

Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques

X009.1

Rapport final

Présenté au ministère des Transports du Québec

**Urs Neumeier, Benoit Ruest, Adrien Lambert, Eliott Bismuth, Dany Dumont,
Denis Jacob, Jean-Pierre Savard, Sylvain Joly**

septembre 2013



Université du Québec à Rimouski
Institut des sciences de la mer de Rimouski

Affiliations des auteurs

Urs Neumeier	Professeur-chercheur, ISMER
Benoit Ruest	Étudiant à la maîtrise en océanographie, ISMER
Adrien Lambert	Stagiaire post-doctoral, ISMER
Eliott Bismuth	Étudiant à la maîtrise, ISMER
Dany Dumont	Professeur-chercheur, ISMER
Denis Jacob	Expert en modélisation, Environnement Canada
Jean-Pierre Savard	Océanographe, Ouranos
Sylvain Joly	Professionnel de recherche, ISMER

Référence complète : Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P., Joly, S., 2013. *Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques*. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, septembre 2013.

Résumé

La conception et le dimensionnement des ouvrages de protection contre l'érosion côtière nécessite de connaître le climat de vagues durant toute leur durée de vie utile. Les changements climatiques à venir au cours du XXI^e siècle dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent incluent l'augmentation de la température de l'air et de la surface de l'eau, la diminution du couvert de glace de mer, qui atténue les vagues en hiver, l'augmentation du niveau marin moyen ainsi qu'une possible modification du régime des vents. Le climat de vagues passé ne peut donc être utilisé pour la conception de nouveaux ouvrages de protection, d'où la nécessité d'évaluer le climat futur et le recours à des modèles.

Le futur climat de vagues est étudié dans ce rapport avec le modèle paramétrique de vague GENER, qui est basé sur des formules de fetch. En plus des deux formules initiales (SPM1977 et SPM1984), quatre autres formules de fetch ont été ajoutées à GENER : Jonswap 1973, Coastal Engineering Manual (CEM03), Wilson 1965, et Donelan 1980. GENER a également été modifié pour pouvoir être utilisé en traitement par lot (*batch mode*). Enfin un algorithme de prétraitement de vents a été développé afin d'alimenter GENER avec les champs de vent 2D issus des modèles atmosphériques. Cet algorithme détermine pour chaque heure le secteur d'où le vent générateur de vagues provient, et calcule ensuite un vecteur de vent moyen pour ce secteur. La validation de GENER alimenté par les vents ajustés de la réanalyse MERRA a été effectuée avec les données enregistrées par les houlographes (AWACs) immergés à 30-40 m de profondeur au large de Saint-Ulric, Cap d'Espoir et Sept-Îles (mai 2010 à octobre 2012) et par la bouée de Mont-Louis (1991 à 2012). Cette validation indique que SPM1984 surévalue clairement la hauteur des vagues. Les autres formules produisent des résultats satisfaisants, et assez similaires entre eux. Le meilleur accord est obtenu avec la formule CEM03, qui est utilisée pour ce projet.

Pour prendre en compte l'effet des glaces et son évolution climatique, des relations empiriques ont été établies entre la présence de glace selon les cartes du Service canadien des glaces et les degrés-jour de gel pour l'ensemble du golfe ainsi que pour les trois secteurs de Saint-Ulric, Cap d'Espoir et Sept-Îles. Le futur couvert de glace annuel a été projeté en appliquant ces relations aux températures de plusieurs simulations climatiques basées sur le scénario A2 d'émission de gaz à effet de serre. Le couvert de glace journalier autour des sites d'étude a aussi été estimé avec les simulations du Modèle Océanique Régional qui inclut la glace de mer (MOR, simulation MRCC-aev/ahj avec scénario A2). Ces deux approches indiquent des tendances similaires pour la période 1970-2070. À partir de ces différentes projections de glace, des fonctions d'atténuation des vagues ont été dérivées pour la période 1981-2100. Il existe une certaine variabilité entre ces projections qui est utilisée comme mesure d'incertitude sur le futur couvert de glace. Néanmoins, elles indiquent une diminution progressive de l'influence des glaces, qui devient négligeable pour le climat de vague au large entre 2060 et 2100 selon les régions. La glace influencera le plus longtemps les vagues dans la moitié sud de l'estuaire maritime.

Les vents de deux simulations climatiques du Modèle régional canadien du Climat (MRCC, simulations MRCC-aev et MRCC-ahj basées sur le scénario A2) ont été utilisés pour étudier les futures conditions de vagues. La comparaison des climats de vagues obtenus avec les vents du MRCC et avec les vents du modèle de réanalyse MERRA confirme que les vents du MRCC produisent des climats de vagues réalistes pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent.

Des séries temporelles de vagues 1981-2100 ont été produites par GENER avec les vents MRCC-aev et MRCC-ahj à cinq sites (Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Sept-Îles, Mont-Louis et Pointe-aux-Loups). L'atténuation des vagues par la glace a été appliquée en post-traitement selon les différentes projections de glace (cf. ci-dessus).

Les résultats indiquent une hausse des vagues extrêmes entre 1981-2010 et 2071-2100 à tous les sites, avec une augmentation entre 5 cm et 1 m des hauteurs de période de retour de 50 ans selon les sites et les simulations de vents. Toutefois, pour plusieurs cas les évolutions montrent des baisses passagères si les périodes intermédiaires 2011-2040 et 2041-2070 sont incluses dans l'analyse. De plus, ces différences sont du même ordre de grandeur que les intervalles de confiance associés aux périodes de retour. Une augmentation des hauteurs de vagues extrêmes est donc probable pour la deuxième moitié du XXI^e siècle, bien qu'il n'y ait pas de certitude et qu'un maintien des conditions actuelles soit aussi possible. Cette hausse est directement liée à la diminution du couvert de glace et, pour la moitié des combinaisons sites × simulations, aussi à un changement du régime des vents (parfois prédominant pour les changements du climat de vagues). L'atténuation des vagues par la glace devient généralement négligeable à la fin du XXI^e siècle et pourrait être ignorée pour des études simplifiées.

La performance du modèle opérationnel de vagues d'Environnement Canada (modèle EC) a été évaluée statistiquement en comparant pour chaque pas de temps les sorties du modèle avec les données enregistrées par les AWACs (cf. ci-dessus) entre mai 2011 et décembre 2012. Les vagues du modèle EC ont été soit interpolées aux sites des instruments, soit propagées du large jusqu'aux sites des instruments avec le modèle SWAN imbriqué dans le modèle EC. Le modèle EC prédit correctement les occurrences des événements de vagues moyennes à très fortes. Pour les sites de Sept-Îles et Cap d'Espoir (golfe du St-Laurent), il surévalue la hauteur des vagues d'un facteur de 1,4 à 1,5 à la position des instruments. Au site de Saint-Ulric (estuaire du St-Laurent), il sous-évalue légèrement la hauteur des vagues inférieures à 2 m d'un facteur 0,9, les vagues plus grandes étant correctement simulées. Le modèle manque fortement de précision pour les périodes aux trois sites. Les données sont très dispersées avec une surévaluation moyenne de 0,6 s dans le Golfe, 0,3 s pour Saint-Ulric. Les périodes des vagues les plus hautes sont surévaluées d'un facteur proportionnel à leur hauteur, compris entre 1,25 et 1,8 pour le Golfe (H_{m0} de 1 m à 6 m), 1 et 1,2 pour l'Estuaire (H_{m0} de 1 m à 4 m). Les directions sont globalement bien prédites à Sept-Îles, mais à Cap d'Espoir et à Saint-Ulric le modèle a plus de difficultés. Les directions des vagues les plus hautes ($> 1,5$ m) sont très bien représentées pour Sept-Îles et Cap d'Espoir.

Table des matières

Résumé	3
Table des matières	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	16
Liste des symboles et abréviations	18
Remerciements	22
1. Introduction	23
2. Méthodologie générale	27
2.1. Sites d'étude	27
2.2. Données de validation expérimentales	31
2.3. Données issues des modèles de vagues	31
2.3.1. Données issues du modèle d'Environnement Canada (Modèle EC)	31
2.3.2. Données issues de SWAN forcé par le modèle EC	32
2.4. Données issues de modèles atmosphériques (réanalyses et modèles climatiques)	34
2.4.1. Réanalyses NARR et MERRA	34
2.4.2. Modèles climatiques MRCC et NARCAPP	38
2.5. Protocole d'évaluation de la performance instantanée	43
2.5.1. Biais (MB, <i>mean bias</i>)	43
2.5.2. Biais absolu (MAE, mean absolute error ou absolute bias)	44
2.5.3. Racine de la moyenne quadratique de l'erreur (RMSE, <i>Root mean square error</i>)	44
2.5.4. Part systématique de la RMSE (RMSE _s)	44
2.5.5. Part non-systématique de la RMSE (RMSE _u)	45
2.5.6. Écart-type de l'erreur entre valeur prédite et mesurée (<i>standard deviation of differences</i>)	45
2.5.7. Coefficients de l'équation de la droite de régression linéaire	45
2.5.8. Coefficient de détermination (R ²)	46
2.5.9. Critère de performance global pour données non-directionnelles (<i>overall performance score</i>)	46
2.5.10. Indice de similitude (<i>index of agreement</i>)	46
2.5.11. Biais angulaire absolu moyen (MAE°)	47
2.5.12. Concentration approximative (approximate concentration)	47
2.5.13. Coefficient de corrélation linéaire pour données directionnelles (utilisation des différences directionnelles, <i>linear correlation coefficient</i>)	48
2.6. Protocole d'évaluation de la performance climatique	48
3. GENER	52
3.1. Description de GENER	52
3.2. Modifications initiales à GENER	53
3.3. Ajout de nouvelles formules de fetch	54
3.3.1. SPM 1977 (USACE, 1977)	54
3.3.2. SPM 1984 (CERC, 1984)	55
3.3.3. Jonswap (Hasselmann et al., 1973)	56

3.3.4. CEM03 (Resio et al., 2002)	56
3.3.5. Wilson (1965)	57
3.3.6. Donelan (1980)	57
3.4. Algorithme de prétraitement de vent	58
4. Méthode d'atténuation des vagues par la glace	60
4.1. Traitement des données de glace (2002-2012)	60
4.2. Caractérisation du climat de glace 2002-2012	62
4.2.1. Estuaire et golfe du Saint-Laurent	62
4.2.2. Sites des AWACs	65
4.3. Projections futures de la présence de glace	67
4.3.1. Estuaire et golfe du Saint-Laurent	68
4.3.2. Sites des AWACs	71
4.4. Méthode de prise en compte de la glace pour l'évaluation du futur climat de vagues.....	81
4.5. Atténuation des vagues à partir des prédictions de glace avec le modèle MOR	85
4.6. Conclusion sur l'atténuation des vagues par la glace	92
5. Résultats	93
5.1. Validation du modèle EC	93
5.1.1. Introduction	93
5.1.2. Hauteurs significatives	97
5.1.3. Périodes	114
5.1.4. Directions	129
5.1.5. Relations entre les paramètres de hauteur significative, période moyenne et direction moyenne des vagues prédites par modèle EC	142
5.1.6. Conclusions sur les performances du modèle EC	155
5.2. Validation de GENER	157
5.3. Comparaison AWAC-MERRA _{corr} et MERRA _{corr} -MRCC	161
5.4. Futur climat de vagues et comparaison avec passé récent	166
5.4.1. Simulations avec atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR	166
5.4.2. Simulations avec atténuation des vagues selon les formules empiriques	175
5.4.3. Synthèse sur le futur climat de vagues	183
6. Conclusions	204
Références	206
Annexe 1 : Distances de fetch pondérées aux sites d'étude	213
Annexe 2 : Description de GENEREUX	215
Annexe 3 : Code de prétraitement des vents pour GENER	221
Annexe 4 : Validation du modèle EC, séries chronologiques et distributions probabilistes des paramètres de vagues	227
Annexe 5 : Évaluation du climat pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et estimation de son évolution future	243
Annexe 6 : Roses de vent de MERRA (non-corrigé) 1981-2012 pour l'ensemble du golfe	249
Annexe 7 : Roses de vent de MRCC-aev 1981-2010 pour l'ensemble du golfe	251
Annexe 8 : Roses de vent de MRCC-ahj 1981-2010 pour l'ensemble du golfe	253

Liste des figures

Figure 1. Carte de localisation des sites d'études.	27
Figure 2. Localisation du site de Saint-Ulric avec la position de l'AWAC, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN.	29
Figure 3. Localisation du site de Cap d'Espoir avec la position de l'AWAC, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN.	30
Figure 4. Localisation du site de Sept-Îles avec la position de l'AWAC, la position modélisée pour le climat futur, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN.	30
Figure 5. Comparaison du vent de MERRA et de la bouée Mont-Louis (C45138), les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleur (rouge : très dense, bleu : peu dense). (a) MERRA U_{10} sans facteur de correction. (b) Directions (c) MERRA U_{10} avec facteur de correction de 1,3 ($MERRA_{corr}$). (d) Q-Q plot de U_{10}	36
Figure 6. Comparaison du vent de MERRA et de la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine, les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleur (rouge : très dense, bleu : peu dense). (a) MERRA U_{10} sans facteur de correction. (b) Directions (c) MERRA U_{10} avec facteur de correction de 1,15 ($MERRA_{corr}$). (d) Q-Q plot de U_{10}	37
Figure 7. Vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MERRA 1980-2012 (sans facteur de correction). Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence.	38
Figure 8. Réchauffement global durant le XXI ^e siècle selon des modèles climatiques utilisant différents scénarios d'émission de CO ₂ (GIEC., 2007).	39
Figure 9. Comparaison entre les simulations climatiques utilisées et l'ensemble des simulations disponibles auprès d'Ouranos pour la température et des précipitations, (A) moyenne annuelle pour 1971-2000, (B) moyenne annuelle pour 2041-2070, (C) moyenne décembre-janvier-février pour 1971-2000, (D) moyenne décembre-janvier-février pour 2041-70.	41
Figure 10. Vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MRCC-aev 1981-2010. Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence.	42
Figure 11. Vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MRCC-ahj 1981-2010. Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence.	43
Figure 12. GPDs ajustées (lignes pleines) et intervalles de confiance 95% (lignes traitillées) avec des seuils sélectionnés selon les percentiles 90% (gris), 93% (rouge), 96% (bleu) et 99% (noir) à 49,42°N / 66,31°W (a) et 48,46°N / 62,71°W (b).	51
Figure 13. Illustration de l'algorithme de prétraitement de vent. (A) Sélection des points de grilles marins à moins de la distance de fetch pondérée (en pointillé rouge) dans un secteur de 90° pour une des seize directions θ (flèches en bleu). (B) Distances de fetch pondérées pour les seize directions θ (en pointillés rouges), vecteurs de vent moyenné pour chacune des seize directions (flèches noires quand dirigés vers le site d'étude, flèches grises quand s'éloignant du site d'étude), vecteur retenu (ellipse verte).	59

Figure 14. (A) Exemple de carte de glace avec les codes de l'œuf pour chaque zone. (B) Concentration de la glace (en nombre de dixième) avec les données numériques DEX du même jour importées dans Matlab.	61
Figure 15. Concentration totale de glace dans le golfe (bleu) et degrés-jour de gel calculés pour l'hiver (vert). L'hiver 2002-2003 (en haut) est un hiver relativement froid, alors que l'hiver 2009-2010 (en bas) est un hiver chaud.	64
Figure 16. Régressions linéaires entre les paramètres issus du nombre de degrés-jour de gel (abscisse) et ceux issus des cartes de glace (ordonnée) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du St-Laurent.	65
Figure 17. Régression linéaire entre les paramètres de degrés-jour de gel (abscisse) et la présence de glace (ordonnée) pour les trois sites des AWACs, dans un rayon de 50 km (bleu) et 100 km (vert).	66
Figure 18. Température moyennée entre le 1er octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour l'ensemble du golfe. La courbe du CGCM3 correspond à la moyenne (minimum et maximum représenté en jaune pâle) des 5 membres simulant le scénario A2. Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.	69
Figure 19. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) pour l'ensemble du golfe.	70
Figure 20. Résultats des relations empiriques appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour l'ensemble du golfe, le trait plein correspond à la moyenne des résultats obtenus par les différentes simulations, et la zone ombragée illustre le minimum et le maximum obtenus pour chaque année. Les étoiles correspondent aux données de glace SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.	71
Figure 21. Température moyennée entre le 1er octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (50 km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.	73
Figure 22. Température moyennée entre le 1er octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (100km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.	74
Figure 23. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) dans un rayon de 50 et 100 km autour du site de Saint-Ulric.	75
Figure 24. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) dans un rayon de 50 et 100 km autour du site de Cap d'Espoir.	76
Figure 25. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) dans un rayon de 50 et 100 km autour du site de Sept-Îles.	77
Figure 26. Résultats des relations empiriques du tableau 84 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Saint-Ulric. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.	78

Figure 27. Résultats des relations empiriques du tableau 84 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Cap d'Espoir. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.	79
Figure 28. Résultats des relations empiriques du tableau 84 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Sept-Îles. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.	80
Figure 29. Schéma décrivant la méthode d'atténuation des vagues produites par GENER. a) Série temporelle fictive de hauteur significative des vagues telle que produite par GENER pour une année; b) Série (a) tronquée de novembre à avril, période sur laquelle on présume une absence de vagues due à la glace; c) Séries temporelles du coefficient d'atténuation des vagues pour plusieurs années, illustrant une disparition progressive de la banquise par un raccourcissement de l'hiver et une diminution de la concentration de glace; d-g) Série temporelle en (a) sur laquelle ont été appliqués les différents masques temporels d'atténuation. La courbe en gris représente la série non-atténuée.	82
Figure 30. Indice d'impact cumulé de la glace sur le régime de vagues hivernal selon les relations empiriques, pour le golfe et chacun des sites des AWACs (50 et 100 km). Le trait plein représente la moyenne des différents scénarios, et la zone ombragée indique le minimum et le maximum pour chaque hiver.	84
Figure 31. Grille du modèle MOR; en gris : points de grille utilisés pour calculer le coefficient d'atténuation; en noir : points de grille exclus du calcul; cercles bleus : sites d'étude.	85
Figure 32. Fonction pour convertir la couverture moyenne de glace en coefficient d'atténuation des vagues par la glace (coefficient 0 = aucune atténuation, coefficient 1 = atténuation totale).	86
Figure 33. Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours de 1981 à 2100 à partir de la simulation MOR-aev.	88
Figure 34. Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours de 1981 à 2100 à partir de la simulation MOR-ahj.	89
Figure 35. Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours à partir de la simulation MOR-ahj, détail pour 2005 à 2009.	90
Figure 36. Indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les deux simulations MOR-aev et MOR-ahj, calculé comme la somme du coefficient d'atténuation pour chaque hiver.	91
Figure 37. Lissage de l'indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les deux simulations MOR-aev (traits continus) et MOR-ahj (traitillés).	91
Figure 38. Localisation des sites d'étude, emprise des domaines de propagation, et position des stations de mesure de vagues.	94
Figure 39. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.	100
Figure 40. Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011 Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	101

Figure 41. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les 10% des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.....	102
Figure 42. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue.....	103
Figure 43. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.....	104
Figure 44. Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	105
Figure 45. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les 10% des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.....	106
Figure 46. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue	107
Figure 47. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.	108
Figure 48. Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	109
Figure 49. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les 10% des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.....	110
Figure 50. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue.....	111
Figure 51. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre T_{02} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.....	118
Figure 52. Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	119
Figure 53. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant aux 10% des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.	120
Figure 54. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre T_{02} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011.....	121
Figure 55. Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	122
Figure 56. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant aux 10% des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.	123
Figure 57. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre T_{02} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.	124

Figure 58. Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	125
Figure 59. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant aux 10% des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.	126
Figure 60. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre directions moyennes prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.	131
Figure 61. Population et valeur moyenne des classes de D_m prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	132
Figure 62. Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Sept-Îles.	133
Figure 63. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre directions moyennes prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011.	134
Figure 64. Population et valeur moyenne des classes de D_m prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	135
Figure 65. Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Cap d'Espoir.	136
Figure 66. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre directions moyennes prédites et mesurées à Saint-Ulric du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011.	137
Figure 67. Population et valeur moyenne des classes de D_m prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.	138
Figure 68. Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Saint-Ulric.	139
Figure 69. Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions moyennes par classes de hauteurs significatives pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.	146
Figure 70. Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions moyennes par classes de hauteurs significatives pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.	150
Figure 71. Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions moyennes par classes de hauteurs significatives pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.	154
Figure 72. Diagramme quantile-quantile (Q-Q plot) comparant les mesures de la bouée C45138 (Mont-Louis) avec les résultats de GENER utilisant la formule CEM pour les périodes 1991-2012 et 2010-2012.	159
Figure 73. Diagrammes quantile-quantile (Q-Q plot) de H_s mesuré et de H_s prédit par GENER pour les quatre sites et les cinq formules de fetch.	160
Figure 74. Diagrammes quantile-quantile comparant les climats de vagues calculés par GENER avec d'une part les vents MERRA _{corr} , et d'autre part les vents MRCC-aev	

et MRCC-ahj, pour la période 1981-2010 aux cinq sites (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups).	162
Figure 75. Climat de vagues calculé par GENER avec les vents MERRA _{corr} pour 1981-2010, avec les fréquences de dépassement 1% et 10% ainsi que les périodes de retour de 10 ans et 100 ans.	164
Figure 76. Comparaison des climats de vagues calculés par GENER avec d'une part les vents MERRA _{corr} , et d'autre part les vents MRCC-aev et MRCC-ahj, pour la période 1981-2010. Sont présentées les différences MRCC moins MERRA _{corr} pour les fréquences de dépassement 1% et 10% ainsi que les périodes de retour de 10 ans et 100 ans.	165
Figure 77. Variations des indicateurs climatiques calculés avec une fenêtre mobile de 30 ans pour le site Mont-Louis avec les vagues MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR-aev (chaque valeur représente les 30 années précédentes). Les traits verticaux rouges indiquent les périodes décrites dans le tableau 11.	170
Figure 78. Pour chaque site et chaque simulation de vent, comparaison du climat de vagues 1981-2010 avec les climats futurs (2041-2070 et 2071-2100), calculés avec l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR, ainsi que sans atténuation (pas de glace) pour 2071-2100.	171
Figure 79. Exemple de la variabilité associée aux différents scénarios de glace (formules empiriques), avec les trois périodes de 30 ans identifiées par des couleurs. À gauche : probabilité de dépassement, à droite : période de retour.	177
Figure 80. Comparaison des climats de vagues avec les vents MRCC-aev (en rouge) et MRCC-ahj (en bleu) avec différents scénarios de glace pour le site A, période 1981-2010. Le traitillé supérieur est le scénario sans glace, la plage colorée est l'enveloppe de six scénarios de glace (formules empiriques), le traitillé inférieur correspond à une couverture de glace continue du 15 décembre au 15 mars. À gauche : probabilité de dépassement, à droite : période de retour.	177
Figure 81. Évolution temporelle des climats de vagues (hauteur de la période de retour de 50 ans) sur des périodes de 30 ans pour les vents MRCC-aev et MRCC-ahj et pour les cinq sites d'études (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du modèle MOR (en vert), sans aucune atténuation en rouge.	186
Figure 82. Évolution temporelles des climats de vagues (hauteur de fréquence de dépassement 0.1%) sur des périodes de 30 ans pour les vents MRCC-aev et MRCC-ahj et pour les cinq sites d'études (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du modèle MOR (en vert), sans aucune atténuation en rouge.	187
Figure 83. Évolution temporelles des climats de vagues (énergie moyenne des vagues) sur des périodes de 30 ans pour les vents MRCC-aev et MRCC-ahj et pour les cinq sites d'études (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace	

	sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du modèle MOR (en vert), sans aucune atténuation en rouge.	188
Figure 84.	Roses de vagues à Saint-Ulric avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	189
Figure 85.	Roses de vagues à Saint-Ulric avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	190
Figure 86.	Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 185 pour les explications.	191
Figure 87.	Roses de vagues à Cap d'Espoir avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	192
Figure 88.	Roses de vagues à Cap d'Espoir avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	193
Figure 89.	Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 185 pour les explications.	194
Figure 90.	Roses de vagues à Sept-Îles avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	195
Figure 91.	Roses de vagues à Sept-Îles avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	196
Figure 92.	Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Sept-Îles avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 185 pour les explications.	197
Figure 93.	Roses de vagues à Mont-Louis avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).	198
Figure 94.	Roses de vagues à Mont-Louis avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des	

	vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).....	199
Figure 95.	Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Mont-Louis avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 185 pour les explications.	200
Figure 96.	Roses de vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).....	201
Figure 97.	Roses de vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).....	202
Figure 98.	Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 185 pour les explications.	203
Figure 99.	Illustration graphique des distances de fetch pondérées aux sites d'étude.....	213
Figure 100.	Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.	227
Figure 101.	Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, incluant la période d'englacement.....	228
Figure 102.	Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.	229
Figure 103.	Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.	230
Figure 104.	Distribution probabiliste des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.	231
Figure 105.	Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011.	232
Figure 106.	Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, incluant la période d'englacement.....	233
Figure 107.	Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.	234

Figure 108. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011.	235
Figure 109. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.	236
Figure 110. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011.	237
Figure 111. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011, incluant la période d'englacement.	238
Figure 112. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.	239
Figure 113. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011.	240
Figure 114. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.	241
Figure 115. Climat de vagues (H_s 1% et H_s 50 ans) pour la période 1981-2010 évalué à partir de la réanalyse MERRA sans (a et b) et avec (c et d) glace de mer. Les écarts entre les climats évalués sans et avec glace ([sans glace] – [avec glace]) sont présentés en (e) et en (f).	244
Figure 116. Écarts des H_s 1% entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 évalués à partir des simulations MRCC-aev (a et b) et MRCC-ahj (c et d) sans (a et c) et avec (b et d) glace de mer.	245
Figure 117. Écarts des H_s 50 ans entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 évalués à partir des simulations MRCC-aev (a et b) et MRCC-ahj (c et d) sans (a et c) et avec (b et d) glace de mer. Les écarts calculés selon [2071-2100] – [1981-2010] sont exprimés en pourcentage.	246
Figure 118. Écarts en pourcentage entre les climats de vagues (H_s 1% et H_s 50 ans) évalués avec et sans glace de mer ([sans glace] – [avec glace]) pour les périodes 1981-2010 (a, b, e et f) et 2071-2100 (c, d, g et h) à partir des simulations MRCC-aev (a, b, c et d) et MRCC-ahj (e, f, g et h).	247

Liste des tableaux

Tableau 1. Positions des houlographes (sites A, B, C et ML) et des sites modélisés pour le climat futur (sites A, B, C, ML et IMC).	28
Tableau 2. Comparaison de données de vents de MERRA avec les mesures à la bouée du Mont-Louis (C45138) et à la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine (IdlM).	36
Tableau 3. Listes des formules de fetch disponible dans GENER.....	54
Tableau 4. Équations des droites de régression entre les paramètres issus des degrés-jour de gel et de ceux issus des cartes de glace, avec leur coefficient de corrélation respectif. Les coefficients supérieurs à 0,80 sont indiqués en gras.	67
Tableau 5. Période de résidence des glaces de mer pour l'hiver 2010-2011 dans un rayon de 40 km autour de chaque site.	96
Tableau 6. Caractérisation statistique des relations entre hauteurs significatives, périodes moyennes et directions prédites et mesurées en fonction des classes de hauteur significative mesurées à Sept-Îles du 4 mai 2010 au 31 décembre 2011.	142
Tableau 7. Caractérisation statistique des relations entre hauteurs significatives, périodes moyennes et directions prédites et mesurées en fonction des classes de hauteur significative mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.	147
Tableau 8. Caractérisation statistique des relations entre hauteurs significatives, périodes moyennes et directions prédites et mesurées en fonction des classes de hauteur significative mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.....	151
Tableau 9. Comparaison des résultats de GENER en utilisant différentes formules de fetch avec les données mesurées en 2010-2012. AWAC-A : Saint-Ulric, AWAC-B : Cap d'Espoir, AWAC-C : Sept-Îles, Bouée C45138 : Mont-Louis.....	158
Tableau 10. Fréquence de dépassement et période de retour des climats de vagues calculés par GENER avec les vents MERRA _{corr} , MRCC-aev et MRCC-ahj, pour la période 1981-2010.	163
Tableau 11. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR.....	168
Tableau 12. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-ahj et l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR.	169
Tableau 13. Liste des scénarios d'atténuation de glace (formules empiriques) appliqués en post-traitement sur les sorties de GENER (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups).	175
Tableau 14. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Saint-Ulric. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.	178
Tableau 15. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et	

l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Cap d'Espoir. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.	179
Tableau 16. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Sept-Îles. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.	180
Tableau 17. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Mont-Louis. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.	181
Tableau 18. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Pointe-aux-Loups. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.	182
Tableau 19. Distances de fetch pondérées en km aux sites d'étude.	213

Liste des symboles et abréviations

Identifiant pour les sites d'étude (cf. section 2.1)

A	Saint-Ulric
B	Cap d'Espoir
C	Sept-Îles
ML	Bouée du Mont-Louis
IMC	Pointe-aux-Loups

Symboles

a	Coefficient directeur (pente) de la droite de régression (équation 7a)
b	Ordonnée à l'origine (offset) de la droite de régression (équation 7b)
cor	Coefficient de corrélation linéaire pour données directionnelles
D	Indice de similitude (<i>index of agreement</i> , équation 10)
d	Profondeur (m)
$début-PG$	Début de la période de gel (jours avant/après le 1 ^{er} janvier à minuit)
Dir ou D_{mean}	Direction moyenne de la provenance des vagues (°)
DJG	Degrés-jour de gel (par rapport au point de congélation de l'eau de mer, -1.9°C)
DJG_{max}	Maximum atteint par la courbe des degrés-jour de gel
E_{moy}	Énergie moyenne des vagues (J/m ²)
F	Distance de fetch pondérée en (m) ou si limité par la durée, fetch équivalent (m)
F_i	Fetch mesuré pour une direction (m)
$fin-PG$	Fin de la période de gel (jours avant/après le 1 ^{er} janvier)
g	Gravité (m/s ²)
$G(z)$	Distribution cumulative des valeurs extrêmes
h	Série chronologique de données simulées (<i>hindcasted</i>)
$\hat{h}$	Application sur m des coefficients obtenus par régression linéaire simple entre h et m
$H_{1/3}$	Hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues (m)
H_{m0}	Hauteur significative des vagues calculée par méthode spectrale(m)
H_s	Hauteur significative, calculé soit par méthode spectrale (H_{m0}), soit par méthode zéro-crossing ($H_{1/3}$) (m)

$H_s 1\%$	Hauteur significative pour la fréquence de dépassement 1% (m)
$H_s 50 \text{ ans}$	Hauteur significative des tempêtes avec période de retour de 50 ans (m)
m	Série chronologique de données mesurées (<i>measured</i>)
MAE	Erreur absolue moyenne (<i>mean absolute error</i> , équation 2)
MAE°	Erreur angulaire absolue moyenne
MB	Biais (équation 1)
MSE	Erreur quadratique moyenne (<i>mean squared error</i> , équation 4)
MSE_S	Erreur quadratique moyenne systématique (<i>systematic MSE</i> , équation 4, 4a)
MSE_u	Erreur quadratique moyenne aléatoire (<i>unsystematic MSE</i> , équation 5, 5a)
PG	Période de gel (en dessous du point de congélation de l'eau de mer)
P_s	Critère de performance global pour données non-directionnelles (<i>overall performance score</i> , équation 9)
R^2	Coefficient de détermination (équation 8)
$RMSE$	Racine de l'erreur quadratique moyenne (root mean squared error, équation 3)
$RMSE_S$	Racine de l'erreur quadratique moyenne systématique (systematic RMSE équation 4)
$RMSE_u$	Racine de l'erreur quadratique moyenne aléatoire (unsystematic RMSE équation 5)
t	Durée du vent (s)
T_{02}	Période moyenne des vagues (s)
T_p	Période du pic d'énergie du spectre des vagues (s)
T_s	Période significative, période moyenne du tiers des vagues le plus grand (s)
U	Vitesse du vent à 10 m (m/s)
α	Coefficient d'atténuation des vagues par la glace (0 = pas d'atténuation, 1 = atténuation totale)
$\hat{\kappa}$	Concentration approximative (<i>approximate concentration</i> , équation 12)
μ	Paramètre de position de distribution d'extrême (cf. section 2.6)
ξ	Paramètre de forme de distribution d'extrême (cf. section 2.6)
σ	Paramètre d'échelle de distribution d'extrême (cf. section 2.6)
σ_d	Écart-type de l'erreur (sde, standard deviation of error, équation 6) entre valeur prédite (h) et mesurée (m)
χ^2	Khi carré (test statistique, cf. 5.2)

Liste des abréviations

ADCP	Profileur de courant à effet Doppler acoustique (Acoustic Doppler Current Profiler)
aev	Simulation 1961-2100 du MRCC (cf. section 2.4.2)
ahj	Simulation 1961-2100 du MRCC (cf. section 2.4.2)
AWAC	(Aussi AWAC-AST), le modèle d'ADCP utilisé pour mesurer les vagues à Saint-Ulric, à Cap d'Espoir et à Sept-Îles
CEM-03	Formule de fetch du Coastal Engineering Manual (Resio, 2002; cf. section 3.3.4)
CGCM	Modèle canadien du climat global (Canadian Global Climate Model, cf. section 4.3.2)
DEX	Format des données numériques de glace du SCG
DON-80	Formule de fetch de Donelan (1980) (cf. section 3.3.6)
EC ou modèle EC	Modèle numérique des vagues pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent opéré par Environnement Canada (cf. section 2.3.1)
ECHAM	Modèle global de circulation couplé océan-atmosphère de l'institut Max-Planck (cf. section 2.4.2)
HRM	Modèle atmosphérique régional de Hadley (Hadley Regional Model 3, cf. section 2.4.2)
IPCC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (<i>International Panel on Climate Change</i>), GIEC en français
JONSWAP	JOint North Sea Wave Project (Hasselmann et al., 1973)
JON-73	Formule de fetch issue du projet JONSWAP (Hasselmann et al., 1973; cf. section 3.3.3)
GEM	Modèle numérique de prévision météorologique opéré par Environnement Canada
GENER	Modèle de vague paramétrique (de fetch) (cf. section 3)
GENEREUX	GENER compatible Linux (cf. section 3.2)
GES	Gaz à effet de serre
GEV	Distribution généralisée des valeurs extrêmes (Generalized extrem values, cf. section 2.6)
GFDL	Modèle de climat global couplé océan-atmosphère (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, cf. section 2.4.2)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
GPD	Distribution généralisée de Pareto (Generalized Pareto Distribution, cf. section 2.6)

MERRA	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, modèle atmosphérique de réanalyse (cf. section 2.4.1)
MERRA _{corr}	Vents du modèle MERRA avec un facteur de correction (cf. section 2.4.1)
MCGOA	Modèles de circulation générale océan-atmosphère (cf. section 2.4.2)
MOR	Modèle océanographique régional pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, opéré par l'ISMER
MRCC	Modèle régional canadien du Climat, modèle atmosphérique climatique, dont les deux simulations MRCC-aev et MRCC-ahj sont utilisés les vents et les températures futures (cf. section 2.4.2)
MRCC-aev	Simulation 1961-2100 du MRCC (cf. section 2.4.2)
MRCC-ahj	Simulation 1961-2100 du MRCC (cf. section 2.4.2)
NARR	North American Regional Reanalysis, modèle atmosphérique de réanalyse (cf. section 2.4.1)
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program, modèle de climat global nord-américain (cf. section 4.3.2)
NCEP	Centre états-unien de prévisions atmosphériques (National Center for Atmospheric Prediction, cf. section 2.4.1)
POT	Méthode du pic au-delà du seuil (<i>Peak Over Threshold</i>)
SCG	Service canadien des Glaces
SHC	Service hydrographique du Canada
SRTM	Données altimétriques de topographie terrestre issues des missions spatiales de la NASA (Shuttle Radar Topography Mission, cf. section 2.3)
SPM-77	Formule de fetch du Shore Protection Manual (USACE, 1977; cf. section 3.3.1)
SPM-84	Formule de fetch du Shore Protection Manual (CERC, 1984; cf. section 3.3.2)
SWAN	Modèle spectral de vague (Simulating WAVes Nearshore, cf. section 2.3.2)
WIL-65	Formule de fetch de Wilson (1965) (cf. section 3.3.5)
WAM	Modèle spectral de vague (WAVE Model, cf. section 2.3.1)

Remerciements

Au terme de ce projet, les auteurs expriment leurs remerciements à toutes les personnes y ayant contribué, et particulièrement à :

- Michel Michaud (MTQ – Service de la coordination de la recherche et de l'innovation, Direction de l'environnement et de la recherche) pour la mise en place et la coordination administrative du projet.
- Christian Poirier et Daniel Lavallée (MTQ – Module hydraulique, Direction des structures) pour leurs explications sur le fonctionnement de GENER ainsi que leurs idées et commentaires pertinents lors des réunions d'avancement.
- James Caveen (ISMER) pour la conversion de GENER de C++ Visual Studio en C++ standard et l'assistance informatique de tous les instants.
- Simon Senneville (ISMER) pour la mise à disposition des données bathymétriques et des forçages météo-marins issus du Modèle Océanique Régional du golfe du Saint-Laurent (MOR).
- Simon St-Onge Drouin (ISMER) pour l'extraction des données de glace du modèle MOR
- Corina Rosu et Blaise Gauvin Saint-Denis (Ouranos) pour la mise à disposition des données de modèles climatiques.
- Hélène Côté et Travis Logan (Ouranos) pour les explications et les figures sur la variabilité inter-membre des modèles climatiques.
- Yann Ropars pour son expertise des vagues en génie côtier et ses conseils sur l'utilisation de GENER.

Les données du MRCC ont été générées et fournies par Ouranos. Nous remercions le « *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP) » de nous avoir fourni les simulations HRM3 et RCM3.

Ce projet est financé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec, Action 23C – volet érosion côtière.

1. Introduction

Ce projet de modélisation du futur climat de vagues de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent est financé par le ministère des Transport du Québec (MTQ) en vertu d'un contrat de recherche entre le MTQ et l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) / Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER). Les partenaires du projet sont le MTQ, l'ISMER, le consortium Ouranos et Environnement Canada (EC).

Contexte

L'érosion des côtes est une problématique qui affecte la majorité des côtes mondiales (Bird, 1985; Komar, 1998; Paskoff, 2001; Stone et Orford, 2004). L'élévation du niveau marin moyen durant le XX^e siècle (Meyssignac et Cazenave, 2012), la variabilité de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, ainsi que le déficit sédimentaire sont parmi les causes importantes d'érosion du littoral. Compte tenu des changements climatiques projetés pour le XXI^e siècle, l'élévation du niveau marin s'accéléra (IPCC, 2007) et le réchauffement entraînera une diminution du couvert de glace (Senneville et Saucier, 2007), qui actuellement atténue fortement les vagues durant l'hiver. L'amplification attendue de ces phénomènes exacerbera les phénomènes d'érosion côtière et de submersion sur les côtes québécoises (Bernatchez et Dubois, 2004). Ces projections sont d'ores et déjà confirmées par des observations récentes montrant que le phénomène d'érosion s'est généralisé et intensifié durant les 15 dernières années (Morissette, 2007).

La concomitance de l'aléa d'érosion/submersion marine et des enjeux socio-économiques situés sur la zone côtière est à l'origine d'un risque élevé. Ce risque affecte particulièrement les biens immobiliers et les infrastructures de transports : routes, voies ferrées, quais, etc. Depuis une vingtaine d'années, des interventions récurrentes de réfection et de protection des infrastructures routières ont dû être réalisées suite aux dommages occasionnés par les événements climatiques, en particulier sur les côtes du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie, de la Côte-Nord et des Îles-de-la-Madeleine.

Les ouvrages côtiers comme les quais, jetées, brises lames et diverses formes de protections côtières pour les infrastructures routières doivent être conçus afin de résister aux conditions environnementales auxquelles ils seront exposés pour une durée de vie utile de 50 à 70 ans (compte tenu d'un entretien normal). Or, en raison des variations des conditions climatiques attendues pour le futur, l'adaptation des critères et normes de conception des ouvrages côtiers constitue un défi particulièrement urgent et difficile à relever pour les ingénieurs. En effet, ces infrastructures sont principalement endommagées lors des événements extrêmes. Il est donc nécessaire de quantifier l'intensité de ces événements (vagues, niveaux d'eau, température) ainsi que leur période de récurrence pour calibrer les ouvrages, c'est-à-dire déterminer les dimensions et les matériaux leur permettant de résister et de demeurer fonctionnel pendant la durée projetée de leur vie utile.

La méthode habituelle pour évaluer les conditions extrêmes environnementales consiste à utiliser les données historiques afin d'établir l'énergie totale ou d'ajuster une distribution statistique

adaptée pour extrapoler les valeurs extrêmes au cours des prochaines décennies. Or, les différentes méthodes utilisées pour cela reposent toutes sur la prémisse que les distributions d'extrêmes sont stationnaires, c'est-à-dire que la probabilité (fréquence ou période de retour) d'un événement extrême demeure constante dans le temps.

Toutefois, les projections climatiques futures prédisent une augmentation de la température, (IPCC, 2007). Compte tenu de ces projections, on s'attend à une diminution de l'emprise et du temps de résidence de la glace de mer hivernale (Senneville et Saucier, 2007). Bien que moins bien documenté, le régime des vents pourrait aussi changer au cours des prochaines décennies, notamment par des changements dans la fréquence, l'intensité et la trajectoire des tempêtes. Ainsi, il est fort probable que l'énergie des vagues approchant des côtes du Saint-Laurent sera considérablement modifiée et que les distributions statistiques des hauteurs et des directions de vagues ne seront plus du tout comparables à leurs valeurs historiques.

On ne peut donc plus se fier uniquement à des projections statistiques basées sur les données historiques pour évaluer l'exposition des infrastructures côtières aux conditions extrêmes futures. Pour pallier à ces difficultés, il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes permettant d'estimer les distributions moyennes et extrêmes des vagues approchant les zones côtières du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent.

Objectifs

L'objectif général du projet est de développer une méthode pour améliorer les statistiques de vagues à utiliser pour la conception des ouvrages côtiers, notamment les infrastructures de protection des routes côtières et des infrastructures maritimes, dans un contexte de changements climatiques. Cet objectif général comporte deux sous-objectifs :

Le premier sous-objectif consiste à valider le modèle unidimensionnel (modèle de fetch) utilisé actuellement par le MTQ pour calibrer les ouvrages de protection et à l'adapter en l'alimentant avec des vents produits par des modèles de climat. Ce sous-objectif vise aussi à prendre en compte l'atténuation saisonnière des vagues par les glaces dans le contexte du climat futur.

Le deuxième sous-objectif est de fournir au MTQ une indication des tendances futures du régime des vagues dans le golfe du Saint-Laurent afin que le ministère puisse adapter la gestion et les opérations d'entretien des infrastructures et procéder à la mise à niveau des ouvrages de protection existants.

Démarche

Il n'existe pas de séries de mesures de vagues suffisamment longues pour définir des climats de vagues dans le golfe du Saint-Laurent. Quelques séries de durée courte à moyenne sont néanmoins disponibles : trois sites côtiers équipés de houlographes AWAC depuis 2010 (Saint-Ulric, Cap d'Espoir et Sept-Îles; cf. section 2.2) et la bouée de Mont-Louis au large depuis 1991 (cf. section 5.2). Le recours à des modèles vent-vagues est donc obligatoire, qui pourront toutefois être validés avec ces séries mesurées.

L'évaluation des variations du climat de vagues à différents sites nécessite le calcul des vagues pour plusieurs périodes de trente ans. La simulation de si longues périodes avec des modèles de vagues spectraux demanderait de trop grandes capacités de calcul. C'est pourquoi le projet utilise principalement le modèle paramétrique de vague GENER (Desjardins et Ouellet, 1984), qui est basé sur des formules de fetch, pour modéliser les futures vagues. Les sorties du modèle numérique de vague d'Environnement Canada (modèle EC), qui sont disponibles depuis 2003, sont également utilisées.

La méthode proposée pour obtenir une représentation de la distribution des vagues du futur comporte les cinq étapes suivantes :

- 1) Validation du modèle EC avec les données des AWACs disponibles depuis 2010 pour Saint-Ulric, Cap d'Espoir et Sept-Îles. Comme le modèle EC a une grille de 5×5 km peu adaptée pour les sites côtiers des AWACs, le modèle de vagues côtier SWAN est imbriqué au modèle EC à proximité des AWACs (sections 2.3 et 5.1). Cette étape visait initialement à s'assurer que le modèle GENER puisse être validé avec le modèle EC, mais finalement le modèle GENER a été validé directement avec les données expérimentales.
- 2) Modifications à GENER pour notamment pouvoir l'utiliser en traitement par lot (*batch mode*) et ajout de différentes formules de fetch; et développement d'un algorithme de prétraitement de vents à partir de champs de vents de modèles atmosphériques (cf. section 3). Validation de GENER modifié avec les données de terrain (stations AWACs depuis 2010, bouée du Mont-Louis depuis 1991, cf. section 5.2).
- 3) Développement d'une méthode pour représenter l'atténuation des vagues par la glace de mer pour le XXI^e siècle. Deux approches sont utilisées : (i) détermination de formules empiriques utilisant la température de l'air, et (ii) utilisation des sorties de glace d'un modèle océanique incluant la glace (section 4). Les fonctions d'atténuation obtenues peuvent être appliquées aux vagues simulées par GENER.
- 4) Comparaison des sorties de GENER alimenté d'une part avec des vents de réanalyses, d'autre part avec des modèles climatiques sur une période commune de 30 ans, afin de s'assurer que les vents des modèles climatiques conviennent pour obtenir des climats de vagues réalistes avec GENER (section 5.3).
- 5) Comparaison des climats de vagues calculés par GENER (sur lesquels est appliquée l'atténuation des vagues par la glace) avec les vents du modèle climatique MRCC pour les périodes 1981-2010 (passé récent), 2041-2070 (futur proche) et 2071-2100 (futur lointain). Cette comparaison permet d'estimer les tendances concernant l'énergie des vagues aux sites d'étude (section 5.4).

Autres publications

Des parties de ce projet ont constitué les sujets de recherche de deux étudiants à la maîtrise en océanographie, Benoit Ruest et Eliott Bismuth, qui déposeront leur mémoire en 2014.

Ce projet a produit à ce jour plusieurs autres publications :

- Trois rapports d'étapes, dont l'essentiel du contenu est repris dans le présent rapport final,
- Un rapport technique sur l'évaluation du modèle EC pour la période automne 2010 (Lambert et al, 2012a).
- Des affiches ou des présentations orales aux réunions annuelles ou au colloque du regroupement stratégique Québec-Océan (Lambert et al., 2011; Bismuth et al., 2012; Ruest et al., 2012; Lambert et al., 2012b),
- Une affiche à la réunion d'automne 2012 de American Geophysical Union (AGU Fall Meeting) à San Francisco (Lambert et al., 2012c),
- Une présentation orale au 5^e symposium scientifique d'Ouranos à Montréal (Neumeier et al., 2012),
- Une présentation orale et un papier dans les comptes-rendus de la conférence Coastal Dynamics 2014 à Arcachon/France (Ruest et al., 2013).

Dans le cadre du projet, un stage de deux mois et demi a été effectué par l'étudiant Benoit Ruest au Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF) à Plouzane près de Brest (France) sur l'utilisation des mesures de vents satellites par diffusiomètre pour la calibration d'un atlas de vagues.

Un autre stage de trois semaines a été effectué par l'étudiant Eliott Bismuth à la société Océanide à La-Seyne-sur-mer près de Toulon (France) pour étudier en bassin à houle l'interaction vagues-glace avec des modèles de floes.

Enfin, en août 2013, Adrien Lambert a donné une formation de trois jours sur l'utilisation du modèle de vague SWAN à l'équipe du Service de la conception du MTQ (Christian Poirier, Daniel Lavallée, Thomas Thibault et Philippe-Hubert Roy-Gosselin).

2. Méthodologie générale

2.1. Sites d'étude

Le climat de vagues et les performances des modèles de vagues ont été étudiés aux trois sites principaux prévus initialement pour ce projet : Saint-Ulric (site A), Cap d'Espoir (site B) et Sept-Îles (site C; Figure 1; Tableau 1). À chacun de ces sites, les vagues sont mesurées depuis 2010 avec des houlographes AWAC dans le cadre d'un projet recherche de l'ISMER (Urs Neumeier) financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec (cf. section 2.2).

Deux autres sites ont été ajoutés pour l'évaluation du futur climat de vagues afin de mieux représenter les différentes régions du golfe du Saint-Laurent (GSL) : Mont-Louis (site ML) et Pointe-aux-Loups (site IMC) (Figure 1; Tableau 1). Le site ML en eau profonde correspond à la bouée d'Environnement Canada qui mesure les conditions météorologiques et les vagues depuis 1991 (données de vagues non-directionnelles). Ces données ont aussi été utilisées pour la calibration de GENER. Au site IMC les courants et les vagues ont été mesurées de juillet 2012 à juin 2013 dans le cadre d'un autre projet financé par le MTQ (projet de recherche MTQ X014.1). Toutefois, ces données-là n'ont pas été disponibles à temps pour être utilisé pour le présent projet.

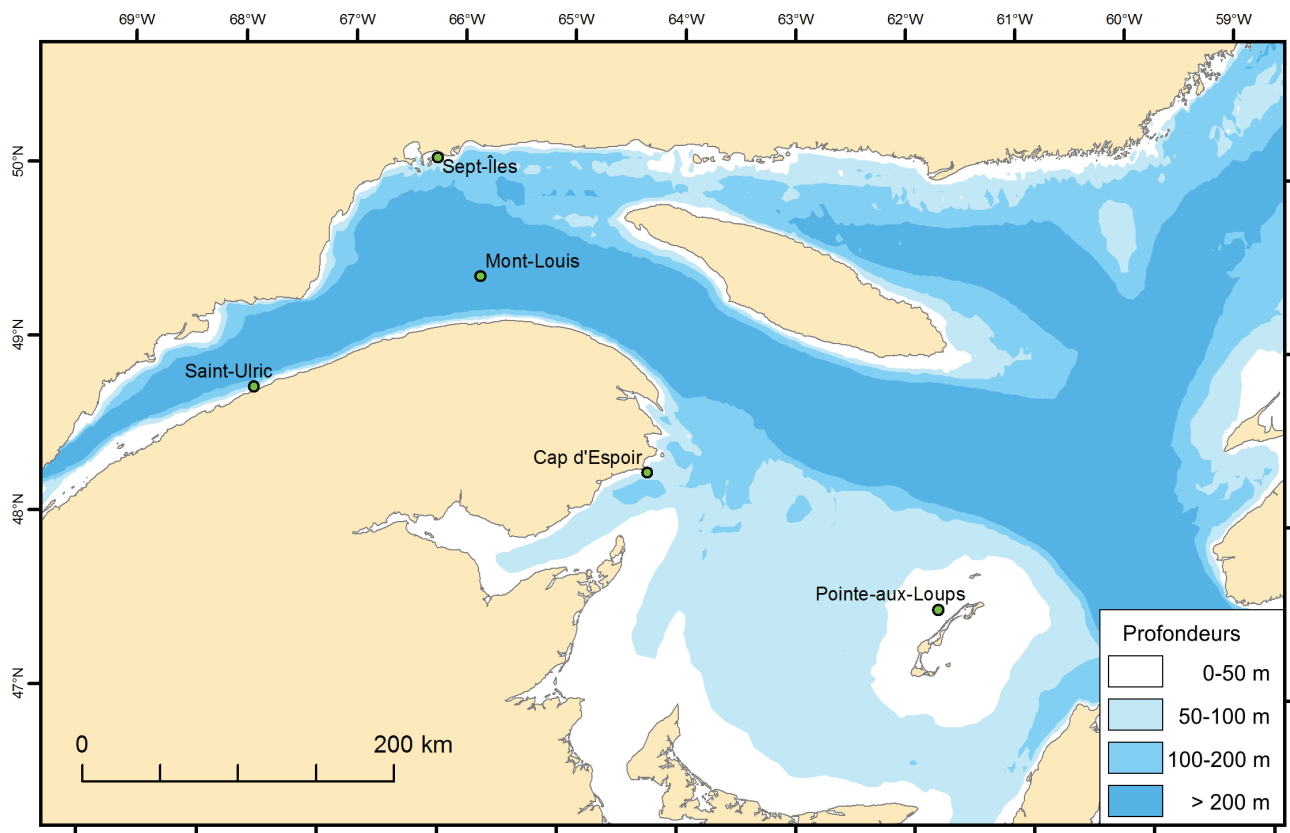


Figure 1. Carte de localisation des sites d'études.

Tableau 1. Positions des houlographes (sites A, B, C et ML) et des sites modélisés pour le climat futur (sites A, B, C, ML et IMC).

ID	Nom	latitude	longitude	Profondeur [#]
A	Saint-Ulric	48° 48' N	67° 44,6' W	34 m
B	Cap d'Espoir	48° 23,35' N	64° 17,35' W	38 m
C [*]	Sept-Îles (AWAC)	50° 10,3' N	66° 13,5' W	29 m
C [*]	Sept-Îles (GENER futur)	50° 06' N	66° 15' W	95 m
ML [‡]	Mont-Louis (GENER validation)	49° 31,8' N	65° 43,2' W	335 m
ML [‡]	Mont-Louis (GENER futur)	49° 30' N	65° 48' W	320 m
IMC	Pointe-aux-Loups	47° 36' N	61° 46,9' W	29 m

[#] Sous le niveau marin moyen

^{*} À Sept-Îles, le site pour la modélisation future avec GENER est plus au large que la position de l'AWAC pour éviter d'être partiellement à l'abri du haut-fond de Moisie et de l'île la Grosse Boule.

[‡] À Mont-Louis, le site pour la validation de GENER correspond exactement à la bouée d'Environnement Canada, alors que le site pour la modélisation future avec GENER est décalé de 6,6 km vers le sud-ouest.

Le site de Saint-Ulric est sur la côte sud de l'estuaire maritime, à 2,3 km au large du village de Saint-Ulric à 34 m de profondeur (Figure 2). La côte est rectiligne. Les vagues ne sont que modérément affectées par la bathymétrie, qui suit une pente régulière vers le large. Il existe deux directions de fetch principales dans l'axe de l'estuaire : 300 km du est-nord-est et 150 km de l'ouest-sud-ouest.

Le site de Cap d'Espoir est au sud de Percé, à 3,8 km au large du Cap d'Espoir, qui marque la limite entre le golfe du Saint-Laurent et la baie des Chaleurs (Figure 3). Le site est à 38 m de profondeur sur le flanc externe du Haut-Fond Leander, qui forme un promontoire sous-marin s'avancant du Cap d'Espoir vers le sud-est. Ce site est largement exposé aux vagues du golfe du Saint-Laurent du nord-est, de l'est, du sud-est et du sud (fetch maximaux de 530 km de l'est-nord-est et 330 km du sud-est), ainsi que des vagues sortant de la baie des Chaleurs du sud-ouest (fetch de 130 km). Toutefois, la présence du plateau madelinien et de reliefs sous-marins affecte la propagation des vagues.

Le site Sept-Îles est situé au sud-est du centre-ville de Sept-Îles dans une région avec une morphologie côtière et une bathymétrie particulièrement complexe (Figure 4). Le site de l'AWAC est à 29 m de profondeur sur un promontoire sous-marin; il est à 4 km devant le quartier de Plage-Routhier, mais seulement à 1,5 km au sud-est des îlots Cayes de l'Est. De plus, il est abrité de l'ouest et du sud-ouest par l'archipel de Sept-Îles (principalement par les îles la Grosse Boule et la Petite Boule) et de l'est par le delta de la rivière Moisie (haut-fond de Moisie). C'est pourquoi un site 8,5 km plus au sud, plus au large que l'archipel de Sept-Îles, est utilisé pour la modélisation du futur climat de vagues (Figure 4, Tableau 1). Le site de Sept-Îles est largement ouvert vers le sud, avec deux directions de fetch dominantes : 250 km du sud-ouest (estuaire du Saint-Laurent) et plus de 600 km du sud-est (golfe du Saint-Laurent, puis au-delà du détroit de

Cabot, océan Atlantique). Il existe aussi une longue distance de fetch de 600 km de l'est, mais les caractéristiques des vagues provenant de cette direction subissent certainement des transformations lors de leur propagation dans le détroit de Jacques Cartier entre l'île d'Anticosti et l'archipel Mingan. Au site de l'AWAC, les vagues sont fortement influencées par la morphologie côtière et la bathymétrie, avec notamment de la réfraction des vagues de l'est et de l'est-sud-est sur le prodelta de la rivière Moisie et de la diffraction des vagues du sud-ouest autour de l'archipel de Sept-Îles.

Le site de Mont-Louis est à 30 km au nord de la Gaspésie, face au village Mont-Louis, dans le chenal Laurentien à plus de 300 m de profondeur. Il est exposé aux vagues de toutes les directions, mais en particulier de l'est-sud-est (fetch de 300 km venant de l'estuaire) et du sud-ouest (plus de 550 km, golfe du Saint-Laurent, puis au-delà du détroit de Cabot, océan Atlantique). Dans cette zone en eau profonde, les vagues ne subissent aucune influence du fond.

Le site de Pointe-aux-Loups est du côté nord-ouest des Îles-de-la-Madeleine, 9 km au large de Pointe-aux-Loups et de la Dune-du-Nord, à une profondeur de 29 m. La côte est rectiligne, orientée nord-est / sud-ouest, mais l'île Brion forme un obstacle 29 km vers le nord-est. Le site est largement exposé vers l'ouest-sud-ouest, l'est, le nord-est, le nord et le nord-nord-est, avec des fetchs dépassant toujours 160 km et atteignant 420 km du nord-ouest à travers le détroit d'Honguedo et plus de 400 km du nord-nord-est. La bathymétrie est régulière, mais le plateau madelinien s'étend au large du site avec des profondeurs de 40-80 m sur des distances de 60 à 200 km selon les directions, ce qui contribue à la dissipation de l'énergie des vagues les plus longues.

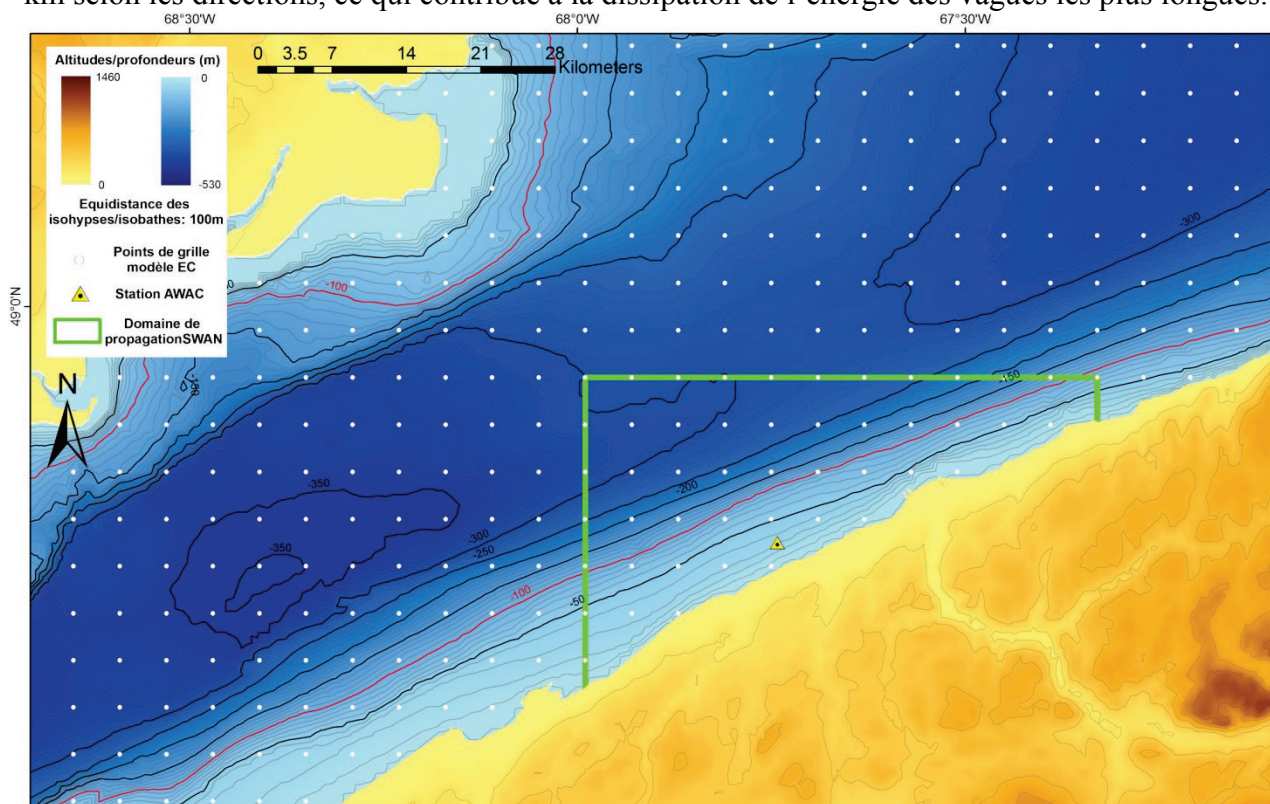


Figure 2. Localisation du site de Saint-Ulric avec la position de l'AWAC, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN.

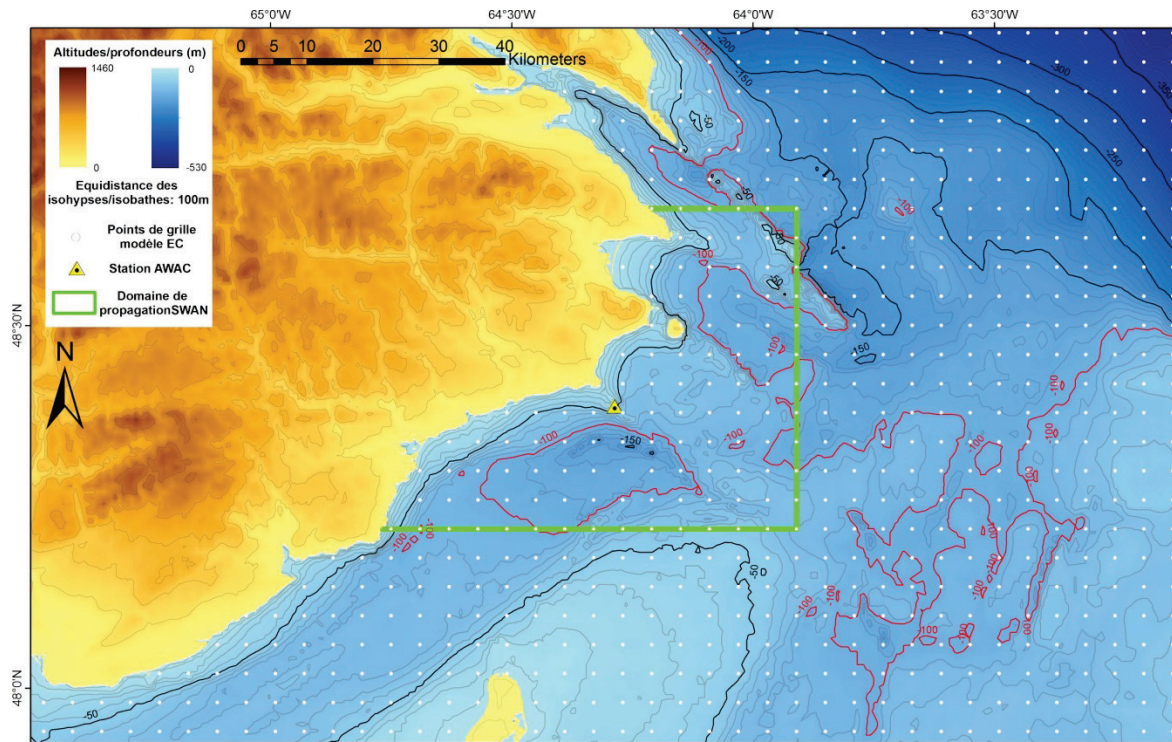


Figure 3. Localisation du site de Cap d'Espoir avec la position de l'AWAC, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN.

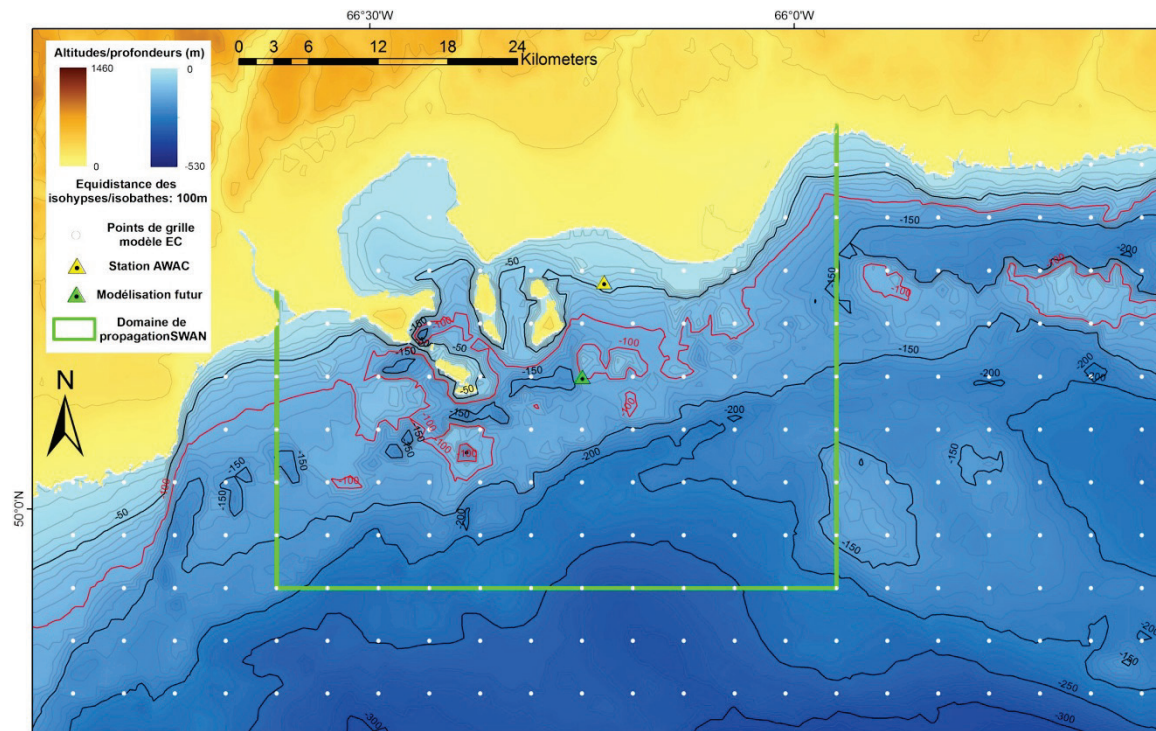


Figure 4. Localisation du site de Sept-Îles avec la position de l'AWAC, la position modélisée pour le climat futur, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN.

2.2. Données de validation expérimentales

Dans le cadre du projet quadriennal "Mouillages pour l'érosion des berges" financé par le ministère de la sécurité publique du Québec, Direction générale de la sécurité civile, des séries chronologiques des caractéristiques de vagues ont été mesurées par l'ISMER (Urs Neumeier) en conditions côtières depuis mai 2010 au large de Saint-Ulric ($48^{\circ} 48,0' \text{ N } 67^{\circ} 44,6' \text{ W}$, profondeur sous le niveau marin moyen 34 m), Cap d'Espoir ($48^{\circ} 23,35' \text{ N } 64^{\circ} 17,35' \text{ W}$, profondeur 38 m) et Sept-Îles ($50^{\circ} 10,3' \text{ N } 66^{\circ} 13,5' \text{ W}$, profondeur 29 m).

Ces données sont enregistrées avec des houlographes AWAC-AST 600 kHz de Nortek (stations AWAC). Ces appareils de type ADCP sont mouillés sur le fond et échantillonnent la colonne d'eau vers la surface. La hauteur et la période des vagues sont déterminées par le faisceau acoustique vertical de l'AWAC, qui mesure la distance entre l'AWAC et la surface de l'eau comme un échosondeur (fréquence d'échantillonnage 2 Hz). La direction des vagues est déterminée par les courants orbitaux mesurés à 1 Hz près de la surface avec les faisceaux obliques de l'AWAC en appliquant le principe de l'effet Doppler acoustique. Ces données, enregistrées à un pas de temps horaire sur une période de 17 minutes, ont été traitées avec le logiciel QuickWave version 2.10 pour calculer la hauteur significative des vagues (H_{m0}), la période moyenne des vagues (T_{02}) et la direction moyenne de provenance des vagues (Dir). Ces résultats sont soumis à un contrôle de qualité. Lorsqu'un des paramètres (H_{m0} , T_{m02} , Dir) est rejeté par le contrôle de qualité, sa valeur est indiquée absente.

La majorité des rejets concerne le paramètre de direction : à une profondeur de 30 m, les stations AWAC ne peuvent déterminer les directions des vagues dont les périodes sont inférieures à $\sim 3,3$ s en raison de la projection à la surface des trois faisceaux acoustiques obliques de l'ADCP, dont l'écartement devient supérieur à la longueur d'ondes des vagues courtes.

Les validations des modèles pour les hauteurs et les périodes sont réalisées sur toutes les données de hauteurs et de périodes disponibles, soit presque tous les échantillons. Pour la validation des directions, les échantillons avec une direction indéterminée ne sont pas utilisés, soit une validation seulement pour les vagues avec une période supérieure à $\sim 3,3$ s. Les échantillonnages utilisés pour la validation des hauteurs/périodes et des directions ne comportent donc pas les mêmes échantillons.

Les validations des hauteurs, des périodes et des directions ont été effectuées sur des échantillonnages différents, alors que ces paramètres sont interdépendants. C'est pourquoi il faut être prudent en reliant les conclusions obtenues pour les hauteurs/périodes à celles obtenues pour les directions.

2.3. Données issues des modèles de vagues

2.3.1. Données issues du modèle d'Environnement Canada (Modèle EC)

WAM (WAVE Model; WAMDI Group, 1988; Komen et al., 1994) cycle IV est un modèle vent-vague de 3^{ième} génération : un modèle pleinement spectral (dans les domaines de fréquence et de direction) qui donne une description bidimensionnelle (2D) de l'état de la mer. Environnement

Canada utilise depuis 2002 pour ses prévisions opérationnelle de l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent la version MW3 « PROMISE » (Pre-Operational Modeling in the Seas of Europe) de WAM (Monbaliu et al., 1999), qui est optimisée pour les estuaires et les bassins océaniques fermés. Il utilise une formulation explicite des processus physiques impliqués dans l'évolution des vagues qui le rend très rapide et précis en eau profonde. Cette formulation requiert néanmoins une grille très fine en domaine côtier et rend donc le modèle moins adapté aux domaines peu profonds. La formulation utilisée pour la génération des vagues est celle de Janssen avec une formulation linéaire de la croissance des vagues de vent (Cavaleri et Malanotte-Rizzoli, 1981). Il intègre également l'action des niveaux d'eau et de courants non-stationnaires sur la transformation des vagues. Il est utilisé avec une grille sphérique de $0,04^\circ$ latitude et $0,06^\circ$ longitude avec une configuration incluant les options suivantes : eaux peu profondes, réfraction des vagues par profondeur et courants, friction sur le fond selon la formulation empirique de Jonswap, et déferlement dû à la profondeur selon Battjes et Janssen (1978). Il est opéré en mode prédiction (temps réel), avec un pas de temps interne de 2 minutes. Ses sorties sont sauvegardées toutes les 3 heures. Elles correspondent donc à un état de la mer à l'instant de la prévision, sans intégration sur le temps.

Le modèle est alimenté par les données de niveau d'eau et de courants de surface issues du modèle océanographique du golfe du Saint-Laurent opéré par Environnement Canada à l'Institut Maurice Lamontagne, ainsi que par les prévisions de vent tri-horaires à 40 m d'altitude issues de GEM, produites toutes les 12 heures et couvrant une période de 48h. Une modélisation du modèle EC des prochaines 48 h est lancée toutes les 12 heures. Les prévisions passées du modèle EC se chevauchent (de 12 h, 24 h, 36 h, et 48 h). Les paramètres H_{m0} , T_{02} et DIR sont sauvegardés aux trois heures. Pour chaque date t existent quatre ou cinq valeurs prédites différentes, celles comprises entre 6h et 15h d'âge (depuis le début de la modélisation) sont considérées comme les plus fiables et sont utilisées dans les comparaisons. Nous disposons donc d'une série chronologique tri-horaire des paramètres de vagues (H_{m0} , T_{02} et DIR) issue du modèle EC à chaque position des stations de mesure entre juillet 2002 et fin novembre 2011 ainsi que sur l'ensemble du golfe et de l'estuaire à chaque point de grille du modèle de 2009 à 2011.

2.3.2. Données issues de SWAN forcé par le modèle EC

SWAN (Simulating WAve Nearshore; Booij et al, 1999) cycle III version 40.85 est aussi un modèle vent-vague de troisième génération. Il utilise les mêmes formulations que WAM pour les termes sources, mais avec une formulation implicite des schémas de propagation dans les espaces spectraux et géographiques, qui sont plus robustes et économiques en ressources que les schémas explicites de WAM. Cette implémentation rend possible l'utilisation d'une grille bathymétrique haute résolution nécessaire à la propagation des vagues en domaine côtier. SWAN est pleinement spectral (directions et fréquences) et permet le calcul de la propagation et l'évolution des vagues en domaine côtier incluant des eaux peu profondes et en présence de courants et de niveaux d'eau non-stationnaires. Nous utilisons SWAN avec les mêmes formulations que WAM pour la génération et la croissance des vagues (Jansen, croissance linéaire). En eau peu profonde, les formulations décrivant les interactions entre les vagues ont été supplémentées avec un terme source prenant en compte les interactions non-linéaires entre trois vagues (triads).

SWAN est alimenté par les séries chronologiques des sorties de vagues du modèle EC qui constituent les conditions aux limites en entrée. Parce que le modèle EC ne sauvegarde pas le spectre directionnel complet, nous définissons un modèle de spectre générique de type JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) à partir du triplet H_{m0} , T_{02} , DIR issues du modèle EC pour représenter le spectre directionnel de l'énergie en entrée du domaine de SWAN. Ce spectre correspond à une mer en développement, ce qui constitue une hypothèse acceptable pour la distribution de l'énergie en entrée de nos domaines au regard de la géométrie de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, ainsi qu'à la variabilité spatiale des conditions de vent. Néanmoins, nous ne disposons que des caractéristiques de vagues extraites par analyse spectrale. Il résulte de cette simplification une perte d'information concernant la distribution continue de l'énergie. Pour cette raison nous n'avons aucune certitude que les spectres reconstitués en entrée de SWAN soient identiques à ceux issus du modèle EC.

Les frontières maritimes des domaines de propagation de SWAN sont déterminées pour se superposer à la grille du modèle EC. SWAN est également alimenté par des données (prévisions) de vent tri-horaires à 10 m issues de GEM et par les données de niveau d'eau et de courants de surface issues du Modèle Océanique Régional (MOR) du golfe du Saint-Laurent opéré par Simon Senneville à l'ISMER.

SWAN utilise une grille bathymétrique haute résolution de 200×200 m, couvrant un domaine s'étendant du large (profondeur en entrée du domaine supérieure à 200 m pour Sept-Îles et Saint-Ulric, 100 m pour Cap d'Espoir) à la côte, avec une ligne du rivage à 2 m au-dessus du niveau marin moyen. Les données hydrographiques proviennent de la base de données du Service hydrographique du Canada (SHC), avec une résolution de base de 25×25 m. Les points de notre grille de 200×200 m ont été interpolés sur les données du SHC. Les données d'altitude pour la zone s'étendant entre le zéro hydrographique et la côte +2 m proviennent de la base de données de la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de la NASA à 90 m de résolution spatiale. L'utilisation de données altimétriques est rendue nécessaire afin de représenter la genèse des vagues à la côte en raison de la non-stationnarité des niveaux d'eau. Les trois implémentations du modèle sont donc conçues pour être « couvrante-découvrante ».

Le modèle est opéré en mode quasi-stationnaire : il est exécuté pour chaque pas de temps avec des conditions stationnaires de vagues, vent, niveau d'eau et courant correspondant. Le calcul se poursuit jusqu'à la convergence, c'est-à-dire quand la différence des hauteurs de vague en chaque point de la grille entre deux itérations successives est suffisamment petite. Lorsque le modèle a convergé, les sorties sont sauvegardées, les données de vagues, vent, courant et niveau d'eau sont incrémentées au pas de temps suivant et le modèle se relance automatiquement.

Nous obtenons en sortie une base de données tri-horaire de H_{m0} , T_{02} , Dir à chaque point de grille ainsi qu'aux coordonnées de la station de mesure. Des sorties spectrales sont également produites à la position de la station. Le modèle a été préalablement calibré puis validé sur la période de l'automne de 2010. Les données produites couvrent actuellement la période de mai 2010 à avril 2012. Ultérieurement, elles peuvent être produites depuis 2003.

2.4. Données issues de modèles atmosphériques (réanalyses et modèles climatiques)

La modélisation du régime des vagues à l'aide de modèles numériques requiert en intrant des données de vitesse et direction du vent à proximité de la surface de l'eau (en général, à 10 m au-dessus de la surface). Comme les observations du vent par des bouées météorologiques sont rares, les données de vent proviennent de modèles atmosphériques qui peuvent être regroupées en 2 catégories : les données de réanalyses, bénéficiant de l'assimilation des observations météorologiques, et les modèles climatiques qui ne requièrent pas de données observées.

Les réanalyses sont produites par des modèles météorologiques opérationnels servant à la prévision quotidienne du temps. Pour effectuer ces prévisions déterministes à court terme le plus justement possible (pour des échéances variant de 6 heures à cinq jours), le modèle météorologique doit initialiser ses calculs avec le portrait le plus précis possible de l'atmosphère (et même de l'océan). Ce portrait s'appelle l'analyse et est le fruit de la procédure d'assimilation des données observées. Ces analyses sont produites de deux à quatre fois par jour selon les centres de prévision. Certains centres décident de retraiter plusieurs décennies de données météorologiques – en incluant parfois de nouvelles sources d'observations – à l'aide de leur plus récent schéma d'assimilation ainsi que de leur plus récent modèle météorologique : ils obtiennent alors des réanalyses. Ces dernières sont les données qui se rapprochent le plus de la météo réelle dont elles ne peuvent guère dériver puisqu'elles sont formées d'une longue succession de prévisions météorologiques faites à posteriori pour de très courtes échéances à l'aide d'observations assimilées. Les réanalyses contiennent beaucoup plus de variables que ce que les divers réseaux de mesures peuvent offrir, et ce, sans discontinuité dans l'espace et le temps pour plusieurs décennies récentes.

Par contre, pour ce qui est du climat futur, les réanalyses ne sont d'aucune utilité car les données observées nécessaires à l'assimilation ne sont évidemment pas encore disponibles. Il faut alors faire appel aux modèles climatiques. Ces derniers simulent en continu de très longues périodes de plusieurs décennies qui vont bien au-delà de la limite de prévisibilité de quelques jours de l'atmosphère. Pour ce qui est du passé récent, les modèles climatiques ne cherchent donc pas à reproduire les conditions météorologiques exactes de jour en jour, mais visent plutôt à reproduire des statistiques climatiques (distribution statistique des vitesses et direction des vents, récurrence des extrêmes, etc.) semblables à celles du climat réel. Leur mode de fonctionnement fait en sorte qu'ils n'ont pas besoin d'être initialisés avec des observations ni d'avoir une procédure d'assimilation. Ils doivent par contre connaître la composition de l'atmosphère – dont la quantité de gaz à effet de serre – ainsi que des caractéristiques de la surface. Cet affranchissement des observations est un atout pour étudier les changements climatiques. Une des façons d'évaluer la fiabilité des modèles climatiques est de comparer les statistiques tirées des réanalyses à celle produites à partir des données de modèles climatiques couvrant la même période (généralement 30 années).

2.4.1. Réanalyses NARR et MERRA

Deux bases de données de réanalyses ont été examinées, North American Regional Reanalysis (NARR, Mesinger et al., 2006) et Modern-Era Retrospective Analysis for Research and

Applications (MERRA, Rienecker et al., 2011). Elles couvrent toutes deux la période 1979-2012. Les données ont été obtenues respectivement du National Operational Model Archive and Distribution System de la NOAA et du Modeling and Assimilation Data and Information Services Center de la NASA. NARR est une réanalyse régionale avec une résolution spatiale de $0,3^\circ$ (32 km dans le golfe) et le vent à 10 m (U_{10}) disponible aux trois heures. Elle est produite par le modèle Eta forcé à sa frontière par le modèle global NCEP2 ayant une grille de $2,5^\circ$ (Kanamitsu et al., 2002). Les réanalyses globales MERRA ont une résolution spatiale de $1/2^\circ$ latitude $\times$ $2/3^\circ$ longitude (56 $\times$ 50 km dans le golfe) et U_{10} disponible à chaque heure.

On considère ces réanalyses comme de bonnes représentations des conditions historiques réelles de vent près de la surface de l'eau. Par contre, près des côtes, surtout dans les zones où le relief est escarpé, les comparaisons sont moins probantes parce que la résolution spatiale choisie pour la production des réanalyses est insuffisante pour reproduire les effets locaux causés par la topographie.

Les données de NARR et de MERRA ont été comparées avec les vents mesurés à la bouée de Mont-Louis (C45138, site ML du Tableau 1) et à la station météorologiques de l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine (IdlM). Les vitesses mesurées respectivement à 5 m et 7,6 m ont été ajustées pour obtenir U_{10} en utilisant la formule recommandée par Kamphuis (2010) : $U_{10} = U_z (10 / z)^{1/7}$, avec U_z la vitesse mesurée à z mètres du sol. Les données MERRA se sont révélées plus fiables que NARR pour représenter les conditions de vents dans l'estuaire et le golfe. Sa résolution spatiale est plus faible, mais suffisante pour alimenter un modèle paramétrique. Par contre, la fréquence horaire des sorties disponibles est plus adaptées pour GENER. Par conséquent, seulement les résultats obtenus avec les vents de MERRA sont présentés ici.

Les paramètres statistiques suivants ont été utilisés pour la validation : le biais (moyenne des différences), la RMSE (racine des moyennes des carrés des différences), le χ^2 (comparaison des distributions, Balakrishnan et al., 2013) et des diagrammes quantile-quantile (Q-Q plot, comparaison visuelle des distributions). Les deux jeux de données sont plus similaires lorsque le biais est proche de zéro, la RMSE et le χ^2 sont petits, et le Q-Q plot est proche de la fonction identité (diagonale).

La comparaison entre les vents de la bouée C45138 et de la station IdlM ajustés pour U_{10} et les vents à 10 m de MERRA (point de la grille le plus proche) montrent que MERRA est généralement en phase avec les mesures de terrain, mais sous-estime les forts vents tout en ayant une bonne correspondance pour les directions. La correspondance est améliorée pour la bouée C45138 si un facteur de correction de 1,3 est appliqué au vent de MERRA (Figures 5). De même, la correspondance est améliorée pour la station IdlM si un facteur de correction de 1,15 est appliqué au vent de MERRA (Figure 6). Ces facteurs de correction minimisent également le biais, la RMSE et le χ^2 (Tableau 2).

Les vitesses U_{10} de MERRA sont ajustées par conséquent avec un facteur 1,3 à l'ouest de $64,5^\circ\text{W}$ et un facteur de 1,15 à l'est de $64,5^\circ\text{W}$. Ces vents corrigés, qui sont nommés $\text{MERRA}_{\text{corr}}$ dans ce rapport, sont utilisés pour la validation de GENER et pour la comparaison entre GENER alimenté par des réanalyses ($\text{MERRA}_{\text{corr}}$) et GENER alimenté par modèle climatique (MRCC).

La Figure 7 présente la vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MERRA 1980-2012. L'annexe 5 présente les roses de vents de MERRA dans l'estuaire et le golfe. Ces représentations graphiques ont permis de sélectionner les points de grille ayant un vent de type marin pour alimenter GENER (Figure 7).

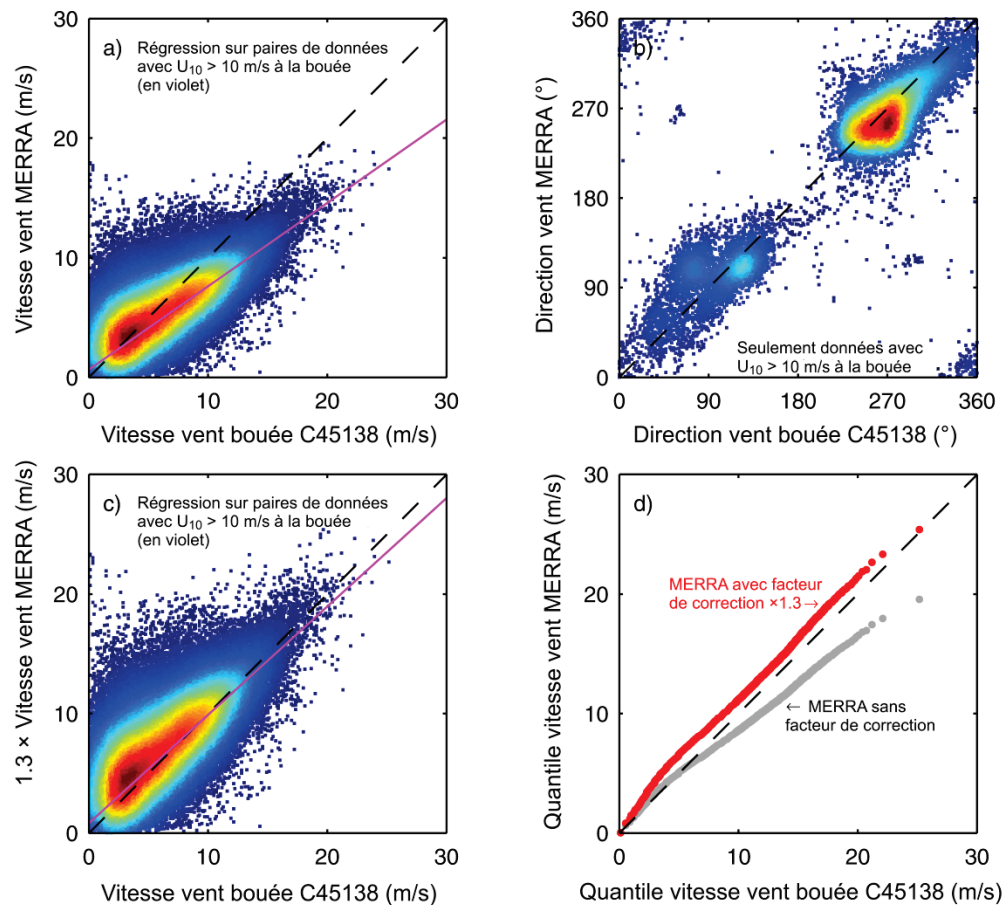


Figure 5. Comparaison du vent de MERRA et de la bouée Mont-Louis (C45138), les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleur (rouge : très dense, bleu : peu dense). (a) MERRA U_{10} sans facteur de correction. (b) Directions (c) MERRA U_{10} avec facteur de correction de 1,3 ($MERRA_{corr}$). (d) Q-Q plot de U_{10} .

Tableau 2. Comparaison de données de vents de MERRA avec les mesures à la bouée du Mont-Louis (C45138) et à la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine (IdlM).

	Bouée C45138 – MERRA			Station IdlM – MERRA			
	Vitesse U_{10}		Direction	Vitesse U_{10}			Direction
Facteur de correction appliqué à MERRA	1	1.3	–	1	1.15	1.3	–
Biais (m/s ou °)	-3.04	-0.30	-3.17	-1.84	0.33	1.17	3.49
RMSE (m/s ou °)	3.56	2.32	26.54	2.86	2.5	3.03	23.26
χ^2	0.48	0.06	0.01	0.28	0.27	1.07	0.02

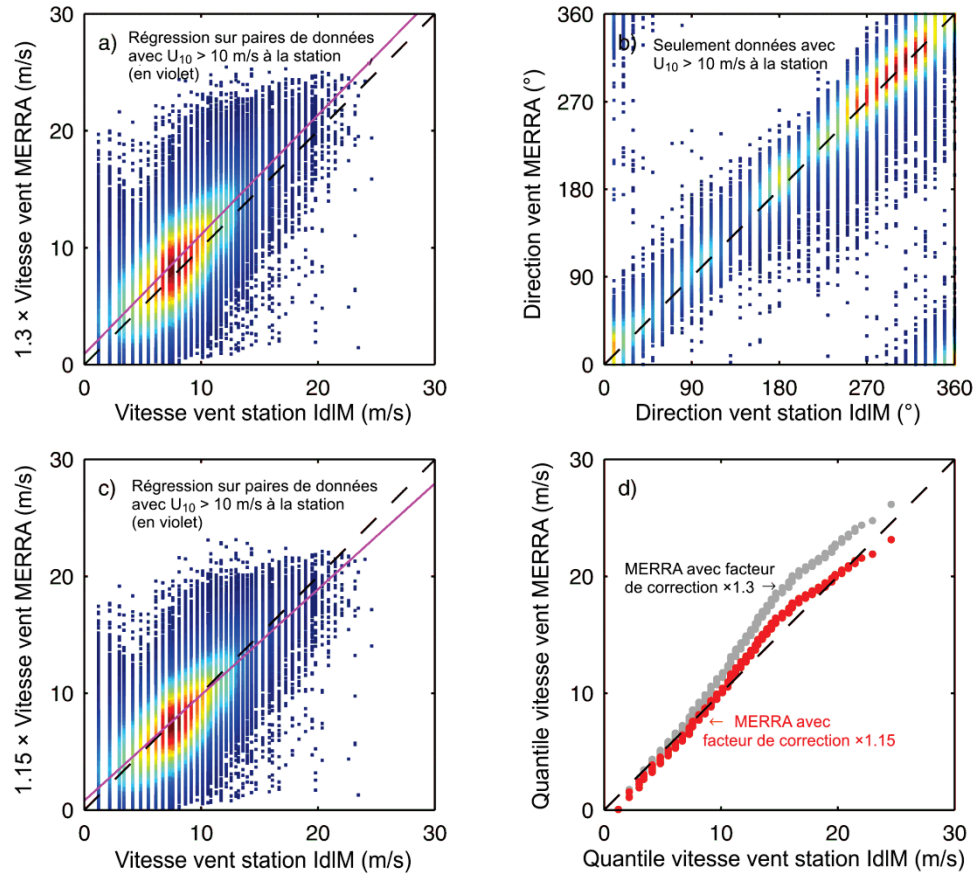


Figure 6. Comparaison du vent de MERRA et de la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine, les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleur (rouge : très dense, bleu : peu dense). (a) MERRA U_{10} sans facteur de correction. (b) Directions (c) MERRA U_{10} avec facteur de correction de 1,15 ($\text{MERRA}_{\text{corr}}$). (d) Q-Q plot de U_{10} .

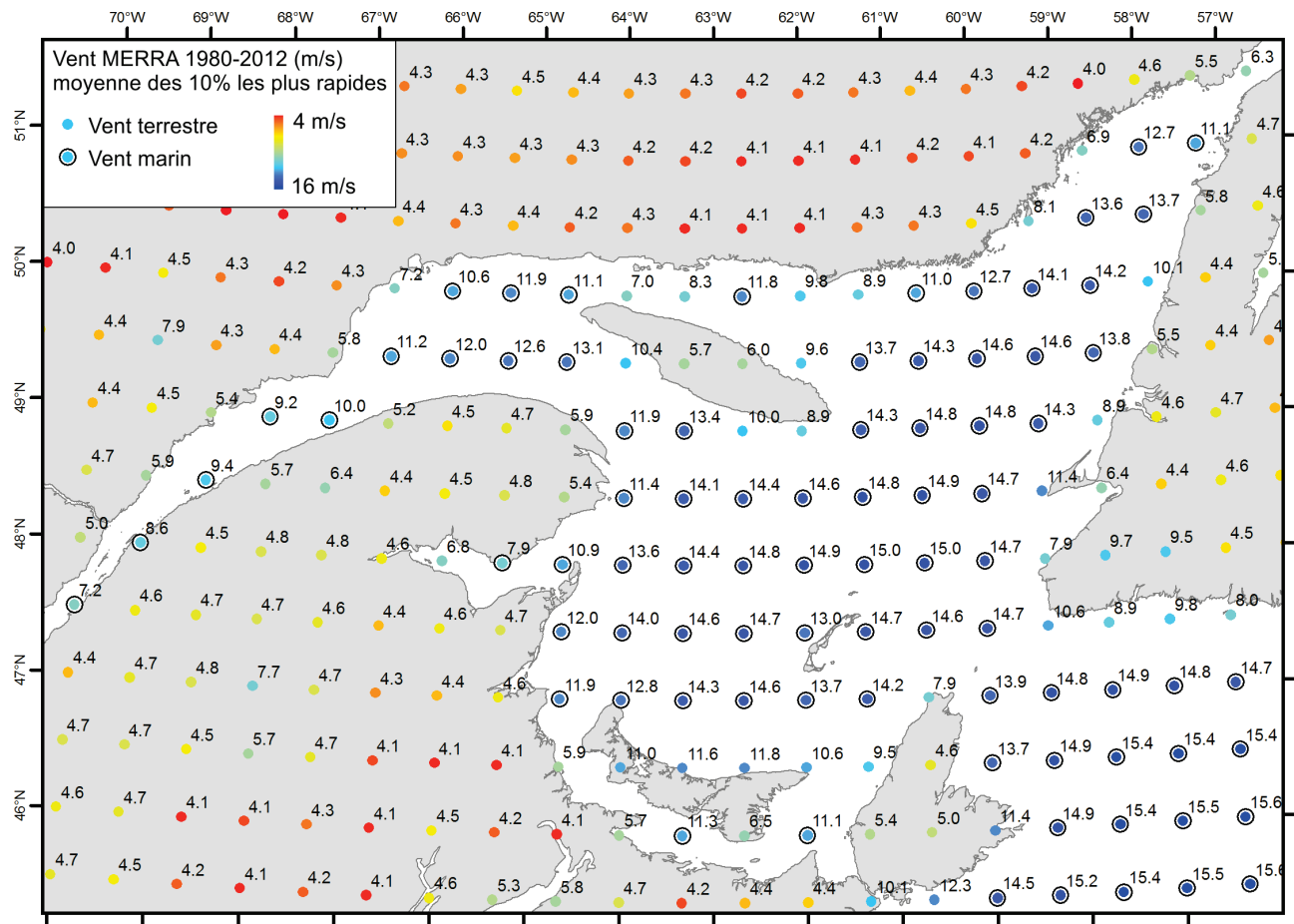


Figure 7. Vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MERRA 1980-2012 (sans facteur de correction). Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence.

2.4.2. Modèles climatiques MRCC et NARCAPP

Pour le futur, les modèles de vagues sont alimentés par des modèles climatiques. Le principal modèle climatique utilisé dans cette étude est le Modèle régional canadien du Climat (MRCC, Caya et Laprise, 1999, Music et Caya, 2007). Deux simulations du MRCC (aev et ahj) ont été choisies parce qu'elles satisfont les exigences du modèle de vagues GENER, soit une résolution spatiale de 45 km et une résolution temporelle de 3 heures; de plus, ces simulations couvrent une longue période (1961-2100). Deux autres simulations régionales de climat tirées du projet NARCCAP (Mearns et al. 2007, 2009) ont aussi été utilisées.

À leurs frontières, toutes ces simulations régionales sont pilotées par des modèles de circulation générale océan-atmosphère (MCGOA); ces derniers intègrent le scénario d'évolution de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) SRES A2 (Nakicenovic et al. 2000). Le scénario A2 se situe dans la tranche haute des scénarios d'émission de GES, mais n'est pas le plus pessimiste (IPCC, 2007). Son utilisation est préférée en impact et adaptation car on considère que ceux pouvant s'adapter à ce scénario s'adapteront également à des scénarios plus optimistes. Les courbes des émissions de GES et de température observées entre 1990 et 2007 soutiennent l'utilisation de ce scénario.

Le scénario A2 est bâti sur l'hypothèse d'un développement induit par les autonomies régionales et les identités locales. Les émissions de GES du scénario A2 correspondent donc à des conditions économiques et sociales hétérogènes dans le monde. La population continue de croître régulièrement et atteint 10 milliards en 2050. Le développement économique est basé sur la régionalisation plutôt que sur la mondialisation des échanges (scénario A1), les développements économiques et technologiques sont lents en comparaison des autres scénarios. En conséquence, les émissions cumulatives de CO₂ projetées pour le milieu et la fin du 21^{ème} siècle sont de 600 et 1850 GtC. Le taux de croissance du méthane et du protoxyde d'azote augmente rapidement. Le dioxyde de soufre augmente jusqu'à atteindre un maximum juste avant 2050 (105 MtS/an) et diminue dans la seconde moitié du siècle (60 MtS/an).

