



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

ENVIRONNEMENT

→ **ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT**

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

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



Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec

Septembre 2013

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec (MTQ)* et a été financée par la Direction de l'environnement et de la recherche.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Collaborateurs :

- 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 Microsoft Visual C++ 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 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 intermembre des modèles climatiques.
- Yann Ropars pour son expertise des vagues en génie côtier et ses conseils sur l'utilisation de GENER.

© Gouvernement du Québec, ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports 2016

ISBN 978-2-550-75257-8 (PDF)

Dépôt légal – 2016

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés. La reproduction de ce document par procédé mécanique ou électronique, y compris la microreproduction, et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation écrite des Publications du Québec.

* Le ministère des Transports du Québec a changé de nom le 28 janvier 2016 et est devenu le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

FICHE ANALYTIQUE

Titre et sous-titre du rapport Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques	Numéro du rapport Transports Québec RTQ-15-04 Date de publication du rapport (année-mois) 2016-03	
Titre du projet de recherche Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques	Numéro du dossier	Numéro du projet X009.1
Responsable de recherche Urs Neumeier, professeur-chercheur, ISMER-UQAR	Date du début de la recherche Janvier 2011	Date de fin de la recherche Septembre 2013
Auteurs du rapport Urs Neumeier, Benoit Ruest, Adrien Lambert, Eliott Bismuth, Dany Dumont, Denis Jacob, Jean-Pierre Savard, Sylvain Joly		
Chargé de projet, direction Michel Michaud Direction de l'environnement et de la recherche	Coût total de l'étude 338 000 \$	
Étude ou recherche réalisée par ISMER-UQAR 310, allée des Ursulines Rimouski (Québec) G5L 3A1	Étude ou recherche financée par Direction de l'environnement et de la recherche Ministère des Transports du Québec 930, chemin Sainte-Foy, 6 ^e étage Québec (Québec) G1S 4X9	

Problématique

L'érosion des côtes est une problématique qui affecte la majorité des côtes mondiales. Depuis une vingtaine d'années, des interventions récurrentes de réfection et de protection de l'infrastructure routière ont dû être réalisées pour contrer ce phénomène, à la suite de dommages occasionnés par des événements climatiques.

La conception et le dimensionnement des ouvrages de protection côtière nécessitent de connaître le climat de vagues durant toute leur durée de vie utile. Dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, on ne dispose pas de longues séries chronologiques de mesures des vagues induites par le vent. Pour cette raison, les critères et les normes de conception de ces ouvrages (quais, protections en enrochement, jetées, etc.) sont actuellement basés sur des modèles de vagues alimentés par des données historiques de vent et de glace. En effet, le ministère des Transports du Québec (MTQ) utilise actuellement un modèle de vagues dit « de fetch » basé sur des données de vent issues de stations météorologiques côtières ou marines. Malheureusement, l'emplacement de ces stations n'est pas toujours optimal pour déterminer le régime des vagues d'un endroit donné, et les vagues réelles ne sont pas le résultat d'un vent appliqué en un seul point de l'espace, mais bien du vent appliqué sur l'ensemble du plan d'eau pour la direction des vagues concernée. De plus, les conditions de glace ne sont pas prises en compte par ce modèle, alors qu'elles peuvent fortement atténuer les vagues.

Il existe également des modèles de vagues dits « numériques » qui calculent le transfert d'énergie du vent tiré d'un modèle météorologique vers le plan d'eau pour une surface commune. Celui qui a été conçu par Environnement Canada (modèle EC) pour le golfe du Saint-Laurent est basé sur les prévisions météorologiques du modèle GEM d'Environnement Canada. Il permet de propager des vagues lorsque les courants sont importants et peut aussi tenir compte de la présence de glace flottante. Cependant, ce modèle ne considère pas les houles atlantiques qui pénètrent dans le Golfe et, pour des simulations sur plusieurs décennies, il requiert un temps de calcul considérable que la puissance informatique des ordinateurs actuellement en service peut difficilement assumer.

Par ailleurs, les conditions climatiques historiques utilisées dans ces modèles ne reflètent pas les conditions futures, puisque le régime des vents et les conditions de glace sont appelés à changer rapidement. En effet, 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. Par conséquent, les critères de conception doivent tenir compte de ces conditions futures. Pour ce faire, des modèles de vagues qui intègrent les données de vent et l'atténuation des vagues par les glaces prévue par les modèles climatiques doivent être créés.

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 ceux de protection des routes côtières et des infrastructures maritimes, dans un contexte de changements climatiques. Cet objectif général comporte deux sous-objectifs, soit :

1. Valider le modèle unidimensionnel (modèle de fetch) utilisé actuellement par le MTQ pour calibrer les infrastructures et adapter ce modèle en l'alimentant avec des vents modélisés par des modèles de climat. Cette validation doit aussi tenir compte de l'atténuation saisonnière des vagues par les glaces dans le contexte du climat futur.
2. Fournir au MTQ une indication des tendances futures concernant le régime des vagues dans le golfe du Saint-Laurent afin que le Ministère puisse adapter la gestion des infrastructures et les opérations d'entretien de même que procéder à la mise à niveau des ouvrages de protection existants.

Méthodologie

Des stations de mesure des vagues (ADCP) ont été mouillées entre 2010 et 2012 au large des côtes de Sept-Îles, de Cap d'Espoir et de Saint-Ulric. Les données recueillies ont été comparées, pour la période commune de 2010 à 2012, avec les données de vagues produites par le modèle numérique (EC) afin de valider ce dernier, qui fonctionne en conditions de glace. Par la suite, les données du modèle EC peuvent être utilisées pour calibrer le modèle de fetch partout dans le Golfe en déterminant une fonction d'amortissement des glaces à partir de variables climatiques.

Des modifications ont été apportées au modèle de vagues paramétrique GENER (modèle de fetch utilisé dans ce projet), notamment pour pouvoir l'utiliser en traitement par lots (*batch mode*) et y ajouter différentes formules de fetch. Un algorithme de prétraitement de vents a été créé afin d'améliorer la représentativité des données de vent issues de modèles atmosphériques alimentant le modèle GENER. À la suite de ces modifications, le GENER a été validé avec les données des 3 stations de mesure des vagues et de la bouée de Mont-Louis (mouillée depuis 1991).

Une méthode a été mise au point pour représenter l'atténuation des vagues par la glace de mer pour le XXI^e siècle et ainsi pouvoir intégrer cette variable à GENER. Les 2 approches utilisées pour modéliser la présence de glace sont : 1) la détermination de formules empiriques utilisant la température de l'air; 2) l'utilisation de prévisions de glace de mer obtenues à partir d'un modèle océanique incluant la glace (MOR).

La validation des sorties du modèle GENER intégrant l'atténuation par la glace a été effectuée en comparant, pour la période 1981-2010, les vagues modélisées à partir des vents issus des prévisions météorologiques (modèle GEM d'EC) et des vents obtenus à l'aide de deux modèles climatiques (MERRA_{corr} et MRCC-aev/ahj). Le MRCC-aev/ahj a produit les climats de vagues les plus réalistes pour le futur. Cette validation a permis de s'assurer que les vents des modèles climatiques convenaient pour obtenir des climats de vagues réalistes à long terme avec GENER, et ce, pour 5 sites d'étude, soit Sept-Îles, Cap d'Espoir-Anse-à-Beaufils (Percé), Saint-Ulric, Mont-Louis et Pointe-aux-Loups (Îles-de-la-Madeleine).

Résultats et recommandations

Validation des modèles actuellement utilisés (GENER et EC)

La validation du modèle EC (avec les données des 3 stations de mesure des vagues mouillées en 2010) a montré que celui-ci représente relativement bien les hauteurs de vagues dans l'estuaire maritime (Saint-Ulric), mais qu'il surestime les hauteurs dans le Golfe (Cap d'Espoir et Sept-Îles). Ce modèle manque fortement de précision pour les périodes aux 3 sites d'étude. Les périodes des vagues les plus hautes sont d'ailleurs surévaluées. 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 toutefois très bien représentées pour Sept-Îles et Cap d'Espoir. Finalement, le modèle EC prédit correctement les occurrences des événements de vagues moyennes à très fortes.

La validation des différentes formules de fetch appliquées dans GENER a montré que SPM84 (initialement incluse dans le modèle GENER) surévalue manifestement la hauteur des vagues. Les autres formules (SPM77, initialement incluse dans GENER, Jonswap [1973], *Coastal Engineering Manual* [CEM03], Wilson [1965] et Donelan [1980]) produisent des résultats satisfaisants, et assez similaires. Le meilleur accord a été obtenu avec la formule CEM03, qui a été utilisée pour ce projet.

Tendances futures concernant le régime des vagues dans le golfe du Saint-Laurent

Le modèle GENER a été modifié afin d'effectuer des traitements par lots, d'y ajouter différentes formules de fetch (dont la formule CEM03 sélectionnée) et d'y intégrer une fonction d'atténuation des vagues par la glace de mer. Les prédictions de glace de mer, issues des formules empiriques utilisant les degrés-jours de gel et des sorties de glace du MOR, indiquent des tendances similaires pour la période 1970-2070, soit la diminution progressive de la durée d'englacement, du couvert de glace et de l'atténuation des vagues par les glaces. L'atténuation des vagues par la glace devient négligeable pour le climat de vagues au large entre 2060 et 2100 et pourrait être ignorée pour des études simplifiées.

Les vagues produites par GENER avec les vents de MRCC-aev/ahj et atténuées selon les deux approches de prédiction de l'influence de la glace indiquent une hausse du climat de vagues entre les périodes 1981-2010 (passé récent) et 2071-2100 (futur lointain) aux 5 sites d'étude. La hausse est marquée pour l'énergie moyenne des vagues. Par contre, pour les vagues extrêmes, la hausse est importante entre le passé récent et le futur lointain (entre 5 cm et 1 m des hauteurs de période de retour de 50 ans), mais moins marquée pour les périodes intermédiaires (2011-2040 et 2041-2070). Cette hausse du climat de vagues est directement liée à : 1) la diminution du couvert de glace, qui augmentera l'énergie moyenne des vagues durant la période hivernale, et potentiellement la hauteur de vagues extrêmes pour la seconde moitié du XXI^e siècle; 2) un changement du régime des vents pour certaines analyses.

Limites et recommandations de l'étude

Pour la présente étude, un seul scénario de changement climatique (A2) a été utilisé parmi les différents scénarios disponibles. Les résultats ne couvrent donc pas tout le spectre des possibilités d'évolution du climat. Il pourrait être pertinent, dans des travaux futurs, de corriger le biais dans les séries de vagues modélisées à l'aide des prévisions et des modélisations climatiques, ce qui pourrait éventuellement réduire les incertitudes dans les projections climatiques. Les écarts remarquables entre les données de vent des différents modèles climatiques (MRCC-aev/ahj) se traduisent aussi par des écarts entre les climats de vagues simulés. Il faudrait répéter cette étude quand d'autres simulations régionales de vent seront disponibles, car actuellement, 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.

De plus, seuls les changements dans le climat de vagues annuel ont été étudiés. Or, le climat de vagues varie d'une saison à l'autre. Il pourrait également être pertinent d'étudier l'évolution dans le temps de la variabilité intersaisonnière du climat de vagues pour connaître les changements saisonniers (par exemple : une augmentation des hauteurs de vagues le printemps/été et une diminution pour l'automne/hiver).

Mots clés	Nombre de pages 297	Nombre de références bibliographiques 85	Langue du document ☒ Français ☐ Anglais Autre (spécifier) :
-----------	----------------------------	---	---

Affiliation des auteurs

Urs Neumeier	Professeur-chercheur, ISMER
Benoit Ruest	Étudiant à la maîtrise en océanographie, ISMER
Adrien Lambert	Stagiaire postdoctoral, 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., B. RUEST, A. LAMBERT, E. BISMUTH, D. DUMONT, D. JACOB, J.-P. SAVARD et S. JOLY (2013). *Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques*, Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, septembre 2013. [Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec].

REMERCIEMENTS

Au terme de ce projet, les auteurs expriment leurs remerciements à toutes les personnes qui y ont 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 Microsoft Visual C++ 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 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 intermembre 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 également 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.

SOMMAIRE

La conception et le dimensionnement des ouvrages de protection contre l'érosion côtière nécessitent 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 de recourir à des modèles.

Le climat de vagues futur est étudié dans ce rapport avec le modèle paramétrique de vagues GENER, qui est basé sur des formules de fetch. En plus des deux formules initiales (SPM77 et SPM84), 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 lots (*batch mode*). Enfin, un algorithme de prétraitement de vents a été créé afin d'alimenter GENER avec les champs de vents 2D issus des modèles atmosphériques. Cet algorithme détermine pour chaque heure le secteur d'où provient le vent générateur de vagues et calcule ensuite un vecteur de vent moyen pour ce secteur. La validation de GENER alimenté par les vents ajustés du modèle de réanalyse MERRA a été effectuée avec les données enregistrées par les houlographes (AWAC) immergés à 30 à 40 m de profondeur au large de Saint-Ulric, de Cap d'Espoir et de Sept-Îles (de mai 2010 à octobre 2012) et par la bouée de Mont-Louis (de 1991 à 2012). Cette validation indique que SPM84 surévalue manifestement la hauteur des vagues. Les autres formules produisent des résultats satisfaisants, et assez similaires. 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-jours 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 couvert de glace futur. Néanmoins, elles indiquent une diminution progressive de l'influence des glaces, qui devient négligeable pour le climat de vagues au large entre 2060 et

2100, selon les régions. C'est dans la moitié sud de l'estuaire maritime que la glace influencera le plus longtemps les vagues.

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 conditions de vagues futures. 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 échelonnées de 1981 à 2100 ont été produites par GENER avec les vents de MRCC-aev et de 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 et 2010 et 2071 et 2100 à tous les sites, avec une augmentation variant entre 5 cm et 1 m des hauteurs de période de retour de 50 ans, selon les sites et les simulations de vents. Toutefois, dans 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 seconde 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 aussi, pour la moitié des combinaisons sites × simulations, 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 AWAC (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 de Cap d'Espoir (golfe du Saint-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 Saint-Laurent), il sous-évalue légèrement la hauteur des vagues inférieures à 2 m d'un facteur de 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 et de 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) et entre 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

1 INTRODUCTION	37
2 Méthodologie générale	43
2.1 Sites d'étude	43
2.2 Données de validation expérimentales	47
2.3 Données issues des modèles de vagues	48
2.3.1 Données issues du modèle d'Environnement Canada (modèle EC)	48
2.3.2 Données issues de SWAN forcé par le modèle EC	49
2.4 Données issues de modèles atmosphériques (réanalyses et modèles climatiques)	51
2.4.1 Réanalyses NARR et MERRA	52
2.4.2 Modèles climatiques MRCC et NARCAPP.....	56
2.5 Protocole d'évaluation de la performance instantanée	61
2.5.1 Biais moyen (mean bias– MB)	62
2.5.2 Erreur absolue moyenne (mean absolute error – MAE, ou absolute bias)	62
2.5.3 Racine de l'erreur quadratique moyenne (root mean squared error – RMSE)	62
2.5.4 Part systématique de la RMSE ($RMSE_s$)	63
2.5.5 Part non systématique de la RMSE ($RMSE_u$)	63
2.5.6 Écart-type de l'erreur entre valeur prédite et mesurée (standard deviation of error – SDE).....	64
2.5.7 Coefficients de l'équation de la droite de régression linéaire.....	64
2.5.8 Coefficient de détermination (R^2)	64
2.5.9 Critère de performance global pour données non directionnelles (overall performance score)	65
2.5.10 Indice de similitude (index of agreement).....	66
2.5.11 Erreur angulaire absolue moyenne (MAE°)	66
2.5.12 Concentration approximative (approximate concentration).....	66
2.5.13 Coefficient de corrélation linéaire pour données directionnelles (linear correlation coefficient, utilisation des différences directionnelles).....	67
2.6 Protocole d'évaluation de la performance climatique	67
3 GENER	73
3.1 Description de GENER	73
3.2 Modifications initiales à GENER	74
3.3 Ajout de nouvelles formules de fetch	75
3.3.1 SPM77 (USACE, 1977).....	75
3.3.2 SPM84 (CERC, 1984).....	76
3.3.3 Jonswap (Hasselmann et al., 1973).....	77

3.3.4	CEM03 (Resio, Bratos et Thompson, 2002)	77
3.3.5	Wilson (1965)	78
3.3.6	Donelan (1980)	79
3.4	Algorithme de prétraitement de vents	79
4	Méthode d'atténuation des vagues par la glace	83
4.1	Traitement des données de glace (2002-2012)	83
4.2	Caractérisation du climat de glace 2002-2012	86
4.2.1	Estuaire et golfe du Saint-Laurent	86
4.2.2	Sites des AWAC	89
4.3	Projections futures de la présence de glace	91
4.3.1	Estuaire et golfe du Saint-Laurent	91
4.3.2	Sites des AWAC	95
4.4	Méthode de prise en compte de la glace pour l'évaluation du climat de vagues futur	104
4.5	Atténuation des vagues à partir des prédictions de glace du MOR	109
4.6	Conclusion sur l'atténuation des vagues par la glace	116
5	Résultats	117
5.1	Validation du modèle EC	117
5.1.1	Introduction	117
5.1.2	Hauteurs significatives	121
5.1.3	Périodes	139
5.1.4	Directions	153
5.1.5	Relations entre les paramètres de hauteur significative, de période moyenne et de direction moyenne des vagues prédites par le modèle EC	166
5.1.6	Conclusions sur les performances du modèle EC	181
5.2	Validation de GENER	183
5.3	Comparaison entre AWAC-MERRA _{corr} et MERRA _{corr} -MRCC	187
5.4	Climat de vagues futur et comparaison avec le passé récent	193
5.4.1	Simulations avec atténuation des vagues selon la glace du MOR	193
5.4.2	Simulations avec atténuation des vagues selon les formules empiriques	204
5.4.3	Synthèse sur le climat de vagues futur	213
6	Conclusions	235
7	Références	237

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Position des houlographes (sites A, B, C et ML) et des sites modélisés pour le climat futur (sites A, B, C, ML et IMC).....	44
Tableau 2	Comparaison de données de vent de MERRA avec les mesures à la bouée de Mont-Louis (C45138) et à la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine (IdIM).....	53
Tableau 3	Liste des formules de fetch disponibles dans GENER.....	75
Tableau 4	Équations des droites de régression entre les paramètres issus des degrés-jours de gel et ceux provenant des cartes de glace, avec leur coefficient de corrélation respectif. Les coefficients supérieurs à 0,80 sont indiqués en gras	88
Tableau 5	Période de résidence de la glace de mer pour l'hiver 2010-2011 dans un rayon de 40 km autour de chaque site	120
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.....	167
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	172
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	177
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	184
Tableau 10	Fréquence de dépassement et période de retour des climats de vagues calculés par GENER avec les vents MERRA _{corr} , de MRCC-aev et de MRCC-ahj, pour la période 1981-2010.....	189
Tableau 11	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du MOR	196
Tableau 12	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-ahj et l'atténuation des vagues selon la glace du MOR	197
Tableau 13	Liste des scénarios d'atténuation de glace (formules empiriques) appliqués en post-traitement aux sorties de GENER (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups)	204

Tableau 14	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Saint-Ulric (site A). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison	208
Tableau 15	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Cap d'Espoir (site B). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison	209
Tableau 16	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Sept-Îles (site C). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison	210
Tableau 17	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Mont-Louis (site ML). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison	211
Tableau 18	Fréquence de dépassement, période de retour et énergie moyenne pour les climats de vagues passé et futurs calculés avec les vents de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Pointe-aux-Loups (site IMC). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans atténuation (pas de glace) figurent comme comparaison.....	212
Tableau 19	Fetch pondérés en kilomètres aux sites d'étude	246

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Carte de localisation des sites d'étude.....	43
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	45
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.....	46
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	47
Figure 5	Comparaison entre les vents de MERRA et de la bouée de Mont-Louis (C45138); les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleurs (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) <i>Q-Q plot</i> de U_{10}	54
Figure 6	Comparaison entre les vents de MERRA et de la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine; les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleurs (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) <i>Q-Q plot</i> de U_{10}	55
Figure 7	Vitesse moyenne de 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.	56
Figure 8	Réchauffement global durant le XXI ^e siècle selon des modèles climatiques utilisant différents scénarios d'émission de CO_2 (GIEC, 2007)	57
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 et février pour 1971-2000. (D) Moyenne décembre, janvier et février pour 2041-2070	59
Figure 10	Vitesse moyenne de 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.....	60
Figure 11	Vitesse moyenne de 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.....	61
Figure 12	GPD ajustées (lignes pleines) et intervalles de confiance à 95 % (lignes traitillées) avec des seuils sélectionnés selon les centiles 90 ^e (gris), 93 ^e (rouge), 96 ^e (bleu) et 99 ^e (noir) à 49,42°N / 66,31°W (a) et à 48,46°N / 62,71°W (b).....	71

Figure 13	Illustration de l'algorithme de prétraitement de vents. (A) Sélection des points de grille marins à une distance plus proche que le fetch pondéré (en pointillé rouge) dans un secteur de 90° pour l'une des 16 directions θ (flèches en bleu). (B) Fetchs pondérés pour les 16 directions θ (en pointillés rouges), vecteurs de vent moyenné pour chacune des 16 directions (flèches noires quand dirigés vers le site d'étude, flèches grises quand s'éloignant du site d'étude), vecteur retenu (ellipse verte).....	81
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 dixièmes) avec les données numériques DEX du même jour importées dans MATLAB	85
Figure 15	Concentration totale de glace dans le Golfe (en bleu) et degrés-jours de gel calculés pour l'hiver (en vert). L'hiver 2002-2003 (en haut) est un hiver relativement froid, alors que l'hiver 2009-2010 (en bas) est un hiver chaud	87
Figure 16	Régressions linéaires entre les paramètres issus du nombre de degrés-jours de gel (abscisse) et ceux provenant des cartes de glace (ordonnée) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.	89
Figure 17	Régression linéaire entre les paramètres de degrés-jours de gel (abscisse) et la présence de glace (ordonnée) pour les 3 sites des AWAC, dans un rayon de 50 km (en bleu) et de 100 km (en vert)	90
Figure 18	Température moyennée entre le 1 ^{er} 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 représentés en jaune pâle) des 5 membres simulant le scénario A2. Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.....	92
Figure 19	Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) pour l'ensemble du Golfe.....	93
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 des différentes simulations, et la zone ombragée illustre le minimum et le maximum obtenus pour chaque année. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM.....	94
Figure 21	Température moyennée entre le 1 ^{er} 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.....	96

Figure 22	Température moyennée entre le 1 ^{er} octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (100 km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM.....	97
Figure 23	Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes sans points) dans un rayon de 50 et de 100 km autour du site de Saint-Ulric.....	98
Figure 24	Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes sans points) dans un rayon de 50 et de 100 km autour du site de Cap d'Espoir.....	99
Figure 25	Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes sans points) dans un rayon de 50 et de 100 km autour du site de Sept-Îles.....	100
Figure 26	Résultats des relations empiriques du tableau 5 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Saint-Ulric. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM.....	101
Figure 27	Résultats des relations empiriques du tableau 5 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 représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM.....	102
Figure 28	Résultats des relations empiriques du tableau 5 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Sept-Îles. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM.....	103
Figure 29	Schéma décrivant la méthode d'atténuation des vagues produites par GENER. (a) Série temporelle fictive de hauteur significative des vagues telle qu'elle est 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) à (g) Série temporelle (a) sur laquelle ont été appliqués les différents masques temporels d'atténuation. La courbe en gris représente la série non atténuée.....	106
Figure 30	Indice d'impact cumulé de la glace sur le régime des vagues hivernal selon les relations empiriques, pour le Golfe et pour chacun des sites des AWAC (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	108
Figure 31	Grille du 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).....	109
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)	110
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	112
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	113
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	114
Figure 36	Indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les simulations MOR-aev et MOR-ahj, calculé comme la somme des coefficients d'atténuation de chaque hiver	115
Figure 37	Lissage de l'indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les simulations MOR-aev (traits continus) et MOR-ahj (traitillés).....	115
Figure 38	Localisation des sites d'étude, emprise des domaines de propagation et position des stations de mesure des vagues	118
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	125
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.....	126
Figure 41	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre 10 % des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011	127
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.....	128
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	129
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.....	130

Figure 45	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre 10 % des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.....	131
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.....	132
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	133
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.....	134
Figure 49	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre 10 % des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011	135
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.....	136
Figure 51	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011	143
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.....	144
Figure 53	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant à 10 % des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011	145
Figure 54	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011	146
Figure 55	Population et valeur moyenne des classes de T_{02} 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.....	147
Figure 56	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant à 10 % des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011	148
Figure 57	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011	149
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.....	150
Figure 59	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant à 10 % des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011	151
Figure 60	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les directions moyennes prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011	156
Figure 61	Population et valeur moyenne des classes de D_{mean} 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.....	157
Figure 62	Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Sept-Îles.....	158
Figure 63	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les directions moyennes prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011.....	159
Figure 64	Population et valeur moyenne des classes de D_{mean} 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.....	160
Figure 65	Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Cap d'Espoir	161
Figure 66	Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les directions moyennes prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011	162
Figure 67	Population et valeur moyenne des classes de D_{mean} 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.....	163
Figure 68	Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Saint-Ulric	164
Figure 69	Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, des périodes moyennes et des directions moyennes par classes de hauteur significative pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011	168
Figure 70	Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, des périodes moyennes et des directions moyennes par classes de hauteur significative pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011	174
Figure 71	Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, des périodes moyennes et des directions moyennes par classes de hauteur significative pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011.	178

Figure 72 Diagrammes quantile-quantile (<i>Q-Q plot</i>) de H_s mesurée et de H_s prédite par GENER pour les quatre sites et les cinq formules de fetch.....	185
Figure 73 Diagramme quantile-quantile (<i>Q-Q plot</i>) comparant les mesures de la bouée C45138 (Mont-Louis) avec les résultats de GENER utilisant la formule CEM03 pour les périodes 1991-2012 et 2010-2012	186
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 de MRCC-aev et de 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)	188
Figure 75 Climat de vagues calculé par GENER avec les vents $MERRA_{corr}$ pour la période 1981-2010, avec les fréquences de dépassement 1 % et 10 % ainsi que les périodes de retour de 10 ans et de 100 ans.....	191
Figure 76 Comparaison des climats de vagues calculés par GENER avec, d'une part, les vents $MERRA_{corr}$ et, d'autre part, les vents de MRCC-aev et de 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 de 100 ans.....	192
Figure 77 Variations des indicateurs climatiques calculés avec une fenêtre mobile de 30 ans pour le site de Mont-Louis avec les vents de MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du MOR-aev (chaque valeur représente les 30 années précédentes). Les traits verticaux rouges indiquent les périodes décrites dans le tableau 11	198
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 MOR ainsi que sans atténuation (pas de glace) pour la période 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 à 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 le sont 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	199

