10	0,09	Х	0,80

Tableau 44 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le site de Pointe-aux-Loups. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

## 3.2.1.6 Baie-de-Plaisance

Les conditions hydrodynamiques générées à la côte par le modèle XBeach ont été validées par un capteur de pression (figure 180, figure 181 et figure 182), déployés en 2018 entre le 12 août et le 16 novembre. La période de validation s'étend du 20 octobre au 3 novembre.



Figure 180 : Localisation des grilles de calcul et des instruments de mesure déployés sur le secteur de Baie-de-Plaisance



Figure 181 : Localisation des instruments de mesure le long de la grille de calcul. Le niveau moyen des pleines mers supérieures est indiqué par le trait pointillé bleu



Figure 182 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande infragravitaire (0,00026 < f < 0,05 Hz). [C] : Comparaison du niveau moyen.

Dans le cas de Baie-de-Plaisance, les résultats sont mitigés (voir tableau 45). En effet, la corrélation entre les variations du forçage hydrodynamique reste forte ( $\rho^2 = 0.53$  et 0.75 dans les bandes gravitaires et infragravitaires respectivement) mais des biais assez importants sont observés (-0.17 et -0.09 cm). L'erreur relative au capteur (RMAE) est de 0.29 cm, ce qui caractérise le modèle hydrodynamique comme étant tout juste acceptable. Les valeurs du score de performance (SPS) pour chacune des trois variables hydrodynamiques testées restent relativement fortes (0.77, 0.67 et 0.77 pour les variables  $H_s$  (G),  $H_s$  (IG) et NM respectivement).

Ici, les performances du modèle sont sans doute amoindries par le fait que l'AWAC se situe relativement loin de la grille (environ 10 km). L'AWAC se situe plus profondément que le dernier point de la grille et les conditions hydrodynamiques entrantes dans le modèle sont donc modifiées par levage artificiel des vagues, selon la théorie linéaire. Néanmoins, la présence de la péninsule au nord de la zone d'étude (voir figure 180) peut fortement altérer la propagation des vagues dans la zone par réfraction-diffraction, ce qui n'est pas pris en compte lors de la correction des conditions hydrodynamique entrantes. Tableau 45 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour le site de Baie-de-Plaisance. Les distances (d) entre chaque capteur et le premier point de la grille à terre est indiqué. Les valeurs de RMSE, de biais et de RMAE sont en mètre.

	Capteur 1 (d = 150 m)					
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	
<i>H</i> ₅ (G)	0,53	0,15	-0,17	0,29	0,77	
<i>H</i> ₅ (IG)	0,74	0,10	-0,09	Х	0,67	
NM	0,72	0,12	-0,00	Х	0,77	

#### 3.2.1.7 Ensemble des observations

Les paramètres statistiques ont été calculés sur l'ensemble des comparaisons (figure 183).



Figure 183 : Comparaison des conditions hydrodynamiques observées (axe y) et simulées (axe x). [A, D] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande gravitaire (0,05 < f < 0,4 Hz). [B, E] : Comparaison des hauteurs significatives dans la bande (0,00026 < f < 0,05 Hz). [C, F] : Comparaison du niveau moyen.

La comparaison faite sur l'ensemble des observations (environ 10 000 mesures; tableau 46) montre que pour la hauteur significative dans la bande gravitaire, le modèle permet de reproduire correctement sa variabilité ( $\rho^2 = 0,72$ ), avec des erreurs acceptables (RMSE = 0,14 cm, ce qui correspond à 35 % d'erreur). Le biais reste faible (-0,07 cm). Le score de performance global (SPS) atteint 0,82. Dans la bande infragravitaire, la corrélation des valeurs est nettement moins élevée ( $\rho^2 = 0,47$ ) et les erreurs plus fortes (RMSE = 0,14 cm en moyenne 60 % des hauteurs mesurées). Le score de performance global (SPS) atteint 0,58. Pour le niveau d'eau moyen, les résultats des différentes simulations sont bien corrélés avec les observations ( $\rho^2 = 0,84$ ) et les erreurs sont du même ordre de grandeur que pour la hauteur des vagues dans la bande gravitaire (RMSE = 0,28 cm, soit 38 % d'erreur). Le score global de performance est de 0,82. Tableau 46 : Paramètres statistiques (corrélation, erreurs et performance) calculés après comparaison entre les observations *in situ* et les séries modélisées pour l'ensemble des observations

	Ensemble des observations					
	ρ²	RMSE	Biais	RMAE	SPS	
<i>H</i> ₅ (G)	0,72	0,14	-0,07	0,07	0,82	
H₅ (IG)	0,47	0,14	0,03	Х	0,58	
NM	0,84	0,25	0,008	Х	0,82	

## 3.3 Suivi des évolutions morphologiques

Le modèle numérique XBeach contient un très grand nombre de paramètres libres, chacun étant associé à un processus physique différent. Cela résulte de l'ajout, avec le temps, de différents modules affinant le modèle. La première version du modèle XBeach a été proposée par Roelvink *et coll*. (2009) pour étudier la dynamique de l'érosion de dunes sableuses. Depuis, d'autres versions ont été proposées en incorporant ou en modifiant les modules physiques du modèle (*e.g.* XBeach Kingsday, 2015; XBeach X, 2018).

Ainsi, le modèle XBeach démontre une très grande polyvalence dans son utilisation et son efficacité à modéliser un nombre important d'évènements, ce qui a été mentionné dans différentes études (Roelvink *et coll.,* 2018; Simmons *et coll.,* 2019).

Pour cette étude, traitant de la capacité du modèle à reproduire les évolutions morphologiques des sites d'étude, la dernière version du modèle XBeach X a été utilisée. Celle-ci contient des développements supplémentaires pour traiter efficacement l'influence de pente locale, particulièrement élevée sur nos sites, sur le transport sédimentaire.

## 3.3.1 Calibration du modèle et application à Pointe-Lebel

Le modèle XBeach a d'abord été utilisé avec les paramètres par défaut pour reproduire les évolutions morphologiques du site de Pointe-Lebel au cours de deux tempêtes différentes. La première tempête a eu lieu en novembre 2016 et la seconde, en décembre 2016. En décembre, une importante quantité de frasil était présente sur le site (figure 184).



Figure 184 : Images du site de Pointe-Lebel issues des observations vidéo prises lors des tempêtes du 16 novembre et du 30 décembre 2016

Les simulations sont faites le long d'une grille 1D co-localisée avec le profil de plage où sont déployés les capteurs de pression ainsi que la zone couverte par une caméra vidéo (figure 185).