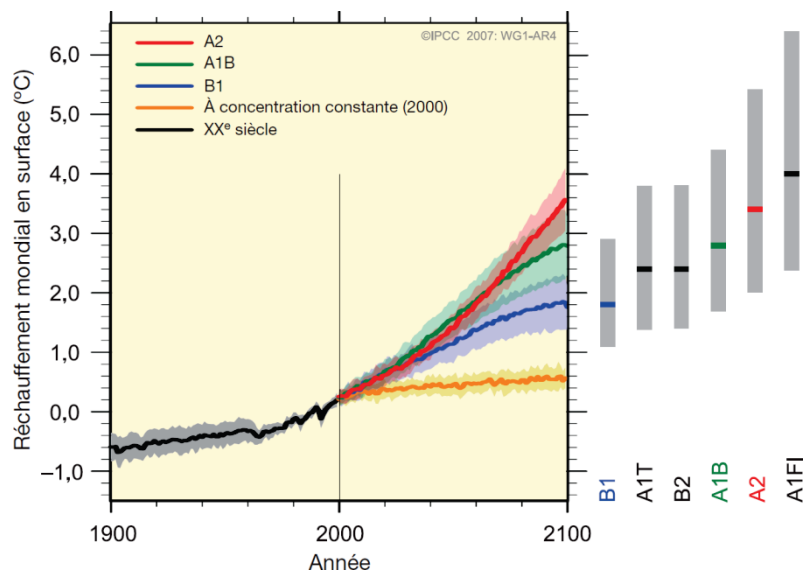


Figure 8. Réchauffement global durant le XXI^e siècle selon des modèles climatiques utilisant différents scénarios d'émission de CO₂ (GIEC., 2007).

Idéalement, on souhaite utiliser le plus grand nombre de simulations possible pour obtenir un éventail de climats plausibles sur les périodes historiques de référence et futures. Cependant, les critères de sélection satisfaisant les modèles de vagues (données à résolution spatiales et temporelles assez fines, disponibles publiquement et couvrant la zone d'étude) limitent le choix des simulations disponibles.

Les simulations climatiques utilisées ont les propriétés suivantes:

- aev : MRCC 4.2.3 piloté par le CGCM3 (modèle canadien couplé de climat global; Scinocca et al., 2008) membre 5 sur le domaine couvrant l'Amérique du Nord à une résolution de 45 km. La période couverte est 1961-2100.
- ahj : MRCC 4.2.3 piloté par le ECHAM5 (modèle allemand couplé de climat global; Jungclaus et al., 2006) membre 3, même domaine et période que aev.

hrm3 : HRM3 (Hadley Regional Model 3) piloté par le GFDL (modèle du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) sur le domaine NARCCAP à une résolution de 50 km. Les périodes couvertes sont 1968-2000 et 2038-2070.

rcm3 : RCM3 (Regional Climate Model 3) piloté par le GFDL, même domaine et période que hrm3.

Les simulations issues du MRCC aev et ahj sont caractérisées par un biais froid général sur la période de contrôle (1971-2000). Concernant les précipitations et les températures, peu de différences apparaissent entre les simulations pilotées par CGCM3 membre 5 (aev) et ECHAM5 membre 3 (ahj; Figure 9). Pour ces simulations, le biais de température est compris entre $-3,6^{\circ}$ et $-1,5^{\circ}\text{C}$ par rapport aux moyennes annuelles du climat actuel (Troin et al., in prep). Sur le bassin versant de la rivière aux Outardes, les températures annuelles moyennes de MRCC-aev sont plus froides d'un degré que celles de MRCC-ahj (Troin et al., in prep). Sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, MRCC-aev a globalement un biais froid d'environ $-1,5^{\circ}\text{C}$, mais un biais chaud jusqu'à $+2^{\circ}\text{C}$ en hiver; MRCC-ahj présente aussi un biais froid sur l'année complète et un biais chaud en hiver, mais moins fort que MRCC-aev (Senneville et al., 2013).

Pour tenir compte du biais important de MRCC-aev, les températures débiaisées par Simon St-Onge-Drouin sur la grille du modèle MOR (Senneville et al., 2013) ont été généralement utilisées pour ce projet, mais les formules empiriques ont également été testées avec les températures de MRCC-aev non corrigées. Aucune correction n'a été appliquée sur les températures de MRCC-ahj, car le biais est moins important.

Pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, les températures calculées par HRM3 pour 2041-2070 indiquent un réchauffement régional en moyenne de $1,5$ à 4° par rapport à celles calculées pour 1971-2000. Celles calculées par RCM3 sont plus élevées de $1,5$ à $2,5^{\circ}$. Le climat futur calculé par HRM3 est donc équivalent à légèrement plus chaud que celui calculé par RCM3.

Ce rapport est basé principalement sur les simulations MRCC-aev et MRCC-ahj, car la longue période couverte permet de comparer le passé récent (1981-2010) avec le futur proche (2041-2070) et le futur lointain (2071-2100). Cela n'est pas possible avec les simulations hrm3 et rcm3, qui ne couvrent que les périodes 1968-2000 et 2038-2070. Les résultats de GENER avec ces derniers ne sont pas présentés dans la version préliminaire du rapport, mais seront ajoutés à la version définitive du rapport.

Les Figures 10 et 11 présentent la vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MRCC-aev et de MRCC-ahj pour la période 1981-2010. Les annexes 6 et 7 présentent les roses de vents dans l'estuaire et le golfe. Ces représentations graphiques ont permis de sélectionner les points de grille ayant un vent de type marin pour alimenter GENER (Figure 7).

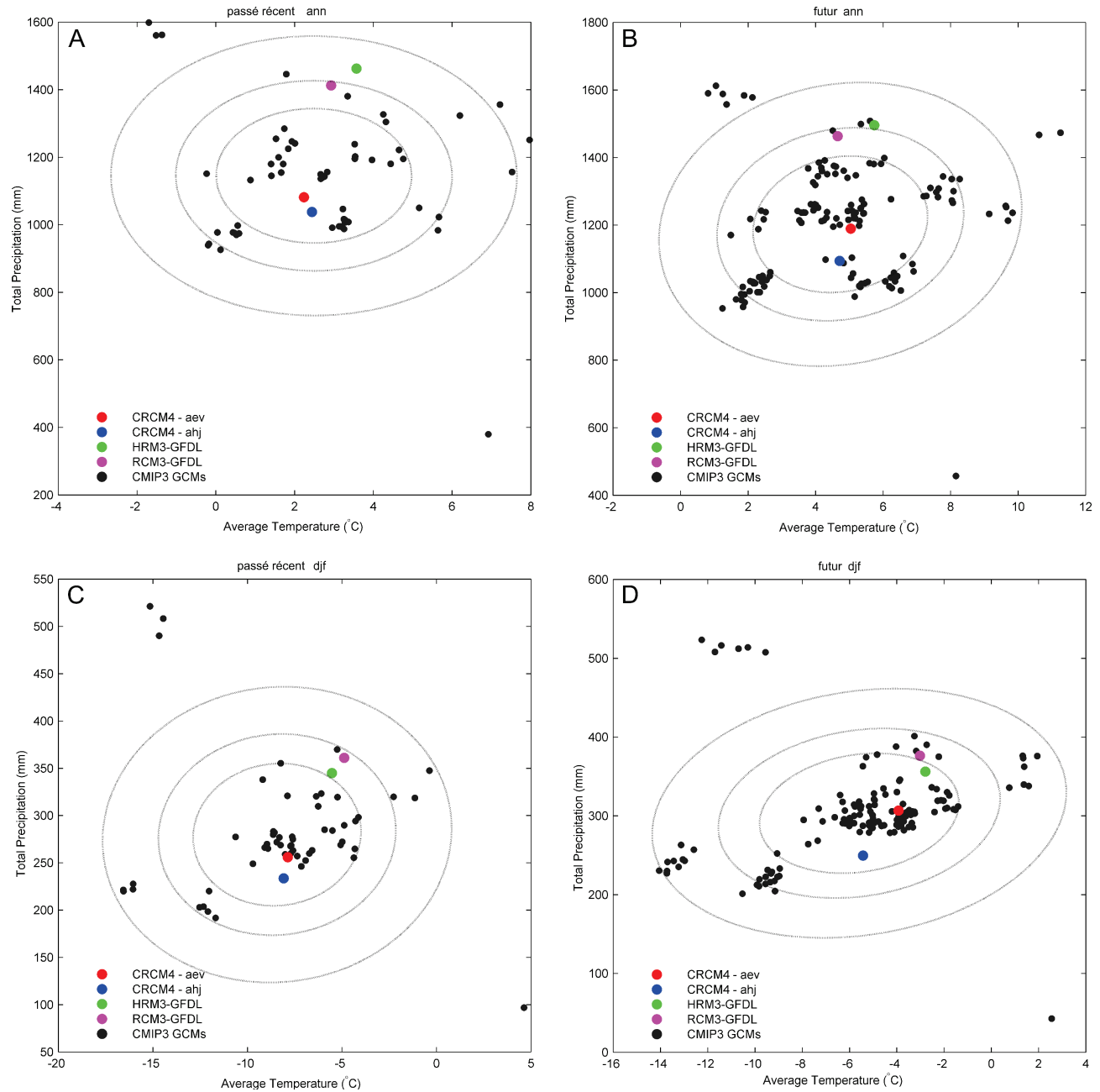


Figure 9. Comparaison entre les simulations climatiques utilisées et l'ensemble des simulations disponibles auprès d'Ouranos pour la température et des précipitations, (A) moyenne annuelle pour 1971-2000, (B) moyenne annuelle pour 2041-2070, (C) moyenne décembre-janvier-février pour 1971-2000, (D) moyenne décembre-janvier-février pour 2041-70.

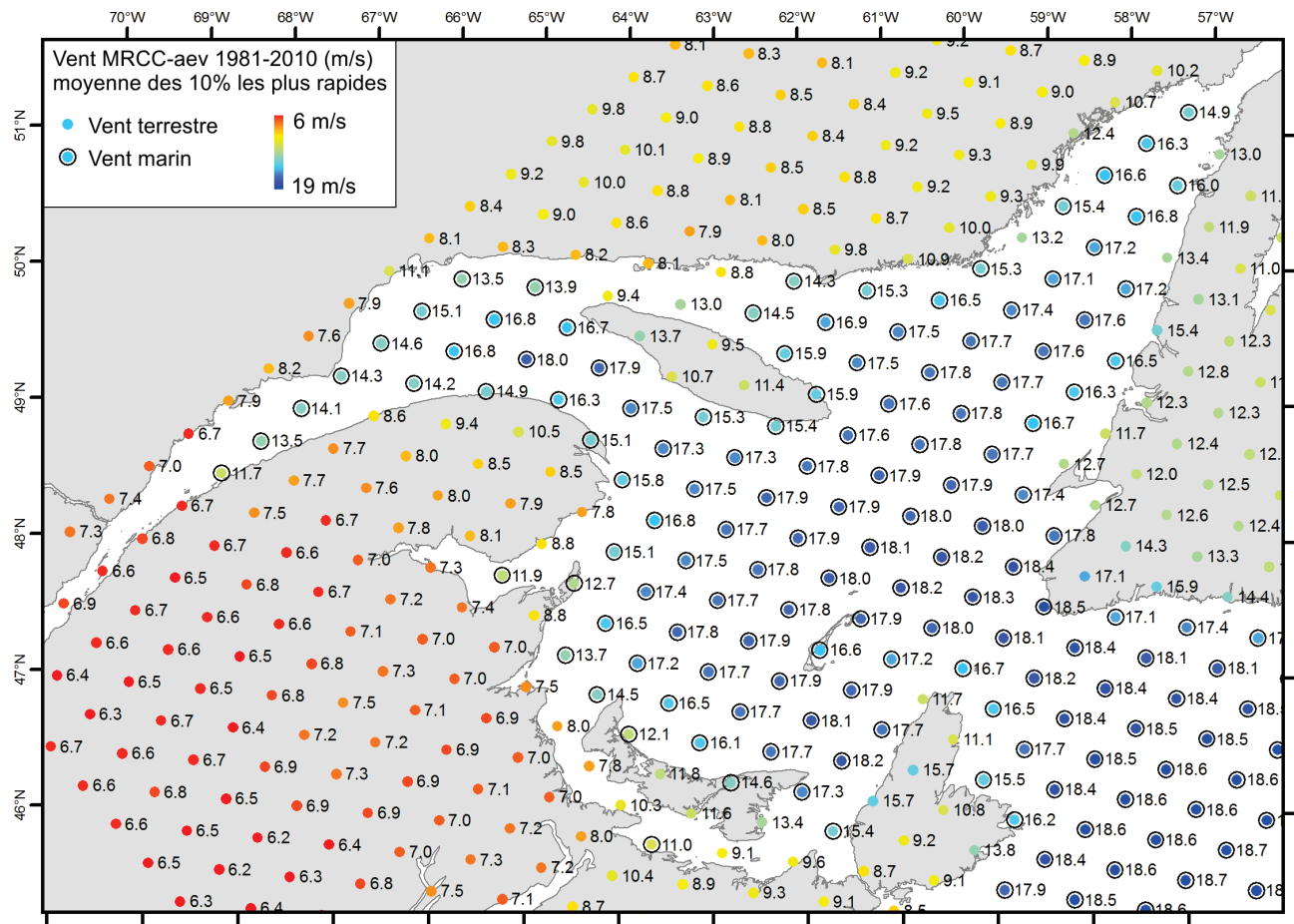


Figure 10. Vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MRCC-aev 1981-2010. Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence.

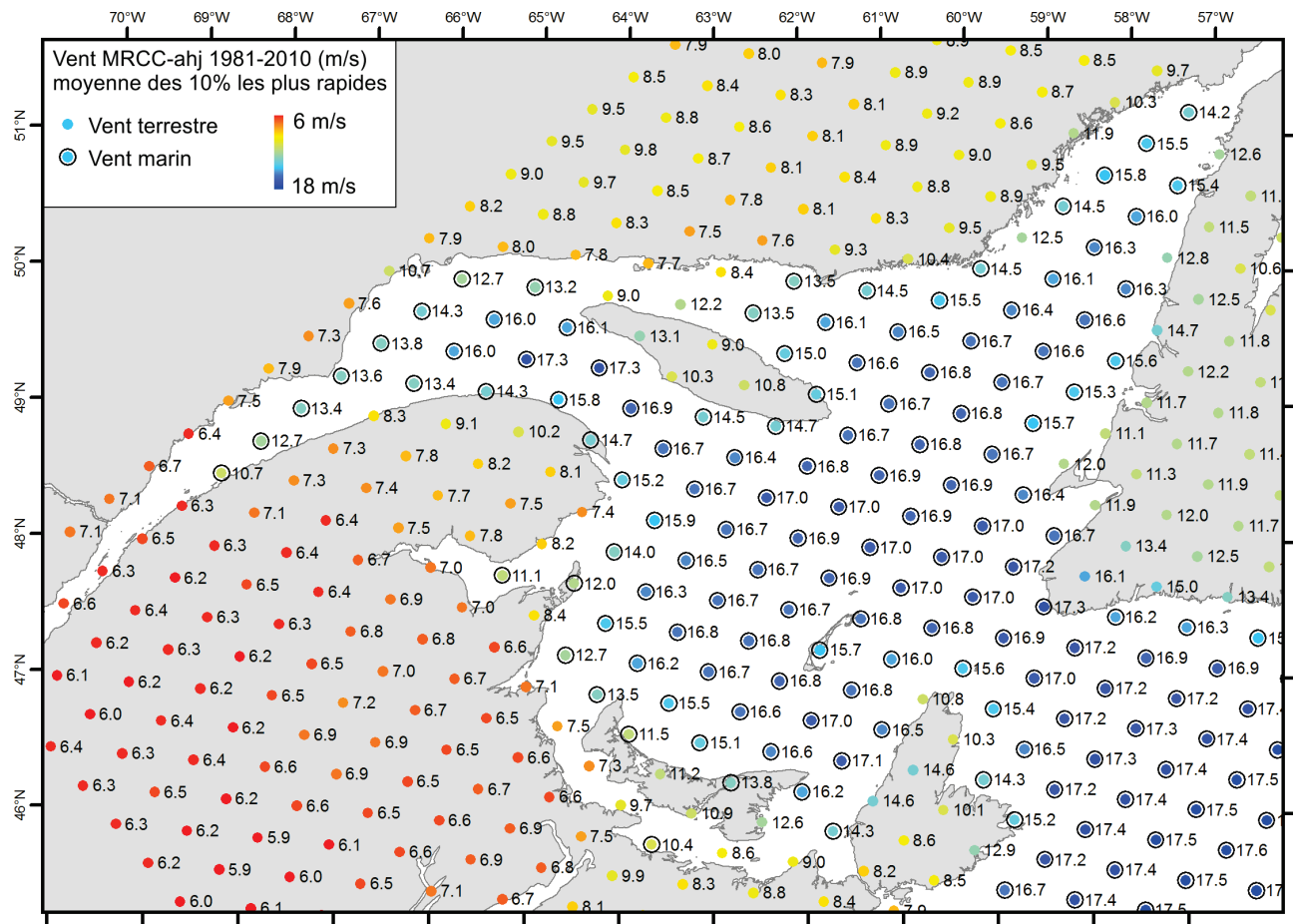


Figure 11. Vitesse moyenne des 10% des vents les plus rapides de MRCC-ahj 1981-2010. Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence.

2.5. Protocole d'évaluation de la performance instantanée

La capacité d'un modèle à reproduire les caractéristiques des vagues (H_{m0} , T_{02} et Dir) est évaluée en quantifiant la correspondance entre les valeurs prédites (h_i) et mesurées (m_i) au même pas de temps, à partir des indicateurs statistiques suivants. Les paramètres 1 à 10 sont utilisés pour les hauteurs et les périodes des vagues. Les paramètres 11 à 13 sont utilisés pour les directions des vagues.

2.5.1. Biais (MB, *mean bias*)

Moyenne des résidus ou erreurs. Paramètre dimensionnel.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i - m_i \quad [1]$$

Avec n le nombre d'observations, h les valeurs prédites (*hindcasted*) et m les valeurs mesurées (*measured*). Il indique l'écart moyen entre valeurs prédites et mesurées, c'est-à-dire la tendance du modèle à sur- ou sous-estimer les valeurs.

2.5.2. Biais absolu (MAE, mean absolute error ou absolute bias)

Indique l'écart absolu moyen entre valeurs prédites et mesurées. Mesure de la magnitude de l'erreur moyenne. Paramètre dimensionnel.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - m_i| \quad [2]$$

2.5.3. Racine de la moyenne quadratique de l'erreur (RMSE, Root mean square error)

Racine de la moyenne du carré des erreurs. Paramètre dimensionnel.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad [3]$$

Mesure de la magnitude de l'erreur moyenne. Donne plus de poids aux valeurs d'erreur extrêmes.

2.5.4. Part systématique de la RMSE (RMSE_s)

La part systématique de la RMSE (RMSE_s ou *Systematic RMSE*) correspond à la part d'erreur qui pourrait être corrigée avec une transformation linéaire des résultats du modèle par rapport aux mesures, c'est-à-dire l'existence d'une déviation entre la droite de régression et la droite 1:1. Ce paramètre est basé sur l'hypothèse qu'il existe une corrélation linéaire significative entre les valeurs mesurées et calculées. Paramètre dimensionnel.

$$RMSE_s = \sqrt{MSE_s} \quad [4]$$

Avec :

$$MSE_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{h}_i - m_i)^2 \quad [4a]$$

$$\hat{h}_i = a \cdot m_i + b \quad [4b]$$

a : pente de la droite de régression, b : ordonnée à l'origine de la droite de régression.

2.5.5. Part non-systématique de la RMSE (RMSE_u)

La part non-systématique de la RMSE (RMSE_u ou *Unsystematic RMSE*) correspond aux écarts aléatoires (imprévisibles) des résultats du modèle par rapport aux mesures (Willmott, 1982; Willmott et al., 1985; Zambresky, 1989), c'est-à-dire la part d'erreur qui ne peut pas être corrigée par une transformation linéaire des résultats du modèle. Paramètre dimensionnel.

$$RMSE_u = \sqrt{MSE_u} \quad [5]$$

Avec :

$$MSE_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2 \quad [5a]$$

2.5.6. Écart-type de l'erreur entre valeur prédite et mesurée (*standard deviation of differences*)

Indique la dispersion de l'erreur autour de la moyenne de l'erreur (biais). Mesure de l'erreur aléatoire (Hanson et al., 2009; Zambresky, 1989). Les valeurs sont faibles si les erreurs sont toujours similaires. Paramètre dimensionnel.

$$\sigma_d = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m_i - b)^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad [6]$$

2.5.7. Coefficients de l'équation de la droite de régression linéaire

Le modèle statistique de régression linéaire par la méthode des moindres carrés entre les données mesurées et celles prédites caractérise la relation entre les deux variables en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire.

$$m = a \cdot h + b \quad [7]$$

Avec a : pente de la droite de régression (idéalement 1), indique si les prévisions sur ou sous évaluent les mesures.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}) \cdot (m_i - \bar{m})}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2} \quad [7a]$$

b : ordonnée à l'origine (ou offset, y-intercept, idéalement 0), indique la présence d'un décalage entre les valeurs des deux séries de données (Moriassi et al., 2007; Dykes et al. 2009; Hsu et al., 2002; Yamaguchi et al., 2004; Romeiser, 1993; Zambresky, 1989; Komen et al., 1994).

$$b = \bar{m} - a \cdot \bar{h} \quad [7b]$$

2.5.8. Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination (adimensionnel) indique la proportion de la variance des valeurs prédites expliquée par la variance des données observées. Il permet de savoir si la corrélation indiquée par la droite de régression linéaire est statistiquement significative. (Moriasi et al., 2007; Moeini et Etemad-Shahidi, 2007; Gorrell et al., 2011; Dykes et al. 2009; Dragani et al., 2008; Hsu et al., 2002; Padilla-Hernandez et al., 2004; Yamaguchi et al., 2004; Romeiser, 1993; Zambresky, 1989; Rogers et al., 2007; Komen et al., 1994). Par contre il n'indique aucunement si le modèle reproduit correctement la réalité.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}) \cdot (m_i - \bar{m})}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \right]^2 \quad [8]$$

2.5.9. Critère de performance global pour données non-directionnelles (*overall performance score*)

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

$$P_s = \frac{\widehat{RMSE} + \hat{b} + (\hat{SI})}{3} \quad [9]$$

Avec :

$$\widehat{RMSE} = \left(1 - \frac{RMSE}{m_{RMS}} \right) \quad [9a]$$

$$\hat{b} = \left(1 - \frac{|b|}{m_{RMS}} \right) \quad [9b]$$

$$\hat{SI} = \left(1 - \frac{\sigma_d}{\bar{m}} \right) \quad [9c]$$

Et :

$$m_{RMS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n m^2}{n} \right)^{0.5} \quad [9d]$$

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m \quad [9e]$$

2.5.10. Indice de similitude (*index of agreement*)

L'indice de similitude calcule le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et « l'erreur potentielle » (Willmott, 1984). Celle-ci est la somme des carrés des valeurs absolues des

distances des valeurs prédites à la moyenne des mesures et des distances des valeurs mesurées à la moyenne des mesures. Paramètre adimensionnel.

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|h_i - \bar{m}| + |m_i - \bar{m}|)^2} \right] \quad [10]$$

Il fournit une mesure standardisée du degré d'erreur de prédiction du modèle. Il peut détecter des différences additives et proportionnelles dans la variance et la moyenne des données observées et mesurées. D est très sensible aux écarts extrêmes. D = 1 indique un accord parfait entre valeurs prédites et mesurées, 0 indique aucun accord (Moriassi et al., 2007; Willmott, 1982).

2.5.11. Biais angulaire absolu moyen (MAE°)

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

$$\text{MAE}^\circ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad [11]$$

$$\begin{aligned} \text{Avec :} \quad D_i &= |\Delta\theta_i| && \text{pour } 0 < |h_i - m_i| \leq 180 \\ D_i &= 360 - |\Delta\theta_i| && \text{pour } 180 < |h_i - m_i| \leq 360 \end{aligned} \quad [11a]$$

$$\Delta\theta_i = \theta_{hi} - \theta_{mi} \quad [11b]$$

Avec θ_h les directions prédites et θ_m les directions mesurées en degrés.

2.5.12. Concentration approximative (approximate concentration)

La concentration approximative $\hat{\kappa}$ est une mesure de la concentration (une mesure réciproque de la dispersion, telle que $1/\hat{\kappa}$ est équivalent à la variance d'une distribution gaussienne). Des valeurs de $\hat{\kappa}$ supérieures à 5 indiquent une distribution étroitement groupée. Des valeurs plus basses indiquent un étalement de la distribution (Fisher, 1993; Bowers et al., 2000; Tracy, 2002).

$$\hat{\kappa} = \begin{cases} 2\bar{R} + \bar{R}^3 + \frac{5\bar{R}^5}{6} & \text{pour } \bar{R} < 0.53 \\ -0.4\bar{R} + 1.39\bar{R} + 0.43(1 - \bar{R}) & \text{pour } 0.53 \leq \bar{R} < 0.85 \\ \frac{1}{(\bar{R}^3 - 4\bar{R}^2 + 3\bar{R})} & \text{pour } \bar{R} \geq 0.85 \end{cases} \quad [12]$$

Avec $\bar{R}$ la longueur résultante moyenne de l'erreur (Fisher, 1993; Bowers et al., 2000; Tracy, 2002; Hanson et al., 2009), telle que :

$$\bar{R} = \frac{\sqrt{C^2 + S^2}}{n} \quad [12a]$$

Avec :

$$S = \sum_{i=1}^n \sin(\Delta\theta_i) \quad [12b]$$

$$C = \sum_{i=1}^n \cos(\Delta\theta_i) \quad [12c]$$

$\bar{R}$ indique la diffusion de l'erreur. Valeur comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur est faible, plus la diffusion est forte autour de la moyenne de l'erreur. Une valeur de 1 indique une erreur constante (Fisher, 1993; Bowers et al., 2000; Tracy, 2002; Hanson et al., 2009).

2.5.13. Coefficient de corrélation linéaire pour données directionnelles (utilisation des différences directionnelles, *linear correlation coefficient*)

$$cor = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(\theta_m - \bar{\theta}_m) \cdot \sin(\theta_h - \bar{\theta}_h)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [\sin(\theta_m - \bar{\theta}_m)]^2 \cdot \sum_{i=1}^n [\sin(\theta_h - \bar{\theta}_h)]^2}} \quad [13]$$

Indique le degré de corrélation positive ou négative entre deux variables circulaires. Même indice que r (coefficient de corrélation linéaire), en remplaçant les différences angulaires par leurs sinus. Le coefficient de détermination (adimensionnel) indique la proportion de la variance des valeurs prédites expliquée par la variance des données observées

2.6. Protocole d'évaluation de la performance climatique

Alors que la performance d'un modèle de vagues à bien représenter des événements de vagues instantanés est très important pour des applications comme la navigation et les travaux en mer, la priorité pour certaines applications comme les études de dynamique côtière et de génie côtier/maritime est plutôt la performance à bien représenter le climat de vagues, et en particulier les valeurs extrêmes. Le climat de vagues d'un site donné se définit comme les statistiques à long terme calculées à partir d'une série temporelle d'au moins 30 ans (OCDE, 2002). Il est possible de caractériser la climatologie des H_s selon deux approches : (1) les fréquences de dépassement définies à partir de la série temporelle des H_s ou (2) les périodes de retour obtenues en ajustant une distribution statistique à un échantillon d'événements extrêmes. Les deux approches ont été utilisées dans le cadre de cette étude puisqu'elles ont chacune leurs avantages et inconvénients et sont complémentaires l'une à l'autre.

Évaluation des fréquences de dépassement

Des conditions de vagues ayant des fréquences de dépassement données (10%, 1% ou 0,1% par exemple) se définissent comme les H_s dépassées respectivement 10%, 1% ou 0,1% du temps. Déterminer la H_s des vagues ayant une fréquence de dépassement donnée revient à calculer un quantile de la série temporelle de vagues analysée. Par exemple, les H_s ayant des fréquences de dépassement de 10%, 1% ou 0,1% sont en fait les quantiles 90%, 99% et 99,9% de la série de données de vagues. Les fréquences de dépassement ou les quantiles d'une série temporelle de vagues sont utiles puisqu'ils permettent de caractériser la distribution intrinsèque de la série, sans

supposer que les données suivent une distribution statistique particulière (par exemple, Tableau 14, Figure 79). Par contre, ce type d'analyse ne peut pas permettre d'extrapoler au-delà de la série de vagues étudiée.

Les **diagrammes quantiles-quantiles (*Q-Q plot*)** sont des outils pertinents pour comparer deux distributions de H_s ensemble (Coles, 2001). Pour tracer ces diagrammes, les quantiles (exemple : [0,1%, 0,2%, ... 99,0%, 99,9%]) de chacune des deux séries sont tracés les uns en fonction des autres sur un graphique (par exemple, Figure 73). La diagonale (droite 1:1) correspond à une correspondance parfaite entre les deux distributions. La distance des points tracés à cette diagonale permet de caractériser les différences entre ces distributions.

Les **roses de vagues** sont un autre moyen de visualiser un climat de vagues selon les fréquences de dépassement en considérant en plus les directions de propagation des vagues. Différentes approches peuvent être adoptées pour tracer des roses de vagues et celle retenue pour cette étude inclut une échelle radiale exponentielle qui permet de mettre en évidence les vagues ayant de faibles fréquence de dépassement (vagues avec les plus grandes H_s). Pour 16 secteurs de direction, les fréquences de dépassement de différentes classes de H_s (représentées en couleur) sont tracées (par exemple, Figure 84). La longueur vers le centre de chacun des secteurs directionnels indique la proportion du temps où des vagues venant de cette direction. Les limites des classes peuvent s'adapter au climat de vagues représenté. La comparaison de roses de vagues permet d'évaluer les différences entre différents climats de vagues autant pour les H_s que pour les directions.

Évaluation des périodes de retour

Une autre approche pour caractérisation d'un climat de vagues est d'estimer la hauteur de vagues de tempête ayant une certaine période de retour, c'est-à-dire la plus grande vague qui statistiquement se produit durant cette période. Cette méthode permet d'extrapoler sur des périodes plus longues que les observations ou simulations disponibles.

La détermination des hauteurs de vagues extrêmes à un site donné pour définir des périodes de retour est généralement faite via l'application de la théorie des extrêmes (Mathiesen et al., 1994). Pour le calcul de période de retour de vagues, les deux distributions les plus utilisées (Teena et al., 2012) sont la distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV) qui a une distribution cumulative comme suit :

$$G(z) = \begin{cases} \exp\left(-\left[1 - \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{1/\xi}\right) & \text{pour } \xi \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\left[\frac{z-\mu}{\sigma}\right]\right)\right) & \text{pour } \xi = 0 \end{cases} \quad [14]$$

et la distribution généralisée Pareto (GPD) qui a comme distribution cumulative :

$$G(z) = \begin{cases} 1 - \left[1 - \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{1/\xi} & \text{pour } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\left[\frac{z-\mu}{\sigma}\right]\right) & \text{pour } \xi = 0 \end{cases} \quad [15]$$

où μ est le paramètre de position, σ le paramètre d'échelle et ξ le paramètre de forme autant pour la GEV que la GPD (Coles, 2001).

Chacune de ces méthodes nécessite d'être ajustée par maximum de vraisemblance à une série d'événements extrêmes. Ceux-ci doivent être indépendants, c'est-à-dire représenter des tempêtes différentes. La manière dont ces événements extrêmes sont sélectionnés varie usuellement selon le type de distribution utilisée. Pour la GEV, la série de vagues est divisée en blocs de temps de périodes égales (typiquement une année) et la hauteur de vagues maximale pour chaque bloc est conservée. Dans le cas de la GPD, la méthode de *Peak Over Threshold* (POT) est recommandée. Cela implique de conserver le maximum de chaque événement extrême supérieur à un seuil préétabli (maxima de chaque tempête ayant dépassé le seuil).

L'avantage de la GPD par rapport à la GEV réside dans le fait que si plusieurs événements extrêmes surviennent durant une période donnée, ils seront tous considérés pour la GPD alors que seule la plus grande de ces valeurs serait utilisée pour la GEV (Coles, 2001; Holthuijsen, 2007; Teena et al., 2012; Jonathan et Ewans, 2013). C'est donc pour maximiser le nombre d'échantillons disponibles pour l'ajustement de la distribution des valeurs extrême que la GPD a été retenue pour déterminer les périodes de retour dans le cadre de cette étude.

L'application du POT nécessite la sélection d'un seuil (H_s minimum) à partir duquel un événement est considéré extrême et aussi un intervalle de temps minimum entre deux événements extrêmes consécutifs pour s'assurer qu'ils sont indépendants (provenant de deux tempêtes différentes). La sélection du seuil demeure l'étape critique dans l'application du POT et malgré différentes tentatives d'automatiser cette tâche, les méthodes graphiques de sélection de seuil demeurent le standard (Jonathan et Ewans, 2013). Un petit nombre d'événements (seuil élevé) produit généralement une courbe GPD près des événements les plus extrêmes, mais avec de grandes incertitudes, alors qu'à l'inverse, trop d'événements (seuil trop faible) réduit l'incertitude autour de la GPD ajustée, mais celle-ci risque d'être biaisée par les événements plus faibles et de s'éloigner des événements les plus extrêmes. Cela consiste à trouver un compromis entre le biais et la variance dans l'ajustement de la GPD (Coles, 2001).

Bien que les méthodes graphiques puissent optimiser la sélection du seuil, elles sont difficilement applicables à un grand nombre de sites, car elles nécessitent une vérification visuelle pour chaque jeu de données. Pour surmonter ce problème, Caires et Sterl (2005) ont utilisé un critère de sélection de seuil variable spatialement basé sur le 93% percentile de la série locale des H_s . La même approche a été tentée pour le GSL avec différents percentiles (entre 90% et 99%) comme critère de sélection du seuil en utilisant les sorties de GENER forcé par les vents MERRA_{corr}. Une étude de sensibilité a permis de constater que le 93% percentile est effectivement une valeur adéquate pour la zone d'étude, permettant d'obtenir un certain équilibre entre le biais et la variance dans l'ajustement des GPDs, comme illustré par la Figure 12 pour deux sites du GSL. Conséquemment, l'approche proposée par Caires et Sterl (2005), soit l'utilisation d'un seuil égal au 93% percentile des H_s pour l'application du POT a été suivie dans la présente étude.

En ce qui concerne l'intervalle de temps minimal entre deux événements extrêmes consécutifs, Mathiesen et al. (1994) et Teena et al. (2012) recommandent 48-h comme approche générale. Cette valeur a été utilisée dans le passé pour le GSL par Hundecha et al. (2008) pour l'analyse POT afin d'étudier la variabilité temporelle des vents extrêmes sur plusieurs décennies et est utilisée à nouveau dans la présente étude.

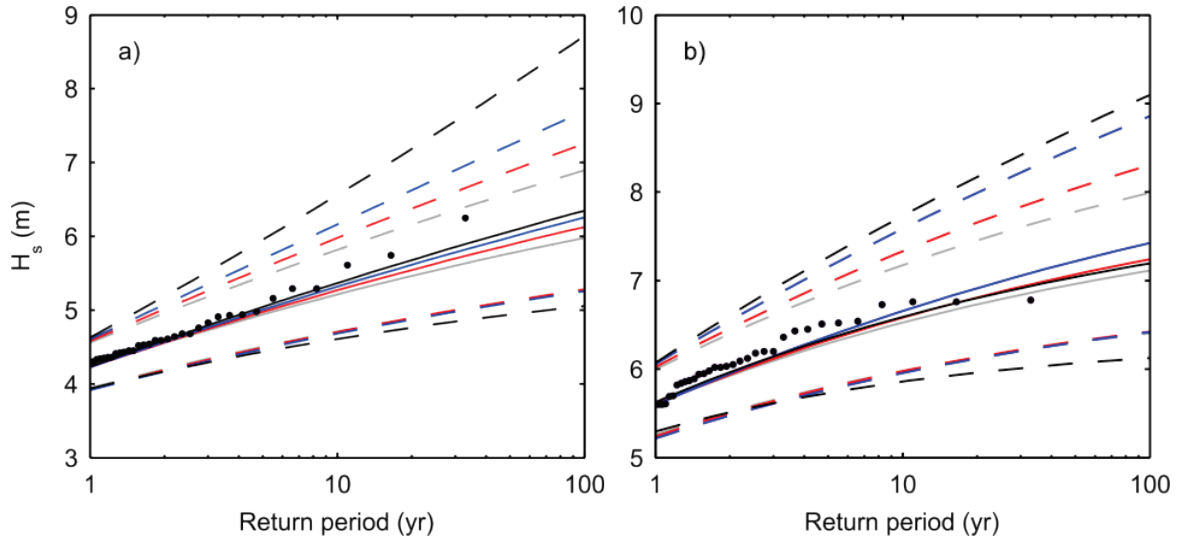


Figure 12. GPDs ajustées (lignes pleines) et intervalles de confiance 95% (lignes traitillées) avec des seuils sélectionnés selon les percentiles 90% (gris), 93% (rouge), 96% (bleu) et 99% (noir) à 49,42°N / 66,31°W (a) et 48,46°N / 62,71°W (b).

Cet ajustement d'une distribution GPD sur les valeurs extrêmes d'une série temporelle de vagues permet ensuite d'évaluer les H_s de différentes périodes de retour. De manière générale il est raisonnable d'extrapoler des périodes de retour jusqu'à deux à trois fois la longueur de la série temporelle de vagues disponible (Resio et al., 2002). Différents climats de vagues peuvent alors être comparés par les différences entre leurs périodes de retour (par exemple, Tableau 10).

Énergie moyenne des vagues

Les fréquences de dépassement et les périodes de retour ne tiennent compte que des grandes vagues et des événements extrêmes. Les vagues plus petites ont également une capacité de transport sédimentaire, certes beaucoup moins importante que les tempêtes, mais pendant une durée beaucoup plus longue. L'énergie moyenne des vagues (E_{moy} , en J/m^2) tient compte de toutes les vagues. Elle est calculée sur des périodes de 30 ans comme :

$$E_{moy} = \frac{1}{n} \rho g \sum_{i=1}^n m_{0i} = \frac{1}{n} \rho g \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_{si}}{4} \right)^2 \quad [16]$$

avec ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3), g : gravité (m/s^2), m_{0i} : moment d'ordre 0 des vagues au temps i (m^2), et H_{si} : hauteur significative des vagues au temps i (m).

3. GENER

3.1. Description de GENER

GENER est un modèle de vagues paramétrique (modèle de fetch) qui a été développé par l'équipe du professeur Yvon Ouellet à l'Université Laval à partir des années 1980 (Desjardins et Ouellet, 1984). Il prédit les vagues (H_s , T_s et direction) à un site en eau profonde en utilisant une série temporelle de vent à 10 m (vitesse U_{10} et direction). Ce vent devrait être représentatif de la région de génération des vagues, mais dans le passé GENER était alimenté par les données de vents d'une station météorologique proche du site d'étude. Les seules données nécessaires en entrée sont cette série horaire de vents à 10 m et le fetch pondéré calculé pour 16 directions (secteurs) autour du site d'étude.

Le fetch pondéré (F) est calculé selon la méthode de Saville (1954), qui est également recommandée par OCDI (2002). Pour chaque secteur, 29 distances de fetch sont mesurées (F_i , i variant de -14 à +14), à savoir dans la direction centrale du secteur (θ_0) et dans 14 directions de part et d'autre : -42° (θ_{-14}), -39° (θ_{-13}), -36° (θ_{-12}), ... $+39^\circ$ (θ_{+13}) et $+42^\circ$ (θ_{+14}). Puis le fetch pondéré est calculé par

$$F = \bar{G} + \left(\frac{1}{13} \sum_{i=0}^{13} (G_i - \bar{G})^2 \right)^{0.5}$$

avec

$$\bar{G} = \frac{1}{14} \sum_{i=0}^{13} G_i$$

$$G_i = \frac{1}{\sum_{k=0}^i \cos \theta_k} \sum_{k=0}^i F_k (\cos \theta_k)^2$$

GENER travaille avec un pas de temps d'une heure. En premier, il lisse la série temporelle des directions de vent avec une moyenne mobile de 9 heures appliquée sur les vecteurs de vent, et il arrondit la direction sur un des 16 secteurs (0° , $22,5^\circ$, 45° , ... $337,5^\circ$). Puis il divise la série en blocs de direction constante (longueur maximale 96 heures).

Chaque bloc de temps est traité séparément. Au pas de temps n , la formule de fetch est utilisée pour calculer H_s et T_s à partir du fetch pondéré du secteur et de toutes les combinaisons possibles de durée et de vitesse de vent moyennée (pas de temps n , pas $n-1$ à n , $n-2$ à n , ..., pas 1 à n). La plus grande H_s (et la T_s associé) est conservée pour ce pas de temps.

Pour tenir compte des conditions de vagues précédentes, un historique de H_s , T_s et direction des blocs de temps est conservé en mémoire. Cet historique est alimenté par les vagues calculées selon le paragraphe précédent au dernier pas de temps de chaque bloc. Une décroissance linéaire de ces H_s et T_s est ensuite appliquée entre chaque pas de temps. Le taux de décroissance est

déterminé par le temps de déplacement des vagues de période T_s sur la distance de fetch en eau profonde. H_s finale pour un pas de temps est calculée comme la racine de la somme des carrés des hauteurs du bloc actuel (calculé selon le paragraphe précédent) et des blocs passés. En effet, l'énergie de H_s finale est la somme de l'énergie des différentes hauteurs, l'énergie étant proportionnel au carré de H_s . T_s et la direction pour un pas de temps sont choisies comme ceux du bloc de temps avec la plus grande contribution à l'énergie de vague totale.

3.2. Modifications initiales à GENER

Le code de GENER utilisé actuellement au MTQ est écrit en Microsoft Visual C++; il utilise une interface graphique avec plusieurs boîtes de dialogue pour exécuter les différents modules du programme. Pour faciliter l'exécution en série, les parties calcul et entrée-sortie du code de GENER (tout à l'exception de l'interface graphique en Microsoft Visual C++) ont été adaptées pour correspondre à du C++ standard ANSI/ISO qui peut être compilé avec le compilateur GNU gcc (compilateur gratuit multiplateforme utilisé à l'ISMER).

Le résultat a été appelé GENEREUX, c'est-à-dire GENER compatible Linux. Les modifications ont été faites par James Caveen et Urs Neumeier à l'ISMER en 2011. GENEREUX s'utilise uniquement depuis la ligne de commande avec les différents paramètres transmis en partie comme options sur la ligne de commande et en partie dans un petit fichier de texte (distances de fetch notamment).

Quelques erreurs de programmation présentes dans les fonctions de calcul de la version Visual C++ ont été corrigées :

- une constante de la formule SPM-77,
- la confusion vitesse/direction pendant 4 heures toutes les 1200 heures,
- le vidage intempestif dans certaines conditions de la table des vagues s'atténuant,
- pour la formule SPM-84 la sous-estimation de la hauteur des vagues d'un facteur 0,95 et la surestimation de la période d'un facteur de 1,053.

Une série d'autres modifications a été apportée pour faciliter l'usage de GENER et donner de nouvelles fonctionnalités :

- Tous les fichiers intermédiaires et les fichiers de sorties sont maintenant des fichiers de texte ascii.
- Les dates et heures du fichier d'entrée sont conservées à travers tous les calculs et sont écrites dans les fichiers de sortie.
- Les trous de 1-4 heures dans le fichier d'entrée sont interpolés. Plusieurs tests de cohérence ont été ajoutés sur le fichier d'entrée et sur les différents paramètres.
- Les vitesses et directions de vent peuvent maintenant être des nombres à virgule et les directions peuvent être exprimées en degrés (au lieu de dizaines de degrés). Les anciens fichiers de vents peuvent encore être lus en utilisant une option particulière.
- L'exécution saisonnière peut aussi chevaucher le 31 décembre (par exemple du 15 avril au 15 janvier).

Un document « Description de GENEREUX » décrit en détail les modifications, les formats de fichiers d'entrée et de sortie, ainsi que la manière d'utiliser le programme (Annexe 2).

3.3. Ajout de nouvelles formules de fetch

La version originale de GENER contenait deux formules de fetch (SPM-77 et SPM-84); nous avons ajouté quatre autres formules (Tableau 3). Les six formules sont documentées ci-dessous, et peuvent être sélectionnées avec le paramètre -m lors de l'appel à GENER.

Tableau 3. Listes des formules de fetch disponible dans GENER

Nom court	Nom long	Référence	paramètre d'appel
SPM77	Shore Protection Manual 1977	USACE (1977)	-m 0 (par défaut)
SPM84	Shore Protection Manual 1984	CERC (1984)	-m 1
JON73	Jonswap	Hasselmann et al. (1973)	-m 2
CEM03	Coastal Engineering Manual	Resio et al. (2002)	-m 3
WIL65	Wilson	Wilson (1965)	-m 4
DON80	Donelan	Donelan (1980)	-m 5

Liste des symboles

- d profondeur (m)
 F distance de fetch pondérée en (m) ou si limité par la durée, fetch équivalent (m)
 g gravité (m/s^2)
 $H_{1/3}$ hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues (m)
 H_{m0} hauteur significative des vagues calculée par méthode spectrale (m)
 H_s hauteur significative des vagues, généralement $H_{1/3}$, mais parfois aussi H_{m0} (m)
 t durée du vent (s)
 T_p période du pic d'énergie du spectre des vagues (s)
 T_s période significative des vagues (période moyenne du tiers supérieur des vagues en hauteur, s)
 U vitesse du vent à 10 m en m/s

3.3.1. SPM 1977 (USACE, 1977)

En premier, le fetch équivalent – correspondant à la durée du vent – est calculé en résolvant l'équation suivante, qui se résume à une équation du deuxième degré en posant $x = \ln(gF/U^2)$

$$(6.5882^2 - 0.0161) \left[\ln\left(\frac{gF}{U^2}\right) \right]^2 + \left[0.3692 - 2 \cdot 0.8798 \ln\left(\frac{gt}{6.5882U}\right) \right] \ln\left(\frac{gF}{U^2}\right) + \left[\ln\left(\frac{gt}{6.5882U}\right) \right]^2 - 2.2024 = 0$$

Ensuite la distance la plus courte entre le fetch équivalent et le fetch réel (pondéré) est utilisée pour calculer la hauteur significative et la période significative.

$$H_s = \frac{U^2}{g} 0.283 \alpha_H \tanh \left[\frac{0.0125}{\alpha_H} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right]$$

$$T_s = \frac{2\pi U}{g} 1.20 \alpha_T \tanh \left[\frac{0.077}{\alpha_T} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right]$$

En eau profonde, $\alpha_H = 1$ et $\alpha_T = 1$. En eau peu profonde α_H et α_T se calculent par

$$\alpha_H = 0.530 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.75}$$

$$\alpha_T = 0.833 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.375}$$

3.3.2. SPM 1984 (CERC, 1984)

SPM 1984 n'utilise pas directement le vent à 10 m, mais une vitesse ajustée :

$$U_A = 0.71 U^{1.23}$$

En premier, le fetch équivalent correspondant à la durée du vent est calculé par

$$F = \left(\frac{gt}{68.8 U_A} \right)^{1.5} \frac{U_A^2}{g}$$

Ensuite la distance la plus courte entre le fetch équivalent et le fetch réel (pondéré) est utilisée pour calculer la hauteur significative et la période du pic d'énergie.

En eau profonde :

$$H_{m0} = \frac{1.6 \cdot 10^3 U_A \sqrt{F}}{\sqrt{g}}$$

$$T_p = 0.2857 \frac{U_A}{g} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}$$

En eau peu profonde :

$$H_s = \frac{U_A^2}{g} 0.283 \alpha_H \tanh \left[\frac{0.00565}{\alpha_H} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right]$$

$$T_p = \frac{2\pi U}{g} 1.20 \alpha_T \tanh \left[\frac{0.0379}{\alpha_T} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right]$$

$$\alpha_H = 0.530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{0.75}$$

$$\alpha_T = 0.833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{0.375}$$

Dans GENER, T_p est converti en T_s avec : $T_s = 0,95 T_p$

3.3.3. Jonswap (Hasselmann et al., 1973)

Les équations sont identiques à celles utilisées pour SPM 1984, sauf que la vitesse du vent à 10 m remplace la vitesse ajustée (U_A).

3.3.4. CEM03 (Resio et al., 2002)

Le Coastal Engineering Manual calcule une vitesse de cisaillement u_* en estimant le coefficient de trainée C_D comme suit

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035 U)$$

$$C_D = \frac{u_*^2}{U^2}$$

Les vagues sont limitées par la durée si

$$t < 77.23 \frac{F^{0.67}}{U^{0.34} g^{0.33}}$$

Dans ce cas un fetch équivalent est calculé comme suit

$$F = 5.23 \cdot 10^{-6} \frac{u_*^2}{g} \left(\frac{gt}{u_*} \right)^{\frac{3}{2}}$$

En eau profonde :

$$H_{m0} = \frac{0.0413 u_* \sqrt{F}}{\sqrt{g}}$$

$$T_p = \frac{0.751 u_*}{g} \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

En eau peu profonde, H_{m0} et T_p sont calculés de manière similaire, puis T_p est limité au maximum à :

$$T_{p,max} = 9.78 \left(\frac{d}{g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

3.3.5. Wilson (1965)

En premier, le fetch équivalent correspondant à la durée du vent est calculé selon Etamad-Shahidi et al. (2009).

$$F = \left(\frac{t U^{0.73} g^{0.27}}{43} \right)^{\frac{1}{0.73}}$$

Ensuite la distance la plus courte entre le fetch équivalent et le fetch réel (pondéré) est utilisée pour calculer la hauteur significative et la période significative.

$$H_s = \frac{U^2}{g} 0.30 \left[1 - \left(1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.5} \right)^{-2} \right]$$

$$T_s = \frac{2\pi U}{g} 1.37 \left[1 - \left(1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-5} \right]$$

3.3.6. Donelan (1980)

En premier, le fetch équivalent correspondant à la durée du vent est calculé :

$$F = \left(\frac{t U^{0.54} g^{0.23}}{30.1} \right)^{\frac{1}{0.77}}$$

Ensuite la distance la plus courte entre le fetch équivalent et le fetch réel (pondéré) est utilisée pour calculer la hauteur significative et la période significative.

$$H_s = 3.664 \cdot 10^{-3} g^{-0.62} U^{1.24} F^{0.38}$$

$$T_p = 0.54 g^{-0.77} U^{0.54} F^{0.23}$$

3.4. Algorithme de prétraitement de vent

GENER fonctionne avec une seule série temporelle de vent en entrée, c'est-à-dire pour chaque heure une valeur de vitesse et de direction du vent. Cette série temporelle doit être la plus représentative possible du vent soufflant sur le plan d'eau et générant les vagues. Traditionnellement des données historiques de stations météorologiques situées sur la côte étaient utilisées, avec un facteur d'ajustement (souvent $\times 1,2$) pour compenser les vents plus fort sur l'eau que sur terre. Toutefois le vent est variable dans l'espace, spécialement lors du passage de front de tempêtes, et la représentativité des données de vent alimentant un modèle de vague est un facteur déterminant pour la qualité des résultats de tout modèle de vague.

Il existe de nos jours différents modèles numériques reproduisant ou simulant relativement correctement les conditions atmosphériques incluant le vent. Ils ont généralement une grille régulière avec des mailles variant entre 15 et 60 km selon les modèles. Il serait possible de sélectionner simplement un point de grille du modèle au large pour alimenter GENER. Toutefois, ce point ne peut pas être représentatif de l'ensemble du domaine de génération de vagues pour toutes les directions de vents.

Nous avons donc développé un nouvel algorithme de prétraitement de vents pour alimenter GENER à partir des sorties de modèles atmosphériques (météorologiques ou climatiques) sur une grille bidimensionnelle. L'algorithme est appliqué séparément pour chaque pas de temps, et la série temporelle obtenue est utilisée pour alimenter GENER de manière traditionnelle.

Le but de l'algorithme est d'obtenir le vent moyen à partir seulement des points de grilles pour lesquels les vagues générées se propagent vers le site d'étude. Ces points dépendent de la direction des vents et aussi des distances de fetch. De plus, comme le vent change significativement entre les zones terrestres et les plans d'eau, uniquement les points de grille marins sont utilisés.

Seize directions sont considérées, soit tous les $22,5^\circ$. Pour chaque direction θ , la zone pouvant influencer les conditions de vagues au site d'étude est définie comme un secteur de 90° centré sur la direction et avec un rayon correspondant au fetch pondéré dans cette direction, en excluant les régions terrestres (Figure 13A). Si cette zone ne contient aucun point de grille, le point de grille marin le plus proche du site d'étude est pris à la place. Un *vecteur de vent moyenné* est construit avec comme direction celle du vecteur moyen des vents, et comme magnitude la racine de la somme des carrés des vitesses (RMS). Si l'angle entre ce *vecteur de vent moyenné* et la direction θ est supérieur à 90° (vent s'éloignant du site d'étude), la vitesse pour la direction θ est considérée nulle. Finalement, à partir des 16 *vecteurs de vent moyenné*, celui avec la plus grande composante vers le site d'étude (magnitude multiplié par le cosinus de la différence entre la direction du vecteur et la direction θ) est sélectionné comme entrée pour GENER pour ce pas de temps (Figure 13B).

Le code Matlab de cet algorithme figure à l'annexe 3.

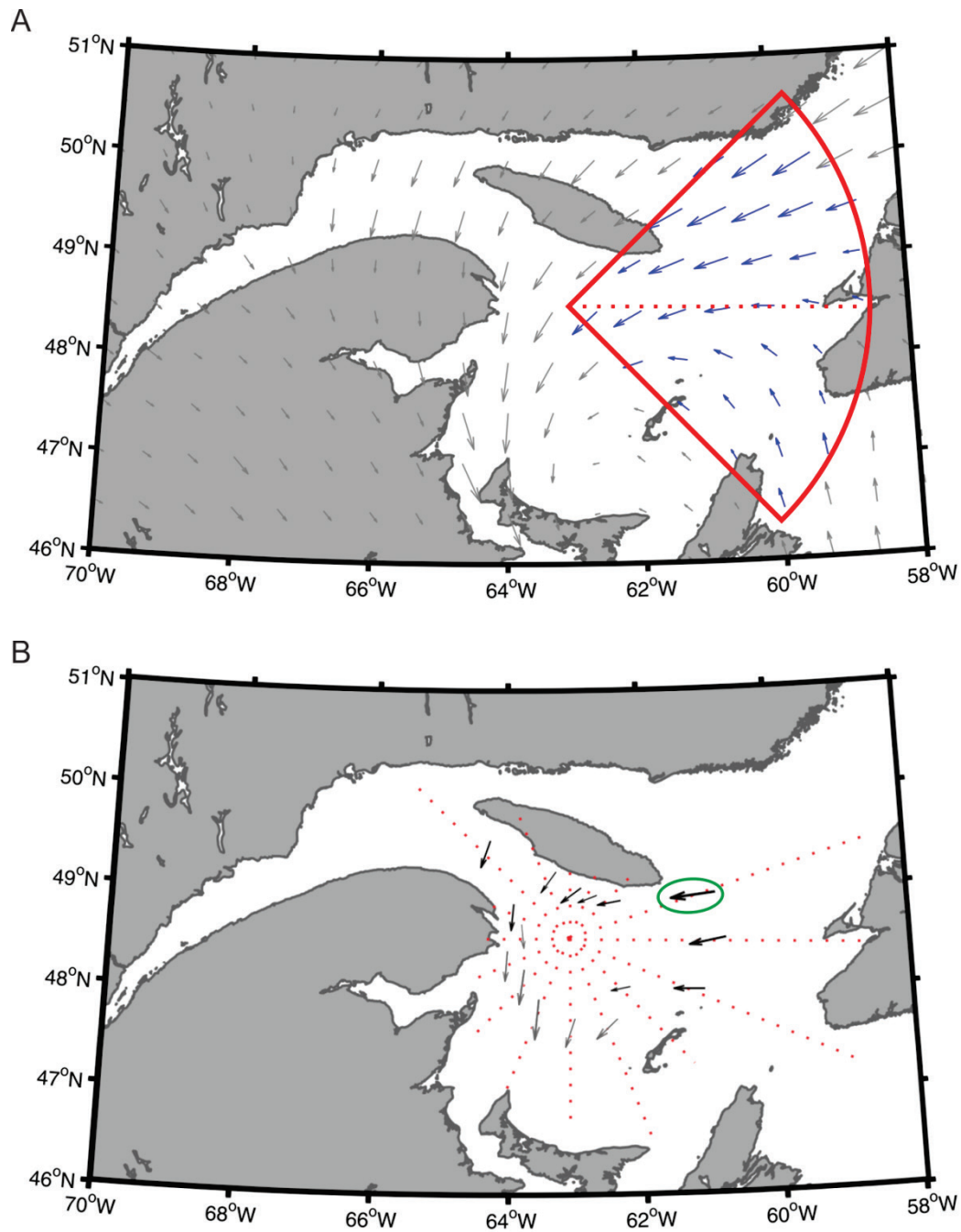


Figure 13. Illustration de l'algorithme de prétraitement de vent. (A) Sélection des points de grilles marins à moins de la distance de fetch pondérée (en pointillé rouge) dans un secteur de 90° pour une des seize directions θ (flèches en bleu). (B) Distances de fetch pondérées pour les seize directions θ (en pointillés rouges), vecteurs de vent moyenné pour chacune des seize directions θ (flèches noires quand dirigés vers le site d'étude, flèches grises quand s'éloignant du site d'étude), vecteur retenu (ellipse verte).

4. Méthode d'atténuation des vagues par la glace

La physique des interactions vagues-glace est un problème complexe et difficile à appréhender de par la grande hétérogénéité de la banquise et de ses propriétés mécaniques, le caractère dispersif et la cohérence des ondes de gravité, mais aussi par la difficulté d'observer ces interactions de manière suffisamment complète dans le temps et dans l'espace pour vérifier la validité des théories et des modèles. Parmi les questions auxquelles il est encore ardu de fournir des réponses définitives, certaines trouvent des réponses approximatives qui peuvent être utiles afin d'évaluer l'évolution future du climat vague-glace, notamment en ce qui concerne l'atténuation des vagues par la glace. Ce phénomène est tellement significatif, que l'on associe traditionnellement à un couvert substantiel de glace, i.e. au-delà d'une certaine concentration, une absence complète de vagues. La méthode proposée ici nuance cette approche et propose l'utilisation d'une méthode empirique adaptée au golfe du Saint-Laurent pour évaluer l'impact de la glace sur le climat de vagues du XXI^e siècle.

Dans cette section, nous dressons d'abord un portrait du climat de glace récent à l'échelle du golfe à l'aide des cartes de glaces du Service Canadien des Glaces (SCG), que l'on associe ensuite à la température de l'air. Un ensemble de projections climatiques de la température de l'air nous permet d'extrapoler les conditions de glace dans le futur. Deux méthodes sont employées et inter-comparées. La première est basée sur une extrapolation d'une régression linéaire entre le cumul saisonnier de concentration de glace à l'échelle du golfe et le maximum de degrés-jour de gel cumulés. Cette méthode est décrite dans les sections 4.1 et 4.2, puis utilisée aux sections 4.3 et 4.4 pour estimer l'atténuation future des vagues par la glace. La seconde est basée sur des simulations directes de la couverture de glace par le Modèle Océanique Régional (MOR) à partir de scénarios climatiques, une méthode est utilisée dans le cadre d'un projet MTQ réalisé en parallèle (Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques). Cette dernière est incluse dans ce rapport à titre de comparaison avec la première méthode, qui elle est strictement basée sur des observations. La seconde méthode utilisée à la section 4.5 pour estimer l'atténuation future des vagues par la glace.

En combinant nos connaissances du climat de glace et des interactions vagues-glace aux sorties climatiques du modèle GENER, l'influence de la glace sur le climat de vagues est évaluée à l'échelle du golfe (section 4.3). Un ensemble de projections futures est réalisé afin de quantifier la tendance à long terme, l'incertitude associée aux modèles atmosphériques utilisés et la variabilité du système.

4.1. Traitement des données de glace (2002-2012)

Les données de glace utilisées pour cette étude proviennent du Service Canadien des Glaces (SCG). Les experts en glace du SCG analysent chaque jour les images satellites, aériennes et les observations de navires pour générer les cartes de glace journalières utilisées pour la navigation. Sur les cartes sont dessinées chaque jour les zones où les caractéristiques de glace sont relativement homogènes (Figure 14). Ces caractéristiques sont regroupées dans le code de l'œuf, un format standard qui informe sur la concentration totale ou partielle de glace, le stade de formation de la glace et la taille maximale des floes, avec jusqu'à trois types de glaces dans une même zone (Frequet, 2005).

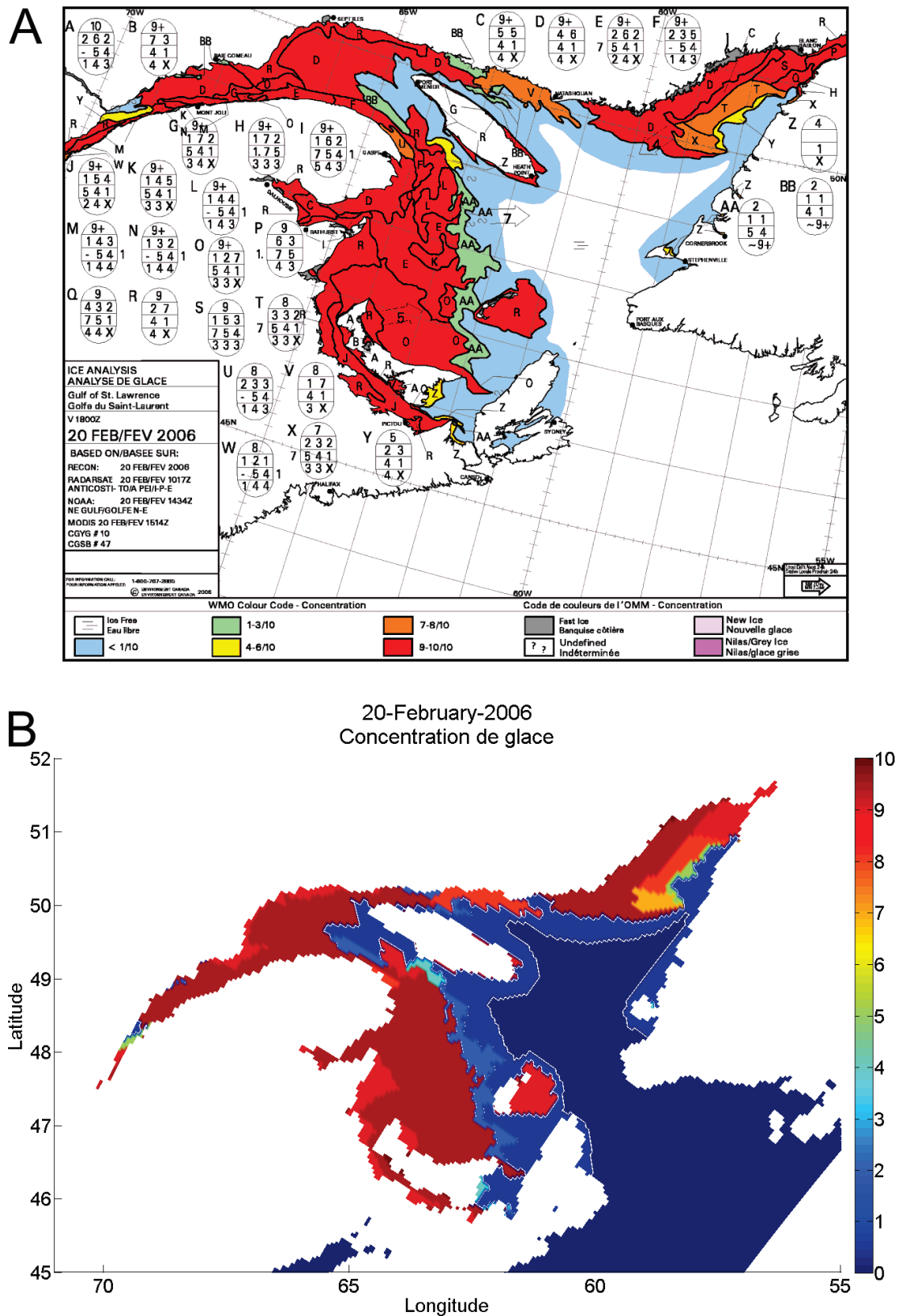


Figure 14. (A) Exemple de carte de glace avec les codes de l'œuf pour chaque zone. (B) Concentration de la glace (en nombre de dixième) avec les données numériques DEX du même jour importées dans Matlab.

L'information contenue dans les cartes de glace est aussi accessible numériquement à partir de fichiers au format DEX où chacune des variables est donnée sur une grille cartésienne de 5×5 km. Ces fichiers existent pour chaque jour des hivers 2002 à 2012 pour l'estuaire et le golfe du St-Laurent. Avant 2002, quelques fichiers DEX existent, mais ils couvrent des périodes de temps trop éparées pour présenter un intérêt dans cette étude. Par exemple, l'hiver 1994 ne compte que deux fichiers.

Avant 2006, les données sont sur une grille régulière complète de 217×212 points, dont 46004 points sont mouillés. À partir de 2006, les fichiers ne contiennent que les 37727 points mouillés qui sont très légèrement décalés par rapport à la première grille. L'ancienne grille étant régulière, elle a été préférée à la nouvelle afin de faciliter la manipulation des données dans Matlab. Les données de glace des hivers 2006 à 2012 ont donc été interpolées sur l'ancienne grille. L'importation dans Matlab a permis de créer des matrices en 4 dimensions pour chaque hiver. Les dimensions des matrices correspondent à $N_x \times N_y \times N_v \times N_t$ où $N_x = 217$ est le nombre de points selon x , $N_y = 212$ est le nombre de points selon y , $N_v = 13$ est le nombre de variables contenues dans le code de l'œuf et $N_t = 273$ (274) le nombre de cartes journalières dans une année (bissexile). Le nombre de jours correspond à la période du 1^{er} octobre au 30 juin. L'exactitude de l'importation a été vérifiée en retraçant les cartes de glaces à partir des matrices annuelles et en les comparant avec les cartes de glaces originales (exemple à la Figure 14).

4.2. Caractérisation du climat de glace 2002-2012

La démarche de cette partie du projet consiste à établir la période de présence de glace dans les années futures et la période durant laquelle les vagues sont plus ou moins atténuées selon la couverture de glace. Pour cela, nous établissons, pour le passé récent, une relation entre la température de l'air et la présence de glace, relation qui sera ensuite extrapolée et appliquée aux années futures dont le climat est obtenu par des simulations climatiques. Cette analyse est réalisée à deux échelles spatiales, d'une part à l'échelle du golfe et d'autre part autour des sites des AWACs.

4.2.1. Estuaire et golfe du Saint-Laurent

Le nombre de degré-jours de gel (DJG), calculé à partir de la température de l'air à 2 m, est le critère choisi comme indicateur de la quantité de chaleur extraite de l'océan et de la glace par l'atmosphère. Assel (1980) l'a utilisé comme indicateur de sévérité de l'hiver et a obtenu une bonne représentation de la couverture de glace des Grands Lacs.

Les degrés-jour de gel sont le cumul de l'écart entre la température moyenne journalière de l'air (T_j) et la température du point de congélation. **Comme nous travaillons en milieu marin, notre température de référence est $-1,9^\circ\text{C}$, soit le point de congélation pour l'eau de mer** (pour l'eau douce les DJG sont au contraire calculés avec une température de référence de 0°C). Les DJG sont donc un critère indiquant le nombre de jours où la température de l'air est propice à la formation de glace de mer. Si le cumul est négatif, celui-ci est remis à zéro. Les DJG au jour j (DJG_j) sont calculés du 1^{er} octobre jusqu'au 30 juin par

$$\text{DJG}_j = \text{DJG}_{j-1} - (T_j + 1.9)$$

avec

$$DJG_0 = 0$$

$$DJG_j = 0 \text{ si } DJG_j < 0$$

Ainsi, la courbe croît lorsque la température journalière de l'air est inférieure à $-1,9^{\circ}\text{C}$, et décroît lorsque la température est supérieure à $-1,9^{\circ}\text{C}$ (Figure 15). Le **début de la période de gel** (début PG) est le jour où la courbe commence à croître; la **fin de la période de gel** (fin PG) est le jour du maximum de la courbe. Début-PG et fin-PG sont exprimés en jour avant/après le 1^{er} janvier. Pour calculer les DJG, les données de températures de l'air du modèle de ré-analyse *Global Environmental Multi-échelle* (GEM) ont été utilisées.

La glace est considérée présente dans le golfe si la moyenne de sa concentration totale est supérieure à 10%. Ainsi, le **jour d'apparition de la glace** est le jour où la concentration de glace pour tout le golfe dépasse la première fois le seuil de 10%, et le **jour de disparition de la glace** celui où la concentration totale descend définitivement sous ce seuil.

La superposition des courbes de concentration totale dans le golfe et du nombre de DJG (Figure 15) montre qu'il existe un lien entre :

- début-PG et l'apparition de la glace,
- fin-PG et la disparition de la glace,
- le maximum atteint par la courbe des degrés-jour de gel ($DJG_{\max}$) et la somme de tous les couverts de glace journaliers de l'hiver (couvert de glace cumulé).

Ces paramètres ont été comparés pour tous les hivers pour lesquels nous avons accès aux cartes de glaces digitalisées, i.e. de 2002-2003 à 2011-2012 et une régression linéaire a été obtenue pour chaque graphique pour établir la relation représentant la corrélation entre le nombre de degrés-jour de gel et la présence de glace de mer (Figure 16, Tableau 4). Notons que les coefficients de corrélations R^2 sont tous supérieurs ou égaux à 0,73, valeurs qui valident en quelque sorte le bien-fondé d'une telle méthode empirique pour caractériser globalement le couvert de glace annuel du golfe du Saint-Laurent. Lorsque l'on applique les relations empiriques aux sorties de GEM et qu'on les compare aux observations de glace (Figure 20), on note que la méthode représente bien la moyenne et la variabilité du climat contemporain.

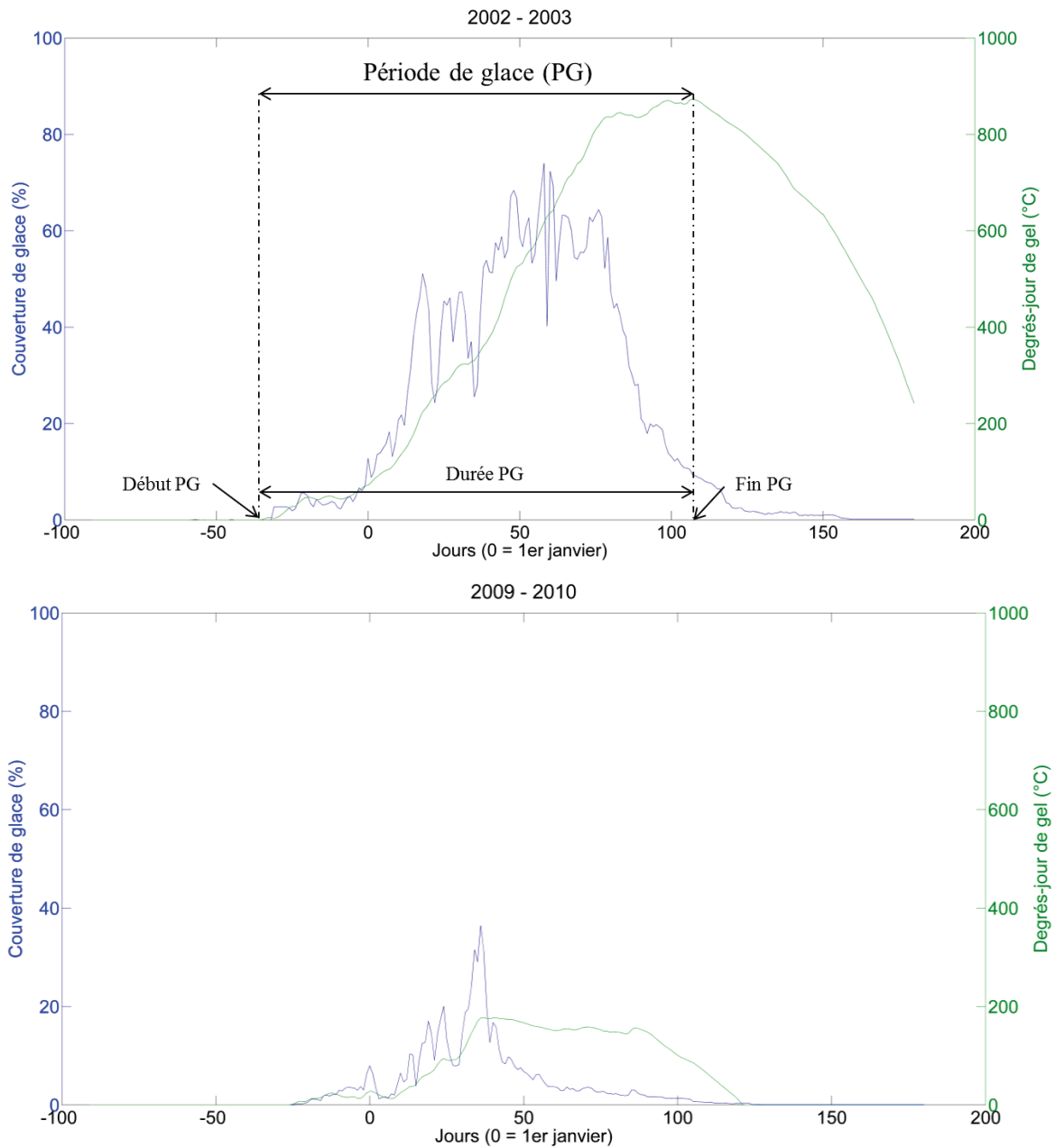


Figure 15. Concentration totale de glace dans le golfe (bleu) et degrés-jour de gel calculés pour l'hiver (vert). L'hiver 2002-2003 (en haut) est un hiver relativement froid, alors que l'hiver 2009-2010 (en bas) est un hiver chaud.

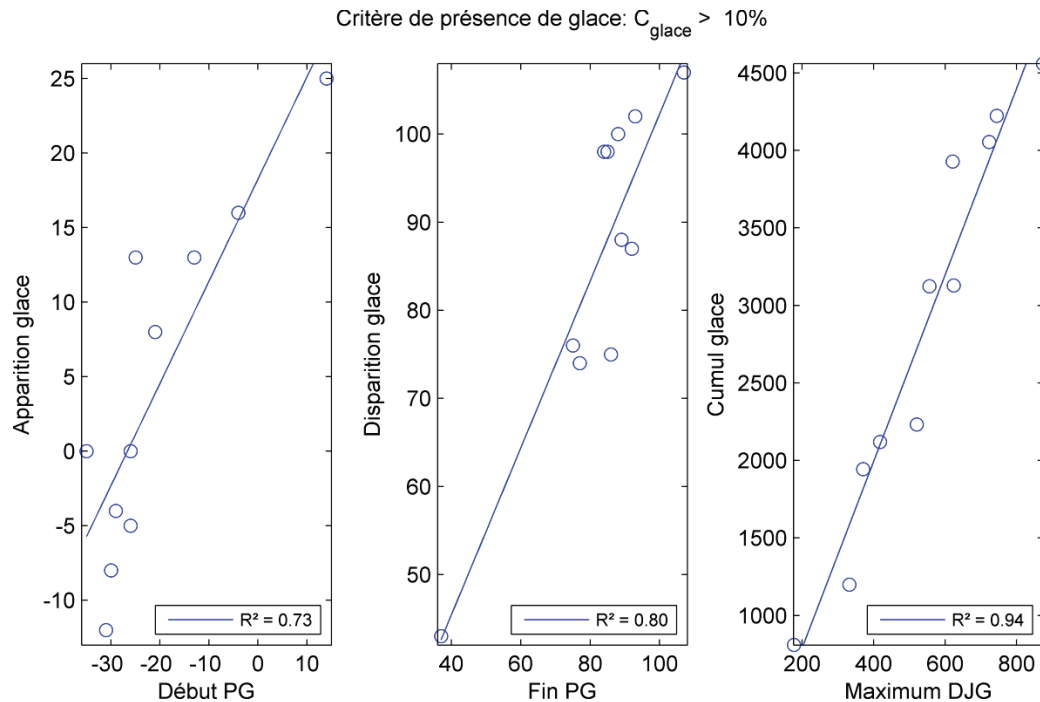


Figure 16. Régressions linéaires entre les paramètres issus du nombre de degrés-jour de gel (abscisse) et ceux issus des cartes de glace (ordonnée) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du St-Laurent.

4.2.2. Sites des AWACs

Les équations de régressions linéaires, les coefficients de corrélation et la significativité des relations sont résumés dans le Tableau 4. Équations des droites de régression entre les paramètres issus des degrés-jour de gel et de ceux issus des cartes de glace, avec leur coefficient de corrélation respectif. Les coefficients supérieurs à 0,80 sont indiqués en gras.

Les mêmes comparaisons ont été effectuées pour les sites des AWACs (St-Ulric, Cap d'Espoir et Sept-Îles). Le couvert de glace et la température de l'air ont été moyennés dans des rayons de 50 et 100 kilomètres autour de la position de chaque mouillage (Figure 17). Le critère de présence de glace pour les environs des AWACs est une concentration supérieure à 15%, plutôt que 10% pour l'ensemble du golfe, d'une part car les corrélations sont meilleures avec une telle concentration, et d'autre part l'influence de la glace côtière est plus importante à l'échelle locale. Ainsi, une concentration de 10% dans un rayon de 50 km d'un site peut correspondre seulement à une bande de banquise côtière, qui influence peu les vagues. Certains de ces paramètres, notamment le jour d'apparition de la glace, sont parfois moins bien corrélés localement qu'à l'échelle du golfe (Tableau 4). Ceci s'explique par le fait qu'à plus fine échelle l'advection de la glace devient un facteur important déterminant la présence ou l'absence de glace, alors que le nombre de DJG est surtout un indicateur des processus thermiques.

Critère de présence de glace: $C_{\text{glace}} > 15\%$

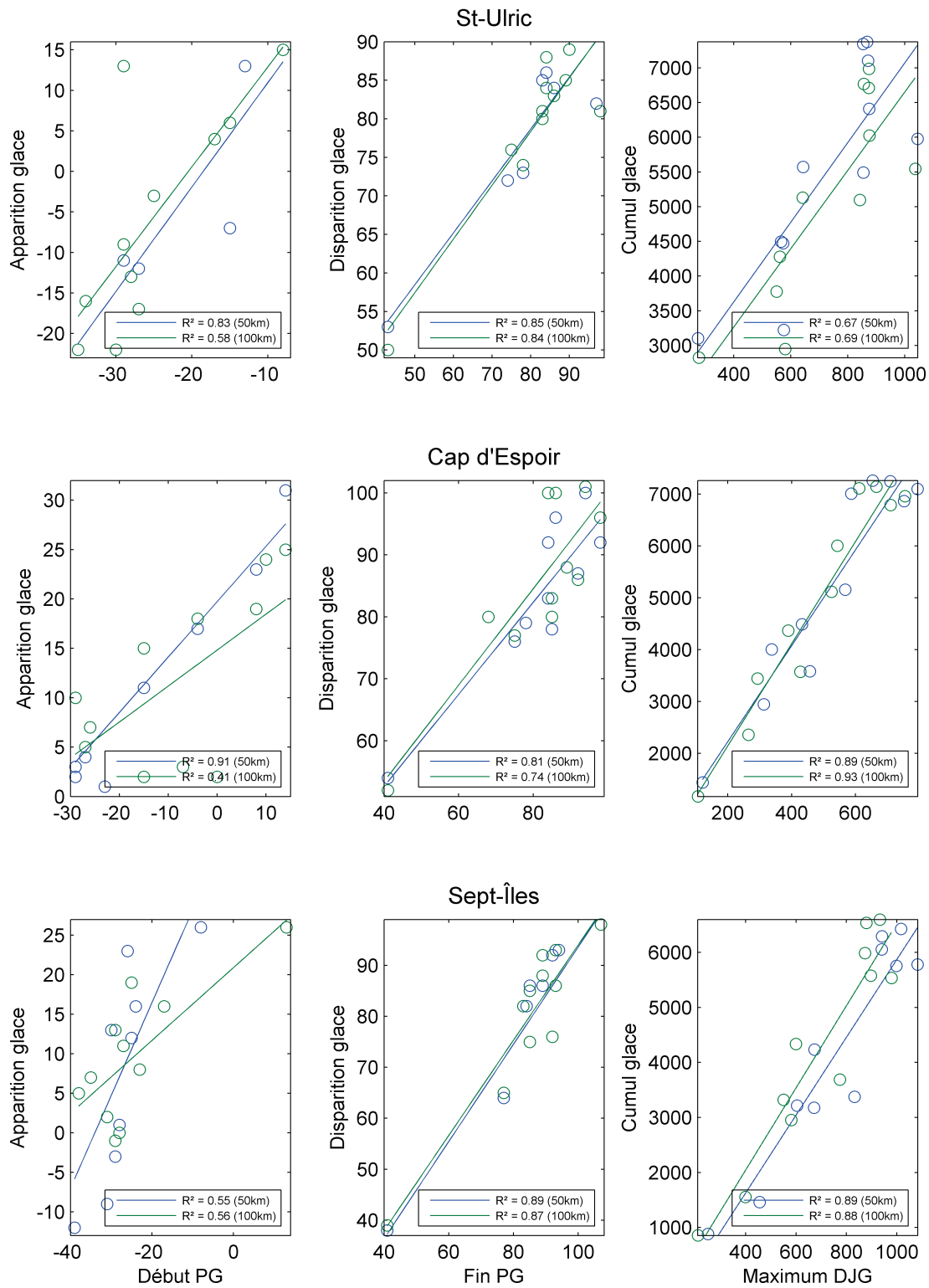


Figure 17. Régression linéaire entre les paramètres de degrés-jour de gel (abscisse) et la présence de glace (ordonnée) pour les trois sites des AWACs, dans un rayon de 50 km (bleu) et 100 km (vert).

Tableau 4. Équations des droites de régression entre les paramètres issus des degrés-jour de gel et de ceux issus des cartes de glace, avec leur coefficient de corrélation respectif. Les coefficients supérieurs à 0,80 sont indiqués en gras.

Région	Début glaces $x = \text{début-PG}$	Fin glaces $x = \text{fin-PG}$	Couvert cumulé $x : \text{DGJ}_{\text{max}}$
Golfe	$y = 0.68x + 18$ $R^2 = 0.73$ **	$y = 0.95x + 8$ $R^2 = \mathbf{0.80}$ **	$y = 6.02x - 415$ $R^2 = \mathbf{0.94}$ **
St-Ulric (50km)	$y = 1.29x + 24$ $R^2 = \mathbf{0.83}$ **	$y = 0.67x + 25$ $R^2 = \mathbf{0.85}$ **	$y = 5.73x + 1337$ $R^2 = 0.67$ *
St-Ulric (100km)	$y = 1.23x + 25$ $R^2 = 0.58$ *	$y = 0.70x + 23$ $R^2 = \mathbf{0.84}$ **	$y = 5.64x + 1015$ $R^2 = 0.69$ *
Cap d'Espoir (50km)	$y = 0.56x + 20$ $R^2 = \mathbf{0.91}$ **	$y = 0.74x + 23$ $R^2 = \mathbf{0.81}$ **	$y = 9.24x + 379$ $R^2 = \mathbf{0.89}$ **
Cap d'Espoir (100km)	$y = 0.36x + 15$ $R^2 = 0.41$	$y = 0.78x + 22$ $R^2 = 0.74$ **	$y = 9.85x + 177$ $R^2 = \mathbf{0.93}$ **
Sept-Îles (50km)	$y = 1.17x + 40$ $R^2 = 0.55$ *	$y = 0.95x - 2$ $R^2 = \mathbf{0.89}$ **	$y = 7.06x - 1195$ $R^2 = \mathbf{0.89}$ **
Sept-Îles (100km)	$y = 0.46x + 21$ $R^2 = 0.56$ *	$y = 0.93x + 1$ $R^2 = \mathbf{0.87}$ **	$y = 7.46x - 938$ $R^2 = \mathbf{0.88}$ **

* significatif à $p < 0.05$

** significatif à $p < 0.01$

4.3. Projections futures de la présence de glace

Huit simulations provenant de deux modèles climatiques suivant le scénario A2 de l'IPCC ont été utilisées pour calculer le nombre de degrés-jour de gel. Un groupe de cinq simulations provient du Modèle Global Canadien de 3^e génération de résolution spatiale d'environ 3,75° en latitude et longitude (CGCM3.1/t47, membres basés sur le scénario A2). Deux autres simulations proviennent de la version 4.2.3 du Modèle Régional Climatique Canadien (MRCC). La simulation MRCC-aev est pilotée par le membre 5 du CGCM3.1/t47 suivant le scénario A2, et la simulation MRCC-ahj provient du forçage du MRCC par le membre 3 du modèle global ECHAM5 suivant le scénario A2 du GIEC. Il est nécessaire de préciser qu'un biais froid a été remarqué par l'équipe de Simon Senneville pour la simulation MRCC-aev, qui a été débiaisé par la méthode des quantiles, et fourni une dernière simulation (MRCC-aev débiaisé). Les simulations du programme North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP) n'ont pas été utilisées pour la prévision de glace, car les données n'étaient disponibles que pour les périodes 1968-2000 et 2038-2070, ce qui complexifie la représentation des résultats.

Les projections de température de l'air ont été comparées entre chaque simulation climatique, en les moyennant sur la période du 1^{er} octobre au 30 juin, sur l'ensemble du golfe et autour de

chaque AWAC. Les degrés-jour de gel ont été calculés pour la période du 1^{er} octobre au 30 juin de chaque année pour chacune de ces simulations, et les valeurs de début, fin et durée de la période de gel, ainsi que le maximum atteint par la courbe ont été extraits. Ensuite, les relations déterminées pour les dix hivers ont été appliquées pour calculer les jours d'apparition et de disparition de la glace, ainsi que le cumul de glace hivernal pour chaque année.

4.3.1. Estuaire et golfe du Saint-Laurent

Les courbes de température moyenne hivernale sont présentées sur la Figure 18. Pour les 5 simulations du CGCM, la courbe est représentée avec la moyenne (trait plein) plus ou moins le minimum et le maximum (zone ombragée). Les projections pour l'ensemble du golfe sont similaires entre les modèles, et les températures de la période du passé récent représentent bien la moyenne et la variabilité du climat de cette période, illustré ici à partir du modèle météorologique GEM. Les pointillés verticaux indiquent les domaines de disponibilités des données de chaque scénario. Les simulations MRCC-aev et MRCC-ahj (courbe bleue et verte) couvrent la période de 1961 à 2100. Le débiaisage de MRCC-aev (courbe rouge) n'a été effectué que pour la période 1981 à 2090, et les données du CGCM (courbe jaune) sont disponibles seulement de 2001 à 2100. Ces pointillés se retrouvent sur chaque graphique suivant, afin de garder à l'esprit le nombre de simulations intervenant dans la moyenne des paramètres de glace issus des différents scénarios.

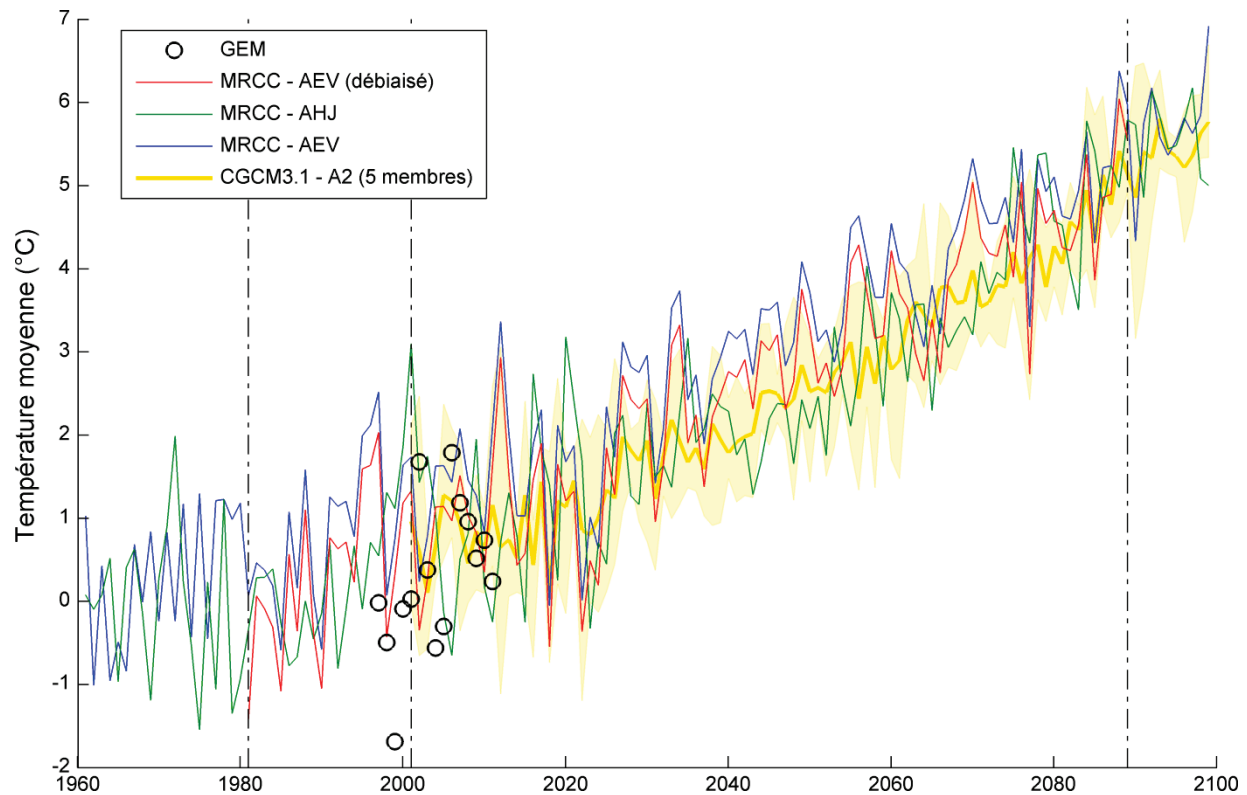


Figure 18. Température moyennée entre le 1er octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour l'ensemble du golfe. La courbe du CGCM3 correspond à la moyenne (minimum et maximum représenté en jaune pâle) des 5 membres simulant le scénario A2. Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.

Les formules empiriques obtenues par les régressions linéaires ont été utilisées avec la température de l'air des simulations MRCC-aev (débiaisé, cf. ci-dessus) et MRCC-ahj pour projeter dans le futur les périodes d'englacement et les couvertures de glace. Ces résultats sont comparés aux projections de glace du Modèle Océanique Régional (MOR) forcé par ces mêmes simulations (Figure 19 et Figures 23 à 25). Rappelons que le modèle MOR simule explicitement la formation, la fonte et dynamique de la banquise dans le St-Laurent (cf. projet *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques* présenté pour le ministère des Transports du Québec) jusqu'en 2070. Ces sorties permettent de vérifier la validité des relations empiriques entre degré-jours de gel et présence de glace, afin de projeter les prédictions jusqu'en 2100 (Figure 19). Malgré tout, la comparaison des deux méthodes montre des similitudes satisfaisantes en termes de tendance au raccourcissement de la durée d'englacement, ainsi qu'à la diminution du couvert de glace.

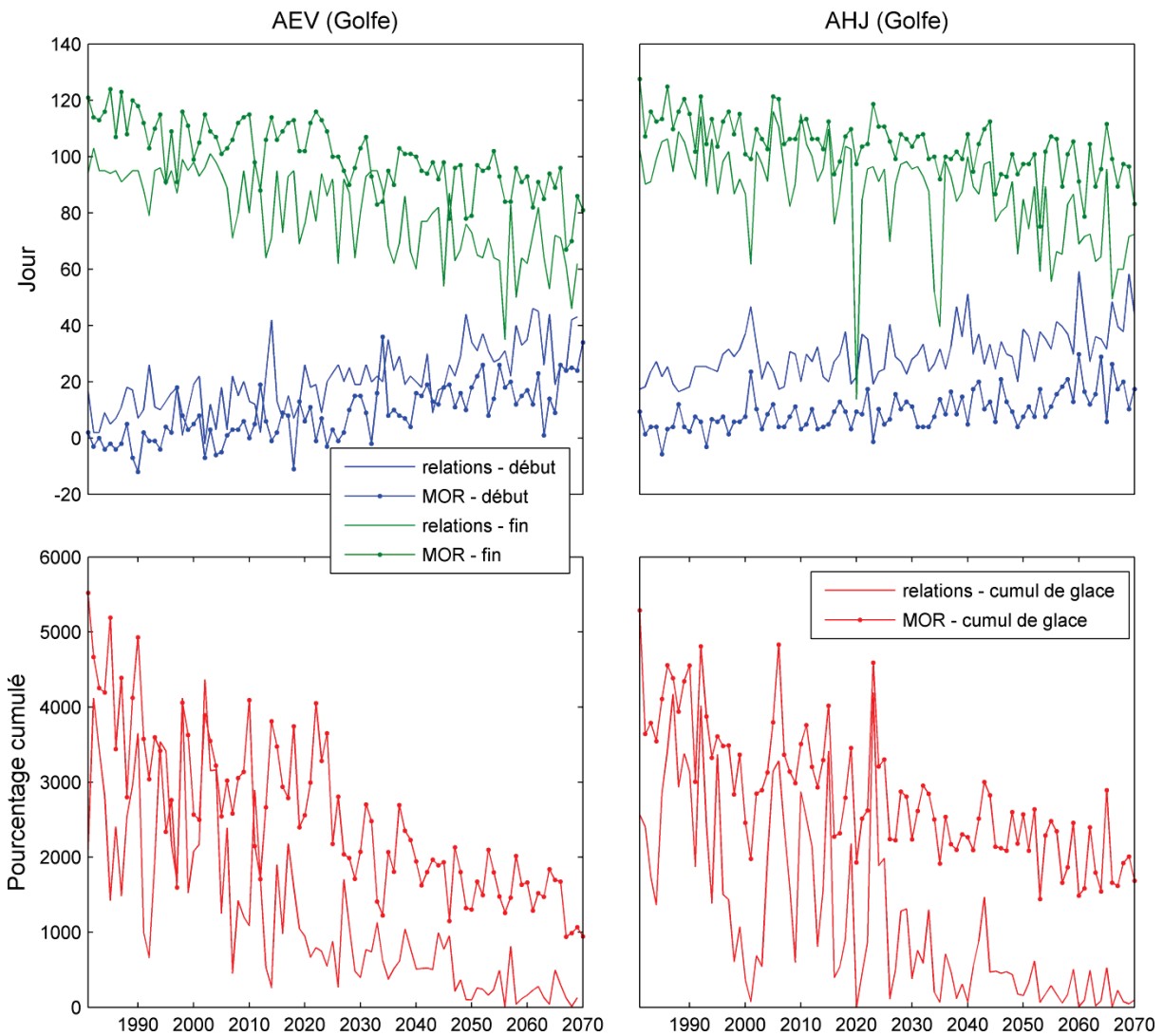


Figure 19. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) pour l'ensemble du golfe.

Les paramètres de glace calculés pour chaque hiver et pour l'ensemble des simulations sont présentés sur la Figure 20, de même que les données de glace du SCG et les paramètres de glace calculés pour les températures de GEM. Cette figure montre que les prédictions issues de GEM et des simulations climatiques représentent relativement bien les données de glace du passé récent, ainsi que leur variabilité inter-annuelle. Cela atteste de la validité de cette méthode de simulation d'englacement de l'estuaire et du golfe du St-Laurent.

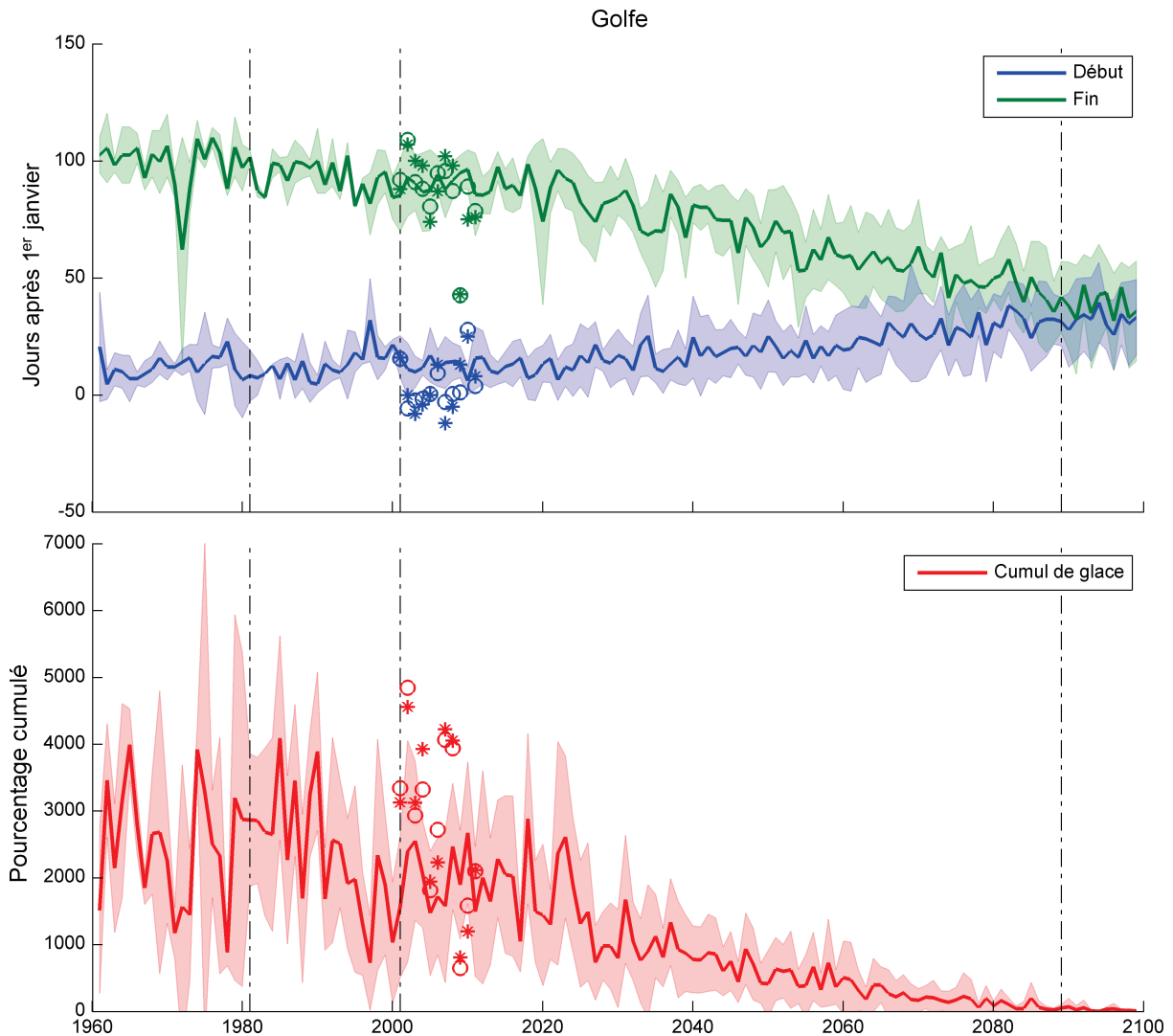


Figure 20. Résultats des relations empiriques appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour l'ensemble du golfe, le trait plein correspond à la moyenne des résultats obtenus par les différentes simulations, et la zone ombragée illustre le minimum et le maximum obtenus pour chaque année. Les étoiles correspondent aux données de glace SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.