Figure 79 Exemple de la variabilité associée aux différents scénarios de glace (formules empiriques), avec les 3 périodes de 30 ans (en couleurs). En haut : fréquence de dépassement. En bas : période de retour	206
Figure 80 Comparaison des climats de vagues avec les vents de MRCC-aev (en rouge) et de MRCC-ahj (en bleu) selon différents scénarios de glace pour le site A, période 1981-2010. Le traitillé supérieur représente le scénario sans glace, la plage colorée est l'enveloppe de 6 scénarios de glace (formules empiriques) et le traitillé inférieur correspond à une couverture de glace continue du 15 décembre au 15 mars. En haut : fréquence de dépassement. En bas : période de retour	207
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 de MRCC-aev et de MRCC-ahj et pour les 5 sites d'étude (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 MOR (en vert), sans aucune atténuation (en rouge).....	214
Figure 82 Évolution temporelle des climats de vagues (hauteur de fréquence de dépassement de 0,1 %) sur des périodes de 30 ans pour les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj et pour les 5 sites d'étude (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 MOR (en vert), sans aucune atténuation (en rouge)	215
Figure 83 Évolution temporelle des climats de vagues (énergie moyenne des vagues) sur des périodes de 30 ans pour les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj et pour les 5 sites d'étude (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 MOR (en vert), sans aucune atténuation (en rouge).....	216
Figure 84 Roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	220

Figure 85	Roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	221
Figure 86	Différences 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 de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 219 pour les explications)	222
Figure 87	Roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	223
Figure 88	Roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	224
Figure 89	Différences 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 de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 219 pour les explications)	225
Figure 90	Roses des vagues à Sept-Îles avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	226
Figure 91	Roses des vagues à Sept-Îles avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	227

Figure 92 Différences 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 de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 219 pour les explications)	228
Figure 93 Roses des vagues à Mont-Louis avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	229
Figure 94 Roses des vagues à Mont-Louis avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)	230
Figure 95 Différences 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 de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 219 pour les explications)	231
Figure 96 Roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation).....	232
Figure 97 Roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation).....	233
Figure 98 Différences 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 de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 219 pour les explications)	234
Figure 99 Illustration graphique des fetchs pondérés aux sites d'étude.....	247

Figure 100 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011	266
Figure 101 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse.....	267
Figure 102 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue	268
Figure 103 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (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	269
Figure 104 Distribution des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (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, période d'englacement exclue.....	270
Figure 105 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011	271
Figure 106 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse.....	272
Figure 107 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue.....	273
Figure 108 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (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	274
Figure 109 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (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, période d'englacement exclue	275

Figure 110 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011	276
Figure 111 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse.....	277
Figure 112 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue	278
Figure 113 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (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 3 mai 2010 au 31 décembre 2011	279
Figure 114 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (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 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue.....	280
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 glace de mer (a et b) et avec glace de mer (c et d). 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 de 95 %.....	283
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 glace de mer (a et c) et avec glace de mer (b et d). Les écarts calculés ([2071-2100] – [1981-2010]) sont exprimés en pourcentage et les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 %.....	284
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 glace de mer (a et c) et avec glace de mer (b et d). Les écarts calculés ([2071-2100] – [1981-2010]) sont exprimés en pourcentage. Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 % et ceux marqués d'un « o » correspondent aux écarts plus grands que l'intervalle de confiance à 95 % de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée de Pareto).....	285

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). Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 % et ceux marqués d'un « o » correspondent aux écarts plus grands que l'intervalle de confiance à 95 % de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée de Pareto).....286

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Fetchs pondérés aux sites d'étude.....	245
ANNEXE 2	Description de GENEREUX	249
ANNEXE 3	Code de prétraitement des vents pour GENER	257
ANNEXE 4	Validation du modèle EC, séries chronologiques et distributions des paramètres de vagues.....	265
ANNEXE 5	Évaluation du climat pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et estimation de son évolution future	281
ANNEXE 6	Roses des vents de MERRA (non corrigé) 1981-2012 pour l'ensemble du Golfe	287
ANNEXE 7	Roses des vents de MRCC-aev 1981-2010 pour l'ensemble du Golfe	291
ANNEXE 8	Roses des vents de MRCC-ahj 1981-2010 pour l'ensemble . du Golfe.....	295

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

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

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

Symboles

a	Coefficient directeur (pente) de la droite de régression (équation 7a)
b	Ordonnée à l'origine (<i>offset</i>) de la droite de régression (équation 7b)
cor	Coefficient de corrélation linéaire pour données directionnelles (<i>linear correlation coefficient</i> , équation 13)
D	Indice de similitude (<i>index of agreement</i> , équation 10)
d	Profondeur (m)
<i>début-PG</i>	Début de la période de gel (jours avant/après le 1 ^{er} janvier à minuit)
<i>Dir ou D_{mean}</i>	Direction moyenne de la provenance des vagues (°)
<i>DJG</i>	Degrés-jours 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-jours de gel
E_{moy}	Énergie moyenne des vagues (J/m ² , équation 16)
F	Fetch pondérée (m) ou, si la croissance des vagues est limitée par la durée pendant laquelle le vent soufflait, fetch équivalent (m)
F_i	Fetch mesuré pour une direction (m)
<i>fin-PG</i>	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
GtC	Giga tonne (10 ¹² kg) de carbone
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 calculée soit par méthode spectrale (H_{m0}), soit par méthode <i>zero crossing</i> ($H_{1/3}$) (m)
H_s 1 %	Hauteur significative pour la fréquence de dépassement 1 % (m)
H_s 50 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 (équation 11)
MB	Biais (<i>mean bias</i> , 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)
MtS	Méga tonne (10^9 kg) de souffre
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 (<i>root mean squared error</i> , équation 3)
$RMSE_S$	Racine de l'erreur quadratique moyenne systématique (<i>systematic RMSE</i> , équation 4)
$RMSE_u$	Racine de l'erreur quadratique moyenne aléatoire (<i>unsystematic RMSE</i> , 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)
$\bar{C}$	Concentration approximative (<i>approximate concentration</i> , équation 12)
μ	Paramètre de position de distribution des valeurs extrêmes (cf. section 2.6)
ξ	Paramètre de forme de distribution des valeurs extrêmes (cf. section 2.6)
σ	Paramètre d'échelle de distribution des valeurs extrêmes (cf. section 2.6)
σ_d	Écart-type de l'erreur (<i>standard deviation of error</i> – SDE, 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 (<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>)
aev	Simulation 1961-2100 du MRCC (cf. section 2.4.2)
ahj	Simulation 1961-2100 du MRCC (cf. section 2.4.2)
AWAC ou	

AWAC-AST	Modèle d'ADCP utilisé pour mesurer les vagues à Saint-Ulric, à Cap d'Espoir et à Sept-Îles
CEM03	Formule de fetch du <i>Coastal Engineering Manual</i> (Resio, Bratos et Thompson, 2002; cf. section 3.3.4)
CGCM	Modèle canadien du climat global (<i>Canadian Global Climate Model</i> , cf. section 4.3.2)
DEX	Format des données numériques de glace du SCG
DON80	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 exploité 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)
GEM	Modèle numérique de prévision météorologique exploité par Environnement Canada
GENER	Modèle de vagues paramétrique (de fetch) (cf. section 3)
GENEREUX	GENER compatible avec Linux (cf. section 3.2)
GES	Gaz à effet de serre
GEV	Distribution généralisée des valeurs extrêmes (<i>generalized extreme values distribution</i> , équation 14, cf. section 2.6)
GFDL	Modèle de climat global couplé océan-atmosphère du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (cf. section 2.4.2)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais : <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> – IPCC)
GPD	Distribution généralisée de Pareto (<i>generalized Pareto distribution</i> , équation 15, cf. section 2.6)
HRM3	Modèle atmosphérique régional de Hadley (<i>Hadley Regional Model 3</i> , cf. section 2.4.2)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (en français : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC)
Jonswap	<i>Joint North Sea Wave Project</i> (Hasselmann <i>et al.</i> , 1973)
JON73	Formule de fetch issue du Jonswap (Hasselmann <i>et al.</i> , 1973; cf. section 3.3.3)
MCGOA	Modèles de circulation générale océan-atmosphère (cf. section 2.4.2)
MERRA	<i>Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications</i> , 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)
MOR	Modèle océanographique régional pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, exploité par l'ISMER
MRCC	Modèle régional canadien du climat, modèle atmosphérique climatique dont les deux simulations, MRCC-aev et MRCC-ahj, sont utilisées pour évaluer les températures et les vents futurs (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)
NARCCAP	<i>North American Regional Climate Change Assessment Program</i> , modèle de climat global nord-américain (cf. section 4.3.2)
NARR	<i>North American Regional Reanalysis</i> , modèle atmosphérique de réanalyse (cf. section 2.4.1)
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>)
RCM3	Modèle atmosphérique régional (<i>Regional Climate Model 3</i> , cf. section 2.4.2)
SCG	Service canadien des glaces
SHC	Service hydrographique du Canada
SPM77	Formule de fetch du <i>Shore Protection Manual</i> (USACE, 1977; cf. section 3.3.1)
SPM84	Formule de fetch du <i>Shore Protection Manual</i> (CERC, 1984; cf. section 3.3.2)
SRTM	Données altimétriques de topographie terrestre issues des missions spatiales de la NASA (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> , cf. section 2.2)
SWAN	Modèle spectral de vagues (<i>Simulating Waves Nearshore</i> , cf. section 2.3.2)
WIL65	Formule de fetch de Wilson (1965) (cf. section 3.3.5)
WAM	Modèle spectral de vagues (<i>Wave Model</i> , cf. section 2.3.1)

1 INTRODUCTION

Le présent projet de modélisation du climat de vagues futur de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent est financé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) en vertu d'un contrat de recherche conclu 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 de l'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 l'érosion côtière et la 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 socioéconomiques de la zone côtière est à l'origine d'un risque élevé. Ce risque touche 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 à la suite de 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, les jetées, les brise-lames et diverses autres formes de protection côtière 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 des 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 d'événements extrêmes. Il est donc nécessaire de quantifier l'intensité de ces événements (vagues, niveaux d'eau, températures) 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 fonctionnels 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 ce faire 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.

Les projections climatiques futures prédisent toutefois 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 cette difficulté, il est nécessaire de mettre au point 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 ceux 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 second sous-objectif est de fournir au MTQ une indication des tendances futures du régime des vagues dans le golfe du Saint-Laurent afin qu'il 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 grâce à trois sites côtiers équipés de houlographes AWAC depuis 2010 (Saint-Ulric, Cap d'Espoir et Sept-Îles; cf. section 2.2) et à la bouée de Mont-Louis, au large depuis 1991 (cf. section 5.2). Le recours à des modèles vent-vagues, qui pourront toutefois être validés avec ces séries mesurées, est donc obligatoire.

L'évaluation des variations du climat de vagues à différents sites nécessite le calcul des vagues pour plusieurs périodes de 30 ans. Simuler de si longues périodes avec des modèles de vagues spectraux demanderait de trop grandes capacités de calcul. C'est pourquoi le présent projet utilise principalement le modèle paramétrique de vagues GENER (Desjardins et Ouellet, 1984), qui est basé sur des formules de fetch, pour modéliser les vagues futures. Les sorties du modèle numérique de vagues d'Environnement Canada (modèle EC), disponibles depuis 2003, sont également utilisées.

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

- 1) Validation du modèle EC avec les données des AWAC 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 aux sites côtiers des AWAC, le modèle de vagues côtier *Simulating WAves Nearshore* (SWAN) est imbriqué dans le modèle EC à proximité des AWAC (sections 2.2 et 5.1). Cette étape visait initialement à s'assurer que le modèle GENER pouvait être validé avec le modèle EC, mais finalement, GENER a été validé directement avec les données expérimentales.
- 2) Modifications à GENER, notamment pour pouvoir l'utiliser en traitement par lots (*batch mode*) et y ajouter différentes formules de fetch, et création d'un algorithme de prétraitement de vents à partir de champs de vents de modèles atmosphériques (cf. section 3). Validation du GENER modifié avec les données de terrain (stations AWAC depuis 2010, bouée de 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 : 1) détermination de formules empiriques utilisant la

température de l'air; 2) 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 et, 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 (auxquels est appliquée l'atténuation des vagues par la glace) avec les vents du Modèle régional canadien du climat (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 Elliott Bismuth, qui déposeront leur mémoire en 2014.

Ce projet a produit, à ce jour, plusieurs autres publications :

- Trois rapports d'étape, dont l'essentiel du contenu est repris dans le présent rapport final;
- Un rapport technique sur l'évaluation du modèle EC pour la période de l'automne 2010 (Lambert, Neumeier et Jacob, 2012);
- Des affiches ou des présentations orales aux réunions annuelles ou au colloque du Regroupement stratégique Québec-Océan (Lambert *et al.*, 2011; Bismuth, Neumeier et Dumont, 2012; Ruest *et al.*, 2012; Lambert *et al.*, 2012a);
- Une affiche à la réunion d'automne 2012 de l'American Geophysical Union (AGU Fall Meeting) à San Francisco (Lambert *et al.*, 2012b);
- Une présentation orale au 5^e Symposium scientifique d'Ouranos à Montréal (Neumeier *et al.*, 2012);
- Une présentation orale et un texte qui figure dans les actes du colloque Coastal Dynamics 2013, qui s'est tenu au palais des congrès d'Arcachon, en France (Ruest *et al.*, 2013).

Dans le cadre du projet, un stage de deux mois et demi a été effectué par 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 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 vagues 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 le présent 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 de recherche de l'ISMER (Urs Neumeier) financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec (cf. section 2.2).

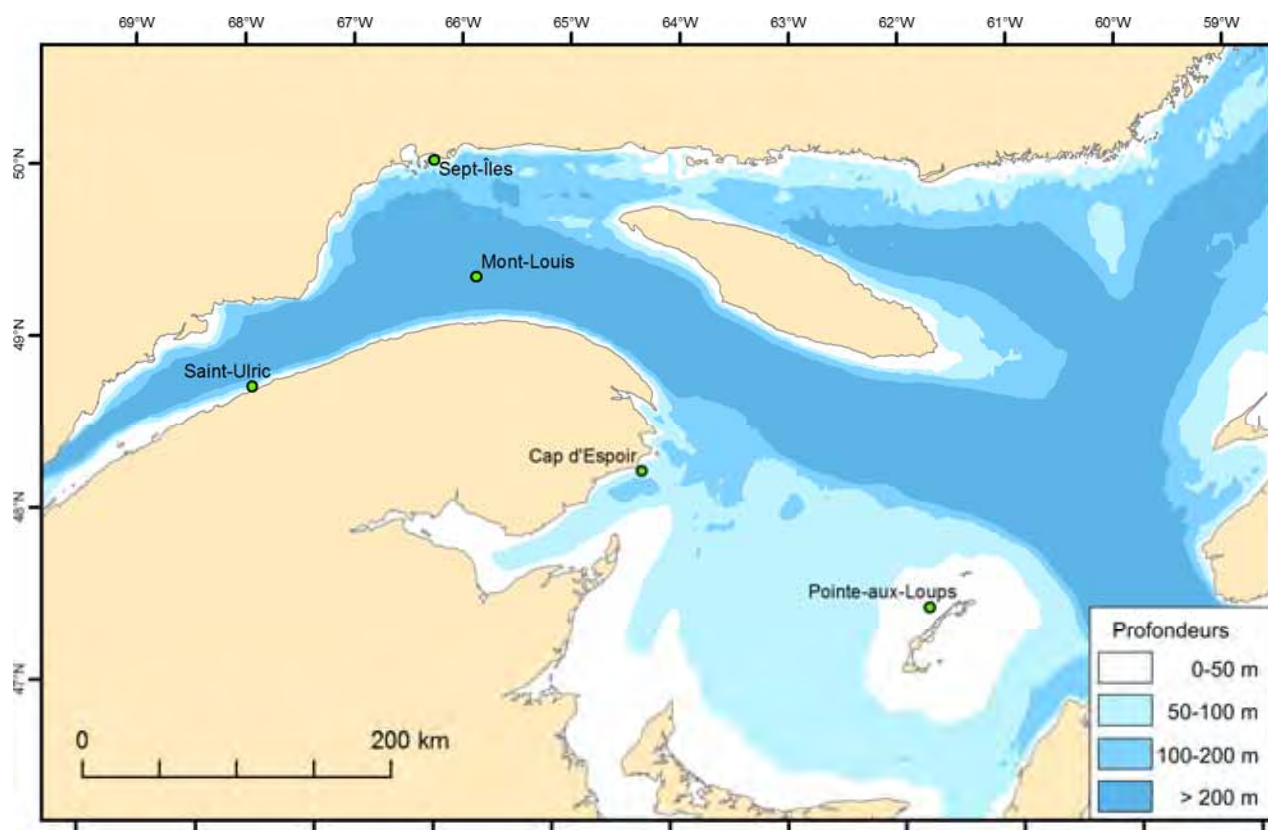


Figure 1 Carte de localisation des sites d'étude

Deux autres sites ont été ajoutés pour l'évaluation du climat de vagues futur afin de mieux représenter les différentes régions du golfe du Saint-Laurent : 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

mesurés 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 utilisées pour le présent projet.

Tableau 1 Position 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 situé plus au large que l'AWAC pour ne pas 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 situé sur la côte sud de l'estuaire maritime, à 2,3 km au large du village de Saint-Ulric et 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 de l'est-nord-est et 150 km de l'ouest-sud-ouest.

Le site de Cap d'Espoir se trouve 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). Il est situé 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 (fetchs maximaux de 530 km de l'est-nord-est et de 330 km du sud-est) ainsi qu'aux 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.

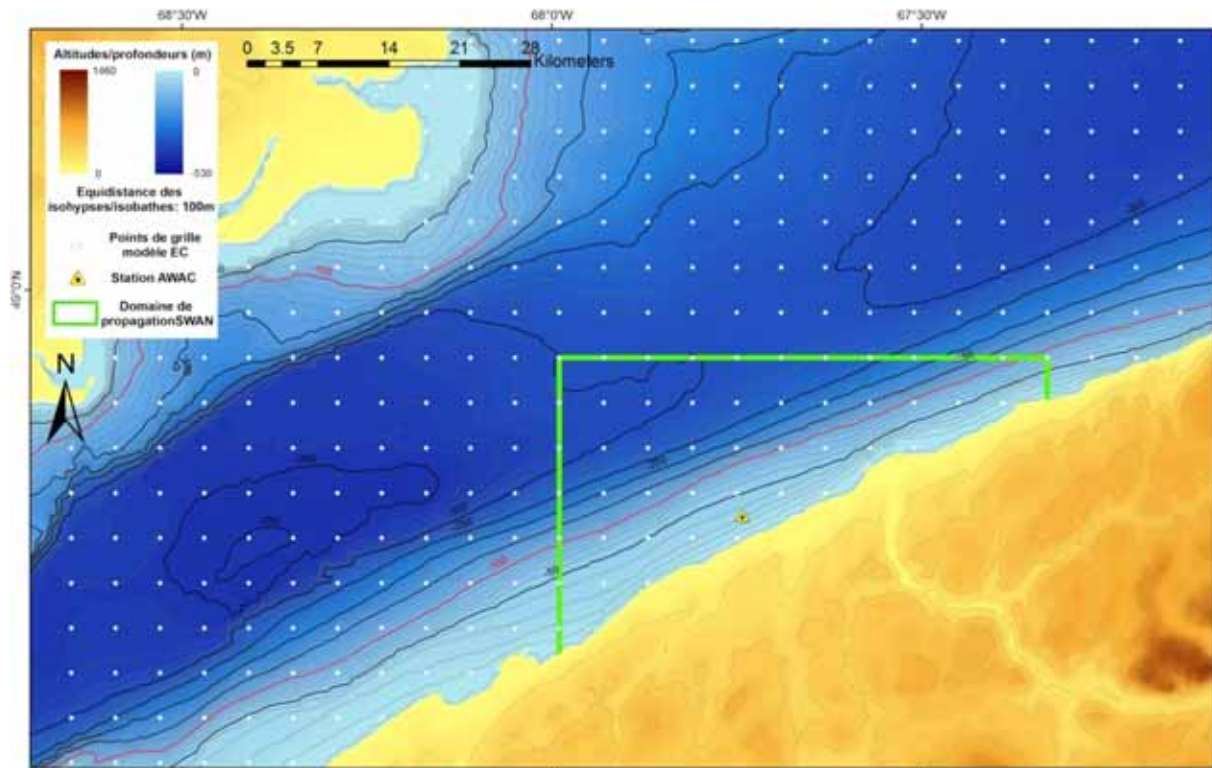


Figure 2 Localisation du site de Saint-Ulric avec la position de l'AWAC, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN

Le site de Sept-Îles est situé au sud-est du centre-ville de Sept-Îles, dans une région possédant une morphologie côtière et une bathymétrie particulièrement complexes (Figure 4). Le site de l'AWAC se trouve à 29 m de profondeur sur un promontoire sous-marin; il est à 4 km devant le quartier de Plage-Routhier, mais à seulement 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 climat de vagues futur (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 un long 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 de 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.

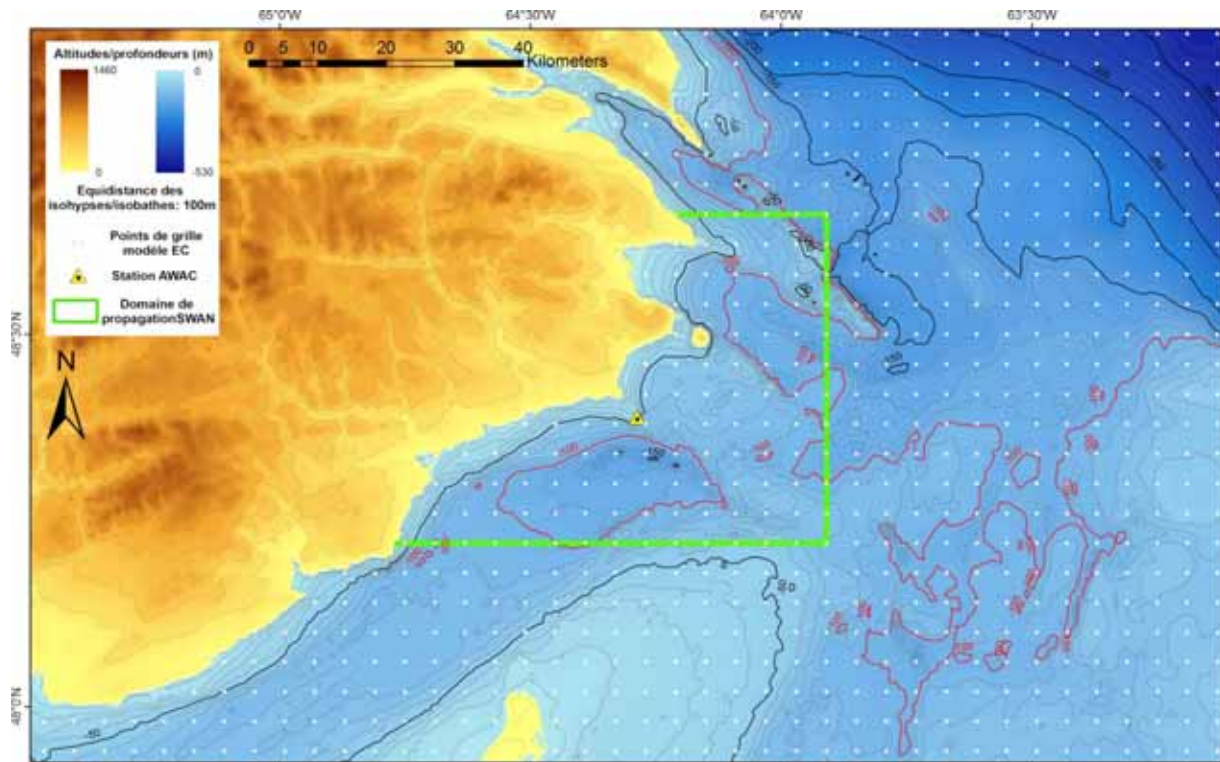


Figure 3 Localisation du site de Cap d'Espoir avec la position de l'AWAC, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN

Le site de Mont-Louis est situé à 30 km au nord de la Gaspésie, face au village de 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 se trouve du côté nord-ouest des Îles-de-la-Madeleine, à 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 à 29 km vers le nord-est. Ce 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 à 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.

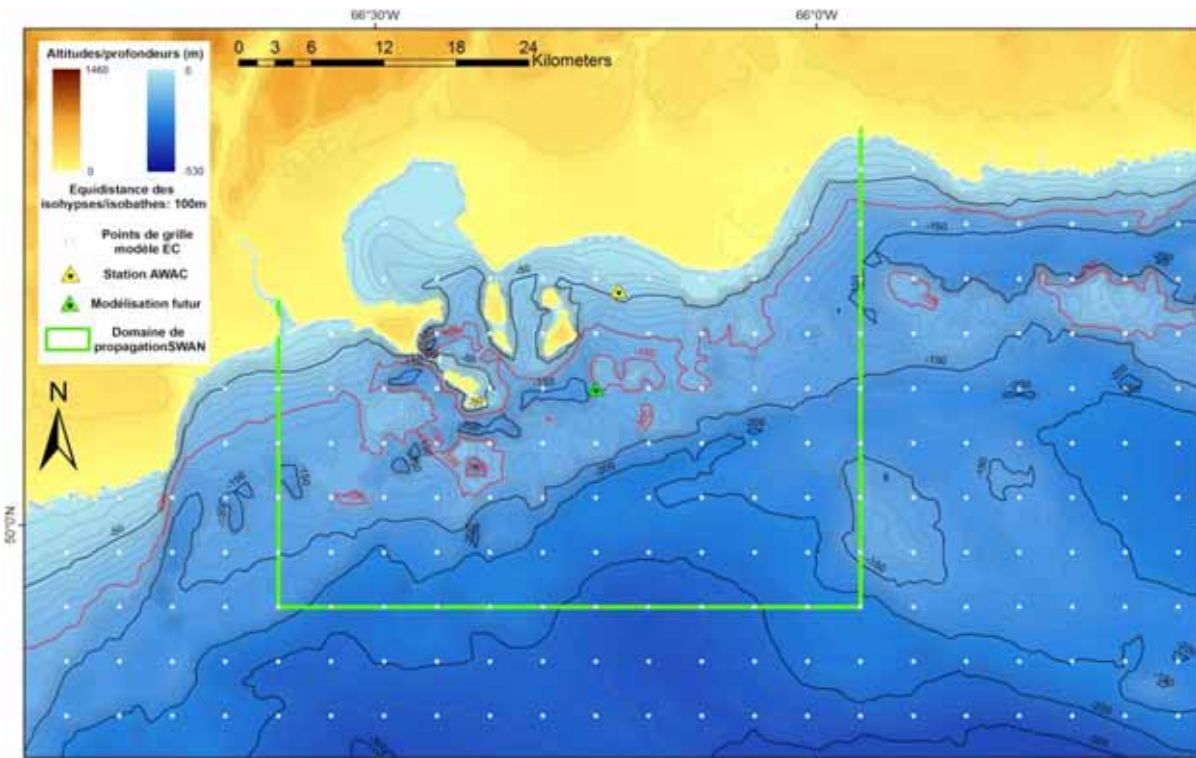


Figure 4 Localisation du site de Sept-Îles avec la position de l'AWAC, la position modélisée pour le climat futur, la grille du modèle EC et l'emprise du modèle SWAN

2.2 Données de validation expérimentales

Dans le cadre du projet quadriennal Mouillages pour l'érosion des berges financé par la Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie du ministère de la Sécurité publique du Québec, 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° 48,0' N 67° 44,6' W, profondeur sous le niveau marin moyen de 34 m), Cap d'Espoir (48° 23,35' N 64° 17,35' W, profondeur de 38 m) et Sept-Îles (50° 10,3' N 66° 13,5' W, profondeur de 29 m).