Différents marqueurs morphologiques pouvant être mesurés conjointement par le modèle et par les observations *in situ* ont été définis. Ce sont les positions de la crête de la microfalaise, de sa base et de la flexure (figure 185b) ainsi que les bilans sédimentaires dans la zone active de la plage (0-200 m).



Figure 185 : A) Aperçu de la zone d'étude pour l'implémentation du modèle XBeach. B) Vue transversale de la plage (Beachface) au site d'étude avec identification des marqueurs morphologiques : crête de la microfalaise (MC<sub>crest</sub>), base de la microfalaise (MC<sub>toe</sub>) et de la flexure (Hinge line). C) La grille utilisée est à proximité d'une caméra vidéo et est située sur le profil des capteurs déployés sur le site.

Les résultats du modèle sont illustrés sur la figure 186. Durant ces évènements, des instruments ont été déployés et des relevés terrain ont été réalisés, ce qui permet de comparer les résultats du modèle avec les observations *in situ* et ainsi d'évaluer son efficacité. Pour des modèles morphodynamiques, le *Brier Skill Score* (noté BSS et défini en annexe 6.2) est couramment utilisé et donne une estimation de l'efficacité d'un modèle morphologique (Van Rijn *et coll.,* 2003).



Figure 186 : Simulation avec le modèle XBeach avec les paramètres par défaut de l'évolution du profil de plage sur le site de Pointe-Lebel pour deux tempêtes différentes ayant eu lieu en novembre et décembre 2016.

Le profil de plage simulé par le modèle montre de grandes différences avec celui observé *in situ* (figure 186). L'évolution du site est bien en accord avec les observations *in situ*, c'est-à-dire une accrétion en bas de plage et une érosion du haut de plage. Mais, dans les deux cas, le modèle surestime largement les quantités de sédiments érodés et accrétés (5 et 10 fois plus pour novembre et décembre respectivement). Le recul de plage après tempête est ainsi plus important dans le modèle : -12 m en novembre et -20 m en décembre, alors que les observations *in situ* nous donnent un recul de -5 m en novembre et de –3,5 m en décembre. Le BSS associé à ces deux modèles est de -9 et de -27 pour la tempête de novembre et de décembre respectivement, ce qui dénote une incapacité du modèle à reproduire les évolutions morphologiques du site (BSS < 0).

Les paramètres par défaut du modèle ne sont donc pas adaptés au site d'étude. Une première étape consiste à calibrer les différents paramètres qu'utilise le modèle afin de reproduire correctement la dynamique intrinsèque du site étudié.

Pour réaliser la calibration de ces paramètres, une méthode simple et efficace a été mise en place. Pour cela, un facteur d'impact (noté *FI*) a été défini et donne un indice de l'importance d'un paramètre ( $\gamma$ ) sur la variabilité du profil de plage (z). Cet indice est défini comme étant le rapport de la variance du paramètre sur la variance du profil :

$$FI = \frac{\sigma_z^2}{\sigma_\gamma^2}$$

Le facteur d'impact nous donne ainsi des informations importantes sur les processus dominants quant à la dynamique sur notre site d'étude. En effet, celui-ci est particulièrement élevé pour le paramètre *facua*, lié au transport sédimentaire induit par la non-linéarité des vagues (asymétrie). Le second paramètre qui influence le plus l'évolution du profil est le paramètre *gammax*, qui intervient dans les processus de dissipation et de stabilité des vagues dans un environnement peu profond. Ensuite, viennent les effets de pente, la dissipation de l'énergie par déferlement des vagues et les processus d'avalanche du substrat sédimentaires.

La calibration est exécutée par ordre décroissant de la valeur donnée par le facteur d'impact, en modifiant par itération la valeur du paramètre testé et en cherchant la valeur optimisant le BSS associé. La calibration a été réalisée sur sept paramètres différents, intervenant sur des processus différents, liés à la dynamique des vagues et au transport sédimentaire (figure 187).





La valeur de BSS associée au modèle calibré atteint 0,82, ce qui dénote d'un modèle morphologique efficace (Van Rijn *et coll.,* 2003). Le modèle est donc validé et calibré. Les tempêtes de novembre et décembre 2016 et leurs impacts sur le site de Pointe-Lebel ont été reproduits avec le nouveau modèle calibré, le long d'un profil 1D (figure 188).

La calibration des paramètres améliore considérablement les résultats du modèle. Les bilans sédimentaires atteignent -7,4 m<sup>3</sup>/m pour la tempête de novembre et -5,2 m<sup>3</sup>/m pour celle de décembre, soit une légère sous-estimation pour le premier évènement (-17 m<sup>3</sup>/m) et une légère surestimation pour décembre (-2,8 m<sup>3</sup>/m). Pour l'évènement de novembre, c'est l'érosion qui est sous-estimée alors que les quantités accrétées sont identiques à ce qui est observé *in situ*. Inversement, pour décembre, les quantités accrétées sont légèrement surestimées alors que la quantité de sédiments érodés est bien reproduite. En ce qui concerne le recul du sommet de la microfalaise, il est parfaitement reproduit lors de la tempête de novembre (5 m de recul enregistré *in situ* et dans le modèle), mais ce n'est pas le cas pour

décembre. En effet, un léger recul de la plage de 0,5 m est enregistré alors que celui-ci a été de 3,5 m. De ce fait, la valeur de BSS associée au modèle de décembre reste faible (BSS = 0,06) alors qu'elle est relativement élevée pour celui de novembre (BSS = 0,82).



Figure 188 : Simulation avec le modèle XBeach calibré de l'évolution du profil de plage sur le site de Pointe-Lebel pour deux tempêtes différentes ayant eu lieu en novembre et décembre 2016

Dans le cas de l'évènement de décembre, une forte concentration de frasil est présente dans la zone intertidale et la plage est gelée. Cela a un impact sur la dynamique générale, mais n'est pas pris en compte dans le modèle. La glace de mer modifie fortement les quantités d'énergie transportée par les vagues et agit comme un filtre passe-bas. Une première hypothèse serait que, dans le modèle de décembre, l'énergie des vagues est plus importante que ce qui est observé car la glace n'est pas prise en compte dans le modèle. Or, ce n'est pas le cas ici. Les niveaux d'énergie en haut de plage sont trop faibles pour engendrer un recul important du haut de plage et ainsi être conforme aux mesures *in situ*. Pour pallier ce problème, une partie de l'estran a été défini comme étant non érodable dans le modèle. Cela représente une zone où les sédiments sont gelés et où la dissipation d'énergie des vagues par le fond est plus faible. L'ajout de cette section non érodable permet à une plus grande quantité d'énergie d'être transférée jusqu'au haut de plage et un recul trois fois plus important de la crête de la microfalaise est enregistré (1,5 m), ce qui correspond mieux aux observations *in situ*. Le BSS associé à ce modèle atteint 0,43 (raisonnablement efficace selon Van Rijn *et coll.,* 2003), une valeur bien supérieure au précédent modèle (BSS = 0,06).