4.3.2. Sites des AWACs

Le même travail a été réalisé pour les 3 sites des AWACs, pour des rayons de 50 et 100 kilomètres. La Figure 22 montre les températures moyennes hivernales pour chaque site et chaque simulation. Les sorties du CGCM donnent des températures plus froides que celles des modèles régionaux MRCC. Ceci est attribuable à la faible résolution spatiale de ce modèle (seulement 5 points mouillés sur tout le golfe) qui ne résout pas bien les particularités régionale et à l'interpolation des sorties aux sites spécifiques qui contamine les valeurs du domaine marin avec des valeurs terrestres, significativement plus froides qu'en mer en hiver. Ce modèle global est d'abord conçu pour simuler des tendances globales et régionales pour des régions de la taille

du golfe et plus. Les simulations climatiques du CGCM n'ont donc pas été retenues pour les prévisions à l'échelle locale.

La Figure 19 illustre la comparaison des sorties de MOR avec les projections de glace provenant des relations empiriques pour l'ensemble du golfe, et les Figures 23 à 25 pour les régions des AWACs. Les discontinuités des courbes de MOR sont dues aux hivers durant lesquels la concentration de glace locale n'a pas dépassé 15%, et dont on ne peut déterminer le début et la fin de l'englacement avec le critère de présence de glace à 15%. À l'échelle du golfe, les tendances et la variabilité sont relativement corrélées entre les 2 méthodes. Pour les régions autour des AWACs, les relations sont parfois moins bonnes, probablement à cause de l'advection de la glace. En effet, la glace peut être advectée par les courants marins, les vents et même les vagues, et sa dynamique est impossible à évaluer uniquement avec un critère thermique tel que les degrés-jour de gel. Les résultats issus des modèles régionaux concordent assez bien avec les observations, et beaucoup mieux que les modèles globaux. L'advection a plus d'importance pour les petites régions que pour tout le système quasi-fermé du golfe. Les projections de glace ont été effectuées, malgré ces limitations (Figures 26 à 28).

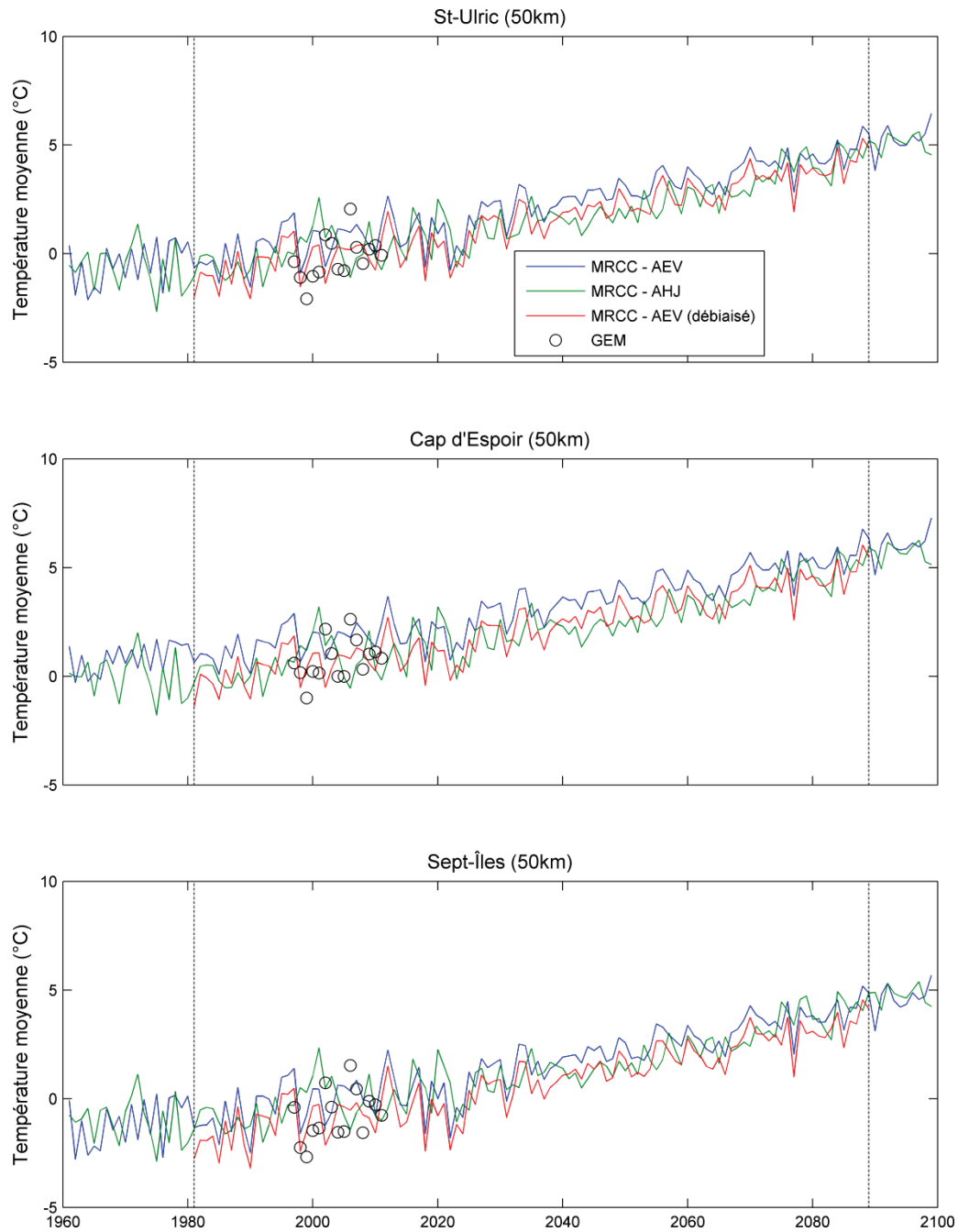


Figure 21. Température moyennée entre le 1er octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (50 km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.

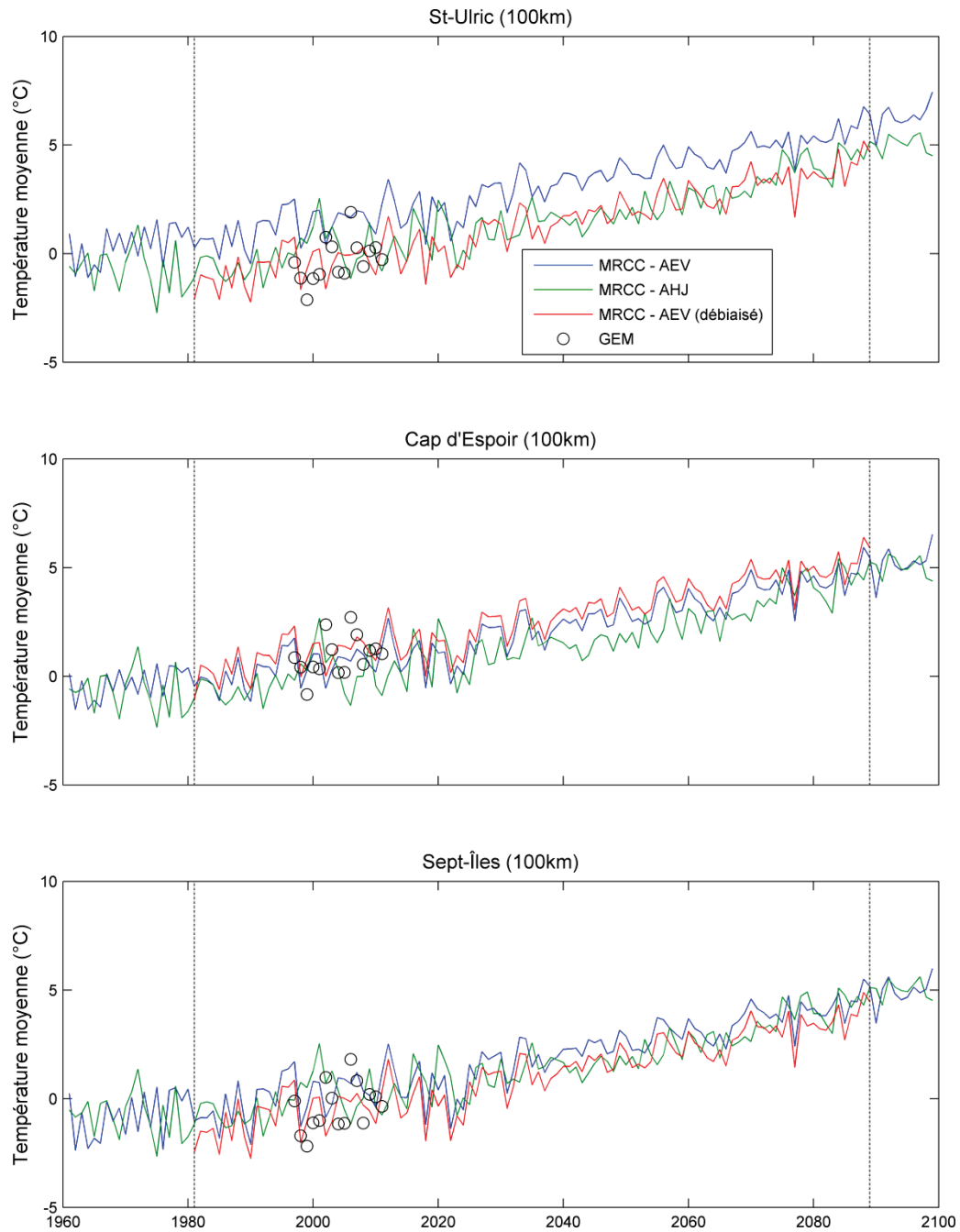


Figure 22. Température moyennée entre le 1er octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (100km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.

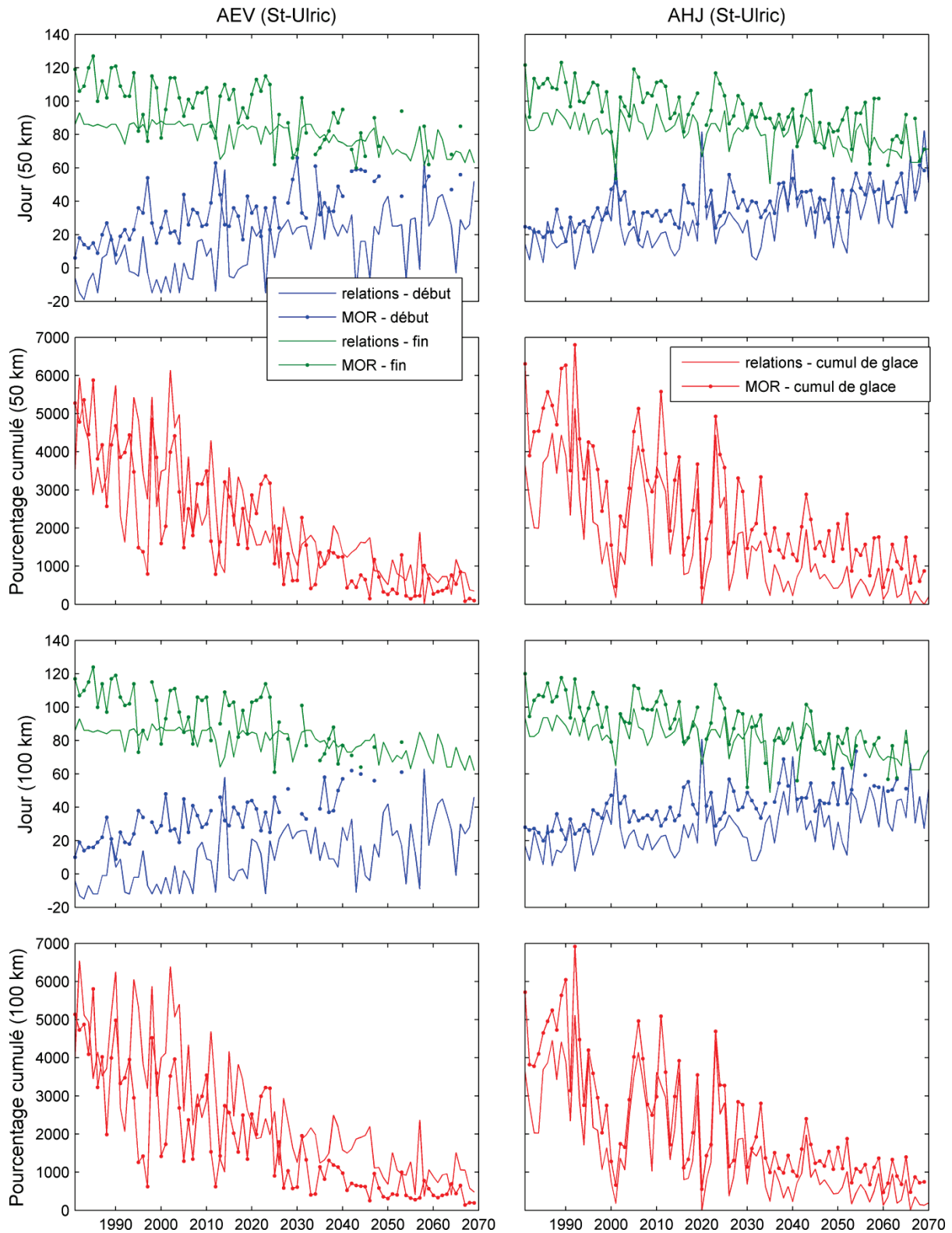


Figure 23. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) dans un rayon de 50 et 100 km autour du site de Saint-Ulric.

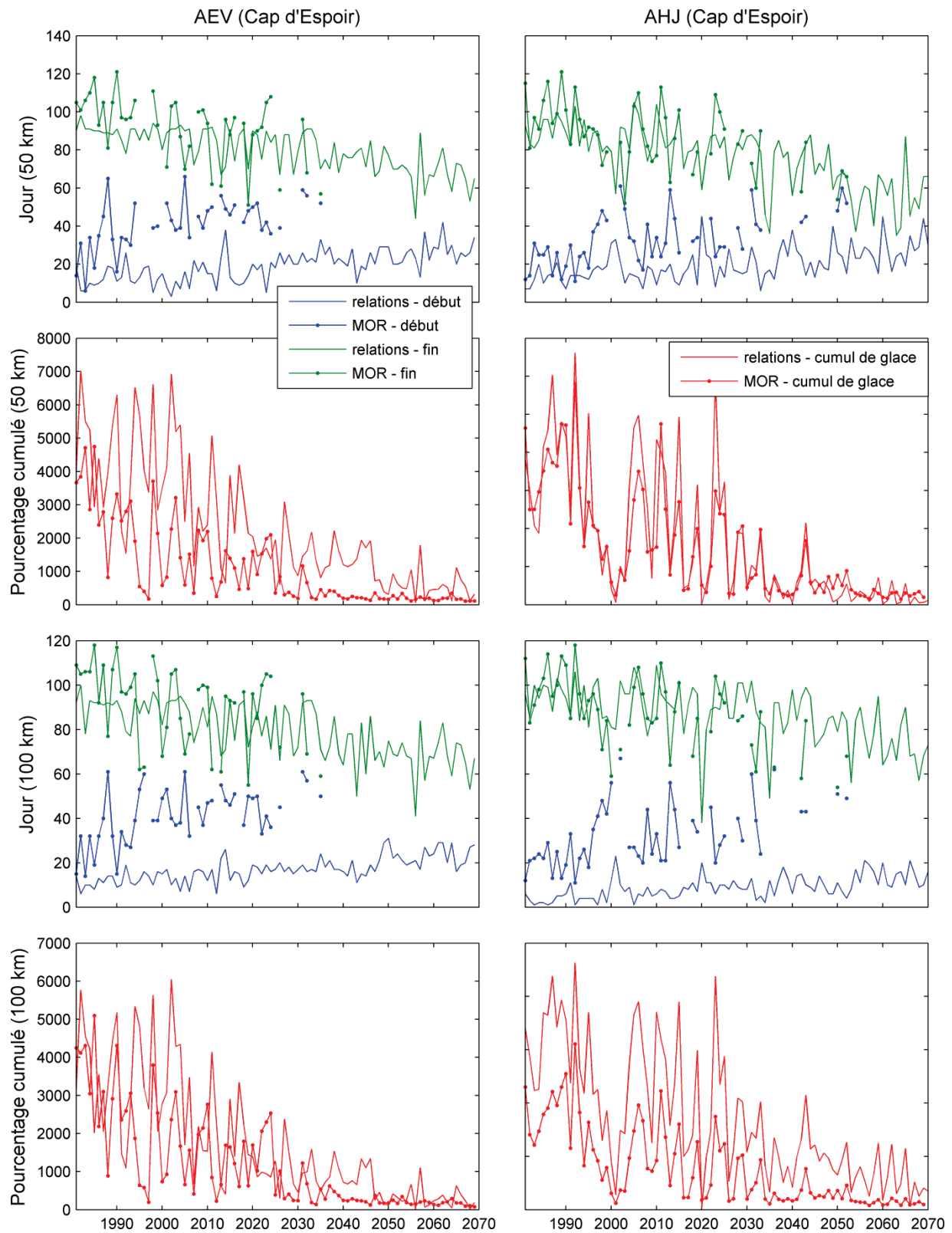


Figure 24. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) dans un rayon de 50 et 100 km autour du site de Cap d'Espoir.

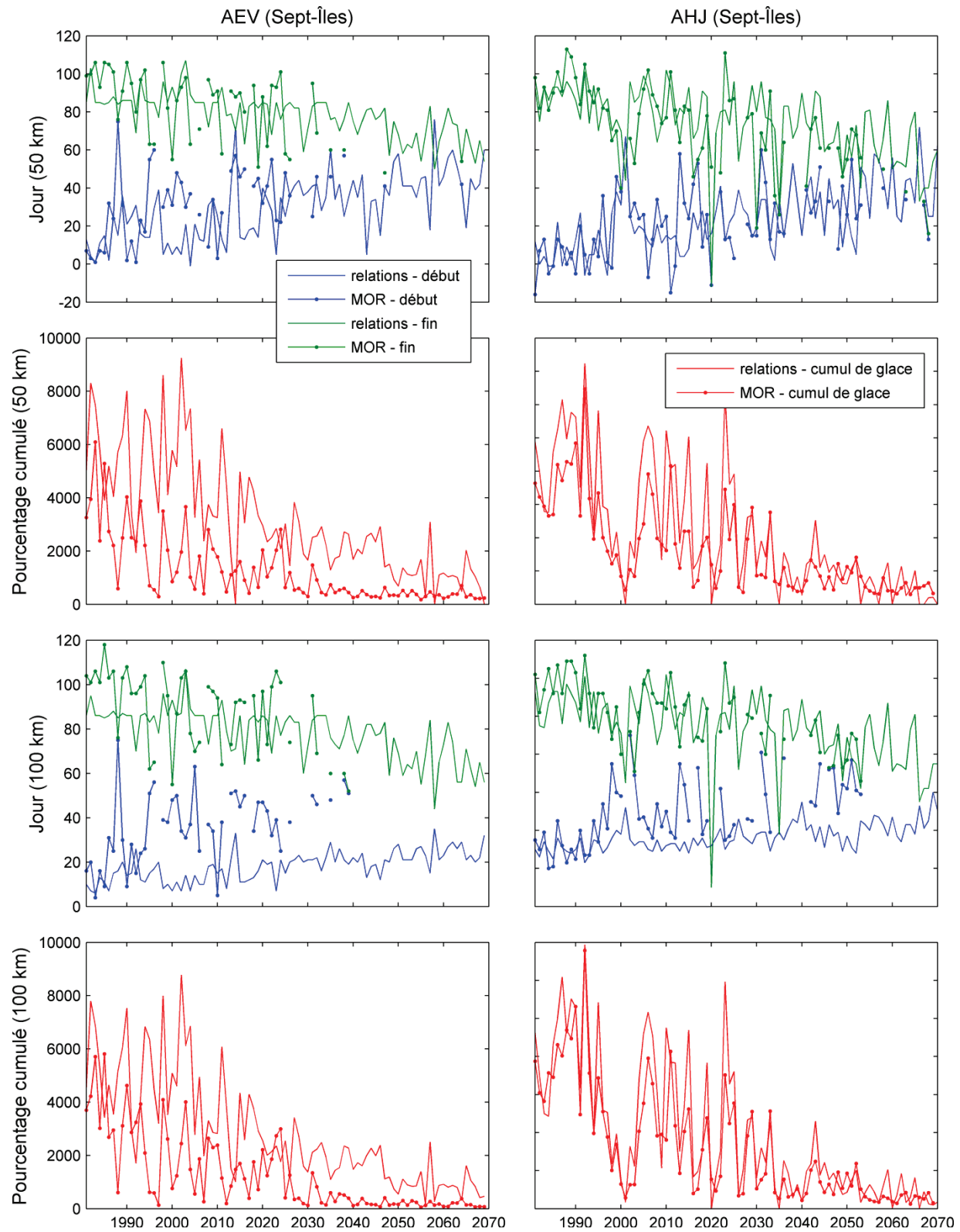


Figure 25. Comparaison des sorties du modèle MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) dans un rayon de 50 et 100 km autour du site de Sept-Îles.

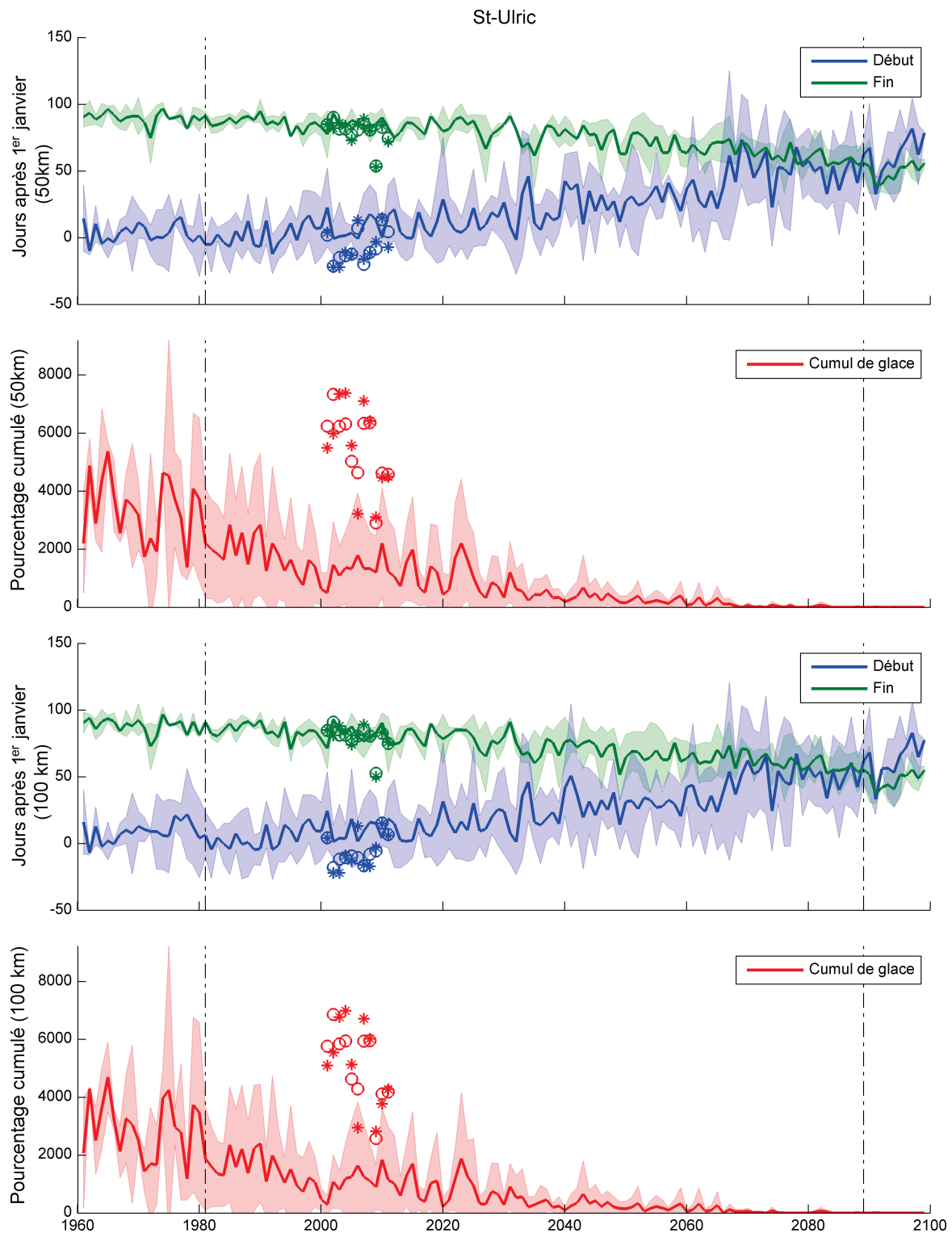


Figure 26. Résultats des relations empiriques du tableau 84 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Saint-Ulric. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.

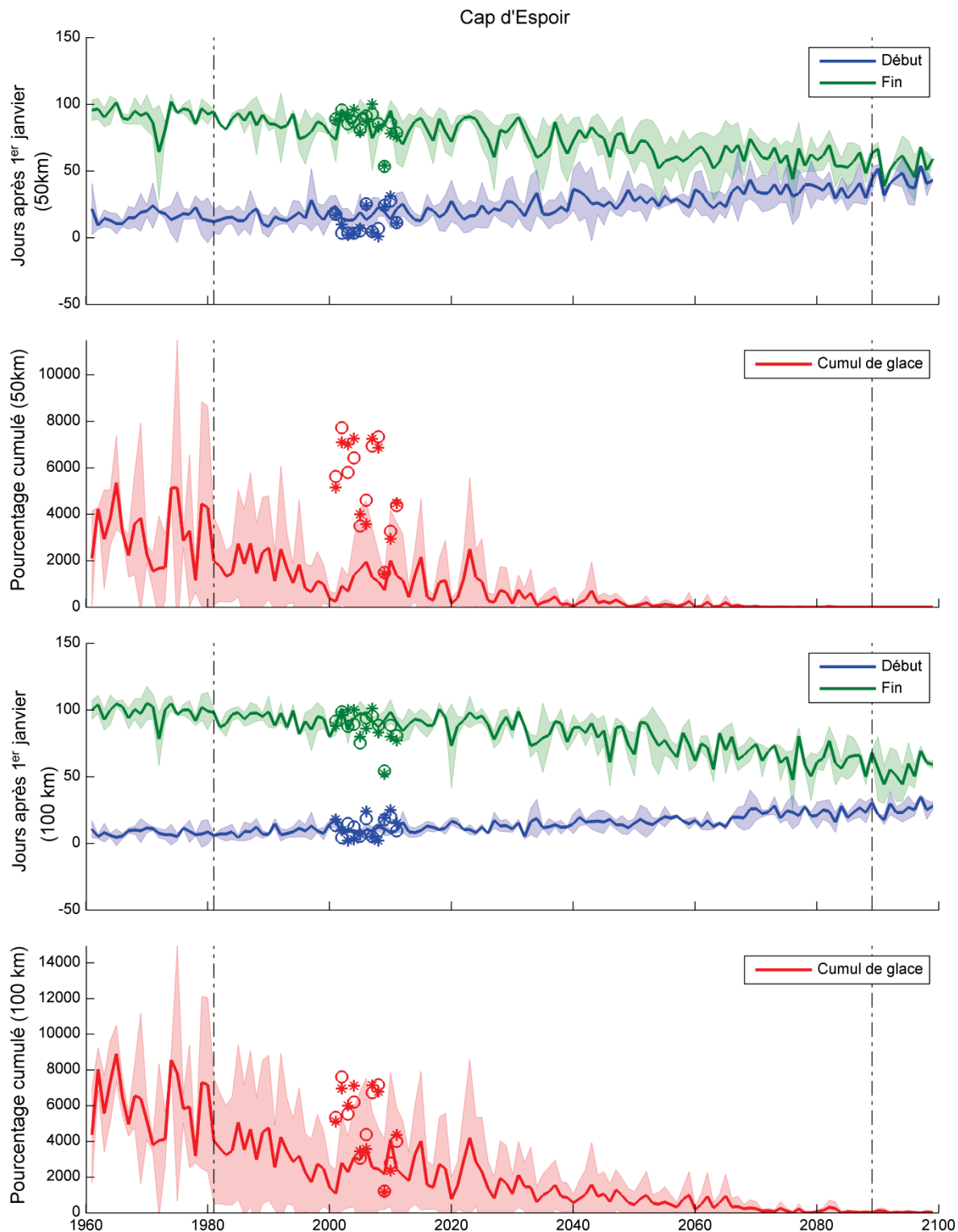


Figure 27. Résultats des relations empiriques du tableau 84 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Cap d'Espoir. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.

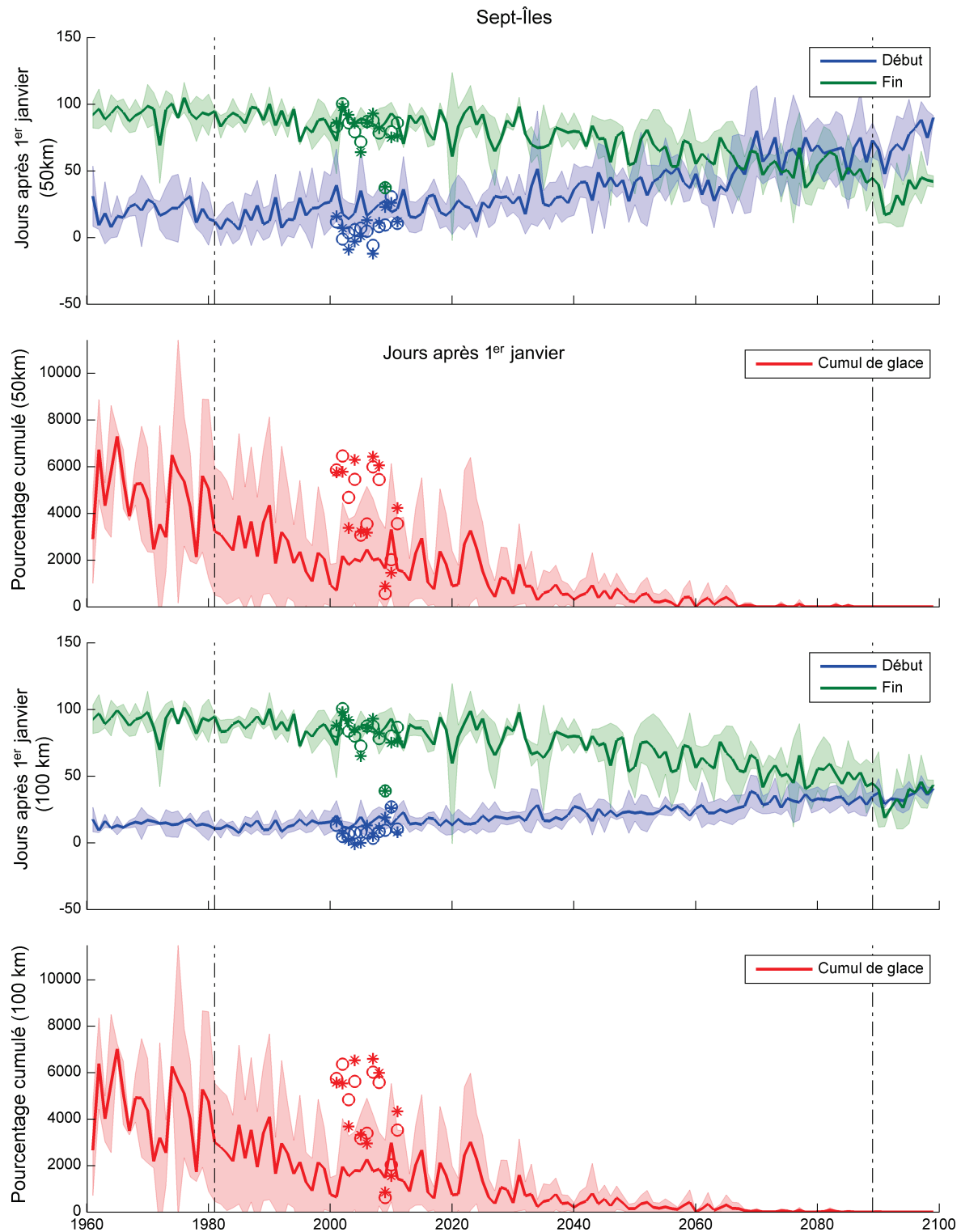


Figure 28. Résultats des relations empiriques du tableau 84 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Sept-Îles. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles correspondent aux prévisions de glace en appliquant les relations empiriques aux données GEM du passé proche.

4.4. Méthode de prise en compte de la glace pour l'évaluation du futur climat de vagues

La méthode d'évaluation du climat de vagues avec le modèle GENER telle que présentée au chapitre 3 ne tient pas compte de l'évolution temporelle des effets du couvert de glace. Deux effets principaux sont attendus : l'atténuation des vagues par la glace et la limitation du fetch. La stratégie employée jusqu'à maintenant pour tenir compte de la présence de glace en hiver est de supposer qu'il n'y a aucune vague entre novembre et avril. Toutefois, les résultats obtenus à la section 4.3 nous fournissent une information suffisante afin de tenir compte, de manière statistiquement probante, du climat de glace dans le golfe du Saint-Laurent pour l'évaluation du climat futur de vagues.

Rappelons d'abord que GENER permet d'obtenir à un endroit donné une estimation de la hauteur significative des vagues à partir d'une série temporelle de vent. La présence de banquise contribue de deux manières à réduire la hauteur des vagues : 1) en réduisant le fetch et 2) en atténuant les vagues formées par le vent. Or, la seule connaissance de la concentration de glace pour une région donnée n'est pas suffisante pour estimer précisément l'impact sur la hauteur des vagues; la distribution de la glace dans l'espace ainsi que son épaisseur et la taille des floes sont des facteurs importants influençant la hauteur des vagues de telle sorte que leur évaluation à un endroit donné est incertaine. Toutefois, on peut supposer qu'en présence d'un couvert complet de glace, les vagues sont absentes et qu'en présence partielle de glace des vagues de hauteurs limitées peuvent exister. Sans une caractérisation détaillée du couvert de glace, il est donc possible d'envisager, dans un contexte de projection climatique, que la hauteur des vagues soit fonction de la concentration globale de glace et que le cumul de glace présenté à la section précédente constitue une estimation viable. En utilisant les estimations de date d'apparition et de disparition de la glace, obtenues en les reliant au début et à la fin de période de gel, il est possible de définir une fonction de probabilité de présence de glace.

La méthode choisie pour tenir compte de l'effet de la glace sur les vagues consiste à appliquer un coefficient d'atténuation aux sorties hivernales de GENER (générées comme si la glace n'était pas présente) durant la période d'englacement. Ce coefficient est constant pour un hiver donné, et est déterminé en fonction de la concentration moyenne de glace durant la période d'englacement, calculée à partir du cumul total de glace et de la durée d'englacement. On considère que les vagues sont complètement atténuées si la concentration moyenne de glace dans le golfe durant l'hiver est supérieure à 50%. Les cartes de glace du SCG montrent qu'à une telle concentration de glace, la quasi-totalité des côtes québécoises du St-Laurent sont suffisamment couvertes de glace pour conjecturer une absence totale de vagues au niveau des berges. Sous cette concentration limite, le coefficient d'atténuation est calculé de manière linéaire suivant la formule

$$\alpha = \begin{cases} C_{moy}/50 & \text{si } C_{moy} < 50\% \\ 1 & \text{si } C_{moy} \geq 50\% \end{cases}$$

On considère que si la durée d'englacement d'une année est inférieure à 5 jours, la glace ne se forme pas du tout durant cet hiver, afin d'éviter une surestimation de la concentration moyenne journalière liée au cumul de glace total. Cette considération est physiquement acceptable, car la

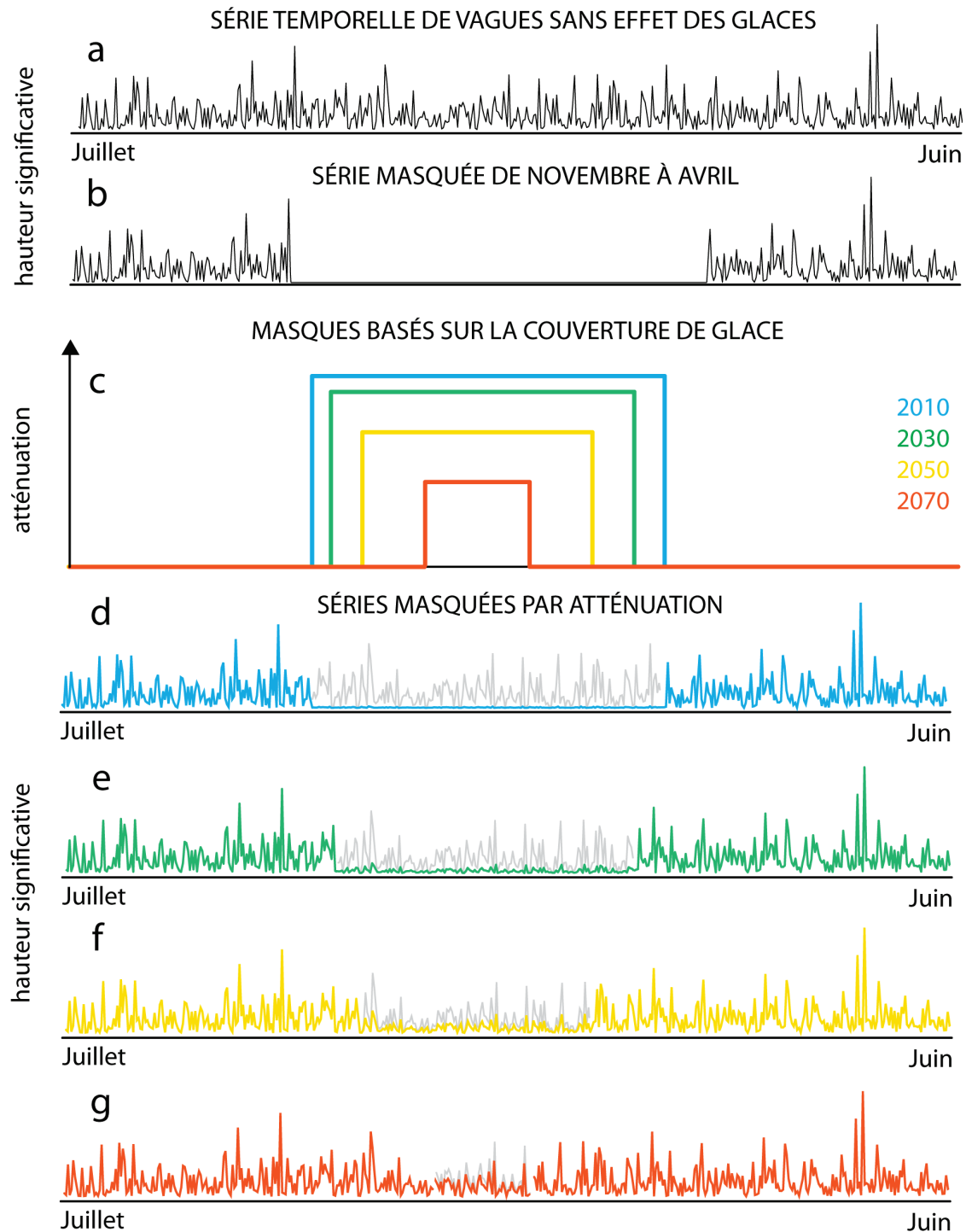


Figure 29. Schéma décrivant la méthode d'atténuation des vagues produites par GENER. **a)** Série temporelle fictive de hauteur significative des vagues telle que produite par GENER pour une année; **b)** Série (a) tronquée de novembre à avril, période sur laquelle on présume une absence de vagues due à la glace; **c)** Séries temporelles du coefficient d'atténuation des vagues pour plusieurs années, illustrant une disparition progressive de la banquise par un raccourcissement de l'hiver et une diminution de la concentration de glace; **d-g)** Série temporelle en (a) sur laquelle ont été appliqués les différents masques temporels d'atténuation. La courbe en gris représente la série non-atténuée.

glace susceptible de se former en 5 jours n'a que peu, voire pas, d'influence sur les vagues. Dans ce cas-là, le coefficient d'atténuation est alors fixé à 0.

Le facteur d'atténuation ($1 - \alpha$) est multiplié par la hauteur significative des vagues modélisées par GENER pour la période d'englacement déterminée par les relations empiriques à partir des degrés-jour de gel, afin d'obtenir le régime de vagues hivernal tenant compte de la présence de glace (Figure 29).

Les paramètres de glace influençant la quantité d'énergie des vagues atténuée durant l'hiver sont donc le début et la fin de la période d'englacement, ainsi que la concentration moyenne journalière. Le calcul du coefficient d'atténuation ne tient pas compte de la physique des interactions vagues-glace, qui indique notamment que les vagues les plus courtes subissent plus d'atténuation par la glace que les longues vagues. Néanmoins, les longues vagues nécessitant un long fetch pour être générées, leur formation est limitée par la présence de glace, ce qui justifie l'utilisation d'un coefficient d'atténuation ne dépendant pas des caractéristiques des vagues. Cette méthode d'estimation du régime de vague en présence de glace est satisfaisante dans un contexte de projection climatique, car elle permet l'existence de vagues malgré la présence de glace, ce qui n'était pas le cas avec les simulations précédentes de GENER.

Advenant la nécessité d'un raffinement des résultats de climat de vagues, il serait envisageable dans une phase ultérieure de permettre au coefficient d'atténuation de varier durant l'hiver, suivant la concentration de glace. Cependant, la méthode présentée ici est une approche intermédiaire entre deux extrêmes soit celui où l'on considère une absence complète de vagues entre décembre et avril (minimum de vagues) et celui où l'on considère que la glace est complètement absente (maximum de vagues). Le premier extrême a peut-être existé dans le passé, mais n'est pas réaliste pour le futur. Le second, aucune atténuation par la glace, est présenté dans ce rapport comme le pire scénario.

En définitive, les projections d'englacement choisies pour tenir compte de l'effet des glaces sur les sorties de GENER sont celles obtenues par l'intermédiaire de huit simulations climatiques suivant le scénario A2 de l'IPCC, à savoir les trois issues du modèle régional MRCC (aev, ahj et aev débiaisé), et les cinq membres du CGCM3 A2. Le scénario A2 est retenu, car c'est un scénario sévère mais assez réaliste quant à la réduction du couvert de glace (cf. section 2.4.2). De plus, le nombre de simulations à disposition suivant ce scénario permet une étude statistique robuste sur l'influence de la glace sur la période de retour des événements de vagues extrêmes.

Pour bien rendre compte des contributions de la durée et de l'étendue du couvert de glace sur le régime annuel des vagues, nous définissons un indice d'**impact annuel cumulé** de la glace sur les vagues comme la somme des coefficients d'atténuation journalier (compris entre 0 et 1) de chaque hiver. La figure 29 présente cet indice, qui est ici simplement le produit du coefficient d'atténuation par la durée d'englacement (en jours), pour le golfe et pour chacun des trois sites.

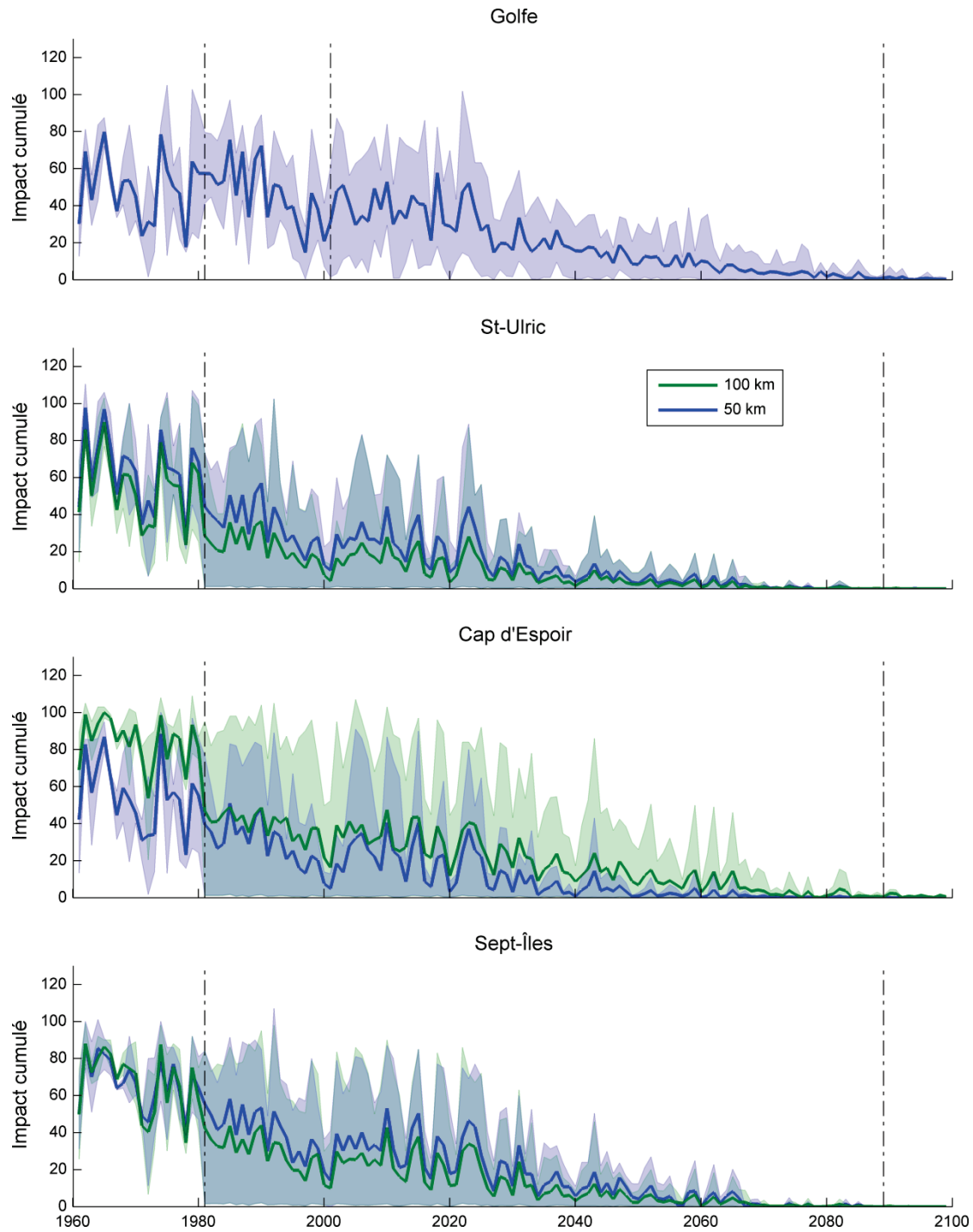


Figure 30. Indice d'impact cumulé de la glace sur le régime de vagues hivernal selon les relations empiriques, pour le golfe et chacun des sites des AWACs (50 et 100 km). Le trait plein représente la moyenne des différents scénarios, et la zone ombragée indique le minimum et le maximum pour chaque hiver.

4.5. Atténuation des vagues à partir des prédictions de glace avec le modèle MOR

Le modèle océanique régional (MOR) de l'ISMER opéré par Simon Senneville reproduit la circulation des masses d'eau et les processus dynamiques et thermodynamiques de la glace de mer dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent sur une grille de 5 km (Saucier et al., 2003). Dans le cadre d'un autre projet financé par le MTQ (Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques), ce modèle a été alimenté au niveau des forçages atmosphériques avec les deux simulations climatiques MRCC-aev et MRCC-ahj pour la période 1981 à 2100 (Senneville et al., 2013).

Les sorties MOR-aev et MOR-ahj contiennent la moyenne quotidienne du pourcentage de couverture de glace pour chaque point de la grille. Certains points de la grille ont été exclus du traitement car leur état d'englacement n'influence pas les vagues aux sites d'étude. Il s'agit d'eaux côtières très peu profondes, où la glace a tendance à s'accumuler, et du côté sud-est des Îles-de-la-Madeleine, qui n'influence pas les vagues au large de Pointe-aux-Loups (Figure 31).

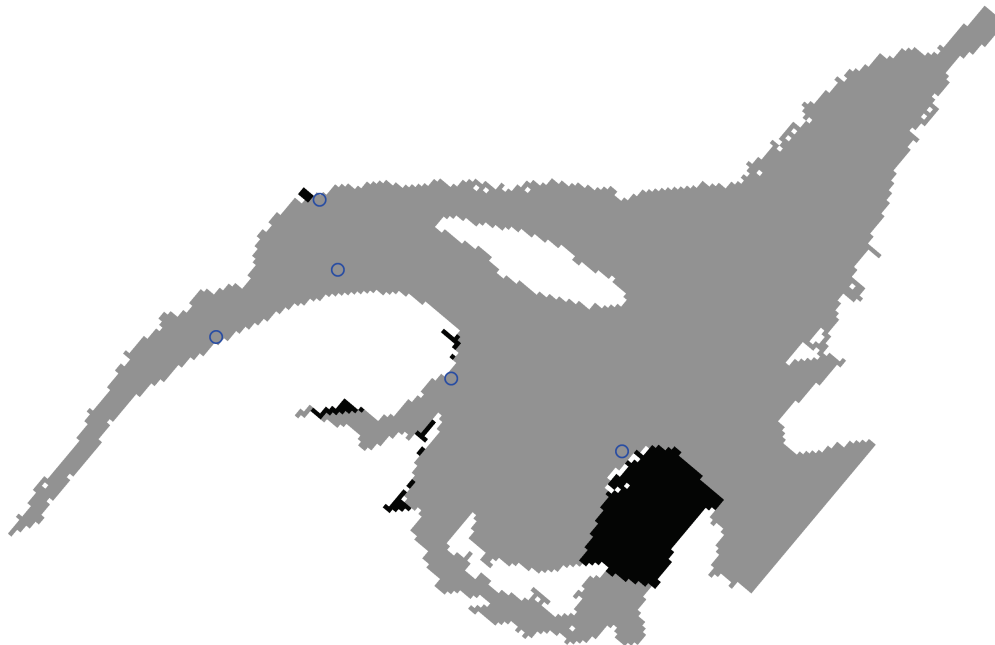


Figure 31. Grille du modèle MOR; en gris : points de grille utilisés pour calculer le coefficient d'atténuation; en noir : points de grille exclus du calcul; cercles bleus : sites d'étude.

Un coefficient d'atténuation des vagues par la glace a été calculé pour chaque jour et pour les cinq sites d'étude (Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Sept-Îles, Mont-Louis et Pointe-aux-Loups, Figure 31) de la manière suivante :

- 1) déterminer pour chaque jour la couverture de glace moyenne à 50 km aux alentours (G_{m50}),
- 2) déterminer pour chaque jour la couverture de glace moyenne à 100 km aux alentours (G_{m100}),
- 3) prendre pour chaque jour la plus grande valeur entre G_{m50} et G_{m100} ,

- 4) appliquer une fonction linéaire avec une atténuation totale si la couverture moyenne est au-dessus de 50% et une atténuation nulle si la couverture est inférieure à 3% (Figure 32).

Le seuil inférieur de 3% est utilisé pour deux raisons : (1) en début et en fin d'hiver le modèle MOR accumule de la glace en milieu côtier qui n'influence pas les vagues au large aux sites d'études; (2) le modèle MOR ne reproduit pas de vagues, alors qu'un événement de vagues peut fortement influencer une couverture de glace très clairsemée, la brisant et la dispersant.

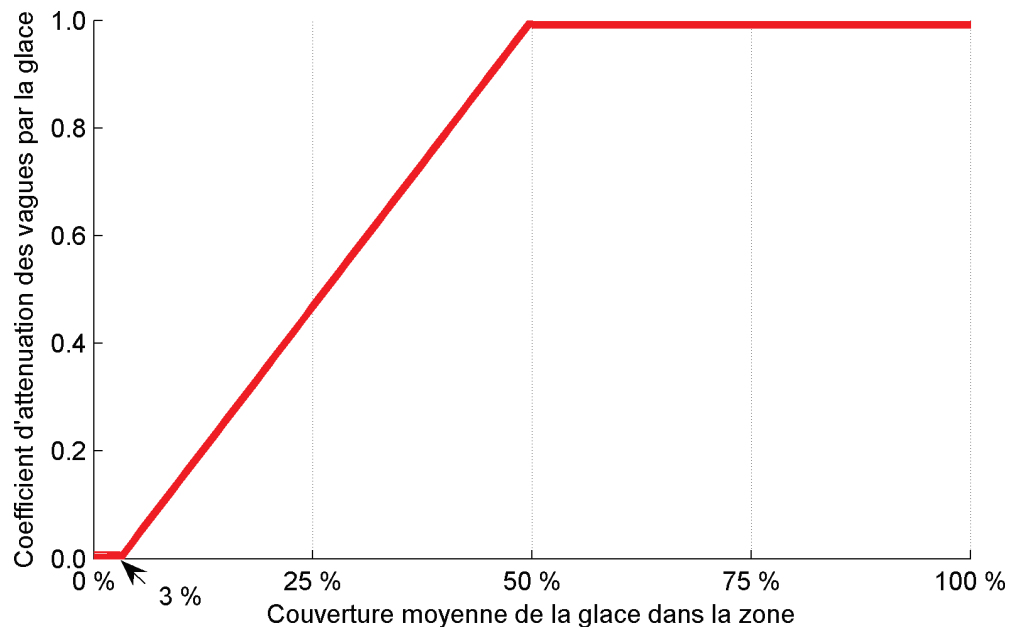


Figure 32. Fonction pour convertir la couverture moyenne de glace en coefficient d'atténuation des vagues par la glace (coefficient 0 = aucune atténuation, coefficient 1 = atténuation totale).

Les simulations MOR-aev et MOR-ahj couvrent seulement 119 hivers, soit la période d'octobre 1981 à septembre 2100. Pour avoir tout l'intervalle 1981-2100, la couverture de glace de janvier-septembre 1981 a été supposée être identique à celle de janvier-septembre 1982, et celle d'octobre-décembre 2100 identique à celle d'octobre-décembre 2099.

Ces coefficients d'atténuation quotidiens ont été attribués à l'heure de midi, puis des valeurs horaires ont été interpolées et appliquées aux hauteurs de vagues prédites par GENER.

Ces coefficients d'atténuation sont différents pour les cinq sites (Figures 33 et 34). À Saint-Ulric la glace atténue partiellement les vagues jusqu'à la fin du XXI^e siècle, alors qu'aux autres sites l'influence de la glace devient négligeable à partir de 2060 ou plus tôt. L'atténuation la plus faible est à Pointe-aux-Loups, et l'influence de la glace y devient négligeable à partir de 2030. La Figure 35 illustre la variation du coefficient d'atténuation au cours de l'hiver. L'augmentation est généralement progressive sur plusieurs jours en début de l'hiver, et il existe parfois des oscillations durant l'hiver si celui-ci n'est pas trop rude.

L'impact cumulé des glaces durant un hiver peut être représenté par un indice calculé comme la somme des coefficients d'atténuation journalier de cet hiver (Figure 36). La variabilité de la glace d'un hiver à l'autre rend difficile la comparaison entre les sites et entre les simulations. Le lissage de ces séries temporelles avec un filtre passe-bas met en évidence les différences entre sites et entre simulations (Figure 37) : l'influence de la glace est nettement la plus forte à Saint-Ulric, puis décroît à Mont-Louis, à Sept-Îles et à Cap d'Espoir, et elle est la plus faible à Pointe-aux-Loups. La simulation MOR-aev produit plus de glace que la simulation MOR-ahj.

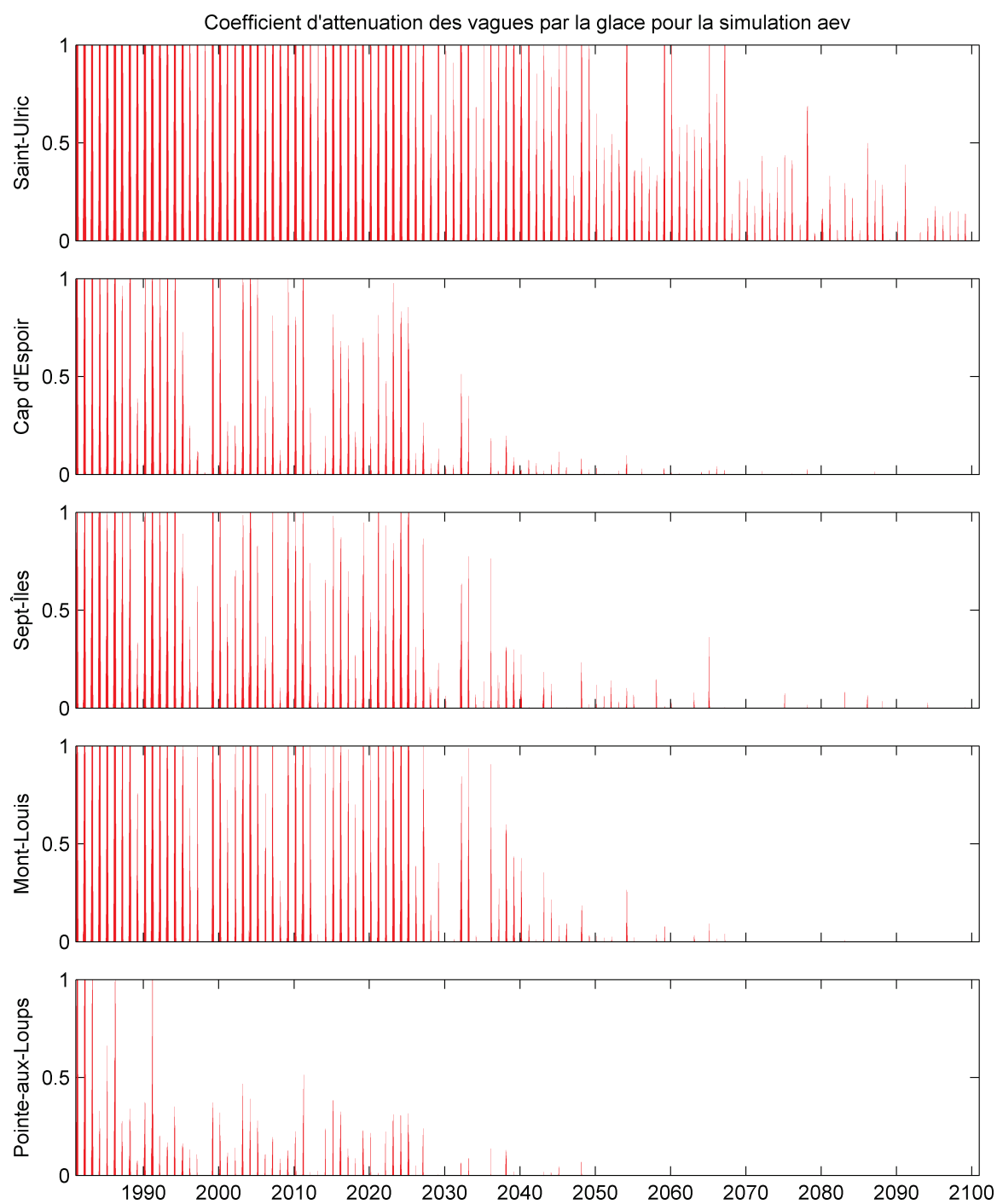


Figure 33. Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours de 1981 à 2100 à partir de la simulation MOR-aev.

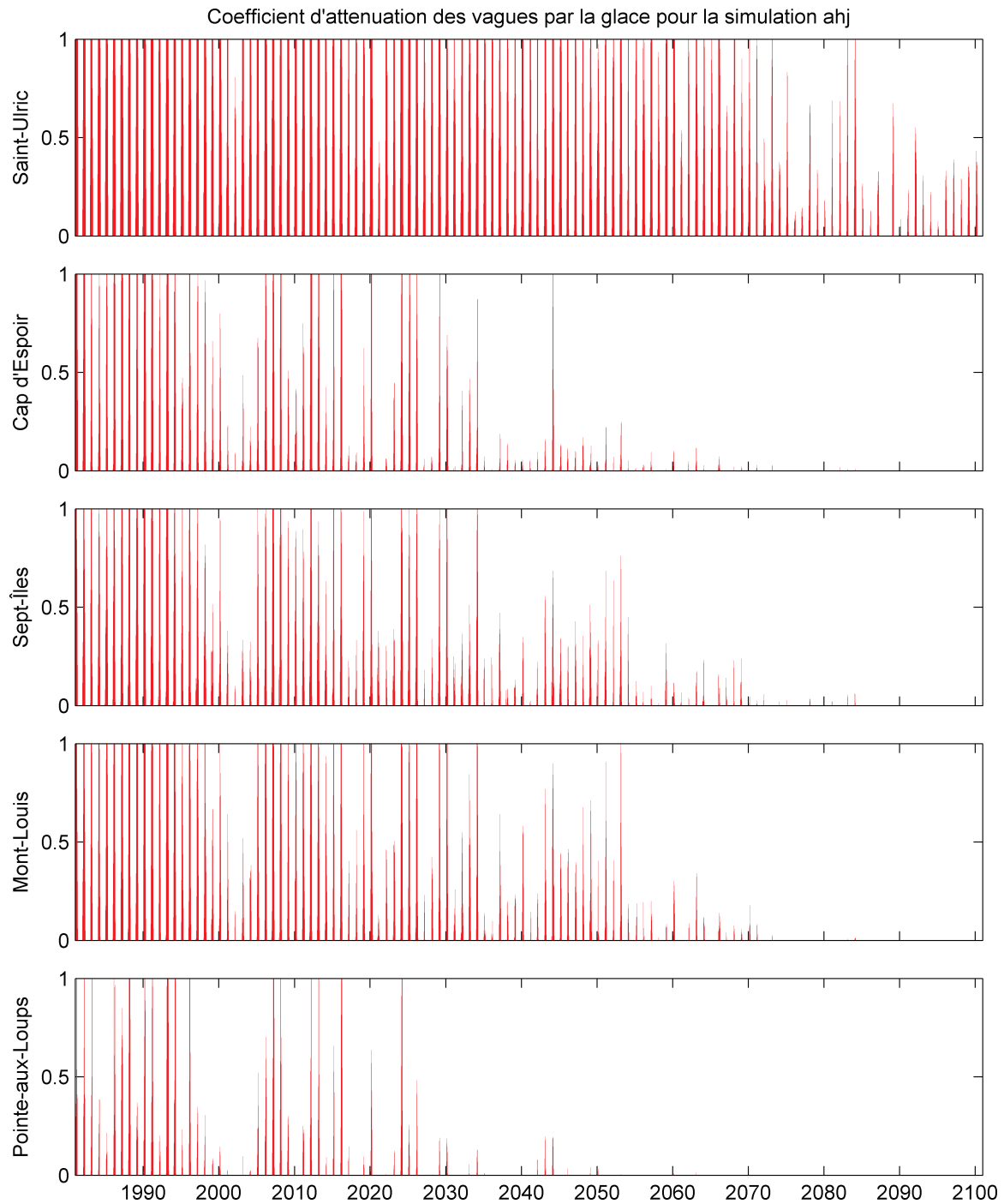


Figure 34. Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours de 1981 à 2100 à partir de la simulation MOR-ahj.

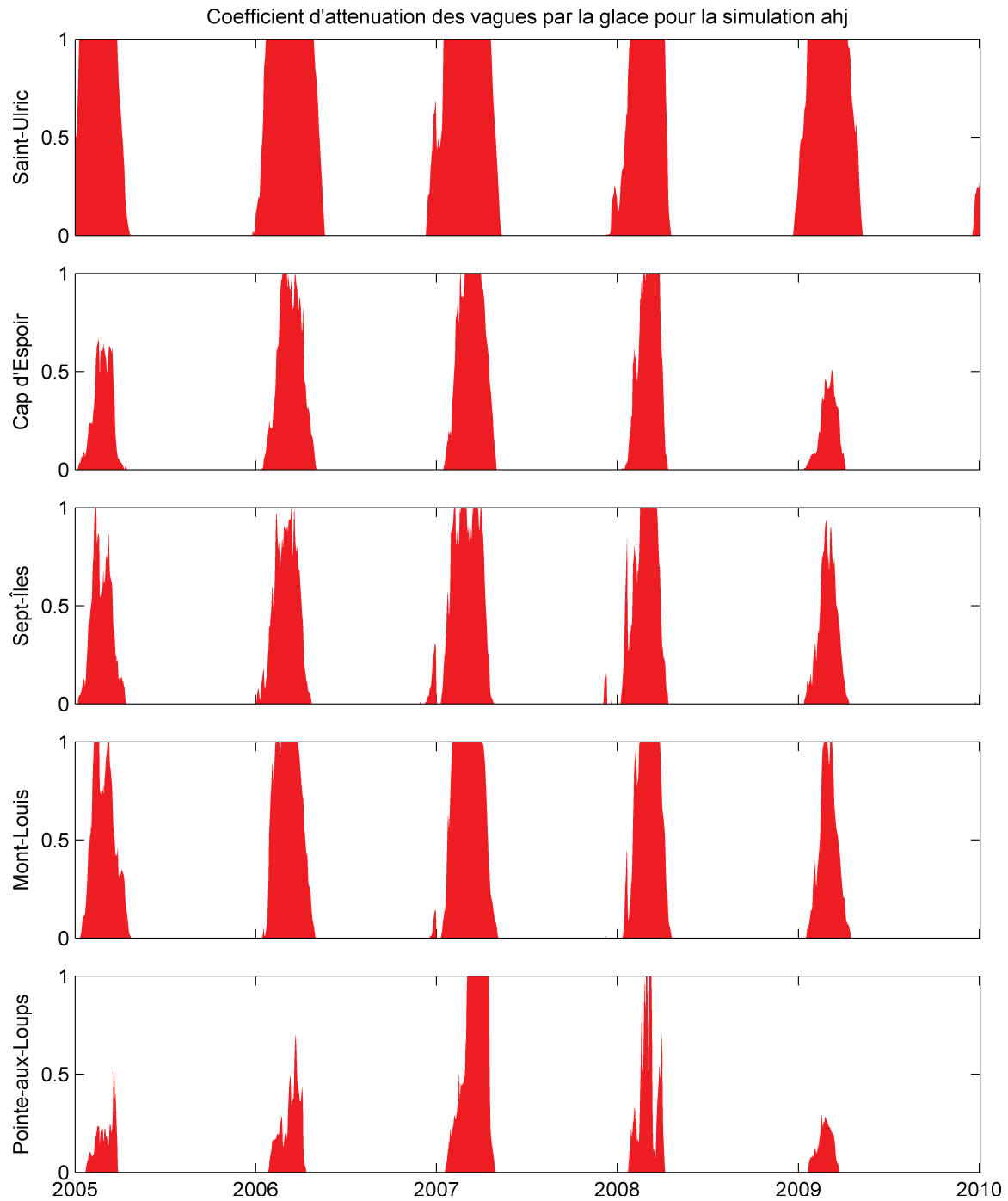


Figure 35. Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours à partir de la simulation MOR-ahj, détail pour 2005 à 2009.

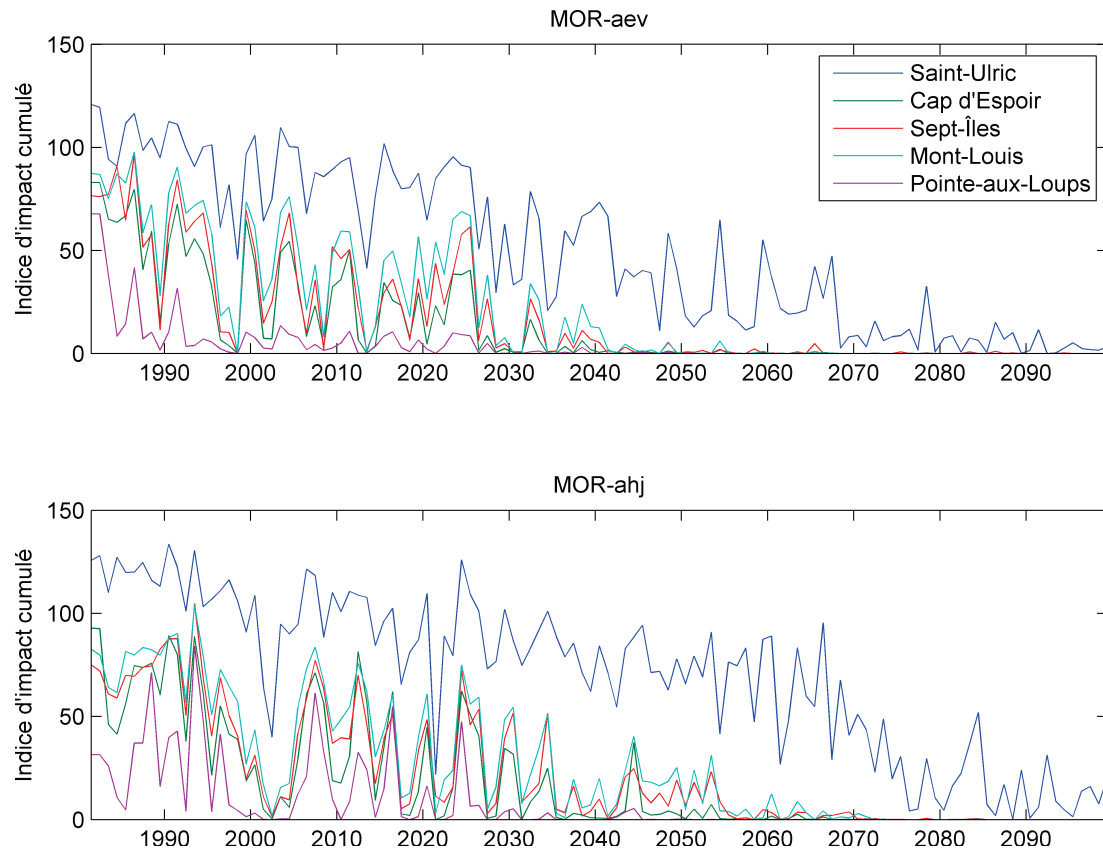


Figure 36. Indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les deux simulations MOR-aev et MOR-ahj, calculé comme la somme du coefficient d'atténuation pour chaque hiver.

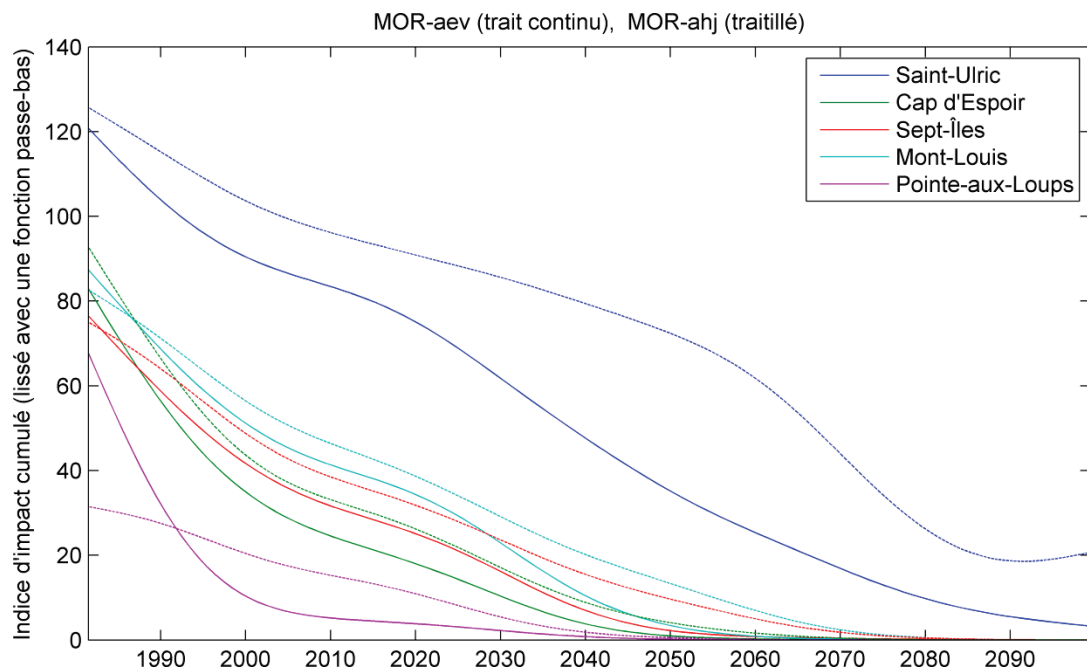


Figure 37. Lissage de l'indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les deux simulations MOR-aev (traits continus) et MOR-ahj (traitillés).

4.6. Conclusion sur l'atténuation des vagues par la glace

Dans cette section nous avons présenté une méthode statistique permettant de prendre en compte les principaux effets de la glace sur le climat de vagues du golfe et de l'estuaire. Cette méthode se base sur l'existence de relations significatives entre le nombre de degré-jours de gel et la date d'apparition et de disparition de la banquise ainsi que la concentration cumulée, qui nous permet d'extrapoler ces valeurs dans le futur à l'aide de simulations climatiques.

Les modèles climatiques régionaux et globaux anticipent une augmentation des températures hivernales (décembre-mars) passant de 1°C présentement à près de 6°C à la fin du siècle, d'après le scénario A2. Selon notre méthode empirique avec plusieurs simulations de température, la durée moyenne d'englacement hivernal restera stable durant le premier quart du XXI^e siècle, après quoi elle diminuera linéairement jusqu'à devenir nulle à la fin du siècle. Le raccourcissement des hivers diminue également la concentration cumulée qui passera de $2000 \pm 1000\%$ -jours en moyenne à environ $200 \pm 100\%$ -jours.

L'englacement futur a aussi été estimé à partir des sorties de glace du modèle MOR, qui suivent les mêmes tendances que les projections des relations empiriques. Les sorties du modèle MOR sont journalières et tiennent compte de la dynamique régionale de la glace, mais elles n'ont été calculées qu'avec deux simulations de température.

À partir de ces données d'englacement, un coefficient d'atténuation est calculé avec une relation simple, qui ne prend en considération que les effets principaux de la glace sur les vagues, c'est-à-dire l'atténuation et la limitation du fetch pondéré. Le premier effet atténue principalement les vagues courtes alors que le second limite la formation des vagues longues. Ce coefficient d'atténuation n'a pas de dépendance en fréquence et est appliqué uniquement sur la hauteur significative des vagues plutôt que sur un spectre, en adéquation avec les sorties de GENER. Les incertitudes issues de ce modèle simple ainsi que des régressions linéaires sont prises en compte en adoptant une méthode probabiliste. Celle-ci consiste à générer plusieurs séries centennales des variables de glace (avec les relations empiriques et avec les simulations MOR) qui servent à définir autant de masques applicables aux sorties de GENER. Ces simulations permettent donc de quantifier la variabilité des conditions de vagues associées et ainsi générer un véritable climat pour la région du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent (section 5.4).

5. Résultats

5.1. Validation du modèle EC

5.1.1. Introduction

Environnement Canada opère depuis juillet 2002 un modèle vent-vague de troisième génération (le modèle EC) afin de produire des prédictions de vagues opérationnelles (tri-horaires) dans le golfe et l'estuaire du fleuve Saint-Laurent (cf. section 2.3.1). Le modèle est exécuté toutes les douze heures pour prévoir les caractéristiques de vagues sur les prochaines 48 heures. Les résultats sont utilisés pour la prévision des conditions météo-marines et sont disponibles sur le site www.meteo.gc.ca ou par bulletins VHF.

Ce modèle a été calibré pour bien reproduire les vagues de tempêtes, à priori en eau profonde. Il a été validé à partir des données expérimentales du houlographe de la bouée de Mont-Louis (Jacob et al., 2004) située au nord de la Gaspésie (49,5°N, 65,8°W), pour la tempête du 1 au 3 juillet 2001.

Dans le cadre du projet « Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques » (projet conjoint du ministère des Transports du Québec – ci-après MTQ – l'UQAR-ISMER, Ouranos et Environnement Canada), Environnement Canada a mis à disposition de l'ISMER des archives de caractéristiques des vagues (H_{m0} , T_{02} et Dir) tri-horaires issues du modèle EC.

La présente validation a pour objectif d'évaluer la capacité du modèle EC à reproduire avec précision les vagues dans les eaux côtières (du large jusqu'à 30 m de fond) de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. L'évaluation est produite pour la période du 04 mai 2010 au 31 décembre 2011 pour les sites de Sept-Îles et Saint-Ulric et pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011 pour le site de Cap d'Espoir.

Cette validation est basée sur la comparaison des sorties du modèle EC avec des séries chronologiques de vagues enregistrées au large de Sept-Îles, Cap d'Espoir et Saint-Ulric (Figure 38) depuis mai 2010, dans le cadre d'un projet recherche de l'ISMER (Urs Neumeier) financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec.

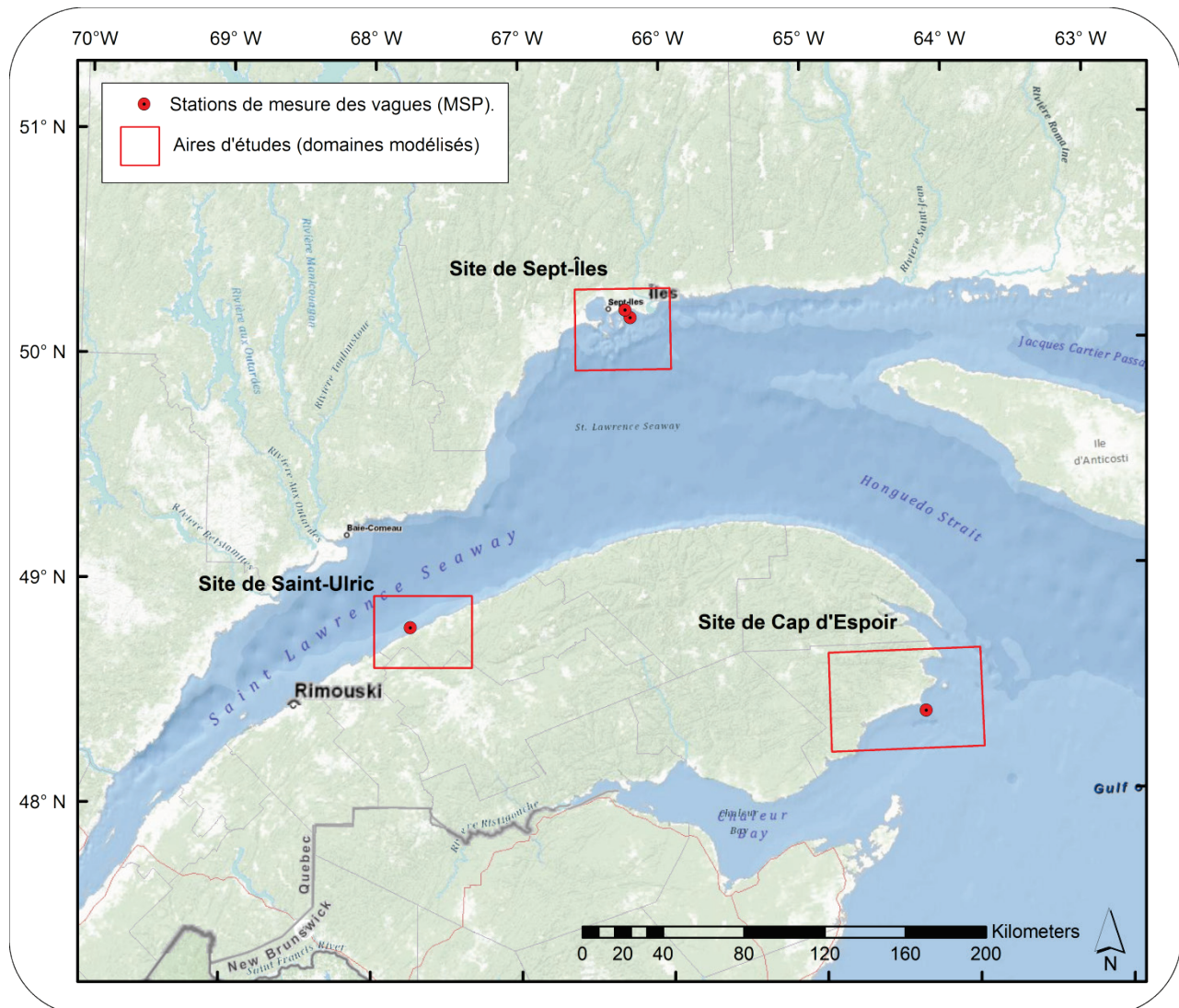


Figure 38. Localisation des sites d'étude, emprise des domaines de propagation, et position des stations de mesure de vagues.

Cette comparaison est effectuée selon deux protocoles : comparaison directe, et utilisation d'un autre modèle pour propager les vagues du large à la position des stations AWAC. Les capacités du modèle EC à reproduire correctement les vagues sont ensuite évaluées par une approche statistique de comparaison modèle-mesure à chaque pas de temps du modèle.

Comparaison modèle EC interpolé vs AWAC

Les sorties du modèle EC (hauteur significative spectrale H_{m0} , période moyenne T_{02} et direction moyenne des vagues DIR) sont comparées avec les valeurs mesurées in-situ (AWAC). Les sorties sont interpolées à la position de l'AWAC à partir des points de la grille d'EC les plus proches

(interpolation bilinéaire pour le site de Sept-Îles et Saint-Ulric, interpolation linéaire pour le site de Cap d'Espoir).

Comparaison modèle EC propagé par SWAN vs AWAC

La faible résolution spatiale du modèle EC ($0,06 \times 0,04$ degré, $\approx 5 \times 5$ km) ne lui permet pas d'intégrer l'effet des méso- et micro-reliefs bathymétriques ainsi que de certaines îles sur la propagation des vagues en domaine côtier. Afin de tenir compte des fortes variations bathymétriques existantes entre le large et la côte pour les sites de Sept-Îles et Cap d'Espoir, un modèle de propagation côtier (SWAN version 40.85) de haute résolution (200×200 m) est implémenté pour chaque site.

Ces modèles sont basés sur le modèle de troisième génération SWAN (cf. section 2.3.2). Ils sont alimentés à leurs limites externes par les sorties du modèle EC aux points de grille considérés comme étant en eau profonde. SWAN utilise les mêmes formulations physiques pour la génération des vagues et leurs interactions avec leur environnement que le modèle EC, ce qui assure une bonne continuité physique aux frontières du domaine. Il utilise des formulations différentes concernant la dissipation de l'énergie des vagues sur le fond, en particulier pour des vagues cambrées, en eau peu profonde et dans le déferlement.

L'objectif de cette démarche est de valider la capacité du modèle EC de reproduire correctement les vagues au large. L'utilisation emboîtée de SWAN compense la difficulté du modèle EC à propager les vagues en milieu côtier.

Une estimation préliminaire menée suivant ce protocole (Lambert et al., 2012a) a démontré une tendance du modèle EC à surévaluer linéairement les vagues dans le golfe d'un facteur 1,33 au niveau des stations. Ce biais positif est corrigé en utilisant les conditions aux limites issues du modèle EC dont les hauteurs significatives ont été pondérées d'un facteur 0,75.

On ne considérera dans le présent document que les résultats de propagation de SWAN forcé par les conditions aux limites pondérées avec facteur 0,75.

Prise en compte de la période de résidence des glaces de mer dans l'évaluation du modèle EC

Un module d'atténuation des vagues lors de la propagation dans un champ de glace, développé par Denis Jacob (Jacob et al., 2004), a été intégré à la version de WAM utilisée par Environnement Canada. Le modèle EC est donc en principe capable de produire des données de vagues en tenant compte de l'influence de la glace sur leur propagation. Néanmoins, le modèle haute résolution (SWAN) utilisé pour propager les vagues du large à la position des stations AWAC ne bénéficie pas de ce raffinement.

Tableau 5. Période de résidence des glaces de mer pour l'hiver 2010-2011 dans un rayon de 40 km autour de chaque site.

Site	Période de résidence des glaces
Saint-Ulric	29 décembre 2010 au 26 mars 2011
Cap d'Espoir	5 janvier 2011 au 25 mars 2011
Sept-Îles	26 décembre 2010 au 19 avril 2011

En conséquence, trois comparaisons statistiques sont réalisées :

- 1) Les données issues du modèle EC sont comparées aux données AWAC (données expérimentales), période de résidence des glaces de mer incluse (Tableau 1).
- 2) Les données issues du modèle EC sont comparées aux données AWAC (données expérimentales), mais en excluant la période d'englacement. La période d'exclusion s'étend de la première à la dernière présence de glace de mer dans un rayon de 40 km autour de chaque site selon des cartes de glace du Service canadien des glaces (Tableau 1).
- 3) Les données issues du modèle EC sont propagées par SWAN jusqu'aux sites des AWAC avant d'être comparées aux données AWAC. SWAN ne tenant pas compte des glaces, la période de résidence des glaces de mer est exclue (Tableau 5).

Les résultats sont présentés avec trois types de graphique de dispersion :

- 1) Le premier graphique affiche toutes les paires de valeurs observation-modélisation (par exemple Figure 39). La densité des points est représentée avec une échelle de couleur. La régression linéaire (aux moindres carrés) réalisée sur ces données prend donc en compte la totalité des échantillons présents. Comme les petites vagues sont beaucoup plus nombreuses que les grandes vagues, les coefficients de la droite de régression sont plus influencés par les petites vagues que par les grandes.
- 2) Pour donner le même poids à tous les types de vagues, un deuxième type de graphique est réalisé avec les moyennes de 20 classes, qui sont représentées par des cercles dont la couleur indique le nombre d'échantillons dans la classe (par exemple Figure 40). Une barre d'erreur représente plus ou moins un écart-type pour chaque classe. (Si l'on fait l'hypothèse d'une distribution gaussienne au sein de chaque classe, 68,2% des valeurs prédites de la classe considérée sont dans cet intervalle.) Les échantillons sont divisés en classes en fonction des valeurs mesurées. Chaque classe correspond à un vingtième de l'intervalle entre les valeurs maximale et minimale. Les classes comportant moins de 5 échantillons (20 pour les directions) ne sont pas prises en compte car leur moyenne est moins significative. Le calcul de la régression linéaire sur ces moyennes permet d'évaluer la tendance de la série modélisée affranchie de la surreprésentation des petites vagues (chaque classe utilisée dans la régression ayant le même poids).
- 3) Comme les grandes vagues sont d'un intérêt particulier en génie côtier, le troisième graphique de dispersion met en relief les vagues correspondant aux 10% des plus grandes hauteurs de

vagues mesurées (par exemple Figure 40). Ces grandes vagues sont en rouges, les vagues plus petites en gris. La régression linéaire et les autres paramètres statistiques sont calculés seulement avec ces grandes vagues. Le seuil est calculé avec les H_{m0} mesurés de la série de donnée représentée et est appliqué sur les valeurs mesurées.

5.1.2. Hauteurs significatives

Les résultats des comparaisons sont présentés sur quatre figures pour chaque site. Chaque figure présente les trois différentes comparaisons statistiques (cf. section précédente). La première figure compare l'ensemble des données, et présente aussi le tableau des paramètres statistiques de comparaison. Dans ce dernier, les valeurs en gras indiquent quelle comparaison obtient la meilleure concordance avec les AWAC. La deuxième figure est similaire, mais les régressions linéaires sont calculées sur les moyennes des classes des hauteurs mesurées (cf. section précédente). La troisième figure est similaire à la première, mais compare seulement les vagues les plus hautes (cf. section précédente). La quatrième figure présente les courbes de probabilité de dépassement, qui indiquent pendant quelle fraction de temps les vagues dépassent une certaine hauteur. C'est une manière efficace d'illustrer la distribution des vagues, l'axe logarithmique mettant l'accent sur les vagues les plus grandes.

L'observation des séries temporelles issues des AWAC et du modèle EC montre une bonne sensibilité du modèle au trois sites : tous les événements de vagues moyennes ou fortes sont représentés, sans déphasage important.

Comparaison modèle EC interpolé vs AWAC, période d'englacement incluse

La concordance entre les séries issues des AWAC et du modèle EC présente des différences importantes entre les sites, en particulier entre les sites du golfe du Saint-Laurent (Sept-Îles, ci-après SI, et Cap d'Espoir, ci-après CPE) et le site de l'estuaire du Saint-Laurent (Saint-Ulric, ci-après STU).

Pour SI et CPE, les biais moyens [1] sont respectivement 0,12 m et 0,14 m, ce qui indique une tendance du modèle à la surévaluation. Cette tendance est confirmée par la pente de la droite de régression ([7a]; SI : 1,239, CPE : 1,311), qui indique une surestimation linéaire d'un facteur 1,2 à 1,3 relativement aux valeurs mesurées.

L'erreur moyenne absolue [2] est relativement élevée, comprise entre 0,26 m (SI) et 0,34 m (CPE). L'erreur RMS [3] est également très élevée, supérieure d'un facteur 1,5 aux MAE (SI : 0,4 m, CPE : 0,52 m). Cela illustre la présence d'erreurs élevées, qui sont majoritairement de nature aléatoire ($RMSE_u$ [5]; SI : 0,36 m, CPE : 0,46 m), l'erreur RMS systématique [4], liée à la tendance à la surestimation linéaire du modèle n'étant que de 0,16 m pour SI, 0,25 m pour CPE. Cela indique un manque de précision du modèle, et l'existence d'une part importante de la variance non-représentée par la droite de régression, bien que les coefficients de détermination ([8]; SI : 0,709, CPE : 0,792) indiquent que la corrélation entre valeurs prédites et mesurées est significative. Ce manque de précision est confirmé par la dispersion importante de l'erreur autour de la moyenne ([6]; SI : 0,38 m, CPE : 0,5 m).

Pour STU, les données simulées présentent un biais faiblement négatif (-0,039 m), illustré par un coefficient directeur de la droite de régression inférieur à 1 (0,77), ce qui indique une tendance à la sous-évaluation. La corrélation entre les séries est faible ($R^2 = 0,615$), la relation linéaire entre les deux séries n'explique pas la totalité de la variance. Les erreurs absolues moyennes et RMS ont des valeurs comparables à celles des sites du golfe. L'erreur est principalement liée à l'imprécision du modèle : $RMSE_u$ (0,28 m) est plus de deux fois plus grande que $RMSE_s$ (0,11 m). Cela est également confirmé par la dispersion forte de l'erreur autour de sa moyenne (0,3 m).

Les graphes de dispersion (Figures 39, 43 et 47) mettent en évidence la présence de ces résidus qui correspondent à des hauteurs de vagues prédites nulles pour des hauteurs mesurées entre 0 et 1,5 m. Ces résidus sont à l'origine de la forte part aléatoire de l'erreur sur l'erreur totale. Ces événements étaient durant le temps de résidence des glaces de mer. Ils sont probablement dus à une erreur ou imprécision dans la modélisation des vagues se propageant dans la glace, mais pourraient aussi être dus à des erreurs de mesure de l'AWAC en présence de glaces.

Comparaison modèle EC interpolé vs AWAC, sans la période d'englacement

Afin d'exclure les fortes erreurs hivernales relevées ci-dessus, nous considérons à présent les mêmes séries temporelles prédites et mesurées à l'exclusion des périodes de résidence des glaces de mers à l'hiver 2010 (cf. Tableau 5).

L'exclusion des fortes valeurs résiduelles hivernales aboutit logiquement à une augmentation des corrélations entre valeurs prédites et mesurées (R^2 [8], SI : 0,77, CPE : 0,84, STU : 0,66).

Pour SI et CPE, Les valeurs d'erreur moyenne [1] augmentent de plus de 40% (SI : 0,17 m, CPE : 0,22 m) en raison de la diminution des valeurs négatives d'erreur, qui compensaient partiellement les erreurs positives. Cette augmentation du biais se traduit également par une augmentation du coefficient directeur des droites de régression ([7a]; SI : 1,29, CPE : 1,36), qui s'adaptent davantage à la géométrie des nuages de point mais restent influencées par la grande population de petites vagues (< 1,5 m). Les Figures 40, 44 et 48 présentent des droites de régression non influencées par les gradients de densités des nuages de points. Ces valeurs constituent une évaluation non-biaisée de la tendance du modèle à la surévaluation des hauteurs significatives, d'un facteur 1,5 pour les deux sites.

Les erreurs absolues moyennes [2] diminuent très faiblement et les RMSE [3] restent quasi-identiques, ce qui confirme la faible contribution de la période d'englacement aux erreurs. La part non-systématique, aléatoire de la RMSE diminue au profit de la part systématique, qui augmente d'un facteur 1,3 (1,35 pour CPE). Cela traduit de nouveau la réduction de l'imprécision du modèle, et l'augmentation du poids de la surévaluation des valeurs prédites dans l'erreur totale.

Pour Saint-Ulric, la suppression des résidus liés à la présence de glace aboutit à une réduction du biais moyen, qui reste très faiblement négatif. Le coefficient de la droite de régression augmente légèrement (0,8) mais demeure inférieur à 1, suggérant une tendance à la sous-évaluation du modèle. Cette tendance est difficilement observable sur le graphe : le nuage de points est

globalement bien centré sur la droite 1:1, en particulier pour les plus grandes hauteurs de vagues. Néanmoins, de très faibles valeurs prédites, correspondant à des vagues mesurées inférieures à 1 m, réduisent la pente de la droite de régression.

Cette tendance est confirmée par la droite de régression sur la moyenne des classes (Figure 48), qui présente un coefficient directeur de 0,9. Les vagues de hauteur intermédiaire ($1\text{ m} < H_{m0} < 2\text{ m}$) sont sous-évaluées ($\sim -0,3\text{ m}$), ce qui réduit la pente de la régression, alors que les vagues de $H_{m0} > 2\text{ m}$ sont correctement prédites.

L'erreur systématique est très faible (0,09 m), la part d'erreur aléatoire restant dominante (0,26 m), ce que confirme la valeur élevée de l'écart type de l'erreur (0,28 m).

Comparaison modèle EC propagé par SWAN vs AWAC

Afin de confirmer la nature systématique de l'erreur liée à une surestimation des valeurs prédites, nous appliquons le même protocole que celui déjà employé dans Lambert et al. (2012a). Nous emboîtons un modèle de vague (SWAN) centré sur les stations AWAC. Ce modèle est forcé à ses limites par les conditions de vagues issues du modèle EC, avec des hauteurs significatives linéairement diminuées (multiplication avec un facteur de 0,75). Il utilise aussi la génération locale de vague par le vent de GEM à 10 m plutôt qu'à 40 m.

Pour les sites du golfe, les valeurs moyennes [1] de l'erreur sont réduites à moins de 0,015 m, ce qui confirme que la tendance à la surévaluation du modèle a été corrigée, alors que les R^2 restent significatifs, dans la même gamme de valeur ([8], SI : 0,76; CPE : 0,79).

Cela est confirmé par les coefficients directeurs des droites de régression (SI : 0,9, CPE : 0,96).

Des valeurs identiques sont obtenues pour les pentes des droites de régression sur la moyenne des classes (Figure 40 et Figure 44). La tendance légèrement sous-évaluatrice n'affecte que deux classes sur quatorze représentées. Considérant l'alignement général du nuage de classes, nous ne considérons pas cette sous-évaluation comme significative en raison du faible nombre d'échantillons dans chacune des classes sous-évaluées (< 10).

Les RMSE [3] diminuent également fortement en raison de la réduction des erreurs extrêmes liées à la surévaluation. Cela est confirmé par la proportion d'erreur RMS systématique [4], qui devient inférieure à 0,05 m pour les deux sites. La part non-systématique de l'erreur RMS [5] diminue seulement de 20-30% (soit 0,23 m et 0,34 m pour SI et CPE), et elle devient la part d'erreur principale.

La dispersion de l'erreur autour de sa moyenne [6] suit la même évolution que la RMSE aléatoire, avec une diminution d'environ 30%, ce qui atteste toujours du manque de précision du modèle. Néanmoins, la performance globale du modèle augmente fortement, avec des scores ([9] et [10]) qui peuvent être considérés comme bon à très bon.

Pour STU, l'utilisation de SWAN forcé par des conditions aux limites réduites de 25% n'apporte pas d'amélioration à la prédiction, et produit une sous-évaluation des valeurs prédites comme le montre l'augmentation du biais négatif (-0,11 m) et de l'erreur systématique (0,2 m), ainsi que la diminution du coefficient de la droite de régression (0,64). La pente du nuage de classes est légèrement plus élevée (0,72). Les classes de 0 à 2,5 m montrent bien une sous-évaluation proportionnelle à la hauteur des vagues, alors que pour les vagues de $H_{m0} > 2,5\text{ m}$, cette sous-évaluation est moins marquée.