Ces données sont enregistrées avec des houlographes AWAC-AST 600 kHz de Nortek (stations AWAC). Ces appareils de type *Acoustic Doppler Current Profiler* (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 de 2 Hz). La direction des vagues est, quant à elle, déterminée par les vitesses orbitales que l'on mesure 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_{02} , Dir) est rejeté par ce contrôle, 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 ~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'onde des vagues courtes.

Les validations des modèles pour les hauteurs et les périodes sont réalisées sur toutes les données de hauteur et de période disponibles, soit presque tous les échantillons. Pour la validation des directions, les échantillons dont la direction est indéterminée ne sont pas utilisés, c'est-à-dire que seules les vagues dont les périodes sont supérieures à ~3,3 s sont considérées. Les échantillons utilisés pour les validations des hauteurs/périodes et des directions ne sont donc pas les mêmes.

Comme les validations des hauteurs/périodes et des directions ont été effectuées sur des échantillons différents, alors que ces paramètres sont interdépendants, il faut être prudent en reliant les conclusions obtenues pour les hauteurs/périodes à celles tirées pour les directions.

2.3 Données issues des modèles de vagues

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

WAVE Model (WAM) (WAMDI Group, 1988; Komen *et al.*, 1994) cycle IV est un modèle vent-vagues de troisième 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. Depuis 2002, Environnement Canada utilise, pour ses prévisions opérationnelles de l'estuaire maritime et du 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. Ce modèle emploie 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). Le modèle 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 $0,04^\circ$ de latitude et $0,06^\circ$ de 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 exploité 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 exploité par Environnement Canada à l'Institut Maurice-Lamontagne ainsi que par les prévisions de vent tri horaires à 40 m d'altitude issues du modèle numérique de prévision météorologique utilisé par Environnement Canada (GEM), produites toutes les 12 heures et couvrant une période de 48 heures. Une modélisation du modèle EC des 48 prochaines heures est lancée toutes les 12 heures. Les prévisions passées du modèle EC se chevauchent (de 12 heures, 24 heures, 36 heures et 48 heures). Les paramètres H_{m0} , T_{02} et Dir sont sauvegardés toutes les 3 heures. Pour chaque date t existent quatre ou cinq valeurs prédites différentes : celles comprises entre 6 heures et 15 heures 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 pour chaque position des stations de mesure entre juillet 2002 et fin novembre 2011 ainsi que sur l'ensemble du Golfe et de l'Estuaire pour chaque point de grille du modèle de 2009 à 2011.

2.3.2 Données issues de SWAN forcé par le modèle EC

SWAN (Booij, Ris et Holthuijsen, 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 de 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 issu 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 sont 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 provenant du Modèle océanique régional (MOR) pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent exploité 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 de 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 « couvrantes-découvrantes ».

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

Nous obtenons en sortie une base de données tri horaire de H_{m0} , T_{02} et Dir pour 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 2010. Les données produites couvrent actuellement la période de mai 2010 à avril 2012. Elles pourraient 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 de 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 regroupés en deux catégories : les réanalyses, qui bénéficient 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 5 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. Les 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 *a 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 des directions 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 d'émissions de gaz à effet de serre (GES) – ainsi que des caractéristiques de la surface. Cet affranchissement des observations est un atout pour étudier les changements climatiques. L'une des façons d'évaluer la fiabilité des modèles climatiques est de comparer les statistiques tirées des réanalyses à celles 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 National Oceanic and Atmospheric Administration (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 toutes les 3 heures. Elle est produite par le modèle Eta forcé à sa frontière par le modèle global NCEP2 (National Center for Atmospheric Prediction; en français : Centre états-unien de prévisions atmosphériques) ayant une grille de $2,5^\circ$ (Kanamitsu *et al.*, 2002). Les réanalyses globales de MERRA ont une résolution spatiale de $1/2^\circ$ de latitude $\times$ $2/3^\circ$ de longitude (56 $\times$ 50 km dans le Golfe) et U_{10} disponible 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 (IdIM). Les vitesses mesurées respectivement à 5 m et à 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 représentant la vitesse mesurée à z mètres du sol. Les données de MERRA se sont révélées plus fiables que celles de NARR pour représenter les conditions de vent 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 adaptée pour GENER. Par conséquent, seuls 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, Voinov et Nikulin, 2013) et des diagrammes quantile-quantile (*Q-Q plot*, comparaison visuelle des distributions). Les deux jeux de données sont plus semblables 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 IdIM ajustés pour U_{10} et les vents à 10 m de MERRA (point de la grille le plus proche) montre 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 (figure 5). De même, la correspondance est améliorée pour la station IdIM 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).

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

	Bouée C45138 – MERRA			Station IdIM – 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

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

La Figure 7 présente la vitesse moyenne de 10 % des vents les plus rapides de MERRA 1980-2012. L'annexe 6 montre, quant à elle, les roses des 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).

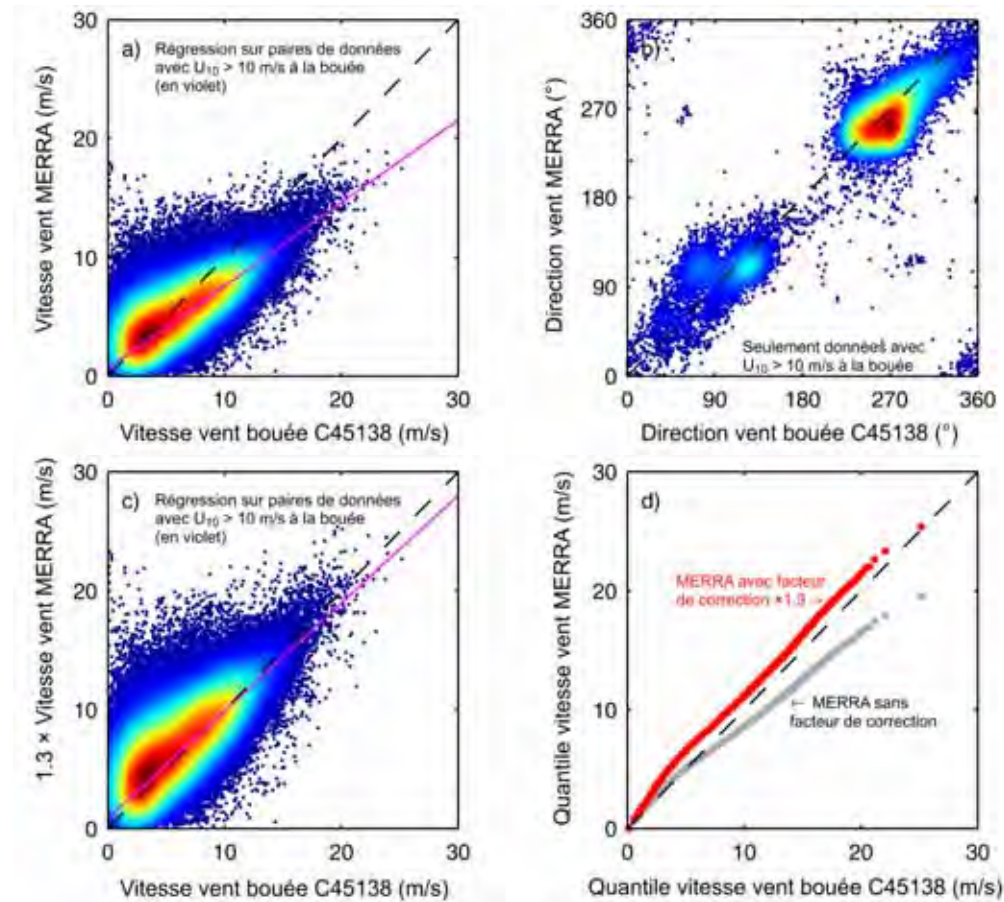


Figure 5 Comparaison entre les vents de MERRA et de la bouée de Mont-Louis (C45138); les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleurs (rouge : très dense, bleu : peu dense). (a) MERRA U_{10} sans facteur de correction. (b) Directions. (c) MERRA U_{10} avec facteur de correction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

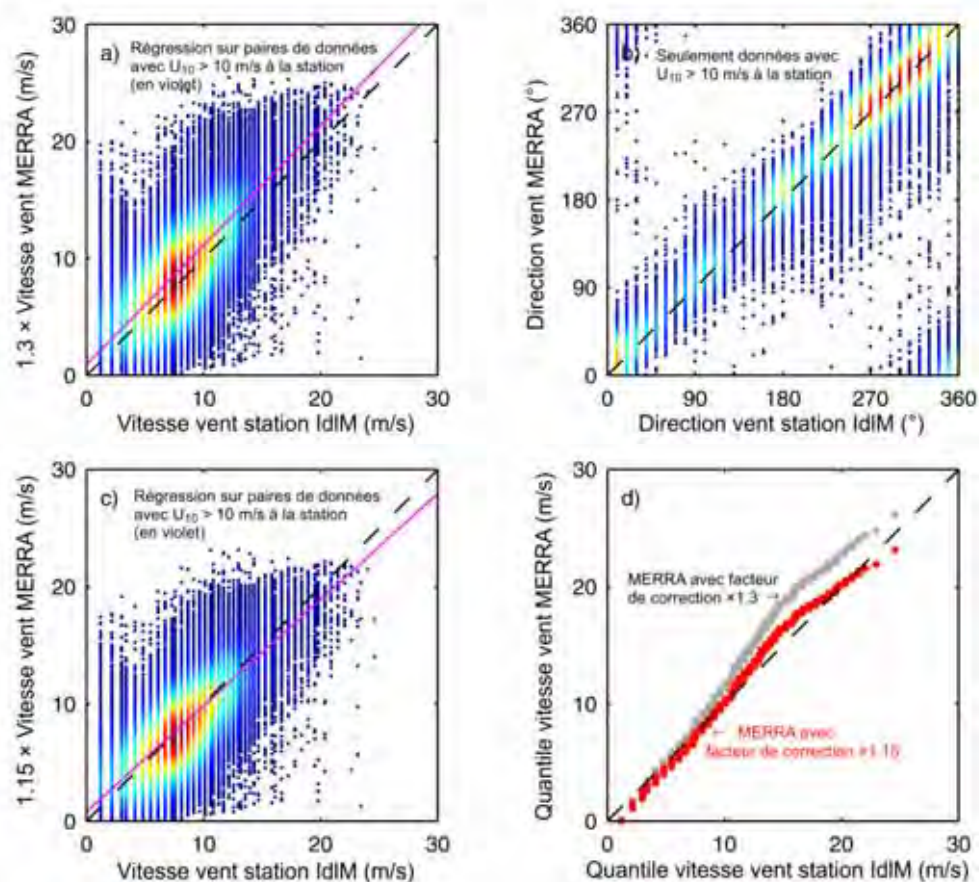


Figure 6 Comparaison entre les vents de MERRA et de la station météorologique des Îles-de-la-Madeleine; les densités des nuages de points sont représentées avec une échelle de couleurs (rouge : très dense, bleu : peu dense). (a) MERRA U_{10} sans facteur de correction. (b) Directions. (c) MERRA U_{10}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

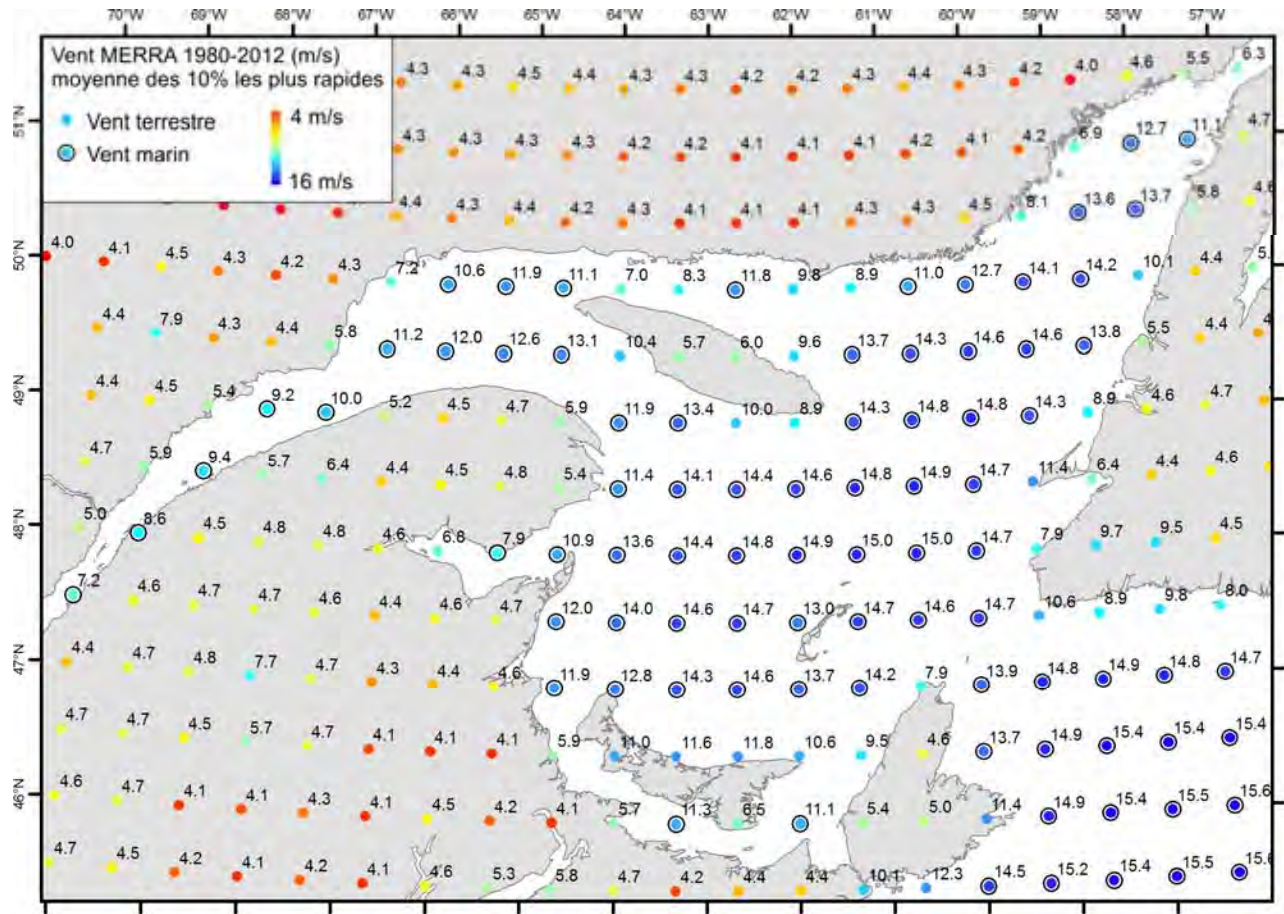


Figure 7 Vitesse moyenne de 10 % des vents les plus rapides de MERRA 1980-2012 (sans facteur de correction). Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence

2.4.2 Modèles climatiques MRCC et NARCCAP

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 *North American Regional Climate Change Assessment Program* (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); ceux-ci intègrent le scénario d'évolution des émissions de GES et d'aérosols du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du 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 qui peuvent 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 repose 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. Dans ce scénario, la population continue de croître régulièrement pour atteindre 10 milliards en 2050, le développement économique est basé sur la régionalisation plutôt que sur la mondialisation des échanges (scénario A1) et 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 XXI^e siècle sont de 600 et de 1 850 GtC. Le taux de croissance du méthane et du protoxyde d'azote augmente rapidement. Le dioxyde de soufre s'accroît jusqu'à atteindre un maximum juste avant 2050 (105 MtS/an), puis diminue dans la seconde moitié du siècle (60 MtS/an).

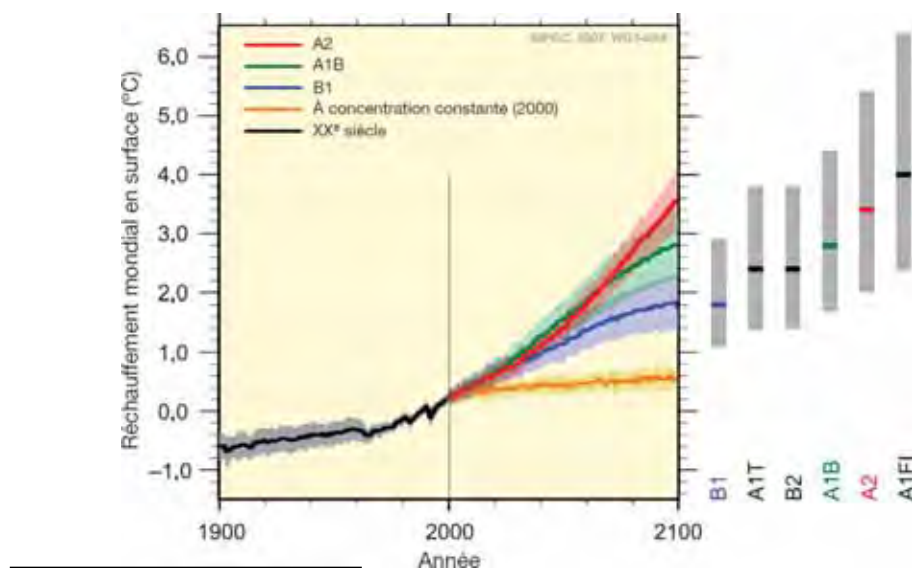


Figure 8 Réchauffement global durant le XXI^e siècle selon des modèles climatiques utilisant différents scénarios d'émission de CO₂ (GIEC, 2007)

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 spatiale et temporelle assez fine, 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 (*Canadian Global Climate Model*; en français : modèle canadien du 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 global de circulation couplé océan-atmosphère de l'institut Max-Planck) (Jungclaus *et al.*, 2006) membre 3, sur les mêmes domaine et période que aev.
- HRM3 : *Hadley Regional Model 3* (HRM3) piloté par le modèle du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) sur le domaine NARCCAP à une résolution de 50 km. Les périodes couvertes sont 1968-2000 et 2038-2070.
- RCM3 : *Regional Climate Model 3* (RCM3) piloté par le GFDL, sur les mêmes domaine et période que HRM3.

Les simulations aev et ahj du MRCC sont caractérisées par un biais froid général sur la période de contrôle (1971-2000). En ce qui concerne 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 et -1,5 °C par rapport aux moyennes annuelles du climat actuel (Troin, Caya et Velázquez, à paraître). 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, Caya et Velázquez, à paraître). Sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, MRCC-aev a globalement un biais froid d'environ -1,5 °C, mais un biais chaud jusqu'à +2 °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 MOR (Senneville *et al.*, 2013) ont généralement été 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 aux 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 de 1,5 à 4 °C, en moyenne, par rapport à celles évaluées pour 1971-2000. Celles estimées par RCM3 sont plus élevées de 1,5 à 2,5 °C. Le climat futur calculé par HRM3 est donc légèrement plus chaud que celui estimé par RCM3.

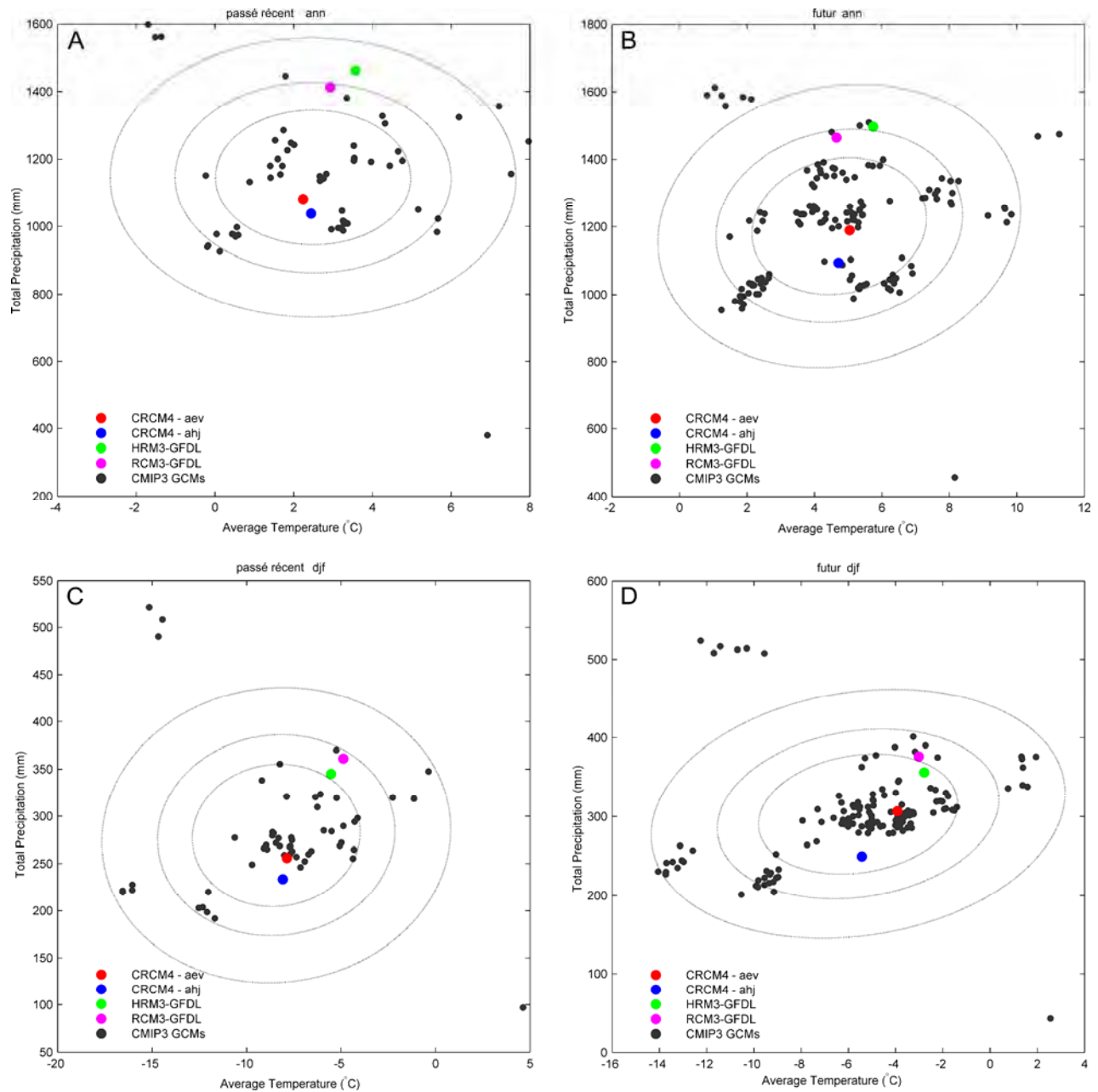


Figure 9 Comparaison entre les simulations climatiques utilisées et l'ensemble des simulations disponibles auprès d'Ouranos pour la température et des précipitations. (A) Moyenne annuelle pour 1971-2000. (B) Moyenne annuelle pour 2041-2070. (C) Moyenne décembre, janvier et février pour 1971-2000. (D)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

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 simulations ne sont pas présentés dans ce rapport.

Les figures 10 et 11 présentent la vitesse moyenne de 10 % des vents les plus rapides de MRCC-aev et de MRCC-ahj pour la période 1981-2010. Les annexes 7 et 8 montrent, quant à elles, les roses des 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).