Ce protocole de calibration a ensuite été appliqué aux autres sites. Des divergences dans les valeurs calibrées des paramètres du modèle montrent bien les différences de dynamique entre nos sites. Pour la calibration morphodynamique, environ 70 simulations sont réalisées pour chacun des sites.

Sur le tableau 47, l'ensemble des simulations réalisées pour chacun des paramètres sont répertoriées.

Paramètre Rôle dans le modèle Valeur par défaut du Intervalle des valeurs modèle testées facua Agit sur l'intensité du 0,1 [0,0 - 1,0] transport sédimentaire Module l'énergie des 2,0 [0, 4 - 5, 0]gammax vagues incidentes facsl Intensité de l'effet de la 1,6 [0,0-1,6] pente locale sur la dynamique valeur seuil pour le 0,55 [0, 4 - 1, 0]gamma déferlement 0,3 [0,0-1,0]wetslp Pente critique pour le processus d'avalanche (immergé) Module l'intensité de la 1,0 [0,5 - 2,0] alpha dissipation d'énergie lors du déferlement

Tableau 47 : Présentation des paramètres testés pour la calibration morphodynamique du modèle

Pour le site de Chandler, les profils de plage présentent malheureusement trop peu de variabilité et sont trop courts (~80 m) pour déterminer une période de calibration satisfaisante. En effet, un prérequis essentiel dans la calibration du modèle est d'obtenir un profil initial et final présentant suffisamment de variations pour que celles-ci soient reproduites par le modèle.

## 3.3.1.1 Pointe-aux-Outardes

La simulation de la dynamique du profil de plage avec les valeurs par défaut des paramètres du modèle est associée à un BSS de -4,1. Cela indique une performance négative du modèle et aucune information claire ne peut être obtenue. Une calibration des valeurs de six paramètres libres du modèle permet d'améliorer sensiblement les performances du modèle.



Figure 189 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Pointe-aux-Outardes par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,42 après calibration.

#### 3.3.1.2 Maria

La simulation de la dynamique du profil de plage avec les valeurs par défaut des paramètres du modèle est associée à un BSS de -3,1. Cela indique une performance négative du modèle et aucune information claire ne peut être obtenue. Une calibration des valeurs de six paramètres libres du modèle permet d'améliorer sensiblement les performances du modèle.



Figure 190 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Maria par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,24 après calibration.

## 3.3.1.3 Longue-Pointe-de-Mingan

La calibration morphologique du modèle est faite sur le site ouest de Longue-Pointe-de-Mingan. La simulation de la dynamique du profil de plage avec les valeurs par défaut des paramètres du modèle est associée à un BSS de -1,4. Cela indique une performance négative du modèle et aucune information claire ne peut être obtenue. Une calibration des valeurs de six paramètres libres du modèle permet d'améliorer sensiblement les performances du modèle.



Figure 191 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,12 après calibration.

## 3.3.1.4 Pointe-aux-Loups

La simulation de la dynamique du profil de plage avec les valeurs par défaut des paramètres du modèle est associée à un BSS de -0,1. Cela indique une performance négative du modèle et aucune information claire ne peut être obtenue. Une calibration des valeurs de six paramètres libres du modèle permet d'améliorer sensiblement les performances du modèle.



Figure 192 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de 0,41 après calibration.

## 3.3.1.5 Baie-de-Plaisance

La simulation de la dynamique du profil de plage avec les valeurs par défaut des paramètres du modèle est associée à un BSS de -1,45. Cela indique une performance négative du modèle et aucune information claire ne peut être obtenue. Une calibration des valeurs de six paramètres libres du modèle permet d'améliorer sensiblement les performances du modèle.



Figure 193 : Résultat de la calibration sur six paramètres libres du modèle XBeach pour le site de Baie-de-Plaisance par valeur décroissante du facteur d'impact calculé précédemment. L'optimisation de la valeur du BSS donne une valeur de -0,15 après calibration.

L'ensemble des valeurs prises par les paramètres libres calibrés sont rassemblées dans le tableau 48.

Tableau 48 : Ensemble des valeurs prises par les paramètres testés lors de la calibration des différents sites. Le paramètre dryslp n'est pas indiqué, celui-ci n'ayant pas eu d'impact significatif sur la dynamique du profil modélisé.

Site	facua	gammax	facsl	gamma	wetslp	alpha	BSS initial	BSS final
Longue-Pointe-de- Mingan	0,2	4,0	0,1	0,4	0,1	1,0	-1,4	0,12
Maria	0,4	0,6	0,6	1,6	0,4	1,0	-3,1	0,24
Pointe-Lebel	0,5	0,58	1,4	0,4	0,6	1,0	-9	0,82
Pointe-aux-Outardes	0,4	4,5	1,6	0,55	0,2	1,0	-4,1	0,42
Pointe-aux-Loups	0,3	1,0	1,4	0,4	0,6	2,0	-0,1	0,41
Baie-de-Plaisance	0,3	0,4	1,4	0,7	0,1	0,5	-1,45	-0,15

## 3.1.2.2 Modèle morphologique à long terme

Afin de suivre l'évolution du trait de côte, associé dans notre étude à la position de la crête de la microfalaise, une approche a été mise en place afin de modéliser les évolutions morphologiques du site sur le long terme. Le modèle numérique XBeach a été conçu pour reproduire les changements morphologiques d'un site à l'échelle d'une tempête (*i.e.* quelques jours). La difficulté ici est donc de définir une approche permettant de générer des simulations de nos sites d'études sur une période plus étendue, sur laquelle plusieurs évènements vont induire des changements du trait de côte.