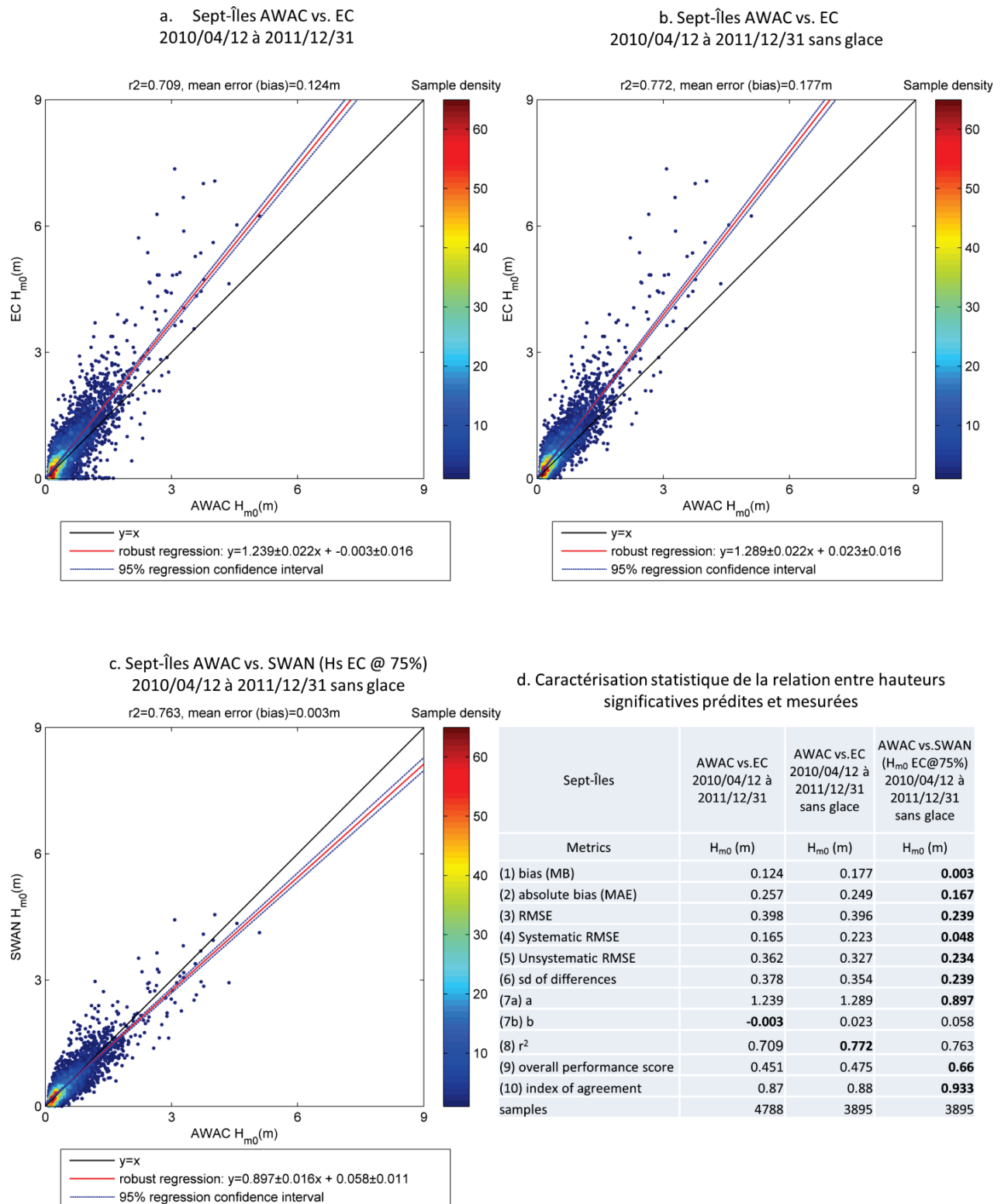


Figure 39. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

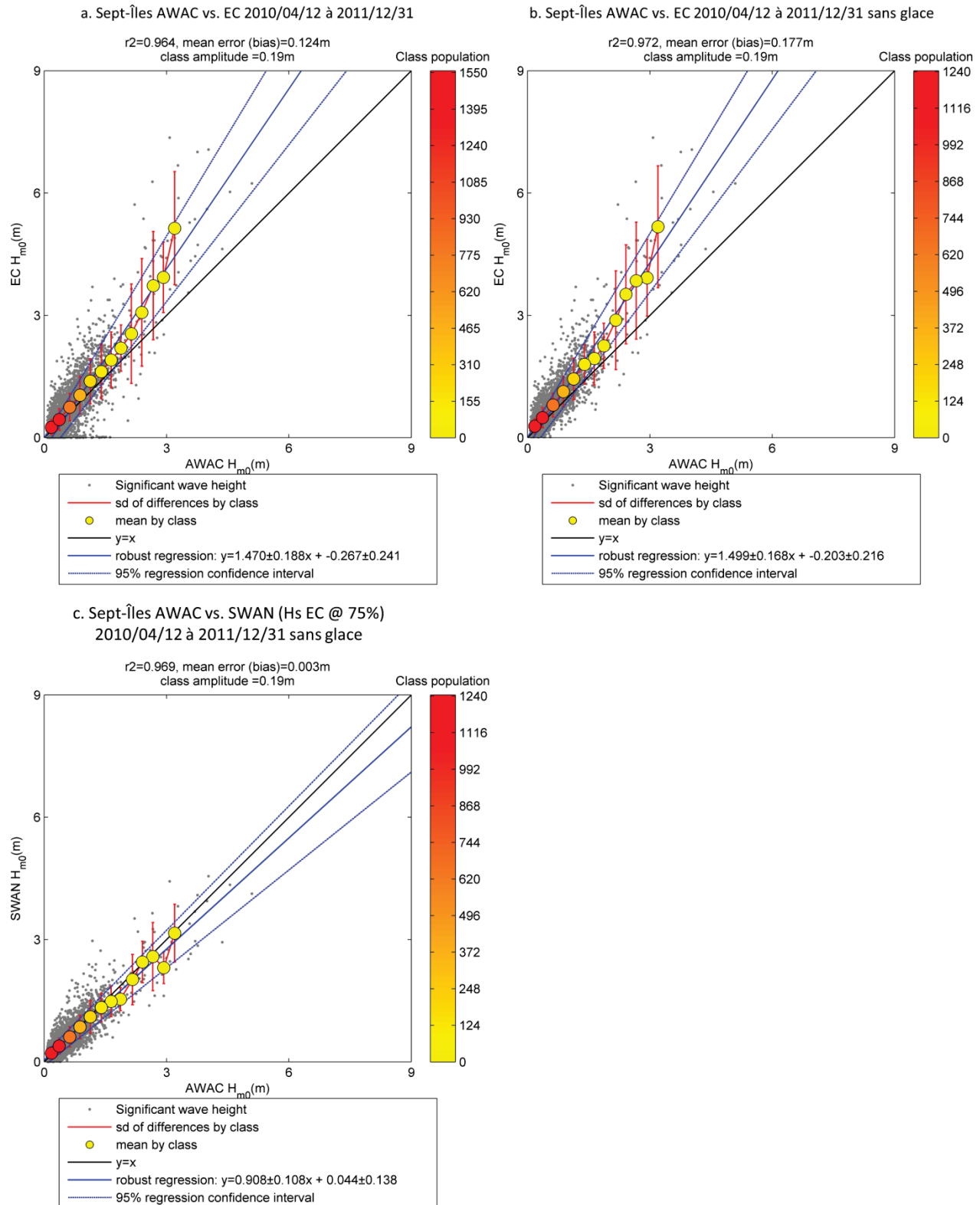


Figure 40. Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011 Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

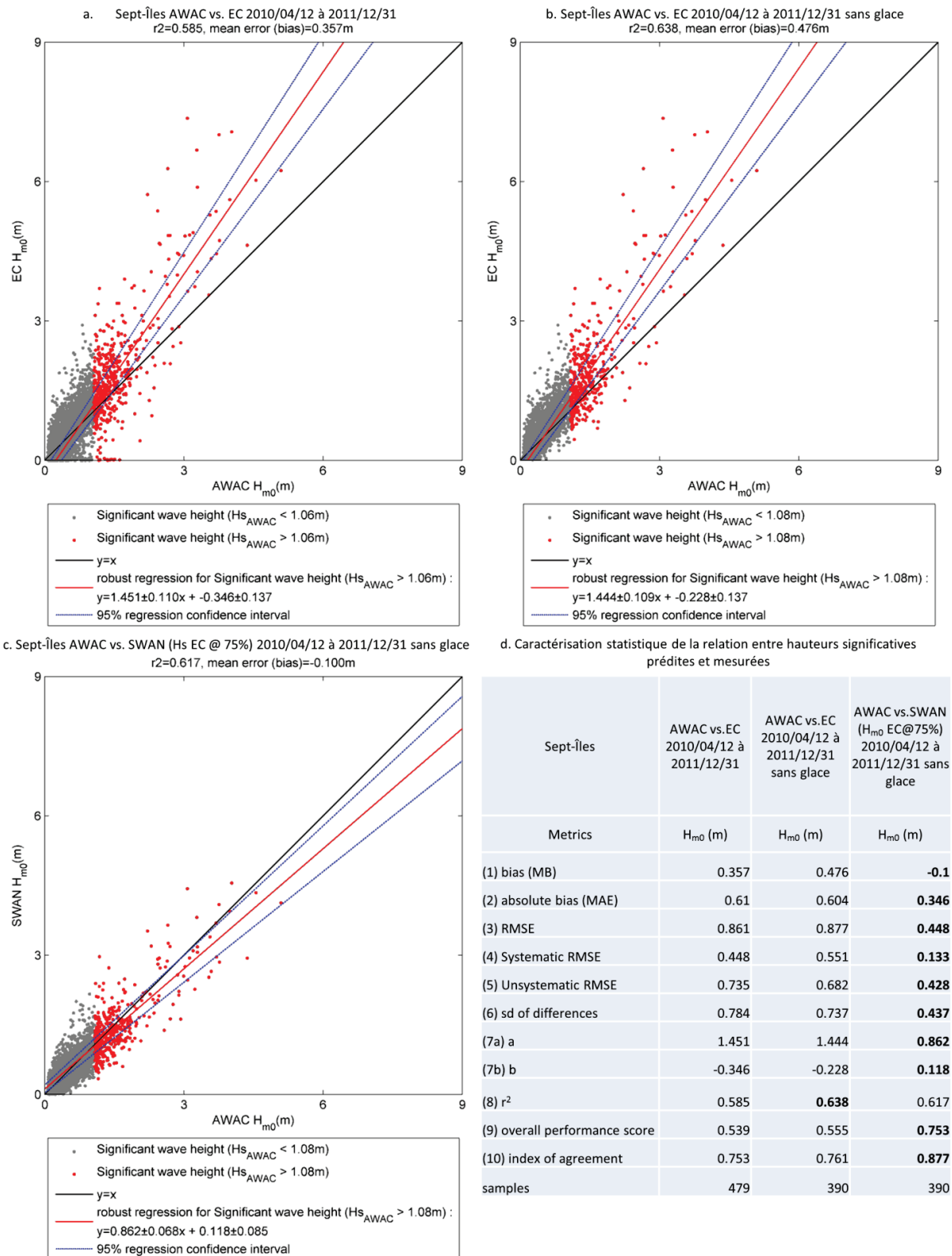


Figure 41. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les 10% des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

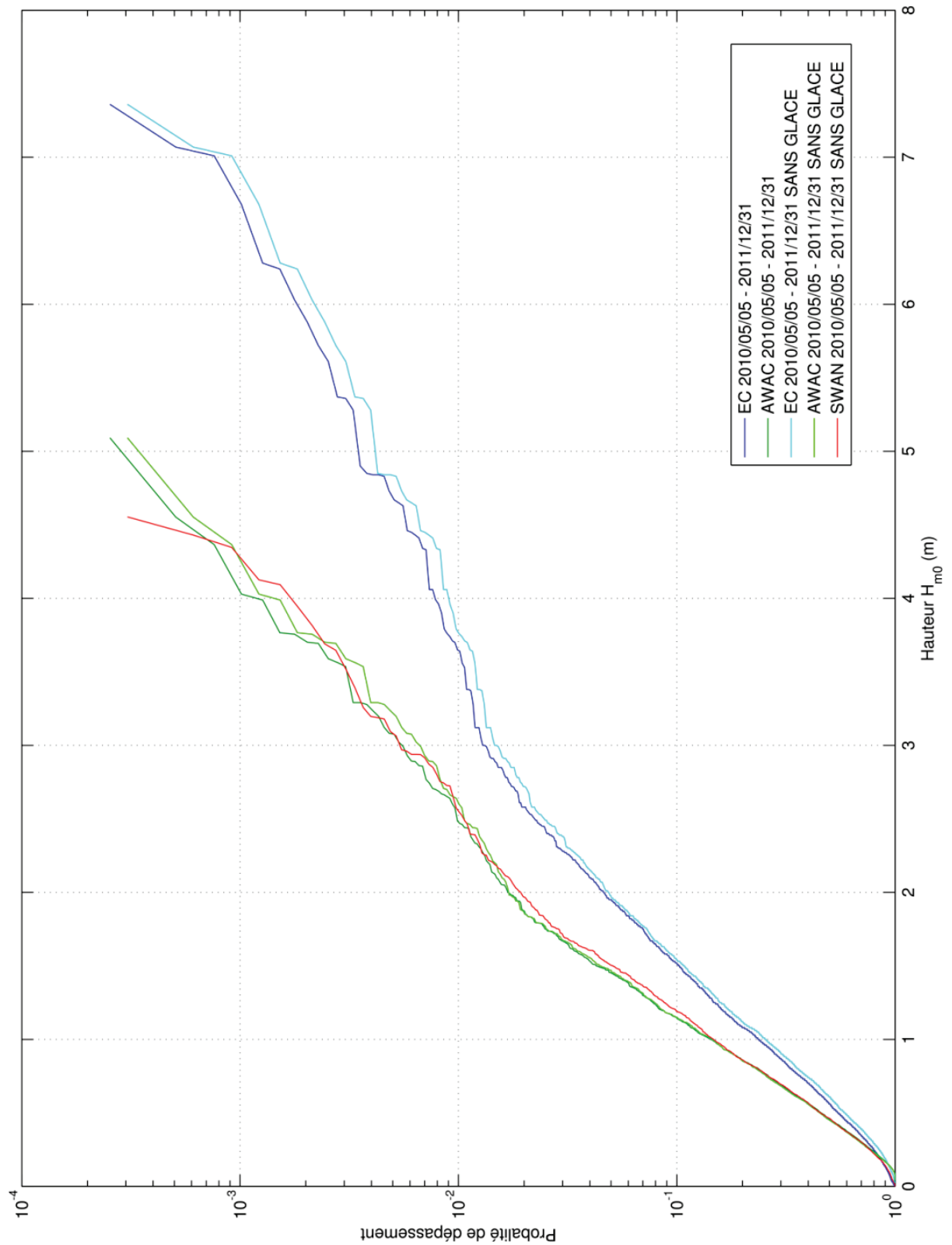


Figure 42. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue

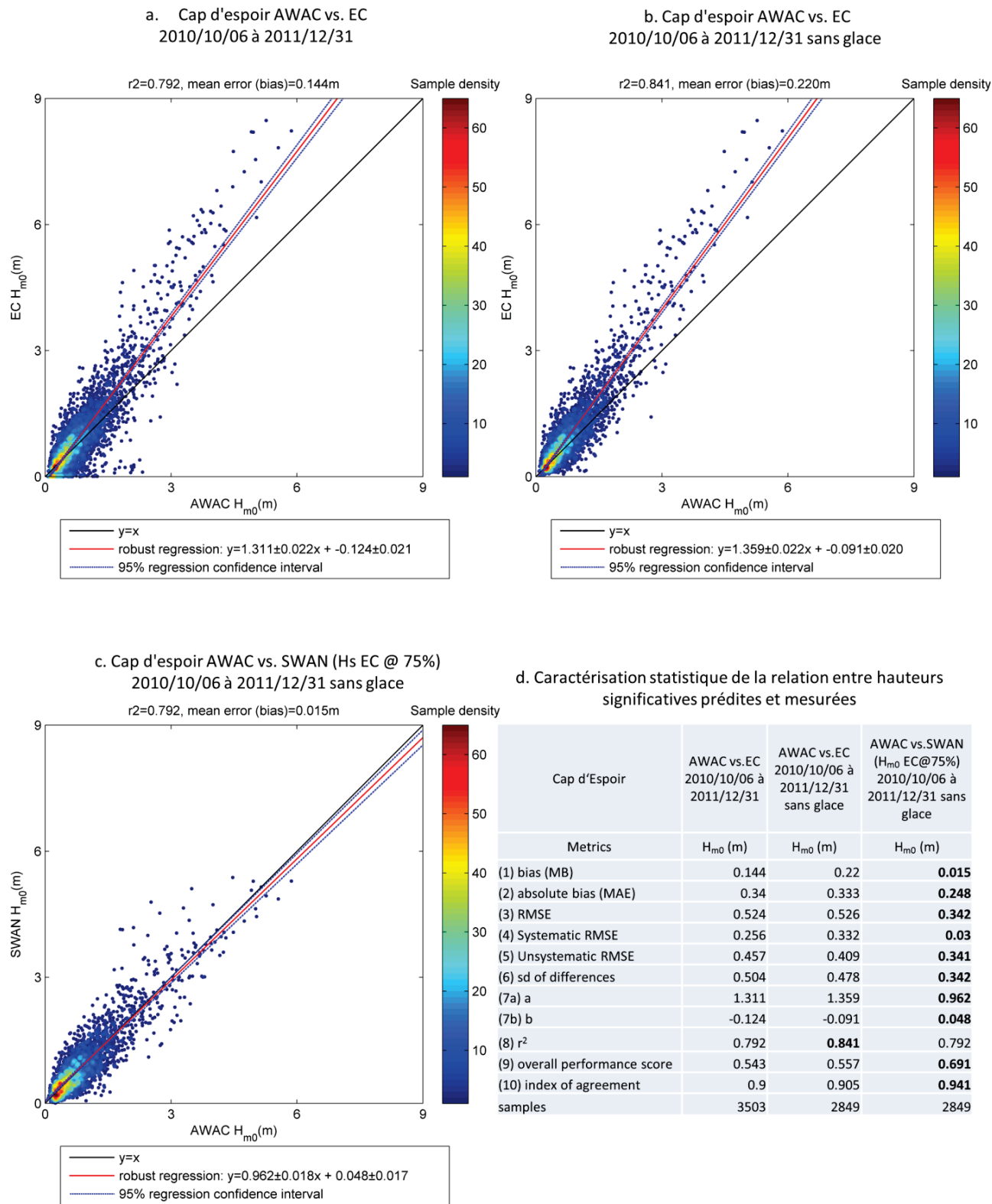


Figure 43. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

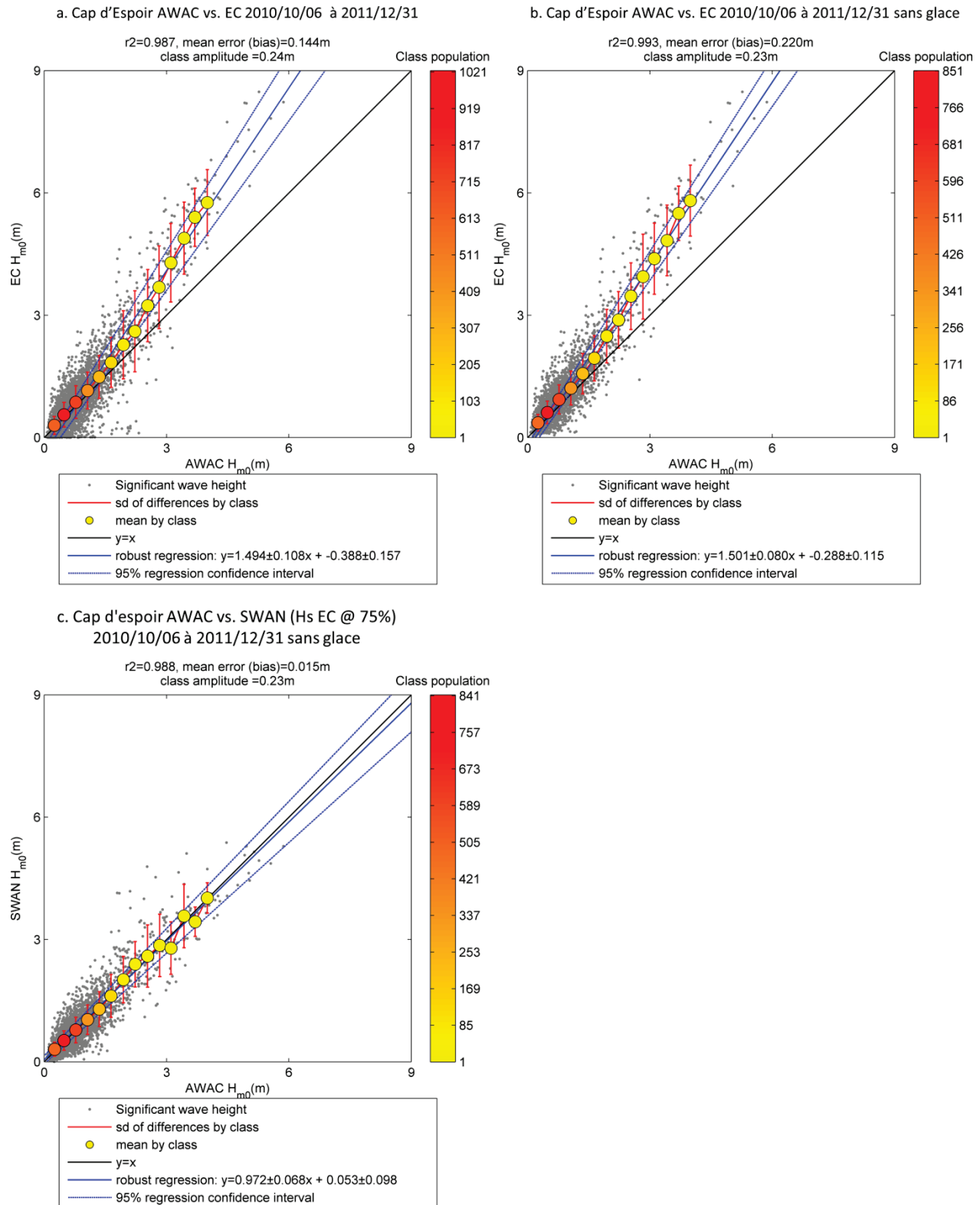


Figure 44. Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

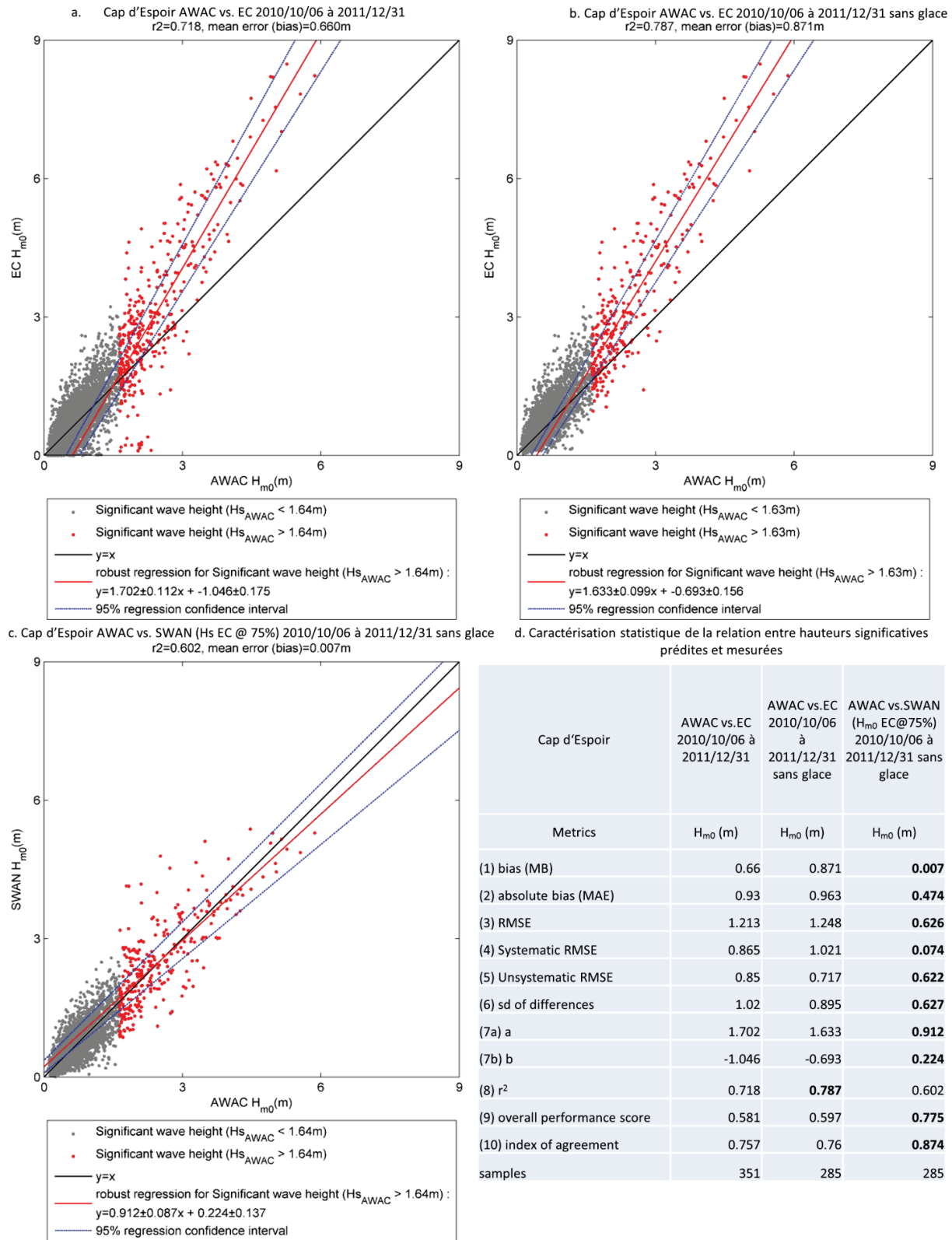


Figure 45. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les 10% des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

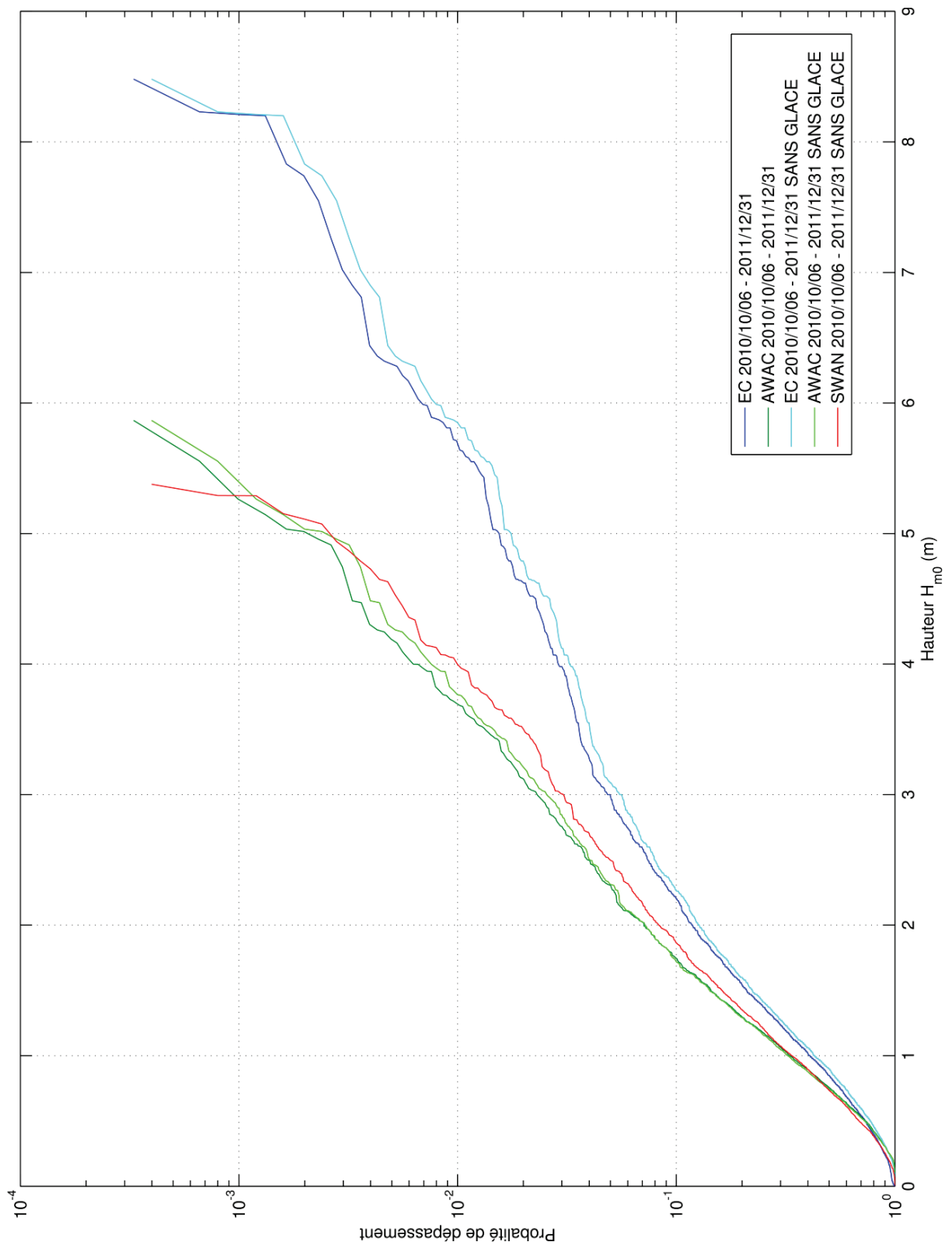


Figure 46. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue

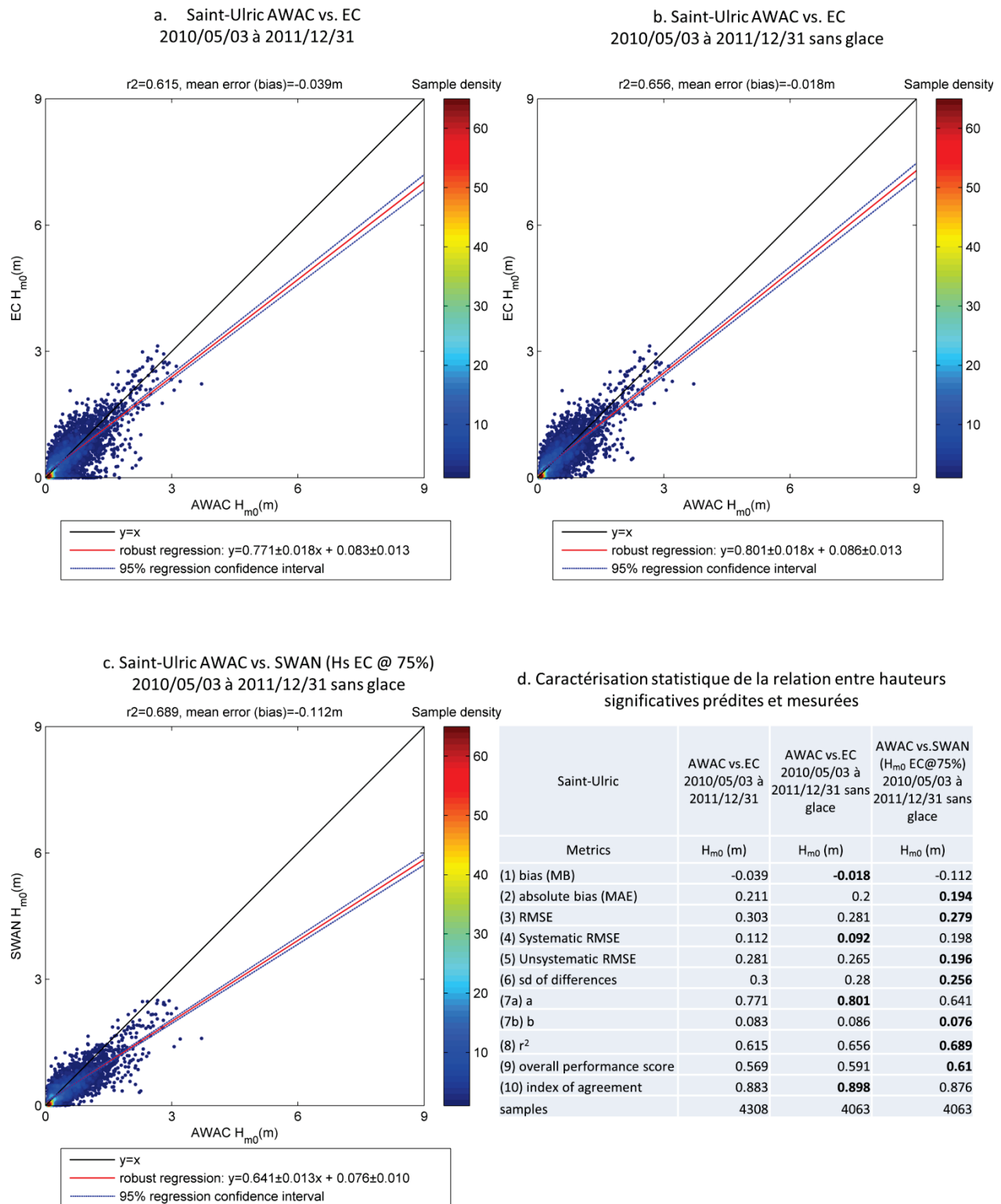


Figure 47. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.

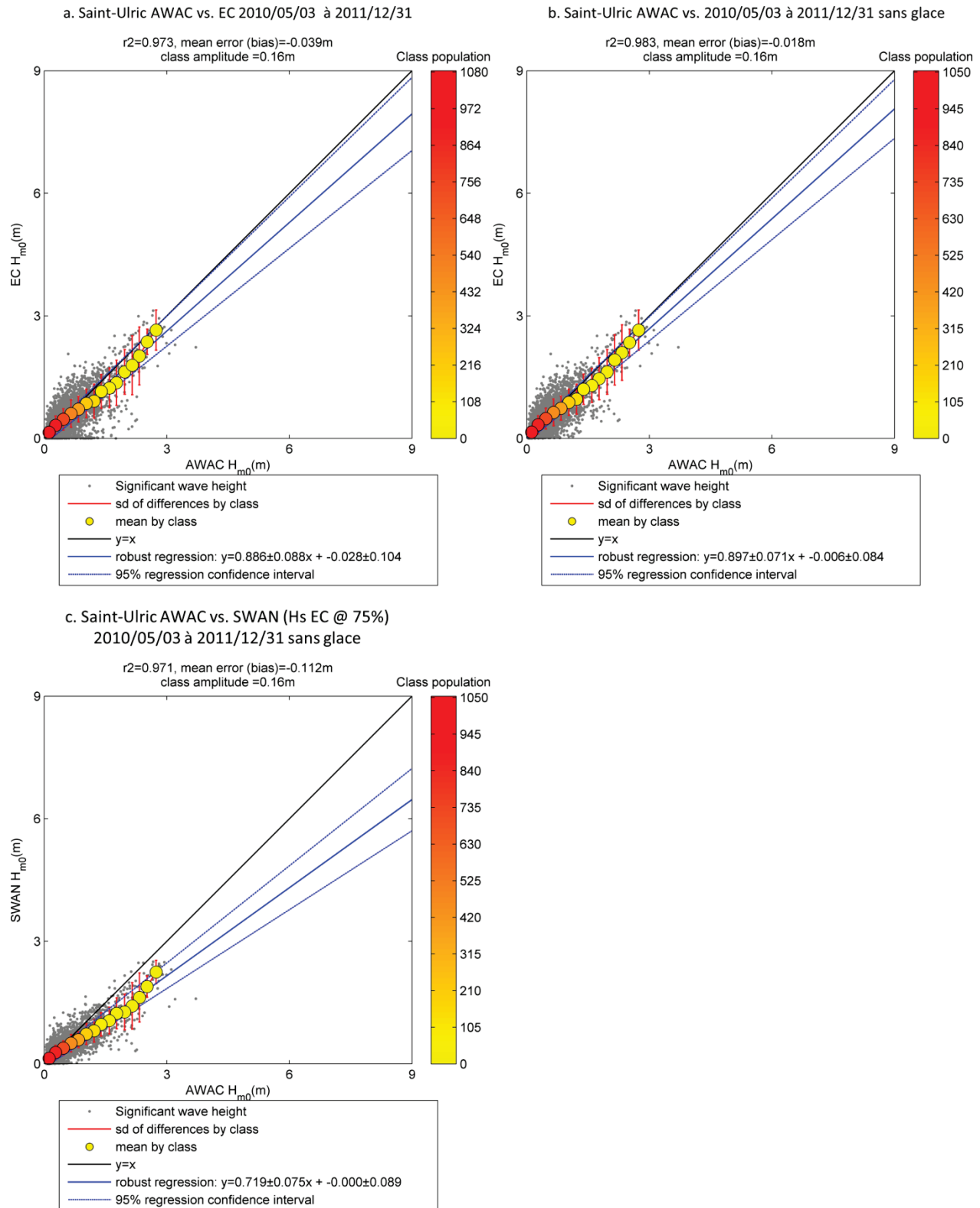


Figure 48. Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

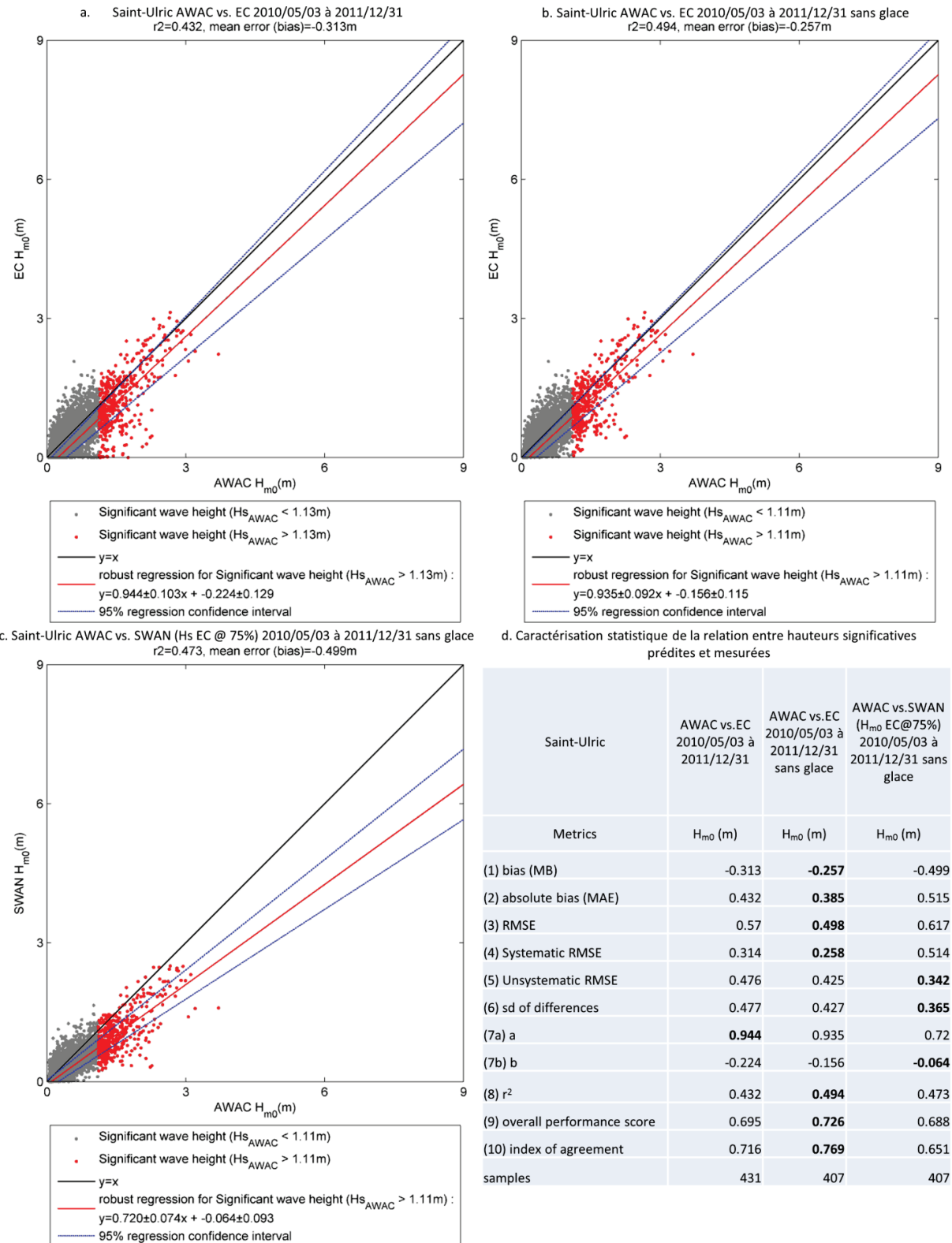


Figure 49. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les 10% des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.

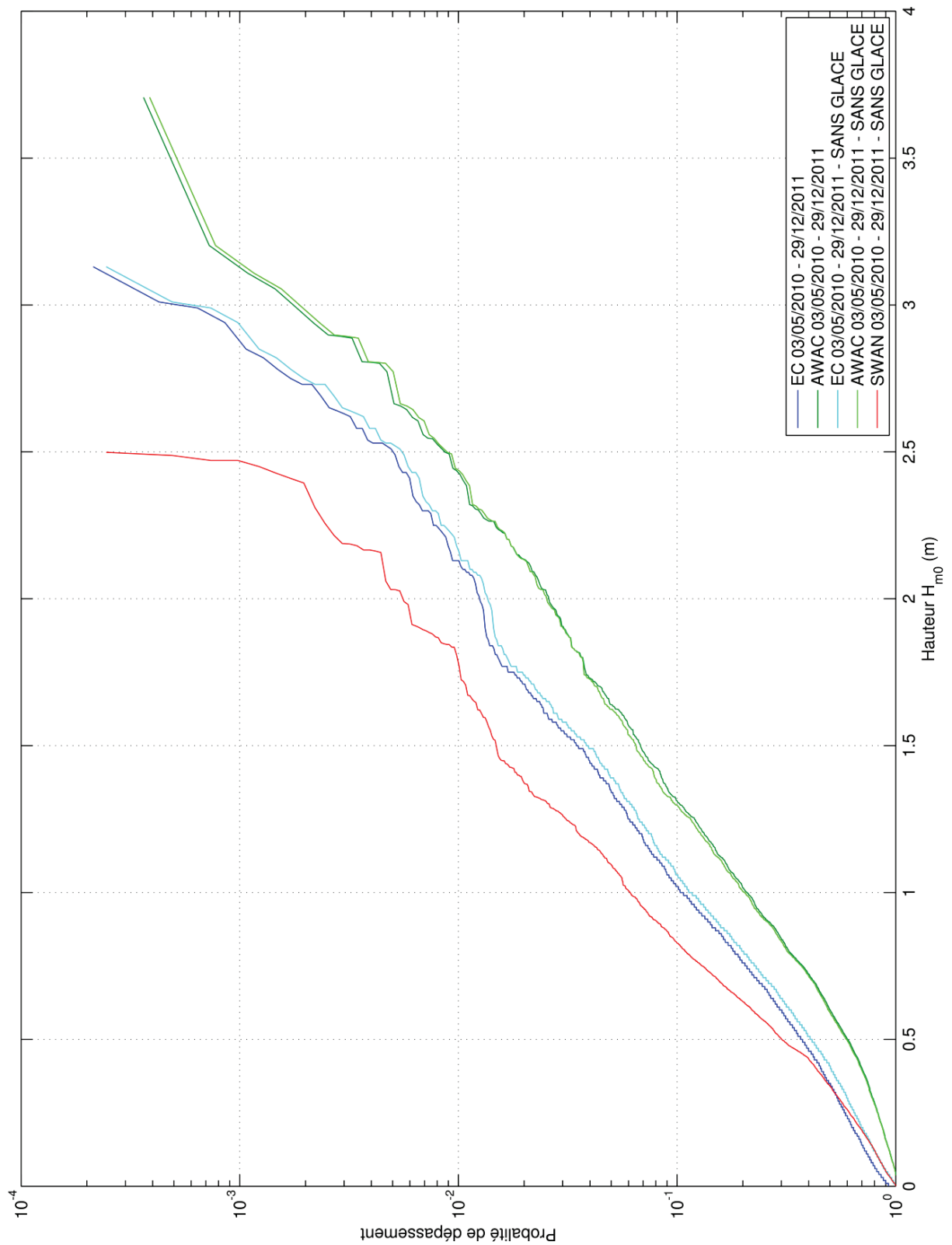


Figure 50. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue

Synthèse des comparaisons de hauteurs

La prise en compte de la période d'englacement est à l'origine d'une erreur non-systématique, qui est probablement due à la difficulté de modéliser les vagues se propageant dans la glace ou à des erreurs dans la distribution spatiale des glaces utilisée par le modèle EC.

Pour la validation, nous considérons donc les mêmes séries chronologiques soustraites de la période durant laquelle de la glace de mer est présente dans un rayon de 40 km autour du site de mesure.

Le modèle EC présente des comportements différents dans l'évaluation des hauteurs de vagues entre les sites du golfe (Sept-Îles, Cap d'Espoir) et celui de l'estuaire maritime (Saint-Ulric).

Pour les sites côtiers du golfe, les séries mesurées et prédites présentent une très bonne corrélation linéaire, mais avec une surévaluation des valeurs mesurées de 29% (Sept-Îles) et 36% (Cap d'Espoir). La majeure partie de l'erreur entre les deux séries est imputable à ce biais linéaire. Les régressions annulant les gradients de densité des nuages de points évaluent la surévaluation à 150% pour les deux sites.

Cette surévaluation, et les erreurs du modèle d'une manière générale, peuvent être liées à quatre types de causes :

- La faible résolution spatiale (5×5 km) de la grille bathymétrique du modèle EC, qui ne reproduit pas les méso- et micro-reliefs bathymétriques influençant la propagation et la distribution de l'énergie des vagues en domaine côtier.
- Le choix des profondeurs attribuées à chaque tuile de la grille bathymétrique du modèle EC. Ces profondeurs correspondent à des valeurs moyennées pour chaque tuile de 5×5 km. Mais des écarts de profondeur importants (plus de 50 m) peuvent exister entre cette moyenne et la profondeur réelle au centre de la tuile. Cette situation se produit dans le cas de pentes fortes ou de variations rapides du relief bathymétrique. Ce phénomène n'est pas problématique en eau profonde, mais le devient à proximité des côtes lorsque le fond génère une dissipation d'énergie par friction. Une profondeur plus importante que la réalité se traduit dès lors par une dissipation plus faible, d'où une surévaluation possible des hauteurs.
- Les termes sources du modèle EC (WAM cycle 4 version PROMISE) ne prennent pas en compte les interactions non-linéaires en domaine peu profond (triads). La propagation ne tient pas compte de la diffraction.
- Les vents utilisés comme forçages atmosphériques du modèle correspondent aux valeurs à 40 m d'altitude de GEM. Or, les termes de génération et de croissance des vagues implémentés dans le modèle WAM sont basés sur des vents mesurés à 10 m (U_{10}). La vitesse du vent est donc surévaluée en entrée du modèle.

Une correction de ce biais est tentée en emboitant un modèle vent-vague côtier (SWAN v.40.85) dont le domaine s'étend de la limite en eau profonde des sites jusqu'à la côte, en incluant les positions des stations de mesure des vagues. Leur résolution spatiale est de 200×200 m, couvrant des domaines de 30×30 km. SWAN inclut les termes de dissipation liée au déferlement forcé par

le fond, et un terme de transfert non-linéaire d'énergie en eau très peu profonde. Il prend également en compte la diffraction. Contrairement au modèle EC, il utilise comme forçage sur la grille les valeurs de vent à 10 m (U_{10}) issues de GEM. SWAN utilise les forçages de courants ambiants et de niveaux d'eau issus du Modèle Océanique Régional du golfe du Saint-Laurent, tout comme le modèle EC. Les résultats non-présentés (cf. Lambert et al., 2012a) issus de cette première série de propagation ramènent la tendance linéaire à la sous-évaluation à 25% pour les deux sites.

Une seconde série de propagation est menée, en utilisant comme conditions aux limites des valeurs de H_{m0} au large issues de modèle EC réduites à 75% de leur valeur initiale afin de corriger la tendance à la surévaluation des données du modèle EC.

Les résultats issus de cette série de propagation conservent une très bonne corrélation linéaire entre valeurs prédites et mesurées. Les erreurs dues à la surévaluation sont annulées. Le biais devient négligeable et la régression linéaire indique une sous-évaluation de 10,8% (Sept-Îles) et 3,8% (Cap d'Espoir). À l'exception de l'erreur non-systématique liée à une imprécision du modèle, ces simulations présentent les valeurs d'erreur les plus faibles, et de corrélation les plus élevées.

Concernant le paramètre de hauteur significative pour les sites de Sept-Îles et de Cap d'Espoir, le modèle EC fournit des valeurs dont la variabilité instantanée est très proche de celle mesurée et reproduit temporellement bien les événements météo-marins, avec toutefois une surévaluation d'environ 50% des vagues mesurées.

L'utilisation de SWAN, avec une réduction à 75% des H_{m0} du modèle EC, permet d'annuler la surévaluation du modèle EC aux points de validation. L'utilisation des vents à 10 m issus de GEM plutôt que les vents à 40 m pourrait aussi contribuer à de meilleurs résultats.

Pour le site côtier de l'estuaire maritime (Saint-Ulric), la comparaison directe des séries mesurées et prédites par le modèle EC présente une très bonne corrélation linéaire, mais avec une sous-estimation des valeurs mesurées. Nous pensons que cette sous-évaluation est liée d'une part à l'incapacité du modèle à générer des vagues de la côte jusqu'au site de l'AWAC (Figure 68). D'autre part, le modèle est imprécis, particulièrement pour les vagues les plus faibles. L'erreur liée au biais systématique est extrêmement faible. L'utilisation de SWAN pour propager les vagues du large à la côte ne permet pas de corriger cette tendance, la sous-évaluation est similaire ou amplifiée.

Concernant le paramètre de hauteur significative au large de l'estuaire maritime (site de Saint-Ulric), le modèle EC fournit des valeurs dont les variations sont très proches de celles mesurées et reproduit bien les événements météo-marins. Compte tenu des très faibles valeurs d'erreur moyenne et d'erreur systématique, ainsi que des valeurs plus importantes d'erreur aléatoire, il est difficile de quantifier précisément la tendance à la sous-évaluation du modèle. Nous considérons cette valeur comme comprise entre 0 et -10%. Les grandes hauteurs sont reproduites correctement.

5.1.3. Périodes

Comparaison modèle EC interpolé vs AWAC, période d'englacement incluse

L'observation des séries temporelles issues des AWAC et du modèle EC montre une mauvaise sensibilité du modèle pour les trois sites, particulièrement pour Sept-Îles. Pour les deux premiers sites, la plupart des événements de longues périodes sont représentés mais avec une forte surévaluation, le modèle semblant très imprécis pour les périodes courtes. La corrélation entre valeurs prédites et mesurées sont faibles, voire inexistantes, ce qui est confirmé par les coefficients de détermination ([8] SI : 0,25 CPE : 0,51, STU : 0,34).

Pour SI et CPE, les biais moyens [1] sont très grands, respectivement 0,66 s et 0,77 s, indiquant une tendance forte du modèle à la surévaluation des périodes. Compte-tenu des faibles valeurs du coefficient de détermination, la pente de la droite de régression [7a] n'est pas significative pour SI. Pour CPE, le coefficient directeur confirme la tendance du modèle à surestimer la période des vagues (1,117), cependant la droite de régression ne rend pas compte des périodes longues, car influencée par la grande densité des périodes courtes (Figure 54).

L'erreur moyenne absolue [2] est également grande, comprise entre 0,9 s (SI) et 1 s (CPE), tout comme l'erreur RMS [3] (SI, CPE : 1,34 s). Cela illustre encore la présence d'erreurs élevées.

Ces erreurs élevées sont majoritairement de nature aléatoire ($RMSE_u$ [5]; SI : 1,14 s, CPE : 1,11 s), mais l'erreur RMS systématique [4], liée à la tendance surestimatrice du modèle atteint également des valeurs élevées : 0,68 s pour SI, 0,78 s pour CPE. Cela confirme que la part majeure de la variance n'est pas représentée par la droite de régression. La dispersion très grande de l'erreur [6] autour de la moyenne (SI : 1,17 s, CPE : 1,1 s) indique également le manque de précision du modèle.

Les graphes de dispersion (Figures 51 et 54) illustrent la distribution de l'erreur pour SI et CPE : il existe un nuage de points avec un centre dense pour les périodes mesurées comprises entre 3 s et 5 s et une dispersion non négligeable pour les longues périodes, ce qui souligne l'imprécision du modèle pour les périodes courtes. Le centre de gravité de ce nuage est situé au-dessus de la droite 1:1, ce qui confirme que les périodes sont majoritairement surévaluées par le modèle EC. Les périodes des vagues supérieures à 5 s sont très surévaluées, d'un facteur 1,4 pour SI et 1,5 pour CPE. Cette tendance est particulièrement bien observable à CPE, qui présente davantage de périodes longues.

À Saint-Ulric, on observe la même tendance globale. Il existe un biais positif moyen de 0,31 s, qui n'est pas représentatif de la totalité de la série. Les périodes inférieures à 4,5 s sont mal représentées par le modèle, ce qui est démontré par la part aléatoire de la RMSE et la très forte dispersion de l'erreur autour de sa moyenne (0,92 s). Les périodes supérieures à 5 s sont surévaluées ce qui correspond à une erreur systématique de 0,33 s. En raison du poids des classes de périodes les plus faibles, la pente de la droite de régression est réduite (0,87). Cette pente n'est pas représentative de la surévaluation des plus fortes périodes, correspondant à un facteur 1,25.

Comparaison modèle EC interpolé vs AWAC, sans la période d'englacement

Afin d'exclure l'erreur d'analyse liée à la mesure/modélisation des vagues dans la glace, nous considérons à présent les mêmes séries temporelles prédites et mesurées à l'exclusion des périodes de résidence des glaces de mer à l'hiver 2010/2011 (cf. Tableau 5).

Dans le golfe, les valeurs d'erreur moyenne [1] stagnent (SI : 0,6 s, CPE : 0,76 s), ce qui confirme la tendance toujours surestimatrice du modèle, illustrée également par une augmentation légère des coefficients directeurs des droites de régression (SI : 0,97, CPE : 1,39).

Sans la période d'englacement, la dispersion du modèle diminue, comme indiqué par l'augmentation des corrélations entre valeurs prédites et mesurées (R^2 [8], SI : 0,385, CPE : 0,616), et une diminution de l'écart-type de l'erreur [6]. L'erreur absolue moyenne [2] et la RMSE [3] diminuent elle aussi faiblement pour les deux sites. Ces diminutions s'expliquent par une diminution de la part de l'erreur aléatoire, comme l'indique la RMSE aléatoire des deux sites (< 1 s). La part d'erreur liée à la surévaluation reste la même, avec des valeurs de RMSE systématique qui restent très proches des valeurs précédemment obtenues.

La distribution des nuages de points reste identique, les périodes courtes mesurées (3 à 5 s) correspondent à un nuage avec un centre dense et une dispersion plus marquée pour les périodes plus longues. Le centre de gravité de ce nuage est néanmoins situé au-dessus de la droite 1:1, ce qui confirme que ces valeurs sont également majoritairement surévaluées.

Pour Sept-Îles, le graphe de dispersion par classes (Figure 52) met en évidence une surévaluation, mais elle semble constante pour toutes les classes (+0,8 s). La dispersion augmente néanmoins plus fortement qu'à Cap d'Espoir (cf. ci-dessous), elle atteint 1 s pour la classe 5 s et atteint 2,5 s pour la classe 6,5 s. Les vagues les plus longues présentent donc une très forte dispersion pour Sept-Îles, certaines étant fortement surévaluées, d'autre fortement sous-évaluées.

Les 10% des vagues les plus hautes ($H_{m0} > 1,08$ m) sont associées à des périodes longues, supérieures à 4,5 s (Figure 53). Il existe également des vagues de longues périodes ($4,5 \text{ s} < T_{02} < 11$ s) qui correspondent à des vagues de $H_{m0} < 1,08$ m, mais les périodes de ces vagues sont systématiquement sous-évaluées par le modèle. Cela entraîne la forte dispersion calculée pour les vagues les plus longues. La surévaluation des périodes modélisées à Sept-Îles peut atteindre 50% pour les vagues les plus hautes.

Pour Cap d'Espoir, le graphe de dispersion par classes (Figure 55) met en évidence une tendance non-linéaire : les vagues les plus courtes ($2,5 \text{ s} < T_{02} < 3,5$ s) présentent une surévaluation moyenne de 0,5 s, cette valeur diminuant pour les périodes intermédiaires ($3,5 \text{ s} < T_{02} < 5$ s, $\sim 0,3$ s). La surévaluation augmente progressivement de nouveau pour les classes de vagues les plus longues ($T_{02} > 5$ s) jusqu'à atteindre plus de 3 s, soit un facteur de 1,5, pour les valeurs les plus élevées. Pour les vagues de moins de 5 s, la dispersion moyenne est 0,75 s, cette valeur augmentant avec les vagues les plus longues jusqu'à atteindre 1 s. Les périodes les plus élevées correspondent très majoritairement aux vagues les plus fortes (Figure 56).

À Saint-Ulric, l'exclusion de la période d'englacement améliore légèrement les scores de chaque critère. Le graphe de dispersion par classes (Figure 55) met en évidence une réduction de la dispersion pour les plus longues vagues, qui est donc imputable en partie à la prédiction/mesure des vagues dans la glace. Le graphe de dispersion des périodes correspondantes aux 10% des H_{m0} les plus grandes (Figure 59) met en évidence une bonne prédiction des périodes des vagues les plus hautes, dont la dispersion est plus faible que celle calculée pour l'ensemble de la série ([6], 0,68 s). Le coefficient de la droite de régression des plus hautes vagues (1,43) démontre la surévaluation des périodes de ces vagues. Il est important de noter que les périodes les plus longues ne correspondent pas forcément aux H_{m0} les plus hautes.

Comparaison modèle EC propagé par SWAN vs AWAC

Afin de confirmer la nature systématique de l'erreur liée à une surestimation des valeurs prédites, nous appliquons le même protocole que celui déjà employé dans Lambert et al. (2012a). Nous emboîtons un modèle de vague (SWAN) centré sur les stations AWAC. Ce modèle est forcé à ses limites par les conditions de vagues issues du modèle EC, avec des hauteurs significatives linéairement diminuées (multiplication avec un facteur de 0,75). Il utilise aussi la génération locale de vague par le vent de GEM à 10 m plutôt qu'à 40 m.

Pour CPE, les valeurs moyennes [1] de l'erreur sont réduites à moins de 0,01 s. La tendance à la surévaluation disparaît pour les vagues les plus courtes, dont le nuage reste fortement dispersé ([6] dispersion de l'erreur autour de l'erreur moyenne : 0,89 s) mais se centre sur la droite 1:1. Les erreurs absolues et RMS diminuent de 25% (0,68 s, 0,89 s). La réduction de ces erreurs est due à une réduction du biais systématique, ce qu'illustre la RMSE systématique qui diminue de 70% ([4] 0,22 s). La part aléatoire de l'erreur reste très élevée ([5] 0,86 s). La corrélation entre les deux séries augmente légèrement ($R^2 = 0,62$). Les plus longues périodes restent néanmoins très surévaluées (1,4), comme le confirme le coefficient directeur de la droite de régression du graphe de dispersion des classes (1,425).

Pour SI, l'erreur moyenne devient négative (-0,29 s) et R^2 diminue (0,28). Le nuage de points correspondant aux vagues les plus courtes, toujours très dispersé ([6] : 0,89 s), se décale sous la droite 1:1, ce qui caractérise une sous-prédiction de ces valeurs par le modèle. Les valeurs des vagues les plus longues (> 5 s) restent cependant toujours surévaluées, mais dans une moindre proportion.

Pour STU, l'utilisation de SWAN a un impact similaire. L'erreur moyenne [1] devient négative (-0,24 s). La tendance à sous-évaluation s'accroît pour les vagues les plus courtes, dont le nuage présente une meilleure concentration que précédemment (dispersion de l'erreur autour de l'erreur moyenne [6] : 0,75 s) mais se décale sous la droite 1:1. La RMSE systématique augmente ([4] 0,33 s). La part aléatoire de l'erreur diminue mais reste élevée ([5] 0,71 s). La corrélation entre les deux séries diminue également ($R^2 = 0,35$). Les périodes associées aux plus hautes vagues (> 5 s, Figure 59), bien que minorées d'environ -0,9 s par le modèle, ne présentent plus de tendance linéaire sur ou sous-évaluatrice.

L'utilisation de SWAN permet la réduction d'une partie de l'erreur systématique, mais la dispersion extrême des données diminue l'efficacité de la correction de biais. Le modèle reste

fortement imprécis pour les vagues courtes, qui sont les plus représentées. Les vagues les plus longues, mieux simulées, restent surévaluées par le modèle. La performance globale du modèle reste faible, avec des scores qui peuvent être considérés mauvais pour SI à moyen pour CPE et STU.

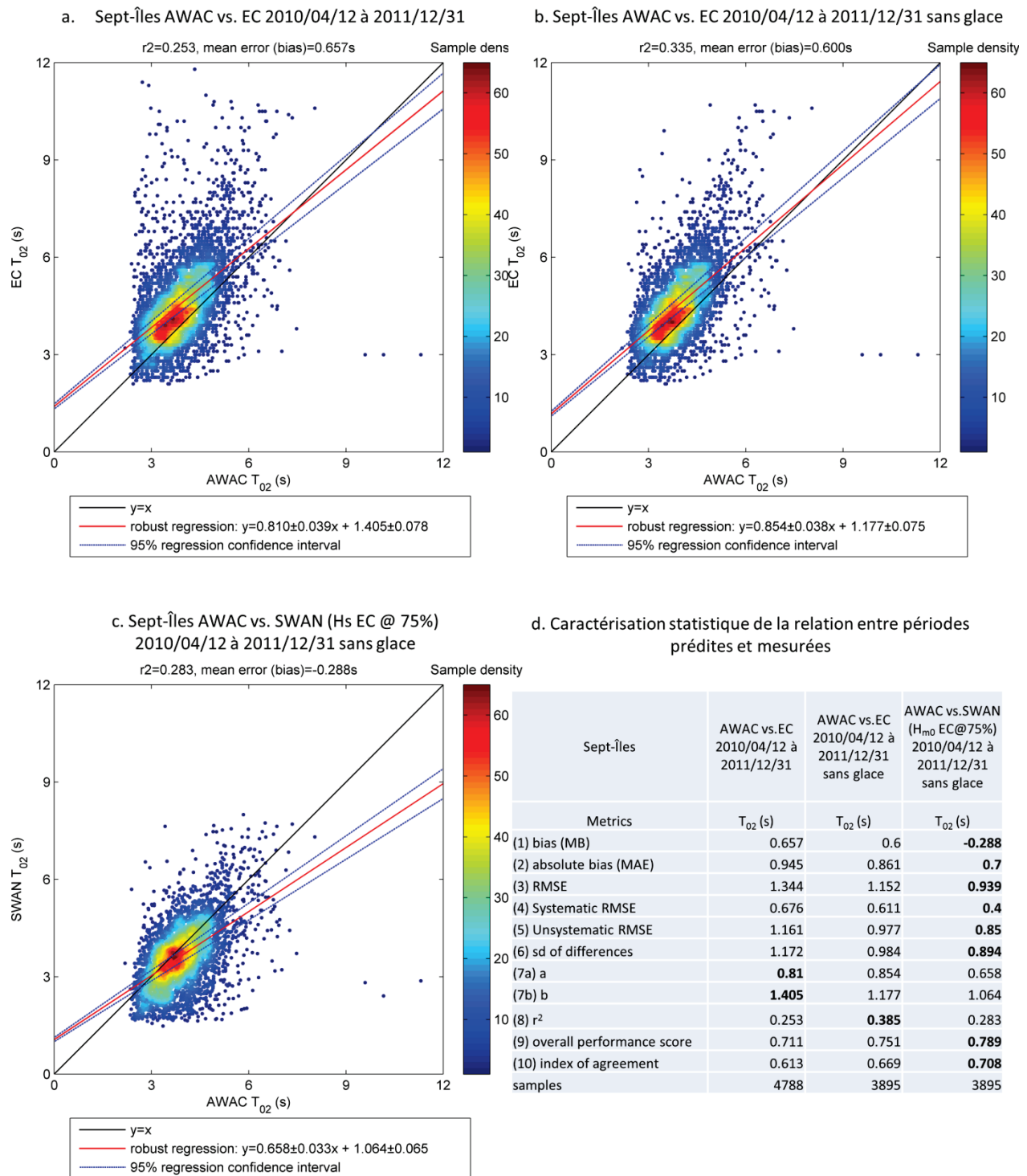


Figure 51. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre T_{02} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

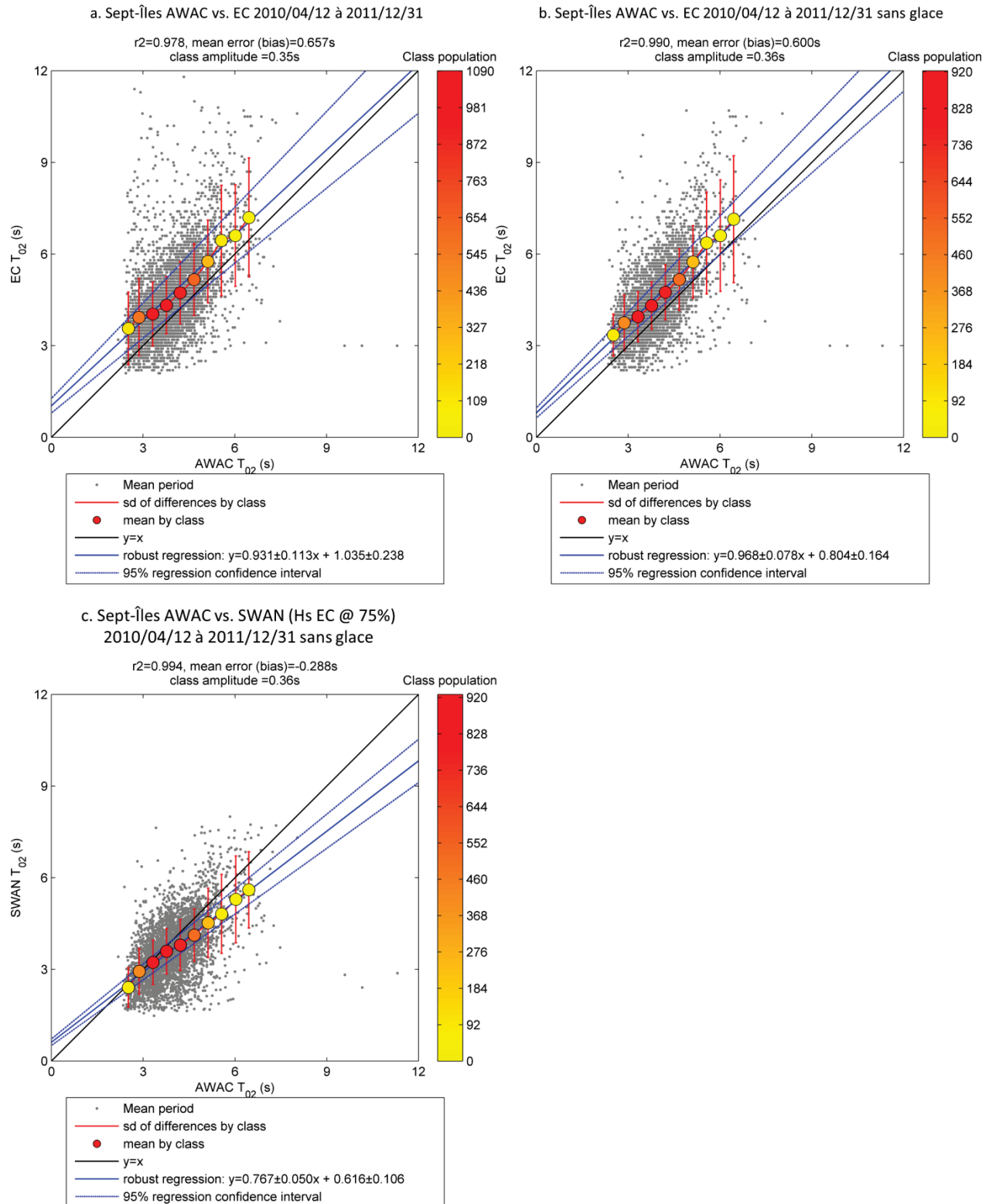


Figure 52. Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

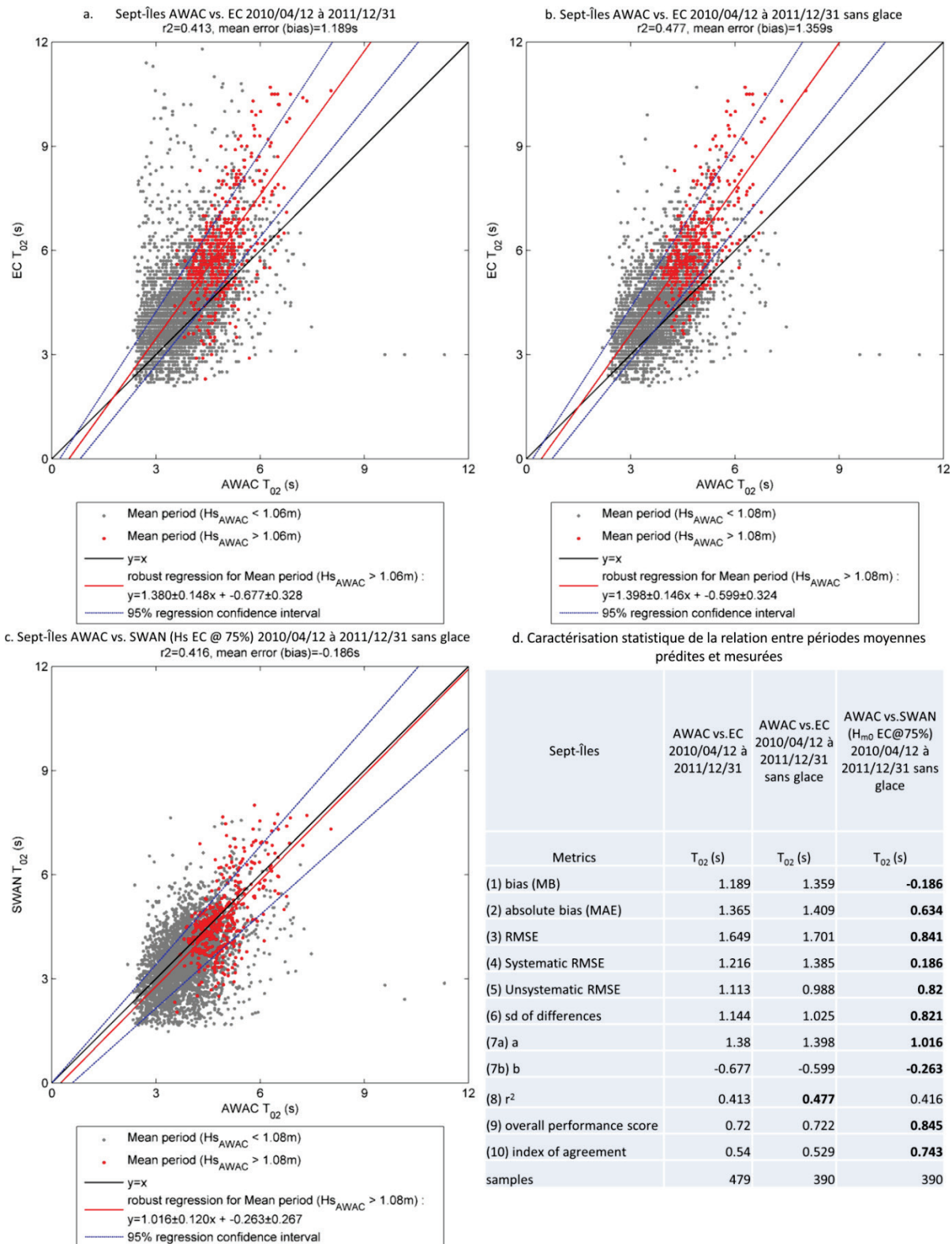


Figure 53. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant aux 10% des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

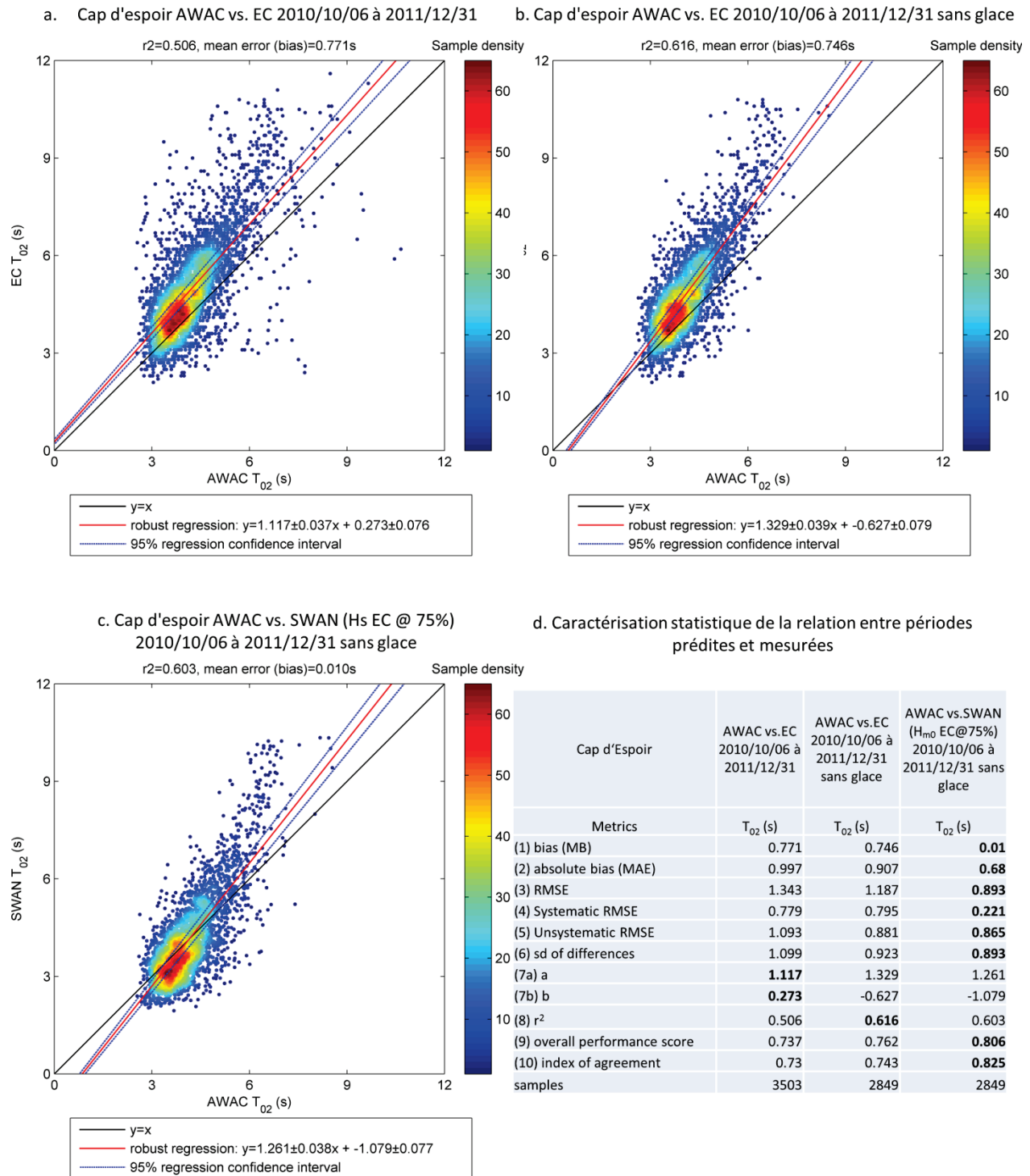


Figure 54. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre T_{02} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

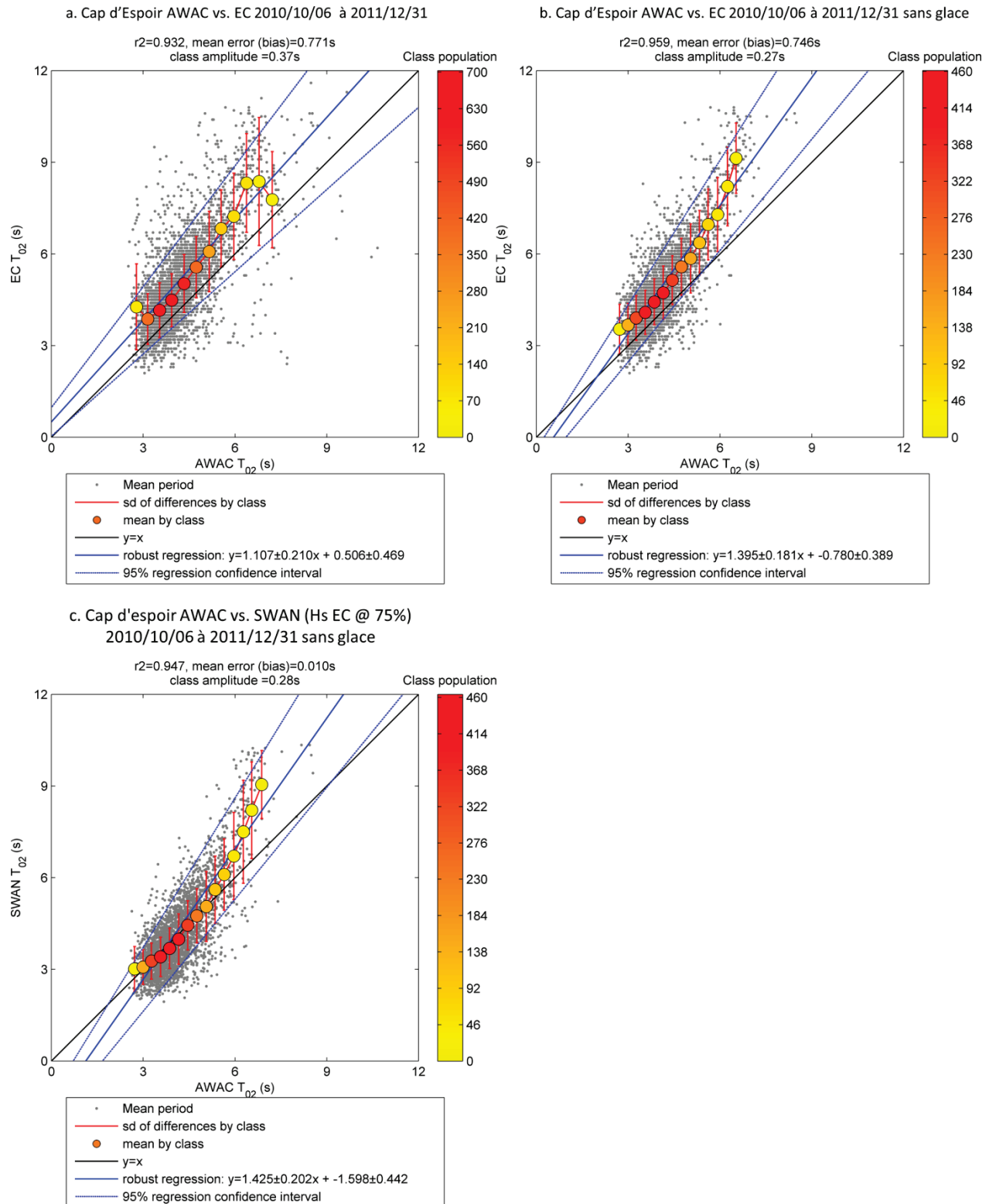


Figure 55. Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

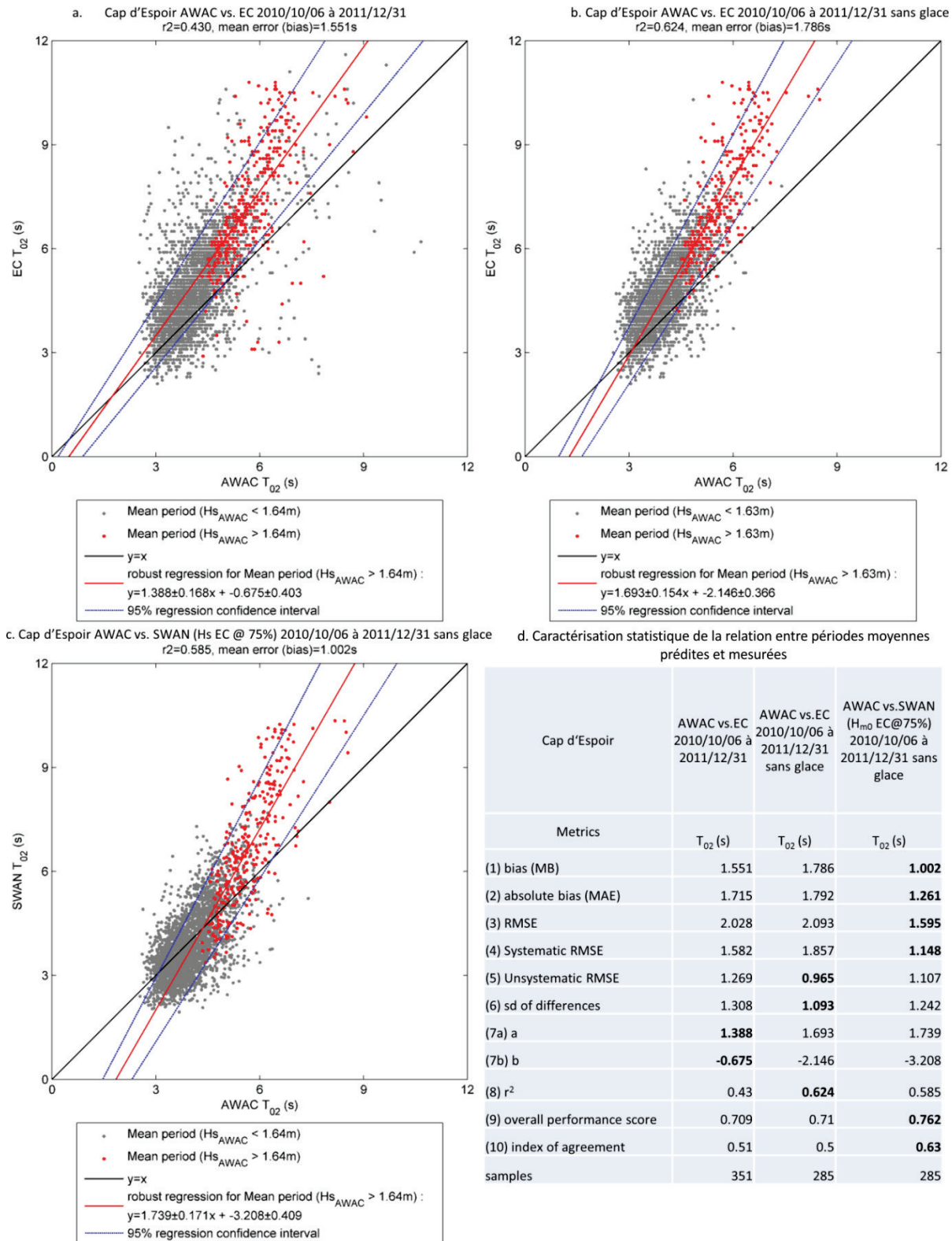


Figure 56. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant aux 10% des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

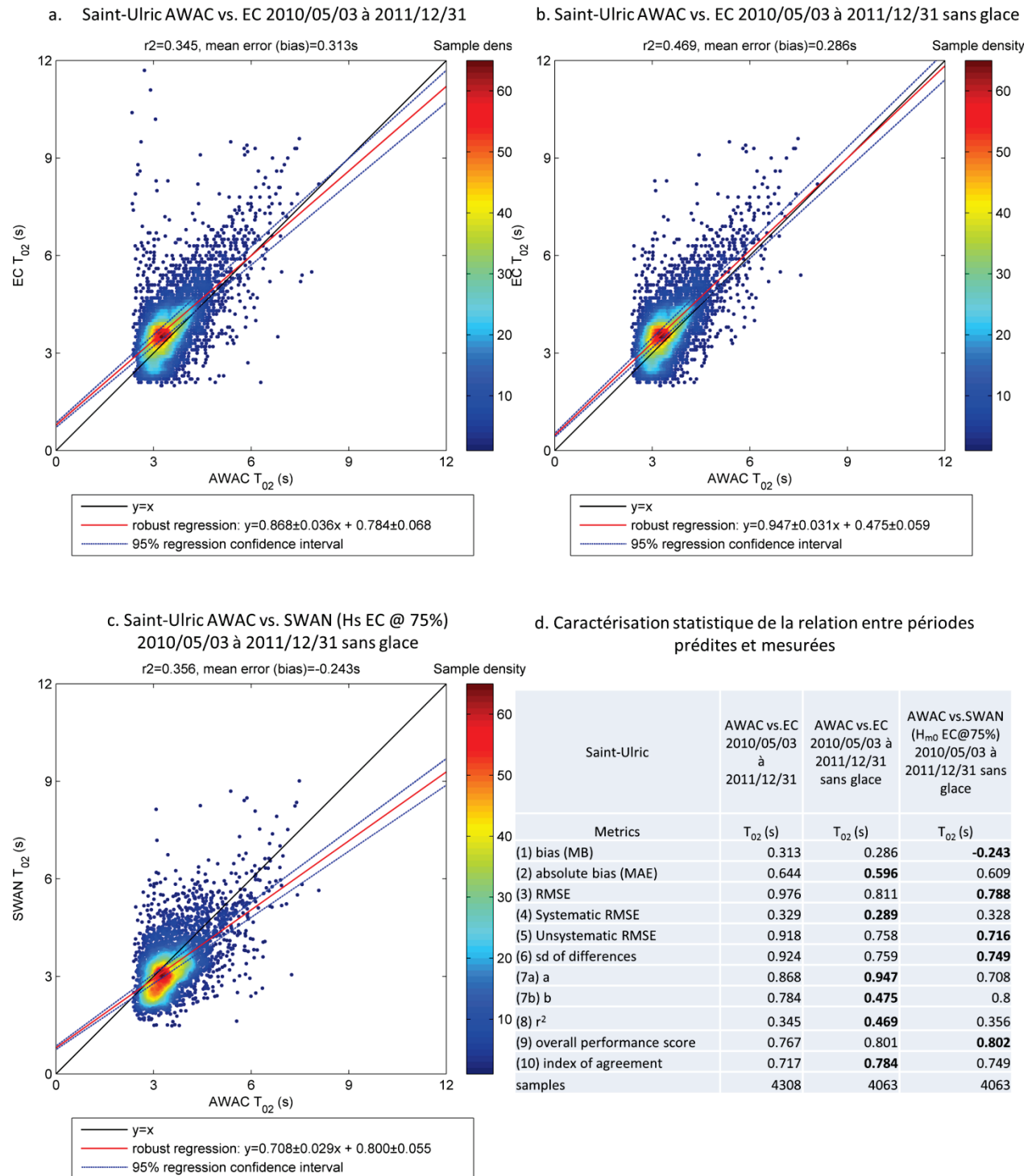


Figure 57. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre T_{02} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.

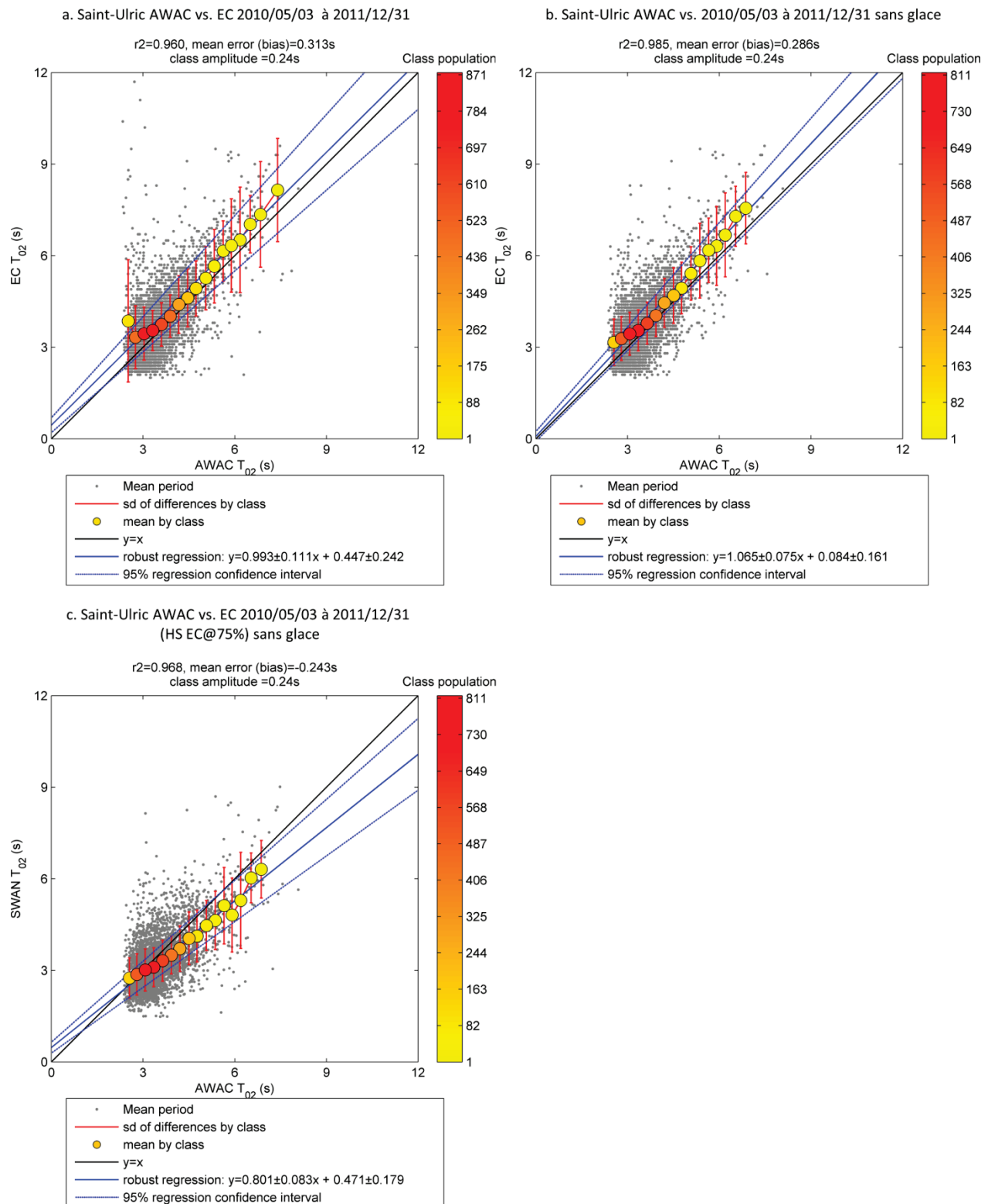


Figure 58. Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

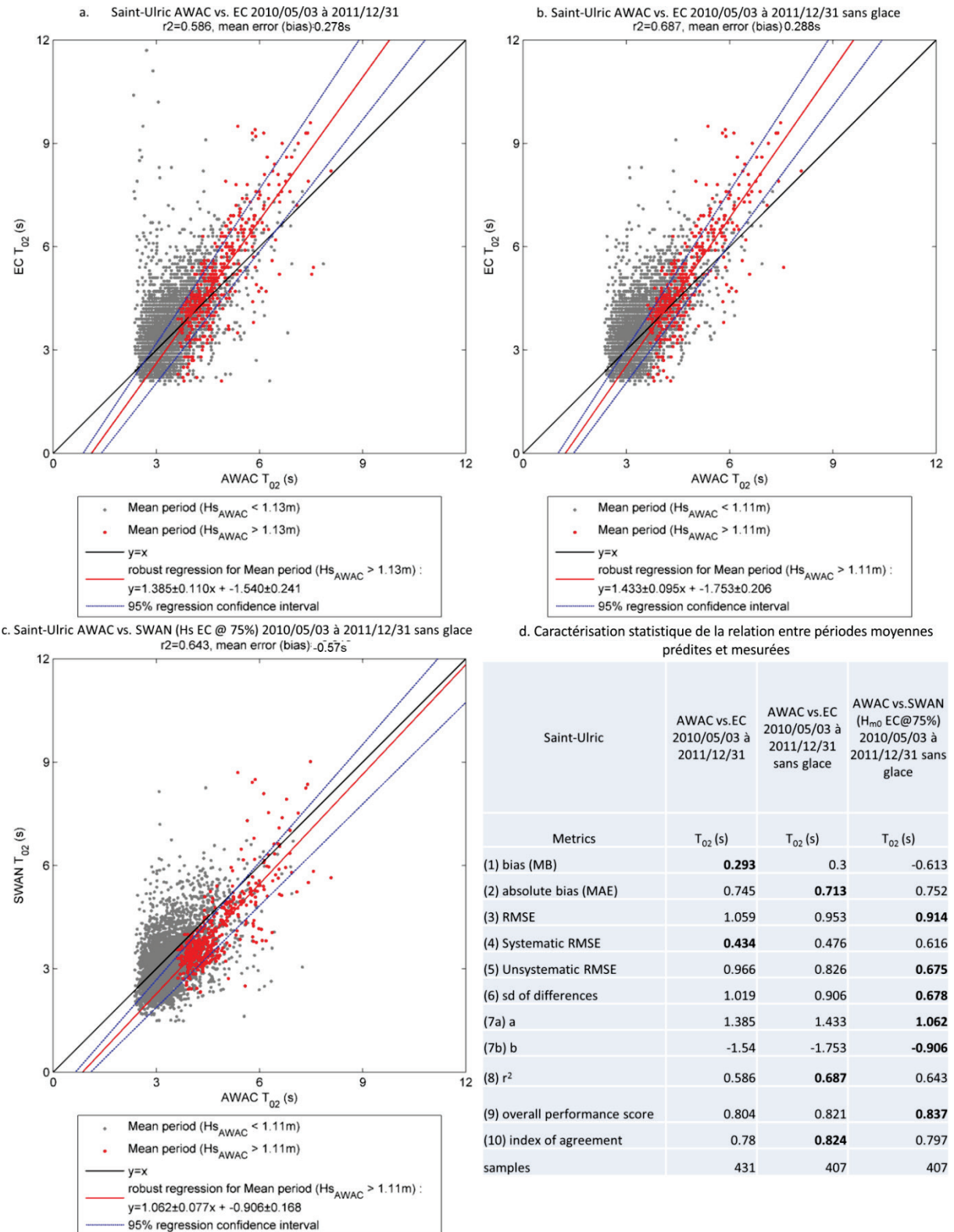


Figure 59. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant aux 10% des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.

Synthèse des comparaisons de périodes

Pour les sites côtiers du golfe, les séries mesurées et prédites par le modèle EC à la position des stations présentent une corrélation linéaire moyenne à Cap d'Espoir et faible à Sept-Îles (plus de dispersion). Le modèle présente deux types de comportement, en fonction de la période des vagues :

- La prédiction des périodes inférieures à 4,5 s est globalement imprécise, la dispersion est élevée, bien que les prédictions soient centrées sur les mesures (pas de tendance), avec la totalité des erreurs comprises entre plus ou moins 60% des valeurs mesurées.
- À partir de 5 s, la dispersion diminue mais le modèle surévalue les périodes d'un facteur pouvant atteindre 1,4 à 1,5 pour les plus longues périodes des deux sites. La dispersion reste toujours beaucoup plus importante pour Sept-Îles en raison de la présence de vagues longues de $H_{m0} < 1,08$ m, mal simulées par le modèle.

La propagation des vagues du large à la position des stations en utilisant SWAN ne permet pas de gagner en précision (pas de diminution de l'erreur aléatoire) mais diminue légèrement la tendance à la sous-évaluation du modèle, sans modifier la différence de qualité entre prédictions des vagues courtes et longues:

- La prédiction des périodes inférieures à 5 s est globalement imprécise, avec une dispersion élevée qui s'accompagne cette fois d'une tendance légèrement sous-évaluatrice du modèle pour Sept-Îles.
- À partir de 5 s, la dispersion diminue fortement mais le modèle continue à surévaluer ces valeurs. Pour Cap d'Espoir, cette surévaluation reste similaire (40%), pour Sept-Îles elle diminue globalement pour atteindre 25%. La dispersion reste toujours plus importante pour Sept-Îles.

Sur les sites côtiers du golfe, pour la période du 10 novembre 2010 au 31 décembre 2010, les prévisions du modèle EC sont imprécises mais sans tendance pour les périodes courtes (inférieures à 5 s). Aux positions des stations, le modèle surévalue les périodes supérieures à 5 s de 45% en moyenne (avec une dispersion maximale de $\pm 30\%$ autour de cette valeur) pour les deux sites. La dispersion très élevée à Sept-Îles est due à une sous-évaluation des prédictions de vagues de faible hauteur et de longue période.