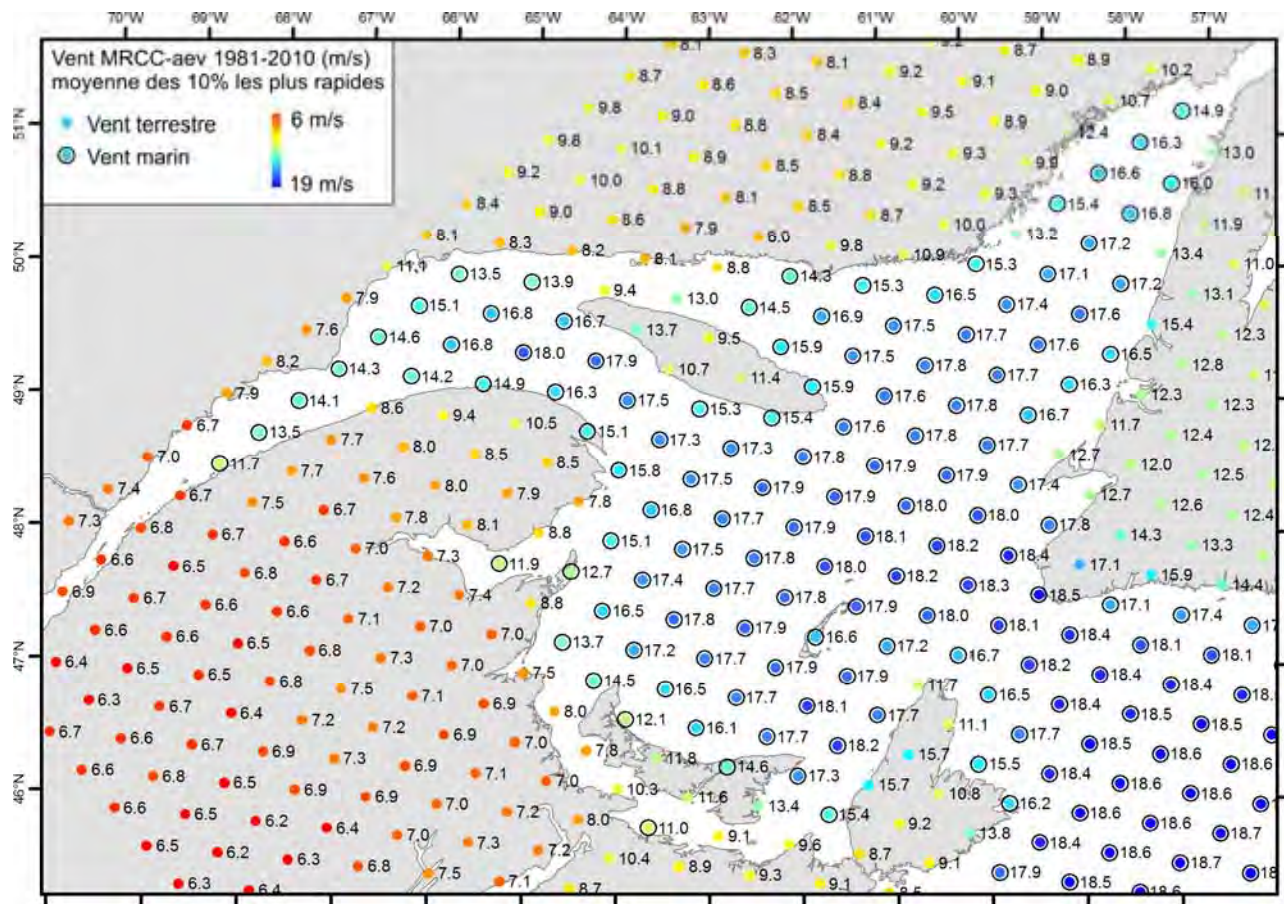


Figure 10 Vitesse moyenne de 10 % des vents les plus rapides de MRCC-aev 1981-2010. Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence

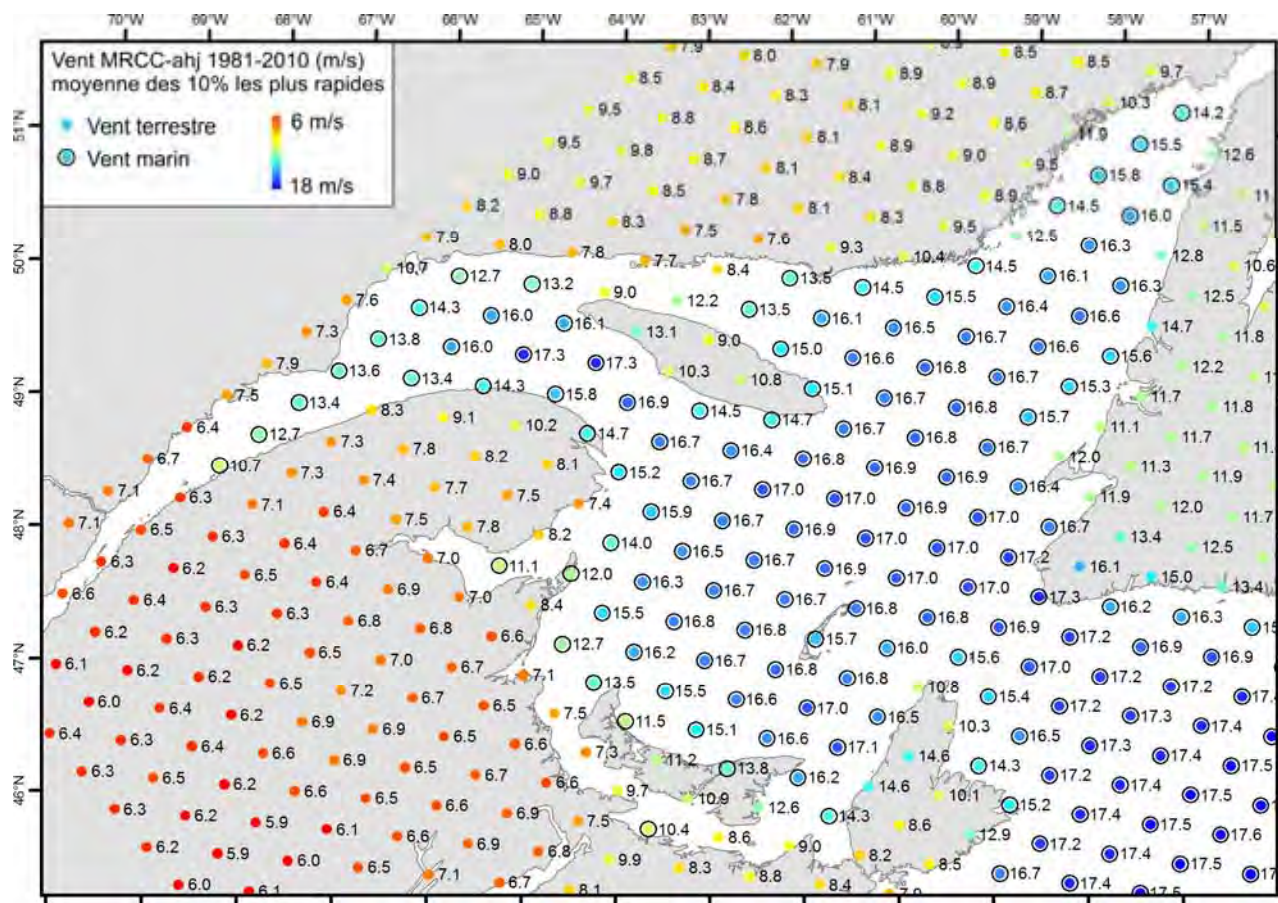


Figure 11 Vitesse moyenne de 10 % des vents les plus rapides de MRCC-ahj 1981-2010. Les points de grille avec vent marin utilisés pour alimenter GENER sont mis en évidence

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 employés pour les directions des vagues.

2.5.1 Biais moyen (mean bias– MB)

Moyenne des résidus ou erreurs. Paramètre dimensionnel.

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

Où :

n = nombre d'observations;

h = valeurs prédites (*hindcasted*);

m = valeurs mesurées (*measured*).

Le biais indique l'écart moyen entre les valeurs prédites et mesurées, c'est-à-dire la tendance du modèle à surestimer ou à sous-estimer les valeurs.

2.5.2 Erreur absolue moyenne (mean absolute error – MAE, ou absolute bias)

Indique l'écart absolu moyen entre les 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 l'erreur quadratique moyenne (root mean squared error – RMSE)

Racine de la moyenne des carrés 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 :

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

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

où :

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 error – SDE)

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 prédites caractérise la relation entre les deux variables en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire.

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

Où :

a = pente de la droite de régression (idéalement 1) : indique si les prévisions surévaluent 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 (Moriasi *et al.*, 2007; Dykes, Wang et Book, 2009; Hsu, Rogers et Dykes, 2002; Yamaguchi, Hatada et Nonaka, 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, Wang et Book, 2009;

Dragani *et al.*, 2008; Hsu, Rogers et Dykes, 2002; Padilla-Hernandez *et al.*, 2004; Yamaguchi, Hatada et Nonaka, 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.

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

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 la prévision est bonne, un score de 1 indiquant une prédiction parfaite.

$$P_s = \frac{\widehat{RMSE} + \widehat{\delta} + \widehat{ST}}{3} \quad [9]$$

Avec :

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

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

$$\widehat{ST} = \left(1 - \frac{\sigma_d}{m} \right) \quad [9c]$$

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 (D) 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.

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

Cet indice 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 qu'il n'y a aucun accord (Moriassi et al., 2007; Willmott, 1982).

2.5.11 Erreur angulaire absolue moyenne (MAE°)

L'erreur angulaire absolue moyenne est une mesure de l'erreur moyenne équivalant à celle de la MAE pour des valeurs linéaires.

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

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

$$\Delta\theta_i = \theta_{h,i} - \theta_{m,i} \quad [11b]$$

où :

θ_h = directions prédites;

θ_m = directions mesurées en degrés.

2.5.12 Concentration approximative (approximate concentration)

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

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

Où :

$\bar{R}$ = longueur résultante moyenne de l'erreur (Fisher, 1993; Bowers, Morton et Mould, 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 et sa valeur est 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, Morton et Mould, 2000; Tracy, 2002; Hanson *et al.*, 2009).

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

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

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 importante pour des domaines

comme la navigation et les travaux en mer, dans d'autres domaines, comme les études de dynamique côtière et de génie côtier ou maritime, la priorité est plutôt sa 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 (OCDI, 2002). Il est possible de caractériser la climatologie des hauteurs significatives (H_s) selon deux approches : 1) les fréquences de dépassement définies à partir de la série temporelle des H_s ; 2) les périodes de retour obtenues en ajustant une distribution statistique à un échantillon d'événements extrêmes. Ces deux approches ont été utilisées dans le cadre de cette étude, puisqu'elles ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients et qu'elles sont complémentaires.

Évaluation des fréquences de dépassement

Des conditions de vagues ayant des fréquences de dépassement données (par exemple : 10 %, 1 % ou 0,1 %) 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 permet pas d'extrapoler au-delà de la série de vagues étudiée.

Les **diagrammes quantile-quantile (Q-Q plot)** sont des outils pertinents pour comparer deux distributions de H_s (Coles, 2001). Pour établir ces diagrammes, on trace les quantiles (par exemple : [0,1 %, 0,2 %, ... 99,0 %, 99,9 %]) de chacune des deux séries les uns en fonction des autres sur un graphique (par exemple : Figure 72). La diagonale (droite 1:1) équivaut 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 des 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 des vagues. Celle retenue pour cette étude inclut une échelle radiale exponentielle qui permet de mettre en évidence les vagues ayant de faibles fréquences 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 couleurs) sont tracées (par exemple : Figure 84). La longueur vers le centre de chacun des secteurs directionnels indique la proportion du temps où des vagues viennent de cette direction. Les limites des classes peuvent s'adapter au climat de vagues représenté. La

comparaison de roses des vagues permet d'évaluer les différences entre divers climats de vagues, tant pour les H_s que pour les directions.

Évaluation des périodes de retour

Une autre approche pour caractériser 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 par l'application de la théorie des extrêmes (Mathiesen *et al.*, 1994). Pour le calcul de périodes de retour de vagues, les deux distributions les plus utilisées (Teena *et al.*, 2012) sont la distribution généralisée des valeurs extrêmes (*generalized extreme values* – GEV), dont la distribution cumulative ($G(z)$) est la suivante :

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

et la distribution généralisée de Pareto (*generalized Pareto distribution* – GPD), dont la $G(z)$ est la suivante :

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

où, tant pour la GEV que pour la GPD (Coles, 2001) :

μ = paramètre de position;

σ = paramètre d'échelle;

ξ = paramètre de forme.

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 du *Peak Over Threshold* (POT) est recommandée. Cela implique de conserver le maximum de chaque événement extrême supérieur à un seuil préétabli (maximum 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 extrêmes 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 minimale) à partir duquel un événement est considéré comme extrême et aussi un intervalle de temps minimal entre deux événements extrêmes consécutifs pour s'assurer qu'ils sont indépendants (c'est-à-dire qu'ils proviennent de deux tempêtes différentes). La sélection du seuil demeure l'étape critique dans l'application du POT et malgré différentes tentatives pour automatiser cette tâche, les méthodes graphiques de sélection de seuil demeurent la norme (Jonathan et Ewans, 2013). Un petit nombre d'événements (seuil élevé) produit généralement une courbe de la GPD près des événements extrêmes, mais avec de grandes incertitudes, alors qu'à l'inverse, un trop grand nombre 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 extrêmes. L'ajustement de la GPD consiste à trouver un compromis entre le biais et la variance (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 du seuil variable, spatialement basé sur le 93^e centile de la série locale des H_s . La même approche a été tentée pour le golfe du Saint-Laurent avec différents centiles (entre 90^e et 99^e) 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^e centile est effectivement une valeur adéquate pour la zone d'étude qui permet d'obtenir un certain équilibre entre le biais et la variance dans l'ajustement des GPD, comme le montre la Figure 12 pour deux sites du golfe du Saint-Laurent. Par conséquent, l'approche proposée par Caires et Sterl (2005), soit l'utilisation d'un seuil égal au 93^e centile 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 qu'il soit de 48 heures. Cette valeur a été utilisée dans le passé par Hundecha *et al.* (2008) pour l'analyse du POT dans le golfe du Saint-Laurent afin d'étudier la variabilité temporelle des vents extrêmes sur plusieurs décennies, et elle est employée à nouveau dans la présente étude.

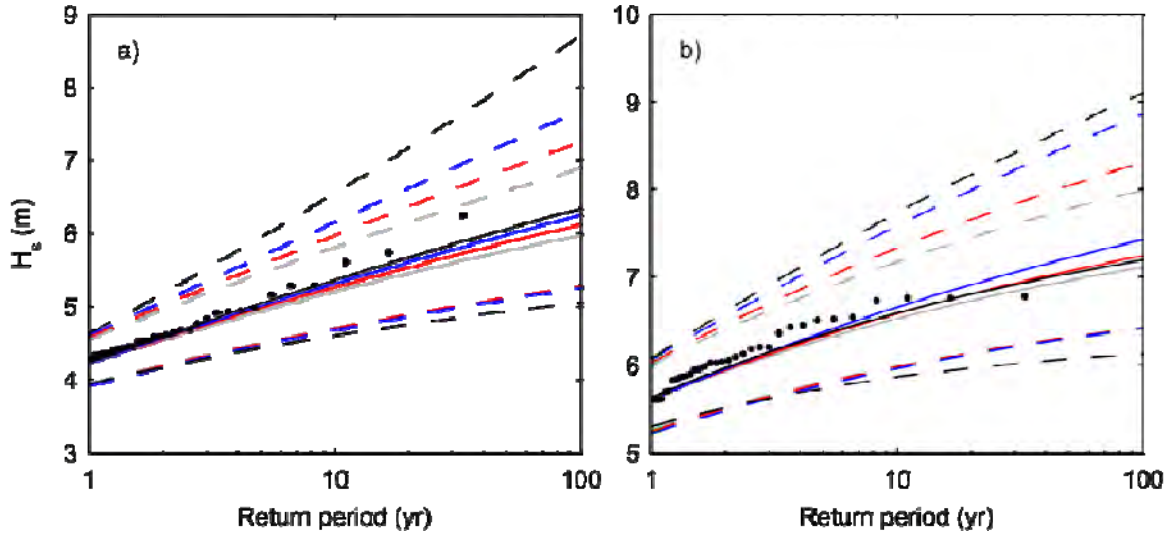


Figure 12 GPD ajustées (lignes pleines) et intervalles de confiance à 95 % (lignes traitillées) avec des seuils sélectionnés selon les centiles 90^e (gris), 93^e (rouge), 96^e (bleu) et 99^e (noir) à 49,42°N / 66,31°W (a) et à 48,46°N / 62,71°W (b)

Cet ajustement d'une 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, Bratos et Thompson, 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. Or, les vagues plus petites ont également une capacité de transport sédimentaire, certes beaucoup moins importante que celle des tempêtes, mais d'une durée bien plus longue. L'énergie moyenne des vagues (E_{moy} , en J/m²) tient compte de toutes les vagues. Elle est calculée sur des périodes de 30 ans de la façon suivante :

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

où :

ρ = masse volumique de l'eau (kg/m³);

g = gravité (m/s²);

m_{0i} = moment d'ordre 0 des vagues au temps i (m²);

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 conçu 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 vent d'une station météorologique proche du site d'étude. Les seules données nécessaires en entrée sont cette série horaire de vent à 10 m et le fetch pondéré (F) calculé pour 16 directions (secteurs) autour du site d'étude.

Le fetch pondéré est calculé selon la méthode de Saville (1954), qui est également recommandée par l'OCDI (2002). Pour chaque secteur, 29 fetchs sont mesurés (F_i , i variant de -14 à +14), soit 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 la formule suivante :

$$F = \bar{F} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{14} \sum_{i=-14}^{+14} (F_i - \bar{F})^2 \right)^{0.25}$$

avec :

$$\bar{F} = \frac{1}{15} \sum_{i=-14}^{+14} F_i$$

$$F_i = \frac{1}{\left(\sum_{k=-14}^{+14} [\cos \theta_k] \right)} \sum_{k=-14}^{+14} F_k (\cos \theta_k)^2$$

GENER travaille avec un pas de temps d'une heure. D'abord, 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 l'un des 16 secteurs (0° , $22,5^\circ$, 45° , ... $337,5^\circ$). Puis, il divise la série en blocs de direction constante (longueur maximale de 96 heures).

Chaque bloc de temps est traité séparément. Au pas de temps n , la formule de fetch est utilisée pour calculer la H_s et la 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 associée) est conservée pour ce pas de temps.

Pour tenir compte des conditions de vagues précédentes, un historique de la H_s , de la T_s et de la 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 le fetch en eau profonde. La 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 la H_s finale est la somme de l'énergie des différentes hauteurs, l'énergie étant proportionnelle au carré de la H_s . La T_s et la direction pour un pas de temps sont choisies comme celles du bloc de temps avec la plus grande contribution à l'énergie des vagues 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 (c'est-à-dire 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 C++ GNU Compiler Collection (gcc) (compilateur gratuit multiplateforme utilisé à l'ISMER).

Le résultat a été appelé GENEREUX, c'est-à-dire GENER compatible avec 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 (fetchs, notamment).

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

- Une constante de la formule SPM77;
- La confusion vitesse/direction pendant 4 heures toutes les 1 200 heures;
- Le vidage intempestif, dans certaines conditions, de la table des vagues s'atténuant;
- Pour la formule SPM84, la sous-estimation de la hauteur des vagues d'un facteur de 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 lui donner de nouvelles fonctionnalités :

- Tous les fichiers intermédiaires et les fichiers de sortie sont maintenant des fichiers texte ASCII;
- Les dates et heures du fichier d'entrée sont conservées dans tous les calculs et sont écrites dans les fichiers de sortie;
- Les trous de 1 à 4 heures dans le fichier d'entrée sont interpolés. Plusieurs tests de cohérence ont été ajoutés au fichier d'entrée et aux différents paramètres;
- Les vitesses et directions de vent peuvent maintenant être exprimées par des nombres décimaux et les directions, 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).

Le document *Description de GENEREUX* décrit en détail les modifications, les formats des fichiers d'entrée et de sortie ainsi que la manière d'utiliser le programme (voir l'annexe 2).

3.3 Ajout de nouvelles formules de fetch

La version originale de GENER contenait deux formules de fetch (SPM77 et SPM84). Nous avons ajouté quatre autres formules (Tableau 3). Les six formules sont décrites ci-dessous et peuvent être sélectionnées avec le paramètre d'appel -m dans GENER.

Tableau 3 Liste des formules de fetch disponibles dans GENER

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

Liste des symboles

- d profondeur (m)
- F fetch pondérée (m) ou, si la croissance des vagues est limitée par la durée pendant laquelle le vent soufflait, 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 SPM77 (USACE, 1977)

D'abord, 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 $x = \ln(gF/U^2)$.

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

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.

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

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

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

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

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

3.3.2 SPM84 (CERC, 1984)

SPM-84 n'utilise pas directement le vent à 10 m, mais une vitesse ajustée :

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

D'abord, le fetch équivalent – correspondant à la durée du vent – est calculé par la formule suivante :

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

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 :

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

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

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

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

Dans GENER, T_p est converti en T_s de la façon suivante : $T_s = 0.95 T_p$

3.3.3 Jonswap (Hasselmann et al., 1973)

Les équations sont identiques à celles utilisées pour SPM84, sauf que la vitesse du vent à 10 m remplace la vitesse ajustée (U_A).

3.3.4 CEM03 (Resio, Bratos et Thompson, 2002)

Le *Coastal Engineering Manual* calcule une vitesse de cisaillement u_* en estimant le coefficient de traînée 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 :

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

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)

D'abord, le fetch équivalent – correspondant à la durée du vent – est calculé selon Etamad-Shahidi, Kazeminarzhad et Mousavi (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)

D'abord, le fetch équivalent – correspondant à la durée du vent – est calculé de la façon suivante :

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

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 vents

GENER fonctionne avec une seule série temporelle de vent en entrée, c'est-à-dire avec, 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 le fait que les vents plus fort sur l'eau que sur terre. Toutefois, le vent est variable dans l'espace, spécialement lors du passage de fronts de tempête, 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 vagues.

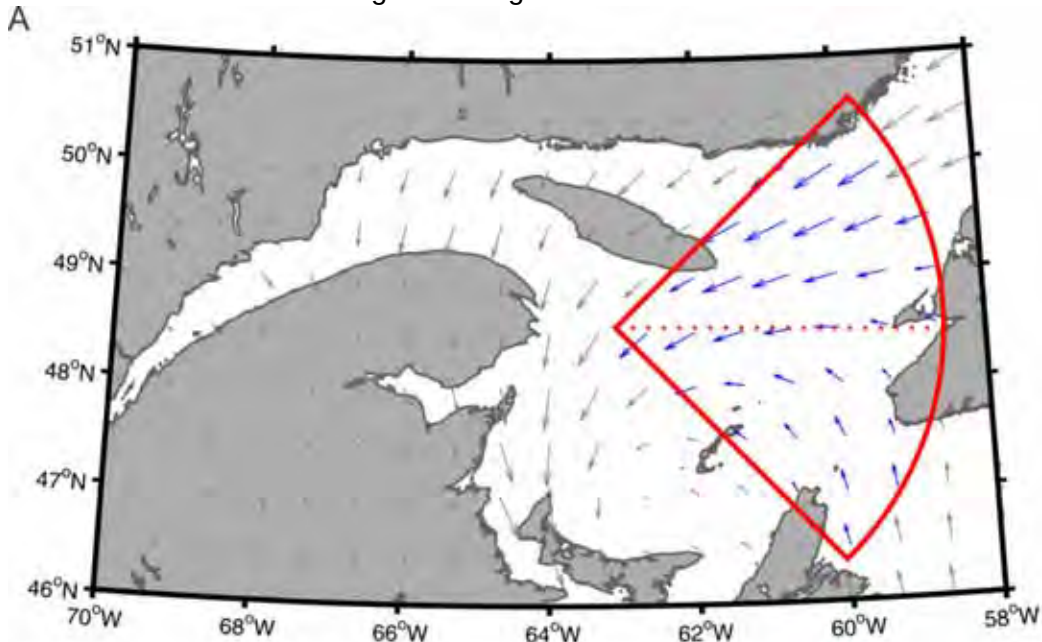
Il existe de nos jours différents modèles numériques reproduisant ou simulant relativement correctement les conditions atmosphériques incluant le vent. Ils ont généralement une grille régulière dont les mailles varient entre 15 et 60 km, selon les modèles. Il serait possible de sélectionner simplement 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 des vagues pour toutes les directions de vent.

Nous avons donc mis au point 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 cet algorithme est d'obtenir le vent moyen à partir des seuls points de grille pour lesquels les vagues générées se propagent vers le site d'étude. Ces points dépendent de la direction des vents et des fetchs. De plus, comme le vent change considérablement entre les zones terrestres et les plans d'eau, seuls les points de grille marins sont utilisés.

En tout, 16 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 dont le rayon correspond 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 choisi. Un *vecteur de vent moyenné* est construit avec comme direction, celle du vecteur moyen des vents et sa 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 comme nulle. Finalement, parmi les 16 *vecteurs de vent moyenné*, celui qui a la plus grande composante dirigée vers le site d'étude (magnitude multipliée 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.



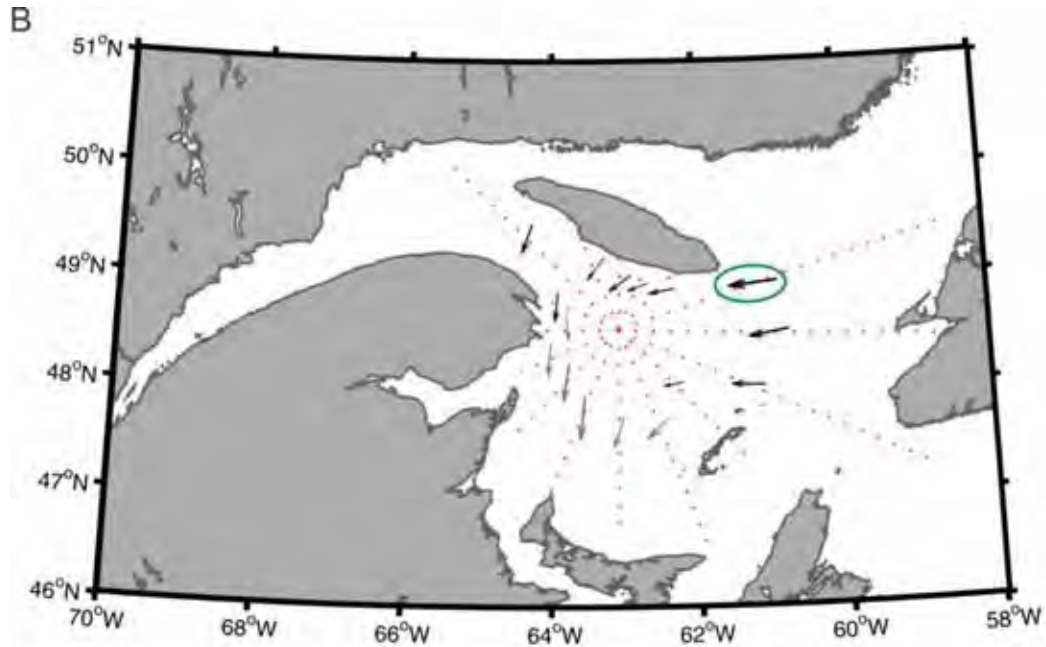


Figure 13 Illustration de l'algorithme de prétraitement de vents. (A) Sélection des points de grille marins à une distance plus proche que le fetch pondéré (en pointillé rouge) dans un secteur de 90° pour l'une des 16 directions θ (flèches en bleu). (B) Fetchs pondérés pour les 16 directions θ (en pointillés rouges), vecteurs de vent moyenné pour chacune des 16 directions (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 non seulement en raison de la grande hétérogénéité de la banquise et de ses propriétés mécaniques, entre autres, le caractère dispersif et la cohérence des ondes de gravité, mais aussi de 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 vagues-glace, notamment en ce qui concerne l'atténuation des vagues par la glace. Ce phénomène est tellement important que l'on associe traditionnellement à un couvert substantiel de glace, c'est-à-dire présent au-delà d'une certaine concentration, une absence complète de vagues. La méthode présentée 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, à l'aide des cartes de glace du Service canadien des glaces (SCG), un portrait du climat de glace récent à l'échelle du Golfe que nous associons 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 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-jours 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 MOR à partir de scénarios climatiques. Cette seconde méthode employée dans le cadre du projet Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques (un projet du MTQ réalisé avec l'UQAR-ISMER, avec la collaboration d'Ouranos et d'Environnement Canada) est incluse dans ce rapport aux fins de comparaison avec la première méthode, qui, elle, est strictement basée sur des observations. La seconde méthode est utilisée à la section 4.5 pour estimer l'atténuation future des vagues par la glace.

L'influence de la glace sur le climat de vagues est évaluée à l'échelle du Golfe en combinant nos connaissances sur le climat de glace et les interactions vagues-glace aux sorties climatiques du modèle GENER (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 ces 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 contenant des codes qui informe sur la concentration totale ou partielle de glace, le stade de formation de la glace et la taille maximale des floes, et qui peut indiquer jusqu'à trois types de glace dans une même zone (Frequest, 2005).

L'information contenue dans les cartes de glace est aussi accessible numériquement à partir de fichiers de format DEX, où chacune des variables est donnée sur une grille cartésienne de 5×5 km. Ces fichiers existent pour chaque jour des hivers de 2002 à 2012 pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Il existe quelques fichiers DEX antérieurs à 2002, 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.