Les travaux précédents ont permis d'identifier, au premier ordre, quelles étaient les conditions environnementales induisant une forte érosion de la plage. Nous avons pu constater que le niveau d'eau est primordial. Tant que celui-ci n'atteint pas la zone active de la plage (entre le niveau moyen et le niveau des pleines mers supérieures), l'érosion ne sera pas significative. De même, on s'intéresse ici à l'érosion côtière générée lors de forçages météo marins importants, c'est-à-dire lors de tempêtes. Or, cette érosion va être induite principalement par des transferts sédimentaires dans le sens perpendiculaire à la côte. Les transferts dus à la dérive littorale, majoritaires à grande échelle sur de longues périodes (*i.e.* mensuelle, annuelle), ne sont pas significatifs ici. Ainsi, la direction des vagues doit être colinéaire avec l'exposition de la plage. Enfin, l'énergie transportée par les vagues doit être suffisante pour mobiliser une quantité importante de sédiments par mise en suspension et par arrachement. Un certain nombre d'évènements ont ainsi pu être identifiés comme étant générateurs d'une forte érosion côtière, entre la période d'août 2016 et de décembre 2016 sur le site de Pointe-Lebel (figure 194).

Le modèle XBeach est forcé avec les conditions de vagues et de niveau d'eau observées lors de ces évènements. Entre deux épisodes de tempête, aucune modification du profil de plage n'est considérée. Ainsi, l'approche consiste à modéliser l'évolution du profil de plage de façon discontinue dans le temps, ici sur une période de cinq mois (août à décembre 2016). Sur cette période, six évènements pouvant potentiellement entrainer une forte érosion côtière, et donc un recul de la plage, sont identifiés. La modélisation numérique du profil de plage et notamment de la position de la crête de la microfalaise (*i.e.* trait de côte) a été comparée avec des observations *in situ* réalisées à l'aide d'enregistrements vidéo (figure 195).



Figure 194 : Suivi vidéo du recul de plage lors de différents évènements entre août 2016 et décembre 2016. La grille du modèle XBeach utilisée est colocalisée avec les mesures vidéo.

Les évolutions du trait de côte dans le modèle ne sont pas toujours corrélées avec celles observées par vidéo. En effet, des différences importantes entre les reculs mesurés par vidéo et par le modèle peuvent subvenir pour certaines tempêtes. Par exemple, lors de la tempête du 16 novembre, un recul de 5 m a été enregistré par les observations vidéo. Ce recul n'est que de 12 cm dans le modèle. Pourtant la simulation de cette même tempête par un modèle classique (voir section 3.3.1) avait donné des résultats excellents (5 m de recul de trait de côte et des bilans sédimentaires proches de ceux observés).

Bien que le modèle ne reproduise pas correctement l'intensité du recul pour chacun des évènements, le modèle reste efficace. En effet, sur les cinq mois de simulation, il totalise un recul de 6 m alors que celuici est de 10,6 m selon les observations *in situ*. De plus, la forme du profil final modélisé reste proche de celle relevée au DGPS. Le *Brier Skill Score* (BSS) est de 0,45 pour le profil de plage final, ce qui reste relativement élevé (Van Rijn *et coll.,* 2003). L'incapacité du modèle à reproduire correctement les tempêtes au cas par cas, dans le modèle long terme, pourrait s'expliquer par le fait que le modèle n'a pas suffisamment de temps pour s'initialiser. De nouvelles simulations sont menées avec une phase d'initialisation entre chaque tempête pour « préparer » le profil à l'épisode à venir.

Un autre point important est le processus d'accrétion. En effet, l'approche choisie ici ne permet pas de reproduire les phases d'accrétions du profil de plage qui surviennent généralement lors de périodes plus calmes et donc entre chaque évènement considéré dans l'étude. Bien qu'il ne soit pas possible de modéliser le profil de plage de façon continue sur des périodes aussi longues, à cause du temps de calcul qui deviendrait trop important, une autre approche pourrait résoudre ce problème. Celle-ci est similaire à la méthode proposée ici, mais elle incorpore un modèle stationnaire entre chaque épisode énergétique. Le mode stationnaire demande beaucoup moins de temps de calcul et est particulièrement indiqué pour reproduire les phases d'accrétion. Cette approche est celle proposée par L. Bart (2017).



Figure 195 : Identification des évènements ayant potentiellement entrainé un recul de la plage entre la période d'août et décembre 2016 sur le site de Pointe-Lebel

## 3.4 Conclusion

Le modèle numérique XBeach a été utilisé afin d'évaluer sa capacité à reproduire la dynamique des évènements d'érosion côtière. Sur chaque site du projet MoDESCo, deux simulations permettant d'évaluer les performances du modèle à reproduire les conditions hydrodynamiques ont été réalisées sur une période de 14 jours, soit un cycle complet de morte-eau/vive-eau. Cette validation hydrodynamique a permis de montrer que le modèle XBeach était capable de reproduire la variabilité des états de mers (hauteur de vagues dans deux bandes de fréquence et niveau d'eau) à la côte de façon satisfaisante sur la majorité des sites. On a pu constater sur certains sites (Chandler, Pointe-aux-Loups et Baie-de-Plaisance, notamment) des écarts importants entre les observations *in situ* et les résultats de modélisation, lesquels s'expliquent par différents facteurs pouvant être corrigés à l'avenir (meilleure qualité des données entrantes notamment). Comme on a pu le voir sur le site de Pointe-Lebel, à l'échelle d'une seule tempête, les performances du modèle sont améliorées. Les résultats de simulation comportent certains écarts par rapport aux observations (que ce soit lié à la variabilité-corrélation ou bien à l'intensité) mais reste acceptable, notamment par rapport aux standards usuels utilisés dans la littérature spécialisée.

La capacité du modèle numérique XBeach à reproduire les évolutions morphologiques des sites d'étude a aussi été évaluée lors de la phase III du projet. Le modèle a montré de bonnes performances pour évaluer le recul du trait de côte ainsi que les quantités de sédiments érodés lors d'épisodes de tempête historiques ponctuelles. Ces évaluations ont dans un premier temps été réalisées sur le site de Pointe-Lebel, utilisé comme site test pour établir les méthodes de calibration. Les performances du modèle ont été évaluées pour des sites libres de glace, mais aussi en périodes hivernales, lorsqu'une couverture de glace importante était présente. Une méthode innovante pour prendre en compte la présence de glace dans le modèle a été proposée. Celle-ci permet d'améliorer la capacité du modèle à reproduire les évolutions morphologiques des sites lorsque de la glace de mer est présente. Bien que cette méthode n'atteint pas les performances du modèle sans présence de glace, l'efficacité du modèle reste acceptable.