L'utilisation de SWAN permet de déduire que le modèle surévalue au large les périodes des vagues supérieures à 5 s de 25% en moyenne (dispersion maximale $\pm 30\%$) pour Sept-Îles et de 40% (dispersion maximale $\pm 30\%$) pour Cap d'Espoir.

Pour le site côtier de l'estuaire maritime (Saint-Ulric), les séries mesurées et prédites par le modèle EC à la position des stations présentent une corrélation linéaire moyenne. La tendance est relativement similaire à celle du golfe, dans des proportions différentes :

- le modèle a tendance à surévaluer l'ensemble des données supérieures à 4,5 s, mais plus faiblement que dans le golfe (15%).
- Les périodes associées aux 10% des plus hautes vagues présentent une surévaluation comparable aux sites du golfe (40%)
- la dispersion est toujours importante pour les périodes inférieures à 4 s. Paradoxalement, il existe des erreurs positives extrêmes sur toute la distribution.

L'utilisation de SWAN forcé par le modèle EC avec les H_{m0} réduit à 75% permet de supprimer la tendance à la surévaluation des périodes les plus longues, les valeurs modélisées ne présentent plus de tendance systématique mais les courtes périodes demeurent fortement dispersées. Les erreurs positives extrêmes sont conservées.

Sur le site côtier de l'estuaire maritime (Saint-Ulric), le modèle EC présente une précision faible pour toutes les classes de périodes mais surévalue linéairement les valeurs de 15% en moyenne (avec une dispersion maximale de $\pm 25\%$ autour de cette valeur). Quelles que soient leurs valeurs, certaines occurrences aléatoires sont fortement surévaluées par le modèle (+50%), sans corrélation avec les paramètres de hauteur ou de période.

L'utilisation de SWAN permet de déduire que le modèle ne surévalue ni ne sous-évalue (pas de tendance) les périodes au large. Certaines occurrences aléatoires demeurent fortement surévaluées par le modèle (+50%) sans corrélation avec les paramètres de hauteur ou de période.

5.1.4. Directions

La qualité de la prédiction varie entre les trois sites.

Pour Sept-Îles, la comparaison des résultats du modèle EC aux données expérimentales AWAC témoigne d'une bonne sensibilité du modèle. La comparaison graphique des deux séries temporelles suggère une bonne corrélation entre les deux variables. Le graphe de dispersion (Figure 60a) met en évidence une distribution bimodale (deux nuages de points), avec deux directions dominantes bien représentées par le modèle (ESE-SE et SWW-SW). Le biais angulaire absolu moyen [11] est faible ($21,14^\circ$). La série présente une dispersion faible ([12], concentration approximative =4,19) relativement aux autres comparaisons, mais elle conserve une valeur absolue élevée. Le coefficient de corrélation basé sur le sinus des valeurs démontre l'existence d'une forte relation linéaire entre les valeurs prédites et mesurées ($r=0,761$). Les coefficients de la droite de régression linéaire (7a, $a=0,83$, 7b, $b=21,44$) confirment la bonne qualité prévisionnelle du modèle. Néanmoins, une régression linéaire n'est pas adaptée pour caractériser les relations entre deux séries de valeurs circulaires. Appliquées à des valeurs circulaires, les valeurs des coefficients de la droite permettent uniquement d'évaluer la neutralité de la relation entre valeurs prédites et mesurées. La notion de sur- ou de sous-évaluation ne s'applique pas pour les directions.

La suppression des données de glace permet une légère amélioration de la plupart des paramètres lors de la comparaison des données du modèle EC et de la station AWAC, sans modification fondamentale.

La comparaison des résultats de SWAN forcé par les valeurs pondérées du modèle avec les données expérimentales AWAC montre une bonne sensibilité du modèle. La comparaison graphique des deux séries temporelles montre une bonne corrélation entre les deux variables. Le graphe de dispersion (Figure 60c) met toujours en évidence une distribution bimodale (deux nuages de points) pour le site de Sept-Îles, avec les mêmes deux directions dominantes. On observe un gain de précision, ce qui est confirmé par la concentration approximative [12], qui augmente légèrement (5,12), et par le biais angulaire absolu moyen [11], qui diminue légèrement ($19,34^\circ$). Le coefficient de corrélation linéaire calculé à partir des sinus présente toutefois une très faible augmentation ([13], 0,785). Cependant, les coefficients de la droite de régression linéaire (7a, $a=0,762$, 7b, $b=43,31$) confirment l'existence d'une dispersion importante des valeurs du modèle pour la reproduction des directions du sud-sud-ouest (200°).

Pour Cap d'Espoir, la comparaison des résultats du modèle EC aux données expérimentales AWAC témoigne d'une moins bonne sensibilité du modèle. Les deux séries sont faiblement corrélées. Cela est confirmé par la comparaison graphique des séries temporelles, qui présentent des écarts importants sur la quasi-totalité de la période. Le graphe de dispersion (Figure 63a) met en évidence une dispersion élevée des données, en particulier pour les vagues mesurées du secteur est ($90-100^\circ$) qui sont les plus fréquentes. Cela est confirmé par la faible valeur de l'indice de concentration ([12], 1,98). En conséquence, le biais angulaire absolu moyen [11], qui est exprimé sur une plage de 0 à 180° , est élevée ($37,12^\circ$). Le coefficient de corrélation basé sur le sinus des valeurs confirme la non-significativité de la relation entre mesures et modèle ($r=0,57$).

La suppression des données de glace permet une légère amélioration de la plupart des paramètres lors de la comparaison des données d'EC et de la station AWAC, sans modification fondamentale.

La comparaison des résultats de SWAN forcé par les valeurs pondérées d'EC et des données expérimentales AWAC pour la période considérée est très proche de la comparaison précédente : la sensibilité du modèle est bonne mais les séries sont peu corrélées. Les deux séries temporelles présentent des écarts importants sur la quasi-totalité de la période. Le graphe (Figure 63) met cependant en évidence une diminution de la dispersion des données qui se recentrent sur la droite 1:1. L'indice de concentration ([12], 2,219) est toujours faible mais augmente légèrement par rapport à l'analyse précédente (+0,1 par rapport aux données du modèle EC). Le biais angulaire absolu moyen [11], toujours élevé, diminue également ([11], 33,05°, soit diminution de -5,1°). Le coefficient de corrélation basé sur le sinus des valeurs augmente très légèrement par rapport à sa précédente valeur mais reste non-significatif ($r=0,574$).

Pour Saint-Ulric, la comparaison des résultats du modèle EC aux données expérimentales AWAC témoigne d'une bonne sensibilité du modèle. Le graphe de dispersion (Figure 66) met en évidence une distribution bimodale des données prédites. Le modèle ne produit que des vagues en provenance du nord-est et de l'ouest, alors que les valeurs mesurées présentent un étalement beaucoup plus important. Le biais angulaire absolu moyen [11] est élevé (36,76°) et la dispersion plutôt élevée ([12], concentration approximative 2,11) relativement aux autres comparaisons. Le coefficient de corrélation basé sur le sinus des valeurs démontre l'existence d'une relation linéaire entre les valeurs prédites et mesurées ($r = 0,71$).

La suppression des données de glace permet une légère amélioration de la plupart des paramètres lors de la comparaison des données d'EC et de la station AWAC, sans modification fondamentale.

La comparaison des résultats de SWAN forcé par les valeurs pondérées et des données expérimentales AWAC pour la période considérée montre toujours une bonne sensibilité du modèle. La comparaison graphique des deux séries temporelles montre une bonne corrélation entre les deux variables. Le graphe de dispersion (Figure 66c) met en évidence une légère diminution de la dispersion, confirmée par l'augmentation faible de la concentration approximative [12]. Le biais angulaire absolu moyen [11] diminue également légèrement (26,93°).

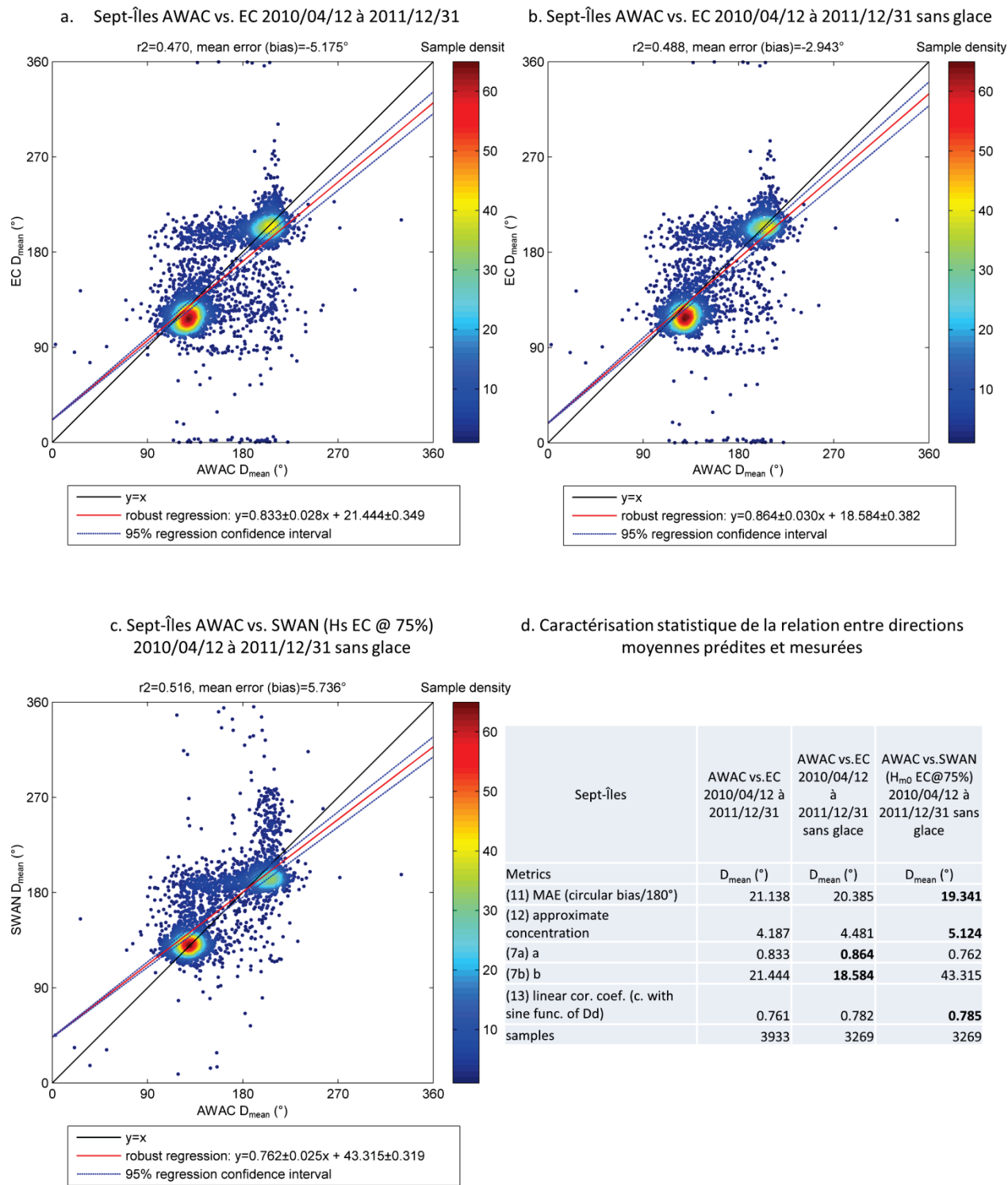


Figure 60. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre directions moyennes prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

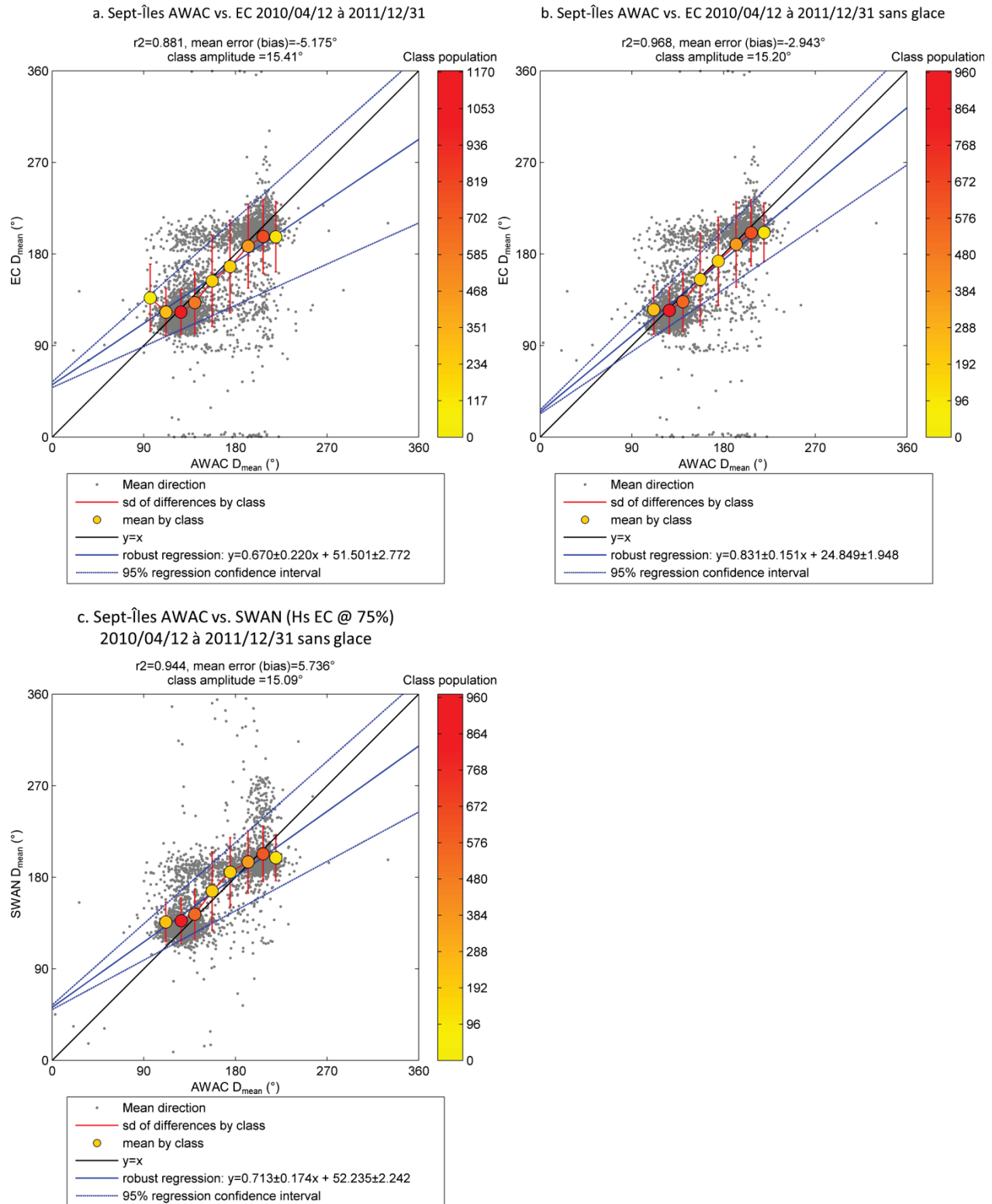


Figure 61. Population et valeur moyenne des classes de D_m prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

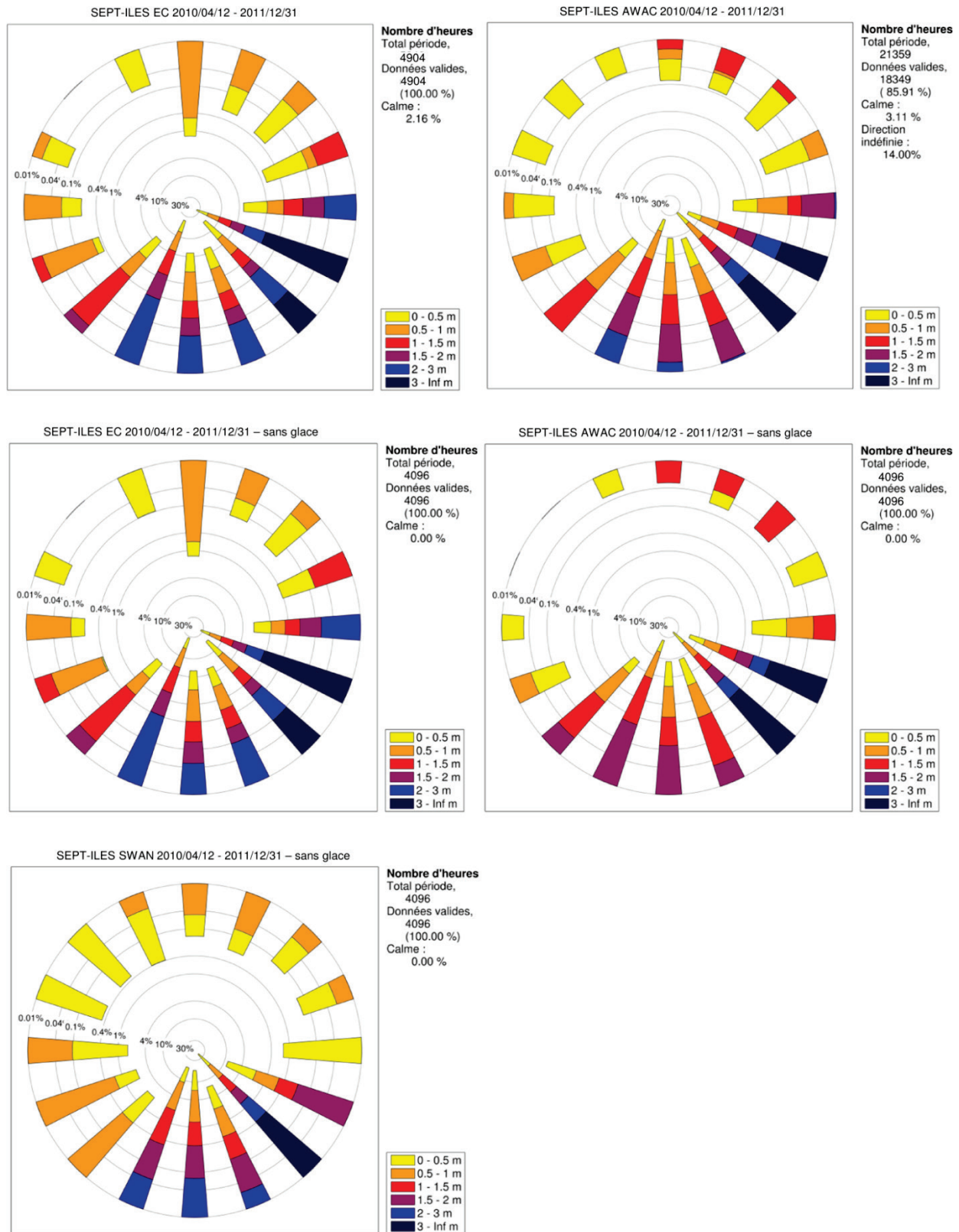


Figure 62. Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Sept-Îles.

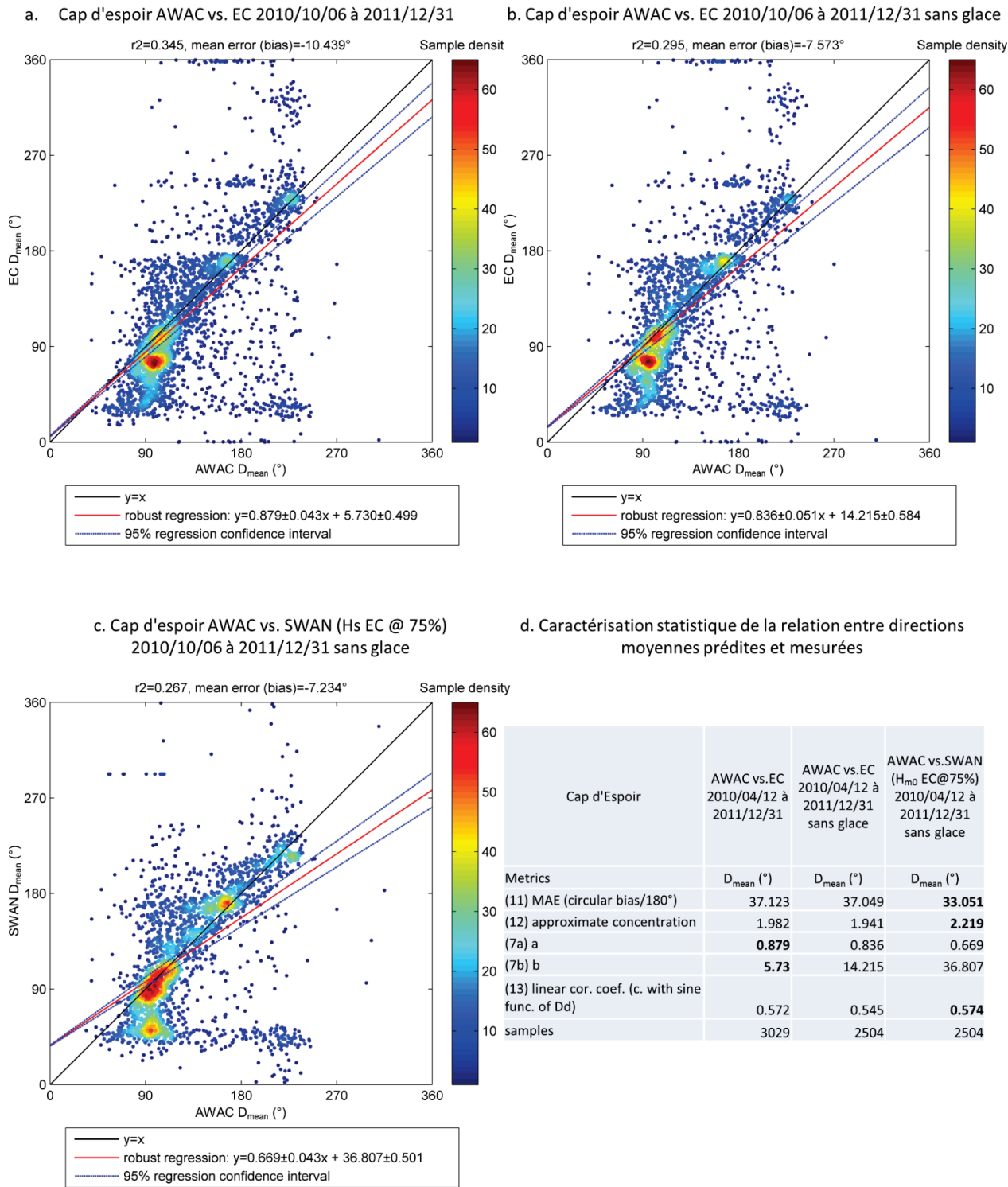


Figure 63. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre directions moyennes prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

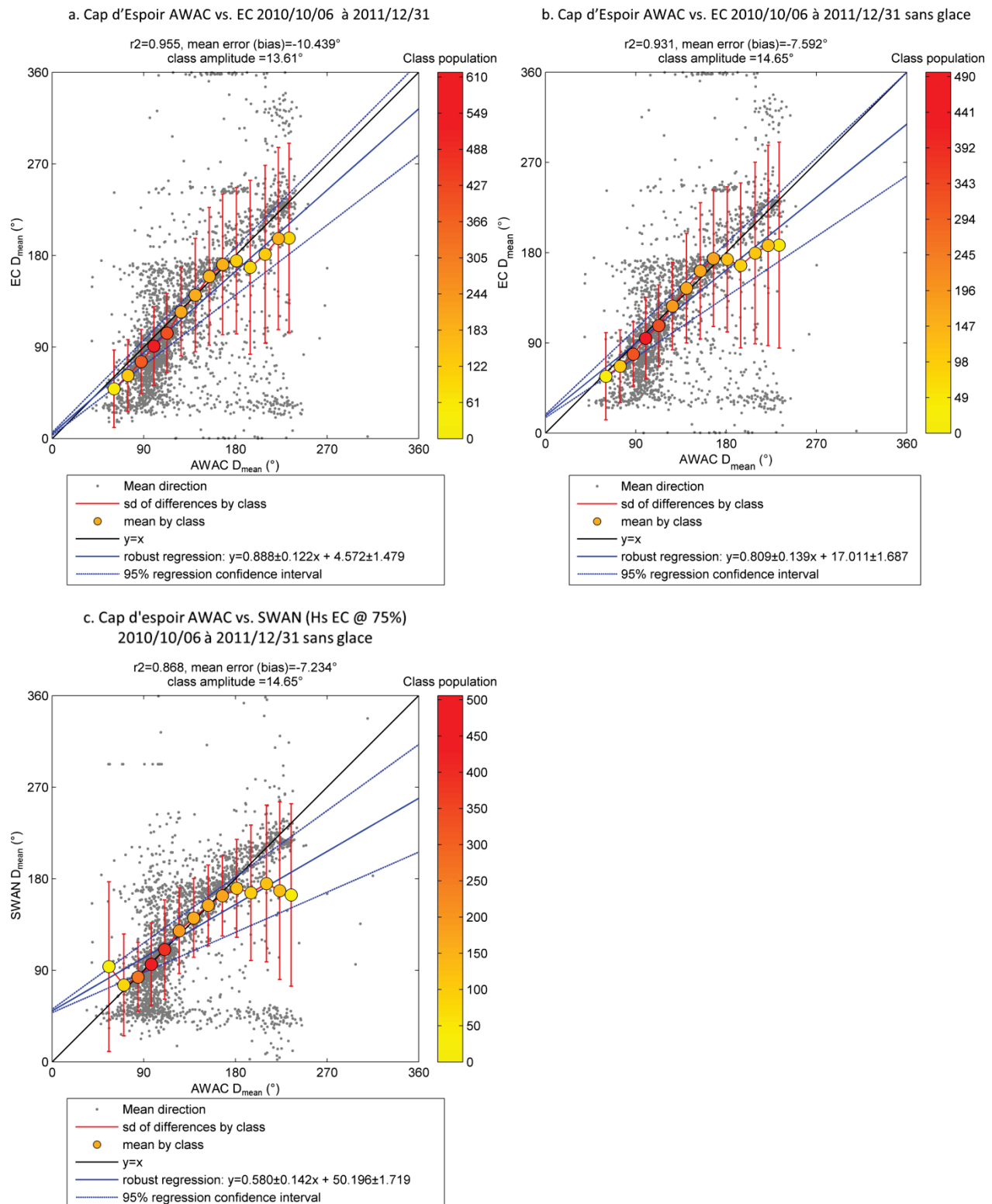


Figure 64. Population et valeur moyenne des classes de D_m prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 06 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

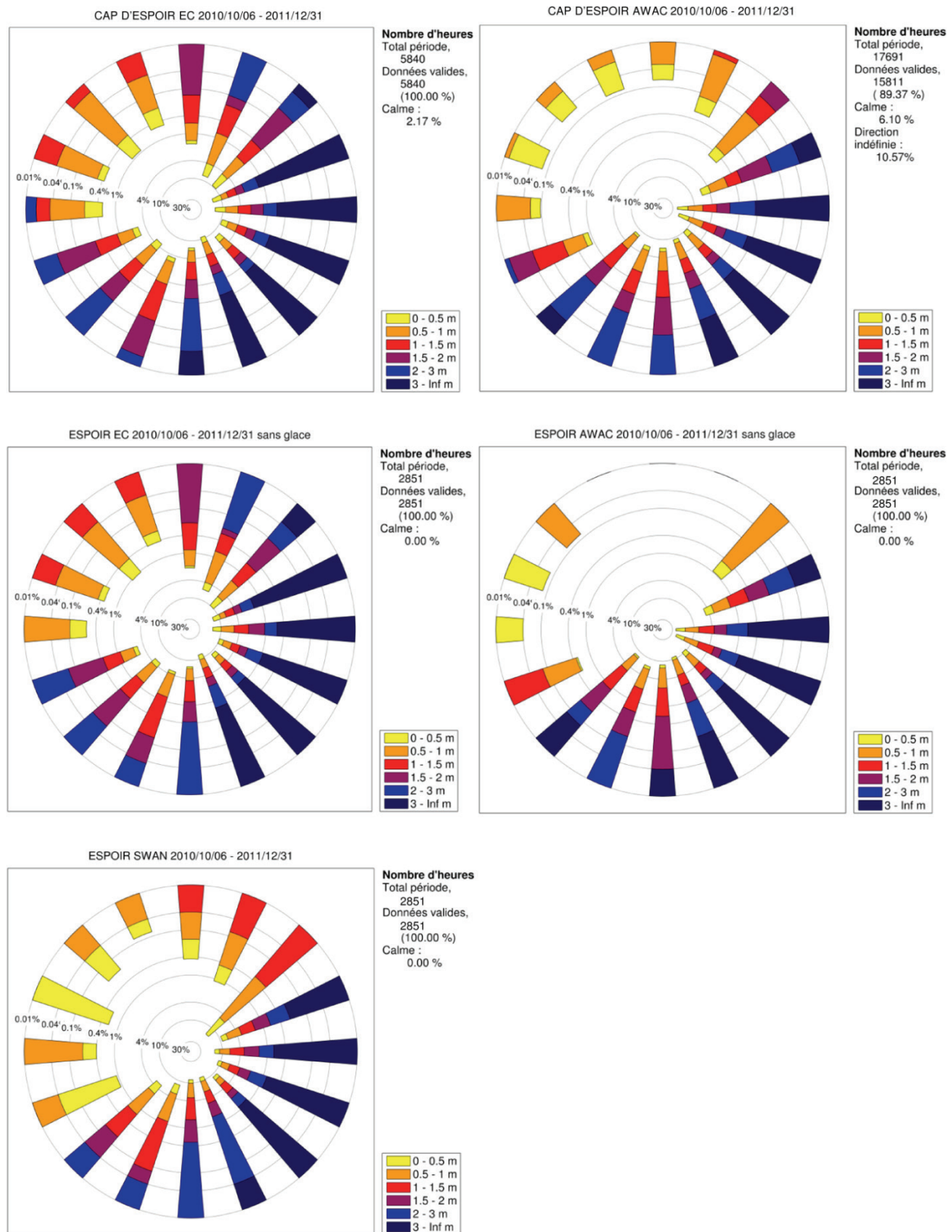


Figure 65. Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Cap d'Espoir.

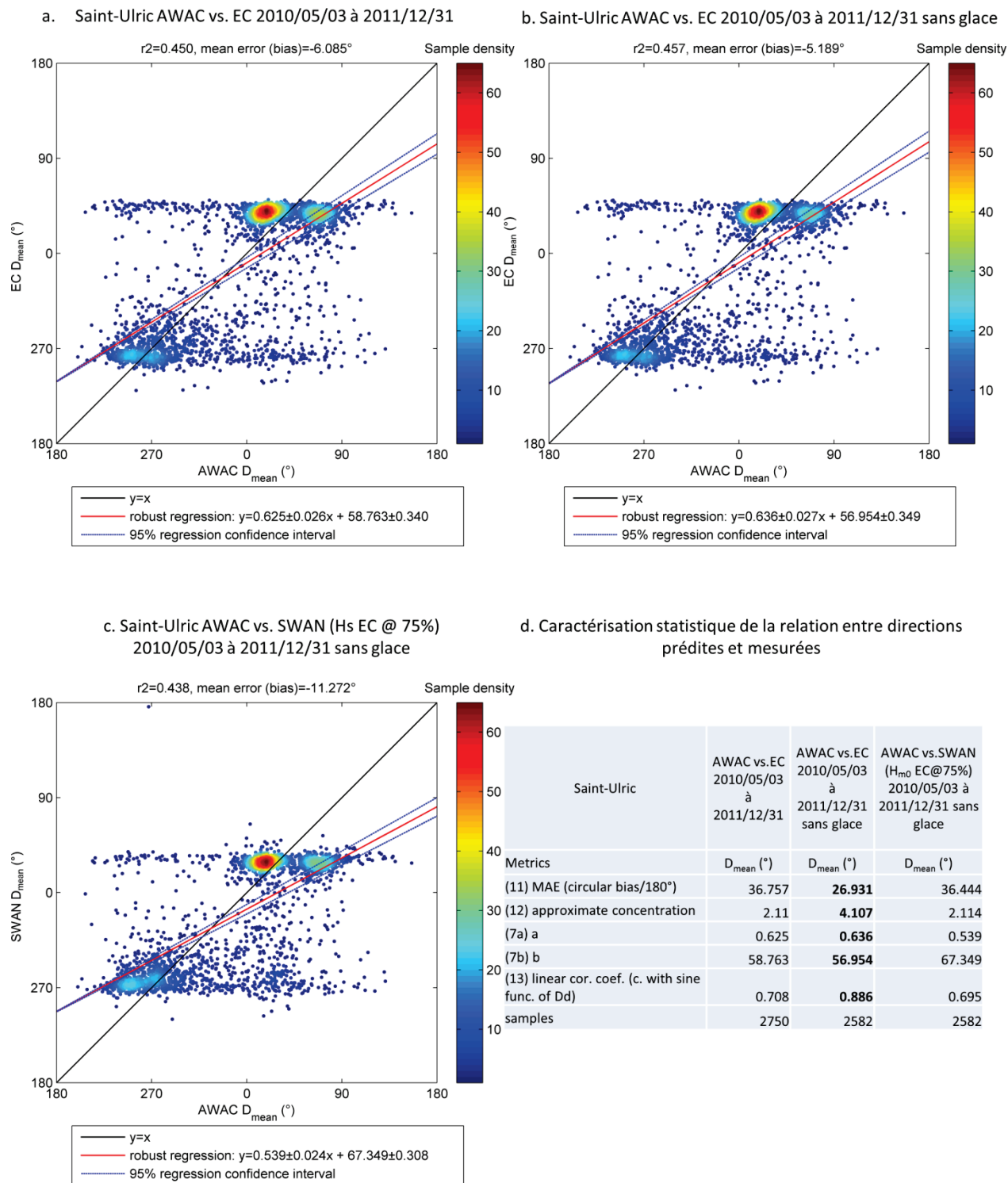


Figure 66. Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre directions moyennes prédites et mesurées à Saint-Ulric du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011.

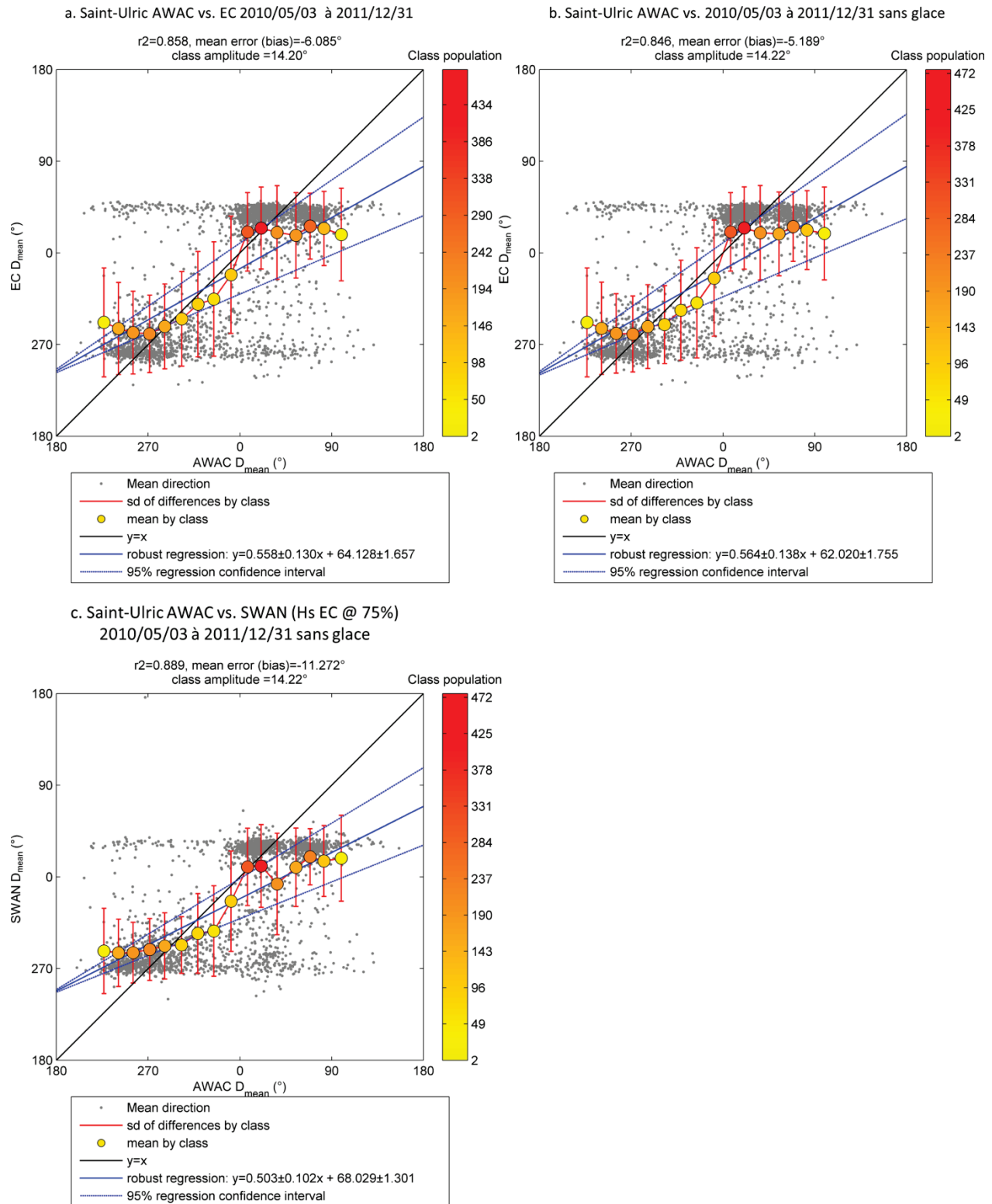


Figure 67. Population et valeur moyenne des classes de D_m prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites.

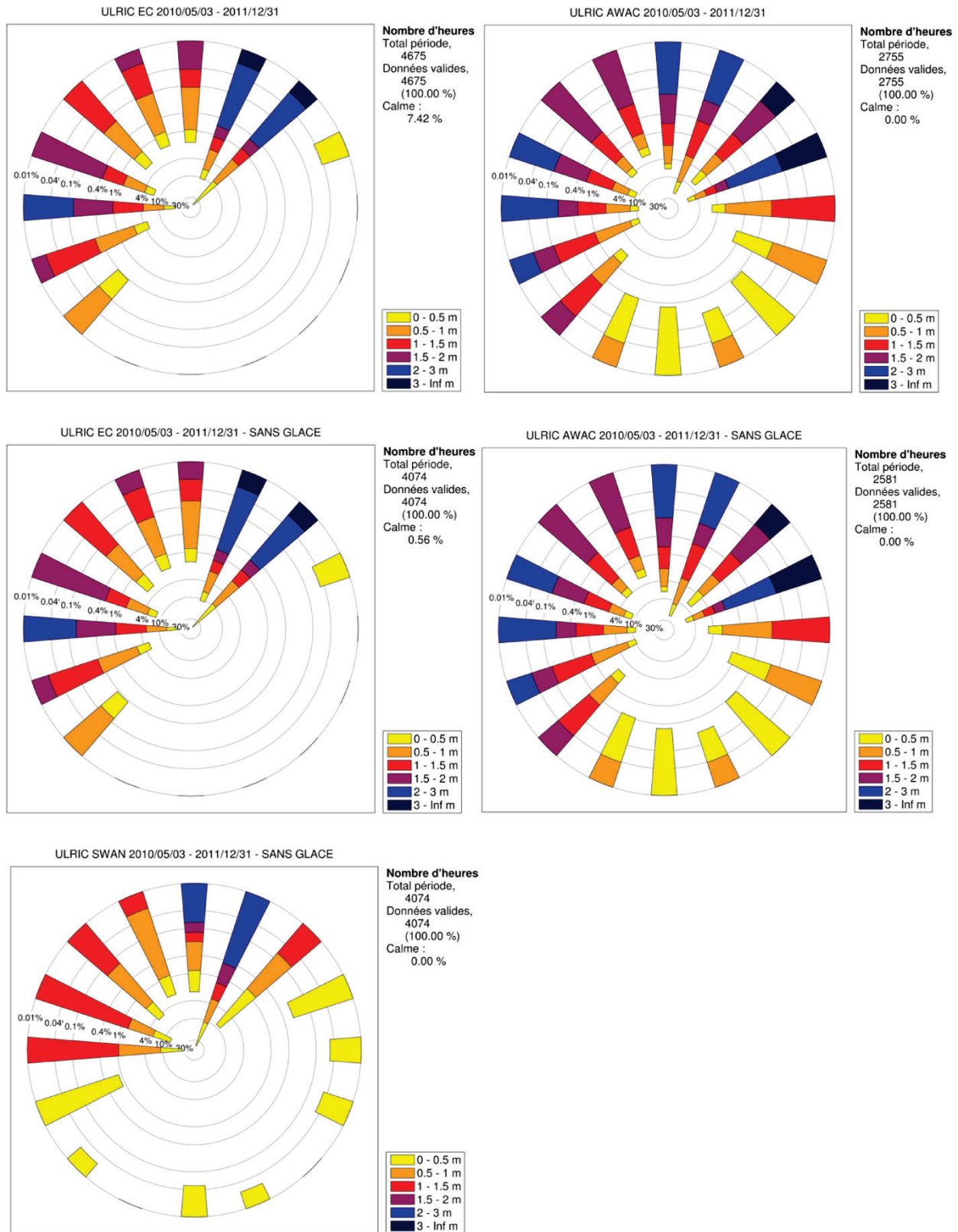


Figure 68. Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Saint-Ulric.

Synthèse des comparaisons de directions

Les résultats sont très contrastés pour les trois sites, il est difficile d'établir une tendance commune.

Le modèle prédit globalement bien les directions pour le site de Sept-Îles, les deux directions dominantes étant bien représentées et la dispersion liée à une imprécision relativement faible (les deux nuages de points présentent une bonne concentration). En dehors de ces nuages de points, des résidus existent qui correspondent à des déphasages positifs ou négatifs lorsque le vent tourne (passage d'une direction à une autre). À Sept-Îles, la fréquence des changements de directions des vagues entre les deux directions dominantes est de 3,5 jours pour la période du 10 mai 2010 au 31 décembre 2011. Ces basculements sont très rapides. L'utilisation de SWAN n'améliore qu'un peu la prédiction des directions. Les directions des vagues les plus hautes sont correctement prédites par le modèle, elles ont une forte concentration correspondant aux deux maximums de densité du graphe de dispersion et sont donc centrées sur la droite 1:1.

En comparaison des données expérimentales, le modèle EC reproduit mal les directions au site de Cap d'Espoir. Les données sont très dispersées. Les deux directions dominantes en fréquence (est et sud-sud-ouest) ne sont pas représentées, et le modèle produit des vagues de secteur nord à nord-est qui n'existent pas dans les données expérimentales. Ce phénomène peut s'expliquer par une difficulté des houlographes à mesurer précisément la direction des vagues de courtes périodes, les vagues de secteur nord à nord-est ne pouvant se développer que sur une distance de fetch comprise entre 10 km et 15 km. L'utilisation de SWAN permet de diminuer les erreurs extrêmes et la concentration, ainsi que les directions de nord à nord-nord-est. La prédiction reste mauvaise en comparaison des valeurs mesurées, excepté pour les directions des vagues les plus hautes qui sont correctement prédites. Ces dernières proviennent essentiellement du quart sud-est (90° - 180°). Elles présentent une bonne concentration le long de la droite 1:1, sans biais. L'utilisation de SWAN permet encore d'améliorer la concentration de ces directions, en particulier pour les vagues venant de l'est.

La prédiction du modèle pour le site côtier de Saint-Ulric n'est également pas satisfaisante : les deux directions dominantes sont mal représentées. Les vagues mesurées des secteurs est-nord-est et est correspondent à des vagues de nord dans le modèle. Le nuage de points de cette direction est globalement bien concentré, quoique décalé de 40° vers l'est et avec présence de valeurs aberrantes correspondant à des changements de direction brutaux. Les vagues du secteur nord-est sont extrêmement dispersées. L'utilisation de SWAN n'apporte pas de gains significatifs. Contrairement aux deux sites du golfe, la prédiction des périodes associées aux vagues les plus hautes ne présente pas de bonification : la concentration reste très faible. Elle est imputable à un manque de précision pour les données des secteurs ouest à nord, alors que la mauvaise prédiction des vagues de secteur nord à est semble due à un manque de résolution (le modèle ne prédit que des vagues du nord-est (40 - 45°) alors que les mesures sont bimodales, avec deux pics distincts pour les vagues du nord (0°) et d'est-nord-est (70 - 90°).

Le modèle EC reproduit mal les directions des vagues au niveau des sites côtiers, à l'exception de Sept-Îles qui présente des valeurs satisfaisantes. Cela s'explique principalement par une imprécision dans la prédiction des vagues fortement réfractées ou des vagues côtières, produites sur des distances de fetch limitées. Cela est confirmé par la

bonne qualité des prédictions des directions des vagues les plus fortes, qui sont très bien prédites pour les sites du golfe, mais pas pour Saint-Ulric.

5.1.5. Relations entre les paramètres de hauteur significative, période moyenne et direction moyenne des vagues prédites par modèle EC

L'analyse des relations entre les paramètres de hauteur significative, période moyenne et direction moyenne des vagues prédites par le modèle EC est basée sur les pas de temps présentant une valeur pour chacun de ces paramètres. Elle exclue les vagues de période inférieure à 3 s, pour lesquelles on ne dispose pas des directions. On présente ci-après les résultats obtenus directement pour le modèle EC, sans tenir compte des améliorations produites par l'emploi de SWAN.

Site de Sept-Îles

Les valeurs chiffrées citées ci-après sont présentées dans le Tableau 6. Dans l'entête de celui-ci, les crochets "[" et "]" indiquent que chaque classe de vagues inclue la limite inférieure, mais exclue la limite supérieure (par exemple, la première classe correspond à $0 \leq H_{m0} < 1.04$ m). Les graphes de dispersion pour Sept-Îles sont présentés dans la Figure 69.

Tableau 6. Caractérisation statistique des relations entre hauteurs significatives, périodes moyennes et directions prédites et mesurées en fonction des classes de hauteur significative mesurées à Sept-Îles du 4 mai 2010 au 31 décembre 2011.

Limite des classes H_{m0} (m)	[0 - 1.04[	[1.04 - 2.08[	[2.08 - 3.12[	[3.12 - 4.16[	[4.16 - 5.2[
Nombre d'échantillons	2847	370	35	14	3
H_{m0} (m)					
Moyenne AWAC	0.45	1.35	2.54	3.56	4.67
Moyenne EC	0.60	1.70	3.65	5.19	5.63
Bias	0.15	0.35	1.11	1.63	0.96
MAE	0.21	0.48	1.33	1.63	0.96
RMSE	0.30	0.64	1.68	1.93	1.09
σ_d	0.26	0.54	1.29	1.08	0.63
T_{02} (s)					
Moyenne AWAC	4.03	4.77	5.48	6.29	7.02
Moyenne EC	4.48	5.92	7.79	9.15	10.20
Bias	0.45	1.15	2.32	2.86	3.18
MAE	0.78	1.21	2.32	2.86	3.18
RMSE	1.05	1.44	2.61	3.03	3.20
σ_d	0.94	0.87	1.23	1.05	0.39
D_{mean} (°)					
Moyenne AWAC	160.01	150.19	127.47	125.09	130.16
Moyenne EC	157.83	142.12	117.64	120.87	121.73
Bias	-2.18	-8.06	-9.83	-4.22	-8.43
MAE	21.63	14.35	11.12	6.20	8.43
RMSE	34.63	19.52	12.12	7.29	8.65
σ_d	34.57	17.80	7.19	6.18	2.38

Vagues de H_{m0} comprise entre 0 et 1,04 m

Les vagues de H_{m0} inférieure à 1,04 m représentent 87% des observations prises en compte (2847 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 0,45 m pour une hauteur modélisée de 0,6 m. Le biais est faible dans cette classe (+0,15 m), mais correspond à une surévaluation d'un facteur 1,33. L'erreur liée aux écarts les plus grands (RMSE, 0,3 m) est deux fois plus élevée que l'erreur moyenne, illustrant le poids des erreurs les plus fortes. Cela est confirmé par la dispersion de cette classe dont l'écart-type de l'erreur ($\sigma_d = 0,26$ m) représente plus de 57% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 1,04 m sont majoritairement comprises entre 3 et 7 s, avec une moyenne de 4,03 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif faible (+0,45 s) correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,11. L'erreur absolue moyenne et l'erreur RMS sont cependant élevées (0,78 s, 1,05 s) illustrant la présence d'écart important entre valeurs prédites et mesurées. Cela est confirmé par la dispersion, également élevée ($\sigma_d = 0,94$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 1,04 m proviennent indifféremment des deux secteurs dominants observés à Sept-Îles (est-sud-est et sud-sud-ouest) avec des valeurs comprises entre 90° et 240°. Le biais moyen est négligeable, illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées, alors que l'erreur absolue moyenne et l'erreur RMS sont élevées (21,63° et 34,63°), confirmant la présence d'erreurs fortes. La dispersion de l'erreur est d'une magnitude équivalente. Le graphe de dispersion met en évidence la difficulté du modèle à discrétiser la direction de certaines vagues du quadrant sud-est dont les valeurs simulées sont distribuées entre 180° et 220°.

Vagues de H_{m0} comprise entre 1,04 et 2,08 m

Les vagues de H_{m0} comprise entre 1,04 m et 2,08 m représentent 11,3% des observations prises en compte (370 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 1,35 m pour une hauteur modélisée de 1,7 m. Le biais est plus élevé dans cette classe (+0,35 m), il représente une surévaluation des H_{m0} mesurées d'un facteur 1,26. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont élevées (0,48 m, 0,64 m), illustrant la présence d'erreurs fortes. La dispersion est élevée ($\sigma_d = 0,54$ m), l'écart-type de l'erreur représentant de 40% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,04 m et 2,08 m sont majoritairement comprises entre 4 et 6,5 s, avec une moyenne de 4,77 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif important (+1,15 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,24. La proximité des valeurs de biais (1,15 s) et de MAE (1,21 s) indique que la majorité des prédictions du modèle sont surévaluées par rapport aux observations. La RMSE est également élevée (1,44 s) mais les erreurs extrêmes sont moins représentées que pour la classe précédente, ce qu'indique également la dispersion ($\sigma_d = 0,87$ s), légèrement plus faible que pour la classe précédente.

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,04 m et 2,08 m proviennent des deux secteurs dominants observés à Sept-Îles (est-sud-est et sud-sud-ouest) avec des valeurs comprises entre 90° et 225° . Le biais moyen est faible ($-8,06^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont plus faibles que pour la classe précédente ($14,35^\circ$ et $19,52^\circ$). Quelques erreurs fortes demeurent mais la dispersion de l'erreur est deux fois plus faible que pour la classe précédente, ce qui est confirmé par le graphe de dispersion. Les prévisions de directions pour les vagues de H_{m0} comprise entre 1,04 m et 2,08 m, faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

Vagues de H_{m0} comprise entre 2,08 et 3,12 m

Les vagues de H_{m0} comprise entre 2,08 m et 3,12 m représentent 1,07% des observations prises en compte (35 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 2,54 m pour une hauteur modélisée de 3,65 m. Le biais est très élevé dans cette classe ($+1,11$ m), il représente une surévaluation d'un facteur 1,44. L'erreur absolue est légèrement supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la surévaluation. L'erreur RMS élevée (1,68 m) illustre la présence d'écarts forts entre mesure et modèle, ce que confirme la dispersion de l'erreur ($\sigma_d = 1,29$ m), qui représente 51% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 2,08 m et 3,12 m sont distribuées entre 5 et 6 s, avec une moyenne de 5,48 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif très important ($+2,32$ s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,42. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. La RMSE est faiblement supérieure à la MAE (2,61 s). La dispersion est plus importante que pour les classes précédentes ($\sigma_d = 1,23$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 2,08 m et 3,12 m proviennent uniquement du secteur est-sud-est avec des valeurs comprises entre 100° et 130° . Le biais moyen est faible ($-9,83^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont plus faibles que pour la classe précédente ($11,12^\circ$ et $12,12^\circ$). Ces valeurs faibles illustrent l'absence d'erreur forte. La faible dispersion de l'erreur est confirmée par la valeur faible de l'écart-type de l'erreur ($7,19^\circ$) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de directions pour les vagues de H_{m0} comprise entre 2,08 m et 3,12 m, très faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

Vagues de H_{m0} supérieure à 3,12 m

En raison du faible nombre d'échantillons compris dans la classe 4,16 à 5,2 m, ces observations sont regroupées avec celles de la classe 3,12 à 4,16 m pour former la classe des vagues de H_{m0} supérieure à 3,12 m.

Ces vagues représentent 0,52% des observations prises en compte (17 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 3,76 m pour une hauteur modélisée de 5,63 m. Le biais est très élevé ($+1,51$ m), il représente une surévaluation de la moyenne des H_{m0} mesurées d'un facteur 1,4. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais.

L'erreur RMS est la plus forte observée toute classe confondues (1,79 m), les écarts les plus importants entre mesures et simulations se trouvant dans cette classe. La dispersion de l'erreur est plus faible que dans la classe précédente ($\sigma_d = 1$ m), les écarts entre mesure et simulations sont légèrement plus homogènes.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 3,12 m sont distribuées entre 5 et 8 s, avec une moyenne de 6,42 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif très important (+2,92 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,45. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. La RMSE (3,06 s) est la plus élevée de toutes les classes confondues. La dispersion est légèrement plus faible que pour les classes précédentes ($\sigma_d = 1$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 3,12 m proviennent uniquement du secteur est-sud-est avec des valeurs comprises entre 100° et 130°. Le biais moyen est très faible (-4,96°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont plus faibles que pour la classe précédente (6,60° et 7,53°), illustrant l'absence d'erreur forte. La faible dispersion est confirmée par la valeur faible de l'écart-type de l'erreur (5,51°) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de directions pour les plus hautes vagues sont très en accord avec les mesures.

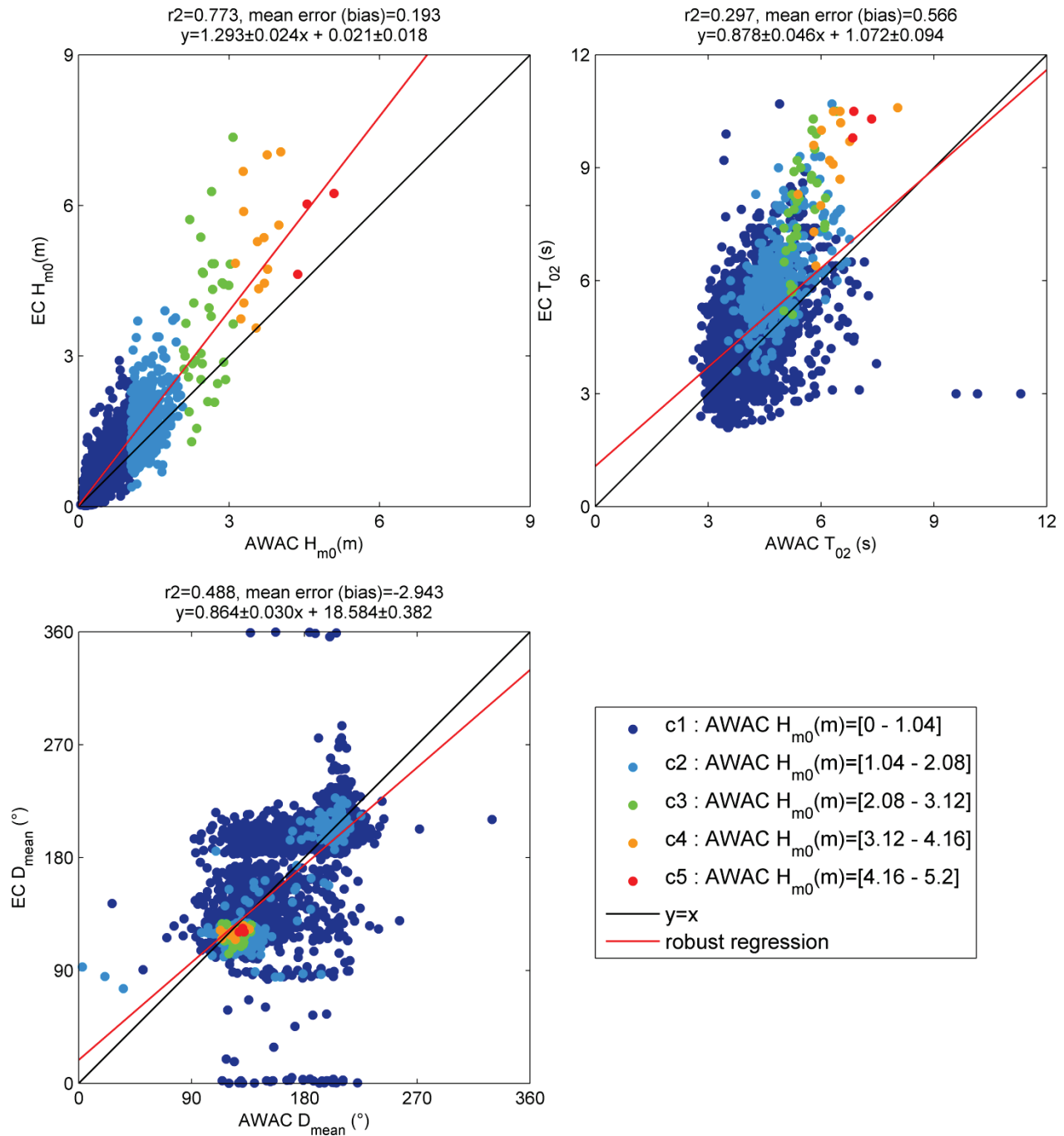


Figure 69. Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions moyennes par classes de hauteurs significatives pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

Site de Cap D'Espoir

Les valeurs chiffrées citées ci-après sont présentées dans le Tableau 7. Les graphes de dispersion pour Cap d'Espoir sont présentés dans la Figure 70.

Vagues de H_{m0} comprise entre 0 et 1,2 m

Les vagues de H_{m0} inférieure à 1,2 m représentent 76% des observations prises en compte (1910 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 0,64 m pour une hauteur modélisée de 0,78 m. Le biais est faible dans cette classe (+0,14 m), il correspond à une surévaluation positive d'un facteur 1,22 de la moyenne des mesures. L'écart entre le biais et la MAE (0,25 m) indique la présence de valeurs sous-évaluées par le modèle, même si la classe est majoritairement surévaluée. La RMSE (0,35 m), qui donne plus de poids aux fortes erreurs, est deux fois supérieure à l'erreur moyenne. Cela est confirmé par la dispersion forte de cette classe ($\sigma_d = 0,32$ m), qui représente 50% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 1,2 m sont majoritairement comprises entre 3 et 5,5 s, avec une moyenne de 4,02 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif faible (+0,59 s) correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,15. L'erreur absolue et

Tableau 7. Caractérisation statistique des relations entre hauteurs significatives, périodes moyennes et directions prédites et mesurées en fonction des classes de hauteur significative mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

Limite des classes H_{m0} (m)	[0 -1.2[	[1.2 - 2.4[	[2.4 -3.6[	[3.6 - 4.8[	[4.8 - 6[
Nombre d'échantillons	1910	483	79	23	8
H_{m0} (m)					
Moyenne AWAC	0.64	1.59	2.92	4.00	5.22
Moyenne EC	0.78	1.91	4.10	6.03	7.71
Bias	0.14	0.32	1.18	2.02	2.49
MAE	0.25	0.48	1.26	2.02	2.49
RMSE	0.35	0.65	1.46	2.11	2.59
σ_d	0.32	0.57	0.86	0.62	0.76
T_{02} (s)					
Moyenne AWAC	4.02	4.98	6.07	6.63	7.20
Moyenne EC	4.61	6.09	8.17	9.57	10.16
Bias	0.59	1.12	2.10	2.94	2.96
MAE	0.79	1.17	2.10	2.94	2.96
RMSE	1.03	1.44	2.33	3.02	3.01
σ_d	0.84	0.91	1.01	0.71	0.56
D_{mean} (°)					
Moyenne AWAC	132.50	136.56	123.31	116.72	129.07
Moyenne EC	123.35	135.39	116.20	103.46	115.56
Bias	-9.14	-1.17	-7.11	-13.27	-13.51
MAE	44.52	19.82	12.85	13.77	13.51
RMSE	66.06	36.92	16.40	15.27	13.62
σ_d	65.44	36.94	14.87	7.73	1.81

l'erreur RMS sont cependant élevées (0,79 s, 1,03 s) illustrant la présence d'écart important entre valeurs prédites et mesurées. Cela est confirmé par la dispersion, également élevée ($\sigma_d = 0,84$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 1,2 m proviennent des secteurs nord-est à ouest-sud-ouest (45° à 250°). Le biais moyen est très faible ($-9,14^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées, alors que les erreurs absolue et RMS sont très élevées ($44,5^\circ$ et $66,1^\circ$), illustrant la présence d'erreurs très fortes, confirmée par la dispersion de l'erreur également très élevée ($65,4^\circ$). Le graphe de dispersion met en évidence la difficulté du modèle à reproduire la direction de certaines vagues du sud-sud-ouest (180 à 225°) dont les valeurs simulées, extrêmement dispersées, sont distribuées entre 270° et 340° , et entre 20° et 45° . Le modèle peine également à reproduire les directions de certaines vagues du secteur est dont les valeurs simulées sont comprises entre 140° et 180° .

Vagues de H_{m0} comprise entre 1,2 et 2,4 m

Les vagues de H_{m0} comprise entre 1,2 m et 2,4 m représentent 19,2% des observations prises en compte (483 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 1,59 m pour une hauteur modélisée de 1,91 m. Le biais est plus élevé dans cette classe (+0,32 m), il représente une surévaluation des H_{m0} mesurées d'un facteur 1,2. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont élevées (0,48 m, 0,65 m), illustrant la présence d'erreurs fortes. La dispersion est moyenne ($\sigma_d = 0,57$ m), l'écart-type de l'erreur représentant 36% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,2 m et 2,4 m sont majoritairement comprises entre 4 et 6 s, avec une moyenne de 4,98 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif important (+1,12 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,22. La proximité des valeurs de biais (1,12 s) et de MAE (1,17s) indique que la majorité des prédictions sont surévaluées par le modèle. La RMSE est également élevée (1,44 s), indiquant la présence de surévaluations massives (plus de 4 s), ce qui est confirmé par la dispersion ($\sigma_d = 0,91$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,2 m et 2,4 m proviennent des secteurs nord-est à ouest-sud-ouest (45° à 250°). Le biais moyen est négligeable ($-1,2^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue et l'erreur RMS diminuent de moitié en comparaison de la classe précédente ($19,8^\circ$ et $36,9^\circ$), ce qui illustre la diminution des écarts extrêmes entre mesures et modèles. La plupart des erreurs sont ainsi inférieures à 60° et l'écart-type de l'erreur diminue également de moitié ($36,9^\circ$), confirmant une meilleure concentration des valeurs d'erreurs autour de leur moyenne.

Vagues de H_{m0} comprise entre 2,4 et 3,6 m

Les vagues de H_{m0} comprise entre 2,4 m et 3,6 m représentent 3,2% des observations prises en compte (79 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 2,92 m pour une hauteur modélisée de 4,1 m. Le biais est très élevé dans cette classe (+1,18 m), il représente une surévaluation d'un facteur 1,4. L'erreur absolue (1,26 m) est légèrement supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la surévaluation. L'erreur RMS est élevée (1,46 m). La

dispersion augmente par rapport aux valeurs précédentes (0,86 m). Elle représente 29,4% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 2,4 m et 3,6 m sont distribuées entre 5 et 7,5 s, avec une moyenne de 6,07 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif très important (+2,1 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,35. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. La RMSE est faiblement supérieure à la MAE (2,33 s). La dispersion est faiblement supérieure aux classes précédentes ($\sigma_d = 1,01$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 2,4 m et 3,6 m proviennent principalement du quadrant sud-est (90° à 180°). Le biais moyen est faible ($-7,11^\circ$). L'erreur absolue et l'erreur RMS sont deux fois plus faibles que pour la classe précédente ($12,85^\circ$ et $16,40^\circ$). Ces valeurs illustrent l'absence d'erreur forte. La faible dispersion de l'erreur est confirmée par la valeur faible de l'écart-type de l'erreur ($14,87^\circ$) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de directions pour les vagues de H_{m0} comprise entre 2,4 m et 3,6 m, très faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

Vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m

En raison du faible nombre d'échantillons compris dans la classe 4,8 à 6 m, ces observations sont regroupées avec celles de la classe 3,6 à 4,8 m pour former la classe des vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m.

Ces vagues représentent 1,2% des observations prises en compte (31 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 4,32 m pour une hauteur modélisée de 6,46 m. Le biais est très élevé (+2,14 m), il représente une surévaluation d'un facteur 1,5. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. L'erreur RMS est la plus forte observée toutes classes confondues (2,24 m), les écarts les plus importants entre mesures et simulations se trouvant dans cette classe. La dispersion de l'erreur est plus faible que dans la classe précédente ($\sigma_d = 0,65$ m), les écarts entre mesure et simulations sont légèrement plus homogènes.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m sont distribuées entre 6 et 9 s, avec une moyenne de 6,78 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif très important (+2,95 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,43. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. La RMSE (3,02 s) est la plus élevée de toutes les classes confondues. La dispersion est plus faible que pour les classes précédentes ($\sigma_d = 0,67$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m proviennent principalement du quadrant sud-est (90° à 160°). Le biais moyen est faiblement négatif ($-13,33^\circ$) et proche de l'erreur absolue ($13,7^\circ$), ce qui indique une légère sous-évaluation des directions que l'on retrouve sur le graphe de dispersion (Figure 70). L'erreur RMS est équivalente à celle de la classe précédente ($14,8^\circ$). Ces valeurs illustrent l'absence d'erreur forte. La faible dispersion de l'erreur est confirmée par la valeur très faible de l'écart-type de l'erreur ($6,2^\circ$) illustrée par le

graphe de dispersion. Les prévisions de directions pour les vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m, très faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

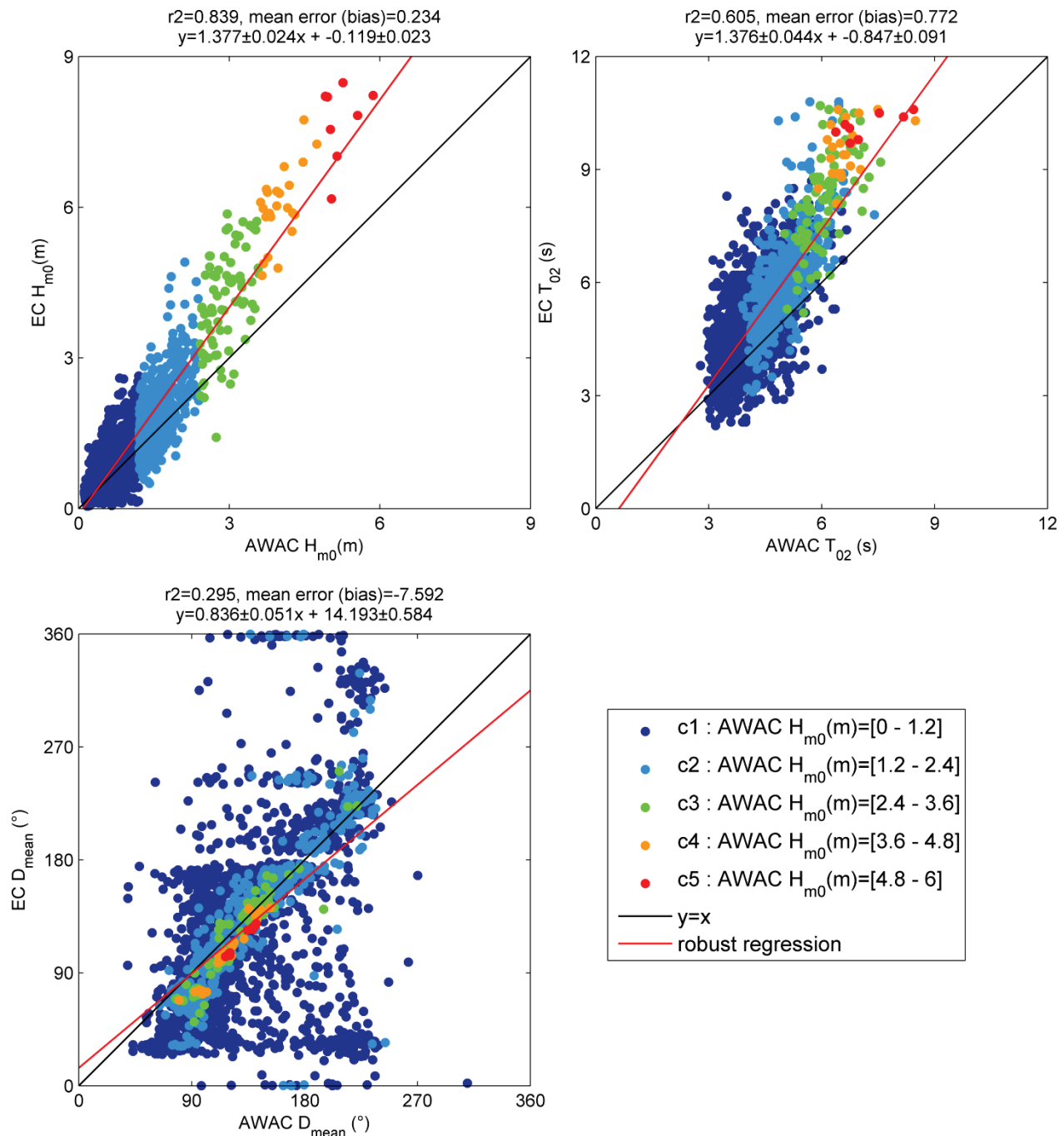


Figure 70. Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions moyennes par classes de hauteurs significatives pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

Site de Saint-Ulric

Les valeurs chiffrées citées ci-après sont présentées dans le Tableau 8. Les graphes de dispersion pour Saint-Ulric sont présentés dans la Figure 71.

Vagues de H_{m0} comprise entre 0 et 0,76 m

Les vagues de H_{m0} inférieure à 0,76 m représentent 64% des observations prises en compte (1655 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 0,41 m pour une hauteur modélisée de 0,44 m. Le biais est négligeable (+0,03 m), indiquant une absence de tendance des données simulées. L'erreur absolue (0,19 m) est élevée en proportion de la moyenne mesurée, elle indique l'amplitude moyenne des erreurs négatives et positives qui sont distribuées également de part et d'autre de la moyenne. L'erreur liée aux erreurs les plus fortes (RMSE, 0,25 m) est plus élevée que l'erreur absolue. Cela est confirmé par la dispersion forte de cette classe ($\sigma_d = 0,25$ m), qui représente 62,5% de la valeur moyenne mesurée.

Tableau 8. Caractérisation statistique des relations entre hauteurs significatives, périodes moyennes et directions prédites et mesurées en fonction des classes de hauteur significative mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.

H_{m0} class boundaries	[0 - 0.76[	[0.76 - 1.52[	[1.52 - 2.28[	[2.28 - 3.04[	[3.04 - 3.8[
Nombre d'échantillons	1655	769	125	29	4
H_{m0}					
Moyenne AWAC	0.41	1.03	1.82	2.59	3.27
Moyenne EC	0.44	0.88	1.50	2.45	2.31
Bias	0.03	-0.15	-0.32	-0.14	-0.96
MAE	0.19	0.29	0.45	0.36	0.96
RMSE	0.25	0.36	0.60	0.44	1.02
σ_d	0.25	0.33	0.51	0.42	0.42
T_{02}					
Moyenne AWAC	3.64	4.16	5.14	5.78	6.89
Moyenne EC	3.85	4.42	5.57	6.72	8.60
Bias	0.21	0.26	0.43	0.95	1.71
MAE	0.56	0.56	0.86	1.02	1.71
RMSE	0.74	0.81	1.07	1.14	1.77
σ_d	0.72	0.77	0.98	0.65	0.52
D_{mean}					
Moyenne AWAC	170.33	164.88	190.84	234.29	242.47
Moyenne EC	164.91	162.15	179.92	205.62	209.83
Bias	-5.42	-2.73	-10.92	-28.67	-32.65
MAE	41.23	27.66	23.98	32.74	32.65
RMSE	59.12	34.95	27.08	33.87	32.90
σ_d	58.88	34.87	24.88	18.35	4.66

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 0,76 m sont majoritairement comprises entre 3 et 5,5 s, avec une moyenne de 3,64 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif faible (+0,21 s) correspondant à une faible surévaluation d'un facteur 1,06. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont cependant élevées (0,56 s, 0,74 s) illustrant la présence d'écarts importants entre valeurs prédites et mesurées. Cela est confirmé par la dispersion, également élevée ($\sigma_d = 0,72$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 0,76 m proviennent principalement des secteurs sud-ouest à est (225° à 90°). Le biais moyen est très faible ($-5,14^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. Toutefois, l'erreur absolue et l'erreur RMS sont très élevées ($41,23^\circ$ et $59,12^\circ$), confirmant la présence d'erreurs très fortes. Cela est également illustré par la dispersion de l'erreur très élevée ($58,8^\circ$). Le graphe de dispersion met en évidence la difficulté du modèle à discrétiser la direction de certaines vagues provenant des deux secteurs dominants.

Vagues de H_{m0} comprise entre 0,76 et 1,52 m

Les vagues de H_{m0} comprise entre 0,76 m et 1,52 m représentent 29,7% des observations prises en compte (769 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 1,03 m pour une hauteur modélisée de 0,88 m. Le biais est négatif (-0,15 m), il représente une sous-évaluation des H_{m0} mesurées, soit un facteur de 0,85 entre modèle et observations. L'erreur absolue et l'erreur RMS sont faibles (0,29 m, 0,36 m), il y a peu d'erreurs fortes. La dispersion est moyenne ($\sigma_d = 0,33$ m), l'écart-type de l'erreur représentant 32% de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 0,76 m et 1,52 m sont majoritairement comprises entre 3,3 et 6 s, avec une moyenne de 4,16 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif faible (+0,26 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,06. L'erreur moyenne absolue est faible (0,56 s), ainsi que l'erreur RMS (0,81 s). La dispersion est faible (0,77 s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 0,76 et 1,52 m proviennent principalement des secteurs sud-ouest à est (225° à 90°). Le biais moyen est très faible ($-2,7^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue et l'erreur RMS diminuent relativement à la classe précédente, avec des valeurs moyennes à faible ($27,7^\circ$ et $35,0^\circ$). La dispersion diminue également ($34,9^\circ$), qui s'explique par la diminution des erreurs extrêmes. Une forte dispersion demeure cependant dans les prédictions des directions autour des deux secteurs dominants.

Vagues de H_{m0} comprise entre 1,52 et 2,28 m

Les vagues de H_{m0} comprise entre 1,52 m et 2,28 m représentent 4,8% des observations prises en compte (125 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 1,82 m pour une hauteur modélisée de 1,5 m. Le biais négatif augmente dans cette classe (-0,32 m), soit un facteur de 0,82 entre prédictions et observations. L'erreur absolue (0,45 m) est supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la sous-évaluation. L'erreur RMS est faible (0,6 m) indiquant

peu d'erreurs extrêmes. La dispersion augmente par rapport aux valeurs précédentes (0,51 m), elle représente toujours une faible proportion (28%) de la valeur moyenne mesurée, indiquant une dispersion moyenne.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,52 m et 2,28 m sont distribuées entre 4 et 6,5 s, avec une moyenne de 5,14 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif faible (+0,43 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,08. L'erreur absolue et l'erreur RMS augmentent (MAE = 0,86 s; RMSE = 1,07 s) mais restent faible relativement à la moyenne des mesures. La dispersion est néanmoins moyenne (0,98 s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,52 m et 2,28 m proviennent principalement des secteurs ouest et nord-est (250° à 280°, 350° à 80°). Le biais moyen est faiblement négatif (-10,9°), l'erreur absolue et l'erreur RMS diminuent relativement à la classe précédente avec des valeurs moyennes à faible (24,0° et 27,1°). La dispersion diminue également (24,9°), qui s'explique par l'absence d'erreurs extrêmes et le resserrement des valeurs prédites vers la droite 1/1.

Vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m

En raison du faible nombre d'échantillons compris dans la classe 3,04 à 3,8 m, ces observations sont regroupées avec celles de la classe 2,28 à 3,04 m pour former la classe des vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m.

Ces vagues représentent 1,2% des observations prises en compte (33 échantillons), avec une hauteur moyenne observée de 2,68 m pour une hauteur modélisée de 2,43 m. Le biais est faible avec une sous-évaluation (-0,24 m), soit un facteur de 0,9 entre prédictions et observations. L'erreur absolue (0,44 m) est supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la sous-évaluation. L'erreur RMS est faible (0,51 m) indiquant peu d'erreurs extrêmes. La dispersion diminue par rapport aux valeurs précédentes (0,42 m) et représente toujours une faible proportion (15,6%) de la valeur moyenne mesurée, indiquant une dispersion faible et une bonne précision du modèle.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m sont distribuées entre 5 et 7,5 s, avec une moyenne de 5,91 s. Les valeurs simulées présentent un biais positif (+1,04 s), correspondant à une surévaluation d'un facteur 1,18. La majorité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE proche du biais. La RMSE (1,10 s) est la plus élevée, toutes classes confondues. La dispersion est plus faible que pour les classes précédentes ($\sigma_d = 0,63$ s).

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m proviennent principalement du secteur est nord-est (70°). Le biais moyen est plus élevé que pour les classes précédentes (-29,2°), l'erreur absolue et l'erreur RMS conservant des valeurs comparables (32,7° et 33,8°). La dispersion atteint sa valeur la plus faible (16,7°) : les prévisions de directions pour les vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m, très faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

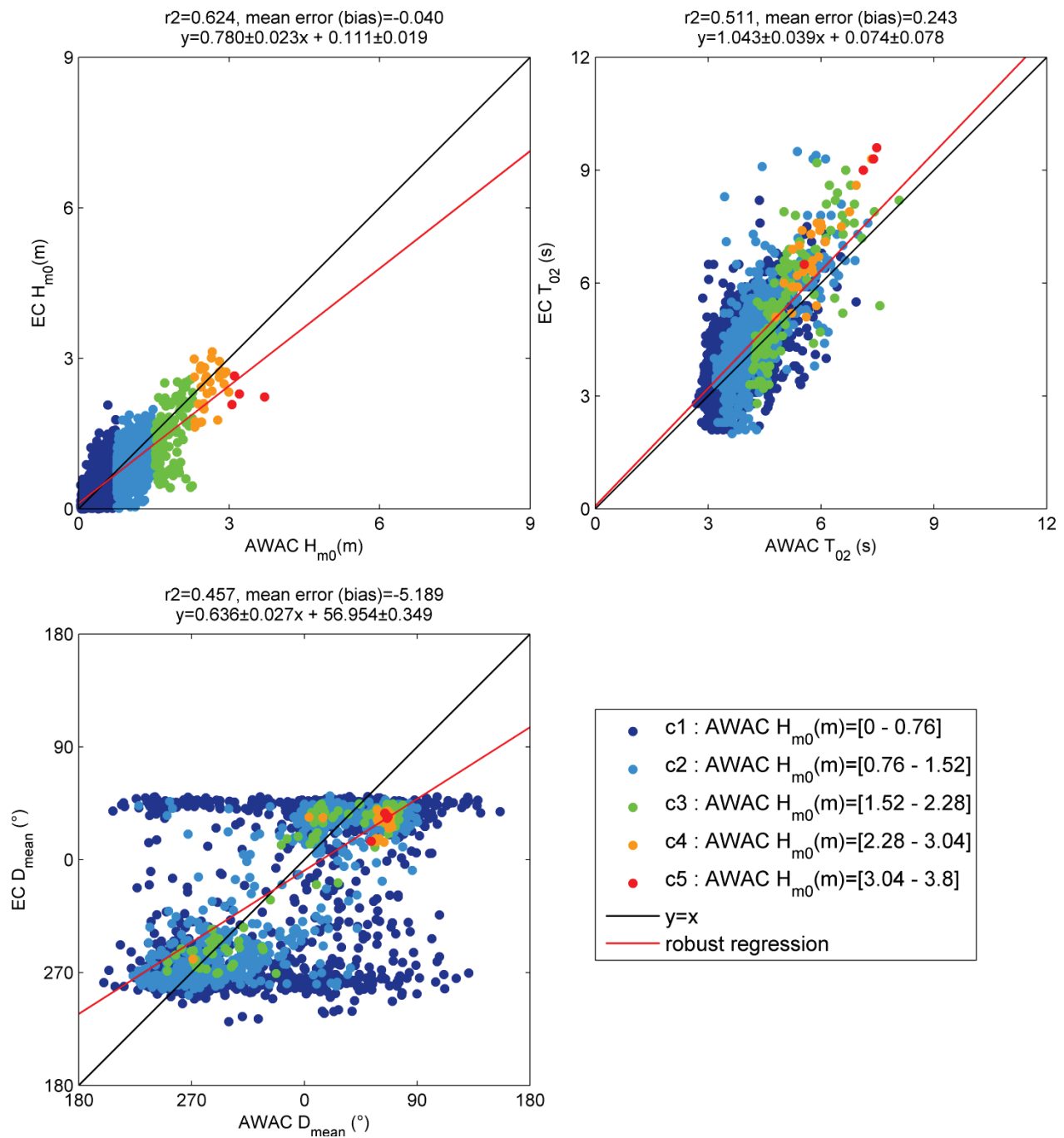


Figure 71. Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions moyennes par classes de hauteurs significatives pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.

5.1.6. Conclusions sur les performances du modèle EC

- *Hauteurs significatives à la position des instruments* : le modèle EC reproduit avec précision la variabilité temporelle pour les trois sites. Néanmoins, le modèle surestime la hauteur des vagues dans le golfe, d'un facteur compris entre 1,4 (Sept-Îles) et 1,5 (Cap d'Espoir). Dans l'estuaire, il sous-estime légèrement la hauteur des vagues faibles à intermédiaire (< 2 m) d'un facteur 0,9, les plus fortes vagues étant correctement simulées.
- *Périodes moyennes à la position des instruments* : pour les trois sites, les prévisions du modèle EC sont imprécises mais sans tendance pour les vagues de courte période (inférieure à 4,5 s). À Cap d'Espoir, les plus longues périodes ($> 4,5$ s) correspondent aux vagues les plus hautes et sont surestimées d'un facteur $1,45 \pm 0,44$. À Sept-Îles, les plus longues périodes correspondent à la fois aux plus hautes vagues, mais aussi à des vagues de hauteurs plus faibles qui sont mal prédites par le modèle, aboutissant à une dispersion élevée. Les périodes associées aux vagues les plus hautes sont surestimées d'un facteur de $1,4 \pm 0,38$. Certaines périodes demeurent fortement surévaluées par le modèle (facteur 1,5). Pour Saint-Ulric, le modèle EC prédit correctement les périodes longues mais surévalue les valeurs d'un facteur de $1,15 \pm 0,23$. Les plus longues périodes ($> 4,5$ s) correspondent à la fois aux vagues les plus hautes et à des vagues de hauteur plus petite. Les périodes associées aux vagues les plus hautes sont surévaluées d'un facteur $1,31 \pm 0,28$.
- *Directions moyennes à la position des instruments* : les résultats sont contrastés entre les trois sites, sans tendance commune. Le modèle prédit globalement bien les directions pour le site de Sept-Îles, avec des erreurs importantes lors des changements de directions brutaux. À Cap d'Espoir et Saint-Ulric, les erreurs sont plus importantes et il n'y a pas de tendance dans l'erreur.
- *Relation entre période et directions en fonction de la hauteur* : pour les vagues inférieures à 2 m, le modèle prédit les paramètres de période et de direction avec une dispersion importante de l'erreur aux trois sites. Cette dispersion importante peut être liée aux données de vents utilisées, dont la résolution spatiale et temporelle ne permet pas de représenter les vents locaux, à l'origine des vagues courtes, de faible hauteur. Au-delà d'une H_{m0} de 2 m, la qualité des prédictions de hauteurs et de directions s'améliore, la dispersion et les erreurs extrêmes diminuant avec l'augmentation de la hauteur des vagues. Les directions sont dès lors en accord avec les mesures, les périodes et les hauteurs restant cependant nettement surévaluées pour les sites du Golfe.

Il existe donc une dichotomie dans les prédictions réalisées pour les sites du golfe et celui de l'estuaire. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette différence.

1) Les formulations physiques des modèles spectraux.

- Les formulations physiques des modèles vent-vagues spectraux sont calibrées pour une utilisation des vents mesurés à 10 m au-dessus de la surface. Le modèle EC a été calibré avec les données mesurées à la station de Mont-Louis et les résultats de la calibration ont

contraint Environnement Canada à employer les vents à 40 m plutôt que 10 m car les vagues simulées étaient trop faibles.

- Dans le golfe, les fetchs sont plus longs et l'âge des vagues atteignant Cap d'Espoir et Sept-îles est plus important que celui des vagues affectant Saint-Ulric, formées dans le champ de vent local. Il est donc normal que les vagues mesurées sur les sites du golfe soient plus longues et plus hautes.
- Or, dans les modèles vent-vagues spectraux la croissance des vagues, (i.e. le transfert d'énergie du vent vers les vagues) est une fonction exponentielle de la hauteur des vagues : le taux de croissance des hautes vagues est donc plus élevé que celui des petites vagues. La relation entre distance de fetch et hauteur des vagues n'est donc pas linéaire. Conjugué avec l'emploi de vents trop forts, cela peut expliquer la surévaluation systématique des hauteurs et périodes des vagues les plus hautes dans le golfe, alors que celles prédites pour Saint-Ulric restent comparables aux données expérimentales.
- Dans un modèle spectral, l'énergie se propage dans l'espace en fonction de sa fréquence et de sa direction. Dans le modèle EC, lorsque l'énergie d'une cellule (bin) de fréquence/direction se propage, si sa variation de direction entre deux points de grille consécutifs est inférieure à $12,5^\circ$, la composante conserve sa direction initiale. Il est possible que la réfraction des composantes basses fréquences (les plus stables) des spectres se propageant vers le nord-ouest dans le détroit d'Honguedo et tournant lentement vers l'ouest autour de la péninsule gaspésienne ne soit pas bien représentée et ne contribue pas à l'énergie des spectres prédits à Saint-Ulric. Or, le modèle EC a été calibré et validé à la station de Mont-Louis.

2) Les données de vent utilisées en entrée

- En raison de la résolution spatiale (24 km) et temporelle (3 h) de la grille de vent utilisée en entrée du modèle EC, les champs de vents locaux (régime des vents thermiques), fortement variables temporellement et spatialement, sont sans doute moins bien représentés que les vents forts issus de grands systèmes météorologiques. Or, ce sont les vents faibles qui sont à l'origine des petites vagues, ce qui peut expliquer la qualité plus faible des prédictions pour les petites vagues, qui représentent la majeure partie des observations à Saint-Ulric.
- Les composantes du vent utilisées dans le modèle EC correspondent au niveau 40 m, sensément plus fort que le vent à 10 m en raison d'une plus faible influence de la rugosité de surface. Les directions des vents à 10 m et à 40 m sont différentes à cause de la spirale d'Ekman, mais avec 30 m d'intervalle cette différence est très faible. Ne disposant pas des champs à 40 m, nous n'avons pu les comparer.
- La résolution des champs de vent (GEM 15 km dégradé à 24 km en entrée du modèle EC) et l'influence des vents de terre lors de l'interpolation à 5km peuvent être à l'origine d'un biais spatial entre les vents de l'estuaire et ceux du golfe, comme celui observé pour les vents issus de NARR et MERRA, conduisant à une surévaluation dans le golfe.

5.2. Validation de GENER

Pour la validation, les hauteurs significatives (H_s) mesurées sont comparées aux H_s calculées par GENER utilisant les formules SPM77, SPM84, JON73, CEM03 et WIL65 (Tableau 3) et les vents corrigés de MERRA_{corr}. La comparaison est effectuée avec le biais (moyenne des différences), la RMSE (racine des moyennes des carrés des différences), le χ^2 (comparaison des distributions, Balakrishnan et al., 2013) et les diagrammes quantile-quantile (Q-Q plot, comparaison visuelle des distributions). La formule DON80 n'est pas illustrée ici, car la méthode complète de Donelan (1980) fait aussi des ajustements en fonction des directions, ce qui n'est pas implémenté dans GENER. Toutefois les premiers tests montrent que la correspondance avec DON80 est similaire avec celles de SPM77, JON73 ou WIL65.

Le Tableau 9 présente le biais, la RMSE et le χ^2 de H_s pour les cinq formules et les quatre sites. Pour chaque site, SPM84 surévalue le plus les vagues (biais positif), produit la dispersion d'erreur la plus grande (grande RMSE) et la correspondance la plus mauvaise des distributions (grand χ^2). La tendance à la surévaluation de SPM84 est aussi bien visible sur les Q-Q plots (Figure 73). La surestimation de SPM84 est sans doute liée à l'utilisation de la vitesse ajustée U_A . La formule JON73, qui utilise les mêmes équations avec U_{10} (cf. sections 3.3.2 et 3.3.3), produit des meilleurs résultats. La performance générale des quatre formules – SPM77, JON73, CEM03 et WIL65 – est relativement similaire avec des valeurs comparables pour le biais, la RMSE et le χ^2 .

Pour toutes les formules de fetch, la comparaison est la plus mauvaise au site Sept-Îles (AWAC-C, Tableau 9, Figure 73C); toutefois, ce site est caractérisé par une morphologie côtière complexe, la position du mouillage étant partiellement protégée des vagues venant du sud-ouest (archipel de Sept-Îles) et de l'est (delta de la rivière Moisie). La formule CEM03 produit les meilleurs résultats pour les trois autres sites (AWAC-A, AWAC-B et bouée C45138), avec la valeur absolue du biais la plus faible, le χ^2 le plus faible, et visuellement la meilleure concordance sur les Q-Q plots (Tableau 9, Figure 73). À Sept-Îles, JON73 et WIL65 produisent des résultats légèrement meilleurs que CEM03.

GENER prédit relativement correctement les distributions de vagues (ce que testent le biais et le χ^2 , et qui est visualisé par les Q-Q plots), mais est moins fiable pour la prédiction heure par heure. Cela est illustré par la dispersion de l'erreur relativement élevée, avec des valeurs de RMSE de 0,36-0,59 m pour CEM03 (WIL65 a une RMSE un peu plus faible, les autres formules de fetch ont une RMSE plus élevée, Tableau 3).

La meilleure correspondance visuelle entre les distributions mesurées et simulées est obtenue par la bouée C45138 (Figure 73D). Par ailleurs, la série de données de la bouée C45138 est la plus longue (22 ans par rapport à 3 ans pour les AWACs). La comparaison quantile-quantile entre les distributions mesurées et simulées pour la bouée C45138 est détériorée si seulement les trois dernières années sont utilisées (2010-2012) au lieu de toute la série de données (1991-2012, Figure 72). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les erreurs non négligeables des comparaisons heure par heure (grande RMSE) s'équilibrent sur le long terme pour finalement produire un faible biais et une bonne correspondance des distributions. Donc l'augmentation de la longueur des séries temporelles H_s prédites par GENER devrait améliorer la représentativité des distributions produites et permettre la production de climats de vague fiables.

La formule de fetch CEM03 (Coastal Engineering Manual) correspond le mieux aux quatre jeux de données disponibles. Elle semble être la mieux adaptée pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, **aussi nous utiliserons CEM03 pour la suite des travaux.**

Le calcul des distances de fetch pondérées en vue d'utiliser GENER nécessite de définir une distance de fetch maximale. Dans le cadre du projet, il a été constaté que ce paramètre peut influencer les sorties de vagues dans GENER, mais à un degré moindre que la qualité des vents donnés en entrée au modèle. Lors de la validation de GENER avec les vents MERRA_{corr} aux différents sites d'étude, une analyse de sensibilité a permis de constater qu'une distance de fetch maximale de 500 km est généralement adéquate pour le calcul des distances de fetch pondérées. Cette valeur est cohérente avec la géographie générale du golfe Saint-Laurent et a donc été retenue pour produire les résultats présentés dans ce rapport (validation de GENER et simulations climatiques de vagues). Les distances pour chaque site sont présentées à l'Annexe 1.

Dans GENER une augmentation du fetch maximal peut augmenter les vagues lors de très long événements de même direction, mais ne peut jamais réduire la hauteur prédite. Par contre, l'algorithme de prétraitement de vent moyenne le vent sur une zone dépendante de la distance de fetch. Un agrandissement de cette zone modifiera le vent moyen, dans certain cas le vent moyen sera réduit, ce qui peut diminuer la hauteur des vagues. Par défaut, l'algorithme de prétraitement de vent utilise les mêmes distances de fetch pondérés que celle utilisée dans GENER. Pour bien représenter des coups de vents de durée limitée, la zone moyennée ne devrait pas être trop grande.

Tableau 9. Comparaison des résultats de GENER en utilisant différentes formules de fetch avec les données mesurées en 2010-2012. AWAC-A : Saint-Ulric, AWAC-B : Cap d'Espoir, AWAC-C : Sept-Îles, Bouée C45138 : Mont-Louis.

	AWAC-A			AWAC-B			AWAC-C			Bouée C45138		
	Biais (m)	RMSE (m)	χ^2	Biais (m)	RMSE (m)	χ^2	Biais (m)	RMSE (m)	χ^2	Biais (m)	RMSE (m)	χ^2
SPM77	0.09	0.47	0.06	0.22	0.51	0.18	0.08	0.35	0.05	0.15	0.51	0.05
SPM84	0.16	0.58	0.19	0.37	0.74	0.36	0.13	0.49	0.16	0.34	0.76	0.22
JON73	0.06	0.48	0.04	0.15	0.54	0.08	0.03	0.37	0.04	0.14	0.59	0.03
CEM03	-0.02	0.47	0.01	0.02	0.53	0.01	-0.05	0.36	0.06	-0.04	0.59	0.02
WIL65	0.07	0.46	0.03	0.17	0.50	0.13	0.05	0.33	0.03	0.09	0.51	0.02

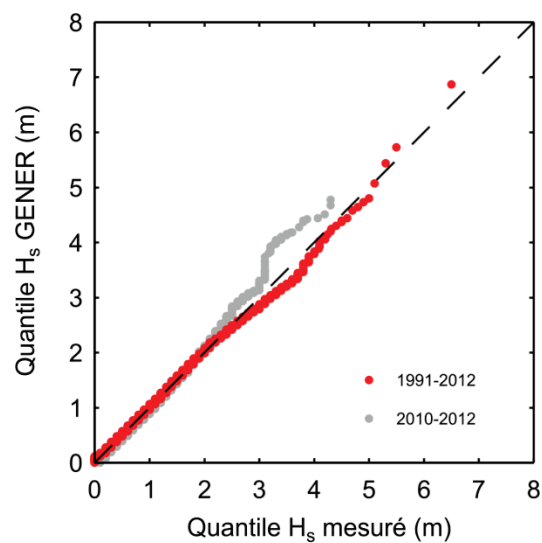


Figure 72. Diagramme quantile-quantile (Q-Q plot) comparant les mesures de la bouée C45138 (Mont-Louis) avec les résultats de GENER utilisant la formule CEM pour les périodes 1991-2012 et 2010-2012.

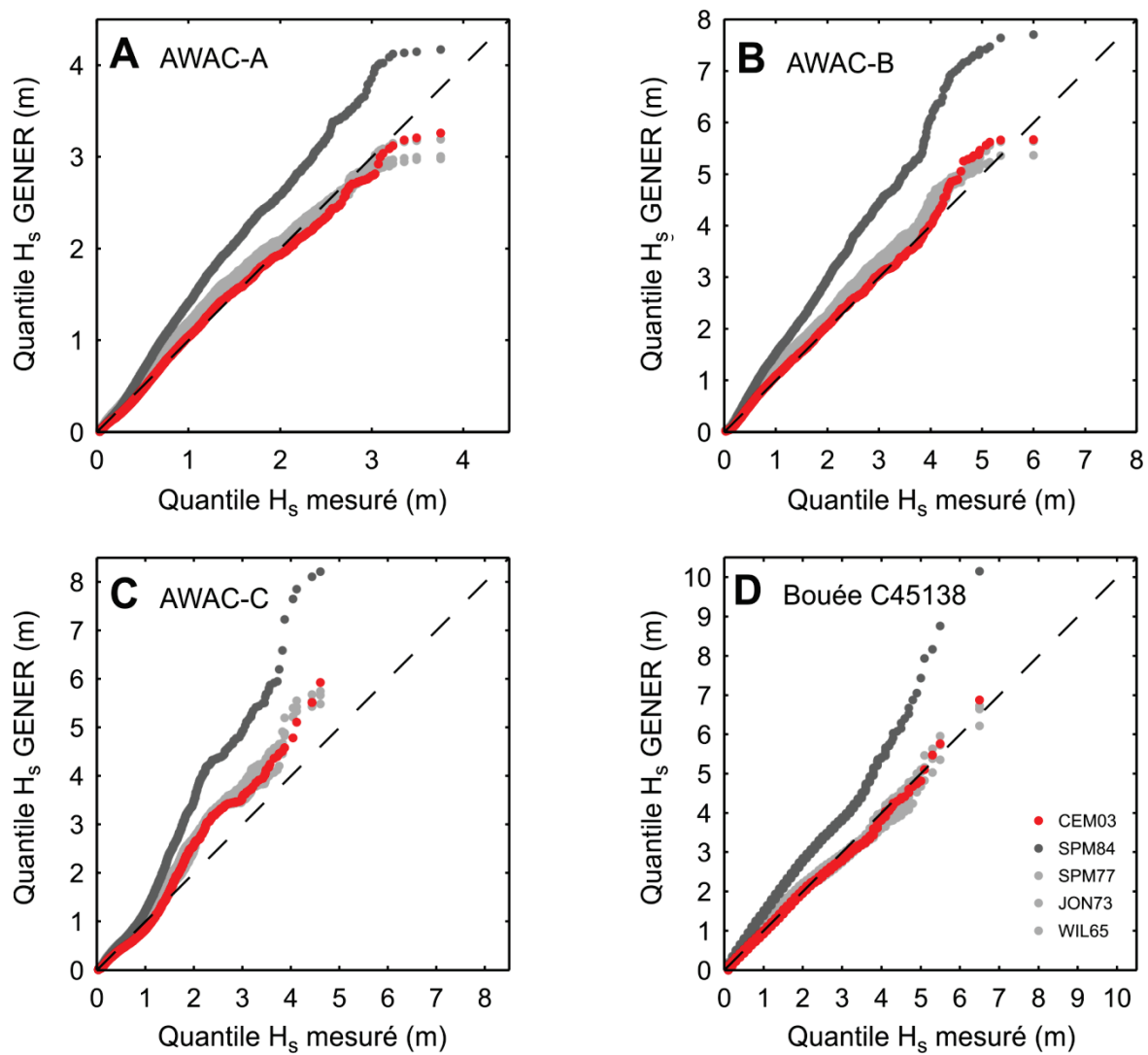


Figure 73. Diagrammes quantile-quantile (Q-Q plot) de H_s mesuré et de H_s prédit par GENER pour les quatre sites et les cinq formules de fetch.