Les données antérieures à 2006 sont représentées sur une grille régulière complète de 217×212 points, dont 46 004 points sont mouillés. À partir de 2006, les fichiers ne contiennent que les 37 727 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 de 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 (bissextile). 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 glace à partir des matrices annuelles et en les comparant avec les cartes de glace originales (par exemple : Figure 14).

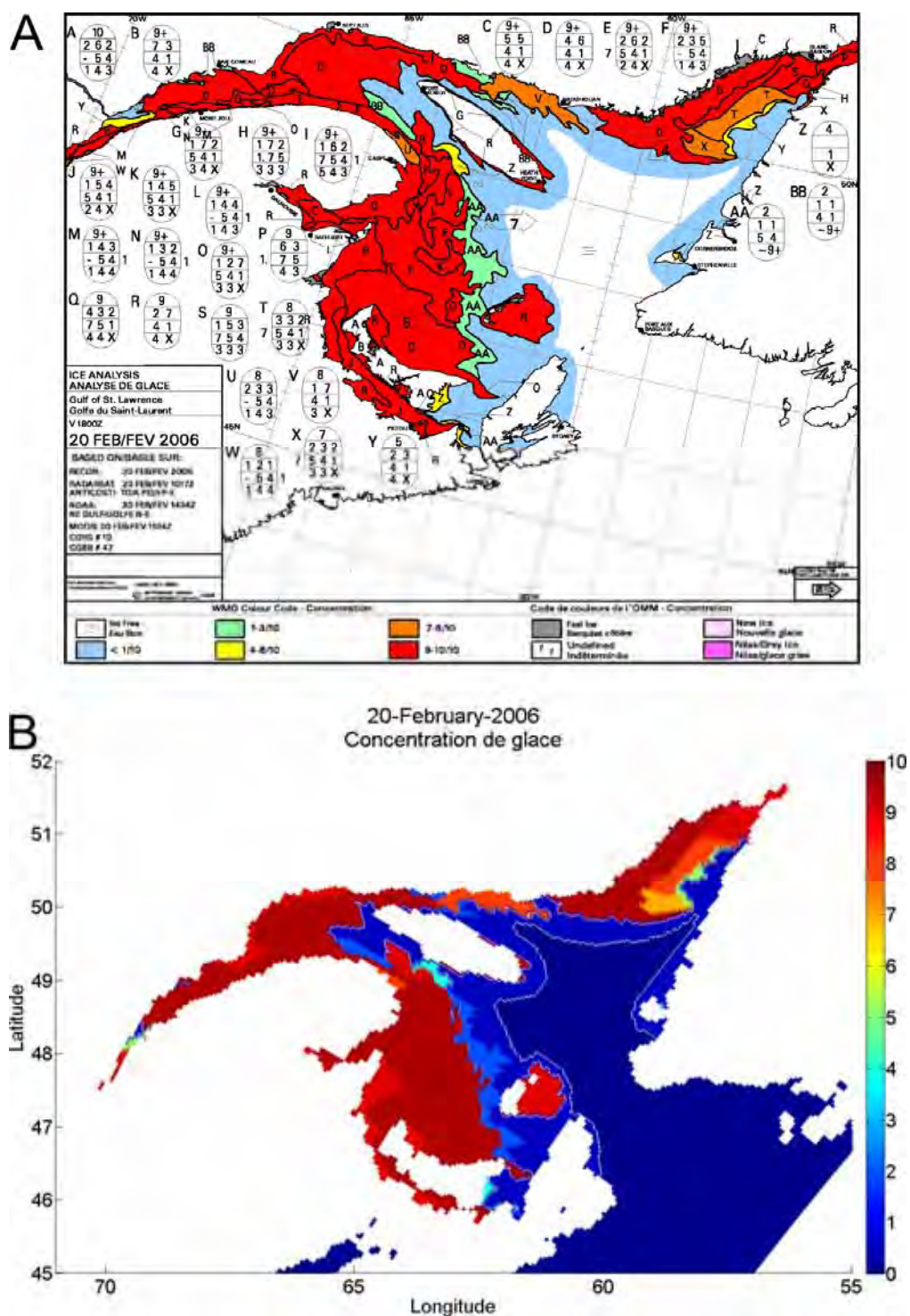


Figure 14 (A) Exemple de carte de glace avec les codes de l'œuf pour chaque zone. (B) Concentration de la glace (en nombre de dixièmes) avec les données numériques DEX du même jour importées dans MATLAB

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 AWAC.

4.2.1 Estuaire et golfe du Saint-Laurent

Le nombre de degrés-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 DJG 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 °C, soit le point de congélation de l'eau de mer** (pour l'eau douce, les DJG sont plutôt 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, il est remis à zéro. Les DJG au jour j (DJG_j) sont calculés du 1^{er} octobre jusqu'au 30 juin par la formule suivante :

$$DJG_j = DJG_{j-1} - (T_j + 1,9)$$

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 °C, et décroît lorsque la température est supérieure à -1,9 °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. Le début-PG et la fin-PG sont exprimés en jours avant/après le 1^{er} janvier. Pour calculer les DJG, les données de température de l'air du modèle de réanalyse GEM ont été utilisées.

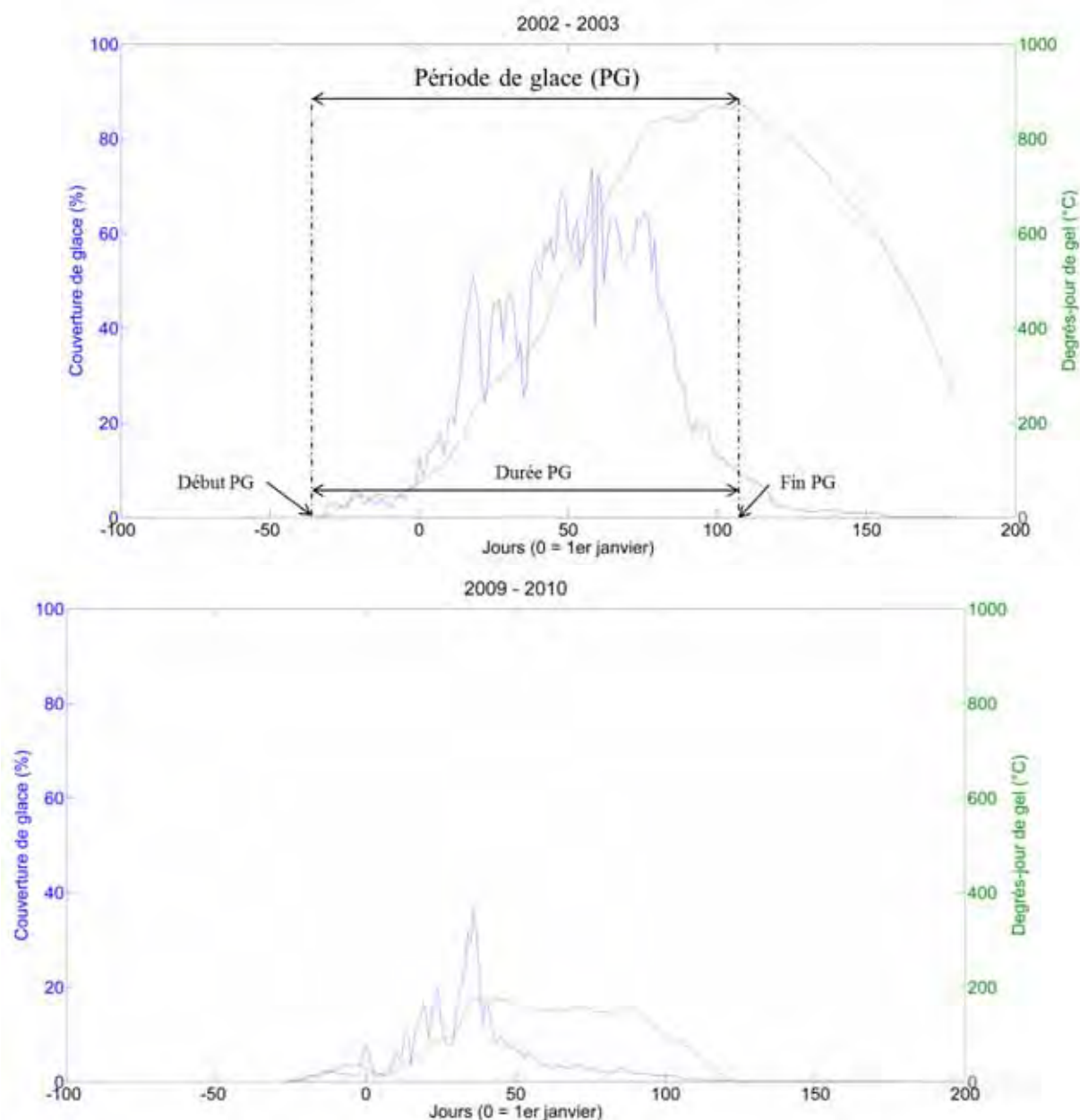


Figure 15 Concentration totale de glace dans le Golfe (en bleu) et degrés-jours de gel calculés pour l'hiver (en vert). L'hiver 2002-2003 (en haut) est un hiver relativement froid, alors que l'hiver 2009-2010 (en bas) est un hiver chaud

La glace est considérée comme 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 de tout le Golfe dépasse pour 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 :

- Le début-PG et l'apparition de la glace;
- La fin-PG et la disparition de la glace;
- Le maximum atteint par la courbe des degrés-jours 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 glace numérisées, c'est-à-dire 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 DJG et la présence de glace de mer (Figure 16; Tableau 4). Notons que les coefficients de détermination R^2 sont tous supérieurs ou égaux à 0,73, ce qui valide, en quelque sorte, le bien-fondé d'une telle méthode empirique pour caractériser globalement le couvert de glace annuel du golfe du Saint-Laurent. Lorsqu'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.

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

Région	Début des glaces $x = \text{début-PG}$	Fin des glaces $x = \text{fin-PG}$	Couvert cumulé $x : DGJ_{max}$
Golfe	$y = 0,68x + 18$ $R^2 = 0,73^{**}$	$y = 0,95x + 8$ $R^2 = \mathbf{0,80^{**}}$	$y = 6,02x - 415$ $R^2 = \mathbf{0,94^{**}}$
Saint-Ulric (50 km)	$y = 1,29x + 24$ $R^2 = \mathbf{0,83^{**}}$	$y = 0,67x + 25$ $R^2 = \mathbf{0,85^{**}}$	$y = 5,73x + 1\,337$ $R^2 = 0,67^*$
Saint-Ulric (100 km)	$y = 1,23x + 25$ $R^2 = 0,58^*$	$y = 0,70x + 23$ $R^2 = \mathbf{0,84^{**}}$	$y = 5,64x + 1\,015$ $R^2 = 0,69^*$
Cap d'Espoir (50 km)	$y = 0,56 + 20$ $R^2 = \mathbf{0,91^{**}}$	$y = 0,74x + 23$ $R^2 = \mathbf{0,81^{**}}$	$y = 9,24x + 379$ $R^2 = \mathbf{0,89^{**}}$
Cap d'Espoir (100 km)	$y = 0,36x + 15$ $R^2 = 0,41$	$y = 0,78x + 22$ $R^2 = 0,74^{**}$	$y = 9,85x + 177$ $R^2 = \mathbf{0,93^{**}}$
Sept-Îles (50 km)	$y = 1,17x + 40$ $R^2 = 0,55^*$	$y = 0,95x - 2$ $R^2 = \mathbf{0,89^{**}}$	$y = 7,06x - 1\,195$ $R^2 = \mathbf{0,89^{**}}$
Sept-Îles (100 km)	$y = 0,46x + 21$ $R^2 = 0,56^*$	$y = 0,93x + 1$ $R^2 = \mathbf{0,87^{**}}$	$y = 7,46x - 938$ $R^2 = \mathbf{0,88^{**}}$

*Significatif à $p < 0,05$.

**Significatif à $p < 0,01$.

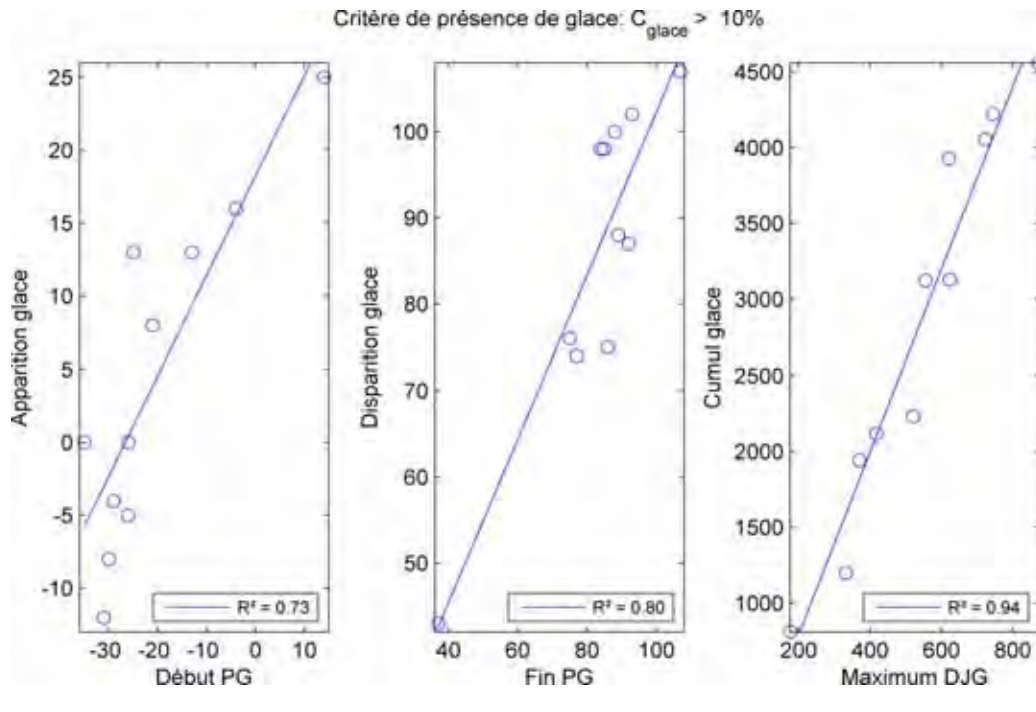


Figure 16 Régressions linéaires entre les paramètres issus du nombre de degrés-jours de gel (abscisse) et ceux provenant des cartes de glace (ordonnée) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent

4.2.2 Sites des AWAC

Les mêmes comparaisons ont été effectuées pour les sites des AWAC (Saint-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 de 100 km autour de la position de chaque mouillage (Figure 17). Le critère de présence de glace pour les environs des AWAC 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, parce que 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). Cela 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.

Les équations de régression linéaire, les coefficients de corrélation et la significativité des relations sont résumés dans le Tableau 4.

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

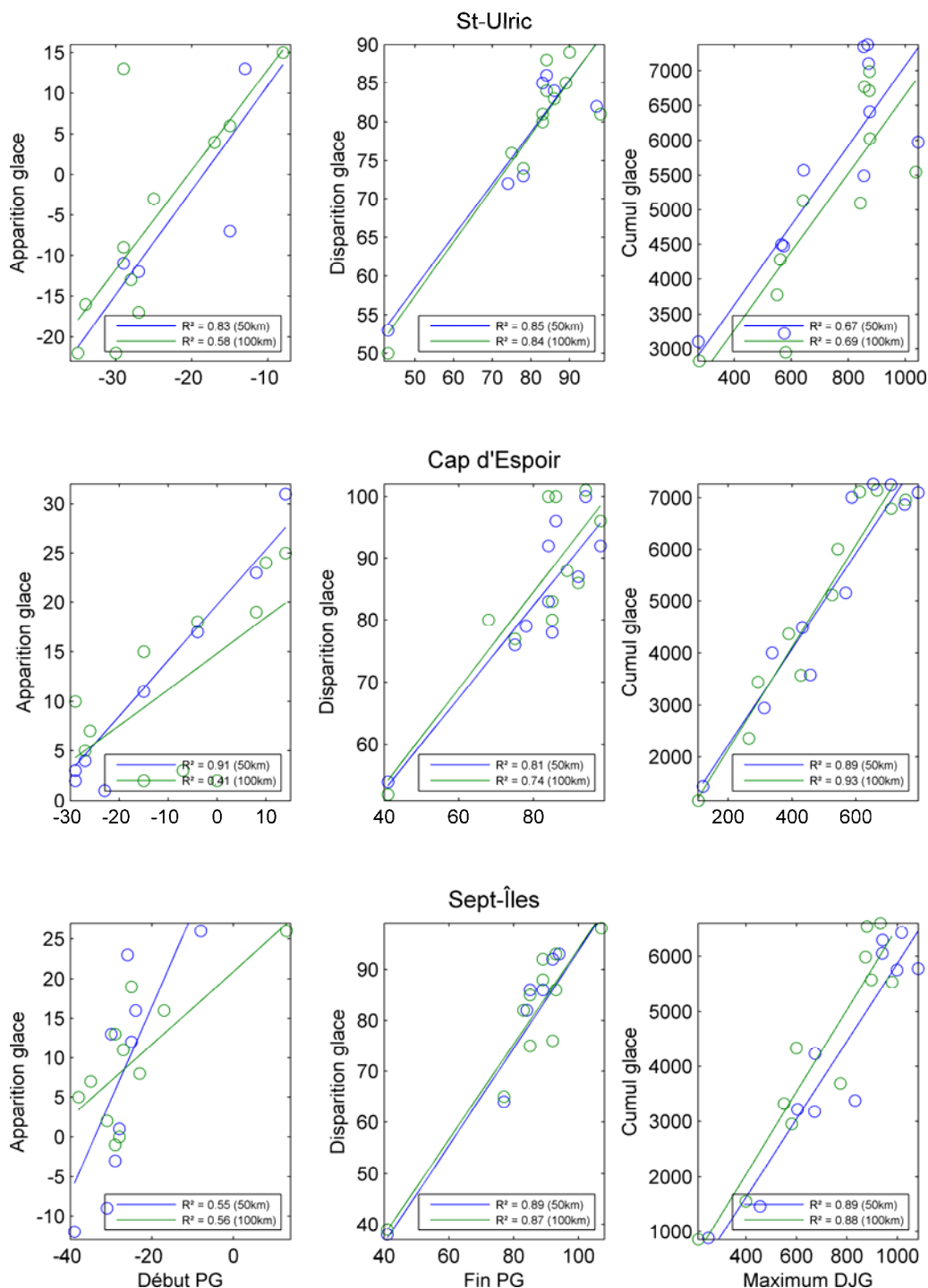


Figure 17 Régression linéaire entre les paramètres de degrés-jours de gel (abscisse) et la présence de glace (ordonnée) pour les 3 sites des AWAC, dans un rayon de 50 km (en bleu) et de 100 km (en vert)

4.3 Projections futures de la présence de glace

Huit simulations provenant de deux modèles climatiques suivant le scénario A2 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont été utilisées pour calculer le nombre de DJG. Un groupe de cinq simulations provient du CGCM 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 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, ce qui a fourni la dernière simulation (MRCC-aev débiaisé). Les simulations du 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 DJG 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, de fin et de durée de la période de gel ainsi que le maximum atteint par la courbe ont été extraits. Ensuite, les relations déterminées pour les 10 hivers ont été appliquées pour calculer les jours d'apparition et de disparition de la glace ainsi que le cumul de glace hivernale pour chaque année.

4.3.1 Estuaire et golfe du Saint-Laurent

Les courbes de température moyenne hivernale sont présentées à la Figure 18. Pour les cinq 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 disponibilité des données de chaque scénario. Les simulations MRCC-aev et MRCC-ahj (courbes 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 de 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 rendre explicite le nombre de simulations intervenant dans la moyenne des paramètres de glace issus des différents scénarios.

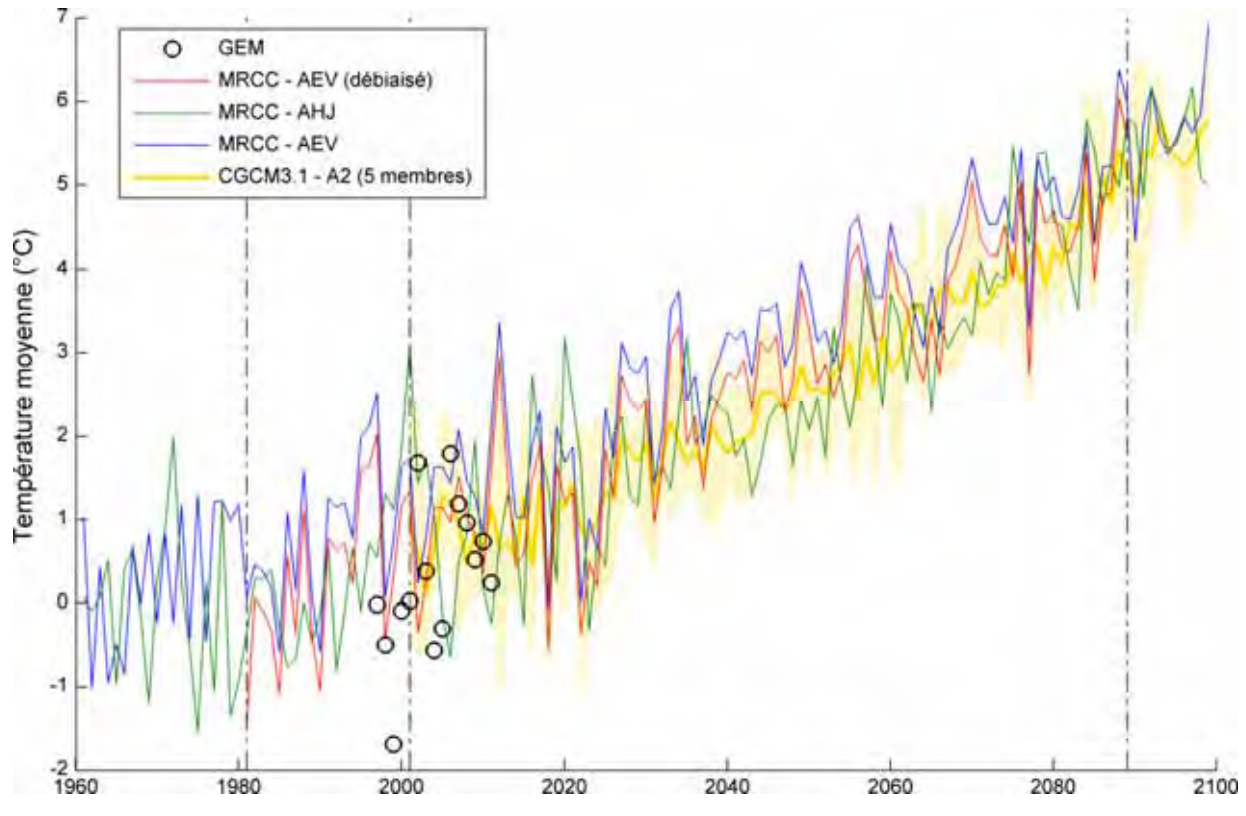


Figure 18 Température moyennée entre le 1^{er} octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour l'ensemble du Golfe. La courbe du CGCM3 correspond à la moyenne (minimum et maximum représentés en jaune pâle) des 5 membres simulant le scénario A2. Les cercles noirs indiquent la 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 MOR forcé par ces mêmes simulations (Figure 19; figures 23 à 25). Rappelons que le MOR simule explicitement la formation, la fonte et la dynamique de la banquise dans le Saint-Laurent (cf. projet Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques) jusqu'en 2070. Ces sorties permettent de vérifier la validité des relations empiriques entre DJG 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 que de diminution du couvert de glace.