La calibration du modèle XBeach a ensuite été faite sur chacun des sites, sauf Chandler où une limitation des données entrantes (topographiques) ne permettait pas de réaliser cette calibration. Les résultats des différentes calibrations sont contrastés selon les sites avec un score de calibration (BSS) pouvant être excellent (BSS > 0,80), comme pour Pointe-Lebel, ou plus faible, comme sur le site de Baie-de-Plaisance (BSS final négatif après calibration).

Il est important de préciser que ces calibrations ont été réalisées sur des périodes relativement longues (plusieurs semaines) du fait de la faible résolution temporelle des profils de plages, nécessaires comme données entrantes pour le modèle et permettant de valider le profil final modélisé. Le modèle XBeach est normalement utilisé pour reproduire la dynamique d'un évènement sur une période de quelques heures à quelques jours. Malgré ces périodes d'utilisation non usuelles, le modèle génère tout de même des résultats permettant de reproduire l'évolution du trait de côte avec une bonne efficacité sur la moitié des sites calibrés (BSS > 0,30 sur les sites de Pointe-aux-Outardes et Pointe aux-Loups et BSS > 0,60 pour le site de Pointe-Lebel). Pour les sites de Maria et de Longue-Pointe-de-Mingan, le BSS final reste en dessous de 0,30 mais est positif (0,12 et 0,23 pour longue-Pointe-de-Mingan et Maria respectivement), ce qui indique que le modèle permet tout de même d'obtenir des informations sur la dynamique du profil mais avec une précision plus faible. Sur le site de Baie-de-Plaisance, il sera nécessaire d'identifier d'autres paramètres ayant un impact significatif sur la dynamique du profil de plage et de les calibrer au besoin afin d'obtenir un modèle XBeach performant. Il est aussi possible qu'appliqué à l'échelle d'une seule tempête, le modèle calibré permette de reproduire correctement l'évolution du profil de plage pour ce site.

Dans le cas où les résultats des calibrations seront appliqués sur des périodes de tempête, les performances du modèle seront sans aucun doute améliorées.

Enfin, une méthode a été développée afin de modéliser les reculs du trait de côte sur des périodes longues, contenant plusieurs évènements de tempête. Cette approche a permis de modéliser avec des performances correctes l'évolution morphologique d'un site sous l'action de plusieurs tempêtes historiques. Des développements sont en cours afin d'améliorer notre approche et les performances du modèle sur le long terme.

# 4 Développer un atlas numérique web pour diffuser les données modélisées de niveaux d'eau et de vagues de l'EGSL.

Les caractéristiques des paramètres de vagues et de niveaux d'eau issues des modélisations réalisées dans le cadre des phases II et III du projet MoDESCo sont entièrement sauvegardées pour les périodes 1980-2017 et 2040-2100 en climat futur, en chaque point d'une grille à une résolution spatiale de 1 km (196 460 points). Pour chaque point de grille, 7 à 10 paramètres sont enregistrés à une résolution temporelle de 1 h.

L'objectif de la phase III de MoDESCo est de rendre disponibles les séries temporelles des caractéristiques hydrodynamiques modélisées pour les institutions publiques, les entreprises privées et les différentes organisations œuvrant dans le domaine maritime. La Chaire de recherche en géoscience côtière possède déjà un système web, le Système intégré de gestion de l'environnement côtier (SIGEC) qui avait été ciblé comme plateforme pour développer un module spécifique pour la diffusion des données hydrodynamiques sous la forme d'un atlas numérique.

Des démarches ont été entreprises auprès de la firme Carto Vista en 2017 pour la mise en ligne et la diffusion de ces données hydrodynamiques par le biais d'un atlas web. Des résultats préliminaires présentés en avril 2019 lors de la conférence *Vecteur*, à Rimouski, étaient très prometteurs quant à la faisabilité du développement de l'atlas web (figure 196). Cependant, la lourdeur et le nombre des données générées rendent la mise en application difficile. La mise en ligne de 90 ans de données horaires reste encore à l'heure actuelle un défi technologique de taille.



Figure 196 : Exemple d'intégration des données du modèle de vagues WW3 à la plateforme web SIGEC développée par CartoVista. Hauteurs de vagues sur le golfe et l'estuaire maritime en date du 6 janvier 1985 à 00:00 UTC.

Une alternative proposée est de mettre en ligne, dans un premier temps, les jeux de données déjà extraites. En effet, depuis 2018, le laboratoire connait une croissance exponentielle dans les demandes de données de vagues du modèle WaveWatch III, provenant autant de consultants et de firmes que de ministères. À l'heure actuelle, les données d'environ 220 points de grille ont été extraites pour une soixantaine de sites allant des Îles-de-la-Madeleine, dans le golfe du Saint-Laurent, à Blanc-Sablon au nord et à L'Isle-aux-Coudres dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent (figure 197).

Des efforts sont actuellement déployés au sein du LDGIZC pour mettre en ligne ces jeux de données. Les figures 197, 198 et 199 illustrent un exemple de mise en ligne et de diffusion des données hydrodynamiques par l'intermédiaire de la plateforme SIGEC. La figure 197 donne une vue d'ensemble des données qui ont été extraites à ce jour. Sur la partie droite de l'écran, l'utilisateur a accès à une description succincte du modèle et des variables disponibles.

Quand l'utilisateur clique sur l'un de ces points, des informations supplémentaires apparaissent à l'écran (figure 198). La grille sur laquelle les simulations ont été tournées apparait à partir d'un certain seuil de zoom sur l'image. La figure 199 illustre un zoom au 1:108 000 dans la baie de Gaspé. Les points de grille apparaissent en blanc et les jeux de données disponibles apparaissent en surbrillance bleu clair.



Modèle de vagues opérationnel de la NOAA, WAVEWATCH3 - Points de grille extraits

Figure 197 : Localisation des points de grille où les données du modèle de vagues WW3 ont été extraites. Exemple de mise en ligne sur la plateforme SIGEC. Vue d'ensemble des données extraites disponibles.



Figure 198 : Illustration des informations qui apparaissent à l'écran quand l'utilisateur clique sur un point de grille où les données de vagues sont disponibles



Modèle de vagues opérationnel de la NOAA, WAVEWATCH3 - Points de grille extraits

Figure 199 : Zoom sur la baie de Gaspé où des données de vagues sont disponibles (points en bleu clair). Les points en blanc représentent les points de grille WW3 au 1 km.

Dans un deuxième temps, étant donné que les points de grille d'intérêt sont généralement situés près des côtes, les points de grille situés dans une bande de quelques kilomètres entre la côte et le large pourront être extraits de manière systématique (*e.g.* les points de grille où la profondeur est inférieure à 50 m, comme illustré dans la figure 200) et mis en ligne pour consultation ou téléchargement à partir du serveur web SIGEC. L'utilisateur pourra également procéder à des demandes spéciales pour des extractions non-effectuées encore. Une mise à jour mensuelle des extractions disponibles est prévue.