5.3. Comparaison AWAC-MERRA_{corr} et MERRA_{corr}-MRCC

La validation de GENER ci-dessus a été réalisée avec les vents d'un modèle de réanalyse (MERRA), qui est contraint à intervalles réguliers sur des observations météorologiques et grâce à cela reproduit fidèlement les événements climatiques réels. Par contre, pour simuler le futur climat de vagues, nous utiliserons des modèles de type climatique (MRCC), c'est-à-dire des modèles qui peuvent évoluer librement à partir des conditions initiales. Il est donc nécessaire de vérifier non seulement si ces modèles ont des biais dans la vitesse des vents, mais aussi si les caractéristiques des événements de tempêtes (durée, direction des vents et leur vitesse de rotation, etc.) produisent des climats de vagues similaires.

Au préalable, les distributions de vents MERRA_{corr} (vents corrigés, cf. section 2.4.1) et MRCC-aev/ahj ont été examinées. Aussi bien la comparaison des fortes vitesses (moyennes des 10% les plus rapides des vitesses, Figures 7, 10 et 11) que celle des vitesses extrêmes (moyennes du 1% le plus rapide des vitesses, non illustré) indiquent des valeurs relativement proches pour les mêmes zones. À noter toutefois que les vents ahj sont presque toujours plus rapides que les vents aev. De même, la comparaison des roses de vagues sur l'ensemble du golfe ne montre pas de différence notable dans les directions des forts vents.

La comparaison des climats de vagues a été effectuée sur la période 1981-2010 aux cinq sites d'études (A : Saint-Ulric; B : Cap d'Espoir; C : Sept-Îles; ML : Mont-Louis; IMC : Pointe-aux-Loups). GENER a été utilisée avec la formule de fetch CEM03 et des fetchs maximaux de 500 km. Aucune atténuation des vagues par la glace n'a été appliquée, car la diminution future des glaces nécessite que le climat de vagues de l'ensemble de l'année soit reproduit correctement. Les sorties de GENER alimenté par les vents de MERRA_{corr} (cf. section 2.4.1) sont comparées aux sorties de GENER alimenté par les vents de MRCC-aev et MRCC-ahj.

Les diagrammes quantile-quantile montrent des distributions de hauteur de vagues généralement assez proches, mais avec des différences significatives (Figure 74). Les comparaisons des résultats avec aev sont très proches de MERRA_{corr} aux sites A et B, et un peu moins bon aux trois autres sites. Les résultats avec ahj sont plus éloignés de MERRA_{corr} que aev, sauf à Mont-Louis où les deux simulations MRCC produisent des diagrammes très similaires. Il n'y a pas de sur- ou sous-estimation systématique. Ahj surestime les vagues sauf à Pointe-aux-Loups où ahj les sous-estime nettement. Aev est souvent très proche de MERRA_{corr}, mais surestime les hauteurs des vagues à Mont-Louis et les sous-estime à Pointe-aux-Loups. Entre les deux simulations de vent MRCC, ahj produit des plus grandes vagues que aev aux sites A, B et C, et légèrement inférieures aux sites ML et IMC. Cela n'est pas étonnant car les vents de ahj sont en moyenne un peu plus rapides que les vents de aev (cf. ci-dessus).

La comparaison des fréquences de dépassement et des périodes de retour (Tableau 10) confirme que aev est très proche de MERRA_{corr} aux sites A et B. Aev sous-évalue fortement les vagues extrêmes à Sept-Îles (périodes de retour de 50 ans et 100 ans sous-estimées d'environ 30%), mais surévalue les vagues moyennes. Aev surévalue les vagues à Mont-Louis, et les sous-évalue à Pointe-aux-Loups.

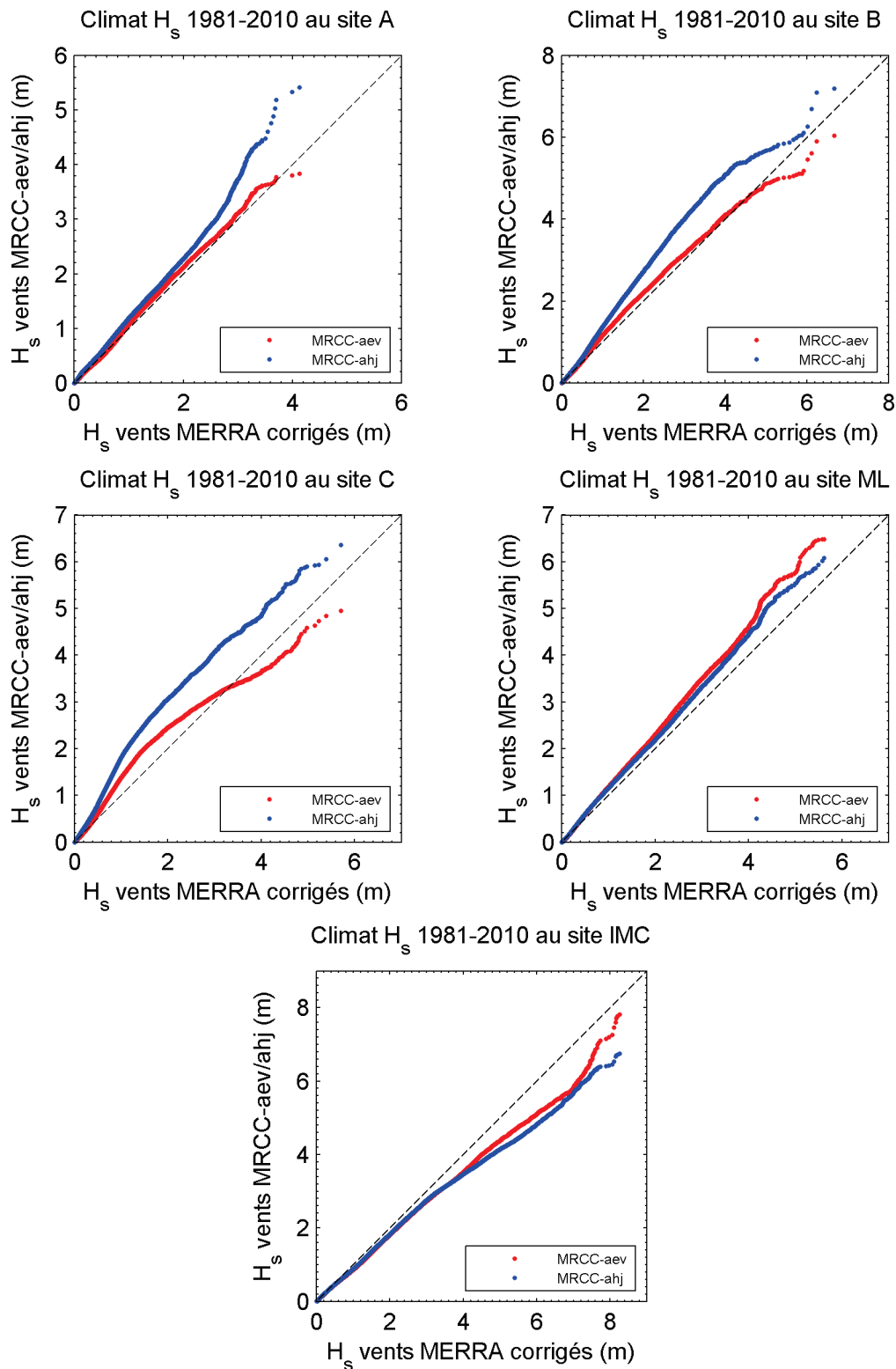


Figure 74. Diagrammes quantile-quantile comparant les climats de vagues calculés par GENER avec d'une part les vents $MERRA_{corr}$, et d'autre part les vents MRCC-aev et MRCC-ahj, pour la période 1981-2010 aux cinq sites (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups).

Tableau 10. Fréquence de dépassement et période de retour des climats de vagues calculés par GENER avec les vents $MERRA_{corr}$, $MRCC-aev$ et $MRCC-ahj$, pour la période 1981-2010.

Climat de vagues période 1981-2010, H_s (m)						
	Fréquence de dépassement			Période de retour		
	10%	1%	0.10%	10 ans	50 ans	100 ans
Site A - Saint-Ulric						
MERRA corrigé	1.16	2.11	2.89	3.65	4.00	4.13
MRCC-aev	1.25	2.23	2.97	3.58	3.86	3.96
MRCC-ahj	1.36	2.40	3.53	4.67	5.36	5.63
Site B - Cap d'Espoir						
MERRA corrigé	1.42	2.63	3.86	5.37	6.13	6.43
MRCC-aev	1.62	2.84	3.98	5.26	5.95	6.22
MRCC-ahj	1.96	3.57	4.96	6.36	6.94	7.15
Site C - Sept-Îles						
MERRA corrigé	1.05	2.24	3.67	5.16	6.25	6.73
MRCC-aev	1.45	2.62	3.47	4.25	4.59	4.71
MRCC-ahj	1.90	3.29	4.63	6.11	6.83	7.11
Site ML - Mont-Louis						
MERRA corrigé	1.87	3.20	4.22	5.24	5.75	5.93
MRCC-aev	2.15	3.71	5.00	5.84	6.33	6.50
MRCC-ahj	2.06	3.53	4.68	5.51	5.95	6.11
Site IMC - Pointe-aux-Loups						
MERRA corrigé	2.45	4.76	6.69	7.89	8.70	9.00
MRCC-aev	2.24	4.21	5.59	7.02	7.74	8.01
MRCC-ahj	2.26	3.99	5.36	6.52	7.05	7.23

Comme pour les distributions, ahj concorde également moins bien avec $MERRA_{corr}$ pour les vagues extrêmes. Ahj est le plus proche de $MERRA_{corr}$ à Mont-Louis. Ahj surévalue fortement les vagues à Saint-Ulric (+35% pour les périodes de retour de 50 et 100 ans). Ahj surévalue les vagues aux sites B et C. Cette surévaluation est plus faible pour les périodes de retour (vagues extrêmes) que pour les grandes vagues (Figure 74). Finalement à Pointe-aux-Loups ahj sous-estime nettement les vagues.

Après avoir constaté cette variabilité inter-sites des tendances, nous avons exécuté GENER sur tous les points de la grille 5×5 km du modèle EC, aussi bien avec les vents $MERRA_{corr}$ que les vents du MRCC (Figure 75). Les périodes de retour ont été calculées de manière automatique sans vérification pour chaque point de grille que les données correspondaient bien à la distribution statistique, ce qui peut avoir produit quelques surestimations des périodes de retour, en particulier au nord-est de Pointe-des-Monts et vers la Baie de Miramichi. La comparaison de

aev et ahj avec $MERRA_{corr}$ montre d'intéressantes tendances spatiales (Figure 76). Aev surévalue les vagues dans l'estuaire maritime et dans plusieurs zones au nord de la Gaspésie, et sous-évalue les vagues dans le reste du golfe. Ahj suit globalement la même tendance spatiale, avec une surévaluation dans l'estuaire maritime, au nord de la Gaspésie, mais aussi la côte est de la Gaspésie, et une sous-évaluation dans le reste du golfe.

Ces tendances spatiales concordent avec les analyses aux cinq sites d'études. Elles suggèrent aussi que les deux modèles numériques MRCC et $MERRA_{corr}$ ne traitent pas de la même manière les différences terre-mer pour la représentation du vent de surface. L'estuaire maritime et le bras du golfe au sud de Sept-Îles sont des zones fortement influencées par la rugosité des terres ($MRCC$ y surévalue les vagues par rapport à $MERRA_{corr}$), alors que le reste du golfe correspond plutôt à des grandes étendues d'eau ($MRCC$ y sous-évalue les vagues par rapport à $MERRA_{corr}$). Par contre, la différence entre modèles n'est probablement pas causée par la résolution des grilles des modèles, car celles-ci ont une maille assez similaire (56×50 km pour $MERRA$, 45×45 km pour $MRCC$).

Malgré ces différences entre les vagues générées avec les vents $MERRA_{corr}$ et les vents $MRCC$, cette comparaison indique que les vents $MRCC$ permettent de produire des climats de vagues réalistes aux cinq sites d'étude. Par conséquent, les vents $MRCC$ peuvent être utilisés pour étudier les variations du futur climat de vagues.

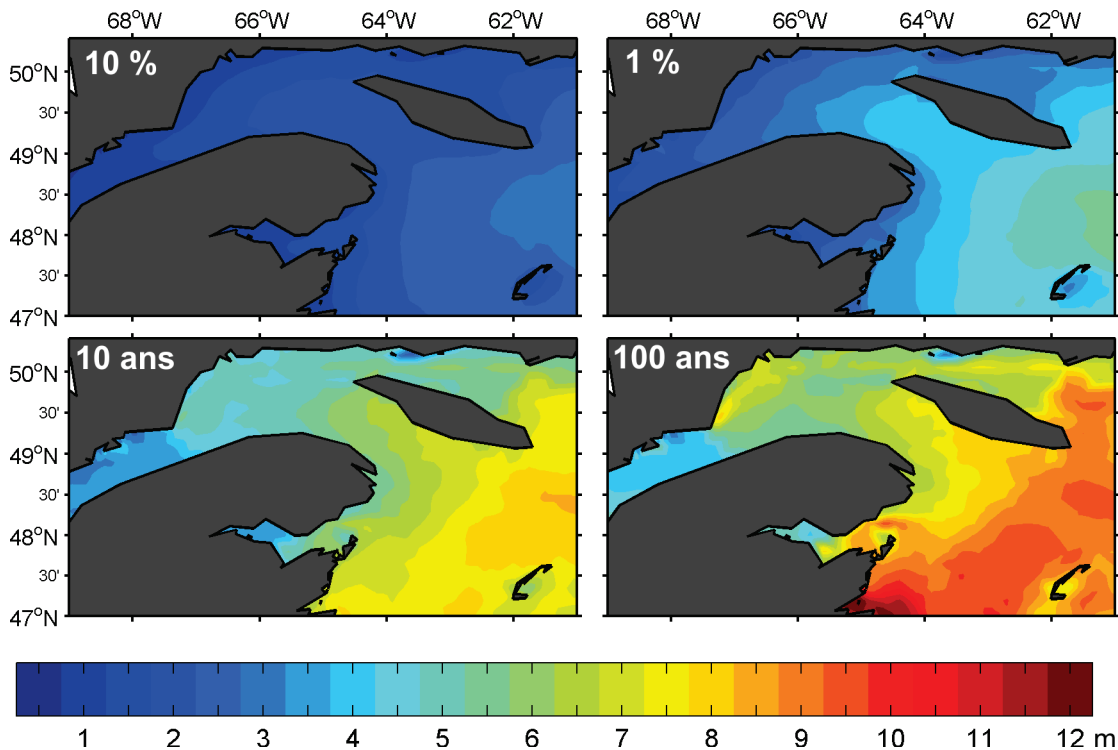


Figure 75. Climat de vagues calculé par GENER avec les vents $MERRA_{corr}$ pour 1981-2010, avec les fréquences de dépassement 1% et 10% ainsi que les périodes de retour de 10 ans et 100 ans.

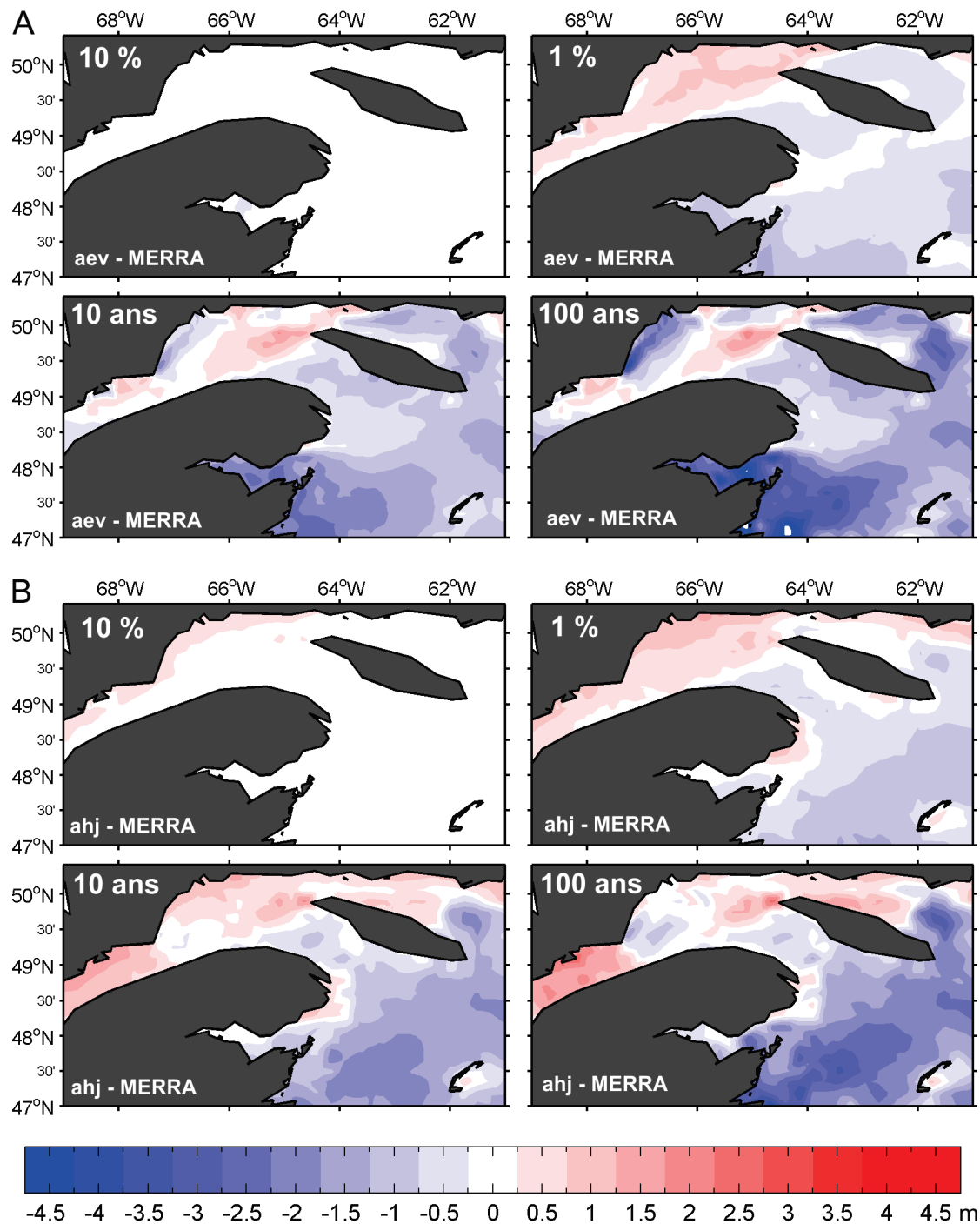


Figure 76. Comparaison des climats de vagues calculés par GENER avec d'une part les vents $MERRA_{corr}$ et d'autre part les vents MRCC-aev et MRCC-ahj, pour la période 1981-2010. Sont présentées les différences MRCC moins $MERRA_{corr}$ pour les fréquences de dépassement 1% et 10% ainsi que les périodes de retour de 10 ans et 100 ans.

5.4. Futur climat de vagues et comparaison avec passé récent

Pour évaluer les modifications du climat de vagues au cours du XXI^e siècle, le climat de vagues a été calculé sur plusieurs périodes de 30 ans. Le passé récent (1981-2010) est comparé au futur proche (2041-2070) et au futur plus lointain (2071-2100). Les comparaisons sont effectuées principalement avec (i) les hauteurs de vagues de fréquences de dépassement 10, 1 et 0,1% distribution généralisée Pareto (GPD), (ii) les hauteurs de vagues de période de retour de 10, 50 et 100 ans, (iii) l'énergie moyenne des vagues, ainsi que (iv) les roses de vagues.

Deux simulations de vents avec une résolution temporelle suffisante sont disponibles sur ces périodes : MRCC-aev et MRCC-ahj (cf. section 2.4.2). Les vagues ont été calculées en alimentant GENER avec ces vents aux cinq sites d'études, en utilisant la formule de fetch CEM03 et une distance maximale de 500 km dans le calcul des fetchs pondérés. Cela a produit dix jeux de données avec les vagues de janvier à décembre. Différentes variantes de l'atténuation des vagues par la glace de mer hivernale ont été appliquées à ces dix jeux de données (sections 5.4.1 et 5.4.2 ci-dessous). Le scénario de disparition totale de la glace a aussi été considéré pour les deux périodes futures. À cause de la grande incertitude de la future couverture de glace, aucune variante de glace n'est sélectionnée comme la meilleure, mais le résultat de toutes ces variantes est discuté à la section 5.4.3.

5.4.1. Simulations avec atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR

Les 10 séries temporelles de vagues produites par GENER (5 sites $\times$ 2 simulations de vent) ont été atténuées par la glace en post-traitement en suivant la méthode basée sur les sorties de glace du modèle MOR qui est présentée à la section 4.5. Les coefficients journaliers d'atténuation des vagues (valeurs entre 0 et 1) ont été appliqués aux hauteurs significatives de vagues calculées par GENER. Les vagues calculées à partir des vents MRCC-aev ont été atténuées avec les coefficients d'atténuation obtenus avec les sorties de la simulation MOR-aev (avec les températures MRCC-aev), et de même pour les vagues calculées à partir des vents MRCC-ahj atténuées avec MOR-ahj. L'enchaînement temporel des événements de vents et de froids de la même simulation climatique sont donc combinés ensemble.

Par la suite, autant pour les séries de vagues sans atténuation par la glace que pour celles atténuées, le climat de vagues a été caractérisé pour différentes périodes de 30 ans (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) en calculant les hauteurs de vagues de fréquences de dépassement 10, 1 et 0,1% ainsi que les hauteurs de vagues de période de retour de 10, 50 et 100 ans. Les tableaux 11 et 12 présentent les valeurs obtenues pour les séries issues des modèles MRCC-aev et MRCC-ahj aux différents sites. De manière générale, les hauteurs de vagues extrêmes sont plus grandes pour la période climatique 2071-2100 comparativement à la période du passé-récent (1981-2010) autant en considérant la glace ou non pour la période future. L'augmentation moyenne des hauteurs de vagues de période de retour de 50 ans aux 5 sites pour les simulations MRCC-aev et MRCC-ahj sont respectivement de 0,2 m et de 0,9 m (1981-2010 vs 2071-2100), avec toutefois une grande variabilité entre les sites (de +0,03 à +1,02 m). Toutefois, la tendance est moins claire pour la période 2041-2070, pour laquelle il y a augmentation ou réduction des hauteurs de vagues extrêmes (par rapport au passé récent) selon la simulation et le site. De plus, comme le montre l'utilisation d'une fenêtre mobile (Figure 77), il y a de la variabilité temporelle des différents

indicateurs du climat de vagues, mais pas une tendance claire dans ces changements, et le choix des périodes de comparaison peut influencer le résultat. Par exemple à Mont-Louis avec la simulation MRCC-aev (Figure 77), la période 2071-2100 montre une nette augmentation des vagues par rapport au passé récent, alors que cela est moins clair pour la période 2066-2095. Finalement les intervalles de confiance associés aux périodes de retour obtenues en ajustant une distribution statistique généralisée Pareto (GPD) sont relativement grands, souvent plus grands que les variations observées d'une période à l'autre (Figure 78).

La détermination de l'impact des changements climatiques sur le climat de vagues de l'estuaire et du golfe du St-Laurent à partir de ces résultats est donc complexe. En effet, même en considérant une réduction importante, voire complète, de l'atténuation des vagues par la glace dans le futur, il peut y avoir autant une réduction qu'une augmentation des vagues extrêmes futures par rapport à celles du passé récent. Toutefois, il y a une tendance évidente démontrée par les résultats des tableaux 11 et 12 car dans tous les cas, mais à un degré moindre pour St-Ulric, l'atténuation des vagues par la glace devient quasi-nulle ou complètement nulle avant la fin du 21^e siècle. Cela est illustré pour les cinq sites à la Figure 78, où la plupart des courbes bleues (climat de vagues avec atténuation par la glace pour la période 2071-2100) sont superposées aux courbes rouges (climat de vagues sans atténuation par la glace pour la période 2071-2100). C'est seulement à St-Ulric (site A) qu'il est possible de voir une distinction entre les deux courbes, mais elles demeurent très près l'une de l'autre.

Même si les simulations MRCC-aev et MRCC-ahj sont toutes les deux basées sur le scénario A2 pour l'évaluation des changements climatiques futurs, les climats de vagues issus de ces deux simulations sont divergents. En effet, il y a des écarts entre les hauteurs de vagues extrêmes d'une simulation à l'autre pour la même période. Généralement, les hauteurs de vagues issues des simulations avec les vents MRCC-ahj sont plus grandes que celles issues des simulations avec les vents MRCC-aev. De plus, les tendances des changements dans le climat de vagues sont parfois contradictoires sur une période donnée entre ces deux simulations de vagues. La Figure 78 permet justement de comparer les courbes des fréquences de dépassement et des périodes de retours aux différents sites pour les deux simulations climatiques. Par exemple, au site A, avec la simulation MRCC-aev, les hauteurs de vagues ayant les périodes de retour les plus grandes sont obtenues pour la période 2041-2070 alors que pour la simulation MRCC-ahj, cette période correspond plutôt à celle avec les hauteurs de vagues les plus faibles pour une période de retour donnée.

Bref, malgré la tendance explicite concernant la réduction de l'atténuation des vagues par la glace dans le futur sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent selon les simulations MOR, les variations dans le climat de vagues futur de la région ne sont pas aussi évidentes et uniformes. Avec la réduction importante de l'atténuation par la glace des vagues en hiver, une réduction des hauteurs de vagues extrêmes pour la fin du 21^e siècle n'est pas anticipée. Il y aurait plutôt maintien des conditions actuelles ou une augmentation des hauteurs de vagues extrêmes. De plus, les résultats montrent qu'il est nécessaire de considérer les vagues durant l'hiver dans l'évaluation du climat de vagues puisque l'atténuation par la glace est limitée et elle pourrait même être négligée pour simplifier l'évaluation des climats de vagues futurs.

Tableau 11. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR.

MRCC-AEV							
	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie
	H_s (m)			H_s (m)			E_{moy} (J/m ²)
	10%	1%	0.10%	10 ans	50 ans	100 ans	
Site A							
1981-2010	1.03	2.04	2.85	3.49	3.79	3.90	222
2041-2070	1.13	2.16	3.04	3.66	3.99	4.10	278
2071-2100	1.19	2.25	3.02	3.55	3.82	3.91	310
2041-2070*	1.22	2.24	3.15	3.69	3.98	4.08	321
2071-2100*	1.22	2.28	3.07	3.63	3.90	4.00	323
Site B							
1981-2010	1.55	2.76	3.90	5.15	5.81	6.06	526
2041-2070	1.66	2.82	4.05	5.63	6.46	6.79	615
2071-2100	1.66	2.85	4.16	5.80	6.81	7.24	622
2041-2070*	1.67	2.82	4.05	5.63	6.46	6.79	616
2071-2100*	1.66	2.85	4.16	5.80	6.81	7.24	622
Site C							
1981-2010	1.36	2.55	3.37	4.08	4.37	4.46	404
2041-2070	1.48	2.55	3.40	4.20	4.53	4.65	478
2071-2100	1.50	2.63	3.61	4.22	4.53	4.64	498
2041-2070*	1.49	2.56	3.40	4.20	4.53	4.64	480
2071-2100*	1.50	2.63	3.61	4.22	4.53	4.64	498
Site ML							
1981-2010	1.97	3.56	4.91	5.78	6.29	6.47	836
2041-2070	2.13	3.70	4.88	5.57	5.91	6.03	1014
2071-2100	2.13	3.67	5.00	5.89	6.42	6.61	1006
2041-2070*	2.14	3.70	4.88	5.57	5.91	6.02	1018
2071-2100*	2.13	3.67	5.00	5.89	6.42	6.61	1006
Site IMC							
1981-2010	2.17	4.13	5.51	6.94	7.65	7.92	1062
2041-2070	2.23	4.05	5.69	6.90	7.58	7.83	1098
2071-2100	2.16	4.04	5.69	6.77	7.43	7.66	1057
2041-2070*	2.23	4.06	5.69	6.90	7.58	7.83	1098
2071-2100*	2.16	4.04	5.69	6.77	7.43	7.66	1057

*sans glace

Tableau 12. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-ahj et l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR.

MRCC-AHJ							
	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie
	H _s (m)			H _s (m)			E _{moy} (J/m ²)
	10%	1%	0.10%	10 ans	50 ans	100 ans	
Site A							
1981-2010	1.06	2.05	2.99	4.14	4.74	4.98	237
2041-2070	1.15	2.15	3.00	3.96	4.41	4.58	282
2071-2100	1.26	2.30	3.36	4.68	5.43	5.74	353
2041-2070*	1.36	2.35	3.28	4.37	4.90	5.11	408
2071-2100*	1.33	2.37	3.46	4.76	5.47	5.75	392
Site B							
1981-2010	1.83	3.40	4.81	5.98	6.49	6.67	743
2041-2070	2.00	3.53	4.94	6.46	7.14	7.40	900
2071-2100	2.04	3.76	5.33	6.84	7.52	7.76	968
2041-2070*	2.00	3.54	4.95	6.47	7.17	7.43	907
2071-2100*	2.04	3.76	5.33	6.84	7.51	7.76	968
Site C							
1981-2010	1.74	3.13	4.45	5.73	6.35	6.58	650
2041-2070	1.92	3.28	4.43	6.00	6.75	7.05	803
2071-2100	1.97	3.46	5.12	6.79	7.84	8.27	865
2041-2070*	1.94	3.32	4.46	6.05	6.79	7.07	827
2071-2100*	1.97	3.46	5.13	6.80	7.85	8.28	866
Site ML							
1981-2010	1.85	3.32	4.49	5.29	5.74	5.90	743
2041-2070	2.06	3.56	4.61	5.42	5.83	5.97	949
2071-2100	2.07	3.52	4.72	5.52	5.98	6.15	959
2041-2070*	2.10	3.64	4.71	5.59	6.04	6.20	996
2071-2100*	2.07	3.52	4.72	5.53	5.98	6.15	959
Site IMC							
1981-2010	2.16	3.88	5.21	6.41	6.93	7.11	1021
2041-2070	2.33	4.07	5.27	6.34	6.79	6.94	1179
2071-2100	2.24	4.08	5.59	7.08	7.86	8.16	1118
2041-2070*	2.34	4.07	5.27	6.34	6.78	6.93	1183
2071-2100*	2.24	4.08	5.59	7.08	7.86	8.16	1118

*sans glace

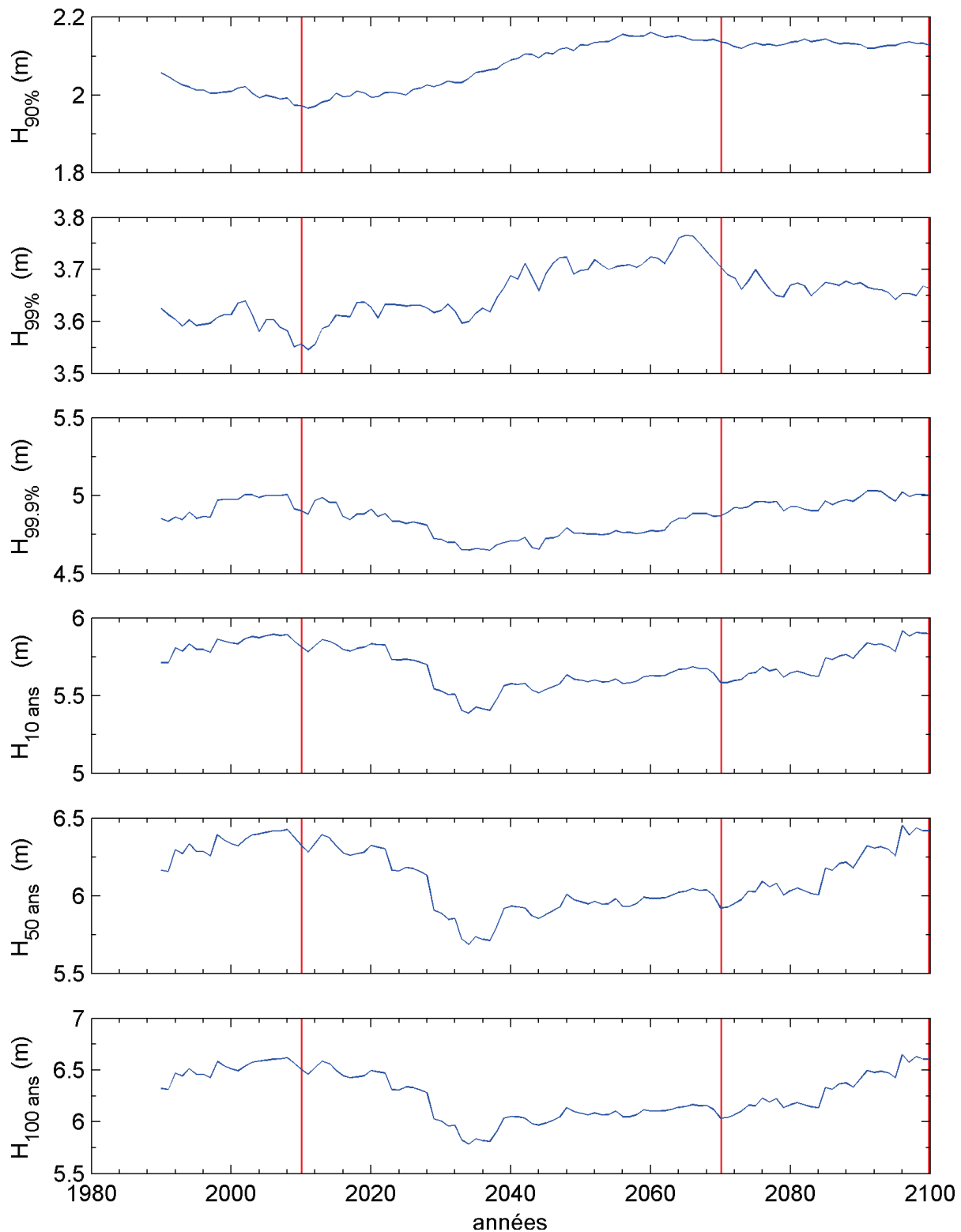


Figure 77. Variations des indicateurs climatiques calculés avec une fenêtre mobile de 30 ans pour le site Mont-Louis avec les vagues MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR-aev (chaque valeur représente les 30 années précédentes). Les traits verticaux rouges indiquent les périodes décrites dans le tableau 11.

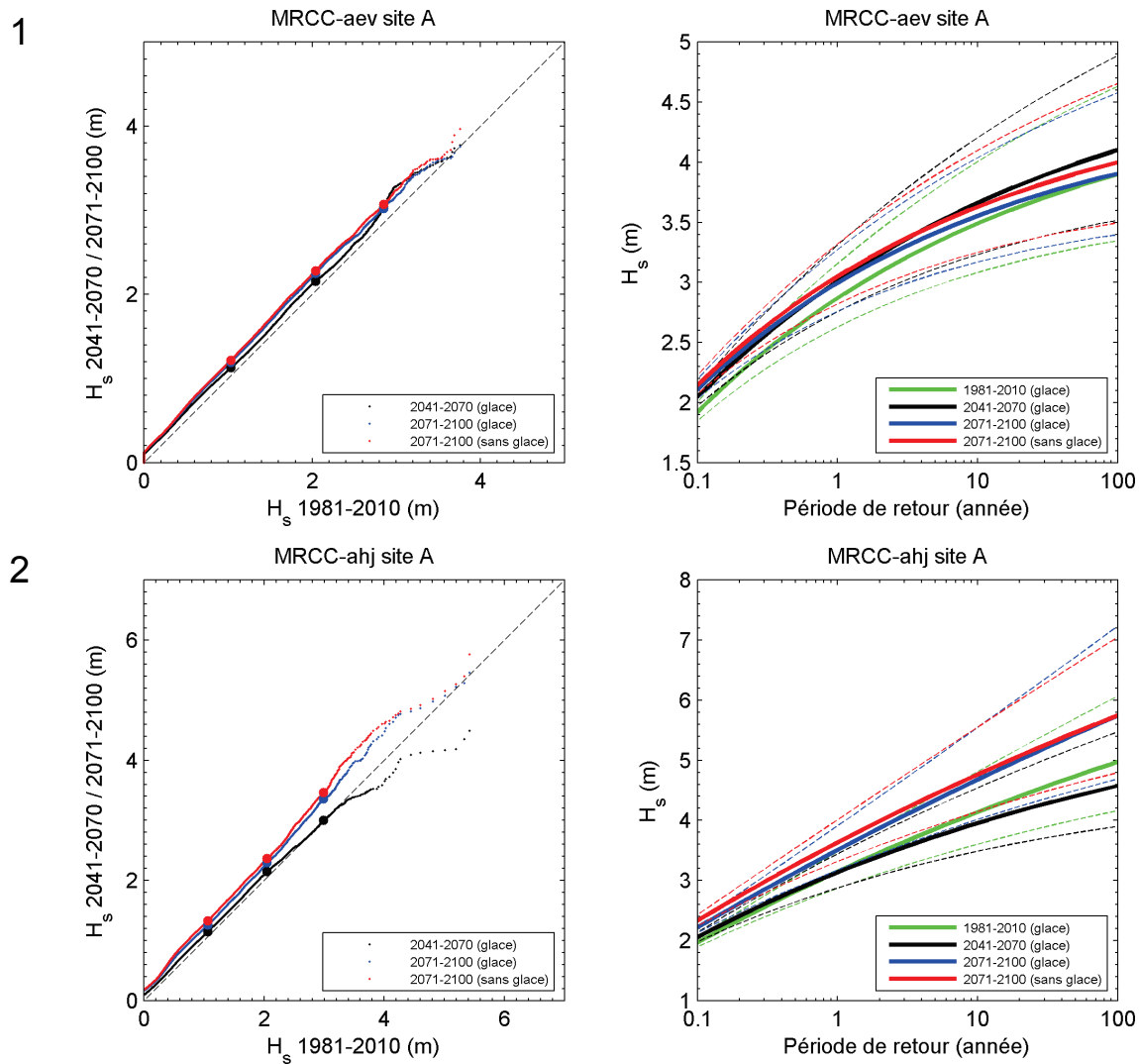


Figure 78. Pour chaque site et chaque simulation de vent, comparaison du climat de vagues 1981-2010 avec les climats futurs (2041-2070 et 2071-2100), calculés avec l'atténuation des vagues selon la glace du modèle MOR, ainsi que sans atténuation (pas de glace) pour 2071-2100.

À gauche, le diagramme quantile-quantile avec les quantiles 90%, 99% et 99,9% indiqués par des points. À droite, les périodes de retour (traits épais) avec les intervalles de confiance 95% (traitillés).

Les résultats avec les vents de la simulation MRCC-aev sont représentés aux lignes impaires (1, 3, 5, 7, 9), ceux avec les vents de la simulation MRCC-ahj aux lignes paires.

(1) et (2) Saint-Ulric, (3) et (4) Cap d'Espoir, (5) et (6) Sept-Îles, (7) et (8) Mont-Louis, (9) et (10) Pointe-aux-Loups. En cas de faible influence de glace en 2071-2100, la courbe bleue se confond avec la courbe rouge et est masquée par celle-ci.

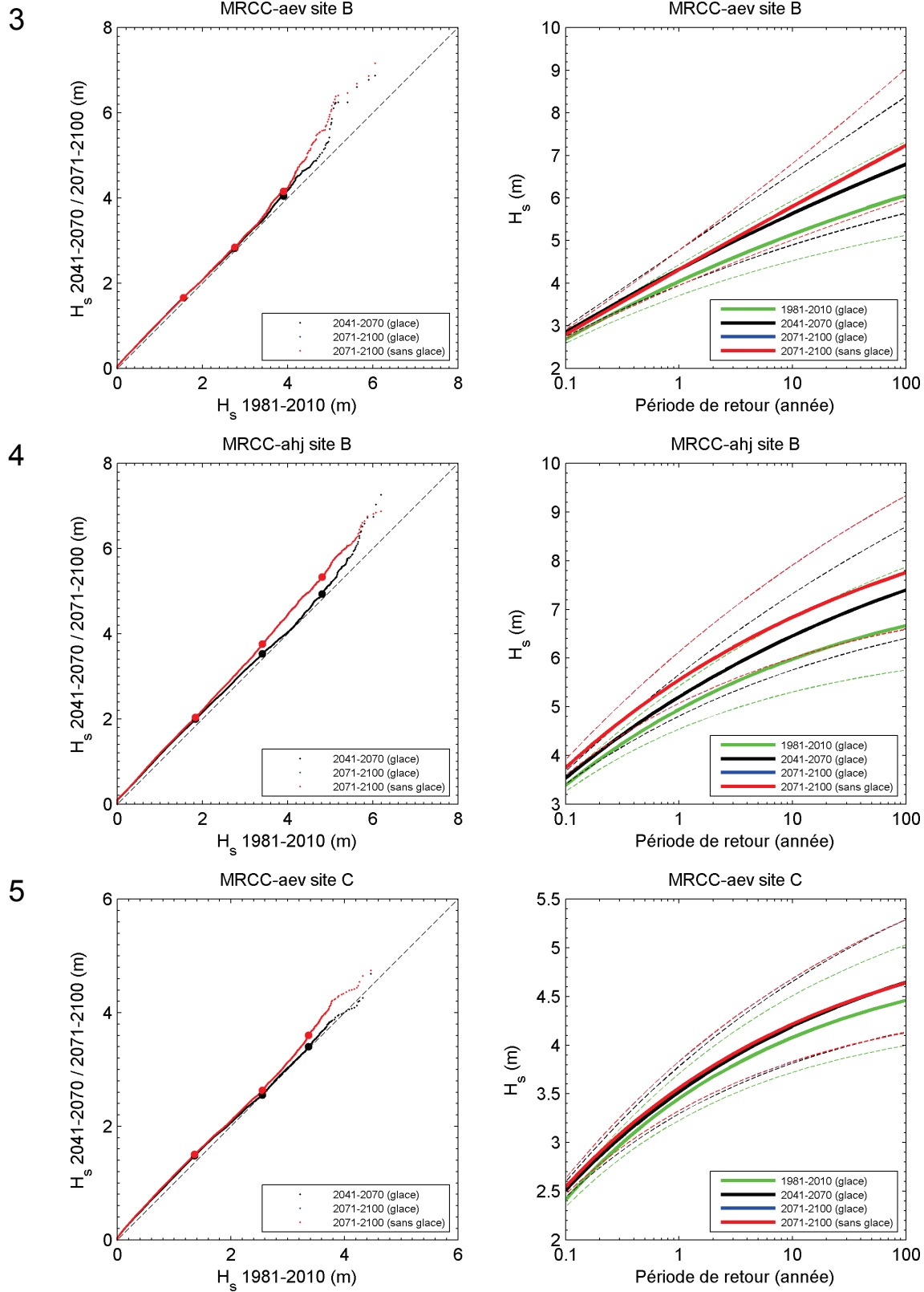
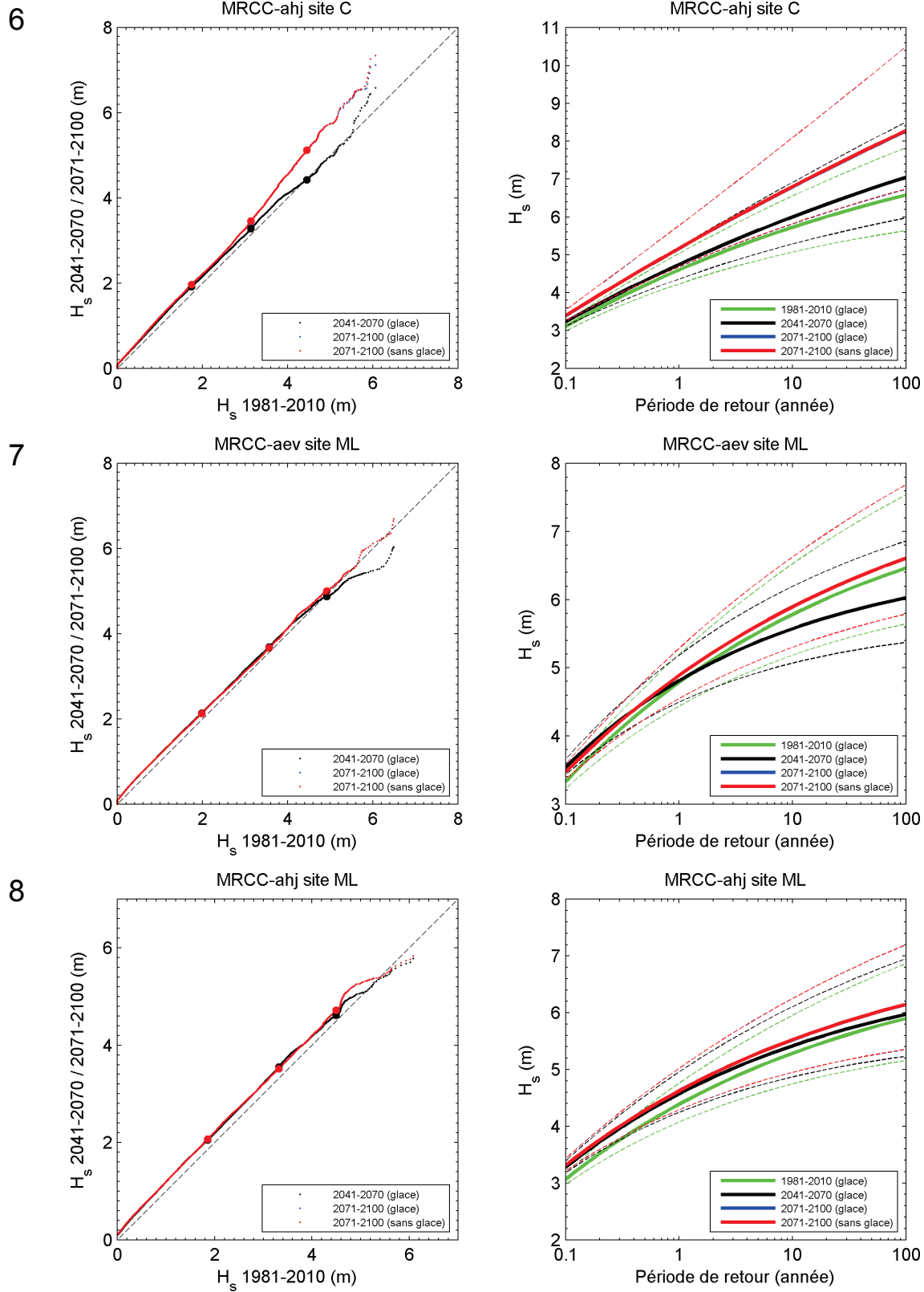
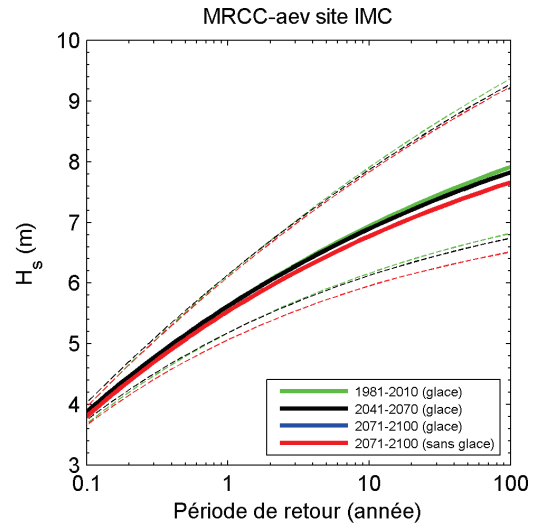
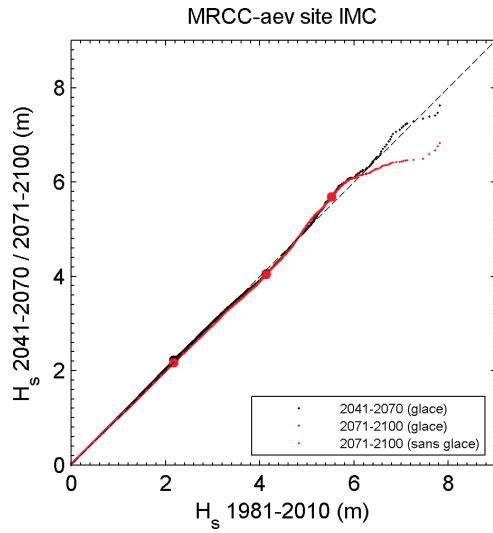


Figure 78. (suite)



9



10

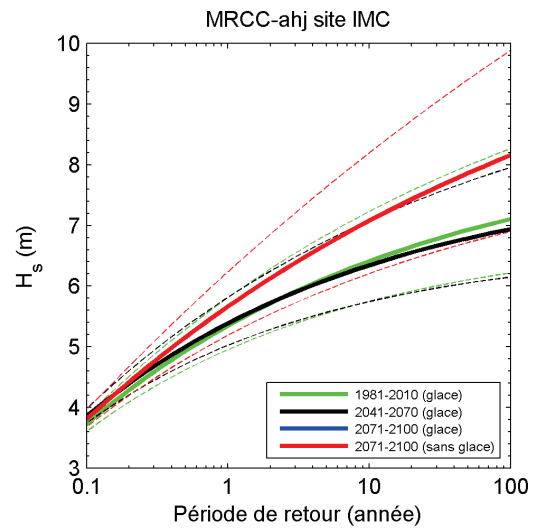
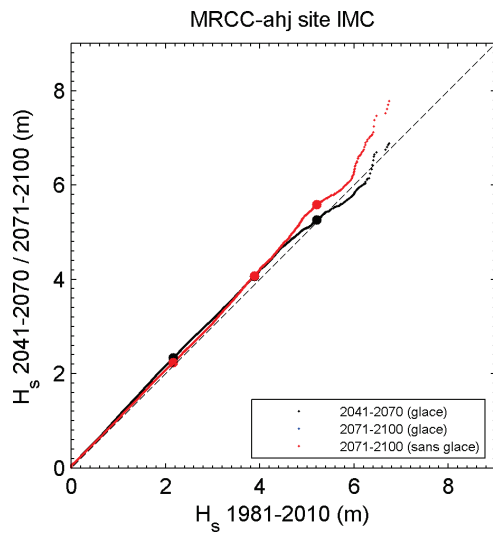


Figure 78. (suite)

5.4.2. Simulations avec atténuation des vagues selon les formules empiriques

Les formules empiriques utilisées pour l'atténuation des vagues par la glace établissent pour chaque hiver le début et la fin de la période d'englacement ainsi que le coefficient d'atténuation des vagues pour cet hiver à partir des températures journalières de la région retenue (sections 4.2 et 4.4). Pour chaque hiver, l'atténuation des hauteurs de vagues par la glace a été appliquée en post-traitement aux 10 séries de vagues simulées avec GENER (5 sites $\times$ 2 simulations de vent). Au total 8 scénarios globaux (uniformes sur tout le golfe) d'atténuation des vagues par la glace ont été appliqués à chaque série de vagues (Tableau 13). Ces scénarios sont basés sur des simulations des modèles MRCC (aev, ahj et aev débiaisé, cf. section 2.4.2) et CGCM (les cinq simulations avec le scénario A2, cf. section 4.3.1). En complément, 3 scénarios locaux (spécifiques à un site) basés sur les simulations du modèle MRCC (aev, ahj et aev débiaisé) ont été appliqués aux séries de vagues sauf pour Pointe-aux-Loups (Tableau 13). La résolution du modèle CGCM était insuffisante pour le calcul des scénarios locaux.

Autant pour les séries de vagues sans atténuation par la glace que pour celles atténuées, le climat de vagues a été caractérisé pour quatre périodes de 30 ans (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) en calculant les hauteurs de vagues de fréquences de dépassement 10, 1 et 0,1%, les hauteurs de vagues de période de retour de 10, 50 et 100 ans, ainsi que l'énergie moyenne des vagues. Toutefois, seulement les 6 scénarios d'atténuation des vagues par la glace basés sur le modèle MRCC couvrent la période de référence 1981-2010 (Tableau 13). C'est pourquoi dans les tableaux de résultats 14 à 18 il y a séparation des climats de vagues calculés à partir de ces 6 scénarios de glace ($n=6$, $n=3$ pour le tableau 18 de Pointe-aux-Loups) et pour ceux calculés avec les 11 scénarios de glaces ($n=11$, $n=6$ pour le tableau 18). Cela permet de comparer l'évolution du climat de vagues calculé de la même manière pour les trois périodes. Ces différents tableaux présentent la moyenne, ainsi qu'entre parenthèses, le minimum et le maximum des différents indicateurs climatiques obtenus avec les différents scénarios de glace (6 ou 11). Nous avons jugé

Tableau 13. Liste des scénarios d'atténuation de glace (formules empiriques) appliqués en post-traitement sur les sorties de GENER (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups).

Simulation de glace	Sites A, B, C et ML	Site IMC
Formule locale, température MRCC-aev ^a	x	
Formule locale, température MRCC-ahj ^a	x	
Formule locale, température MRCC-aev débiaisé ^a	x	
Formule golfe, MRCC-aev ^a	x	x
Formule golfe, MRCC-ahj ^a	x	x
Formule golfe, MRCC-aev debiaisé ^a	x	x
Formule golfe, CGCM-SRES A2-1 ^b	x	x
Formule golfe, CGCM-SRES A2-2 ^b	x	x
Formule golfe, CGCM-SRES A2-3 ^b	x	x
Formule golfe, CGCM-SRES A2-4 ^b	x	x
Formule golfe, CGCM-SRES A2-5 ^b	x	x

^a Période couverte : 1981-2100

^b Période couverte : 2000-2100

raisonnable de comparer seulement les moyennes des indicateurs climatiques puisque leur variabilité demeure limitée d'un scénario de glace à l'autre telle qu'illustrée aux Figures 79 et 80. Toutefois, il existe une incertitude dans les prédictions de glace qui est représentée par l'écart minimum-maximum.

Il faut souligner que les résultats entre les deux simulations de vents (MRCC-aev et MRCC-ahj) diffèrent significativement (Figure 80). Ces différences deviennent importantes pour les vagues extrêmes produits par des événements peu fréquents, et ils influencent nécessairement les périodes de retour calculées (Figure 80). Comme pour toutes les sorties de modèles climatiques, c'est les variations à long terme qui sont intéressantes, et les valeurs absolues sur une période donnée ne sont pas directement interprétable.

Les tableaux de résultats 14 à 18 montrent que de manière générale, considérant une simulation donnée, il y a augmentation des hauteurs de vagues extrêmes entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100. Par exemple, entre ces deux périodes (en considérant l'atténuation par la glace basée sur 6 scénarios), l'augmentation moyenne des hauteurs de vagues de période de retour de 50 ans aux 5 sites sont de 0,3 m (vents MRCC-aev) et 0,8 m (vents MRCC-ahj). Toutefois, l'ordre de grandeur des augmentations peut être différent d'une simulation à l'autre à un même site (MRCC-aev vs MRCC-ahj), surtout pour les périodes de retour. L'ajustement des courbes GPD pour calculer les périodes de retour ajoute en effet de l'incertitude sur les indicateurs climatiques calculés et pourrait expliquer une partie de ces écarts importants. Comme pour les vagues atténuées selon la glace du modèle MOR (cf. section 5.4.1), la tendance est moins claire entre le passé récent et la période 2041-2070, avec aussi bien des augmentations que des diminutions des vagues extrêmes. Il est également important de mentionner que l'atténuation des vagues par la glace à la fin du 21^e siècle devient très limitée aux différents sites avec tous les scénarios de glace.

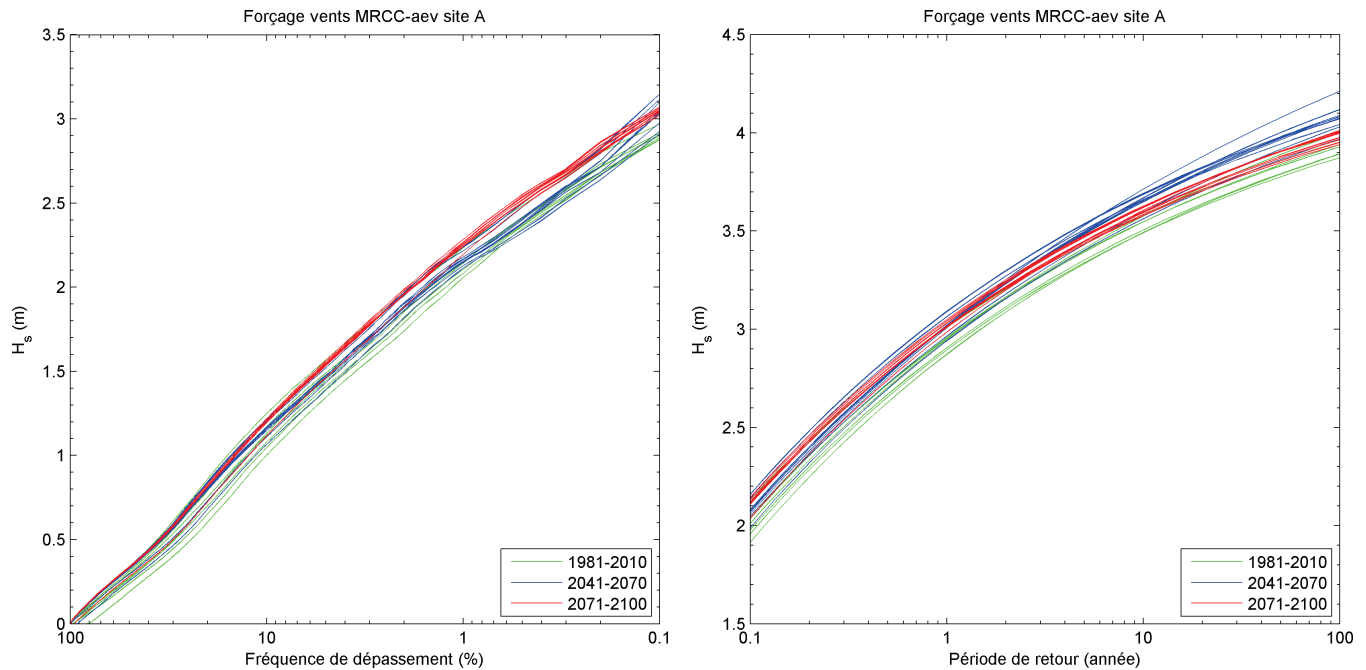


Figure 79. Exemple de la variabilité associée aux différents scénarios de glace (formules empiriques), avec les trois périodes de 30 ans identifiées par des couleurs. À gauche : probabilité de dépassement, à droite : période de retour.

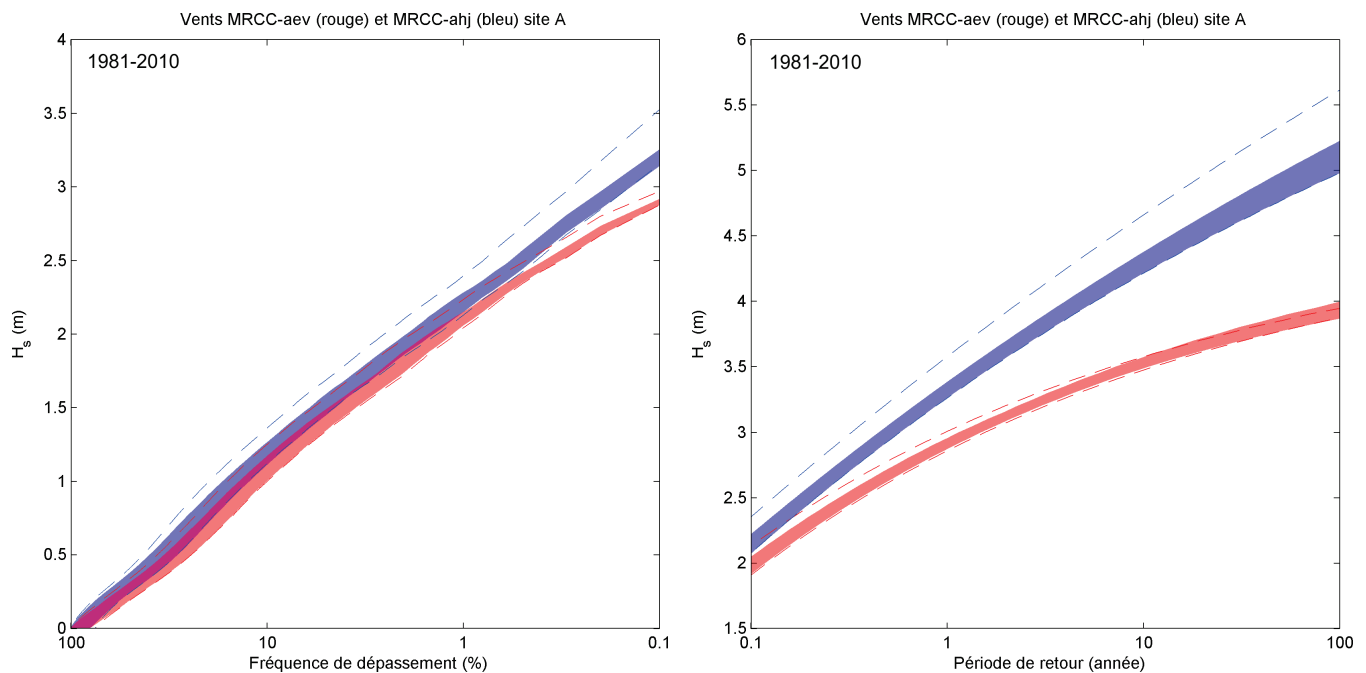


Figure 80. Comparaison des climats de vagues avec les vents MRCC-aev (en rouge) et MRCC-ahj (en bleu) avec différents scénarios de glace pour le site A, période 1981-2010. Le traitillé supérieur est le scénario sans glace, la plage colorée est l'enveloppe de six scénarios de glace (formules empiriques), le traitillé inférieur correspond à une couverture de glace continue du 15 décembre au 15 mars. À gauche : probabilité de dépassement, à droite : période de retour.

Tableau 14. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Saint-Ulric. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.

Site A – MRCC-AEV							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.09 (1.00 – 1.17)	2.11 (2.06 – 2.15)	2.90 (2.88 – 2.92)	3.53 (3.49 – 3.58)	3.82 (3.78 – 3.89)	3.92 (3.88 – 4.00)	248 (213 – 274)
2041-2070 n=6	1.16 (1.07 – 1.22)	2.14 (2.11 – 2.24)	2.98 (2.91 – 3.15)	3.64 (3.56 – 3.69)	3.97 (3.87 – 4.00)	4.08 (3.97 – 4.12)	288 (243 – 318)
2071-2100 n=6	1.20 (1.12 – 1.22)	2.26 (2.19 – 2.28)	3.07 (3.04 – 3.07)	3.62 (3.61 – 3.63)	3.91 (3.90 – 3.91)	4.00 (4.00 – 4.01)	310 (270 – 323)
2041-2070 n=11	1.16 (1.07 – 1.21)	2.17 (2.11 – 2.24)	3.05 (2.91 – 3.15)	3.66 (3.56 – 3.71)	3.97 (3.87 – 4.08)	4.08 (3.97 – 4.21)	290 (243 – 318)
2071-2100 n=11	1.20 (1.12 – 1.22)	2.26 (2.19 – 2.28)	3.06 (3.02 – 3.07)	3.61 (3.58 – 3.63)	3.89 (3.85 – 3.91)	3.99 (3.94 – 4.01)	311 (270 – 323)
2041-2070 sans glace	1.22 -	2.24 -	3.15 -	3.69 -	3.98 -	4.08 -	321 -
2071-2100 sans glace	1.22 -	2.28 -	3.07 -	3.63 -	3.90 -	4.00 -	323 -

Site A – MRCC-AHJ							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.20 (1.11 – 1.27)	2.23 (2.15 – 2.28)	3.21 (3.15 – 3.26)	4.32 (4.23 – 4.39)	4.90 (4.78 – 5.00)	5.13 (5.00 – 5.25)	305 (261 – 339)
2041-2070 n=6	1.30 (1.20 – 1.36)	2.30 (2.24 – 2.35)	3.22 (3.08 – 3.28)	4.29 (4.04 – 4.38)	4.81 (4.47 – 4.92)	5.02 (4.62 – 5.15)	365 (306 – 404)
2071-2100 n=6	1.31 (1.23 – 1.33)	2.34 (2.27 – 2.37)	3.44 (3.38 – 3.46)	4.73 (4.68 – 4.76)	5.43 (5.37 – 5.47)	5.72 (5.64 – 5.75)	376 (327 – 392)
2041-2070 n=11	1.30 (1.20 – 1.36)	2.30 (2.24 – 2.35)	3.22 (3.08 – 3.28)	4.29 (4.04 – 4.38)	4.82 (4.47 – 4.92)	5.03 (4.62 – 5.15)	369 (306 – 404)
2071-2100 n=11	1.30 (1.23 – 1.33)	2.34 (2.27 – 2.37)	3.43 (3.38 – 3.46)	4.74 (4.68 – 4.77)	5.46 (5.37 – 5.52)	5.75 (5.64 – 5.83)	378 (327 – 392)
2041-2070 sans glace	1.36 -	2.35 -	3.28 -	4.37 -	4.90 -	5.11 -	408 -
2071-2100 sans glace	1.33 -	2.37 -	3.46 -	4.76 -	5.47 -	5.75 -	392 -

Tableau 15. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Cap d'Espoir. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.

Site B – MRCC-AEV							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.48 (1.45 – 1.55)	2.68 (2.65 – 2.74)	3.78 (3.76 – 3.84)	5.01 (4.97 – 5.06)	5.62 (5.56 – 5.69)	5.85 (5.79 – 5.94)	471 (450 – 509)
2041-2070 n=6	1.60 (1.53 – 1.66)	2.14 (2.67 – 2.82)	2.98 (3.89 – 4.05)	3.64 (5.32 – 5.63)	3.97 (6.05 – 6.45)	4.08 (6.35 – 6.78)	555 (509 – 605)
2071-2100 n=6	1.63 (1.59 – 1.66)	2.83 (2.80 – 2.85)	4.10 (4.02 – 4.16)	5.67 (5.50 – 5.80)	6.61 (6.36 – 6.83)	7.01 (6.72 – 7.28)	599 (571 – 622)
2041-2070 n=11	1.60 (1.53 – 1.64)	2.75 (2.67 – 2.80)	3.95 (3.89 – 4.01)	5.44 (5.24 – 5.56)	6.19 (5.90 – 6.35)	6.49 (6.15 – 6.67)	563 (509 – 605)
2071-2100 n=11	1.64 (1.59 – 1.66)	2.83 (2.80 – 2.85)	4.11 (4.02 – 4.16)	5.71 (5.50 – 5.82)	6.68 (6.36 – 6.88)	7.09 (6.72 – 7.34)	602 (571 – 622)
2041-2070 sans glace	1.67 -	2.82 -	4.05 -	5.63 -	6.46 -	6.79 -	616 -
2071-2100 sans glace	1.66 -	2.85 -	4.16 -	5.80 -	6.81 -	7.24 -	622 -

Site B – MRCC-AHJ							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.79 (1.76 – 1.85)	3.41 (3.39 – 3.44)	4.81 (4.78 – 4.85)	5.97 (5.91 – 6.11)	6.47 (6.39 – 6.68)	6.65 (6.56 – 6.88)	706 (679 – 756)
2041-2070 n=6	1.93 (1.85 – 2.00)	3.47 (3.42 – 3.54)	4.88 (4.83 – 4.95)	6.40 (6.34 – 6.47)	7.11 (7.06 – 7.17)	7.37 (7.33 – 7.44)	828 (765 – 891)
2071-2100 n=6	2.00 (1.94 – 2.04)	3.71 (3.64 – 3.76)	5.27 (5.19 – 5.33)	6.72 (6.59 – 6.84)	7.38 (7.23 – 7.51)	7.61 (7.46 – 7.76)	929 (881 – 968)
2041-2070 n=11	1.93 (1.85 – 1.98)	3.47 (3.42 – 3.49)	4.87 (4.83 – 4.90)	6.36 (6.25 – 6.41)	7.06 (6.89 – 7.11)	7.32 (7.12 – 7.38)	839 (765 – 891)
2071-2100 n=11	2.00 (1.94 – 2.04)	3.72 (3.64 – 3.76)	5.27 (5.19 – 5.33)	6.73 (6.59 – 6.84)	7.39 (7.23 – 7.51)	7.62 (7.46 – 7.76)	936 (881 – 968)
2041-2070 sans glace	2.00 -	3.54 -	4.95 -	6.47 -	7.17 -	7.43 -	907 -
2071-2100 sans glace	2.04 -	3.76 -	5.33 -	6.84 -	7.51 -	7.76 -	968 -

Tableau 16. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Sept-Îles. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.

Site C – MRCC-AEV							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.34 (1.30 – 1.38)	2.52 (2.50 – 2.54)	3.35 (3.30 – 3.39)	4.10 (4.06 – 4.18)	4.40 (4.35 – 4.52)	4.50 (4.45 – 4.64)	389 (366 – 406)
2041-2070 n=6	1.46 (1.40 – 1.49)	2.14 (2.49 – 2.56)	2.98 (3.33 – 3.40)	3.64 (4.14 – 4.20)	3.97 (4.47 – 4.53)	4.08 (4.59 – 4.64)	460 (426 – 479)
2071-2100 n=6	1.50 (1.47 – 1.50)	2.63 (2.61 – 2.63)	3.60 (3.56 – 3.61)	4.21 (4.18 – 4.22)	4.53 (4.49 – 4.53)	4.64 (4.60 – 4.65)	493 (478 – 498)
2041-2070 n=11	1.45 (1.40 – 1.49)	2.52 (2.49 – 2.56)	3.37 (3.31 – 3.40)	4.17 (4.14 – 4.20)	4.50 (4.47 – 4.53)	4.62 (4.59 – 4.65)	454 (426 – 479)
2071-2100 n=11	1.49 (1.47 – 1.50)	2.62 (2.60 – 2.63)	3.59 (3.56 – 3.61)	4.20 (4.17 – 4.22)	4.51 (4.48 – 4.54)	4.62 (4.59 – 4.65)	490 (478 – 498)
2041-2070 sans glace	1.49 -	2.56 -	3.40 -	4.20 -	4.53 -	4.64 -	480 -
2071-2100 sans glace	1.50 -	2.63 -	3.61 -	4.22 -	4.53 -	4.64 -	498 -

Site C – MRCC-AHJ							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.75 (1.71 – 1.80)	3.16 (3.12 – 3.17)	4.46 (4.40 – 4.48)	5.79 (5.68 – 5.87)	6.43 (6.29 – 6.57)	6.67 (6.51 – 6.84)	660 (627 – 685)
2041-2070 n=6	1.91 (1.84 – 1.94)	3.29 (3.24 – 3.32)	4.44 (4.39 – 4.46)	6.00 (5.92 – 6.05)	6.75 (6.64 – 6.81)	7.04 (6.92 – 7.11)	794 (739 – 827)
2071-2100 n=6	1.96 (1.91 – 1.97)	3.44 (3.39 – 3.46)	5.09 (5.02 – 5.13)	6.77 (6.65 – 6.80)	7.82 (7.68 – 7.85)	8.25 (8.10 – 8.28)	853 (818 – 866)
2041-2070 n=11	1.90 (1.84 – 1.94)	3.26 (3.22 – 3.32)	4.41 (4.35 – 4.46)	5.95 (5.80 – 6.05)	6.68 (6.47 – 6.79)	6.97 (6.73 – 7.09)	782 (739 – 827)
2071-2100 n=11	1.95 (1.91 – 1.97)	3.43 (3.39 – 3.46)	5.08 (5.02 – 5.13)	6.76 (6.65 – 6.82)	7.82 (7.68 – 7.94)	8.25 (8.10 – 8.41)	848 (818 – 866)
2041-2070 sans glace	1.94 -	3.32 -	4.46 -	6.05 -	6.79 -	7.07 -	827 -
2071-2100 sans glace	1.97 -	3.46 -	5.13 -	6.80 -	7.85 -	8.28 -	866 -

Tableau 17. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Mont-Louis. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.

Site ML – MRCC-AEV							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.94 (1.87 – 2.03)	3.51 (3.44 – 3.58)	4.72 (4.63 – 4.87)	5.61 (5.44 – 5.74)	6.05 (5.83 – 6.24)	6.21 (5.96 – 6.42)	803 (732 – 852)
2041-2070 n=6	2.08 (1.97 – 2.14)	2.14 (3.50 – 3.69)	2.98 (4.66 – 4.86)	3.64 (5.32 – 5.57)	3.97 (5.64 – 5.91)	4.08 (5.74 – 6.02)	949 (844 – 1010)
2071-2100 n=6	2.11 (2.03 – 2.13)	3.65 (3.57 – 3.67)	4.98 (4.85 – 5.00)	5.87 (5.80 – 5.89)	6.41 (6.34 – 6.44)	6.60 (6.53 – 6.64)	984 (917 – 1006)
2041-2070 n=11	2.07 (1.97 – 2.13)	3.59 (3.50 – 3.69)	4.74 (4.57 – 4.86)	5.42 (5.30 – 5.57)	5.75 (5.60 – 5.91)	5.86 (5.70 – 6.02)	939 (844 – 1010)
2071-2100 n=11	2.10 (2.03 – 2.13)	3.64 (3.57 – 3.67)	4.95 (4.85 – 5.00)	5.86 (5.80 – 5.89)	6.39 (6.34 – 6.44)	6.58 (6.53 – 6.64)	980 (917 – 1006)
2041-2070 sans glace	2.14 -	3.70 -	4.88 -	5.57 -	5.91 -	6.02 -	1018 -
2071-2100 sans glace	2.13 -	3.67 -	5.00 -	5.89 -	6.42 -	6.61 -	1006 -

Site ML – MRCC-AHJ							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=6	1.87 (1.81 – 1.93)	3.35 (3.30 – 3.42)	4.52 (4.46 – 4.59)	5.34 (5.28 – 5.44)	5.80 (5.71 – 5.94)	5.97 (5.86 – 6.11)	753 (694 – 792)
2041-2070 n=6	2.04 (1.93 – 2.10)	3.55 (3.44 – 3.64)	4.63 (4.55 – 4.71)	5.48 (5.35 – 5.60)	5.94 (5.80 – 6.07)	6.11 (5.96 – 6.24)	928 (829 – 988)
2071-2100 n=6	2.05 (1.97 – 2.07)	3.50 (3.44 – 3.52)	4.69 (4.59 – 4.72)	5.50 (5.39 – 5.54)	5.96 (5.82 – 6.01)	6.12 (5.97 – 6.18)	936 (868 – 959)
2041-2070 n=11	2.03 (1.93 – 2.09)	3.52 (3.44 – 3.63)	4.60 (4.55 – 4.71)	5.45 (5.35 – 5.60)	5.92 (5.80 – 6.07)	6.09 (5.96 – 6.24)	919 (829 – 988)
2071-2100 n=11	2.04 (1.97 – 2.07)	3.50 (3.44 – 3.52)	4.68 (4.59 – 4.72)	5.50 (5.39 – 5.55)	5.97 (5.82 – 6.04)	6.13 (5.97 – 6.22)	933 (868 – 959)
2041-2070 sans glace	2.10 -	3.64 -	4.71 -	5.59 -	6.04 -	6.20 -	996 -
2071-2100 sans glace	2.07 -	3.52 -	4.72 -	5.53 -	5.98 -	6.15 -	959 -

Tableau 18. Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Pointe-aux-Loups. "n=" indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER avec aucune atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.

Site IMC – MRCC-AEV							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=3	1.98 (1.89 – 2.07)	3.94 (3.89 – 3.99)	5.38 (5.32 – 5.45)	6.80 (6.71 – 6.89)	7.56 (7.46 – 7.68)	7.84 (7.74 – 7.97)	915 (840 – 981)
2041-2070 n=3	2.19 (2.13 – 2.23)	2.14 (3.87 – 4.05)	2.98 (5.46 – 5.69)	3.64 (6.73 – 6.89)	3.97 (7.47 – 7.58)	4.08 (7.75 – 7.83)	1058 (1008 – 1097)
2071-2100 n=3	2.16 (2.14 – 2.16)	4.03 (4.01 – 4.04)	5.65 (5.57 – 5.69)	6.75 (6.69 – 6.77)	7.39 (7.32 – 7.43)	7.63 (7.55 – 7.66)	1049 (1034 – 1057)
2041-2070 n=8	2.14 (2.09 – 2.23)	3.90 (3.83 – 4.05)	5.50 (5.27 – 5.69)	6.77 (6.61 – 6.89)	7.50 (7.33 – 7.60)	7.78 (7.60 – 7.90)	1019 (981 – 1097)
2071-2100 n=8	2.13 (2.12 – 2.16)	4.00 (3.97 – 4.04)	5.66 (5.57 – 5.69)	6.75 (6.69 – 6.77)	7.41 (7.32 – 7.46)	7.65 (7.55 – 7.71)	1033 (1020 – 1057)
2041-2070 sans glace	2.23 -	4.06 -	5.69 -	6.90 -	7.58 -	7.83 -	1098 -
2071-2100 sans glace	2.16 -	4.04 -	5.69 -	6.77 -	7.43 -	7.66 -	1057 -

Site IMC – MRCC-AHJ							
Période	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie E _{moy} (J/m ²)
	H _s (m)			H _s (m)			
	10%	1%	0.1%	10 ans	50 ans	100 ans	
1981-2010 n=3	2.02 (1.94 – 2.09)	3.74 (3.70 – 3.78)	5.02 (4.92 – 5.15)	6.26 (6.19 – 6.36)	6.77 (6.68 – 6.91)	6.95 (6.85 – 7.10)	920 (853 – 977)
2041-2070 n=3	2.29 (2.23 – 2.34)	4.03 (3.98 – 4.07)	5.22 (5.14 – 5.27)	6.29 (6.19 – 6.34)	6.73 (6.62 – 6.79)	6.88 (6.76 – 6.94)	1144 (1096 – 1182)
2071-2100 n=3	2.23 (2.21 – 2.24)	4.06 (4.03 – 4.08)	5.57 (5.54 – 5.59)	7.05 (6.99 – 7.08)	7.83 (7.76 – 7.86)	8.12 (8.05 – 8.16)	1110 (1094 – 1118)
2041-2070 n=8	2.24 (2.20 – 2.34)	3.98 (3.94 – 4.07)	5.20 (5.14 – 5.27)	6.26 (6.19 – 6.34)	6.71 (6.62 – 6.79)	6.87 (6.76 – 6.95)	1106 (1072 – 1182)
2071-2100 n=8	2.21 (2.19 – 2.24)	4.04 (4.02 – 4.08)	5.57 (5.54 – 5.59)	7.05 (6.99 – 7.08)	7.86 (7.76 – 7.91)	8.16 (8.05 – 8.22)	1093 (1078 – 1118)
2041-2070 sans glace	2.34 -	4.07 -	5.27 -	6.34 -	6.78 -	6.93 -	1183 -
2071-2100 sans glace	2.24 -	4.08 -	5.59 -	7.08 -	7.86 -	8.16 -	1118 -

5.4.3. Synthèse sur le futur climat de vagues

Les projections du futur climat de vagues dans le golfe du Saint-Laurent à partir des vents MRCC-aev/ahj et en considérant l'atténuation des vagues par la glace selon les sorties du modèles MOR ou les méthodes empiriques laissent surtout présager une hausse des hauteurs de vagues extrêmes à la fin du 21^e siècle par rapport au passé-récent (1981-2010). La Figure 81 montre l'évolution des hauteurs significatives de vagues de période retour de 50 ans aux 5 sites d'études avec les 4 périodes climatiques de référence (1981-2010, 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100). Similairement, les Figures 82 et 83 montrent respectivement les hauteurs significatives de la fréquence de dépassement 0,1% et de l'énergie moyenne des vagues.

Pour la période de retour de 50 ans, la tendance temporelle globale est effectivement positive en prenant les deux périodes extrêmes (1981-2010 et 2071-2100), mais se complexifie si les périodes intermédiaires sont également prises en compte (Figure 81). La hausse est évidente à Cap d'Espoir (vents aev et ahj) et à Sept-Îles (ahj). La hausse est nettement moins marquée à Saint-Ulric (aev), Sept-Îles (aev), Mont-Louis (ahj). Les changements varient fortement d'une période à l'autre à Saint-Ulric (ahj), Mont-Louis (aev) et à Point-aux-Loups (aev et ahj). De plus, les intervalles de confiance associés à la période de retour de 50 ans ne sont pas représentés sur la Figure 81; ils sont typiquement entre 1 et 2,5 m, soit du même ordre de grandeur que les variations observées d'une période à l'autre (cf. Figure 78).

La tendance à la hausse du climat de vagues résulte de la combinaison de deux facteurs. (1) Des changements dans le vent, ce qui est illustré par les variations des vagues sans aucune glace (courbes rouges sur la Figure 81). Celles-ci augmentent nettement au site B (aev et ahj), au site C (seulement ahj) et au site IMC (seulement ahj), pour les autres sites les vents sont constants ou en diminution. (2) La réduction importante voire la disparition complète de l'atténuation des vagues par la glace sur le golfe du Saint-Laurent avant la fin du 21^e siècle. En effet, à la Figure 81 les courbes vertes (atténuation avec MOR) et bleues (atténuation avec les relations empiriques) se rapprochent de plus en plus de la courbe rouge (sans atténuation) avec le temps. Ceci est plus évident pour les courbes vertes dont la plupart sont superposées aux courbes rouges dès la période 2041-2070. Ainsi, l'intégration de l'atténuation de la glace dans les scénarios futurs de vagues sur le golfe du Saint-Laurent n'est peut-être pas nécessaire puisque le scénario extrême (aucune atténuation), s'approche des scénarios considérant la glace.

Les tendances sont similaires pour la fréquence de dépassement 0,1%, qui correspond environ à la plus forte tempête observée tous les 6 mois (Figure 82). Par contre, l'impact de la disparition de la couverture de glace est plus marqué sur l'énergie moyenne des vagues. Si aucune atténuation de la glace est considérée, l'énergie des vagues est relativement stable entre les différentes périodes de 30 ans (trait rouge sur la Figure 83). L'énergie des vagues modélisées avec l'atténuation de la glace augmente clairement à tous les sites durant le XXI^e siècle. Des vagues hivernales moyennes à fortes, qui n'influencent pas les périodes de retour des tempêtes mais qui pèsent sur la moyenne de l'énergie, ont été bloquées dans le passé par la glace, mais pourront se développer dans le futur.

Les Figures 84 à 98 présentent les roses de vagues aux cinq sites d'études avec les deux simulations de vents (MRCC-aev et MRCC-ahj), ainsi que les différences entre les roses de vagues des trois périodes. Les limites de l'échelle de couleur des roses des vagues varient d'un

site à l'autre. Les six scénarios de glace disponibles pour toute la période sont utilisés pour les formules empiriques d'atténuation des vagues.

Les Figures 86, 89, 92, 95 et 98 présentent les différences entre les périodes (2041-2070 vs 1981-2010, et 2071-2100 vs 1981-2010), les barres sur le cercle extérieur représentent la variation de la fréquence de la plus grande classe de vagues dans chaque direction. Similairement les barres du cercle intermédiaire sont pour la deuxième plus grande classe de vagues et celles du cercle intérieur pour la troisième classe. La taille des barres est proportionnelle à la différence de fréquence, une augmentation de fréquence étant représentée en bleu avec une barre vers l'extérieur et une diminution en rouge avec une barre vers l'intérieur. L'échelle des tailles varie pour chacun des cercles (ou classe de vagues); le texte en haut à droite indique les trois classes de vagues représentées et pour chacune la valeur pour la barre d'échelle bleu adjacente. Les variations de provenance des événements extrêmes se retrouvent sur le cercle extérieur.

Les roses de vagues ne changent que peu d'une période à l'autre. Cela s'explique par le fait qu'elles sont déterminées par les vents et les distances de fetch, et que ces dernières sont invariables (à l'échelle de temps étudiée). Des fines variations existent néanmoins, qui sont bien visible sur les figures de différences des roses des vagues. On constate généralement un renforcement des directions dominantes :

- À Saint-Ulric (site A), les grandes vagues deviennent plus fréquentes surtout de l'ouest-sud-ouest (dans l'axe de l'estuaire) et du nord/nord-est.
- C'est à Cap d'Espoir (site B) que les changements sont les plus disparates entre les différents scénarios de glace et de vent; avec MRCC-aev les fréquences des grandes vagues de l'est/est-nord-est augmentent, alors qu'avec MRCC-ahj ce sont celles du sud-est/sud-sud-est. Cela peut être lié à la grande ouverture du site sur le golfe.
- À Sept-Îles (site C), avec MRCC-aev les grandes vagues du sud-ouest/sud-sud-ouest (de l'estuaire) deviennent plus fréquentes, et avec MRCC-ahj 2071-2100 également celles du sud-est (du détroit d'Honguedo).
- À Mont-Louis (site ML), les grandes vagues deviennent plus fréquentes surtout de l'ouest-sud-ouest (de l'estuaire).
- À Pointe-aux-Loups (site IMC), les grandes vagues deviennent plus fréquentes surtout du sud-ouest/ouest avec, pour les vents MRCC-aev, une diminution des vagues du nord-ouest.

Néanmoins, il faut souligner que les différences de roses de vagues varient parfois fortement entre les périodes (2041-2070 et 2071-2100) et entre les différents scénarios de glace, qui déterminent quelles tempêtes hivernales peuvent créer des vagues. Il ne faut donc pas s'attacher à chaque détail de chaque diagramme de différences et interpréter l'ensemble avec une certaine prudence.

Dans la dernière décennie, d'autres études portant sur l'impact des changements climatiques selon différents scénarios sur la climatologie des vagues (globale ou régionale) ont essayé de simuler le futur climat de vagues pour différentes régions du monde où les interactions vagues-glace ne sont pas importantes. Leurs résultats anticipent autant des réductions que des augmentations des hauteurs de vagues (Wang et al., 2004; Wang et Swail, 2006; Mori et al.,

2010; Debernard et Roed, 2008; Hemer et al. 2012, De Winter et al., 2012). Les changements dans les champs de vents pourraient donc également expliquer une part des changements perçus dans le climat de vagues du golfe du Saint-Laurent entre 2010 et 2100.

Pour la présente étude, seul le scénario de changement climatique A2 a été utilisé parmi les différents disponibles. Les résultats ne couvrent donc pas tout le spectre des possibilités d'évolution du climat. Néanmoins, ce scénario est généralement considéré comme réaliste, bien qu'assez pessimiste (émissions de gaz à effet de serre élevées, cf. section 2.4.2). Ce choix a peut-être amplifié l'impact possible des changements climatiques sur le climat de vagues (Charles et al., 2012).

Même s'ils sont basés sur le même scénario de changements climatiques (A2), des écarts non négligeables entre les vents issus des simulations MRCC-aev et MRCC-ahj ont été remarqués. Il n'est donc pas surprenant de retrouver des écarts importants dans les climats de vagues basés sur les vents de ces mêmes simulations (par exemple, plus d'un mètre pour Sept-Îles). Wang et Swail (2006) ont mis en évidence comment des modèles climatiques différents peuvent occasionner des écarts dans les climats de vagues bien que basés sur un même scénario de changements climatiques. Les simulations aev et ahj proviennent du même modèle régional, mais le forçage externe par un modèle climatique global est différent dans les deux cas, ce qui expliquerait les écarts obtenus. Les comparaisons des simulations de vagues MRCC avec le climat de vagues 1981-2010 issu de la réanalyse MERRA_{corr} ont montré également des écarts importants (section 5.3). *Les variations passé-futur des hauteurs de vagues produites avec les vents MRCC sont sans doute significatives, mais il ne faut pas utiliser simplement les valeurs absolues de hauteurs de vagues obtenues avec une simulation climatique.* Il pourrait donc être pertinent, dans des travaux futurs, de corriger le biais dans les séries de vagues climatiques comme l'ont fait Charles et al. (2012). Cela pourrait éventuellement réduire les incertitudes dans les projections climatiques.

De plus, la présente étude est basée sur seulement deux simulations de vents (MRCC-aev et MRCC-ahj), qui diffèrent significativement. Il faudrait répéter cette étude quand d'autres simulations régionales de vent seront disponibles, car actuellement avec $n = 2$ il n'est pas possible de savoir si les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj sont dans la moyenne des projections, ou s'ils sortent du lot.

Ici, seuls les changements dans le climat de vagues annuel ont été étudiés. Or, le climat de vagues varie d'une saison à l'autre. Dans le passé récent, la période avec les tempêtes les plus importantes dans le golfe du Saint-Laurent s'étendait de la fin de l'automne jusqu'au début du printemps (Wang et Swail, 2006; Hundedcha et al., 2008). Il pourrait également être pertinent étudier l'évolution dans le temps de la variabilité inter-saisonnière du climat de vagues. Par exemple, Casas-Prat et Sierra (2011) ont étudié des scénarios futurs de vagues sur le nord-ouest de la Méditerranée et ils ont constaté qu'en plus des changements sur le climat de vagues annuel (réduction des hauteurs de vagues), il y avait des changements saisonniers (augmentation des hauteurs de vagues le printemps/été et diminution pour l'automne/hiver).

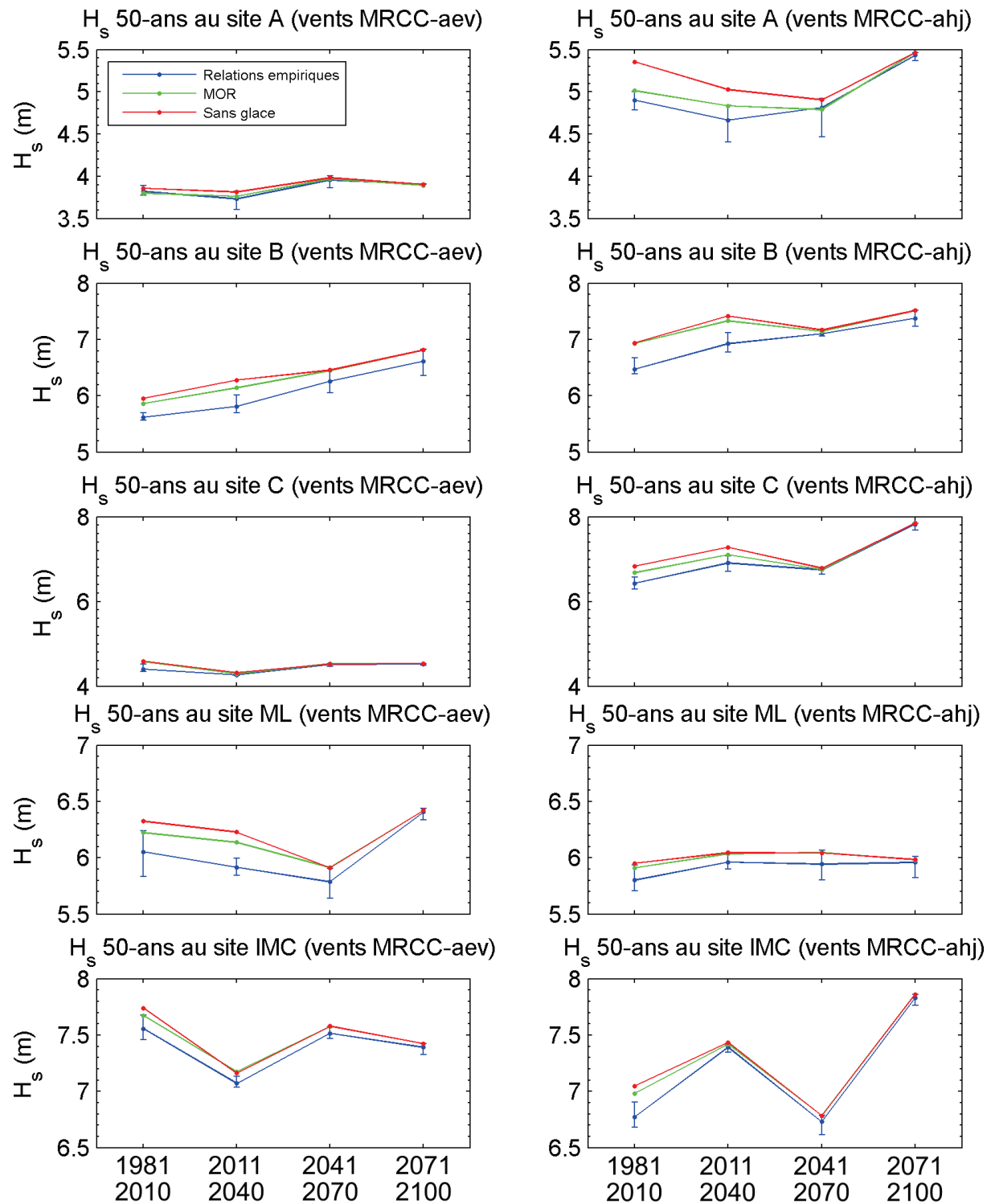


Figure 81. Évolution temporelle des climats de vagues (hauteur de la période de retour de 50 ans) sur des périodes de 30 ans pour les vents MRCC-aev et MRCC-ahj et pour les cinq sites d'études (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du modèle MOR (en vert), sans aucune atténuation en rouge.

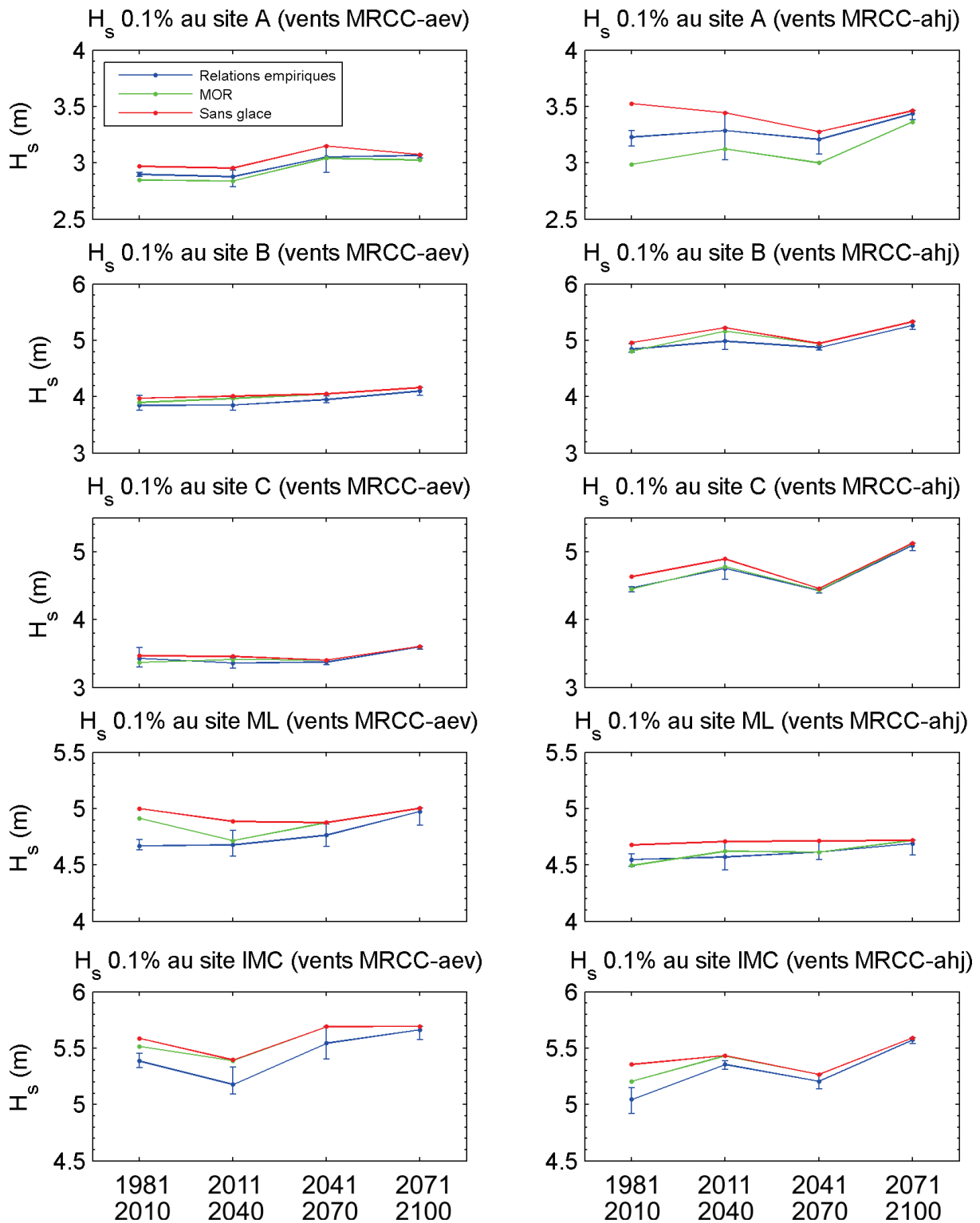


Figure 82. Évolution temporelle des climats de vagues (hauteur de fréquence de dépassement 0.1%) sur des périodes de 30 ans pour les vents MRCC-aev et MRCC-ahj et pour les cinq sites d'études (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du modèle MOR (en vert), sans aucune atténuation en rouge.