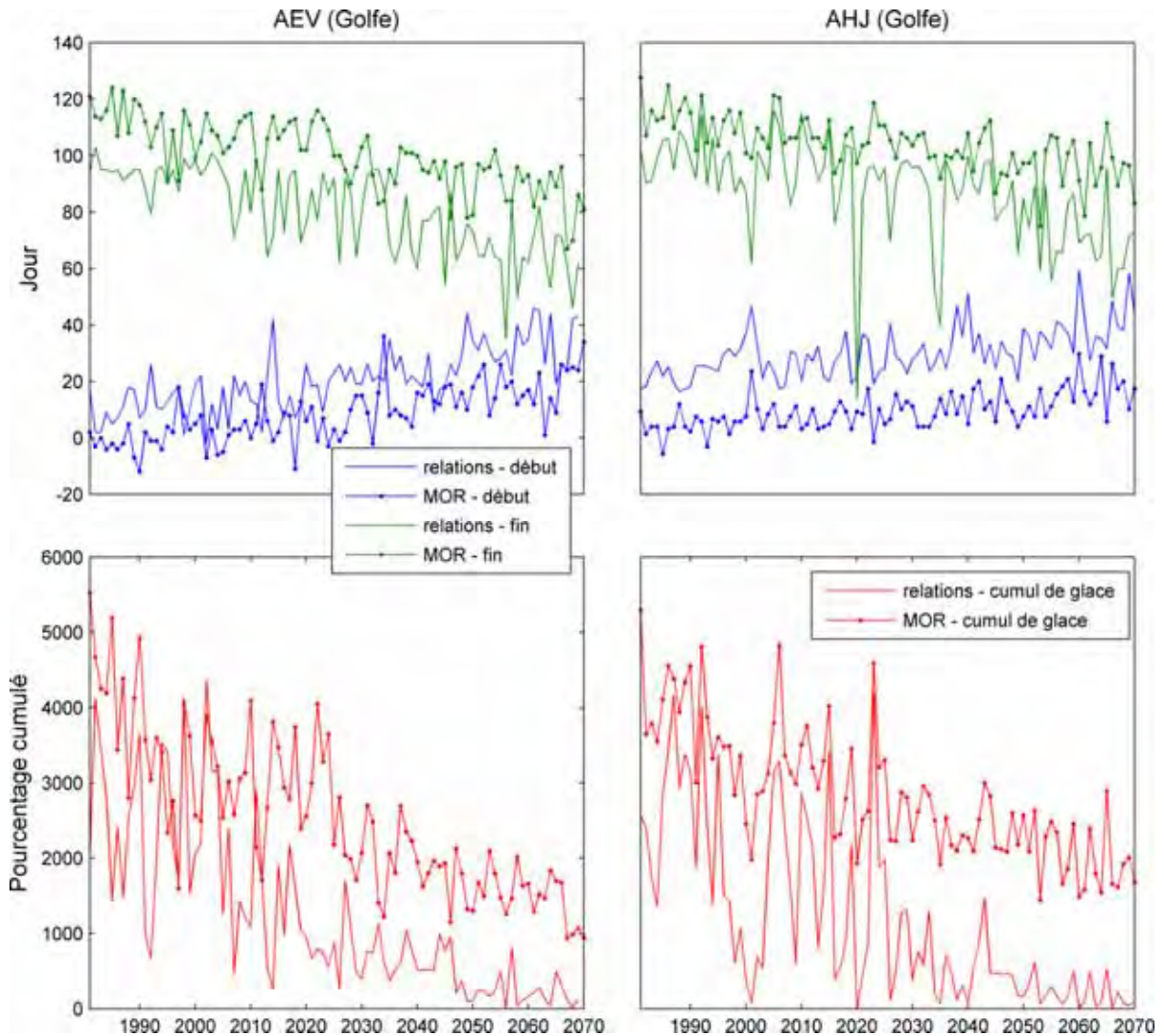


Figure 19 Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes) pour l'ensemble du Golfe

Les paramètres de glace calculés pour chaque hiver et pour l'ensemble des simulations de même que les données de glace du SCG et les paramètres de glace calculés pour les températures de GEM sont présentés à la Figure 20. 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 interannuelle. Cela atteste de la validité de cette méthode de simulation de l'englacement de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

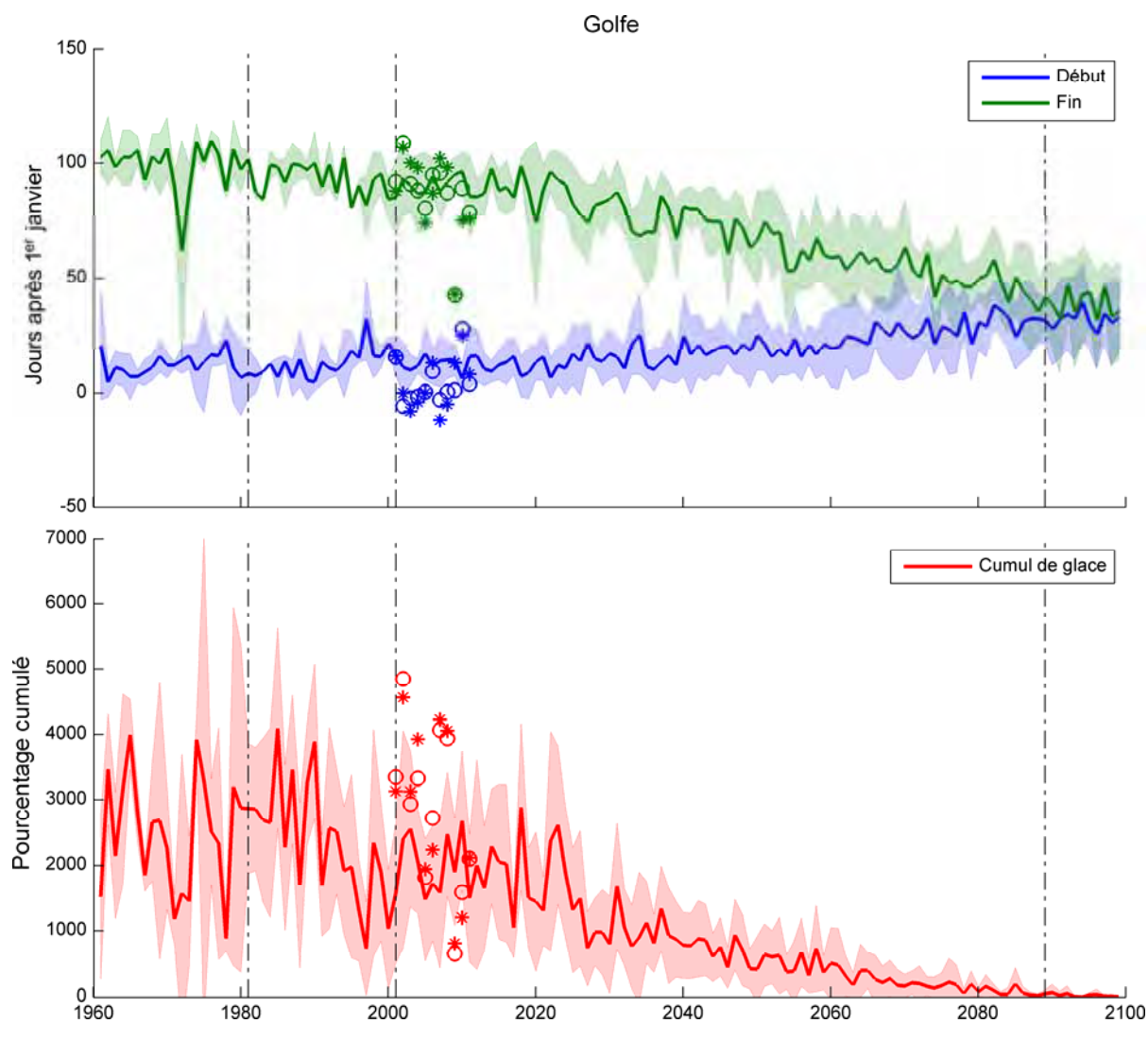


Figure 20 Résultats des relations empiriques appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour l'ensemble du Golfe. Le trait plein correspond à la moyenne des résultats des différentes simulations, et la zone ombragée illustre le minimum et le maximum obtenus pour chaque année. Les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

4.3.2 Sites des AWAC

Le même travail a été réalisé pour les 3 sites des AWAC, pour des rayons de 50 et de 100 km. 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 simulations MRCC-aev et MRCC-ahj. Cela est attribuable à la faible résolution spatiale du CGCM (seulement 5 points mouillés sur tout le Golfe), qui ne résout pas bien les particularités régionales, et à l'interpolation des sorties aux sites spécifiques, qui contamine les valeurs du domaine marin avec des valeurs terrestres, considérablement plus froides qu'en mer en hiver. Le CGCM est d'abord conçu pour simuler des tendances globales et régionales pour des régions de la taille du Golfe ou de plus grande taille. 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 du MOR avec les projections de glace provenant des relations empiriques pour l'ensemble du Golfe, et les figures 23 à 25 font de même pour les régions des AWAC. Les discontinuités des courbes du 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 ni la fin de l'englacement avec le critère de présence de glace de 15 %. À l'échelle du Golfe, les tendances et la variabilité des deux méthodes sont relativement corrélées. Pour les régions autour des AWAC, 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 DJG. Les résultats issus des modèles régionaux concordent assez bien avec les observations, du moins beaucoup mieux que ceux des modèles globaux. L'advection a plus d'importance dans les petites régions que dans l'ensemble du système quasifermé du Golfe. Malgré ces limites, les projections de glace ont été effectuées (figures 26 à 28).

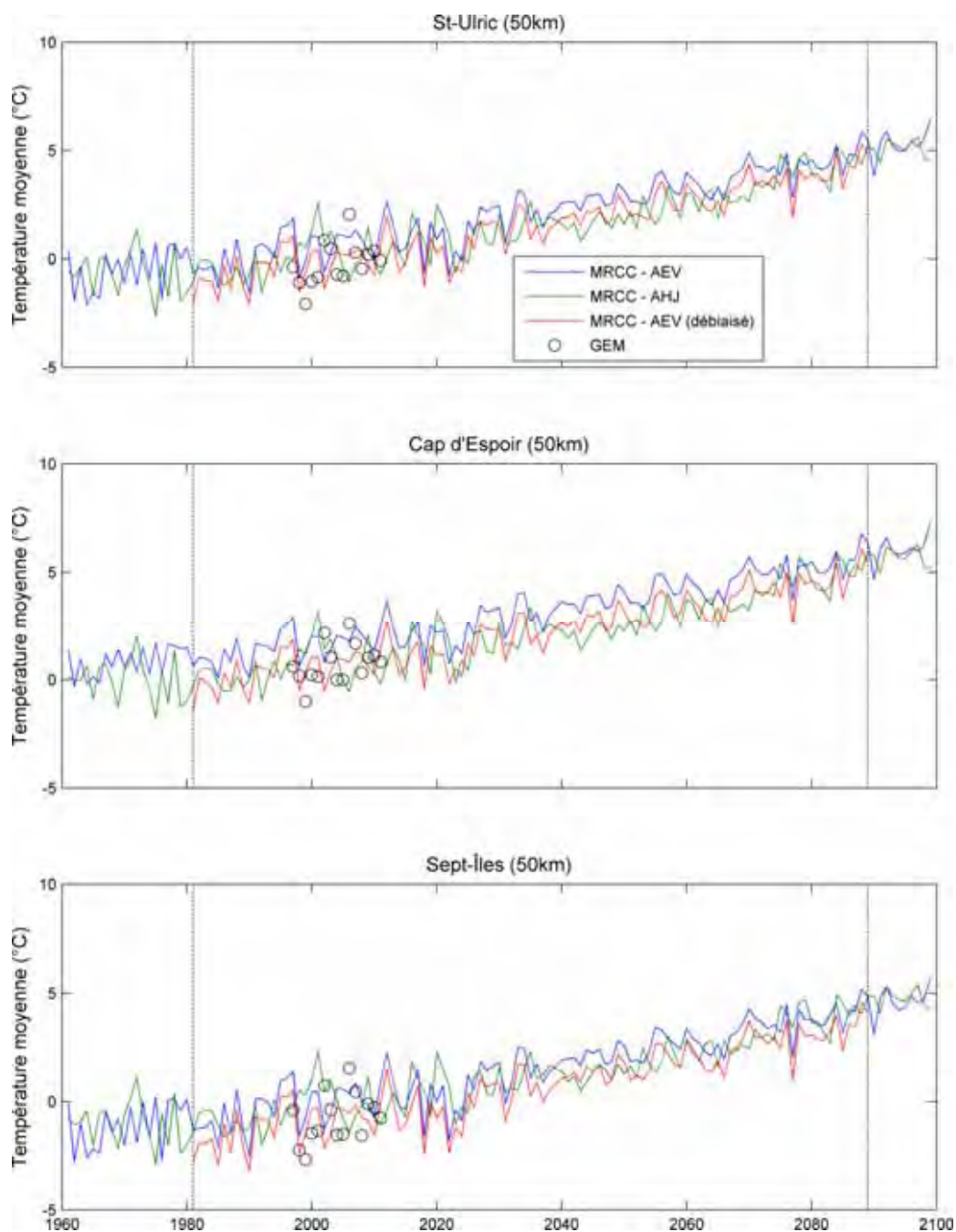


Figure 21 Température moyennée entre le 1^{er} octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (50 km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM

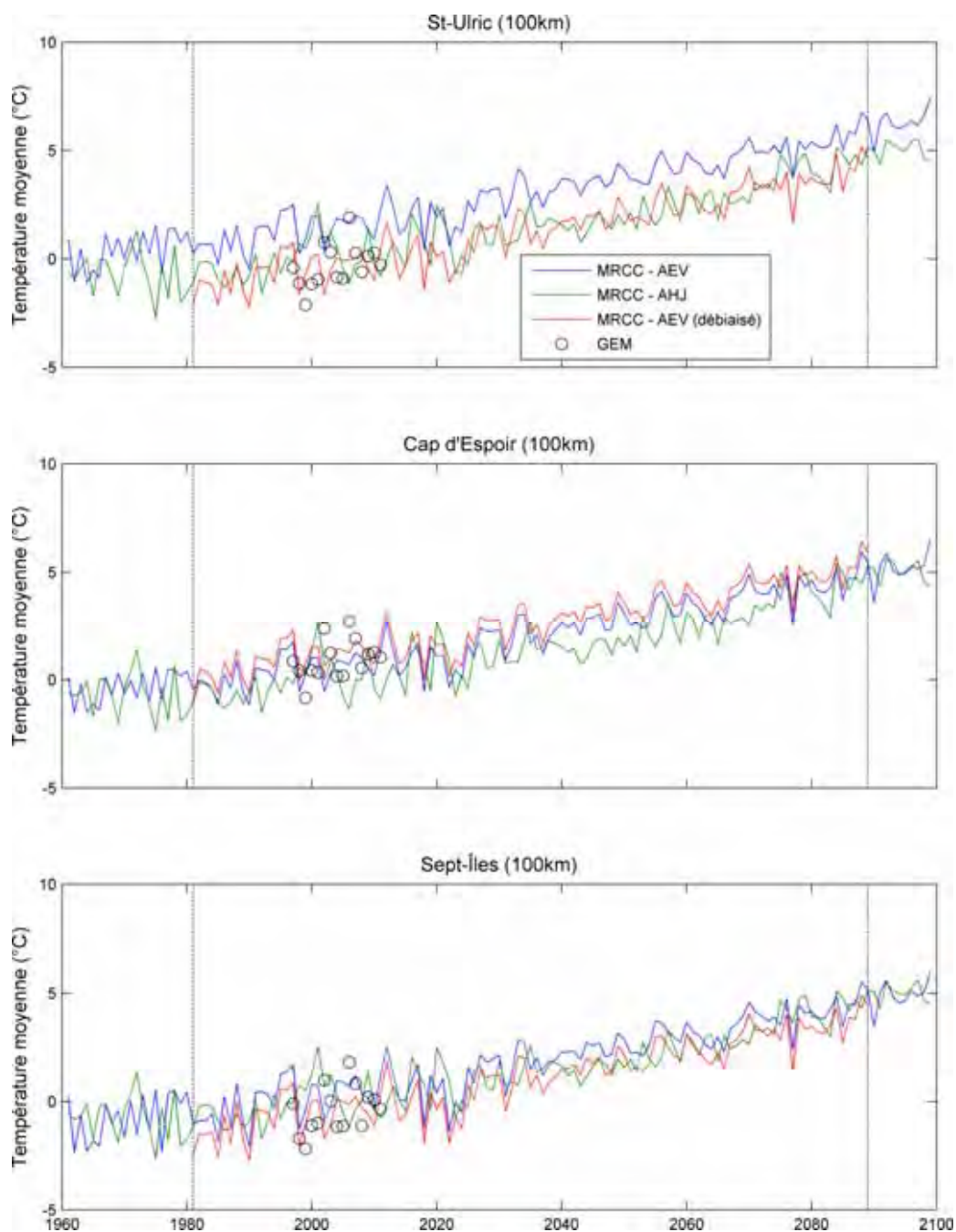


Figure 22 Température moyennée entre le 1^{er} octobre et le 30 juin pour chacun des scénarios climatiques utilisés pour les environs de chaque AWAC (100 km). Les cercles noirs indiquent la température moyenne hivernale issue de GEM

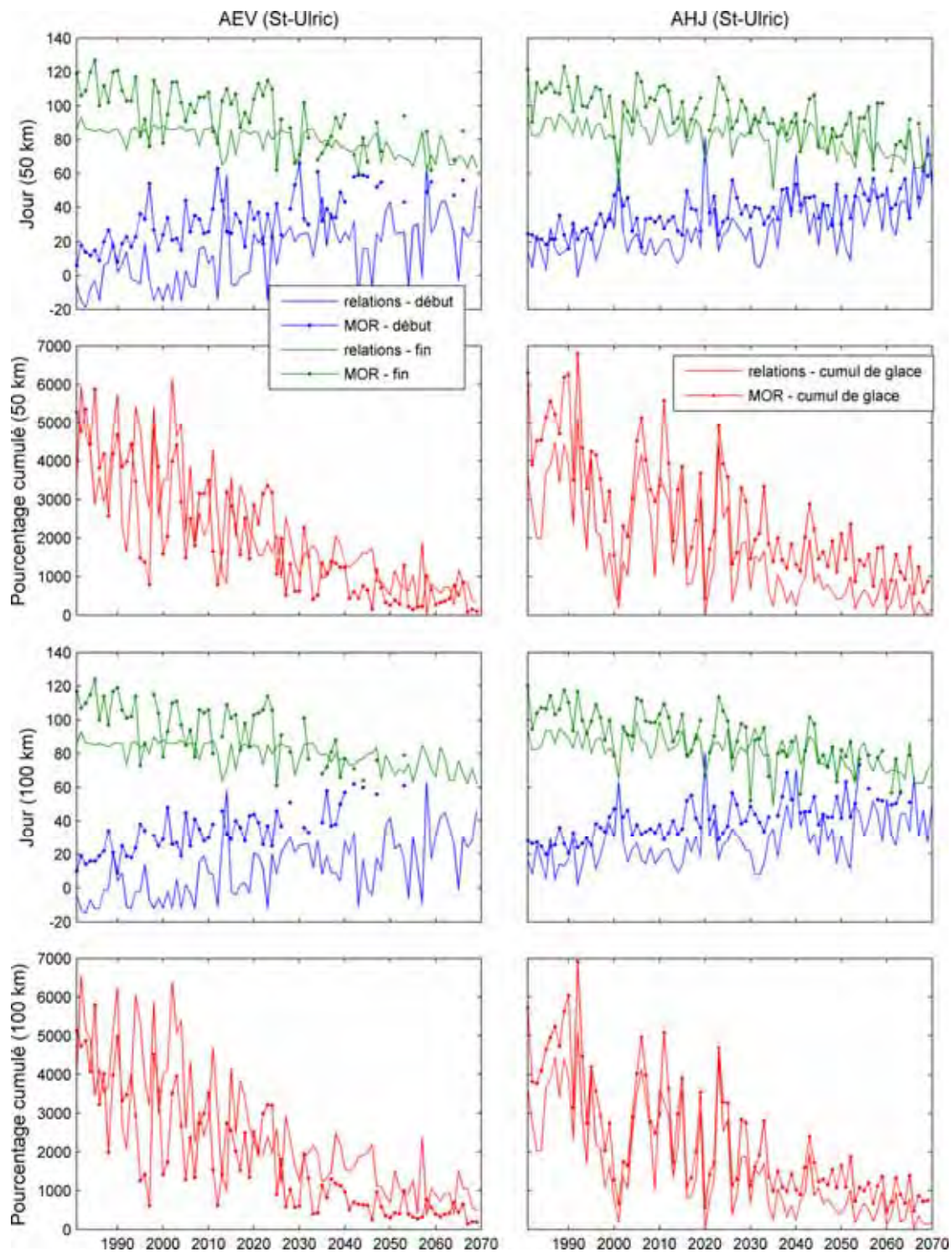


Figure 23 Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes sans points) dans un rayon de 50 et de 100 km autour du site de Saint-Ulric

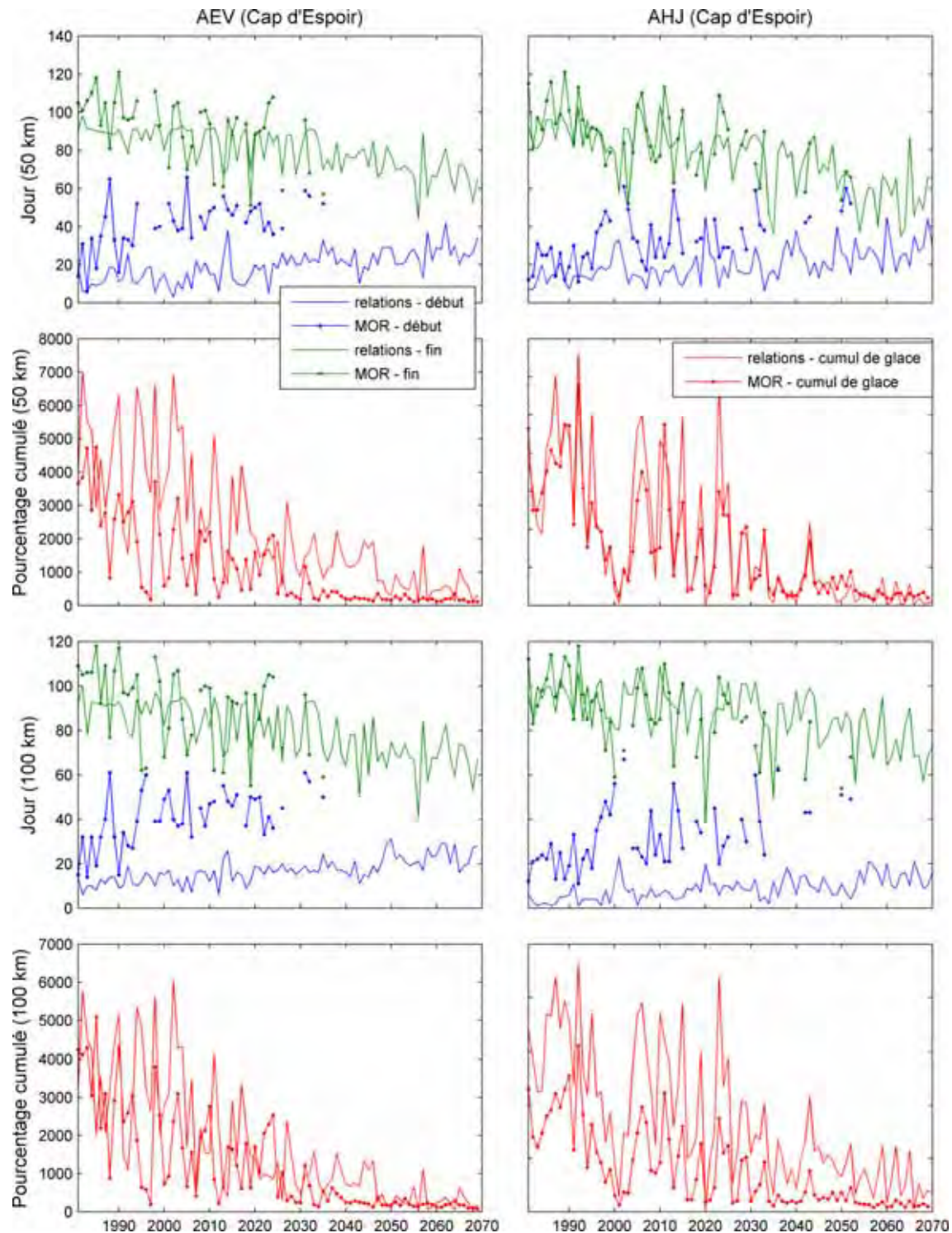


Figure 24 Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes sans points) dans un rayon de 50 et de 100 km autour du site de Cap d'Espoir

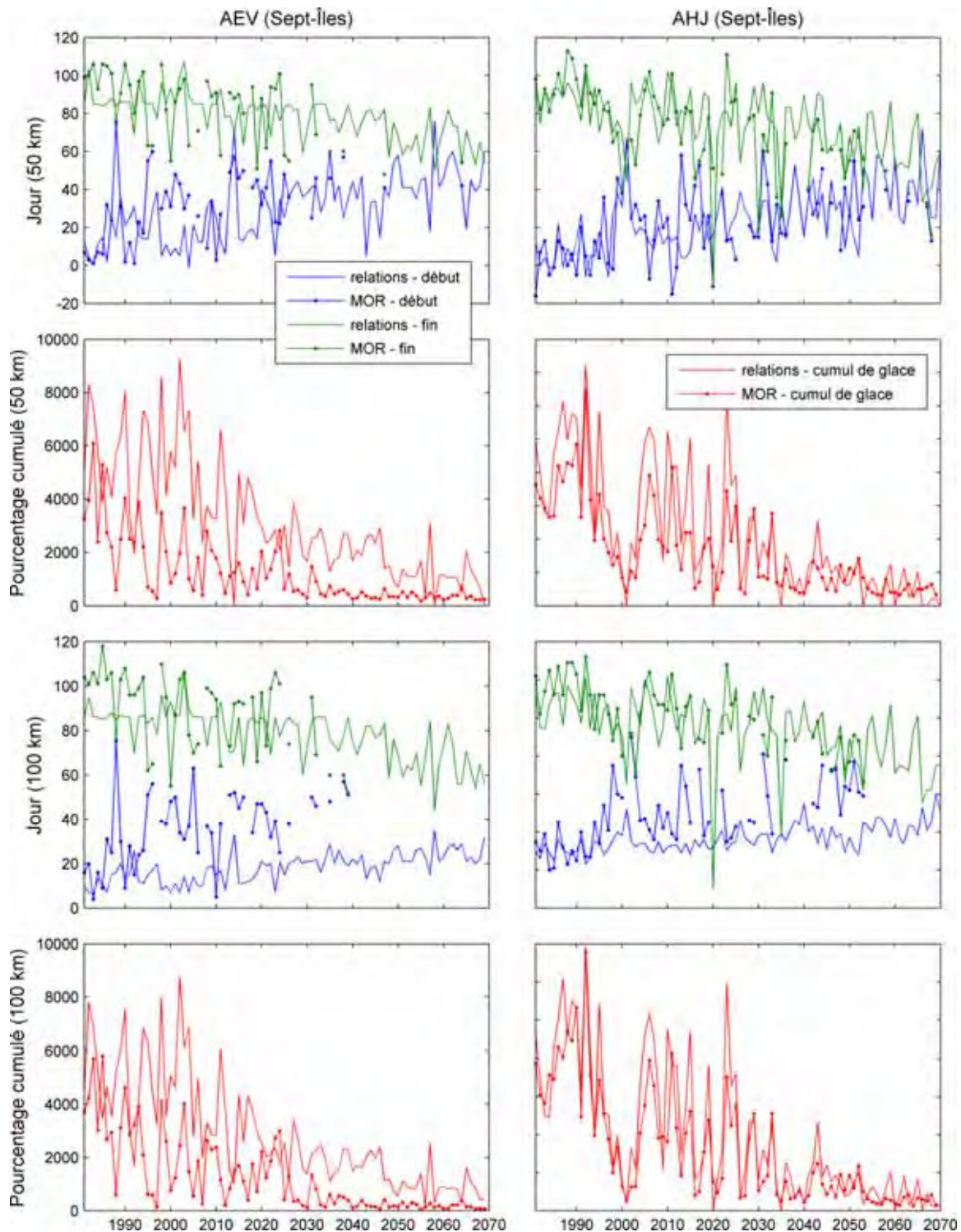


Figure 25 Comparaison des sorties du MOR (lignes avec points) avec les résultats des relations empiriques (lignes sans points) dans un rayon de 50 et de 100 km autour du site de Sept-Îles