Les firmes de génie-conseil mandatées pour concevoir des solutions d'adaptation aux aléas côtiers ou des infrastructures côtières et maritimes pourront ainsi avoir accès à des séries temporelles fiables en climat futur. Des entrevues ont été réalisées avec les praticiens et professionnels ayant montré un intérêt pour ce type de données afin de s'assurer de fournir des formats utilisables par leur organisation. Le tableau 49 donne un aperçu des résultats de ces entrevues. Il est à noter que, parfois, les personnes présentes à l'entrevue n'étaient pas celles responsables de la modélisation au sein de leur compagnie et avaient des connaissances limitées quant au format de données utilisé, ce qui explique en partie le fort pourcentage de non applicable (56 %), mais la principale raison est que la plupart des firmes mandatent les quelques mêmes firmes pour le volet de modélisation hydrodynamique. Sur 16 firmes consultées, 5 utiliseraient des données de vagues pour leurs analyses. Des formats autres que .txt, .csv, netCDF, .xls ou GIS pourraient être proposés au cas par cas. Mentionnons cependant que la majorité des demandes de données WW3 que nous avons eu jusqu'à maintenant sont en format .csv ou .txt et dans quelques cas en format matlab.



Figure 200 : Exemple de solution pour la mise en ligne des données du modèle de vagues WW3 sur la plateforme de diffusion web (SIGEC web, UQAR) avec les extractions des points de grille à une profondeur inférieure à 50 m

Formats utilisés pour données de vagues	Fréquence	Pourcentage
Excel	1	6,3 %
.txt	1	6,3 %
GIS	1	6,3 %
NetCDF	1	6,3 %
.CSV	1	6,3 %
Ne se prononce pas	2	12,5 %
Non applicable	9	56,3 %
Total	16	100 %

Tableau 49 : Inventaire des formats de données de vagues utilisées par les firmes consultées en entrevues

# **5** Conclusion

La phase III de MoDESCo a permis de déployer des instruments de mesure sur sept sites représentatifs de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent pour quantifier les conditions météo marines de la côte jusqu'à la zone prélittorale.

En continuité avec les phases I et II, un suivi des conditions hydrodynamiques et morphologiques a été effectué sur sept sites caractéristiques et représentatifs des côtes du Québec maritime. Six courantomètres AWAC ont permis de caractériser le climat de courants et de vagues annuel et saisonnier moyen au large des sites. De nombreux capteurs de pression RBR (plusieurs déploiements par site équivalant au déploiement d'une centaine d'instruments) déployés à la côte ont permis de caractériser les conditions de vagues dans la zone intertidale. Un suivi morphologique a été effectué sur l'ensemble de ces sites à intervalle régulier. Une analyse conjointe de ces données hydrodynamiques au large et à la côte ainsi que des données morphologiques permet une meilleure compréhension des différents procédés physiques qui entrent en compte dans les phénomènes d'érosion et de submersion côtières, en plus de servir à valider les modèles numériques. Les instruments implantés dans le cadre de ce projet servent aussi à la validation du projet de modélisation d'ondes de tempête mené à l'ISMER (CPS 18-19-15) ainsi qu'au projet de développement d'un Système Opérationnel de Prévision des niveaux d'Eau Côtiers dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (SOPEC-CPS 19-20-07). Les données des instruments de mesure sont aussi largement utilisées par les firmes d'ingénierie, le MTQ et le MSP pour les analyses et la mise en œuvre des solutions. Il serait par conséquent pertinent de les maintenir en place.

La phase III de MoDESCo a aussi permis d'étendre la climatologie de vagues existante sur deux années additionnelles, soit 2016 et 2017, à une résolution de 1 km sur l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Une étude de l'intégration de vents intrants au modèle de vagues à une plus haute résolution spatiale (2,5 km au lieu de 35 km pour les simulations antérieures) montre une réduction des biais existants dans les régions où ils avaient été identifiés dans la phase II de MoDESCo (estuaire et baie des Chaleurs). La phase de validation du modèle de vagues avec des données hydrodynamiques *in situ* a permis de montrer l'efficacité de WW3 à reproduire les différents paramètres de vagues pour le golfe du Saint-Laurent. Toutefois, le maintien des instruments de mesure permettrait d'assurer une meilleure validation et débiaisage pour les extrêmes. L'ajout d'instruments dans le moyen estuaire permettrait aussi d'étendre la modélisation jusqu'à Québec. Les résultats de MoDESCo III montrent clairement l'importance de générer les nouveaux forçages de vent (HRDPS) pour la période historique afin de remodéliser les différents paramètres de WW3 particulièrement pour le moyen estuaire, l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs.

Des efforts sont actuellement déployés au sein du LDGIZC pour mettre en ligne et diffuser certains jeux de données hydrodynamiques par l'intermédiaire de la plateforme web SIGEC. La lourdeur et le nombre des données générées rendent la mise en application difficile. La mise en ligne de 90 ans de données horaires constitue un défi technologique de taille.

Les séries temporelles de hauteur de vague ainsi que les couvertures de glaces hivernales modélisées par le modèle WaveWatch III ont été analysées afin de connaitre les évolutions futures possibles du climat de vagues de l'EGSL. Une méthode de détection des évènements énergétiques (*i.e.* épisodes de tempête) a été mise en place pour analyser ces séries. Il apparait qu'en moyenne, un peu plus de quatre tempêtes par an sont observées sur chacun des sites. Selon les mêmes critères, à partir de 2041, ce seront presque dix évènements qui seront observés annuellement, avec des quantités d'énergie transportée par les vagues plus importantes. Cette intensification des tempêtes et de leur occurrence est liée à un changement du climat de vague dû à une diminution de l'atténuation de l'énergie des vagues en hiver par la couverture de glace moins importante. 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.