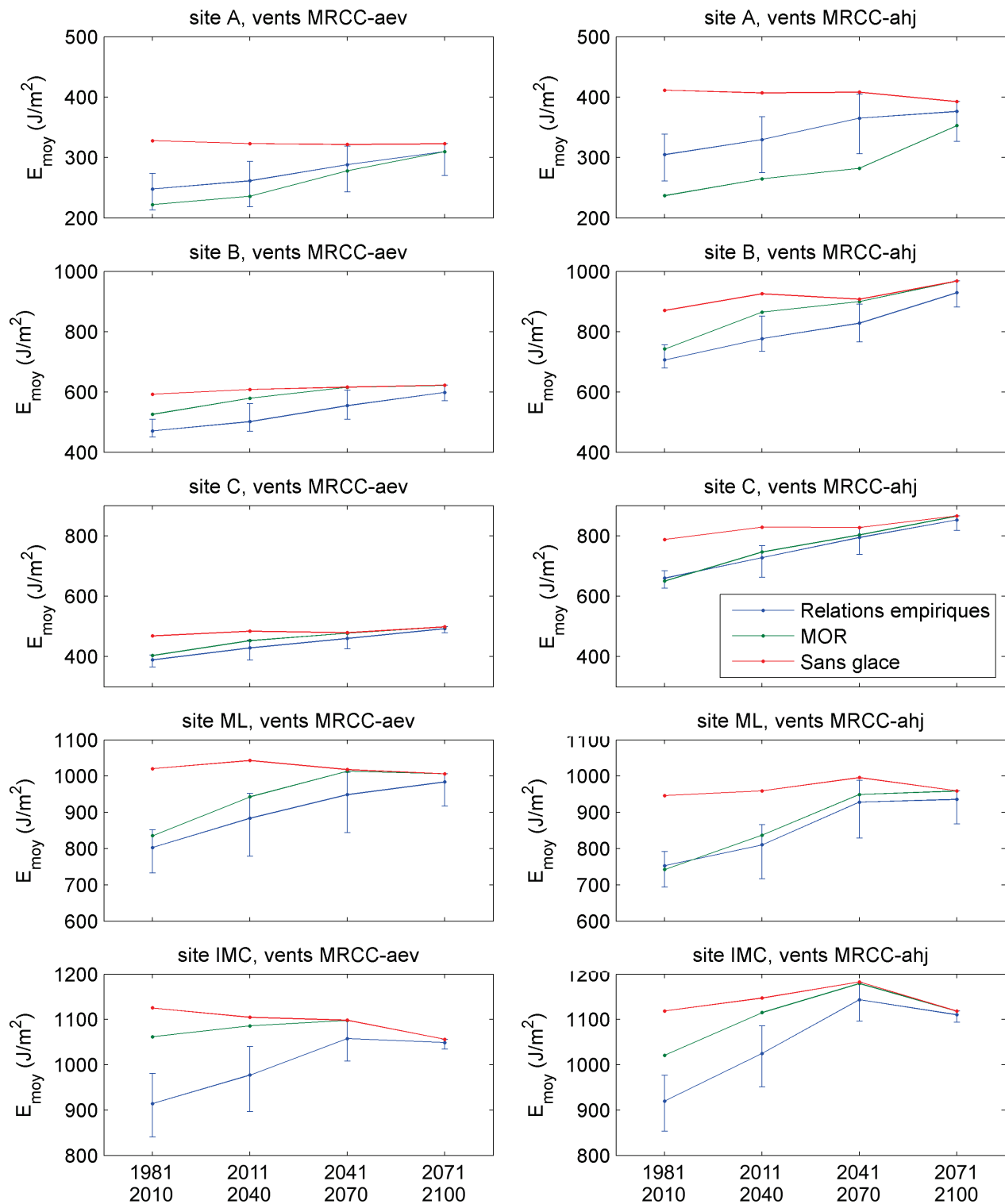


Figure 83. Évolution temporelle des climats de vagues (énergie moyenne des vagues) sur des périodes de 30 ans pour les vents MRCC-aev et MRCC-ahj et pour les cinq sites d'études (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du modèle MOR (en vert), sans aucune atténuation en rouge.

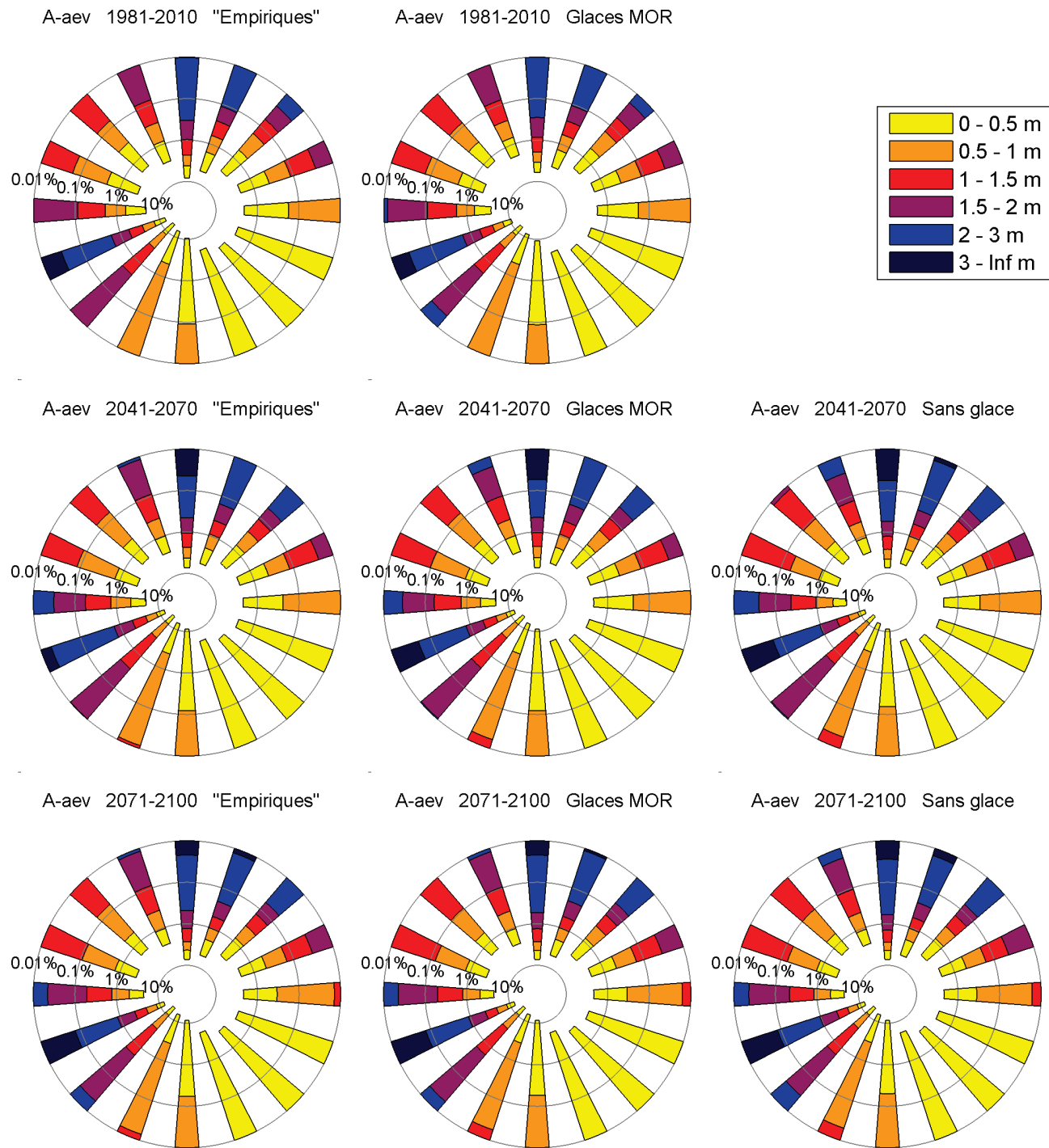


Figure 84. Roses de vagues à Saint-Ulric avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

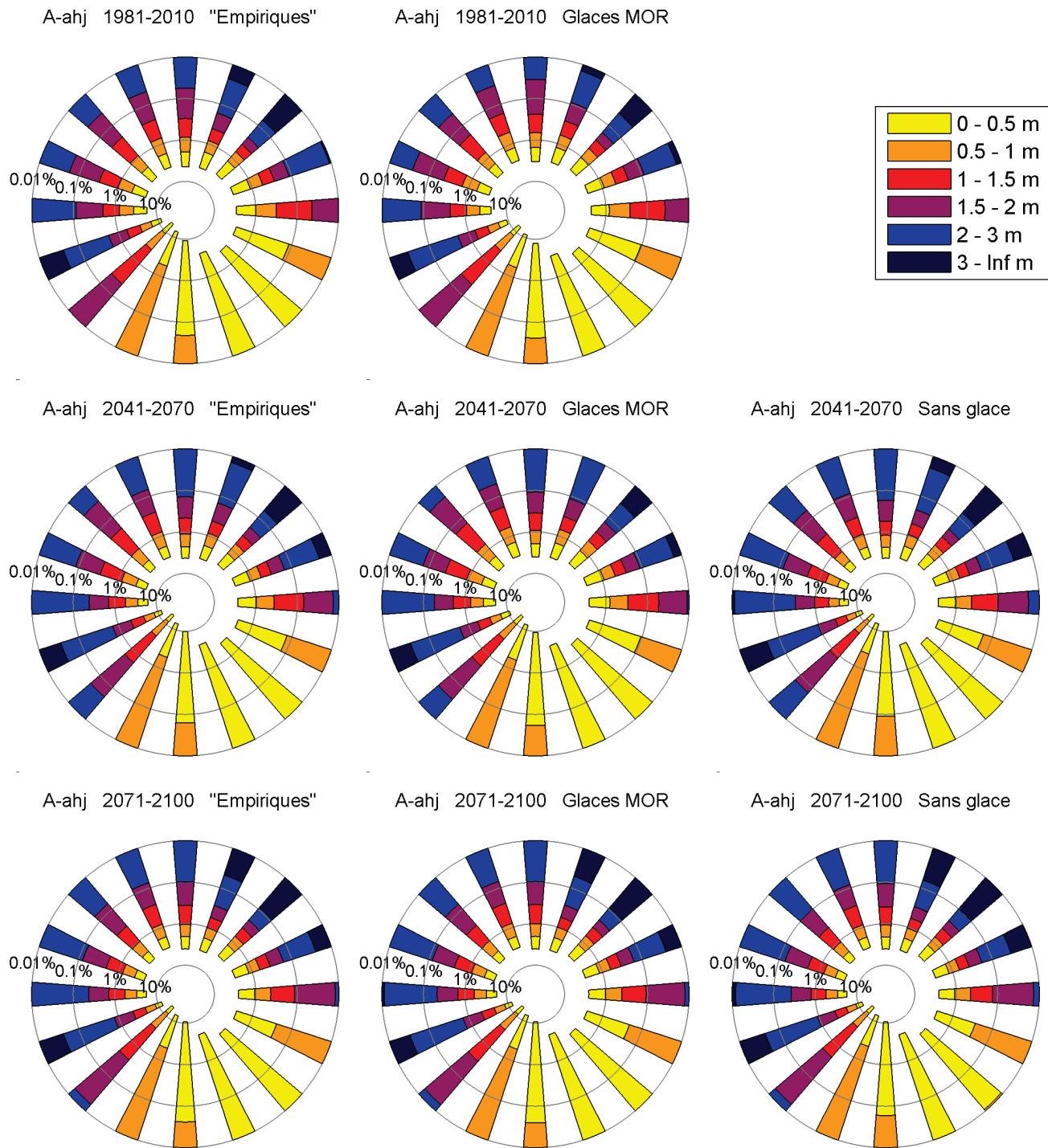


Figure 85. Roses de vagues à Saint-Ulric avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

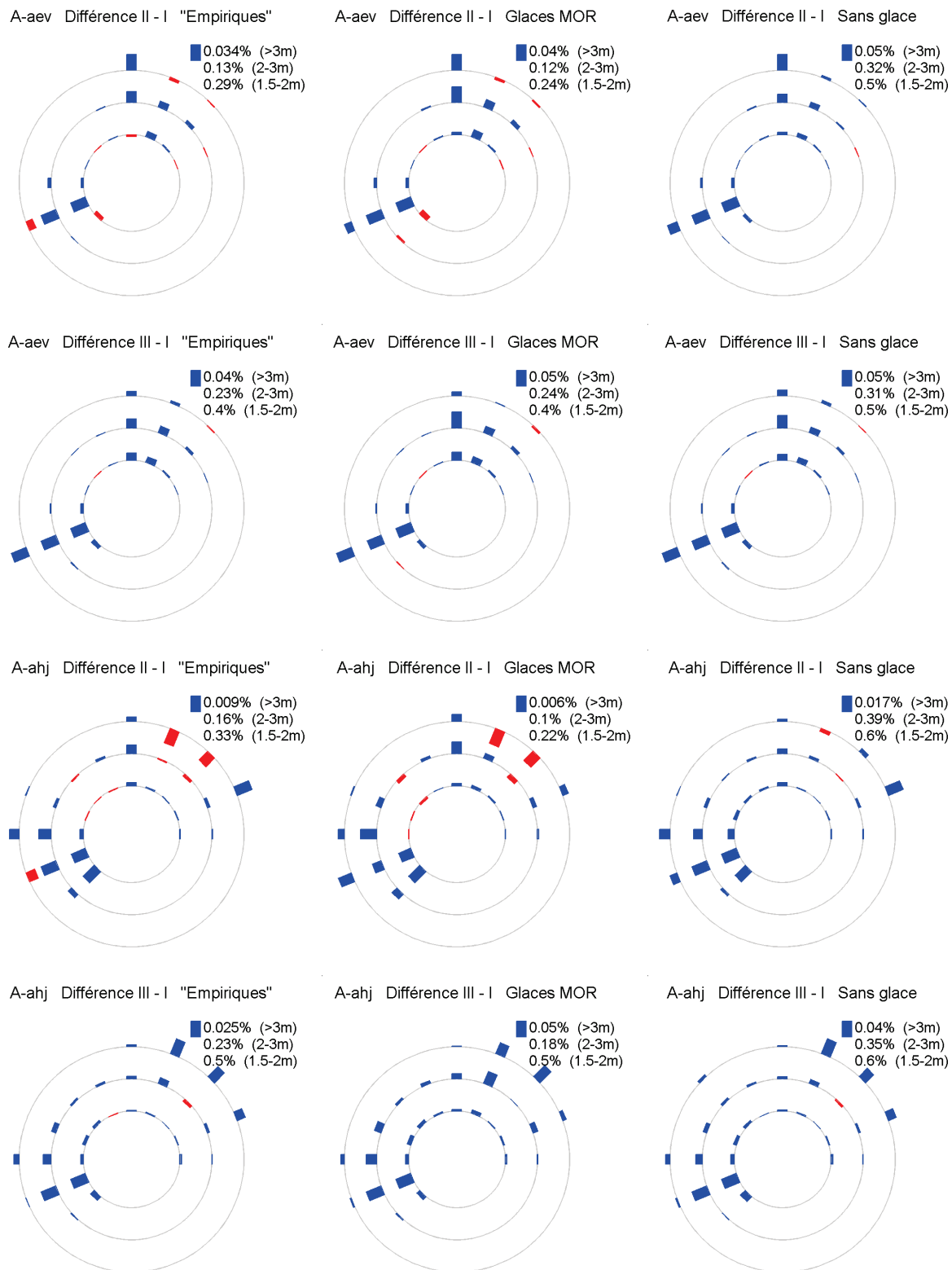


Figure 86. Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 184 pour les explications.

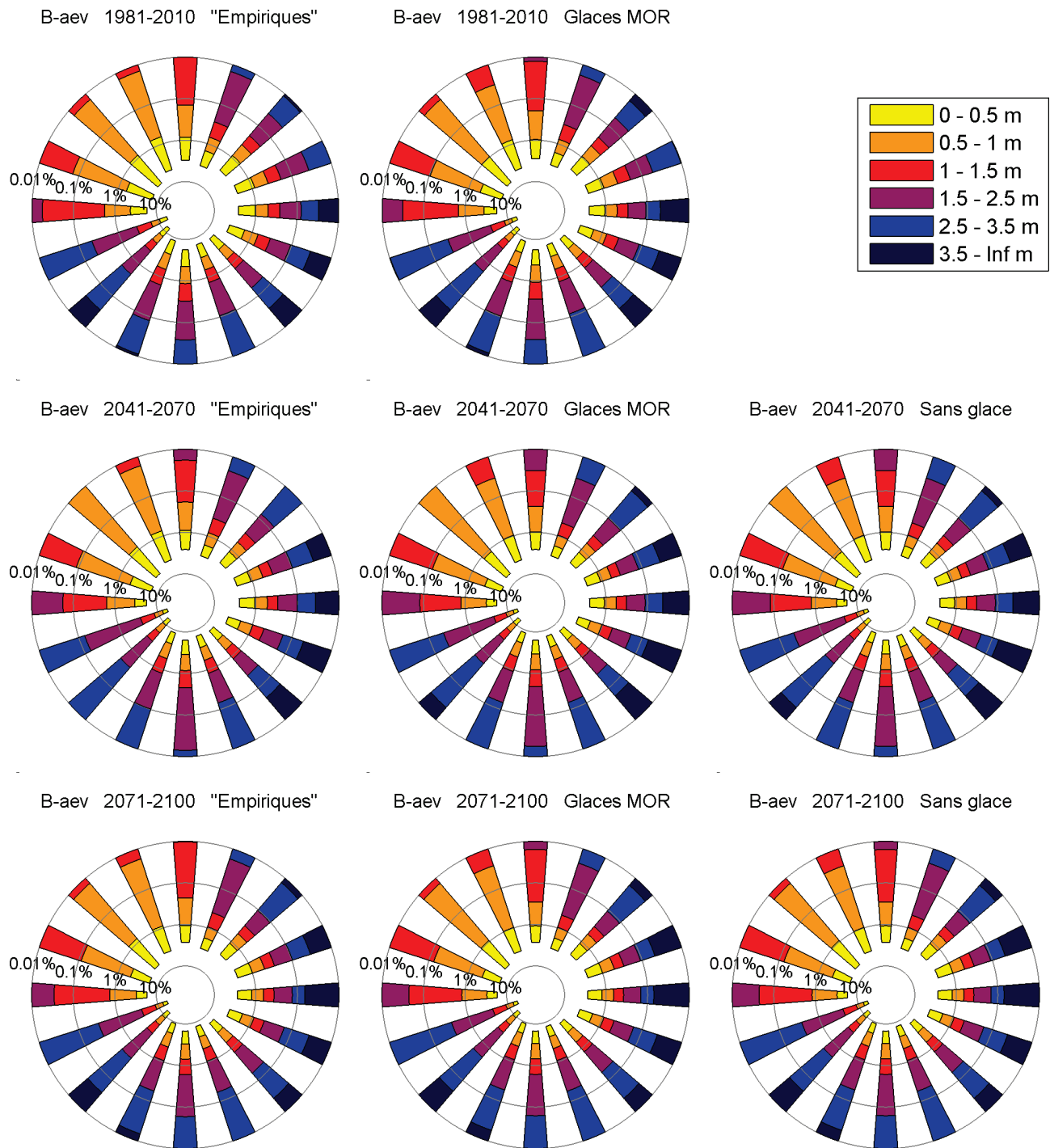


Figure 87. Roses de vagues à Cap d'Espoir avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

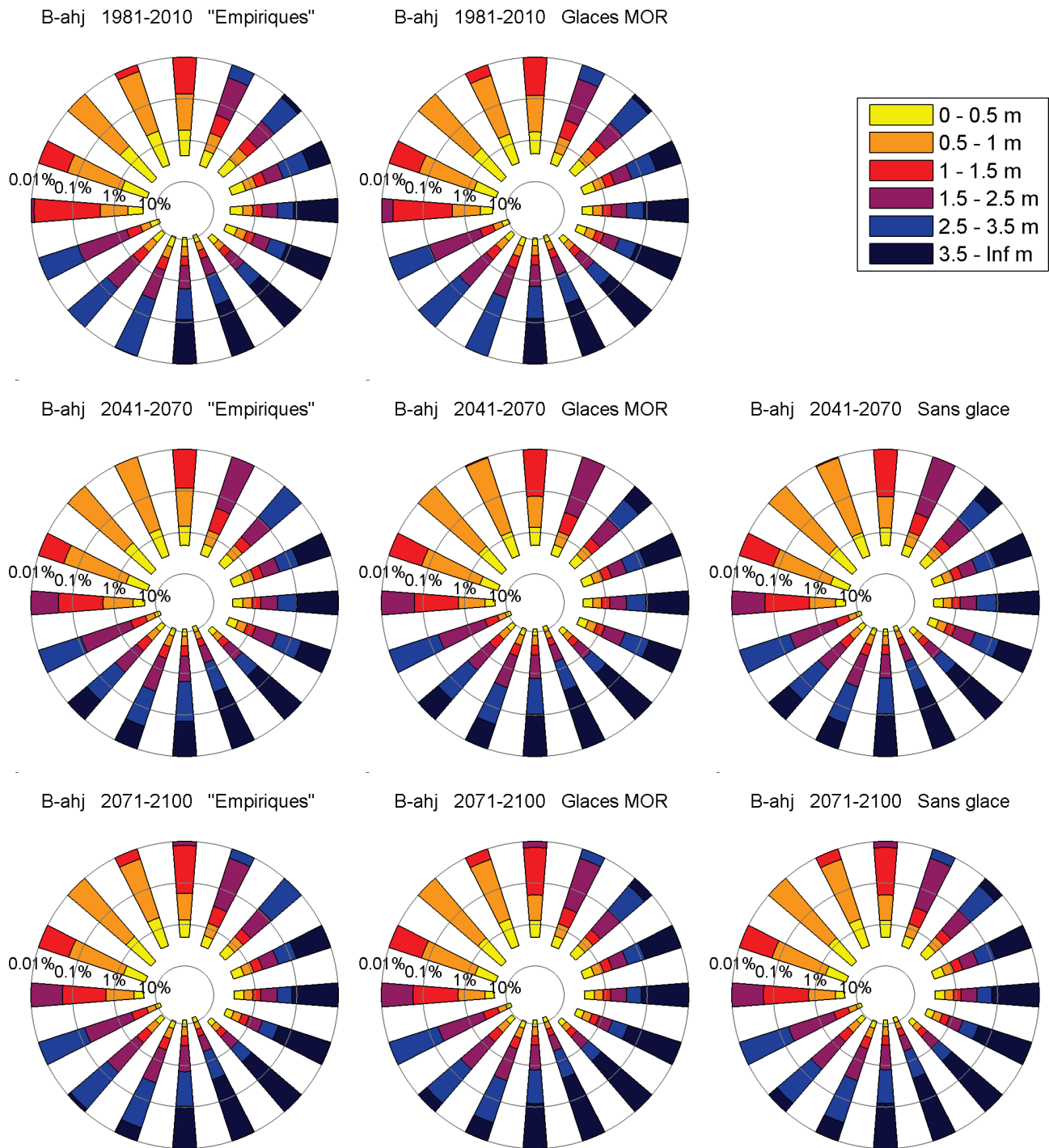


Figure 88. Roses de vagues à Cap d'Espoir avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

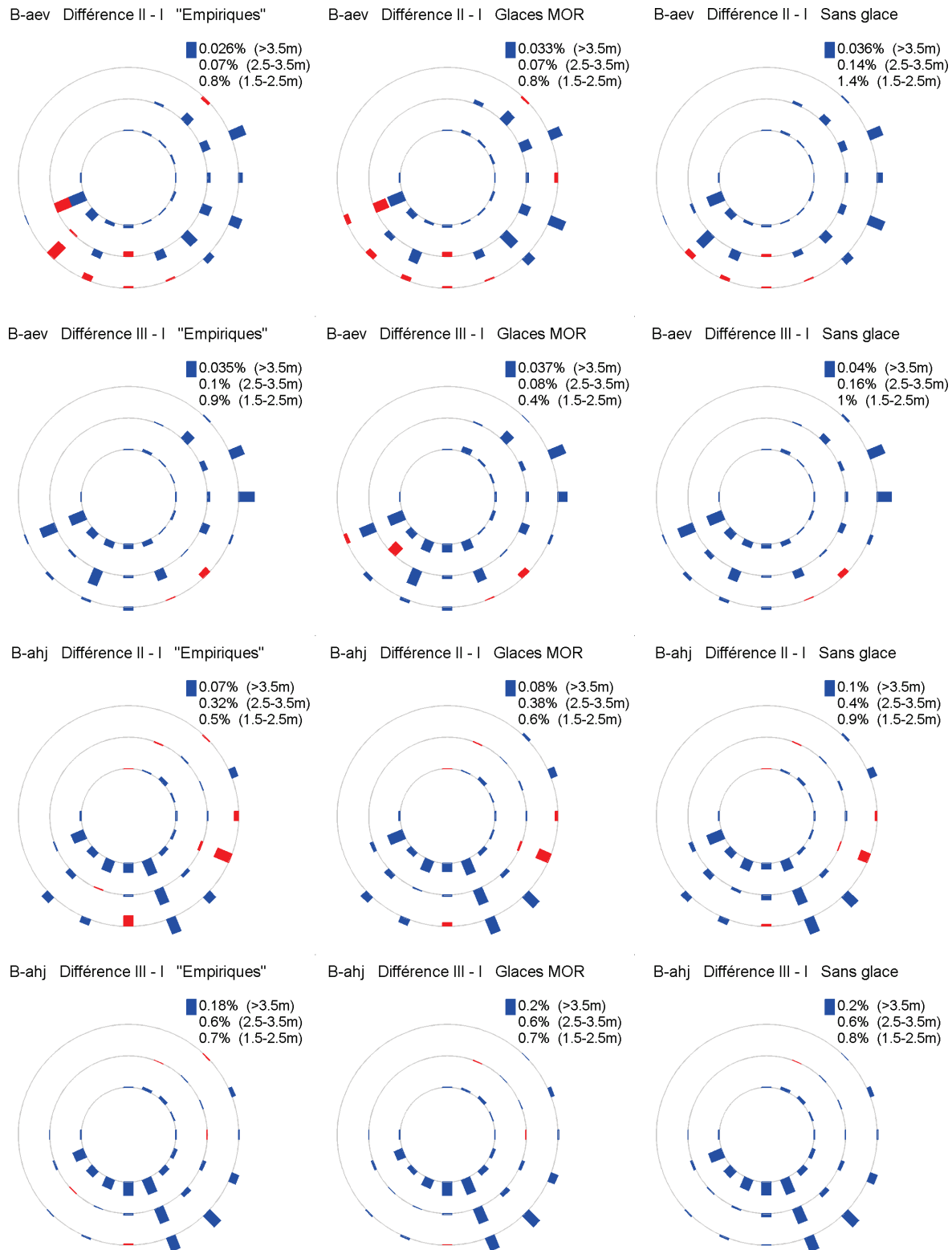


Figure 89. Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 184 pour les explications.

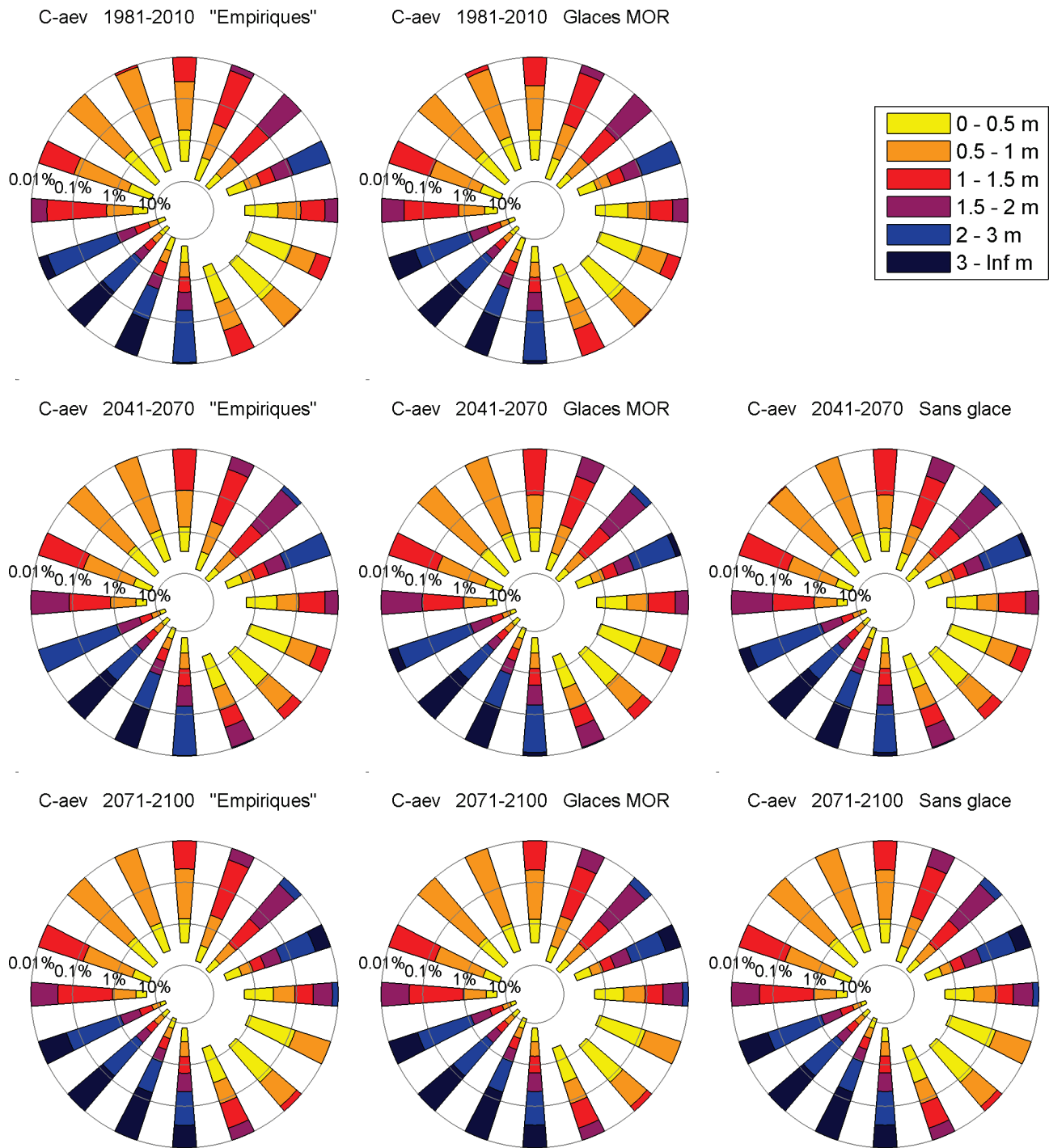


Figure 90. Roses de vagues à Sept-Îles avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

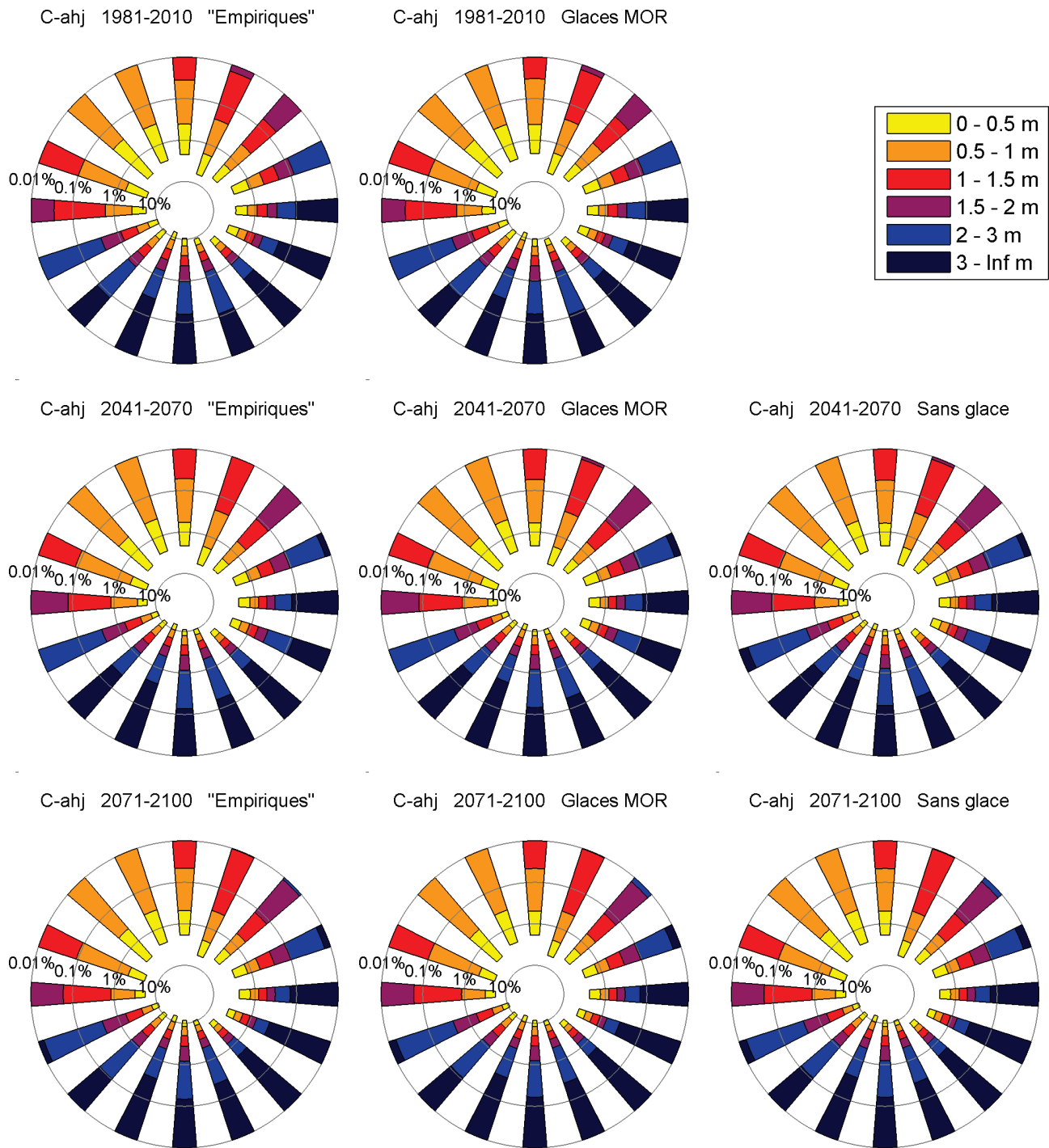


Figure 91. Roses de vagues à Sept-Îles avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

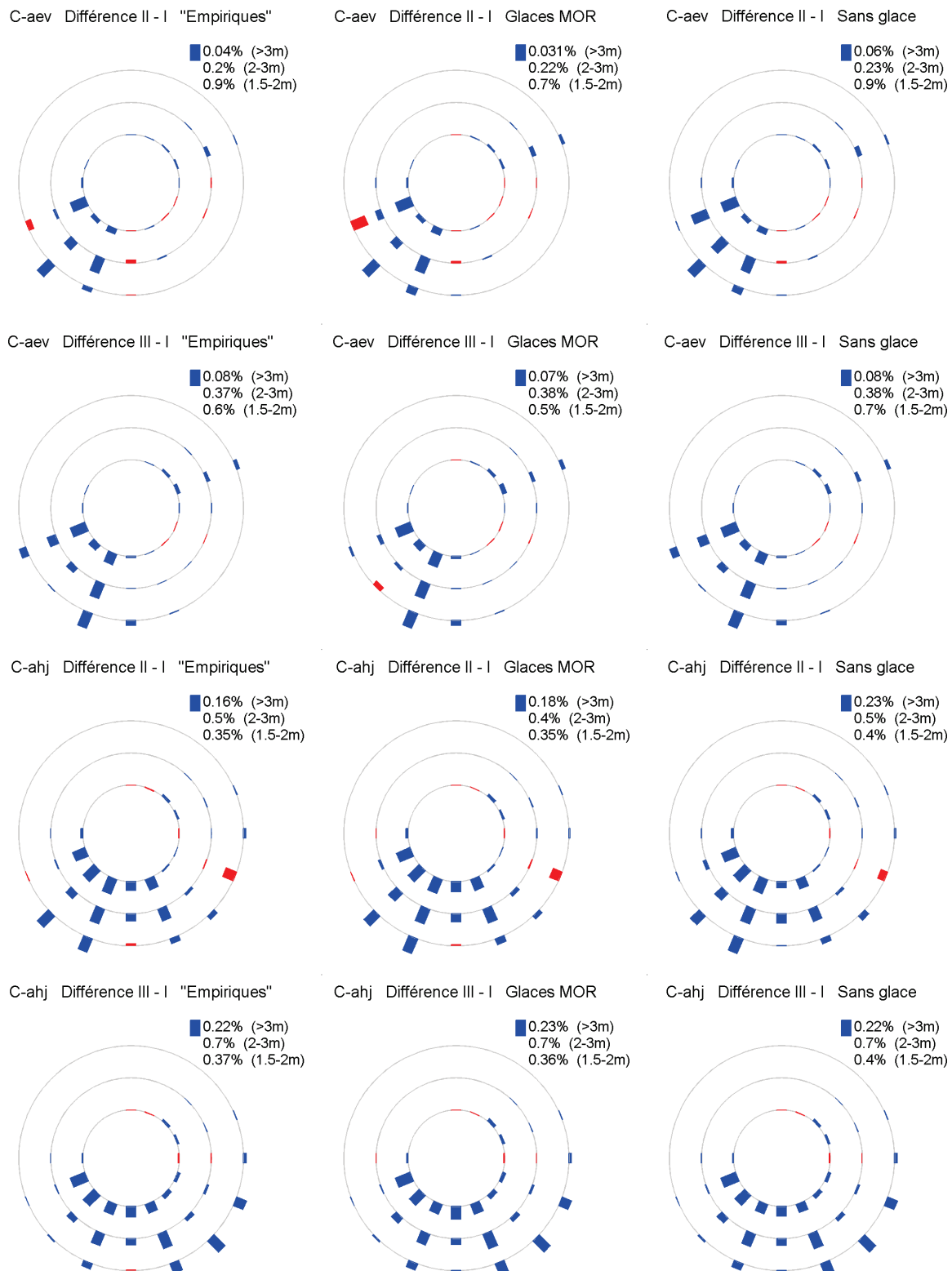


Figure 92. Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Sept-Îles avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 184 pour les explications.

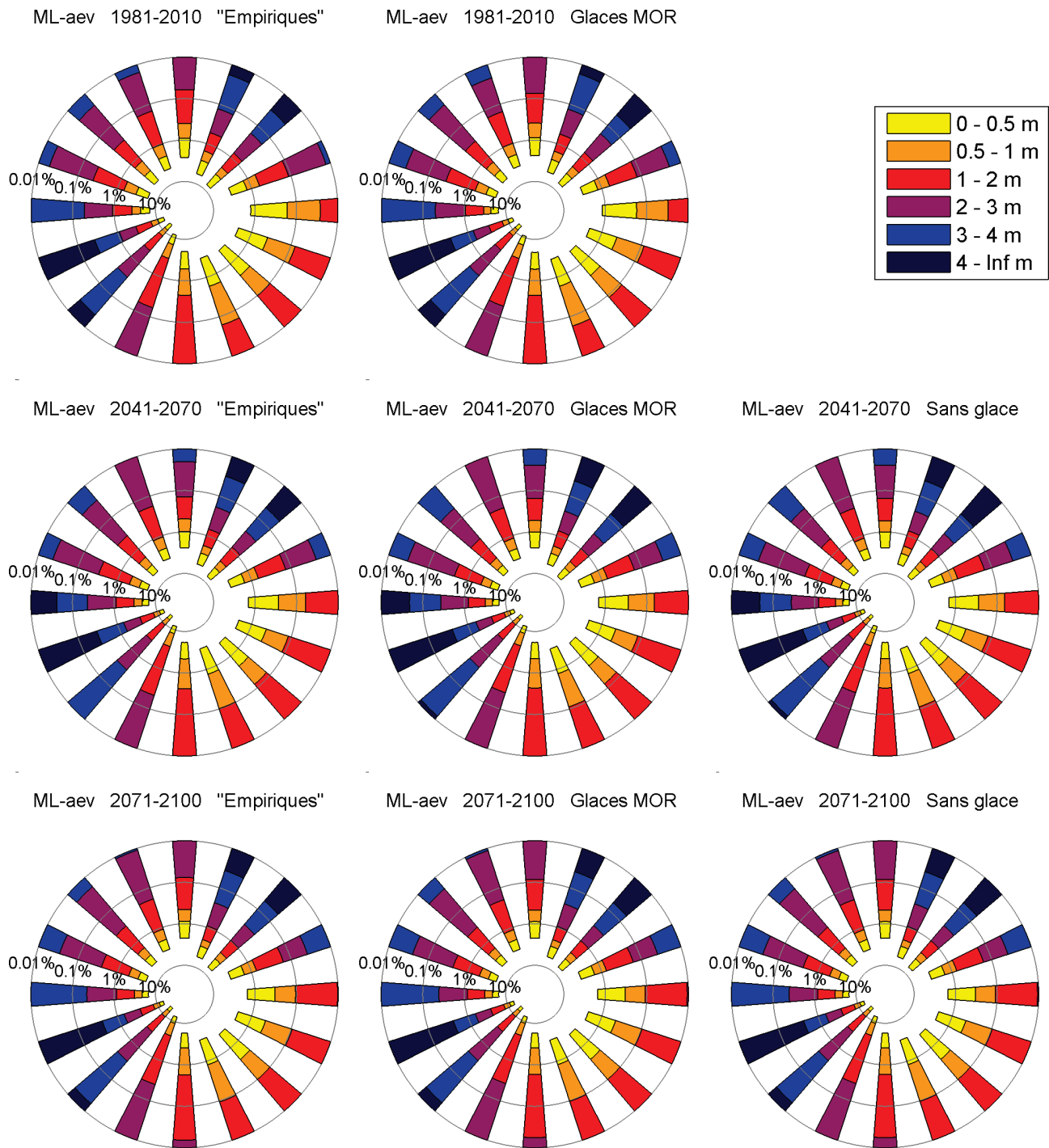


Figure 93. Roses de vagues à Mont-Louis avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

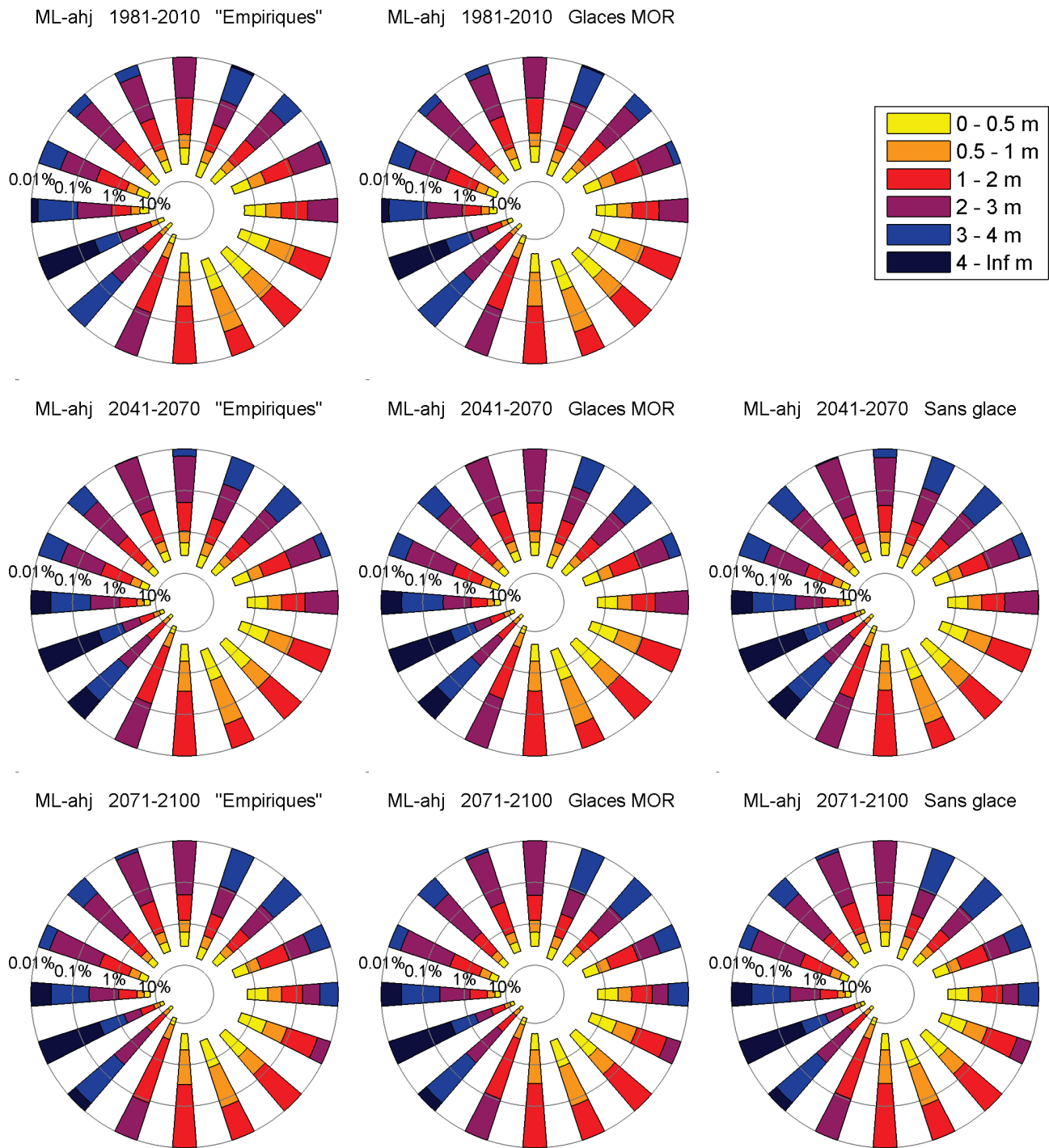


Figure 94. Roses de vagues à Mont-Louis avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

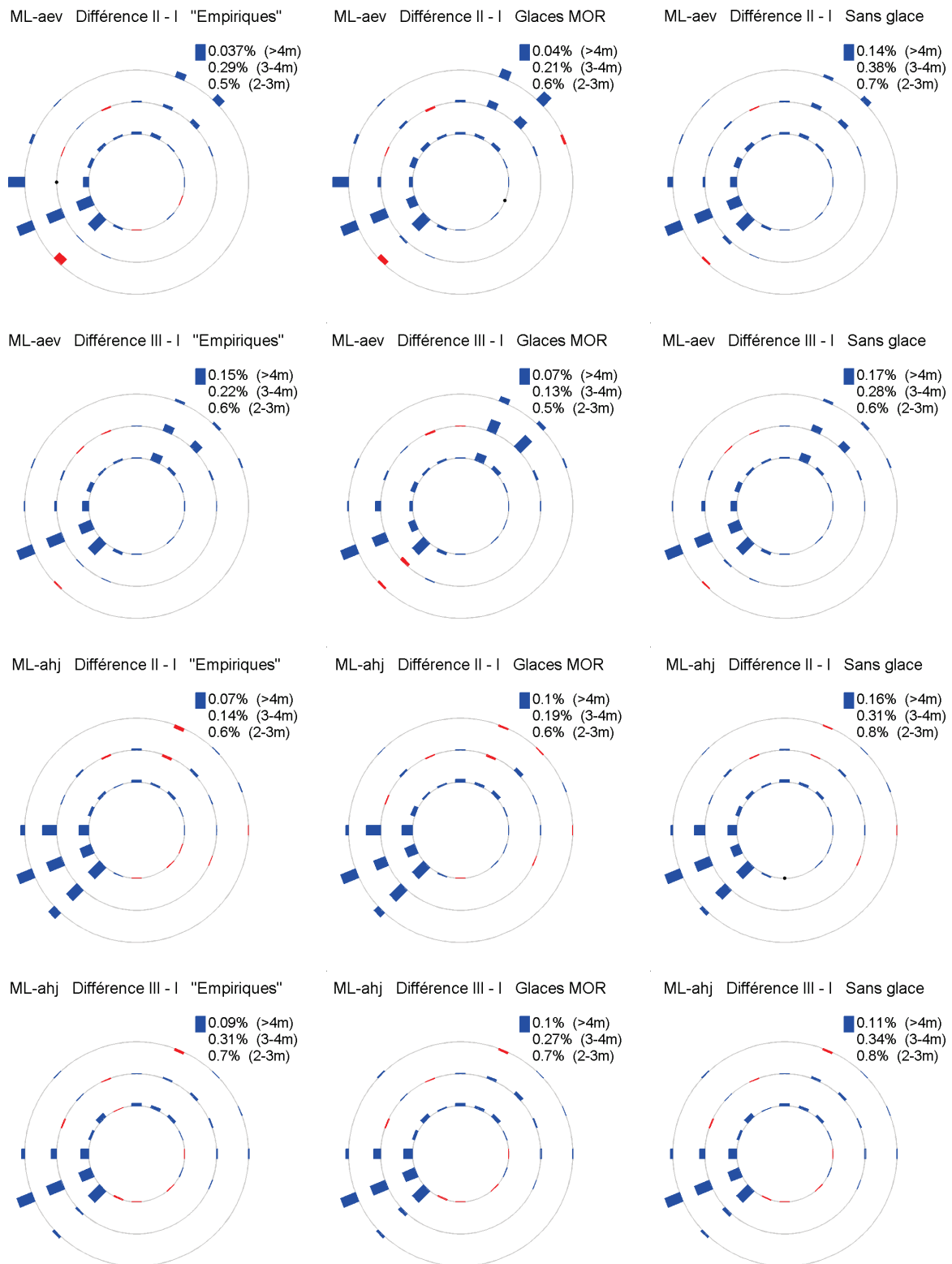


Figure 95. Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Mont-Louis avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 184 pour les explications.

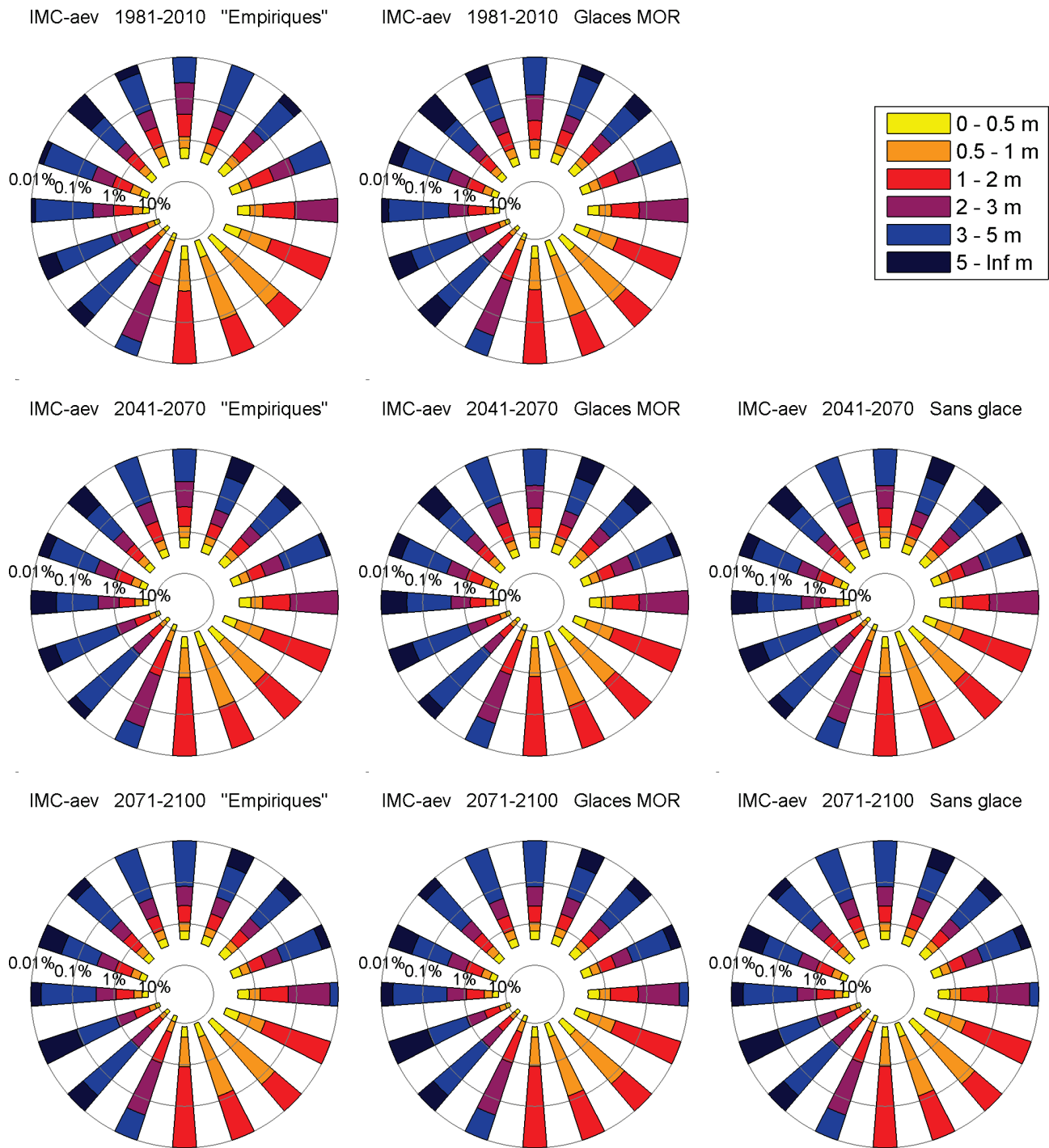


Figure 96. Roses de vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

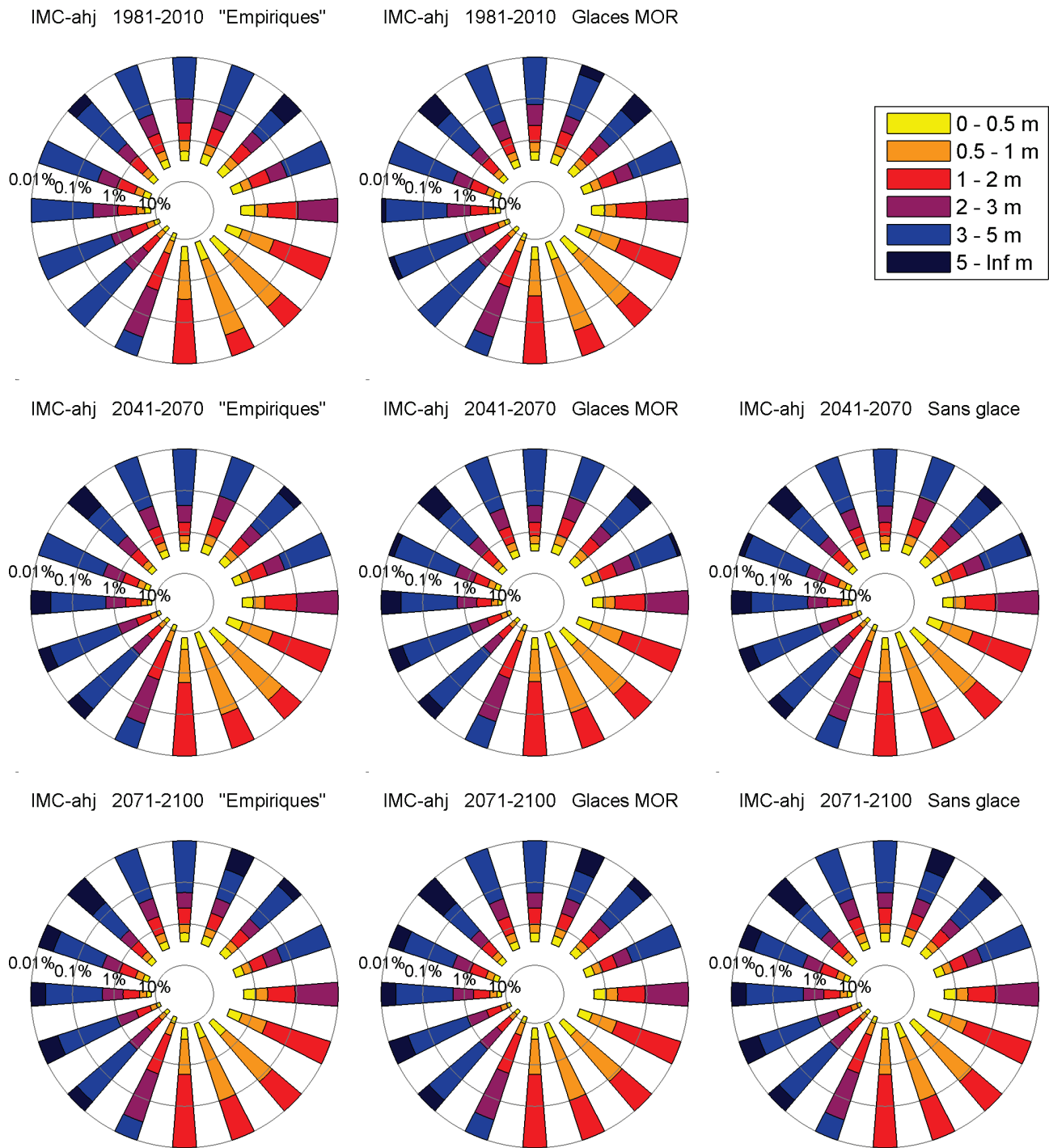


Figure 97. Roses de vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace (aucune atténuation).

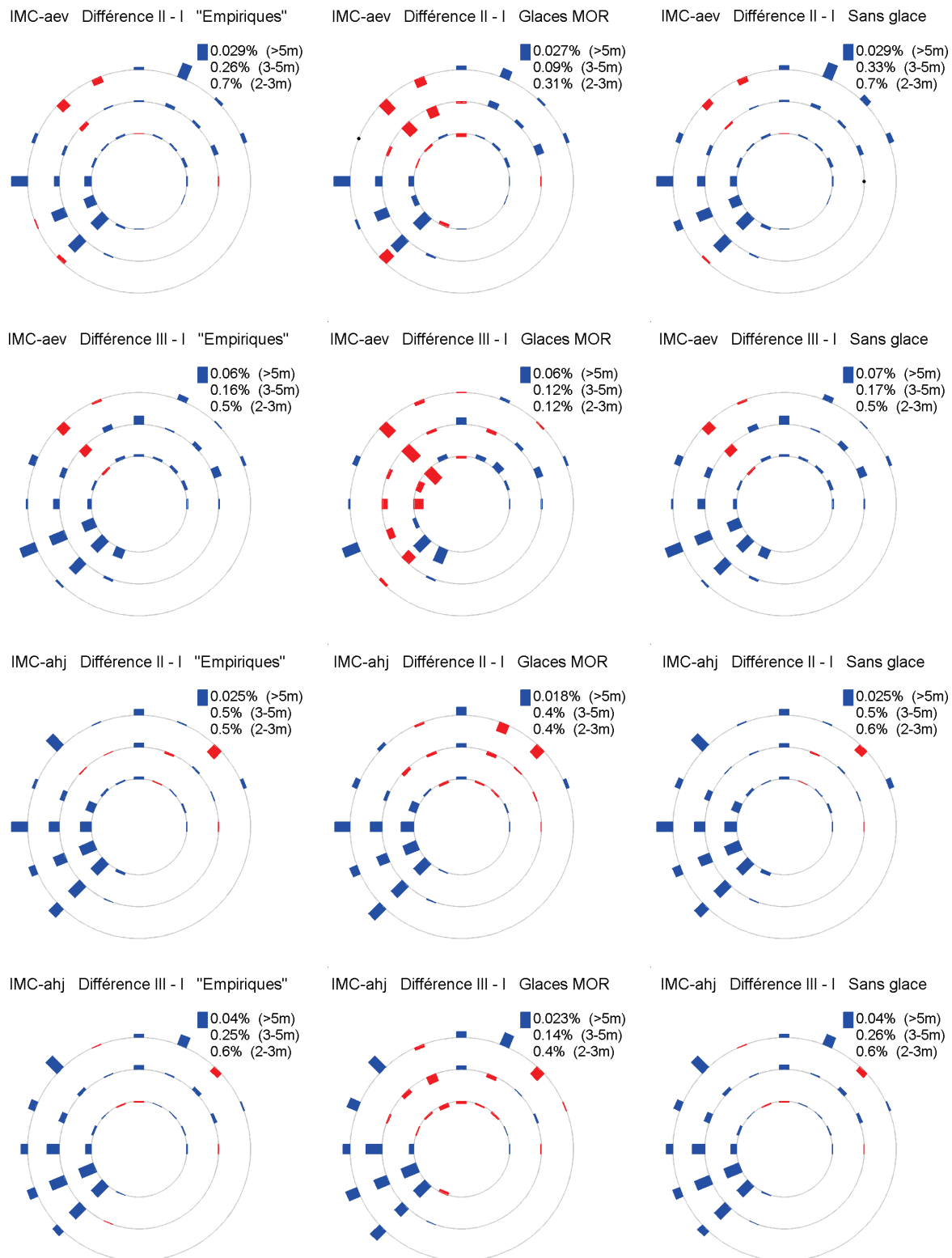


Figure 98. Différence entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents MRCC-aev/ahj et pour trois versions d'atténuation des vagues par la glace : (gauche) avec les formules empiriques, (centre) selon le modèle de glace MOR, et (droite) en absence de glace. Voir texte p. 184 pour les explications.

6. Conclusions

La validation du modèle EC a montré que celui-ci représente relativement bien les hauteurs de vagues dans l'estuaire maritime (Saint-Ulric), mais qu'il surestimait les hauteurs dans le golfe (Cap d'Espoir et Sept-Îles) d'un facteur $\sim 1,5$. Le modèle EC a de la difficulté à bien prédire les périodes et les directions des petites vagues (forte dispersion et surévaluation générale). Néanmoins, les résultats sont satisfaisants pour les périodes des plus hautes vagues, quoiqu'avec encore une forte surévaluation des périodes proportionnelle à la hauteur pour les sites du golfe, et une faible surévaluation pour Saint-Ulric. Les directions sont correctement prédites pour Sept-Îles mais elles présentent une forte dispersion pour Cap d'Espoir et Saint-Ulric. Les directions des plus hautes vagues sont correctement représentées pour les sites du golfe, mais pas pour Saint-Ulric.

Il existe donc une dichotomie dans les prédictions réalisées pour les sites du golfe et celui de l'estuaire. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette différence : le modèle EC utilise les vents GEM à 40 m (au lieu des vents à 10 m) sur une grille de 35 km, qui résout différemment la morphologie de l'estuaire et du golfe; les fetchs sont plus long dans le golfe et l'âge des vagues atteignant Cap d'Espoir et Sept-Îles est plus important que celui des vagues affectant Saint-Ulric; et Saint-Ulric reçoit de l'énergie des vagues générées dans le golfe et ayant lentement tournées autour du nord de la Gaspésie, ce qui n'est pas simple à bien représenter en modélisation.

Il était prévu initialement de valider GENER avec le modèle EC, mais à cause des surévaluations du modèle EC dans le golfe, GENER a finalement été validé directement avec les vagues mesurées (stations AWAC et bouée de Mont-Louis).

La validation de la version modifiée de GENER incluant le nouvel algorithme de prétraitement de vent démontre que la formule de fetch SPM84 (Shore Protection Manual 1984) surestime clairement les vagues aux sites de validation (Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Sept-Îles et Mont-Louis), alors que les autres formules produisent des résultats relativement proches des mesures et assez similaires. La formule CEM03 (Coastal Engineering Manual 2003) a été retenue pour ce projet, mais elle ne se démarque pas nettement des autres formules.

Les deux approches pour prédire le futur couvert de glace, les formules empiriques utilisant les degrés-jour de gel et les sorties de glace du modèle MOR, indiquent des tendances similaires pour la période 1970-2070 pour le scénario A2. La durée d'englacement, le couvert de glace et l'atténuation des vagues par les glaces diminueront progressivement. Ils deviendront négligeables à la fin du XXI^e siècle et selon certaines projections de glace déjà vers 2060 à Cap d'Espoir, Sept-Îles et Mont-Louis, ainsi que vers 2030 à Pointe-aux-Loups. Toutefois il faut souligner la grande variabilité qu'il existe entre les différentes projections de glace. Malgré cette incertitude, l'atténuation des vagues par la glace pourrait probablement être ignorée pour des études simplifiées du climat des vagues au large à partir d'environ 2080, sauf dans l'estuaire maritime et le nord de la Gaspésie.

Les vagues produites par GENER avec les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj et atténuées selon les deux approches de prédiction de l'influence de la glace indiquent une hausse du climat des vagues entre les périodes 1981-2010 (passé récent) et 2071-2100 (futur lointain) aux cinq

sites d'étude (Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Sept-Îles, Mont-Louis et Pointe-aux-Loups). La hausse est marquée pour l'énergie moyenne des vagues, elle est plus variable pour les vagues extrêmes, selon les sites, selon les simulations de vents et selon les variantes de projections des glaces, avec par exemple une augmentation entre 5 cm et 1 m pour les hauteurs de période de retour de 50 ans. L'image est moins claire si les périodes intermédiaires 2011-2040 et 2041-2070 sont aussi considérées, avec dans certain cas des baisses passagères des vagues extrêmes (mais pas de l'énergie moyenne des vagues).

La disparition certaine du couvert de glace de mer augmentera les vagues durant la période hivernale. Par conséquence, l'énergie moyenne des vagues augmentera. Pour les vagues extrêmes, bien qu'un maintien des conditions actuelles soit possible, une augmentation des hauteurs de vagues extrêmes est probable pour la deuxième moitié du XXI^e siècle.

Références

- Assel, R.A., 1980. Maximum freezing degree-days as a winter severity index for the great lakes, 1897-1977. *Monthly Weather Review*, 108: 1440–1445.
- Balakrishnan, N., Voinov, V., Nikulin, M.S., 2013. *Chi-Squared Goodness of Fit Tests with Applications*. Academic Press, 256 p.
- Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random wave. *Proc. 16th Conf. Coastal Engineering (Hamburg)*. ASCE, New York, pp. 569–587.
- Bernatchez, P., Dubois, J.M.M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, 58, 45–71.
- Bird, E.C.F., 1985. *Coastline changes : A global review*. Wiley, Chichester, 219 p.
- Bismuth, E., Neumeier, U., Dumont, D., 2012. Impact du couvert de glace sur le régime de vagues du Saint-Laurent. In : *Colloque Québec-Océan*, 7–9 décembre 2012, Montréal.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 1, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104/C4, 7649–7666.
- Bowers, J.A., Morton, I.D., Mould, G.I., 2000. Directional statistics of the wind and waves. *Applied Ocean Research*, 22/1, 13-30.
- Caires, S., Sterl, S., 2005. 100-year return value estimate for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data. *Journal of Climate*, 18, 1032–1048.
- Casas-Prat, M., Sierra, J.P., 2011. Future scenario simulations of wave climate in the NW Mediterranean Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 200–204.
- Cavaleri, L., Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, 86/C11, 10961–10973.
- Caya, D., Laprise, R., 1999. A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM, *Monthly Weather Review*, 127(3), 341–362.
- CERC, 1984. *Shore protection manual*. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers, U.S. Government Printing Office, Washington.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Deque, M., Le Cozannet, G., 2012. Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, 62, 831–848. doi:10.1007/s10236-012-0534-8
- Coles, S., 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer, 208 p.
- Debernard, J.B., Roed, L.P., 2008. Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas: a revisit. *Tellus*, 60A, 427–438. doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00312.x
- Desjardins, L., Ouellet, Y., 1984. Modèles numériques utilisés pour la conception des ouvrages maritimes. *Comptes rendus du Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique*, dans le cadre du 52e congrès annuel de l'ACFAS, 187–224.

- De Winter, R.C., Sterl, A., de Vries, J.W., Weber, S.L., Ruessink, G., 2012. The effect of climate change on extreme waves in front of the Dutch coast. *Ocean Dynamics*, 62, 1139–1152. doi:10.1007/s10236-012-0551-7
- Donelan, M.A., 1980. Similary theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions. In : *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, pp. 47–61.
- Dragani, W.C., Garavento, E., Simionato, C.G., Nunez, M.N., Martin, P., Campos, M.I., 2008. Wave simulation in the outer Rio de la Plata estuary : evaluation of SWAN model. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 134/5, 299–305.
- Dykes, J.D., Wang, D.W., Book, J.W., 2009. An evaluation of a high resolution operational wave forecasting system in the Adriatic sea. *Journal of Marine Systems*, 78, S255-S271.
- Etamad-Shahidi, A., Kazeminarzhad, M.H., Mousavi, S.J., 2009. On the prediction of wave parameters using simplified method. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 505–509.
- Fisher, N.I., 1993. *Statistical analysis of circular data*. Cambridge: Cambridge University Press, 277 p.
- Frequet, D., 2005. *MANICE, Manuel des normes d'observation des glaces*. 9e édition. Service canadien des glaces, Environnement Canada, Ottawa, 155 p.
- GIEC, 2007. Résumé à l'intention des décideurs. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M., Miller H.L., (éds.). *Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gorrell, L., Raubenheimer, B., Elgar, S., Guza, R.T., 2011. SWAN predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry. *Coastal Engineering*, 58, 510–516.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungsheft A12*.
- Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 387 p.
- Hundecka, Y., St-Hilaire, A., Ouarda, T.B.M.J., El Adlouni, S., Gachon, P., 2008. A nonstationary extreme value analysis for the assessment of changes in extreme annual wind speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 2745–2759.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.
- Hanson, J.L., Tracy, B.A., Tolman, H.L., Douglas Scott, R., 2009. Pacific hindcast of three numerical wave models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 1614–1633.

- Hemer, M.A., Wang, X.L., Weisse, R., Swail V.R., 2012 Advancing wind-waves climate science: the COWCLIP project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93, 791–796. doi:10.1175/BAMS-D-11-00184.1
- Hsu, Y.L., Rogers, W.E., Dykes, J.D., 2002. WAM Performance in the Gulf of Mexico with COAMPS Wind. *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, October 21–25, Banff, Alberta, Canada.
- Jacob, D., Perrie, W., Toulany, B., Saucier, F., Denis Lefaivre, D., Turcotte, V., 2004. Wave Model Validation in the St. Lawrence River Estuary. *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, October 21–25, Banff, Alberta, Canada. 14 p.
- Jonathan, P., Ewans, K., 2013. Statistical modelling of extreme ocean environments. *Ocean Engineering*, 62, 91–109.
- Jungclauss, J.H., Botzet, M., Haak, H., Keenlyside, N., Luo, J.J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., Roeckner, E., 2006. Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19, 3952–3972.
- Kamphuis, J.W., 2010. *Introduction to coastal engineering and management*. Advances Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing, 525 p.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L., 2002. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631–1643.
- Komar, P.D., 1998. Wave erosion of a massive artificial coastal landslide. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 415–428.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, New York, 532 p.
- Lambert, A., Neumeier, U., Savard, J.P., Jacob, D., Dumont, D., 2011. Modélisation du futur climat de vagues dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent : présentation du projet.. In: *10e Assemblée Générale Annuelle de Québec Océan*, 17–18 novembre 2010 Lac-Delage.
- Lambert, A., Neumeier, U., Jacob, D., 2012a. *Évaluation du modèle WAM opéré par Environnement Canada dans le Golfe du Saint-Laurent; résultats préliminaires pour les tempêtes de l'automne 2010*. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis au Ministère des Transports du Québec.
- Lambert, A., Neumeier, U., Drejza, S., Savard, J.P., Jacob, D., 2012b. Modélisation des tempêtes de décembre 2010 sur le littoral de Sept-Îles, Golfe du Saint-Laurent. In : *Colloque Québec-Océan*, 7–9 décembre 2012, Montréal.
- Lambert, A.P., Neumeier, U., Jacob, D., Savard, J.P., 2012c. Are regional operational wind-waves models usable to predict coastal and nearshore wave climate? Résumé OS23A-1823 présenté au *2012 Fall Meeting, AGU*, San Francisco, 3–7 décembre 2012.
- Mathiesen, M., Goda, Y., Hawkes, P.J., Mansard, E., Martín, M.J., Peltier, E., Thompson, E.F., Van Vledder, G., 1994. Recommended practice for extreme wave analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 32, 803–814.
- Mearns, L.O., et al., 2007, updated 2012. *The North American Regional Climate Change Assessment Program dataset*. National Center for Atmospheric Research Earth System Grid data portal, Boulder, CO. doi:10.5065/D6RN35ST

- Mearns, L.O., Gutowski, W.J., Jones, R., Leung, L.-Y., McGinnis, S., Nunes, A.M.B., Qian, Y., 2009. A regional climate change assessment program for North America. *EOS*, 90(36), 311–312.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P.C., Ebisuzaki, W., Jovic, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E.H., Ek, M.B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., Shi, W., 2006. North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 343–360.
- Meyssignac, B., Cazenave, A., 2012. Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics*, 58, 96–109. doi:10.1016/j.jog.2012.03.005
- Moeini, M.H., Etemad-Shahidi, A., 2007. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. *Applied Ocean Research*, 29, 137–145.
- Monbaliu, J., Hargreaves, J.C., Carretero, J.-C., Gerritsen, H., Flather, R., 1999. Wave modelling in the PROMISE project. *Coastal Engineering*, 37, 379–407.
- Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., Oku, Y., 2010. Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming. *Hydrological Research Letters*, 4, 15–19.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50/3, 885–900.
- Morissette, A., 2007. *Évolution côtière haute résolution de la région de Longue-Rive-Forestville, Côte Nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise en océanographie, Université du Québec à Rimouski, xiii+267 p.
- Music, B., Caya, D., 2007. Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, 8(5), 969–988. doi:10.1175/JHM627.1.
- Nakicenovic N, S Swart et al., 2000, *IPCC special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 p.
- Neumeier, U., Savard, J.P., Jacob, D., Lambert, A., Dumont, D., Ruest, B., Bismuth, E., 2012. Modélisation du futur régime des vagues de l'estuaire et du golfe du St-Laurent. 5^e *Symposium scientifique d'Ouranos*, 19–21 novembre 2012, Montréal.
- OCDI, 2002. *Technical Standards and Commentaries of Port and Harbour Facilities in Japan*. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Daikousha Printing, 600 p.
- Padilla-Hernandez, R. Perrie, W., Toulany, B., Smith, P.C., Zhang, W., Jimenez_Hernanadez, S., 2004. An Intercomparison of Modern Operational Wave Models. *Proc. 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*.
- Paskoff, R., 2001. *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité*. Institut Océanographique, Paris, 190 p.
- Resio, D., Bratos, S., Thompson, E., 2002. Meteorology and Wave Climate. In: Vincent, L., Demirbilek, Z. (eds.) *Coastal Engineering Manual*, Part II, Hydrodynamics, Chapter II-2, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 77 p.
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., Kim, G.K., Bloom, S., Chen, J.Y., Collins, D., Conaty, A.,

- Da Silva, A., Gu, W., Joiner, J., Koster, R.D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P., Redder, C.R., Reichle, R., Robertson, F.R., Ruddick, A.G., Sienkiewicz, M., Woollen, J., 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *Journal of Climate*, 24, 3624–3648.
- Rogers, W.E., Kaihatu, J.M., Hsu, L., Jensen, R.E., Dykes, J.D., Holland, K.T., 2007. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight. *Coastal Engineering*, 54, 1–15.
- Romeiser, R., 1993. Global validation of the wave model WAM over a 1-year period using Geosat wave height data. *Journal of Geophysical Research*, 98, 4713–4726.
- Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Lambert, A., 2012. Évaluation du climat de vagues du golfe du Saint-Laurent à l'aide d'un modèle de vagues paramétrique. In : *Colloque Québec-Océan 2012*, 7–9 décembre, Montréal.
- Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Lambert, A., 2013. Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model. In: Bonneton, P., Garlan, T. (Eds.) *Proceedings of Coastal Dynamics 2013*, SHOM, Brest (France), pp. 1363–1374.
- Saucier, F.J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P., Ritchie, H., 2003. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Geophysical Research—Oceans*, 108/C8, 3269. doi:10.1029/2000JC000686
- Saville, T., 1954. *The effect of fetch width on wave generation*. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical Memorandum 70, 9 p.
- Scinocca, J.F., McFarlane, N.A., Lazare, M., Li, J., Plummer, D., 2008. Technical Note : The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 7055–7074. doi:10.5194/acp-8-7055-2008
- Senneville, S., Saucier, F.J., 2007. *Étude de sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent*. Rapport préparé pour Ouranos et soumis le 30 octobre 2006.
- Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., 2013. *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*. Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec, Québec, 53 p.
- Stone, G.W., Orford, J.D., 2004. Storms and their significance in coastal morpho-sedimentary dynamics. *Marine Geology*, 210, 1–5.
- Teena, N.V., Sanil Kumar, V., Sudheesh, K., Sajeev, R., 2012. Statistical analysis on extreme wave height. *Natural Hazards*, 64, 223–236.
- Tracy, B.A., 2002. Directional characteristics of the 1990-1999 Wave Information Studies Gulf of Mexico hindcast. *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, October 21-25, Banff, Alberta, Canada. 10 p.
- Troin, M., Caya, D., Velázquez, J.A., in prep. Hydrological response to dynamical downscaling of climate model outputs: a case study for western and eastern snowmelt-dominated Canada catchments using the Canadian RCM.
- USACE, 1977. *Shore protection manual*. US Army Corps of Engineers, U.S. Government Printing Office, Washington, 3 volumes, pagination multiple.

- WAMDI Group, 1988. The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775–1810.
- Wang, X., Swail, V., 2006. Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights. *Climate Dynamics*, 26, 109–126. doi:10.1007/s00382-005-0080-x
- Wang, X., Zwiers, F., Swail, V., 2004. North Atlantic Ocean wave climate change scenarios for the twenty-first century. *Journal of Climate*, 17, 2368–2383. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2368:NAOWCC>2.0.CO;2
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorologist Society*, 63/11, 1309–1313.
- Willmott, C.J., 1984. On the evaluation of model performance in physical geography. In : Gaile, G. L., Willmott, C.J. (eds.) *Spatial Statistics and Models*. D. Reidel, Dordrecht (Pays-Bas), pp. 443–460.
- Willmott, C.J., Ackleson S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90/C5, 8995–9005.
- Wilson, B.W., 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 18, 114–130. doi:10.1007/BF02333333
- Yamaguchi, M., Hatada, Y., Nonaka, H., 2004. Intercomparison of Wave Data Hindcast in Lake Erie. Proc. 8th *International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*.
- Zambresky, L., 1989. *A verification study of the global WAM model, December 1987–November 1988*. Technical Report 63, European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Reading (England).

Annexe 1 : Distances de fetch pondérées aux sites d'étude

Tableau 19. Distances de fetch pondérées en km aux sites d'étude.

Direction	St-Ulric	Cap-d'Espoir	Sept-Îles	Mont-Louis	Pointe-aux-Loups
N	62.84	15.62	11.97	84.09	234.56
NNE	114.30	49.01	12.92	95.19	334.50
NE	218.16	129.11	25.66	122.07	284.09
ENE	107.85	346.57	89.04	136.86	218.84
E	26.83	396.98	300.59	212.79	66.04
ESE	3.57	309.62	363.00	347.95	16.79
SE	2.55	287.78	233.37	94.35	9.53
SSE	2.28	229.44	128.83	33.50	10.52
S	2.62	173.49	105.62	30.30	20.95
SSW	6.00	106.60	131.95	37.55	65.06
SW	29.82	88.85	126.56	85.06	162.42
WSW	106.78	54.38	65.10	199.33	200.06
W	88.16	22.14	24.72	128.95	224.75
WNW	65.52	8.60	13.42	97.96	241.92
NW	53.44	5.18	6.63	90.57	330.22
NNW	55.30	6.50	8.03	82.93	224.96

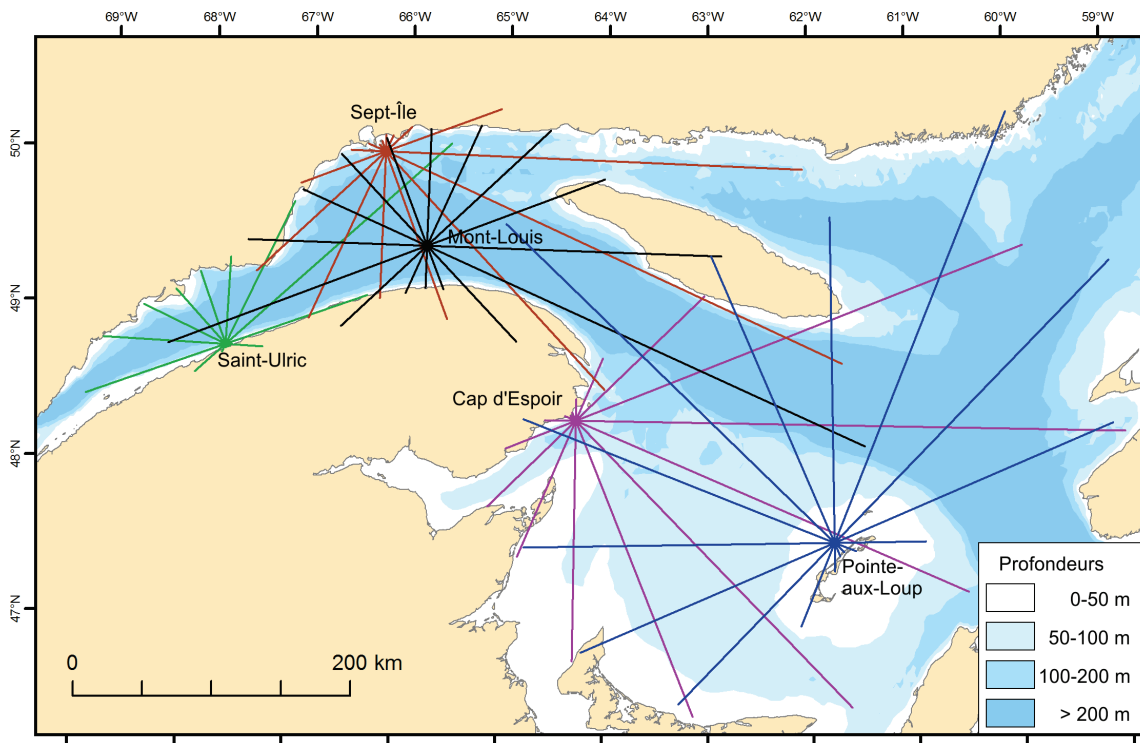


Figure 99. Illustration graphique des distances de fetch pondérées aux sites d'étude.

Annexe 2 : Description de GENEREUX

GENEREUX correspond à la fois aux modifications apportées à GENER par James Caveen, Urs Neumeier et Benoit Ruest à l'ISMER de 2011 à 2013 et au programme principal permettant d'appeler les différentes fonctions de Gener depuis la ligne de commande.

Modifications apportées

La partie calcul et entrée-sortie des fichiers du code de Gener (donc tout à part les boîtes de dialogue de l'interface Microsoft Visual C++ et la production de graphique) a été adaptée pour correspondre à du C++ standard et afin de pouvoir le compiler avec le compilateur GNU gcc. Plusieurs petites erreurs de programmation présentes dans les fonctions de calcul de la version Visual C++ ont été corrigées.

Tous les fichiers intermédiaires et les fichiers de sorties sont maintenant des fichiers de texte ascii.

Les dates et heures du fichier d'entrée sont conservées à travers tous les calculs et sont écrites dans les fichiers de sortie.

Les trous de 1-4 heures dans le fichier d'entrée sont interpolés. Plusieurs tests de cohérence ont été ajoutés sur le fichier d'entrée et sur les différents paramètres.

Les vitesses et directions peuvent maintenant être des chiffres à virgule et les directions peuvent être exprimées en degrés (au lieu de dizaines de degrés).

L'exécution saisonnière peut aussi être du style 15 avril au 15 janvier.

Utilisation de GENEREUX

GENEREUX s'utilise uniquement depuis la ligne de commande (Linux ou DOS/Windows) en indiquant comme argument sur la ligne de commande le nom des différents fichiers, le modèle utilisé (SPM77/SPM84/Jonswap/CEM03/Wilson/Donelan), les dates de début et de fin, et d'autres options.

La commande "generoux" sans argument affiche l'aide-mémoire suivant :

Utilisation: **generoux -p fichier_param [-s|-s10] fichier_data options**

Toutes les parametres sont facultatifs sauf -p et -s (ou -s10), l'ordre n'a pas d'importance

- s fichier_data - fichier d'entree de donnees de vents brutes (direction degre)
- s10 fichier_data - fichier d'entree de donnees de vents brutes (direction dizaine de degre)
- p fichier_param - fichier d'entree contenant les parametres necessaires au modele
- m modele - numero du modele a utiliser (0: SPM-77, 1: SPM-84, 2: Jonswap, 3: CEM-03, 4: Wilson, 5: Donelan, all/tout: les 6 modeles, par default 0)
- l fichier_vents - fichier intermediaire de vents lisses (par default fichier_data.vent)
- v fichier_vagues - fichier de sortie de donnees de vagues (par default fichier_data.vague)
- d date_debut - format: aaaa-mm-jj (par default 1900-01-01)
- f date_fin - format: aaaa-mm-jj (par default 2199-12-31)
- i - exclusion d'une periode au milieu d'annee au lieu de l'hiver
- t - ecrit un fichier de statistique de vagues (par default fichier_data.stat)
- t0/-t1/t2 - ecrit un fichier de statistique de vagues avec les classes de vagues 0: 0-7.5m, 1: 0-5.0 m, 2: 0-1.5 m (par default 0)
- t/-t0/-t1/-t2 fichier_stat - fichier de sortie de statistique (par default fichier_data.stat)
- hp P_min P_interv - defini la periode minimale et l'intervalle pour le fichier .hist
- fr - fichier de statistique en francais (par default)
- en - fichier de statistique en anglais

```

-q          - execution silencieuse sans message a l'ecran
-nb         - utilise un calendrier sans annee bissextile (pour MRCC-aev)
-c texte comm. - ajoute un commentaire (nom projet), doit etre le dernier parametre

```

L'ordre des arguments n'a pas d'importance. Les options -s, -s10, -p, -m, -l, -v, -d, -f et -c prennent obligatoirement un deuxième argument. Un deuxième argument peut être fourni après les options -t, -t0, -t1 et -t2.

Les deux seuls arguments obligatoires sont le fichier de vent brut (option -s si direction en degrés, option -s10 si direction en dizaines de degrés), et le fichier de paramètres (option -p, ce fichier contient les distances de fetch, les profondeurs et les facteurs de vent, cf. description détaillée ci-dessous). Des valeurs par défaut sont prévues pour tous les autres arguments.

Par défaut les autres noms de fichier sont construits à partir du nom du fichier de vent brut : nom du fichier intermédiaire de vents lissés avec l'extension *.vent*, nom du fichier de vagues avec l'extension *.vague*, nom du fichier de statistique de vagues (optionnel) avec l'extension *.stat*. Ces noms peuvent être modifiés avec respectivement les options -l, -v et -t/-t0/-t1/-t2.

Le modèle de vague est choisi avec l'option "-m N", où N est un chiffre entre 0 et 5, représentant un modèle selon la table ci-dessous. La sélection par défaut est "-m 0" pour SPM-1977. Avec "-m all" ou "-m tout", les calculs sont fait successivement avec les six modèles disponibles. Les résultats sont enregistrés dans des fichiers dont le nom est construit en ajoutant le suffixe *_N* avant l'extension du fichier. Dans tous les cas, le nom du modèle de vague utilisé est écrit dans l'entête de tous les fichiers de sorties.

Paramètre d'appel	Nom court	Nom long	Référence
-m 0 (par défaut)	SPM77	Shore Protection Manual 1977	USACE (1977)
-m 1	SPM84	Shore Protection Manual 1984	CERC (1984)
-m 2	JON73	Jonswap	Hasselmann et al. (1973)
-m 3	CEM03	Coastal Engineering Manual	Resio et al. (2002)
-m 4	WIL65	Wilson	Wilson (1965)
-m 5	DON80	Donelan	Donelan (1980)

Les dates de début et de fin sont indiquées avec les options -d et -f. Les dates doivent être écrites dans le format AAAA-MM-JJ. Par défaut sont utilisées les dates 1900-01-01 à 2199-12-31. Si la date de début n'est pas un 1er janvier, les jours avant ce jour/mois sont ignorés pour toutes les années. De même, si la date de fin n'est pas un 31 décembre, les jours après ce jour/mois sont ignorés pour toutes les années. Cela permet de modéliser seulement certaines saisons, et d'ignorer la saison hivernale.

Il est possible d'inverser ce comportement pour ignorer une période au milieu de l'année en ajoutant aux options -d et -f aussi l'option -i. Tous les jours suivant le jour -d et précédant le jour -f sont ignorées, les années traitées vont de l'année -d à l'année -f.

Les jours ignorés ne sont pas reproduits dans les fichiers de sorties.

Un calendrier sans année bissextile est utilisé avec l'option -nb. Cela est uniquement utile avec des données de modèles climatiques n'ayant pas d'années bissextiles, pour éviter que l'absence de 29 février ne soit interprétée comme trou dans la série de données de vent.

Avec l'option -c un nom de projet peut être fourni, qui aura préséance sur le nom de projet lu dans le fichier de paramètre (cela est utile pour utiliser un seul fichier de paramètre définissant le fetch avec plusieurs fichiers de vent). L'option -c doit être la dernière sur la ligne de commande, tout le reste de la ligne formera le nom de projet.

Par défaut le fichier de statistique n'est pas écrit. Il doit être demandé avec une des options suivantes : -t ou -t0 (classes de vagues entre 0 et 7,5 m), -t1 (classes de vagues entre 0 et 5 m) ou -t2 (classes de vagues entre 0 et 1,5m). Par défaut ou avec l'option -fr le fichier de statistique est en français. Avec l'option -en le fichier de statistique est en anglais.

Lorsque que le fichier statistique est demandé (-t), un fichier de même nom avec extension .rose est écrit, qui peut être utilisé pour produire une rose des vagues (cf. ci-dessous).

Lorsque que le fichier statistique est demandé (-t), un fichier de même nom avec extension .hist est écrit avec des statistiques par direction et intervalle de période (cf. ci-dessous). Avec l'option -hp il est possible de spécifier la limite inférieure du premier intervalle de période (défaut 2 s) et la taille de chaque intervalle de période (défaut 1 s).

Tous les messages sauf les messages d'erreurs fatales peuvent être supprimés avec le mode silencieux (option -q).

Format du fichier de paramètres

Différents paramètres utilisés par Gener doivent être fournis dans un fichier de paramètres en format texte. Dans ce fichier, chaque ligne commence par un mot clé, qui détermine le contenu de la ligne. Uniquement les quatre premiers caractères du mot clé sont testés sans tenir compte des différences majuscule/minuscule. La structure est typiquement la suivante (mots clés en italique) :

Projet Nom du projet (optionnel)
Station Nom de la station (optionnel)
Directions 8 ou 16
Fetch Fetch1 Fetch2 Fetch3 ... FetchN
Profondeur Prof1 Prof2 Prof3 ... ProfN (optionnel)
FacteurPondVent Fact1 Fact2 Fact3 ... FactN (optionnel)

L'ordre des lignes est libre, mais *Directions* doit venir avant *Fetch*, *Profondeur* et *FacteurPondVent*. Le nombre de direction (*Directions*) et les distances de fetch pondérées en km (*Fetch*) sont les deux seules informations obligatoires.

Le nom de projet (*Projet*) et le nom de la station (*Station*) sont optionnels, ils ne sont pas nécessaires au programme, mais simplement retranscrit dans le fichier de résultat. Le nom de projet défini ici peut être supplanté par l'option -c à la ligne de commande.

Le nombre de direction (*Directions*) doit être 8 ou 16. Il est recommandé d'utiliser seulement 16 directions et pas 8 directions.

Les distances de fetch pondérées (*Fetch*) doivent être comprises entre 0 et 1000 km.

Les profondeurs moyennes en m (*Profondeur*) sont optionnelles, la valeur par défaut est 1000 m (ce qui utilise la version eau profonde des équations de fetch). Pour toutes les directions avec profondeur de 0 m la direction de fetch sera mise aussi à 0 km.

Les facteurs de pondération de la vitesse du vent (*FacteurPondVent*) sont optionnels, la valeur par défaut est 1, les valeurs doivent être comprises entre 0 et 10.

Représentation des directions dans GENEREUX

Toutes les directions de vents, de vagues, de fetchs, etc. sont les directions de provenances. GENEREUX travaille avec 8 ou 16 directions. Il est recommandé d'utiliser seulement 16 direction. Chaque direction est un secteur de 45° ou 22,5°.

Pour les distances de fetchs, les profondeurs et les facteurs de vent dans le fichier de paramètres, la première direction est le Nord, la deuxième le NE/NNE, et la dernière le NW/NNW.

Dans le fichier de vent lissé et dans le fichier de vague, le premier secteur est NE/NNE et le dernier secteur est Nord. La direction en degrés d'un secteur peut être calculée ainsi :

$$\text{Dir} = \text{secteur} \times 360 / \text{nb_directions}$$

Dans le fichier de vent lissé, le secteur 0 indique calme plat, le secteur -1 valeurs manquantes, le secteur -2 saut temporel.

Format du fichier de vent brut (fichier d'entrée)

Le fichier d'entrée doit exactement correspondre au schéma suivant :

Deux lignes successives pour chaque date, l'une avec 24 vitesses de vent (code 076 ou 070), l'autre avec 24 directions de vent (code toute valeur autre que 076 et 070), l'ordre des deux lignes n'a pas d'importance. Les vitesses de vents sont en km/h mesurées en principe à 10 m au-dessus du sol/de l'eau. Les directions sont en degrés (option -s) ou en dizaines de degrés (option -s10). Les valeurs peuvent être des nombres entiers ou des chiffres à virgules, elles doivent toujours être écrites sur 6 positions.

Chaque ligne a le format suivant :

colonnes 1-7 : identifiant de station (doit être identique aux 7 derniers caractères du nom fichier avant l'extension)

colonnes 8-15 : date en format AAAAMMJJ

colonnes 16-18 : type de valeur (vitesse : 076 ou 070, direction : 075)

colonnes 19-24 : valeur 1 (pour heure 00:00)

colonne 25 : validité valeur 1 (valide si " ", sinon donnée manquante/erronée)

colonnes 26-31 : valeur 2 (pour heure 01:00)

colonne 32 : validité valeur 2 (valide si " ")

...

colonnes 180-185 : valeur 24 (pour 23:00)

colonne 186 : validité valeur 24 (valide si " ")

Format du fichier de vent lissé (fichier intermédiaire)

Les six premières lignes sont l'entête, avec l'identifiant de la station, le nom de la station, le nombre de direction, la date de début et la date de fin (comme indiquées par les options -d et -f).

Chaque ligne de données correspond à une période de direction constante avec la date du début de la période (AAAAMMJJ), l'heure du début (HH), la durée de la période en heure (nbHeures), la direction (numéro de secteur), et les vitesses en km/h selon le format suivant :

DateDebut HeureDebut nbHeures direction vitesse1 vitesse2 ... vitesseN

Format du fichier de vagues (résultat principal)

Ce fichier remplace l'ancien fichier .asc.

Les neuf premières lignes sont l'entête, avec le nom du projet, l'identifiant de la station, le nom de la station, le nombre de direction, la date de début et la date de fin (comme indiquées par les options -d et -f), les facteurs de vent et les distances de fetch.

La ligne 10 est l'entête des colonnes de données.

Les données sont en 5 colonnes avec une ligne par heure selon le format suivant :

Date (AAAAMMJJ), Heure, Direction (secteur), Hauteur H_s , Période T_s .

Les heures avec des valeurs marquées manquantes/erronées dans le fichier d'entrée de vent brut sont représentées par direction=-9, H_s =-9, T_s =-9. Le secteur 0 indique calme plat et que toutes les vagues de la période précédente se sont atténuées.

Format des fichiers de statistique des vagues (option -t)

Avec l'option -t sont produits trois fichiers suivants.

Fichier de statistiques détaillées (extension **.stat** par défaut, similaire à l'ancien fichier .tab) : Il s'agit d'un fichier avec texte explicatif présentant les statistiques par secteur, période et hauteur, ainsi que tout à la fin les statistiques par période et hauteur, toutes directions confondues.

Fichier de rose des vagues (extension **.rose**, similaire à l'ancien fichier .rose) : Les 16 ou 8 premières lignes indiquent pour chaque direction les pourcentages de dépassement pour différentes hauteurs de vagues. La première ligne est la direction Nord, la ligne 16 ou 8 la direction NNW ou NW. Ces hauteurs limites sont définies à la ligne 17 ou 9 (cette ligne n'existait pas dans l'ancien fichier .rose). La ligne 18 ou 10 indique le choix d'intervalle, puis viennent les métadonnées habituelles.