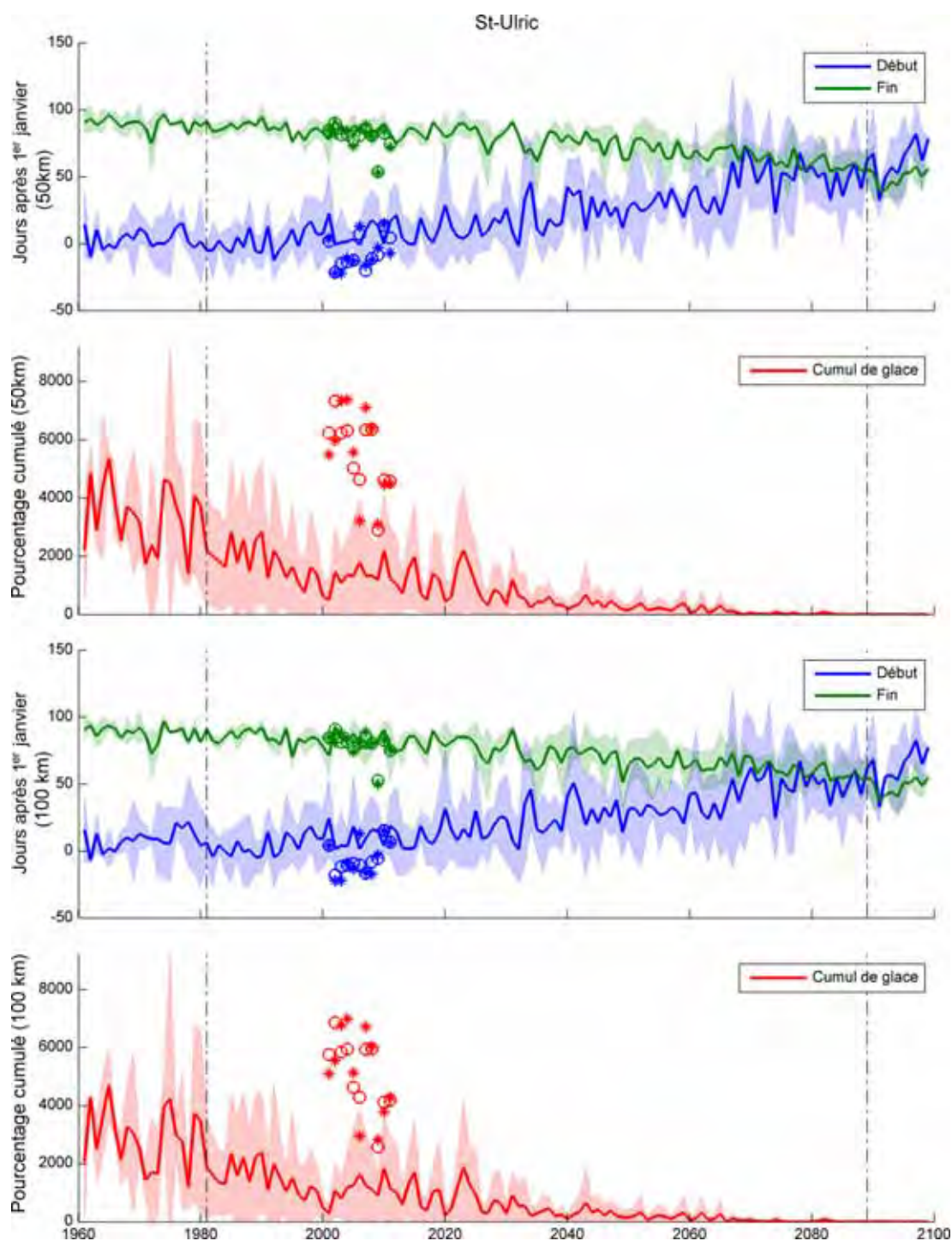


Figure 26 Résultats des relations empiriques du tableau 5 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Saint-Ulric. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM

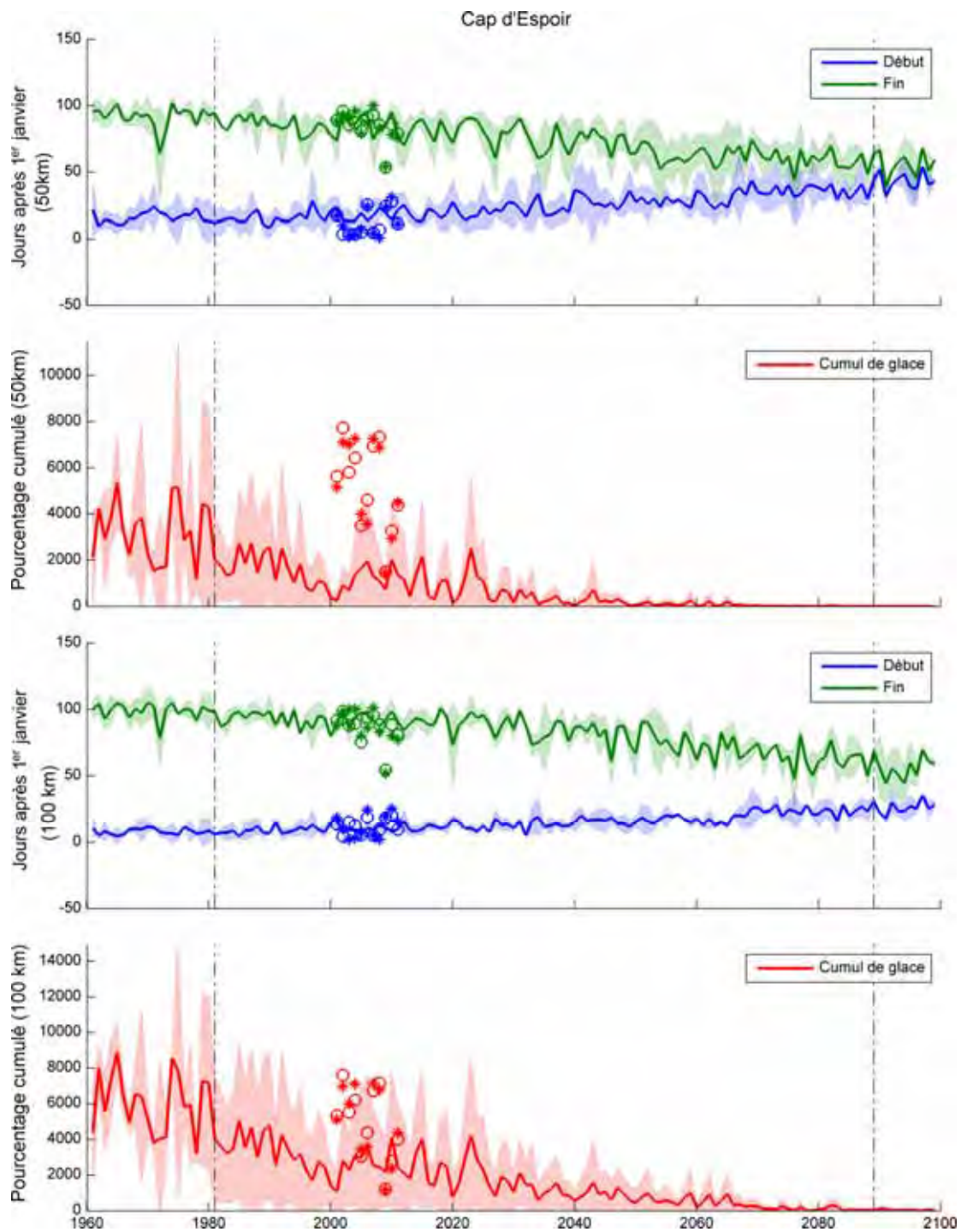


Figure 27 Résultats des relations empiriques du tableau 5 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Cap d'Espoir. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM

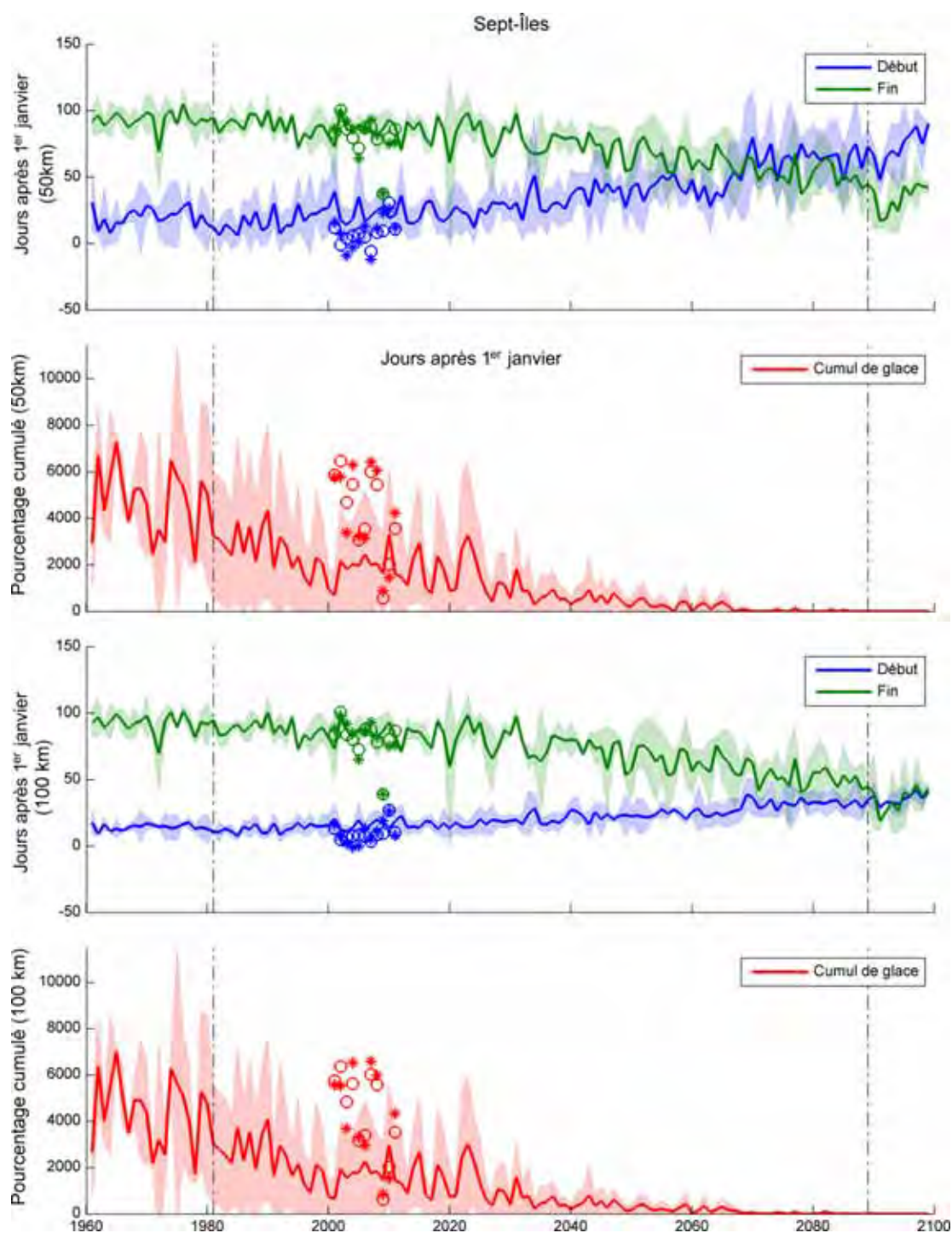


Figure 28 Résultats des relations empiriques du tableau 5 appliquées aux sorties des différentes simulations climatiques pour le site de Sept-Îles. Les étoiles correspondent aux données de glace du SCG. Les cercles représentent les prévisions de glace lorsque les relations empiriques sont appliquées aux données du passé proche issues de GEM

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

La méthode d'évaluation du climat de vagues avec le modèle GENER, telle qu'elle a été 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 pour nous permettre de tenir compte, de manière statistiquement probante, du climat de glace dans le golfe du Saint-Laurent pour l'évaluation du climat de vagues futur.

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 la banquise contribue de deux manières à réduire la hauteur des vagues : 1) en diminuant le fetch; 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 de la glace 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 d'un couvert partiel de glace, des vagues de hauteur limitée 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 dates d'apparition et de disparition de la glace, obtenues en les reliant au début et à la fin de la 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 Saint-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 selon la formule suivante :

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

Afin d'éviter une surestimation de la concentration moyenne journalière liée au cumul de glace total, 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. Cette considération est physiquement acceptable, car la 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 DJG, afin d'obtenir le régime des 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 plus 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 des vagues 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 du 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 il n'est pas réaliste pour le futur. Le second, c'est-à-dire aucune atténuation par la glace, est présenté dans ce rapport comme le pire scénario.

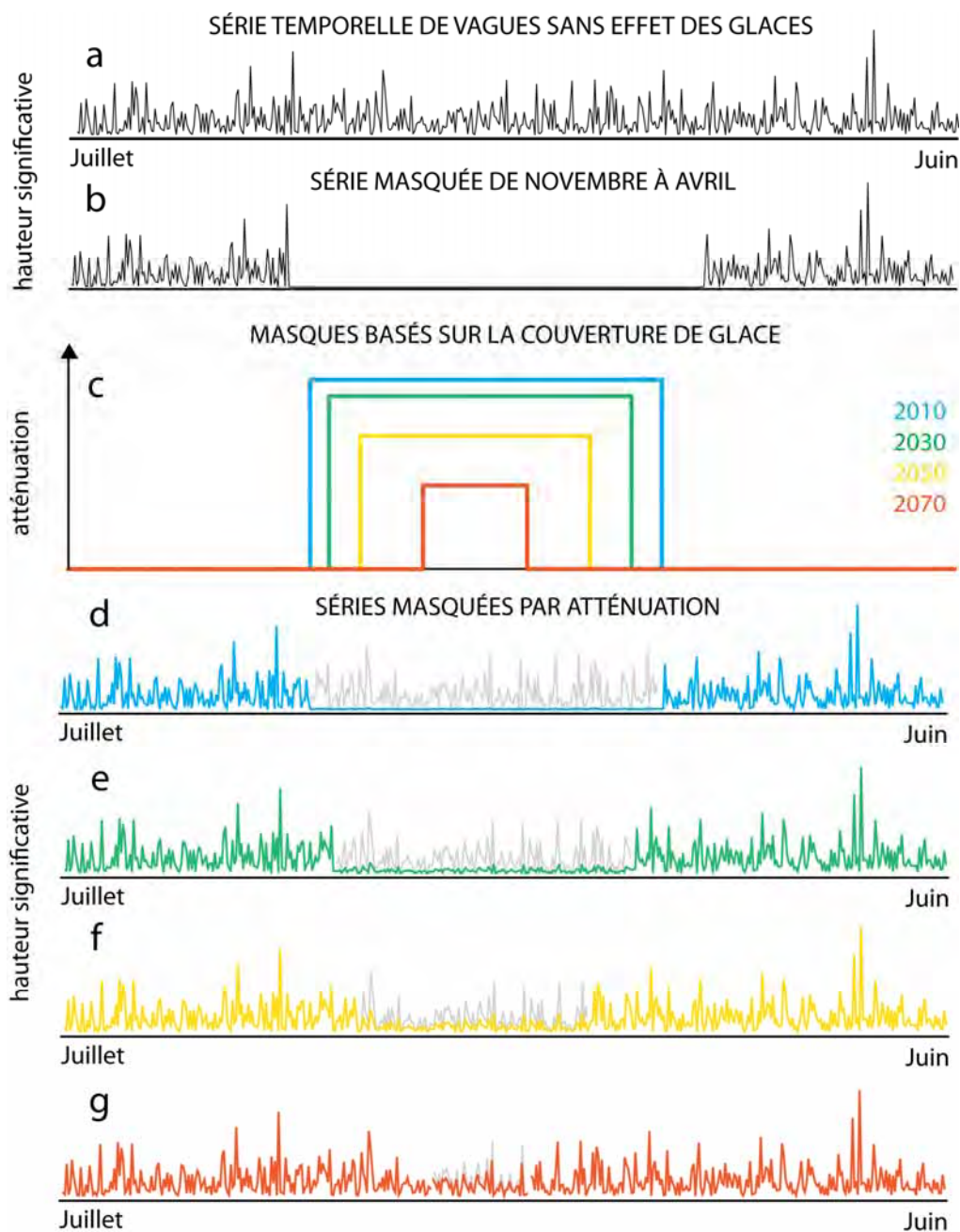


Figure 29 Schéma décrivant la méthode d'atténuation des vagues produites par GENER. (a) Série temporelle fictive de hauteur significative des vagues telle qu'elle est produite par GENER pour une année. (b) Série (a) tronquée de novembre à avril, période sur laquelle on présume une absence de vagues due 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) à (g) Série temporelle (a) sur laquelle ont été appliqués les différents masques temporels d'atténuation. La courbe en gris représente la série non atténuée

En définitive, les projections d'englacement choisies pour tenir compte de l'effet de la glace sur les sorties de GENER sont celles obtenues par l'intermédiaire de huit simulations climatiques suivant le scénario A2 du GIEC, à savoir les trois issues du MRCC (aev, ahj et aev débiaisé) et les cinq membres du CGCM3 A2. Le scénario A2 a été retenu, car il est sévère, mais assez réaliste quant à la réduction du couvert de glace (cf. section 2.4.2). De plus, le nombre de simulations mises 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 de la contribution 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 journaliers (compris entre 0 et 1) de chaque hiver. La Figure 30 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.

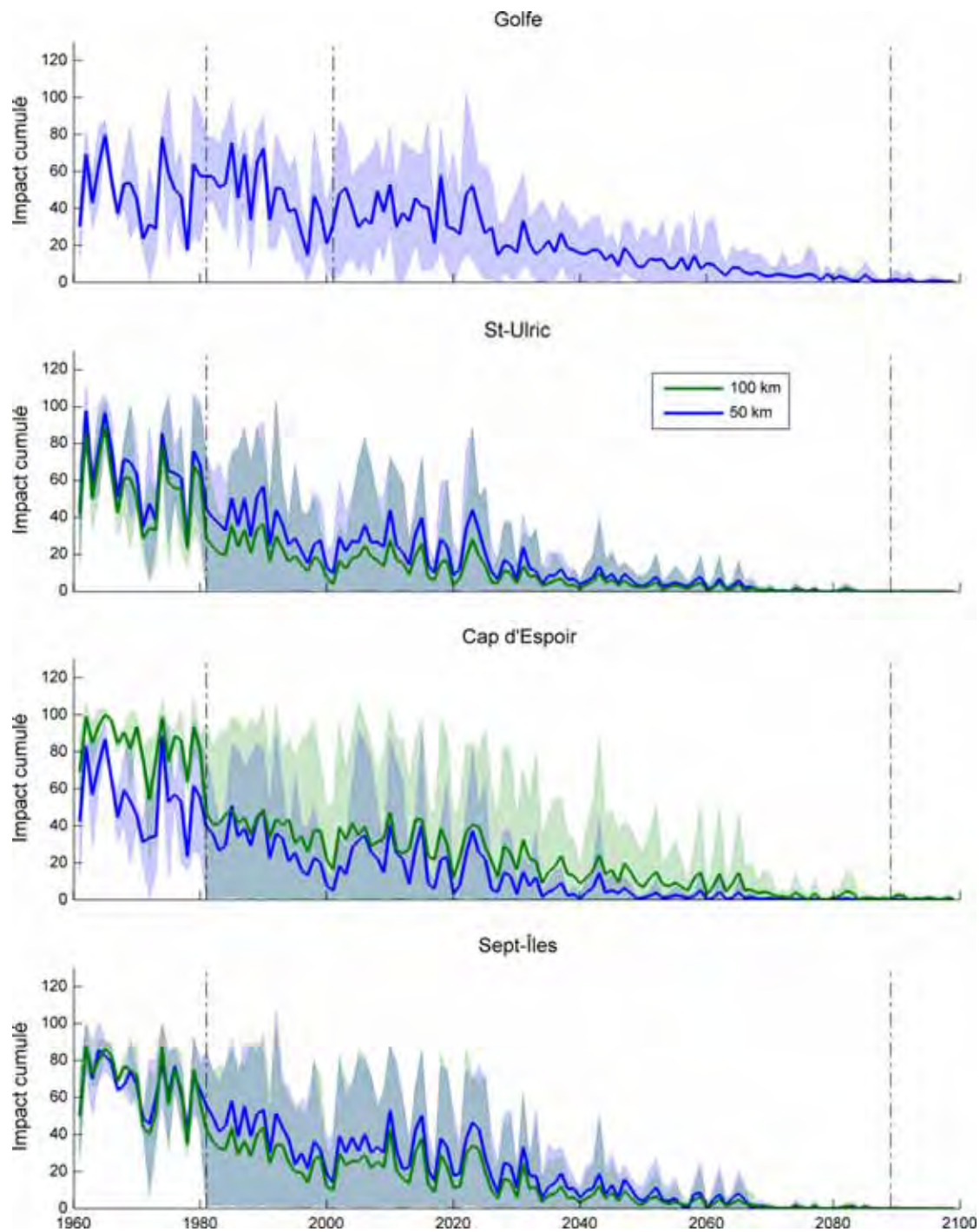


Figure 30 Indice d'impact cumulé de la glace sur le régime des vagues hivernal selon les relations empiriques, pour le Golfe et pour chacun des sites des AWAC (50 et 100 km). Le trait plein représente la moyenne des différents scénarios et la zone ombragée indique le minimum et le maximum pour chaque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

4.5 Atténuation des vagues à partir des prédictions de glace du MOR

Le modèle océanique régional (MOR) de l'ISMER, exploité 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, pour les forçages atmosphériques, avec les deux simulations climatiques MRCC-aev et MRCC-ahj pour la période de 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'influencerait 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'agit pas sur les vagues au large de Pointe-aux-Loups (Figure 31).

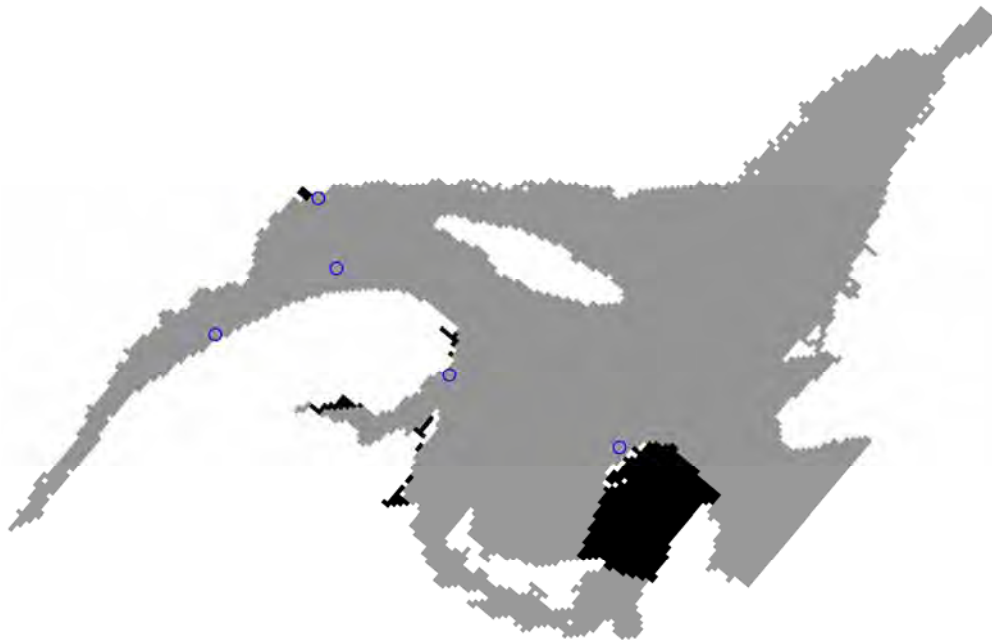


Figure 31 Grille du MOR (en gris : points de grille utilisés pour calculer le coefficient d'atténuation; en noir : points de grille exclus du calcul; cercles bleus : sites d'étude)

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 supérieure à 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) au début et à la fin de l'hiver, le MOR accumule de la glace en milieu côtier qui n'influence pas les vagues au large aux sites d'étude; 2) le 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.

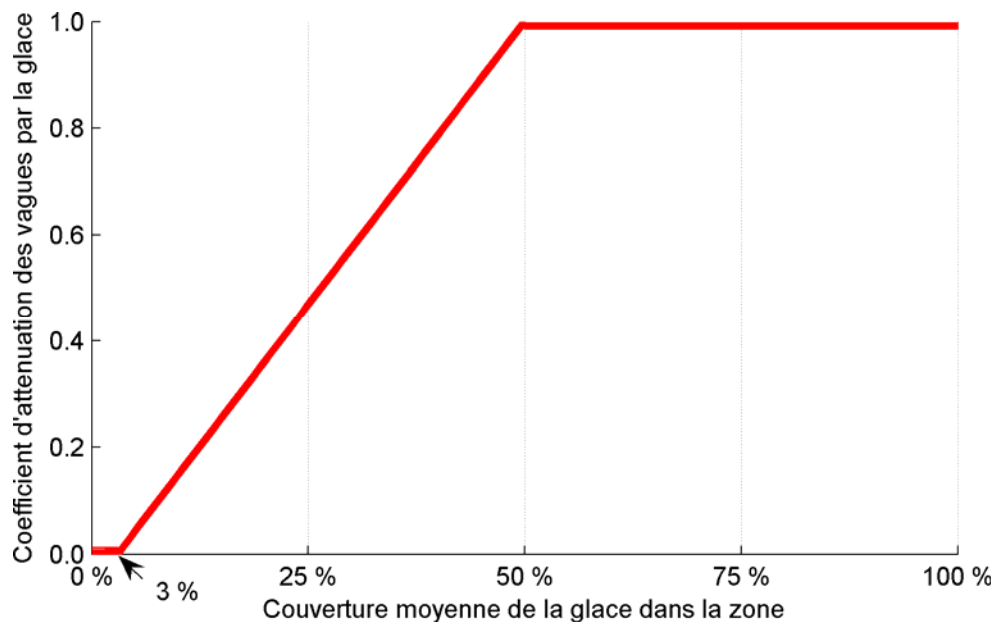


Figure 32 Fonction pour convertir la couverture moyenne de glace en coefficient d'atténuation des vagues par la glace (coefficient 0 = aucune atténuation; coefficient 1 = atténuation totale)

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

Les coefficients d'atténuation quotidiens ont été attribués à la 12^e heure (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 concerne Pointe-aux-Loups, où l'influence de la glace devient négligeable à partir de 2030. La Figure 35 illustre la variation du coefficient d'atténuation au cours de l'hiver. Ce coefficient augmente généralement sur plusieurs jours au début de l'hiver, et il fluctue parfois 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 journaliers 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.