La capacité des modèles numériques à reproduire les évolutions morphologiques des sites d'étude a aussi été évaluée lors de la phase III du projet. Le modèle XBeach a montré de bonnes performances pour évaluer le recul du trait de côte ainsi que les quantités de sédiments érodés lors d'épisodes de tempête historiques ponctuelles. Les performances du modèle ont été évaluées pour des sites libres de glace, mais aussi en périodes hivernales, lorsqu'une couverture de glace importante était présente. Une méthode innovante pour prendre en compte la présence de glace dans le modèle a été proposée. Celle-ci permet d'améliorer la capacité du modèle à reproduire les évolutions morphologiques des sites lorsque de la glace de mer est présente. Bien que cette méthode n'atteint pas les performances du modèle sans présence de glace, l'efficacité du modèle reste raisonnable. De plus, il serait plus que pertinent que dans une phase ultérieure, d'intégrer dans XBeach la glace côtière (pied de glace qui recouvre la zone intertidale) et du gel de la plage puisque ces facteurs influencent clairement les niveaux d'atteinte du jet de rive et les épisodes de submersion et d'érosion.

Une méthode a été développée afin de modéliser les reculs du trait de côte sur des périodes longues, contenant plusieurs évènements de tempête. Cette approche a permis de modéliser, avec des performances correctes, l'évolution morphologique d'un site sous l'action de plusieurs tempêtes historiques. Des développements sont en cours afin d'améliorer notre approche et les performances du modèle sur le long terme.

## **Références**

Ardhuin, F., & Roland, A. (2012). Coastal wave reflection, directional spread, and seismoacoustic noise sources. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *117*(C11).

Atkinson, A. L., Power, H. E., Moura, T., Hammond, T., Callaghan, D. P., & Baldock, T. E. (2017). Assessment of runup predictions by empirical models on nontruncated beaches on the south-east Australian coast. *Coastal Engineering*, *119*, 15-31.

Alfieri, L., Salamon, P., Bianchi, A., Neal, J., Bates, P., & Feyen, L. (2014). Advances in pan-European flood hazard mapping. Hydrological Processes, 28(13), 4067–4077. https://doi.org/10.1002/hyp.9947

Barnett, R.L., Bernatchez, P., Garneau, M., Juneau, M.-N. 2017. Reconstructing late Holocene relative sea-level changes at the Magdalen Islands (Gulf of St. Lawrence, Canada) using multi-proxy analyses. Journal of Quaternary Science. 32(3), 380-395.

Bart, L. J. C. (2017). Long-term modelling with XBeach: combining stationary and surfbeat mode in an integrated approach. *Delft University of Technology*. Bates, P. D., Dawson, R. J., Hall, J. W., Horritt, M. S., Nicholls, P. L. Wicks, L. & Hascan, M. A. A. M. (2005). Simplified two

R. J., Wicks, J., & Hassan, M. A. A. M. (2005). Simplified twodimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. Coastal Engineering, 52(9), 793–810. doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005. 06.001

Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Coastal Engineering 1978* (pp. 569-587).

Bernatchez, P. 2003. Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives. Thèse de doctorat, Université Laval, 460 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. 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.

Bernatchez, P. et Dubois, J. M., 2004. «Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien ». *Géographie physique et Quaternaire*, 58(1), 2004, pp. 45-71.

Bernatchez, P. et Dubois, J.M.M. (2008). Seasonal Quantification of coastal Processes and cliff Erosion on fine sediments shoreline in a Cold Temperate Climate, Ragueneau Region, Quebec. Journal of Coastal Research, Vol. 24, p. 169-180. Bernatchez, P., Fraser, C., Lefaivre, 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., 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.

Bismuth, E. (2014) Interactions vagues-glace dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, Mémoire, Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, 94 p.

Boon, J.D. Evidence of sea level acceleration at U.S. and Canadian tide stations, Atlantic Coast, North America. J. Coast. Res. 2012, 285, 1437–1445.

Corriveau, M., Bernatchez, P., Arsenault, E., Bandet, M., 2018. Analyse de la dynamique des foyers d'érosion en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord afin d'identifier des solutions d'adaptation pour la route 138. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtière, Université du Québec à Rimouski, Rapport final présenté au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 2018. 405 pages + Annexes.

Corriveau, M., Fraser, C., Caron, T., Bernatchez, P., Buffin-Bélanger, T. Van-Wierts, S., 2016. Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques : Rapport final. Projet X016.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, Mars 2016, 421 p. + annexes.

Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R.L., Van-Wierts, S. 2015. Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. *Journal of Marine Science and Engineering 3*, 560-590. Didier, D., Bernatchez, P., Marie, G., & Boucher-Brossard, G. (2016). Wave runup estimations on platform-beaches for coastal flood hazard assessment. *Natural Hazards*, *83*(3), 1443-1467.

Didier, D., Baudry, J., Bernatchez, P., Dumont, D., Sadegh, M., Bismuth, E. & Sévigny, C. (2019). Multihazard simulation for coastal flood mapping: Bathtub versus numerical modelling in an open estuary, Eastern Canada. *Journal of Flood Risk Management*, *12*, e12505.

Didier, D., Bandet, M., Bernatchez, P., & Dumont, D. (2019). Modelling Coastal Flood Propagation under Sea Level Rise: A Case Study in Maria, Eastern Canada. *Geosciences*, *9*(2), 76.

Didier, D., Caulet C., Bandet, M., Bernatchez, P., Dumont, D., Augereau, E., Floc'h, F. et Delacourt, C. 2020. Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system. Continental Shelf Research, v192. 21 p

Dubuc, D., McKinnon R., et Bernatchez, P. 2020. Suivi environnemental des côtes du Québec maritime (2019-2022) : rapport de mission et gestion des instruments de 2019. 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, février 2020, 57 p.

Dugas, S. (2020) Analyse et modélisation de la propagation du spectre de vagues dans les mers englacées, Mémoire, Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, 110 p.

Hanson, J. L., Tracy, B. A., Tolman, H. L., & Scott, R. D. (2009). Pacific hindcast performance of three numerical wave models. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(8), 1614-1633.

Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., ... & Meerburg, A. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft 8-12*.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H., & Barnett, T. P. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, *15*(11), 1378-1391

Holman, R. A. (1986). Extreme value statistics for wave runup on a natural beach. *Coastal Engineering*, *9*(6), 527-544.

Koohzare, A., Van'ıc'ek, P. et Santos, M. (2008). Pattern of recent vertical crustal movements in Canada, Journal of Geodynamics 45, 133–145.

Labarre, T., Bernier, J.-F., Lajeunesse, P. 2019. Levés multifaisceaux – Chandler (Gaspésie). Rapport méthodologique. *Laboratoire de Géosciences marines de l'Université Laval,* 16 p.

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.

Makowski, C., Finkl, C. W., 2016. History of modern seafloor mapping. *In* Seafloor Mapping along Continental Shelves, *Coastal Research Library* 13, Ch. I, 3-49

Mase, H. (1989). Random wave runup height on a gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *115*(5), 649-661.