Fichier d'histogramme par période et par secteur (extension **.hist**, similaire à l'ancien fichier .waves) : Pour chaque secteur et intervalle de période, une ligne indique (1) direction comme texte, (2) Période (limite inférieure), (3) direction en degrés, (4) moyenne des H_s , (5) "1.0", (6) la proportion d'heure de ce secteur/période, (7) le nombre d'heure de ce secteur/période dans une année.

Les directions avec fetch nul, les combinaisons secteur/intervalle de période sans aucune vague sont omises du fichier.

Il existe trois modifications par rapport à l'ancien fichier .waves. La deuxième colonne est maintenant la limite inférieure de l'intervalle de période (au lieu du centre de l'intervalle arrondi à

l'entier inférieur). La moyenne des H_s (quatrième colonne) est calculée avec la hauteur réelle de chaque vague au lieu du centre de l'intervalle de hauteur correspondant. Le nombre d'heure dans une année (septième colonne) est maintenant calculée selon le nombre de jours entre date_debut et date_fin (options -d et -f).

Annexe 3 : Code de prétraitement des vents pour GENER

La fonction Matlab `gener_vent.m`, dont le code est reproduit ci-dessous, est utilisée pour obtenir un vent moyenné représentatif à partir des sorties d'un modèle atmosphérique afin d'alimenter GENER (cf. section 3.4).

```
function [vent_out] = gener_vent(vent_in,option,varargin)
%gener_vent Algorithme de génération du vent pour GENEREUX
%
%   VENT_OUT = GENER_VENT (VENT_IN, OPTION, VARARGIN)
%
% INPUT
%
% VENT_IN (structure représentant la grille de vent en entrée et les champs suivant)
%   .lat   (latitude de chaque point de la grille de vent)
%   .lon   (longitude de chaque point de la grille de vent)
%   .water (boolean: vrai si point de grille marin)
%   .temps (vecteur avec les valeurs de chaque pas de temps des données)
%   .u     (composante u du vent avec matrice [temps, pts_grille])
%   .v     (composante v du vent avec matrice [temps, pts_grille])
%
% OPTIONS   type d'algorithme de prétraitement du vent
%   'fet'   "Moyenne" selon sector et distance de fetch (méthode recommandée)
%
% VARARGIN
%   OBLIGATOIRE
%   'point', [long, lat] (coordonnées longitude/latitude du point d'intérêt)
%   FACULTATIF
%   'gen', 'nomfichiervent.dat' (écriture du fichier de vent pour GENEREUX, le nom
%                               du fichier de vent doit avoir au moins 7 caractères)
%   'fetch' 'nomfichierparam.txt' (Écriture du fichier de paramètre pour GENEREUX
%
%   'xlim', [longitude_min,longitude_max] (limites en longitude de la zone d'intérêt)
%   [0 Inf] par défaut
%   'ylim', [latitude_min,latitude_max] (limites en latitude de la zone d'intérêt)
%   [0 Inf] par défaut
%   'debut', [AAAA MM JJ HH MM SS] (date de début de l'analyse du vent)
%   [0] par défaut
%   'fin', [AAAA MM JJ HH MM SS] (date de fin de l'analyse du vent)
%   [Inf] par défaut
%   'max_fet', range (Utilisation de la fonction sel_max_fetch.m pour faire
%                   orienter les vents vers les fetchs max
% OUTPUT
%
%   VENT_OUT (séries temporelle de vent [temps u v dir vitesse]
%
% par Benoit Ruest, 2013

%% Validation de varargin

% Attribution valeurs varargin
i=1;
genereux=false;    % si vrai, écrit le fichier de vent pour GENEREUX
fetch_bool=false;
max_fet=false;
while i<numel(varargin)
    val=varargin{i+1};
    switch lower(varargin{i})
        case {'gen','-gen'}
            genereux=true;
            nom_gener=val;
    end
    i=i+1;
end
```

```

    case {'fetch','-fetch'}
        fetch_bool=true;
        nom_param=val;

    case {'point','-point'}
        if numel(val)==2
            coor_pt=val;
        else
            error('Nombre de données incorrecte pour l''option %s',varargin{i})
        end
    case {'xlim','-xlim'}
        if numel(val)==2
            lim_x=val;
        else
            error('Nombre de données incorrecte pour l''option %s',varargin{i})
        end
    case {'ylim','-ylim'}
        if numel(val)==2
            lim_y=val;
        else
            error('Nombre de données incorrecte pour l''option %s',varargin{i})
        end
    case {'debut','-debut'}
        debut=val;
        debut=datetime(debut);
    case {'fin','-fin'}
        fin=val;
        fin=datetime(fin);
    case {'max_fet','-max_fet'}
        max_fet=true;
        range=val;
    otherwise
        if ischar(varargin{i})
            error('Option inexistante (''%s'',varargin{i})')
        else
            error('Option inexistante')
        end
    end
    i=i+2;
end

% Valeurs par défaut

if ~exist('coor_pt','var')
    error('Coordonnées du point d''intérêt manquantes')
end

if fetch_bool==true
    load coast;
    fetch=(fetch_distance(coast,[coor_pt(2)
                                coor_pt(1)], 'file',nom_param,'nofig','w16','max500'))'/1000;
    d_ang=360/16;
end

if ~exist('lim_x','var') | ~exist('lim_y','var')

    if strcmp(option,'prx')
        load coast;
        fetch=(fetch_distance(coast,[coor_pt(2)
                                    coor_pt(1)], 'nofig','w16','max500'))'/1000;
        d_ang=360/16;

        % angle en radian selon convention trigo
        % en sens antihoraire depuis l'axe est (x)
        fetch(:,2)=mod((90*pi/180):(-d_ang*pi/180):((-270+d_ang)*pi/180),2*pi);
    end
end

```

```

        lim_x=[-Inf Inf];
        lim_y=[-Inf Inf];

    else
        lim_x=[-Inf Inf];
        lim_y=[-Inf Inf];
    end
end

if ~exist('debut','var')
    debut=0;
end

if ~exist('fin','var')
    fin=Inf;
end

%% Calcul vent représentatif

% Sélection des points de vents compris dans l'intervalle long/lat et le temps

if ~isfield(vent_in,'water')
    sel_points=find(vent_in.lon>=lim_x(1) & vent_in.lon<=lim_x(2) & vent_in.lat>=lim_y(1) &
                    vent_in.lat<=lim_y(2));
else
    sel_points=find(vent_in.lon>=lim_x(1) & vent_in.lon<=lim_x(2) & vent_in.lat>=lim_y(1) &
                    vent_in.lat<=lim_y(2) & vent_in.water);
end

sel_temps=vent_in.temps(:)>=debut & vent_in.temps(:)<=fin;
vent_out=zeros(sum(sel_temps),3);
vent_out(:,1)=vent_in.temps(sel_temps);

if ~strcmpi(option,'fet')
    error('Méthode de calcul du vent inexistante')
else
    % Selection des points de grille de vent pour chaque direction de fetch (16)
    % Coordonnées du point d'intérêt
    lon=coor_pt(1);
    lat=coor_pt(2);
    [x0,y0]=deg2utmMOD(lat,mod(lon,360),mod(lon,360));
    % angle (deg) de part et d'autre du fetch pour la selection des points de grille de vent
    angle=45*pi/180;
    % Sélection points grille de vent du domaine marin
    points=vent_in.water;
    sel_fetch=cell(size(fetch,1),1);

    % Calcul coordonnées X/Y des points de grilles à partir de lon/lat

    [coor.x,coor.y] = deg2utmMOD(vent_in.lat,mod(vent_in.lon,360),mod(lon,360));

    [coor.a,coor.d] = cart2pol(coor.x-x0, coor.y-y0);

    % Boucle pour déterminer les points de grille à moyenné pour chaque direction
    for i=1:size(fetch,1)

        points=find(coor.d<=fetch(i,1)*1000 & abs(mod(coor.a-fetch(i,2)+pi,2*pi)-pi)<=angle
                    & vent_in.water);
    end
end

```

```

    % Matrice contenant les points de vents à utiliser pour chaque fetch
    sel_fetch{i}=points;
end

% calcul du vent moyen pour chaque secteur

% trouve le point de vent le plus près du point d'intérêt
x=(coor_pt(1)-vent_in.lon(sel_points)).*cos(coor_pt(2)/180*pi);
y= (coor_pt(2)-vent_in.lat(sel_points));
d= (x.^2+y.^2).^0.5;
 [~, imin]=min(d);

% Boucle de calcul du vent "moyen" pour chaque fetch (RMS)
for i=size(sel_fetch,1):-1:1

    %% Méthode RMS u et RMS v + dir moy

%    % Selection des points de vent pour le fetch
    sel=sel_fetch{i};

    if ~isempty(sel)

        u_moy=sqrt(nanmean(vent_in.u(sel_temps,sel).^2,2)) .*
            sign(nanmean(vent_in.u(sel_temps,sel),2));
        v_moy=sqrt(nanmean(vent_in.v(sel_temps,sel).^2,2)) .*
            sign(nanmean(vent_in.v(sel_temps,sel),2));

        wind(:,i)=sqrt(nanmean( vent_in.u(sel_temps,sel).^2+vent_in.v(sel_temps,sel).^2
            ,2));

    else % si pas de points de vent sur le secteur, vent marin le plus près
        u_moy=(vent_in.u(sel_temps,sel_points(imin)));
        v_moy=(vent_in.v(sel_temps,sel_points(imin)));
        wind(:,i)=sqrt(u_moy.^2+v_moy.^2);

    end

    direc(:,i)=mod((atan2(v_moy,u_moy)),2*pi);

    windcos(:,i)=wind(:,i).*cos(fetch(i,2)-direc(:,i));

end

windcos(windcos<0)=0;

% Sélection des vents max pour chaque pas de temps
[~,index]=nanmax(windcos,[],2);
serie=zeros(size(windcos,1),2);

for i=1:size(serie,1)
    serie(i,1)=wind(i,index(i));
    serie(i,2)=direc(i,index(i));
end

% Vecteur u pour chaque pas de temps
vent_out(:,2)=serie(:,1).*cos(serie(:,2));
% Vecteur v pour chaque pas de temps
vent_out(:,3)=serie(:,1).*sin(serie(:,2));

end

% Direction vent pour chaque pas de temps
vent_out(:,4)=mod(-90-(atan2(vent_out(:,3),vent_out(:,2)))*180/pi,360);
% Amplitude du vent pour chaque pas de temps
vent_out(:,5)=sqrt(vent_out(:,2).^2+vent_out(:,3).^2);
vent_out=vent_out(:,[1 4 5]);

```

```

if max_fet
    [vent_out]=sel_max_fetch(fetch(:,1),vent_out,range);
end

%% Écriture du fichier de vent pour GENEUX

if genereux
    gener_writeraw(nom_gener,vent_out,'ms')
end

function [x,y] = deg2utmMOD(lat,lon,meridian)
% -----
% [x,y] = deg2utm(Lat,Lon,meridian)
%
% Description: Function to convert lat/lon vectors into UTM coordinates (WGS84).
% Some code has been extracted from UTM.m function by Gabriel Ruiz Martinez.
%
% Inputs:
%   Lat: Latitude vector.   Degrees.  +ddd.ddddd WGS84
%   Lon: Longitude vector.  Degrees.  +ddd.ddddd WGS84
%   meridian: central meridian of the customized UTM zone. It is an unique value for all
%             points, no test
%             is done whether point is close or far from requested UTM zone.
%
% Outputs:
%   x, y .
%
% Author:
%   Rafael Palacios
%   Universidad Pontificia Comillas
%   Madrid, Spain
% Version: Apr/06, Jun/06, Aug/06, Aug/06
% Aug/06: fixed a problem (found by Rodolphe Dewarrat) related to southern
%         hemisphere coordinates.
% Aug/06: corrected m-Lint warnings
%
% Dec/09: include optional third input argument zone
% May/11: modified by Urs Neumeier to compute UTM for a given meridian
% -----

% Argument checking
error(nargchk(3, 3, nargin));

if ~isequal(size(lat),size(lon))
    error('LAT and LON should have the same size');
end

if numel(meridian)>1 & ~isequal(size(lat),size(meridian))
    error('LAT and MERIDIAN should have the same size (or MERIDIAN be a scalar)');
end

sa = 6378137.000000 ; sb = 6356752.314245;
e2 = ( ( sa ^ 2 ) - ( sb ^ 2 ) ) ^ 0.5 ) / sb;
e2cuadrada = e2 ^ 2;
c = ( sa ^ 2 ) / sb;

lat = lat * ( pi / 180 );
lon = lon * ( pi / 180 );

meridian=meridian * (pi/180);

deltaS = lon - meridian;

a = cos(lat) .* sin(deltaS);
epsilon = 0.5 * log( ( 1 + a ) ./ ( 1 - a ) );

```

```

nu = atan( tan(lat) ./ cos(deltaS) ) - lat;
v = ( c ./ ( ( 1 + ( e2cuadrada * ( cos(lat) ) .^ 2 ) ) ) .^ 0.5 ) * 0.9996;
ta = ( e2cuadrada / 2 ) * epsilon .^ 2 .* ( cos(lat) ) .^ 2;
a1 = sin( 2 * lat );
a2 = a1 .* ( cos(lat) ) .^ 2;
j2 = lat + ( a1 / 2 );
j4 = ( ( 3 * j2 ) + a2 ) / 4;
j6 = ( ( 5 * j4 ) + ( a2 .* ( cos(lat) ) .^ 2 ) ) / 3;
alfa = ( 3 / 4 ) * e2cuadrada;
beta = ( 5 / 3 ) * alfa ^ 2;
gama = ( 35 / 27 ) * alfa ^ 3;
Bm = 0.9996 * c * ( lat - alfa * j2 + beta * j4 - gama * j6 );
x = epsilon .* v .* ( 1 + ( ta / 3 ) ) + 500000;
y = nu .* v .* ( 1 + ta ) + Bm;

y(y<0)=9999999+y(y<0);

```


Annexe 4 : Validation du modèle EC, séries chronologiques et distributions probabilistes des paramètres de vagues

Site de Sept-Îles

Modèle EC vs AWAC, période d'englacement incluse

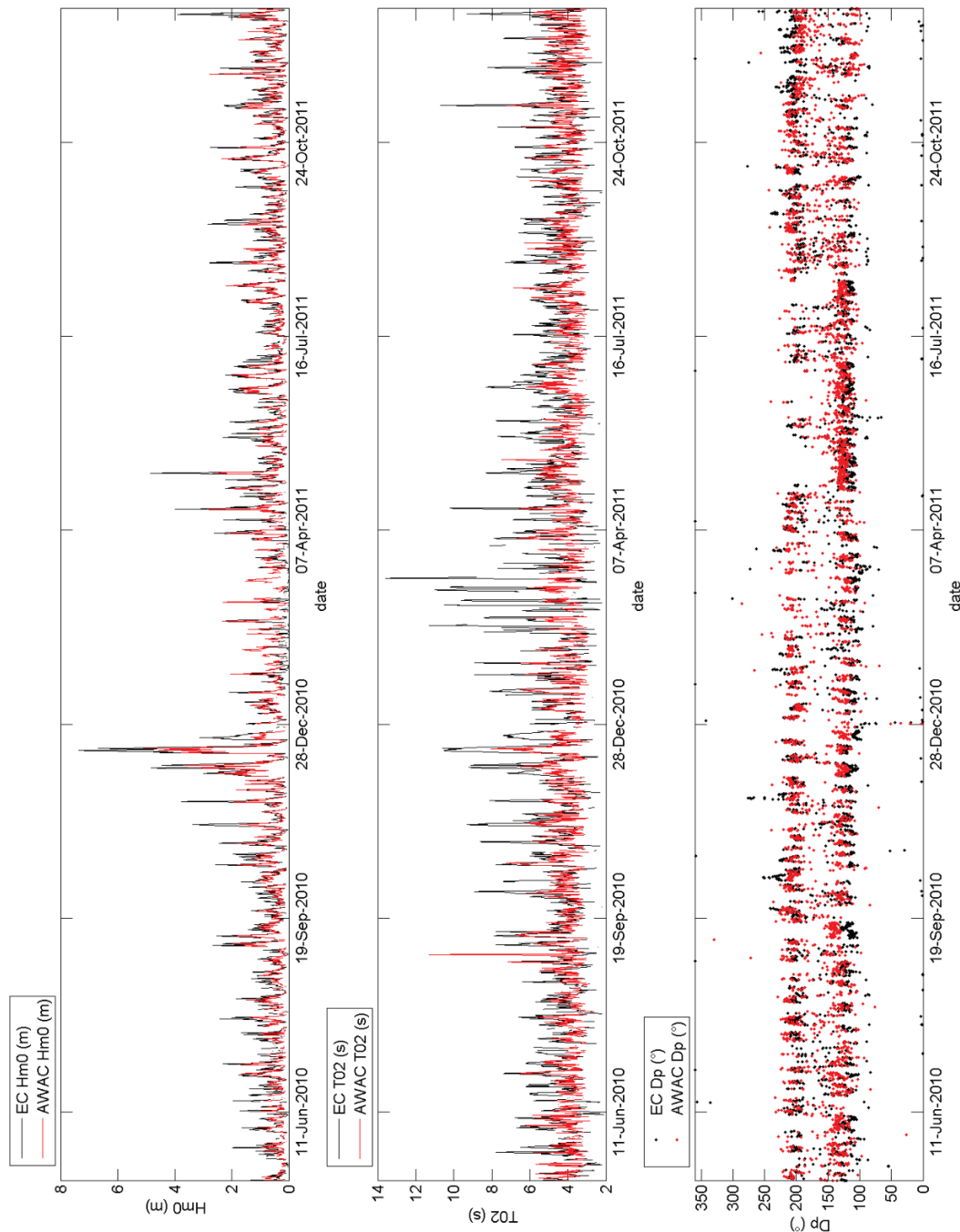


Figure 100. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

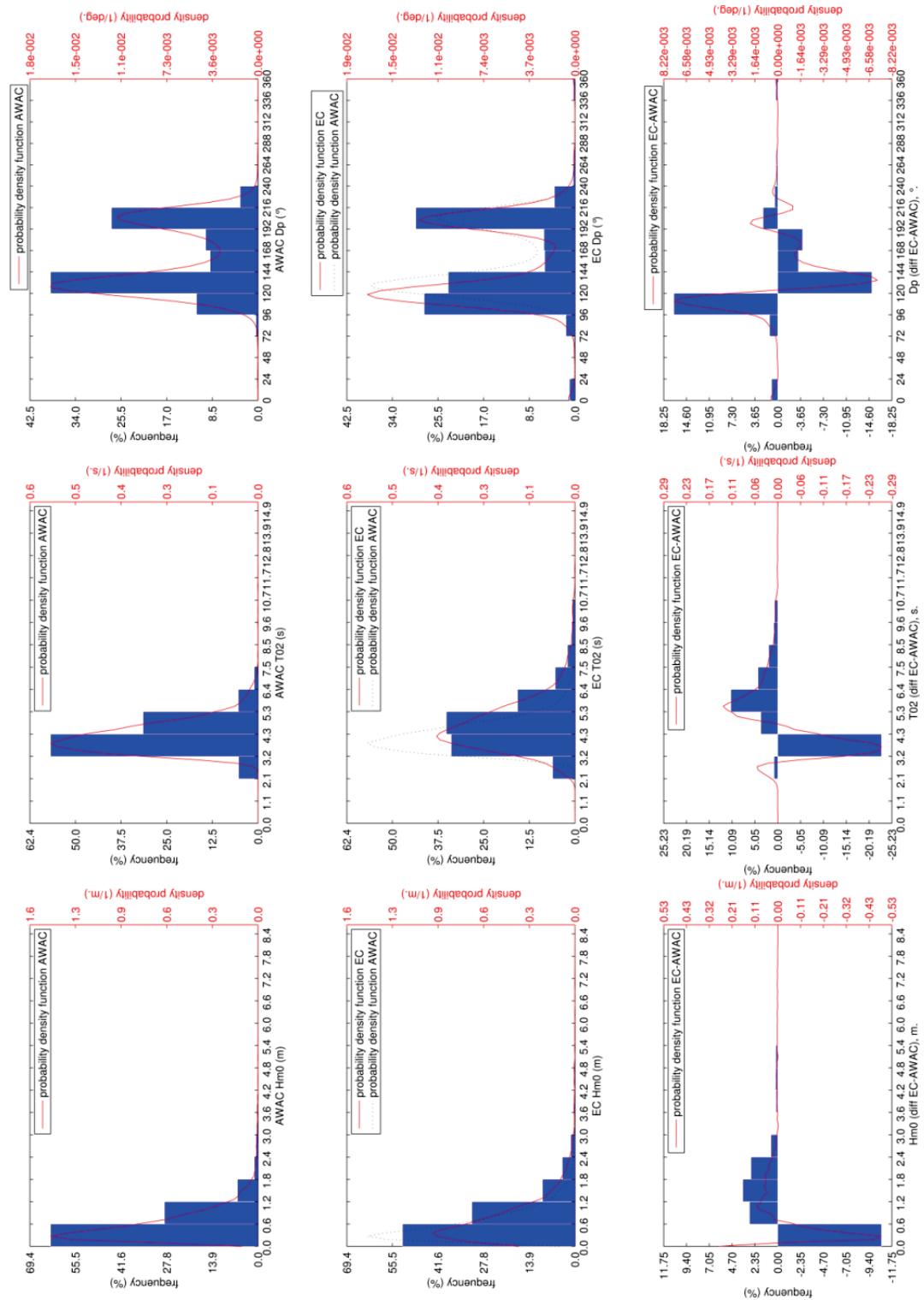


Figure 101. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, incluant la période d'englacement.

Modèle EC vs AWAC, période d'englacement exclue

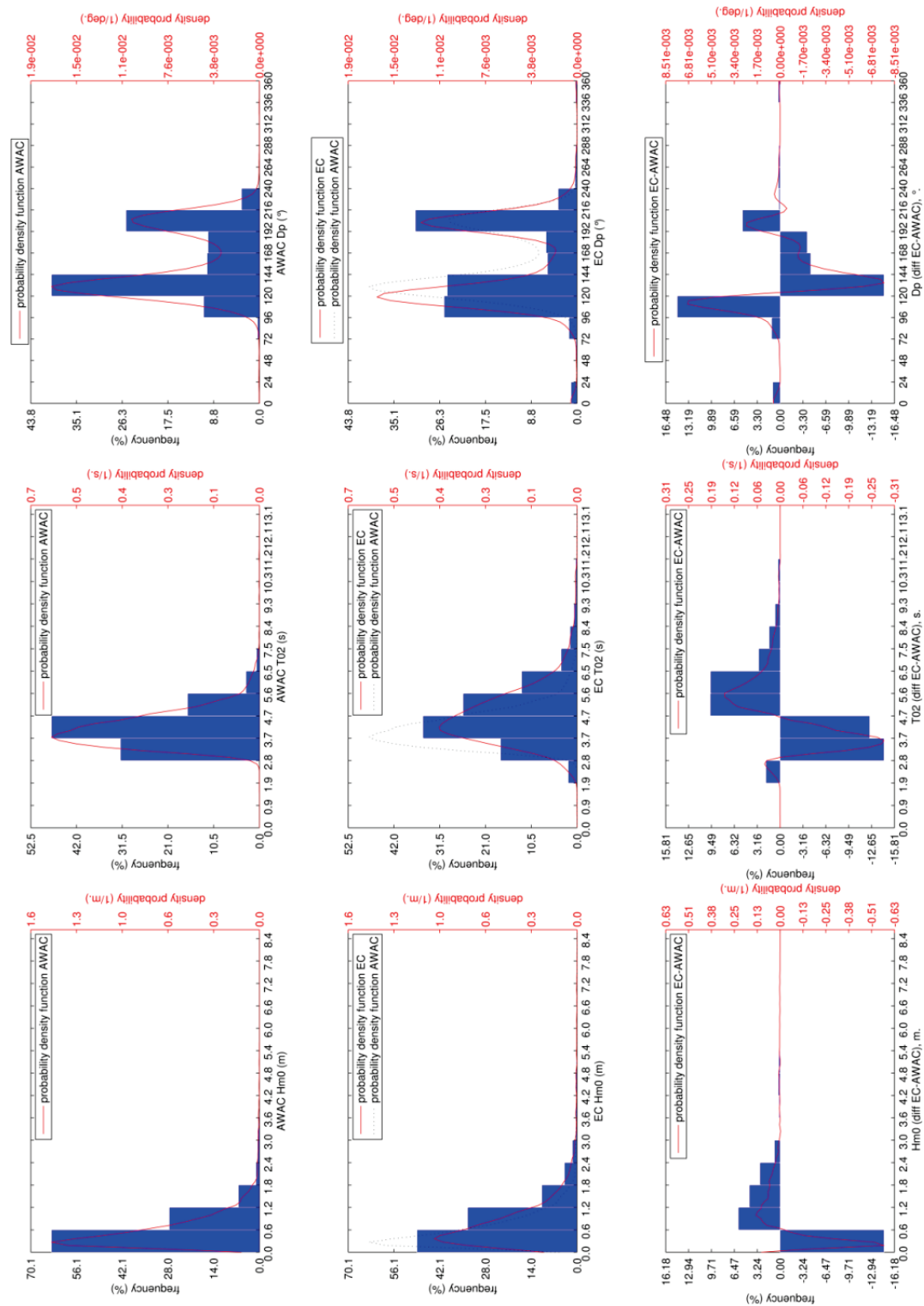


Figure 102. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.

SWAN vs AWAC, période d'englacement exclue

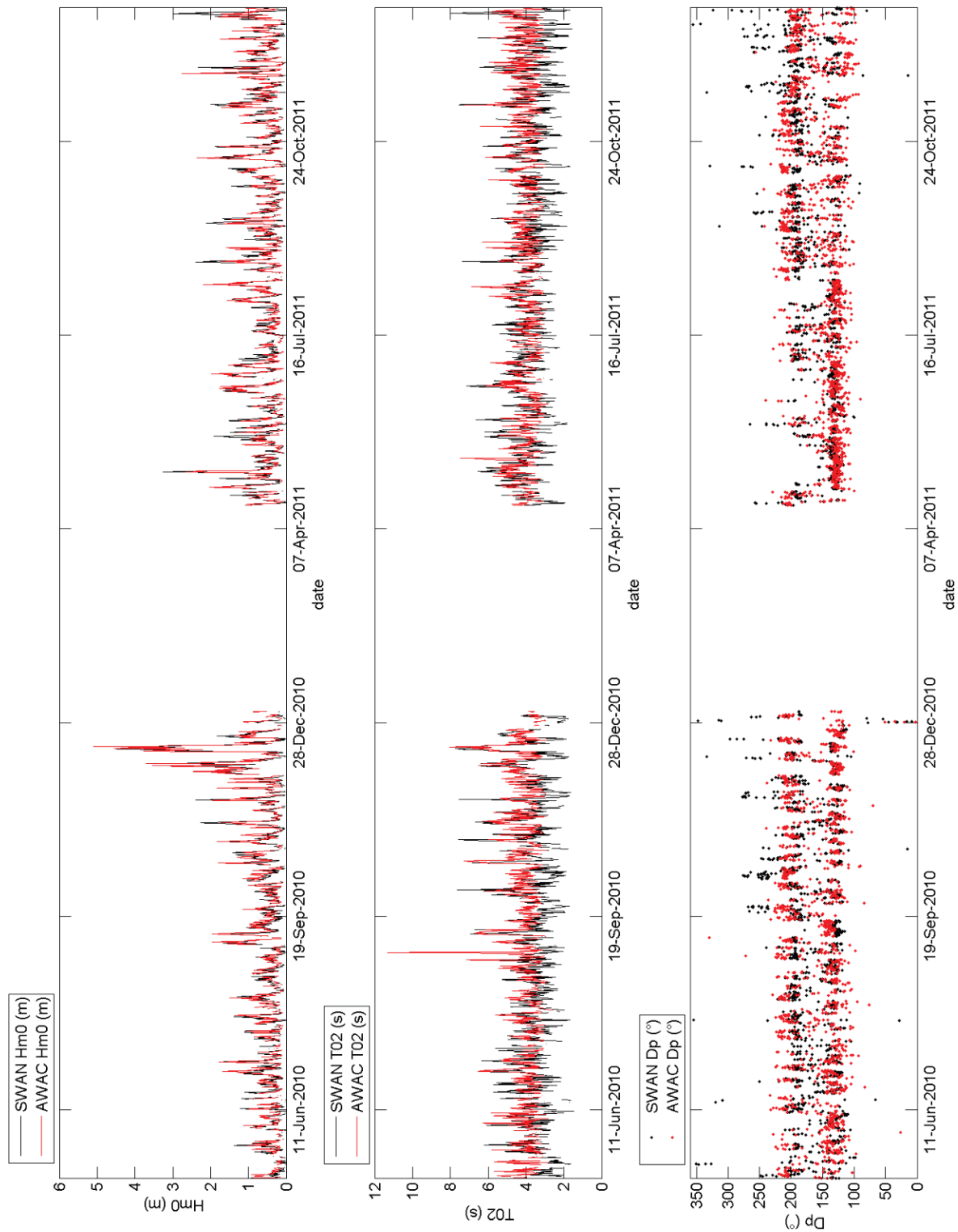


Figure 103. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011.

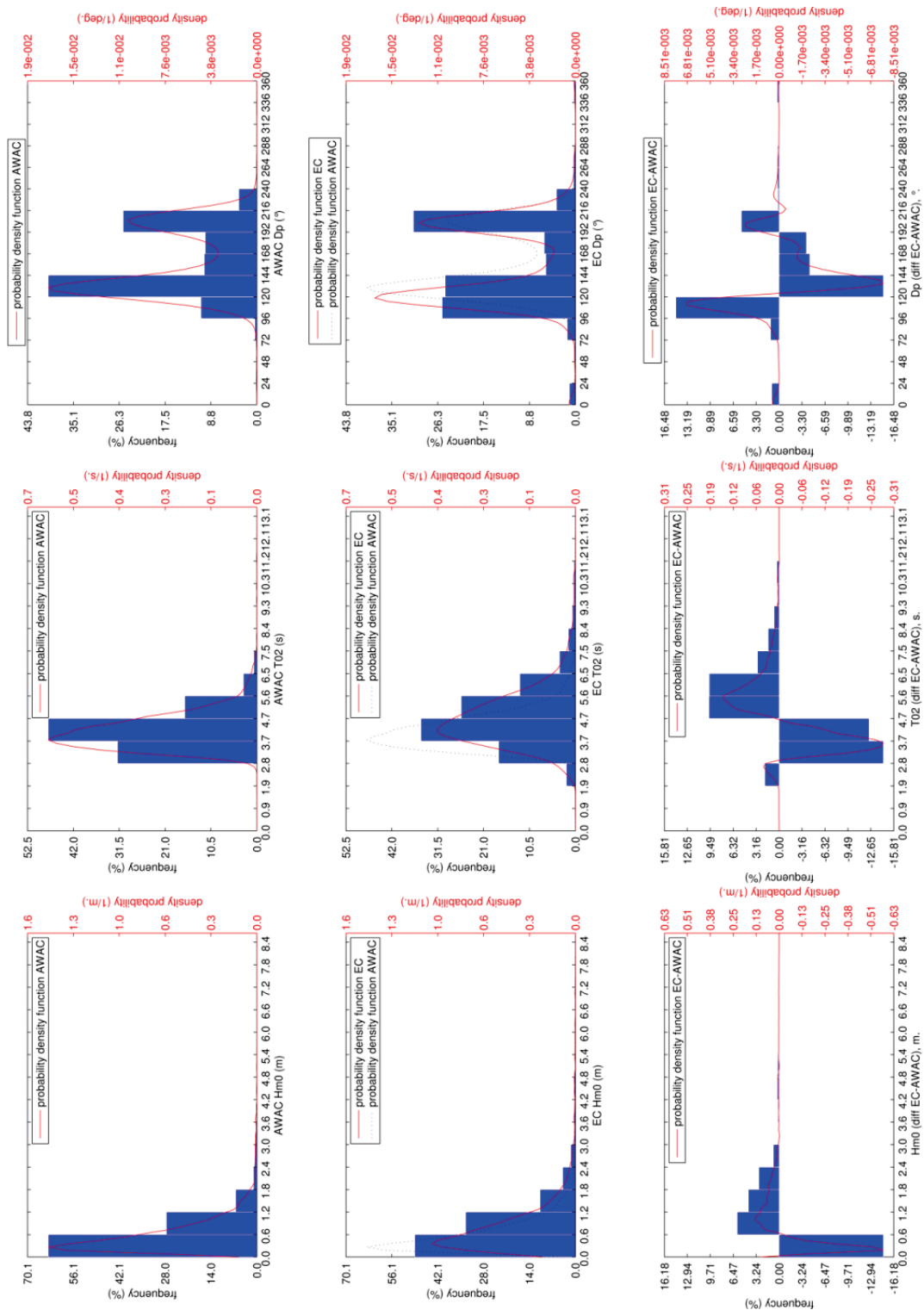


Figure 104. Distribution probabiliste des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.

Site de Cap d'Espoir

Modèle EC vs AWAC, période d'englacement incluse

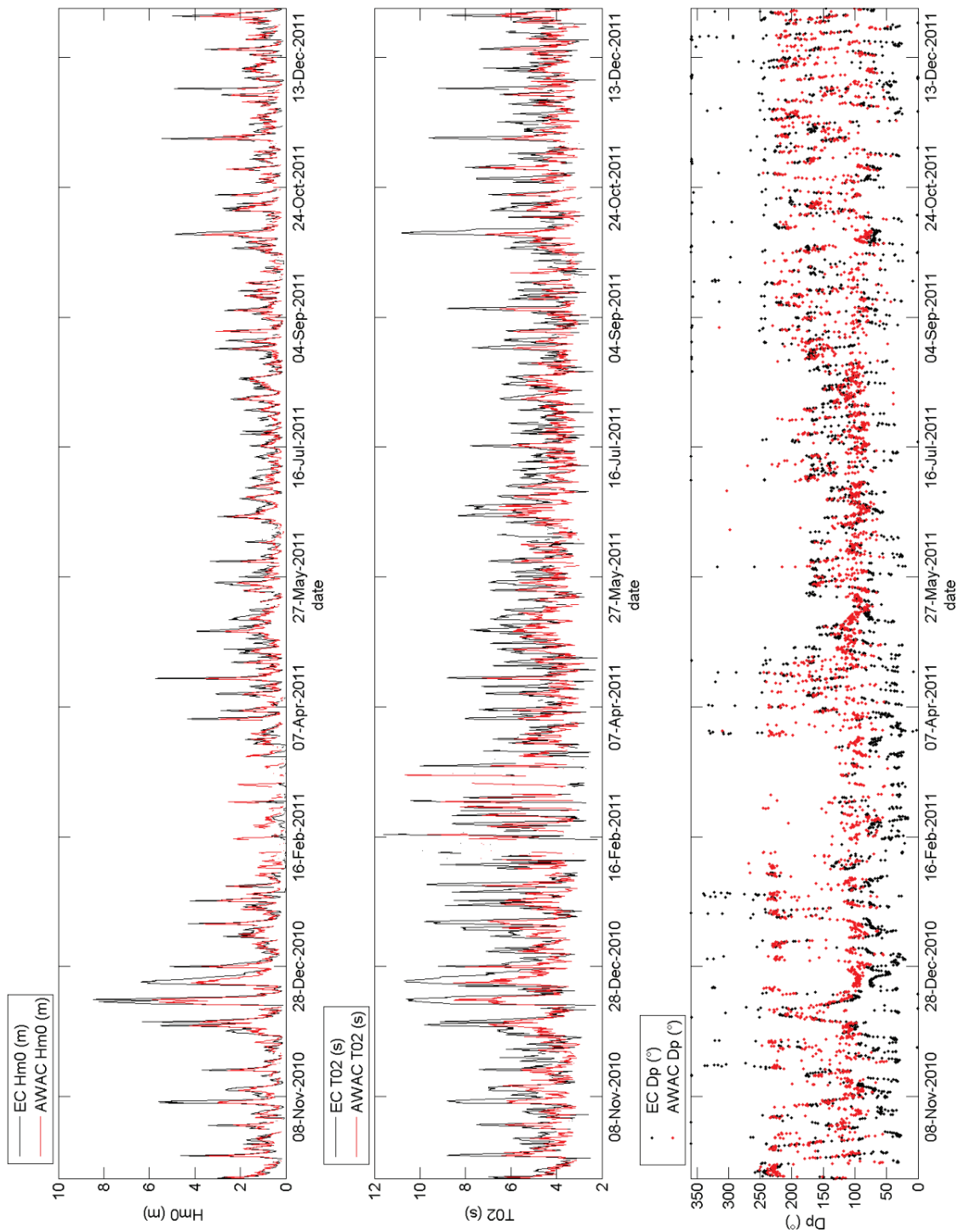


Figure 105. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

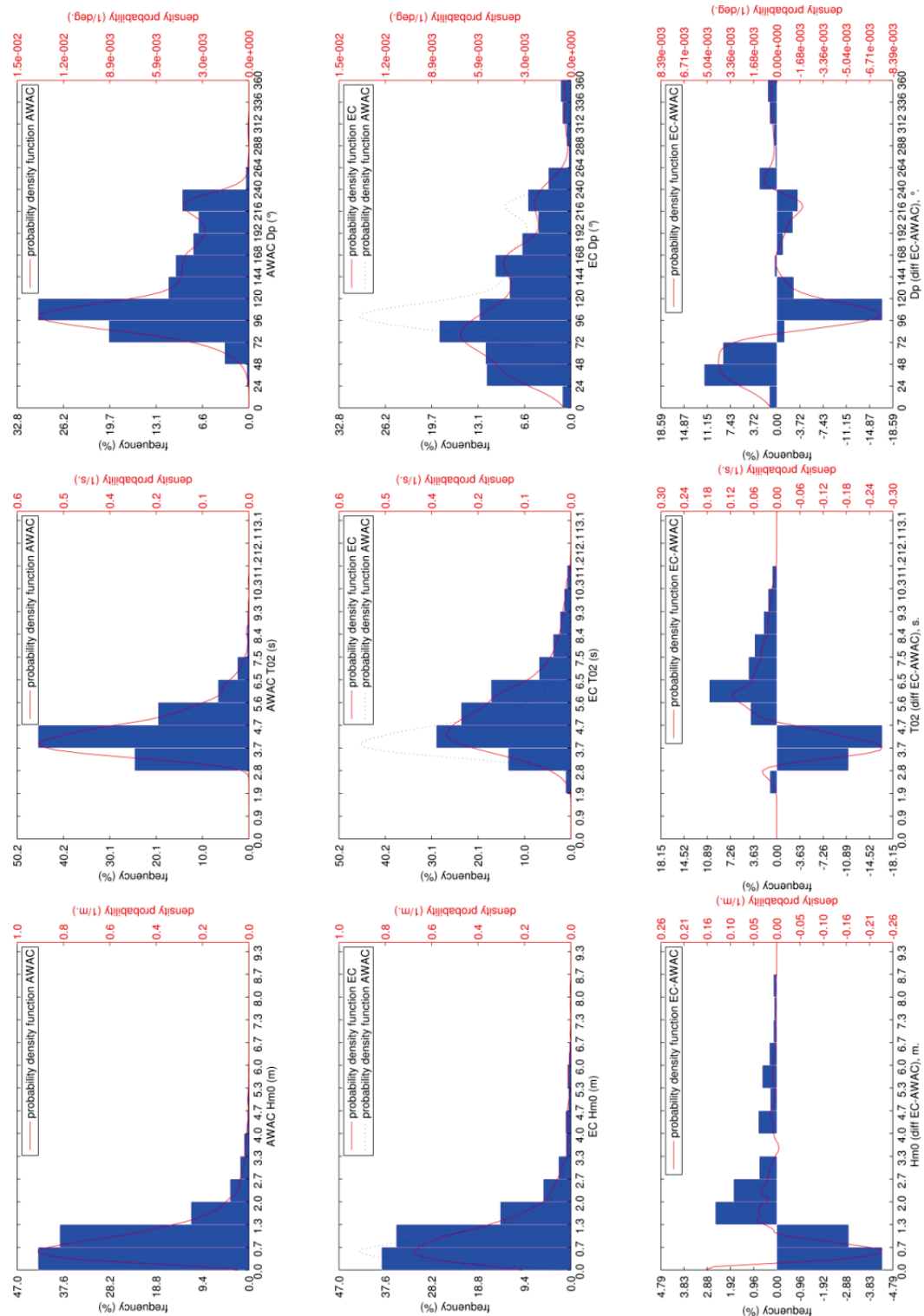


Figure 106. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, incluant la période d'englacement.

Modèle EC vs AWAC, période d'englacement exclue

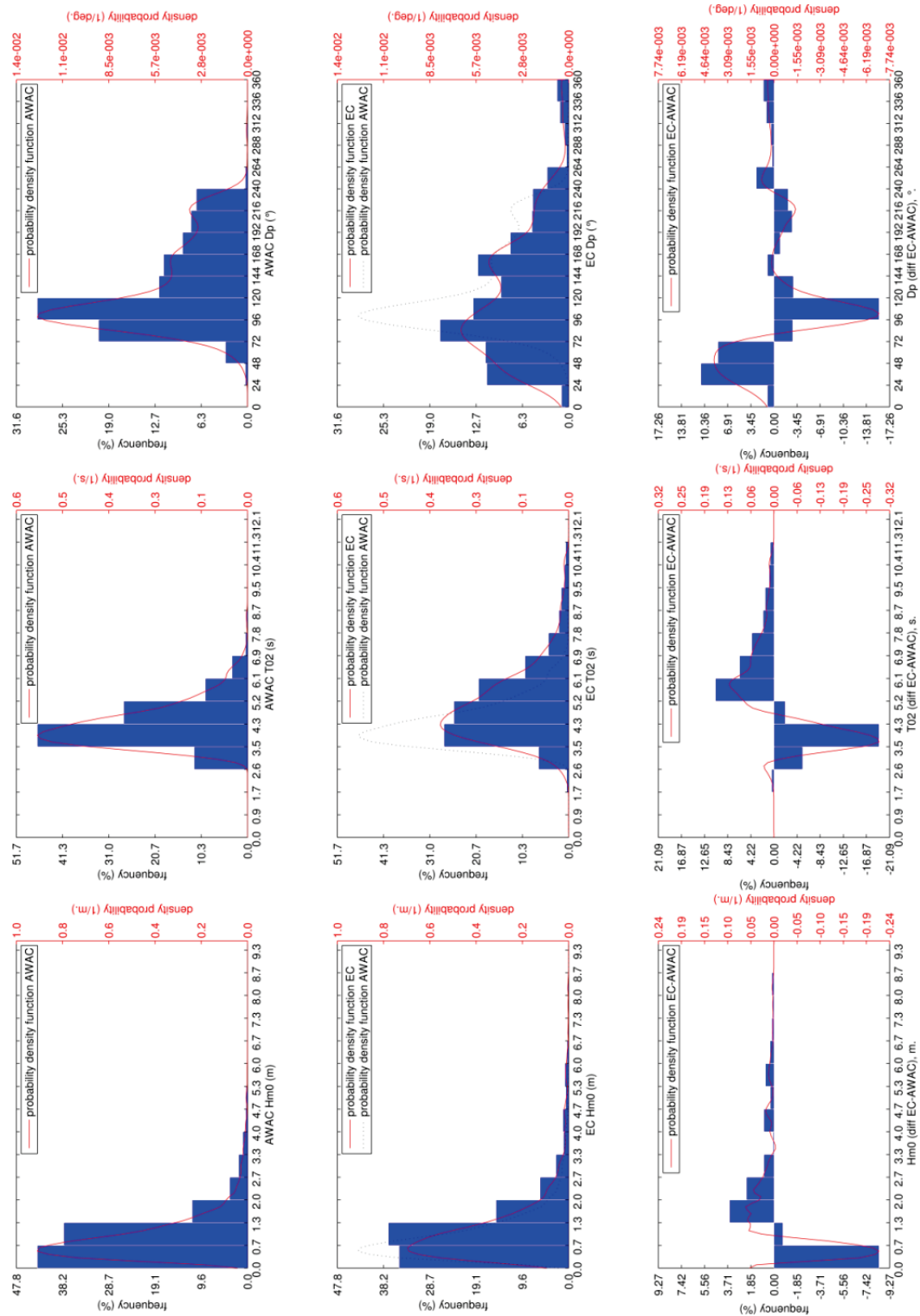


Figure 107. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.

SWAN vs AWAC, période d'englacement exclue

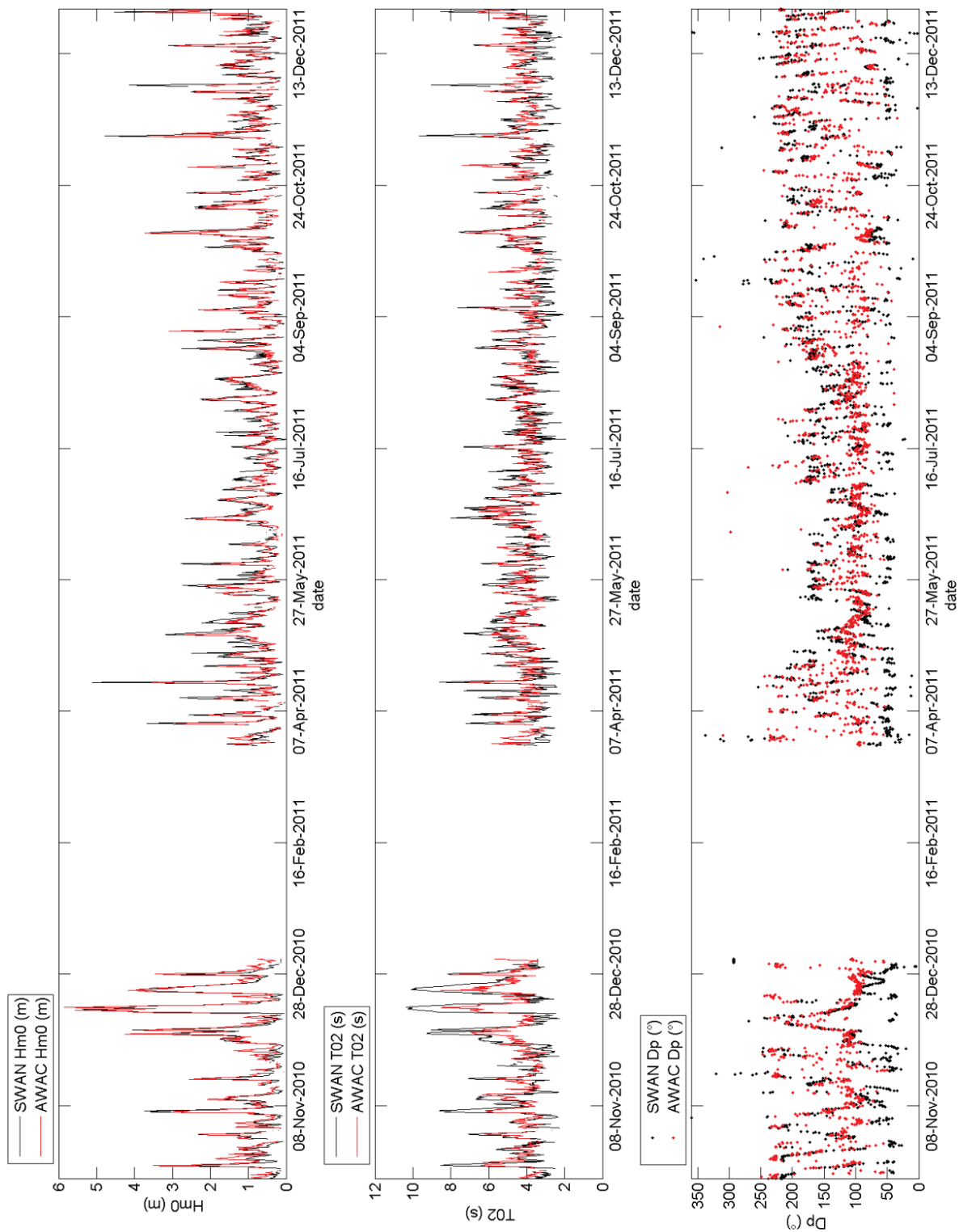


Figure 108. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011.

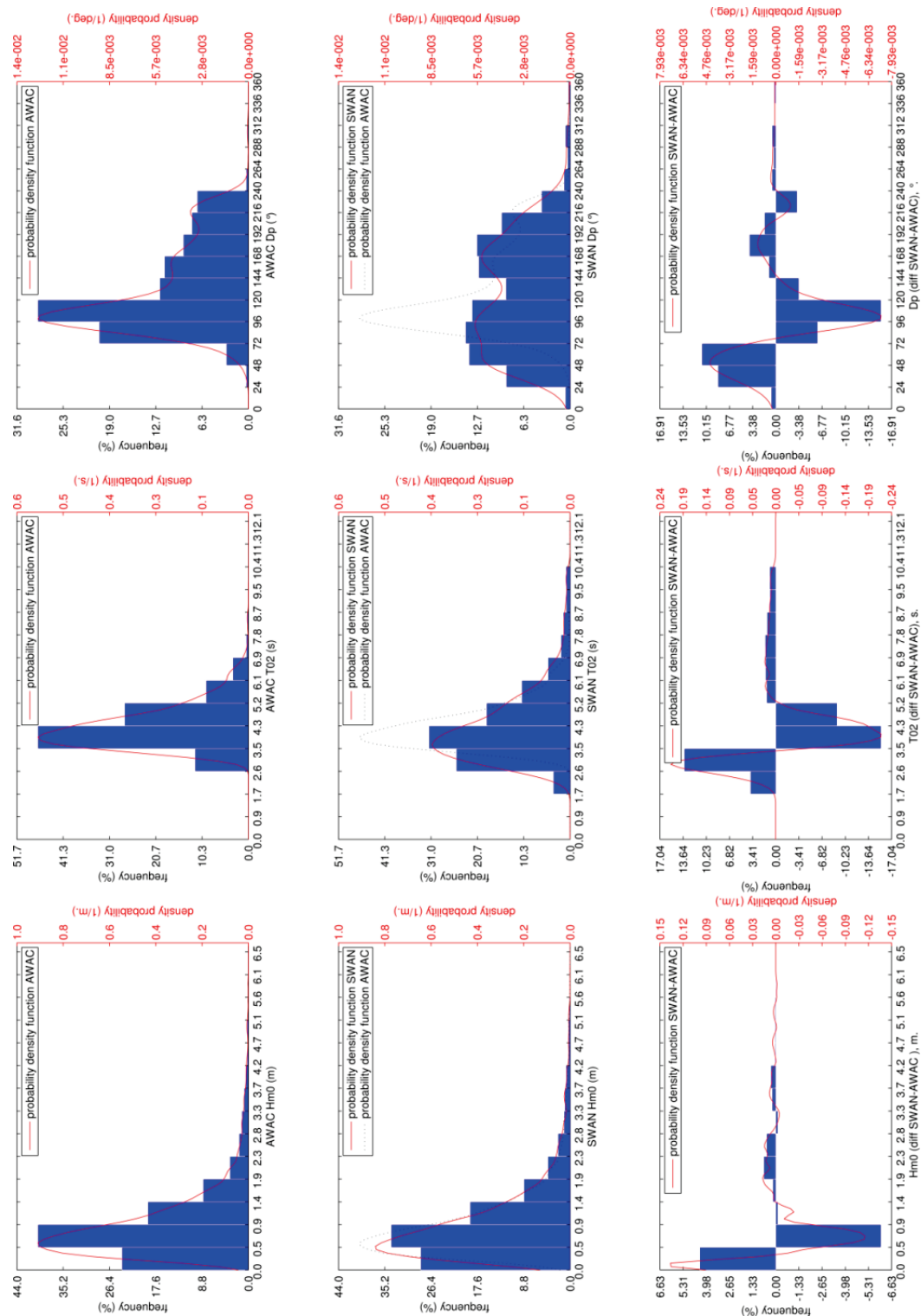


Figure 109. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.

Site de Saint-Ulric

Modèle EC vs AWAC, période d'englacement incluse

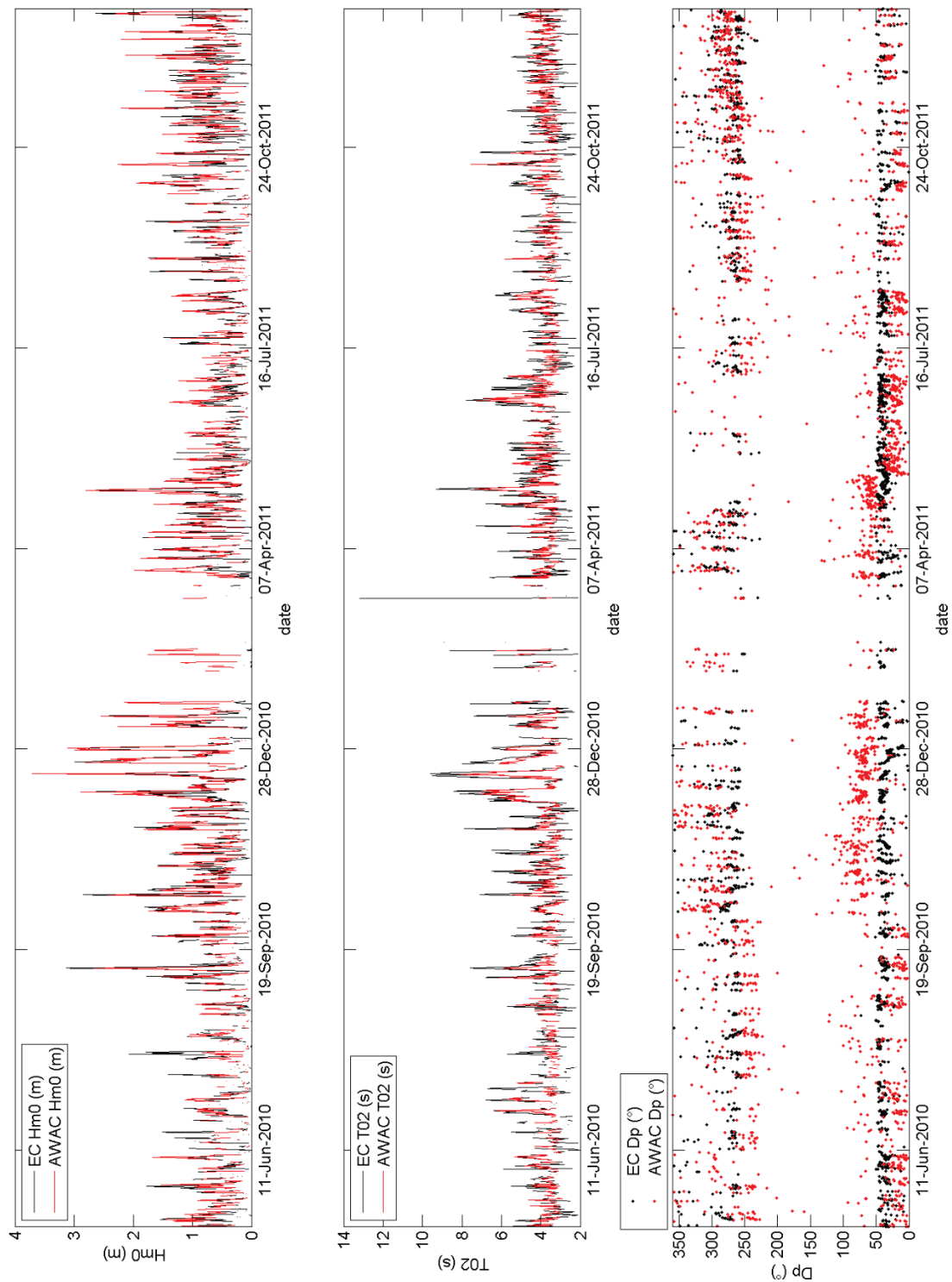


Figure 110. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011.

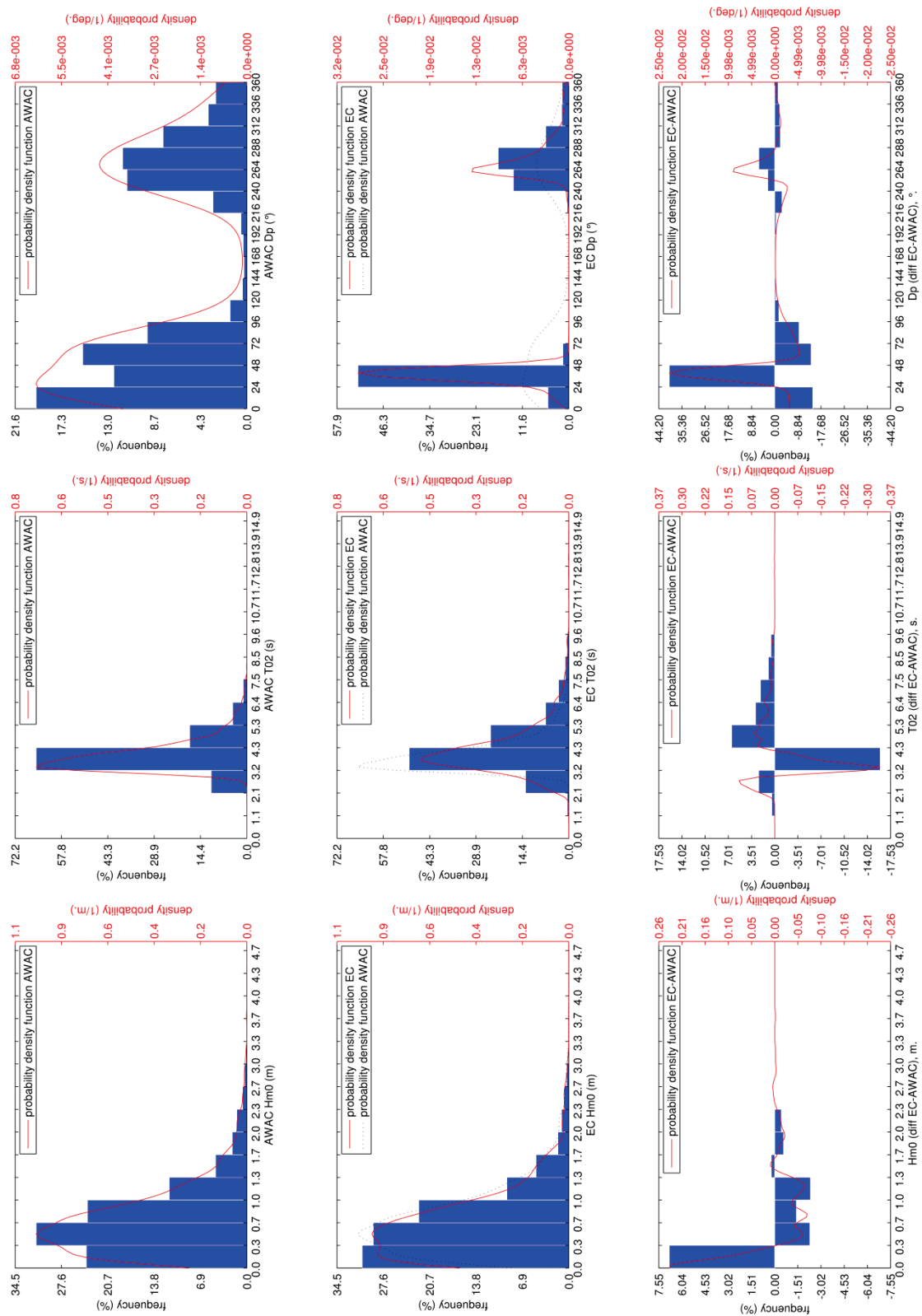


Figure 111. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011, incluant la période d'englacement.

Modèle EC vs AWAC, période d'englacement exclue

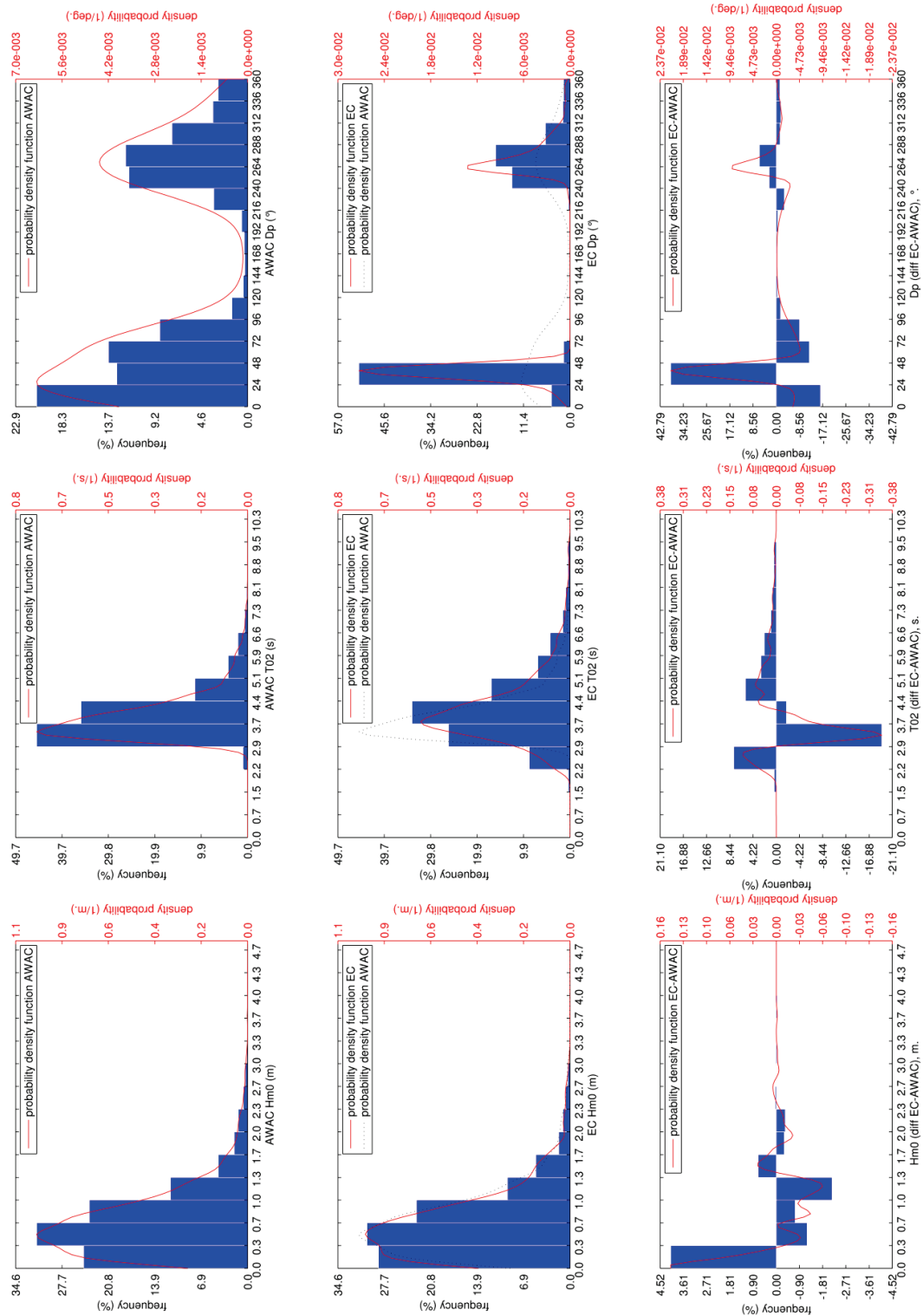


Figure 112. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.

SWAN vs AWAC, période d'englacement incluse

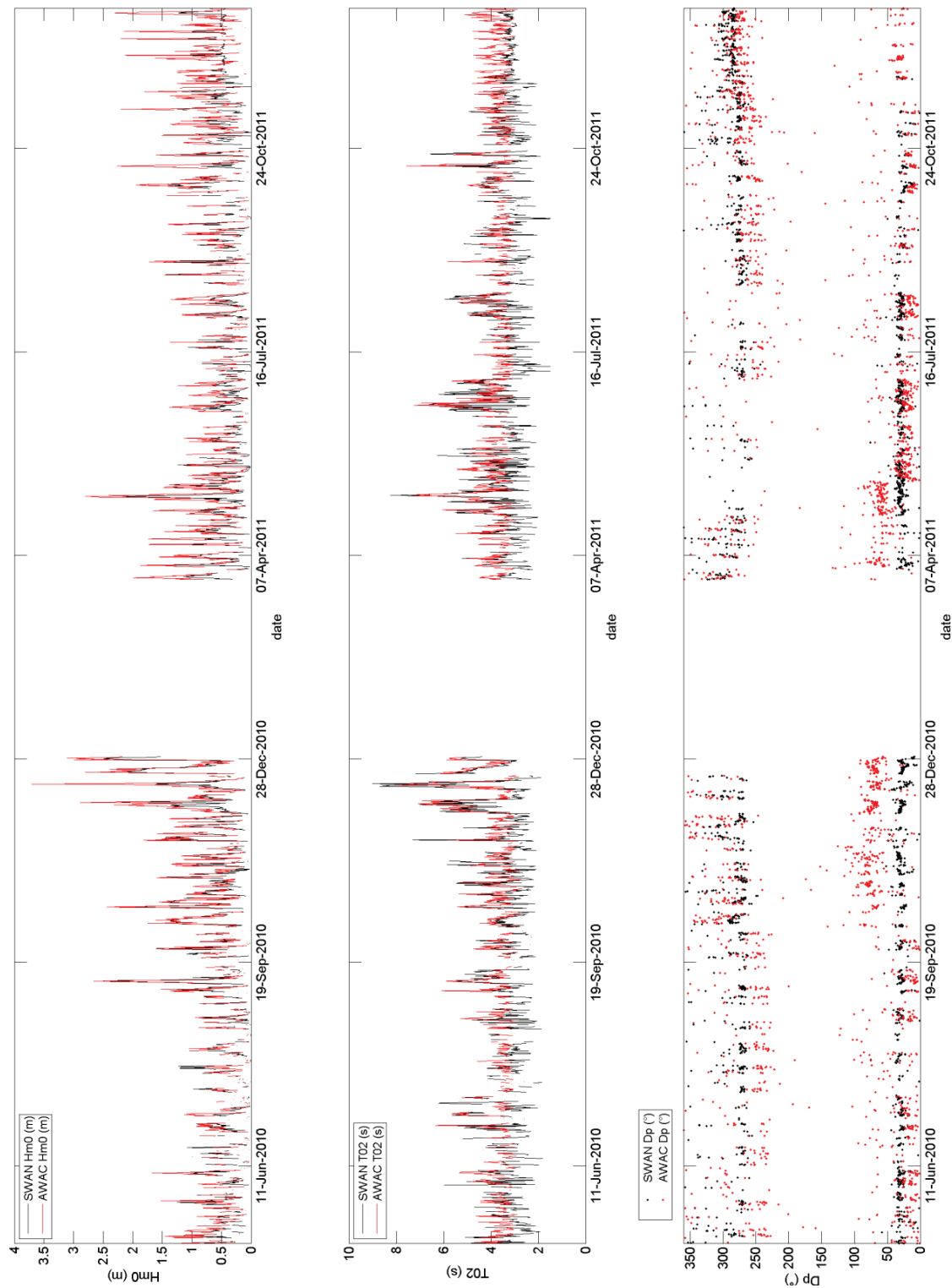


Figure 113. Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011.

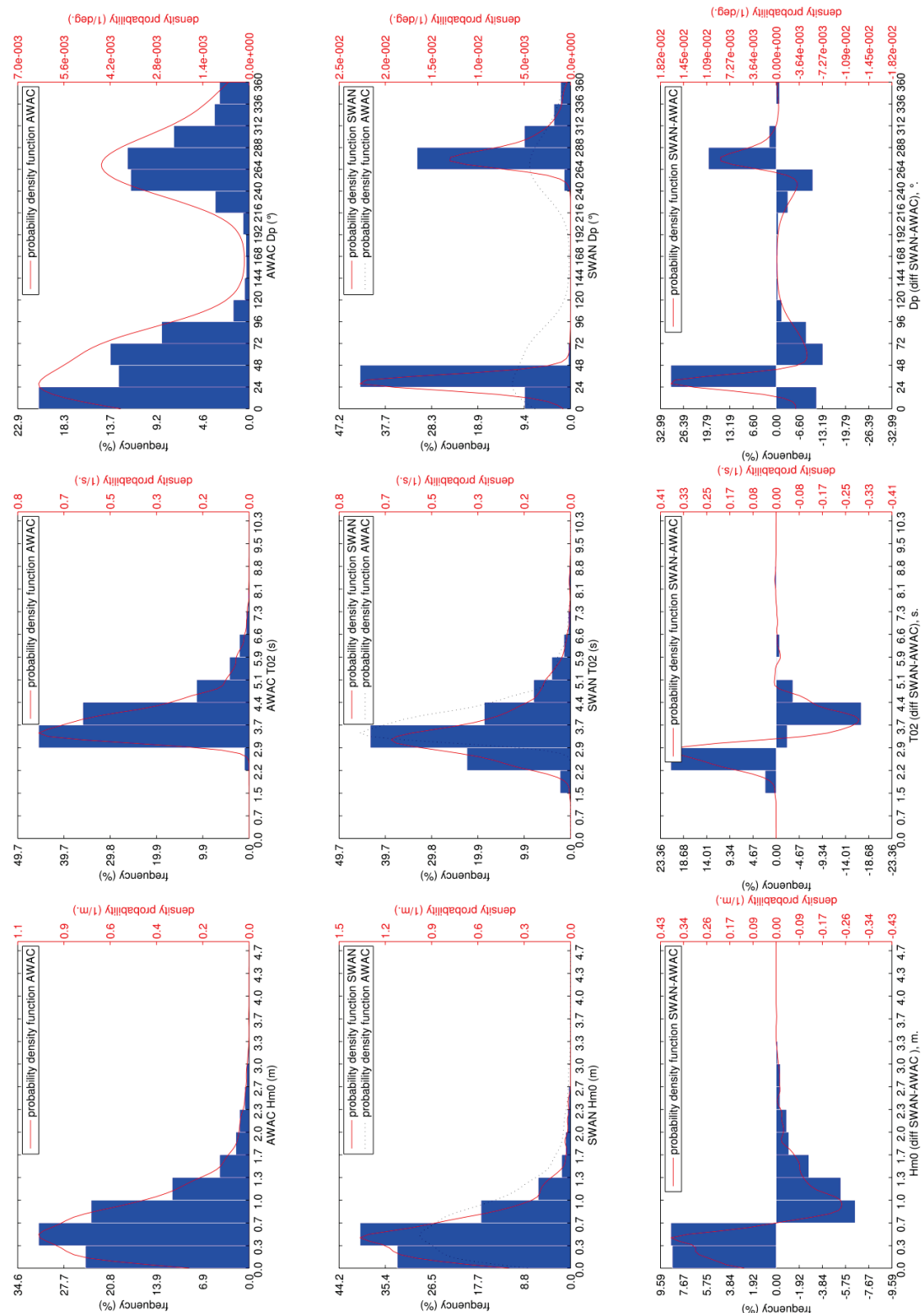


Figure 114. Distributions des paramètres de vagues mesurées (mouillage AWAC) et calculées (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Saint-Ulric pour la période du 03 mai 2010 au 31 décembre 2011, mais sans la période d'englacement.

Annexe 5 : Évaluation du climat pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et estimation de son évolution future

La méthode d'évaluation du climat de vagues présentée dans ce rapport et utilisée principalement aux cinq sites de mesure de vagues a également été appliquée sur une grille régulière de 15 km de résolution couvrant la partie nord-ouest du golfe du Saint-Laurent ainsi que l'estuaire maritime du Saint-Laurent. La prise en considération de la présence de glace de mer s'est faite selon les relations empiriques développées pour l'ensemble du golfe. Les sorties de la réanalyse MERRA ont été utilisées pour la caractérisation du climat de vagues sur la période 1981-2010 alors que celles de deux simulations du MRCC (aev et ahj) ont été utilisées pour estimer l'impact potentiel des changements climatiques sur le climat de vagues.

La Figure 115 permet de visualiser la variabilité spatiale des hauteurs H_s ayant une fréquence de dépassement 1% (H_s 1%) et des hauteurs H_s avec une période de retour de 50 ans (H_s 50 ans) pour la période 1981-2010 évaluée à partir de MERRA. Elle montre également l'influence de la glace sur le climat de vagues au cours de cette période. L'impact de la glace est de l'ordre de 10% (réduction des H_s).

La Figure 116 compare les H_s 1% des périodes climatiques 1981-2010 et 2071-2100 évaluées à partir des simulations MRCC-aev et MRCC-ahj. La Figure 117 compare pour les mêmes périodes les H_s 50 ans. Lorsque seule l'évolution du vent est prise en compte (panneaux de gauche), les résultats ne montrent pas une tendance claire de changements climatiques sur les H_s . Toutefois, lorsque l'effet combiné de l'évolution des vents et de la glace de mer est considéré (panneaux de droite), l'impact des changements climatiques sur les H_s est plus évident. En effet, la tendance est une augmentation des H_s 1% de l'ordre de 8-10% et des H_s 50 ans de l'ordre de 10-20%. En résumé, l'évolution de la glace de mer au cours du 21^e siècle devrait avoir un impact plus important sur l'évolution du climat de vagues de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent que l'évolution du régime des vents.

La Figure 118 illustre la diminution de l'effet de la glace de mer sur le climat de vagues (H_s 1% et H_s 50 ans) au cours du 21^e siècle, effet qui devient négligeable d'ici 2100.

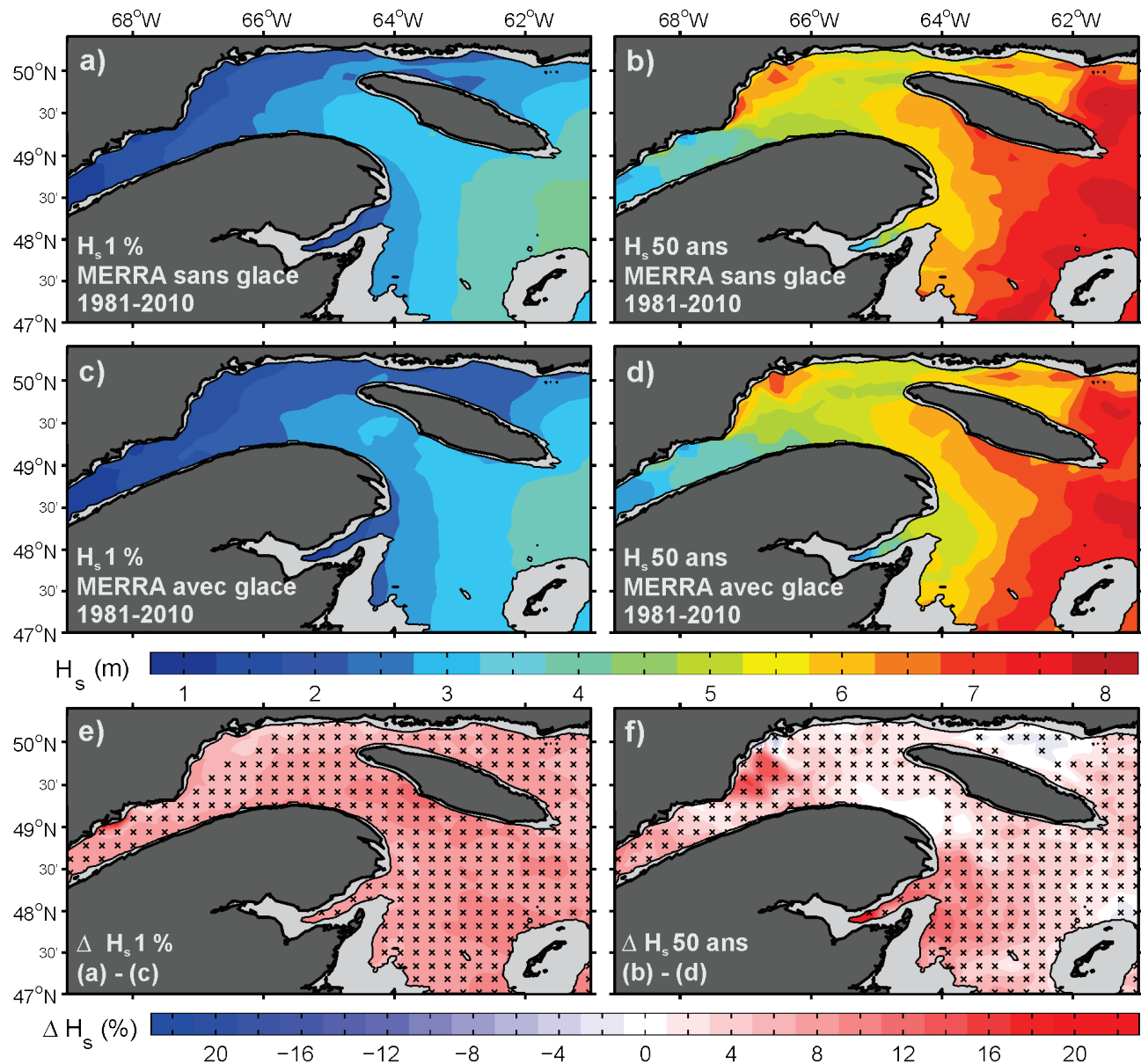


Figure 115. Climat de vagues (H_s 1% et H_s 50 ans) pour la période 1981-2010 évalué à partir de la réanalyse MERRA sans (a et b) et avec (c et d) glace de mer. Les écarts entre les climats évalués sans et avec glace ([sans glace] – [avec glace]) sont présentés en (e) et en (f). Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil 95%. Sur (f), pour aucun point les écarts sont plus grands que l'intervalle de confiance 95% de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée Pareto).

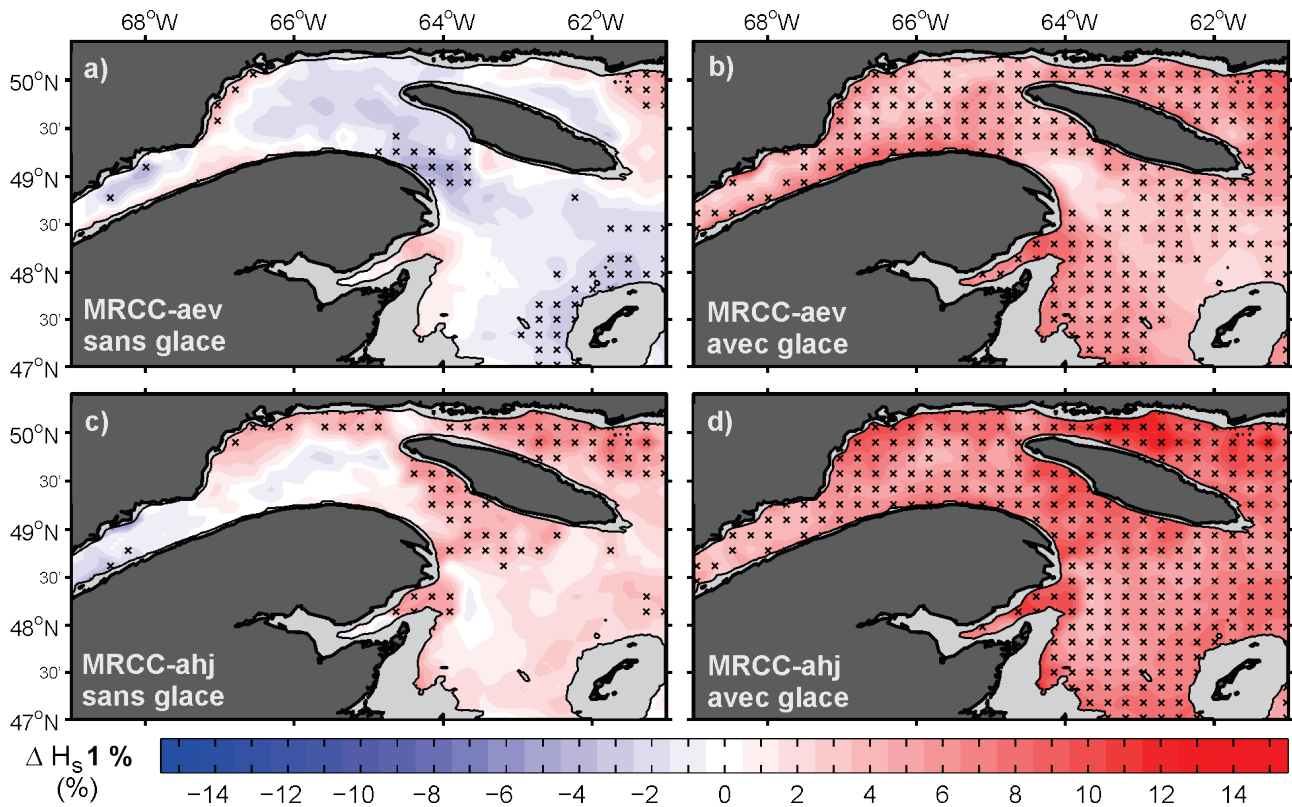


Figure 116. Écarts des H_s 1% entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 évalués à partir des simulations MRCC-aev (a et b) et MRCC-ahj (c et d) sans (a et c) et avec (b et d) glace de mer. Les écarts calculés selon $[2071-2100] - [1981-2010]$ sont exprimés en pourcentage et les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil 95%.

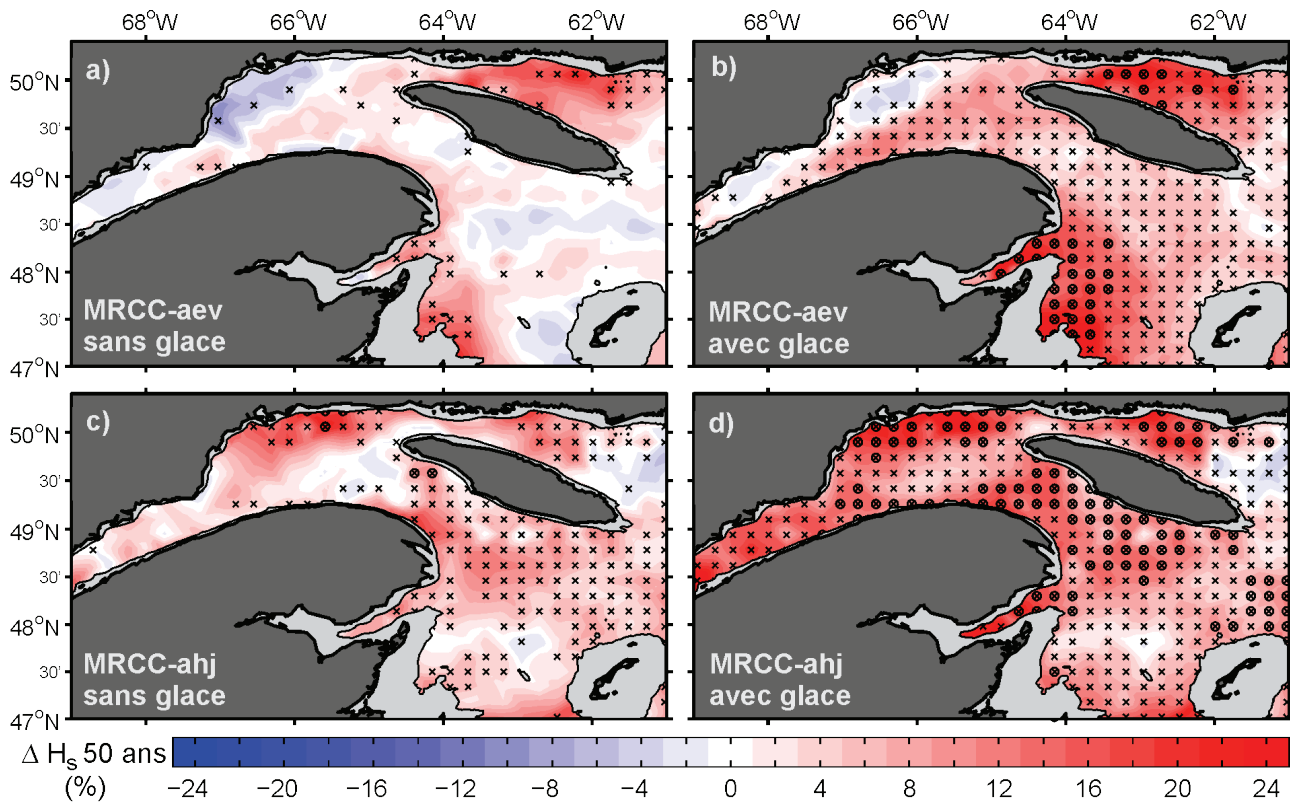


Figure 117. Écarts des H_s 50 ans entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 évalués à partir des simulations MRCC-aev (a et b) et MRCC-ahj (c et d) sans (a et c) et avec (b et d) glace de mer. Les écarts calculés selon $[2071-2100] - [1981-2010]$ sont exprimés en pourcentage. Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil 95% et ceux marqués d'un « o » représentent les écarts plus grands que l'intervalle de confiance 95% de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée Pareto).

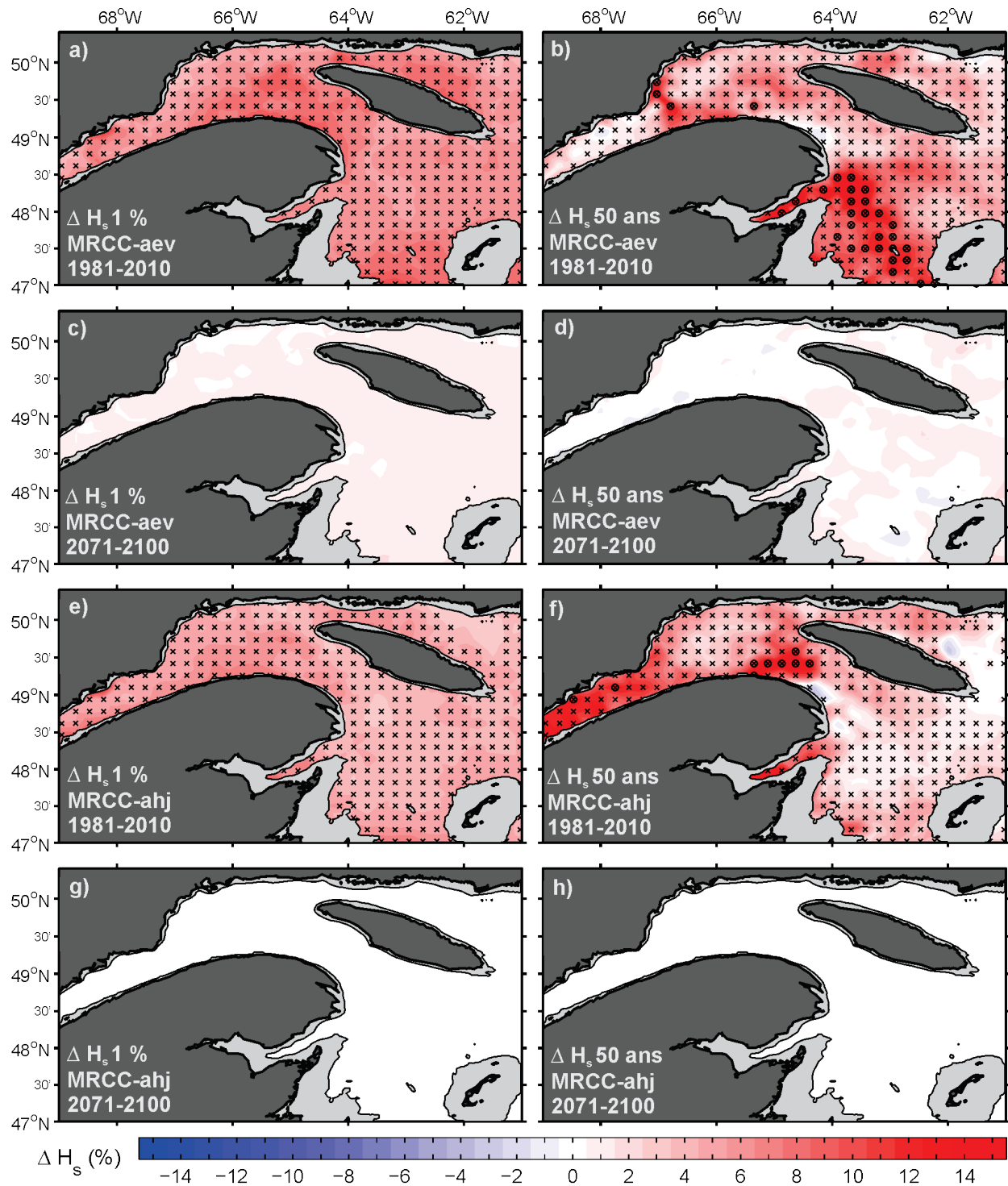
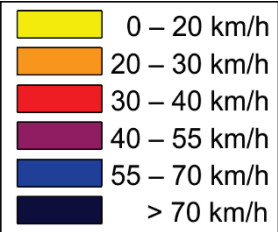
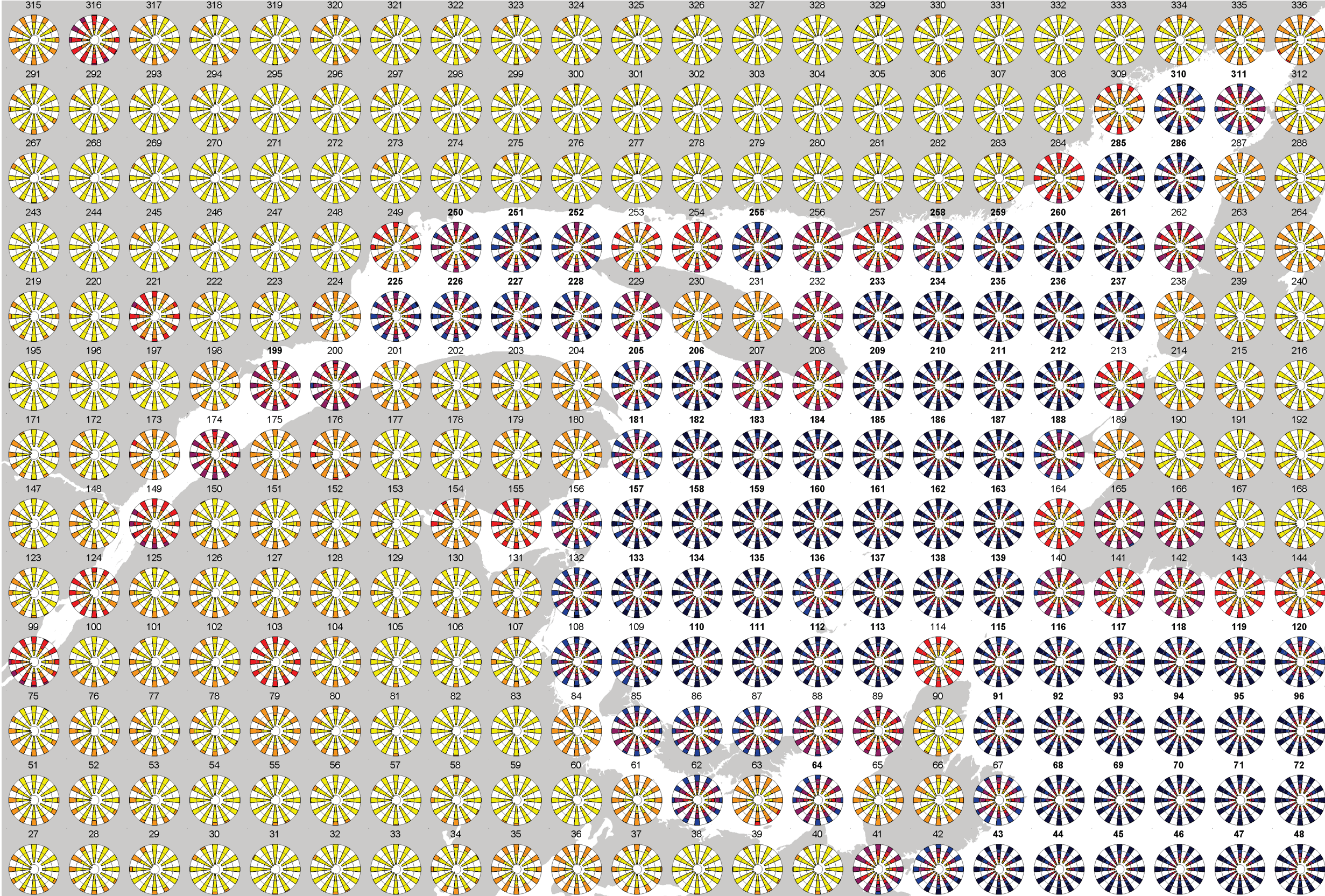


Figure 118. Écart en pourcentage entre les climats de vagues (H_s 1% et H_s 50 ans) évalués avec et sans glace de mer ([sans glace] – [avec glace]) pour les périodes 1981-2010 (a, b, e et f) et 2071-2100 (c, d, g et h) à partir des simulations MRCC-aev (a, b, c et d) et MRCC-ahj (e, f, g et h). Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil 95% et ceux marqués d'un « o » représentent les écarts plus grands que l'intervalle de confiance 95% de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée Pareto).

Annexe 6 : Roses de vent de MERRA (non-corrigé) 1981-2012 pour l'ensemble du golfe



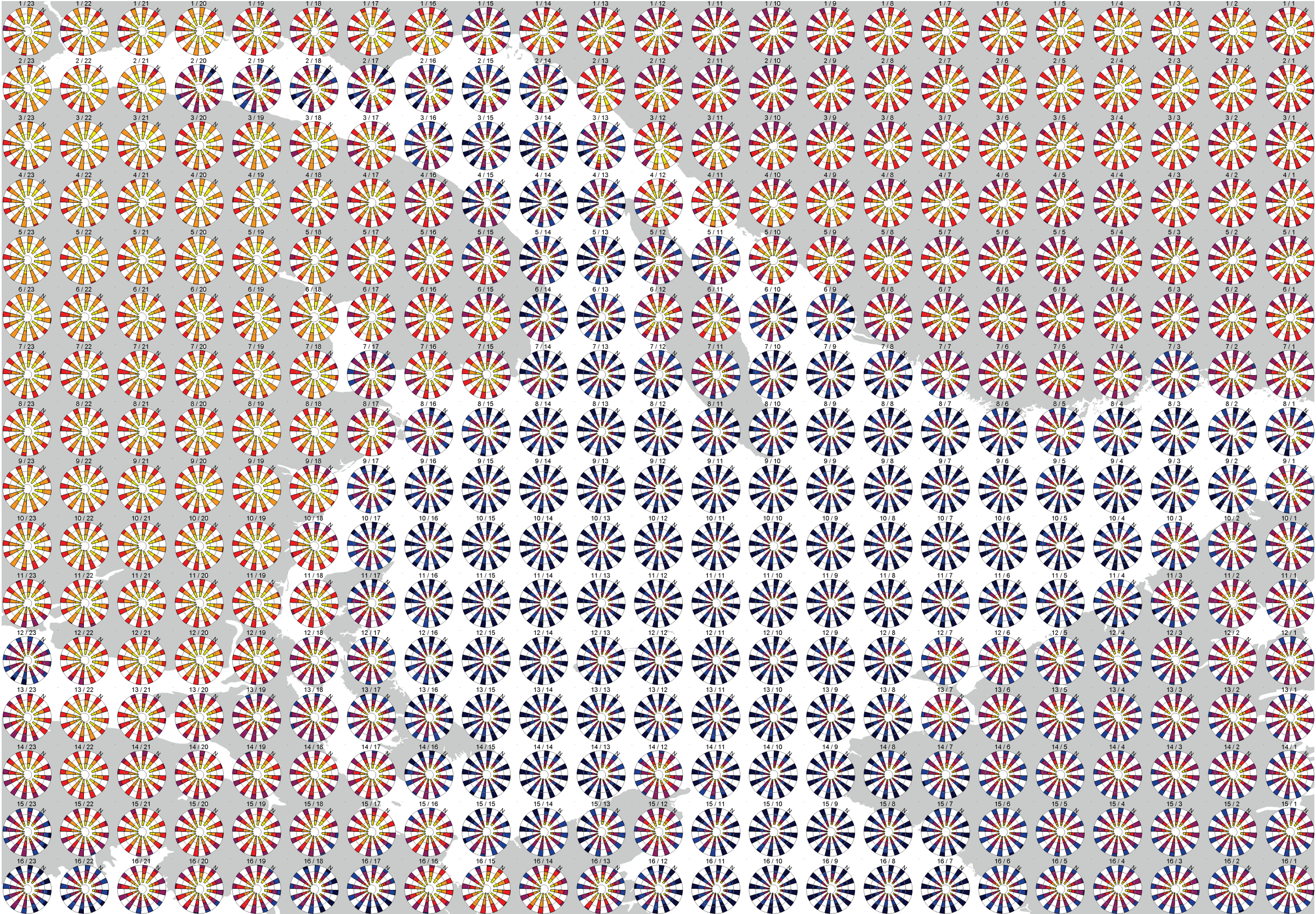
Les quatre cercles
représentent de l'extérieur
vers le centre 0.01 %, 0.1 %, 1 % et 10 %.



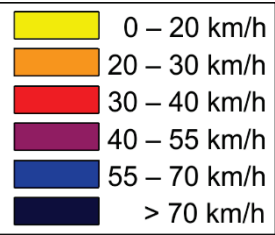
Annexe 7 : Roses de vent de MRCC-aev 1981-2010 pour l'ensemble du golfe



Les quatre cercles représentent de l'extérieur vers le centre 0.01 %, 0.1 %, 1 % et 10 %.



Annexe 8 : Roses de vent de MRCC-ahj 1981-2010 pour l'ensemble du golfe



Les quatre cercles représentent de l'extérieur vers le centre 0.01 %, 0.1 %, 1 % et 10 %.