Masselink, G., & Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of coastal research*, 785-800.

Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M., & Conley, D. (2016). The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England. *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*(3), 378-391.

Melby, J. A., Nadal-Caraballo, N. C., & Kobayashi, N. (2012). *Wave runup prediction for flood mapping*. Coastal Engineering Research Council of the American Society of Civil Engineers.

Pollard, J., Brooks, S., Spencer, T., & Moeller, I. (2018, April). Geomorphological Risk: investigating the relationship between geomorphology, erosion and flood risk at the coast. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 20, p. 677).

Pratte, S. Garneau, M. et De Vleeschouwer, F. (2016). Late-Holocene atmospheric dust deposition in eastern Canada (St. Lawrence North Shore). The Holocene, Volume: 27 issue: 1, page(s): 12-25. 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 : 48 p. + 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

Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incidentband runup. *Coastal Engineering*, *134*, 103-123.

Simmons, J. A., Splinter, K. D., Harley, M. D., & Turner, I. L. (2019). Calibration data requirements for modelling subaerial beach storm erosion. *Coastal Engineering*, *152*, 103507.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, *53*(7), 573-588.

Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Bismuth, E., Senneville, S., & Caveen, J. (2016). Recent wave climate and expected future changes in the seasonally iceinfested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Climate dynamics*, *46*(1-2), 449-466.

Short, A. D., & Aagaard, T. (1993). Single and multi-bar beach change models. *Journal of Coastal Research*, 141-157.

Sunamura, T., Maruyama, K., 1987. Wave-induced geomorphic response of eroding beaches with special reference to seaward migrating bars. Proceedings of Coastal Sediments 87, New Orleans, pp. 788–801

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

Tolman, H. L. et le groupe de développement 2014. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 4.18; NOAA/NWS/NCEP: College Park, MD, USA; p. 311.

Van Rijn, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. P. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, *47*(3), 295-327.

Van Wierts, S., Bernatchez, P. et Larouche C., 2017. Suivi topographique côtier au moyen d'un système Lidar mobile terrestre : exemple d'une recharge sédimentaire de plage. Geomatica.

Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Mentaschi, L., Dottori, F., Giardino, A., Bouziotas, D., Feyen, L. (2016). Developments in large-scale coastal flood hazard mapping. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(8), 1841–1853. https://doi.org/10.5194/nhess-16-1841-2016.

Willmott, C.J. (1984) On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. In Spatial Statistics and Models, Springer, Berlin, 443-460

## 6 Annexe

## 6.1 Description des paramètres morphodynamiques

Description des grandeurs morphodynamiques utilisées pour caractériser les sites d'étude (section 2.1). Tableau 50 : Définitions des variables utilisées pour la caractérisation de la morphodynamique des sites d'étude

Nombre	dimension	Commentaire	Référence
		Marnage relatif	Masselink & Short (1993)
		$RTR = MSR/H_b$	
RTR	ø	RTR < 3 : dominance des vagues, peu ou pas	
		3 < <i>RTR</i> < 15 : dominance intermédiaire de la	
		15 < RTR : dominance de la marée	
		Vitesse de chute adimensionnelle (nombre de Dean, nombre	Gourlay (1968)
		de Gourlay ou encore paramètre de réflectivité)	Dean (1973) Wright & Short (1984)
		$\Omega = {}^{H_b} / {}_{\omega_s T}$	
		Paramètre utilisé pour la typologie des plages et pour caractériser l'environnement de la plage :	
Ω	ø	0 < 1 · nlage très réflective	
		$1 < \Omega < 6$ : plage des reflective 1 < $\Omega < 6$	
		courants sagittaux, environnement	
		modérément - fortement	
		énergétique, sable moyen à fin ,	
		0 > 6 : plage très dissinative sable fin	
		environnement très énergétique.	
		période des vagues courtes	
		Nombre d'Iribarren (Surf similarity parameter) : caractérise la	Iribarren et Nogales (1949)
		nature du déferlement des vagues	Battjes (1974)
ξo	ø	$\xi_0 = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_b/\lambda}}$	
		$\xi < 0.4$ : déferlement glissant	
		$0.4 < \xi < 1$ : déferlement plongeant	
		$\xi > 1$ : déferiement frontal	0 (1075)
		Parametre de deferiement	Guza and Inman (1975)
		$\varepsilon = H\omega^2/$	
	4	$\int g * tan^2\beta$	
ε	ø		
		$\varepsilon < 2.5$ : déferlement frontal	
		$2.5 < \varepsilon < 20$ : déferlement plongeant	
		20 < ε : déferlement glissant	
		Parametre de barre	
		B* < 20 : Pas de barre (plage réflective)	Short et Aagaard (1993)
	4	$20 < B^* < 50$ : 1 barre sableuse	
В	ø	$50 < B^* < 100$ : 2 barres	
		$400 < B^*$ : 4 barres ou plus	
		Embayment scaling parameter	
		$\delta' = \frac{S_l}{100 + C} + H$	Short 1996
		/ 100 * C <sub>l</sub> * H <sub>b</sub>	Castelle et al., 2012
δ	ø	$\delta = L * \gamma_b * \frac{\beta}{H_a}$	
		· **g	
		$\delta' \delta < \delta$ : Circulation collulaire	
		$8 < \delta', \delta < 19$ : Circulation transitoire	
		$\delta', \delta > 19$ : Circulation normale	

# 6.2 Résumé des paramètres statistiques utilisés

Paramètre statistique	Formule	Description
$ ho^2$	$\rho^2 = \frac{\operatorname{cov}(Obs, Mod)}{\sigma_{Obs}\sigma_{Mod}}$	R2 = 1 parfaite corrélation entre les données. Néanmoins, la tendance peut être inverse.
Erreurs quadratiques moyennes <i>(RMSE)</i>	$RMSE = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} (Mod_i - Obs_i)^2$	Erreurs quadratiques moyennes
Summary Performance Score (SPS)	$SPS = \frac{(1 - NRMSE) + (1 -  BI ) + (1 - SI)}{3}$	Cet index prend en compte la variabilité des données, les erreurs et la corrélation associée. Défini dans Melby <i>et coll.,</i> 2012
Brier Skill Score (BSS)	$BSS = 1 - \frac{\operatorname{var}(Mod - Obs)}{\operatorname{var}(Obs)}$	Roelvink <i>et coll.</i> , 2009 BSS = 1 modèle très efficace, BSS = 0 aucune performance, BSS < 0 évolution indésirable