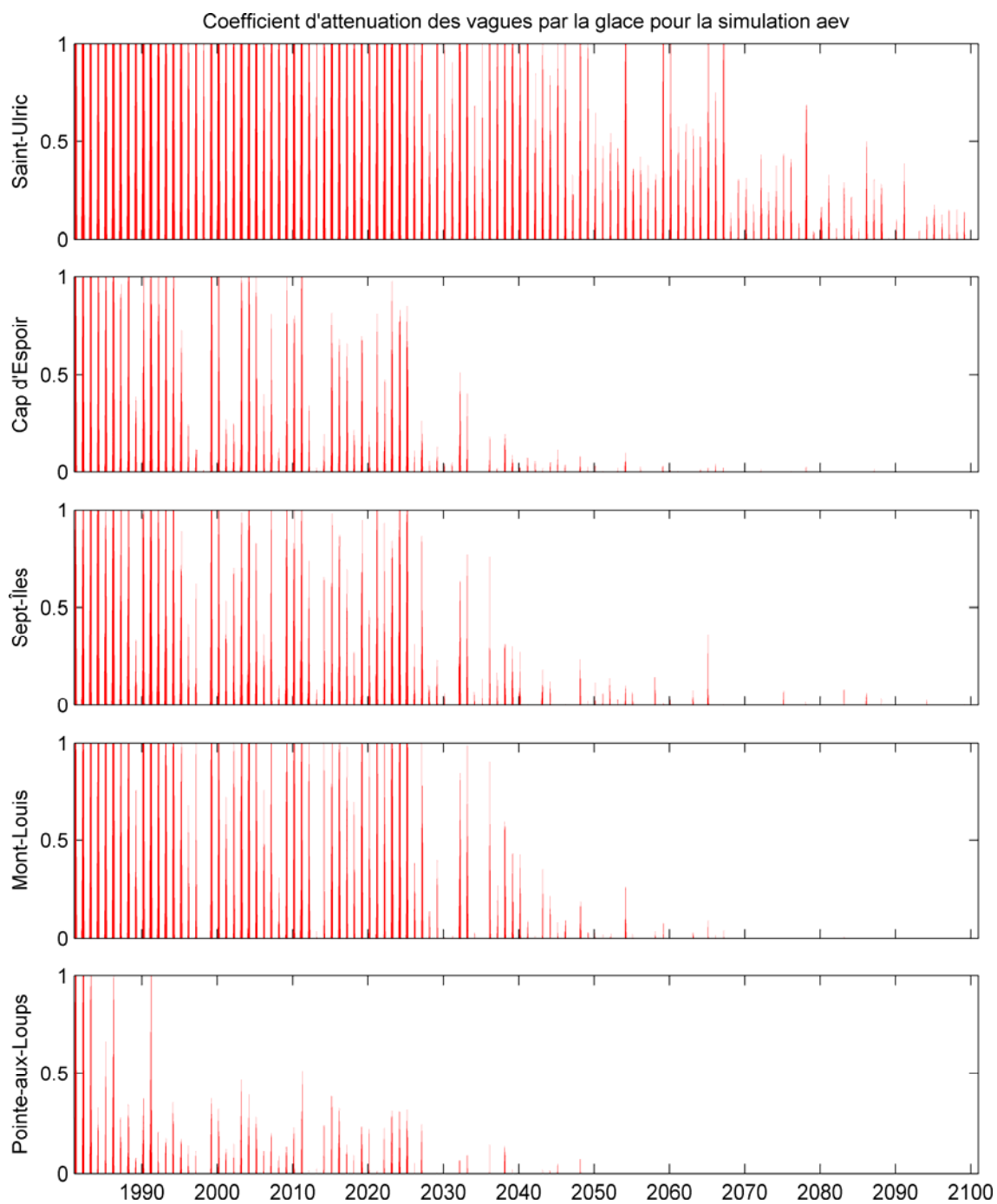


Figure 33 Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours de 1981 à 2100 à partir de la simulation MOR-aev

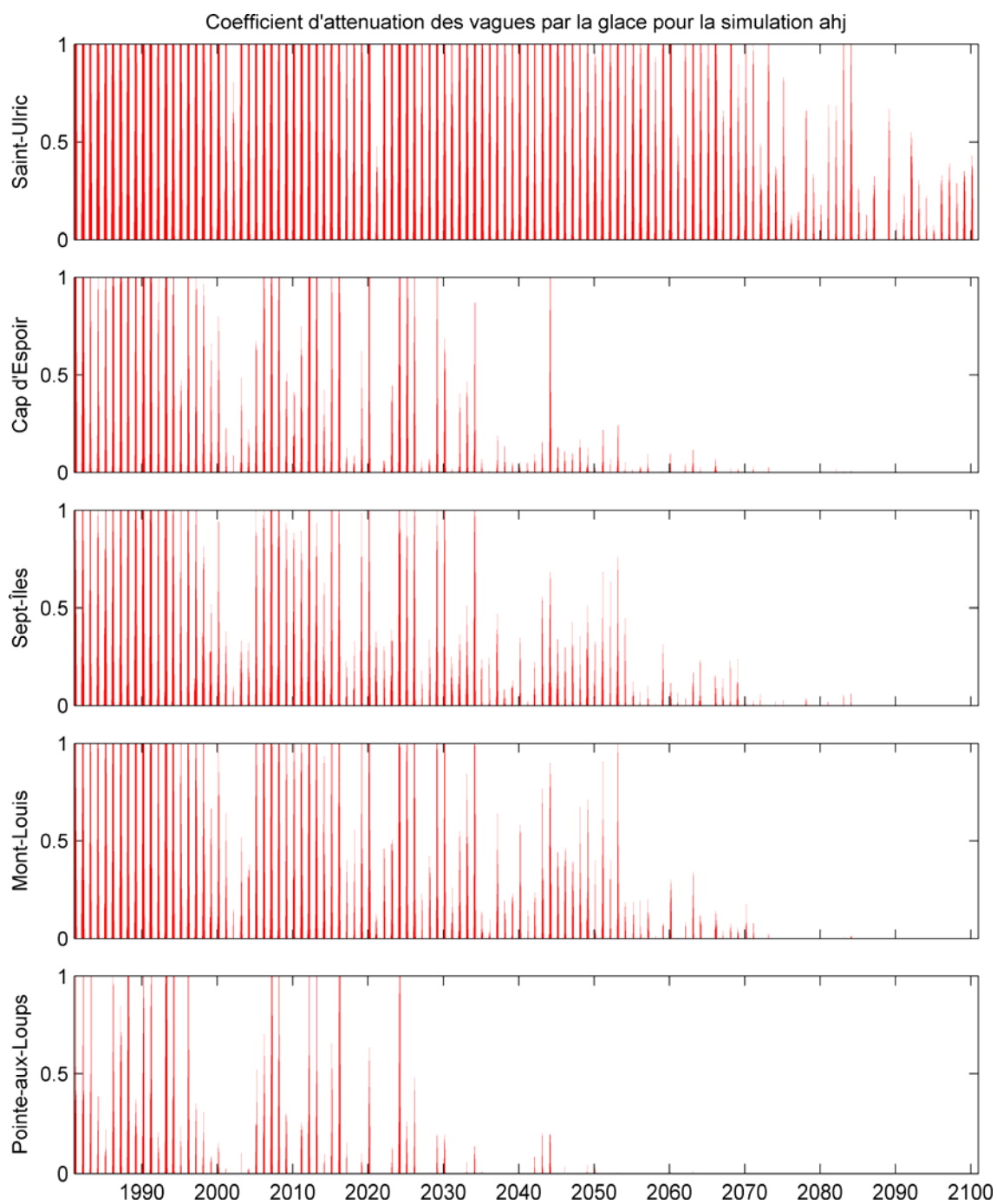


Figure 34 Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours de 1981 à 2100 à partir de la simulation MOR-ahj

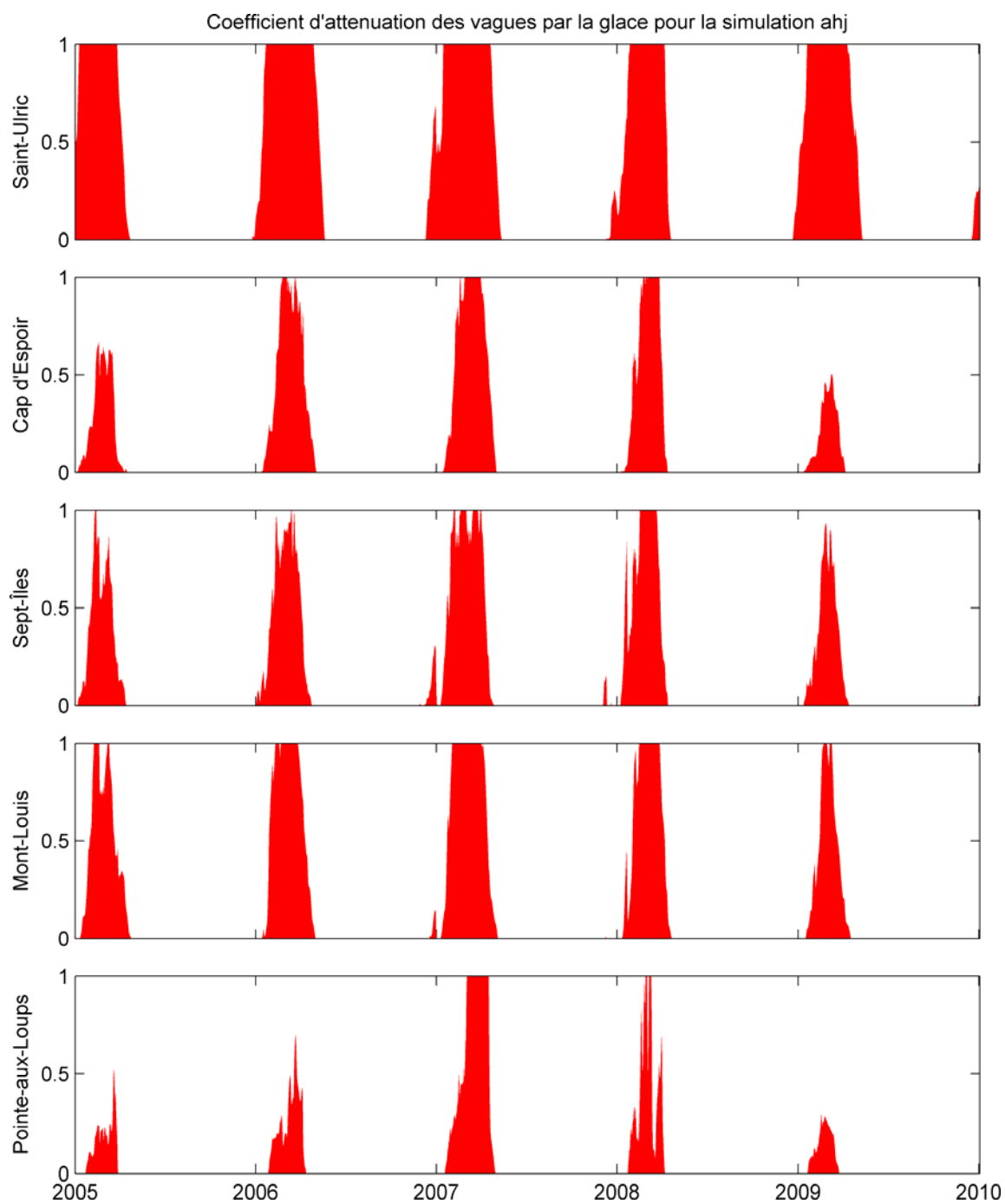


Figure 35 Coefficient d'atténuation des vagues par la glace calculé pour tous les jours à partir de la simulation MOR-ahj; détail pour 2005 à 2009

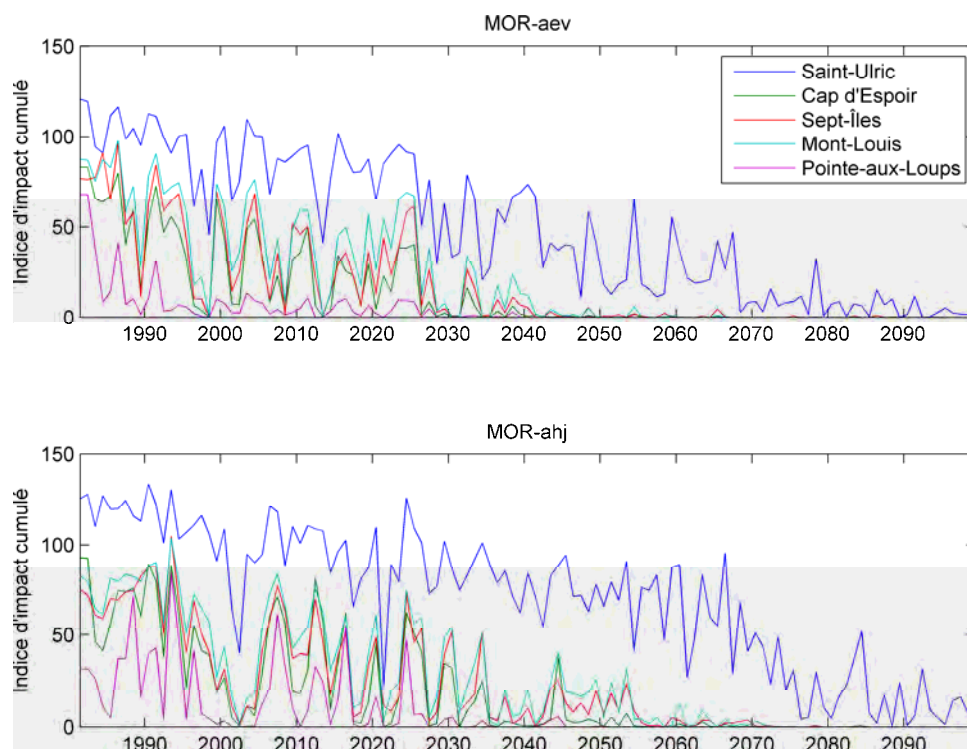


Figure 36 Indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les simulations MOR-aev et MOR-ahj, calculé comme la somme des coefficients d'atténuation de chaque hiver

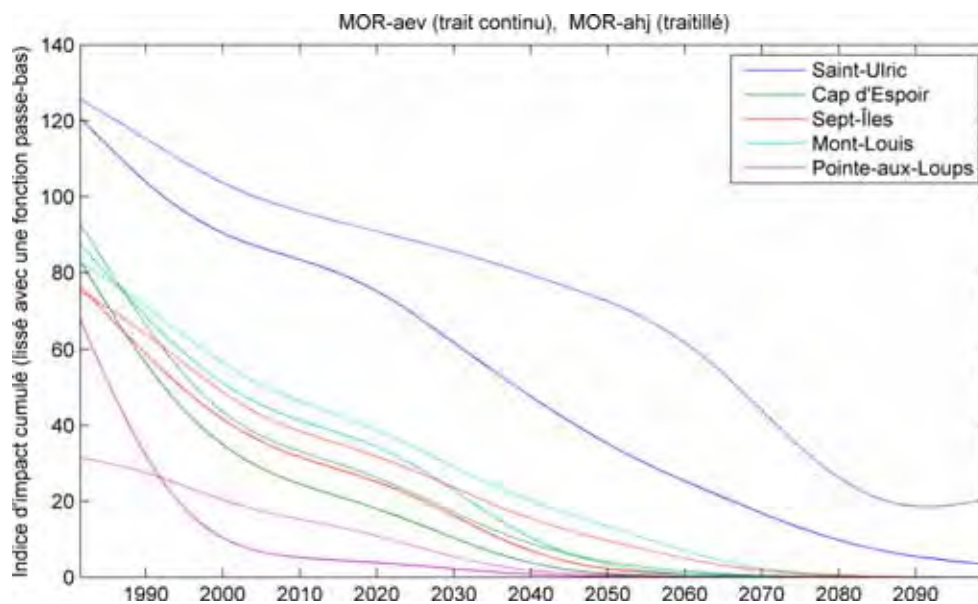


Figure 37 Lissage de l'indice d'impact cumulé de la glace aux cinq sites et pour les simulations MOR-aev (traits continus) et MOR-ahj (traitillés)

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 du Saint-Laurent. Cette méthode se base sur l'existence de relations significatives entre le nombre de DJG 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), qui passeront de 1 °C présentement à près de 6 °C à la fin du siècle, d'après le scénario A2. Selon notre méthode empirique utilisant plusieurs simulations de température, la durée moyenne de l'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 réduit également la concentration cumulée, qui passera de $2\,000 \pm 1\,000$ %-jours, en moyenne, à environ 200 ± 100 %-jours.

L'englacement futur a aussi été estimé à partir des sorties de glace du MOR, qui suivent les mêmes tendances que les projections des relations empiriques. Ces sorties 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 du 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, de 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 exploite, depuis juillet 2002, un modèle vent-vagues 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). Ce modèle est exécuté toutes les 12 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 au www.meteo.gc.ca ou par bulletins VHF.

Le modèle EC a été calibré pour bien reproduire les vagues de tempête, *a 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^{er} 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 précédemment mentionné, Environnement Canada a mis à la 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 4 mai 2010 au 31 décembre 2011 pour les sites de Sept-Îles et de 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, de Cap d'Espoir et de Saint-Ulric (Figure 38) depuis mai 2010, dans le cadre d'un projet de recherche de l'ISMER (Urs Neumeier) financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec.

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 pour chaque pas de temps du modèle.

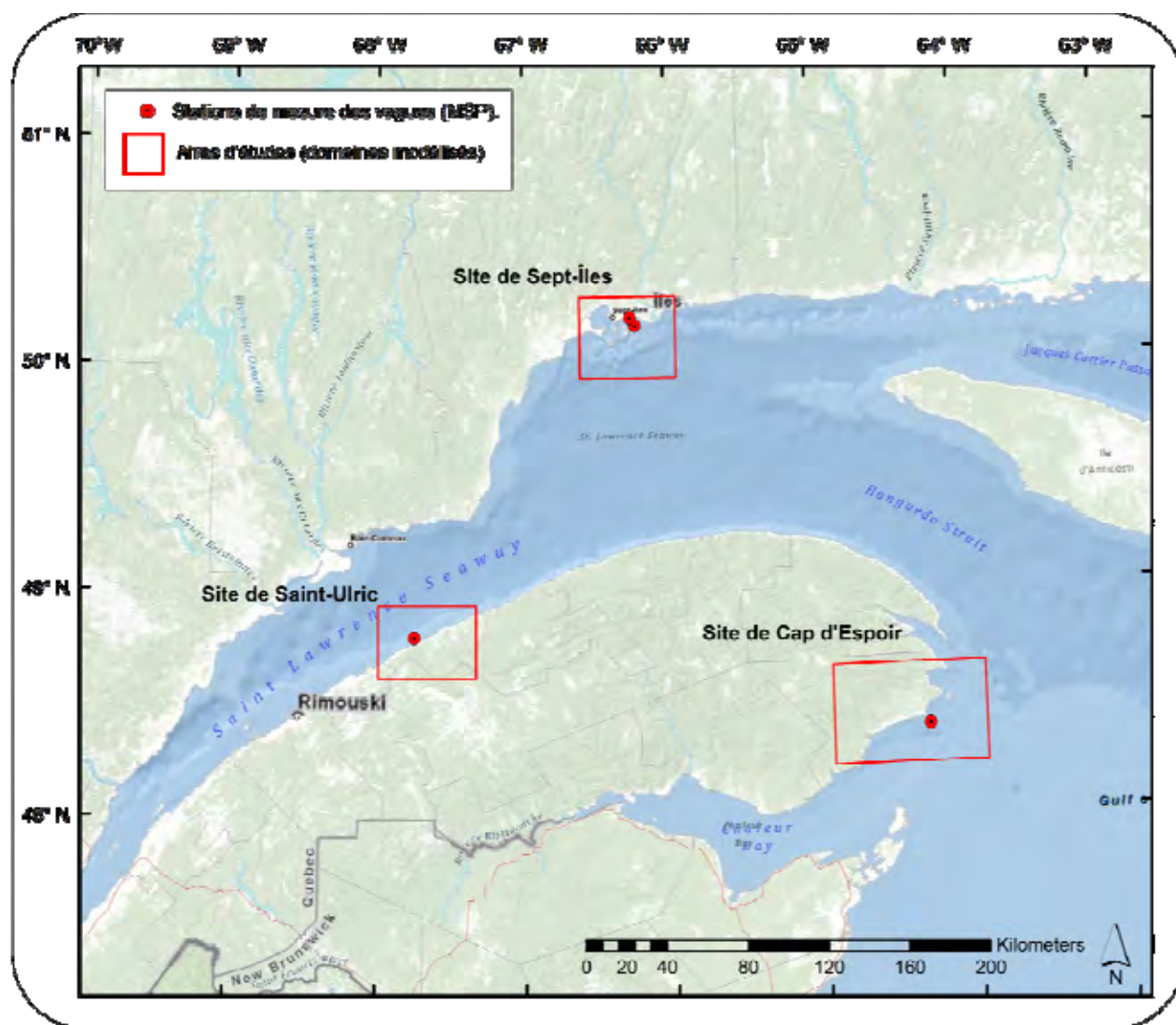


Figure 38 Localisation des sites d'étude, emprise des domaines de propagation et position des stations de mesure des vagues

Comparaison entre le modèle EC interpolé et l'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 de Saint-Ulric, interpolation linéaire pour le site de Cap d'Espoir).

Comparaison entre le modèle EC propagé par SWAN et l'AWAC

La faible résolution spatiale du modèle EC ($0,06 \times 0,04^\circ$, $\approx 5 \times 5$ km) ne lui permet pas d'intégrer l'effet des méso reliefs et des microreliefs 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 de 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 emploie toutefois 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 à 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, Neumeier et Jacob, 2012) a démontré une tendance du modèle EC à surévaluer linéairement les vagues dans le Golfe d'un facteur de 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 de 0,75.

On ne considérera, dans le présent document, que les résultats de propagation de SWAN forcé par les conditions aux limites pondérées avec un facteur de 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 leur propagation dans un champ de glace, conçu 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.

En conséquence, trois comparaisons statistiques sont réalisées :

- 1) Les données issues du modèle EC sont comparées à celles des AWAC (données expérimentales), période de résidence de la glace de mer incluse (tableau 1);
- 2) Les données issues du modèle EC sont comparées à celles des 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 SCG (tableau 1);
- 3) Les données issues du modèle EC sont propagées par SWAN jusqu'aux sites des AWAC avant d'être comparées aux données des AWAC. SWAN ne tenant pas compte de la glace, la période de résidence de la glace de mer est exclue (Tableau 5).

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

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

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 couleurs. 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 à 10 % des plus grandes hauteurs de vagues mesurées (par exemple : Figure 40). Ces grandes vagues sont indiquées en rouge et 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} mesurées de la série de données 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 semblable 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 aux trois sites : tous les événements de vagues moyennes ou fortes sont représentés, sans déphasage important.

Comparaison entre le modèle EC interpolé et l'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 – SI et Cap d'Espoir – 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 de 0,12 m et de 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 de 1,2 à 1,3 relativement aux valeurs mesurées.

L'erreur absolue moyenne [2] est relativement élevée, soit entre 0,26 m (SI) et 0,34 m (CPE). La RMSE [3] est également très élevée, supérieure d'un facteur

de 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), la $RMSE_s$ [4], liée à la tendance à la surestimation linéaire du modèle, n'étant que de 0,16 m pour SI et de 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 (R^2 [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 ($R^2 = 0,615$) et la relation linéaire entre les deux séries n'explique pas la totalité de la variance. L'erreur absolue moyenne et la RMSE 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 forte dispersion 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 se sont produits durant le temps de résidence de la glace de mer. Ils sont probablement dus à une erreur ou à une 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 glace.

Comparaison entre le modèle EC interpolé et l'AWAC, période d'englacement exclue

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 de la glace de mer 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 hausse du coefficient directeur des droites de régression ([7a]; SI : 1,29; CPE : 1,36), qui s'adaptent davantage à la géométrie des nuages de points, mais qui 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 densité 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 de 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 de 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, ce qui suggère 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 entre le modèle EC propagé par SWAN et l'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, Neumeier et Jacob (2012). Nous emboîtons un modèle de vagues (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 vagues par le vent de GEM à 10 m plutôt qu'à 40 m.

Pour les sites du Golfe, les biais moyens [1] sont réduits 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 valeurs (R^2 [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 à une légère sous-évaluation ne touche que 2 classes sur les 14 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 de $RMSE_s$ [4], qui devient inférieure à 0,05 m pour les deux sites. La $RMSE_u$ [5] diminue, quant à elle, seulement de 20 à 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 bons à très bons.

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 montrent 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 $H_{m0} > 2,5$ m, cette sous-évaluation est moins marquée.

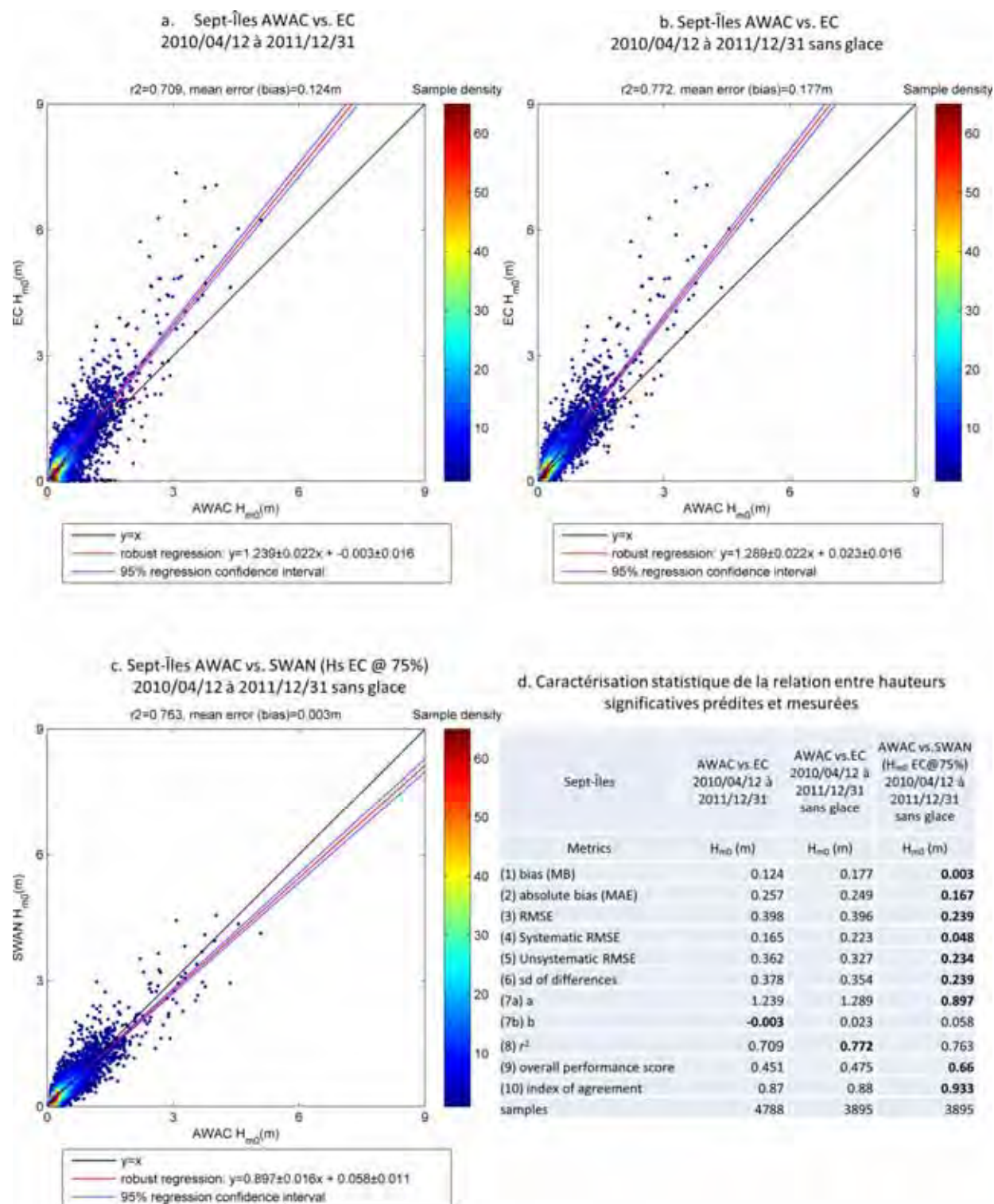


Figure 39 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

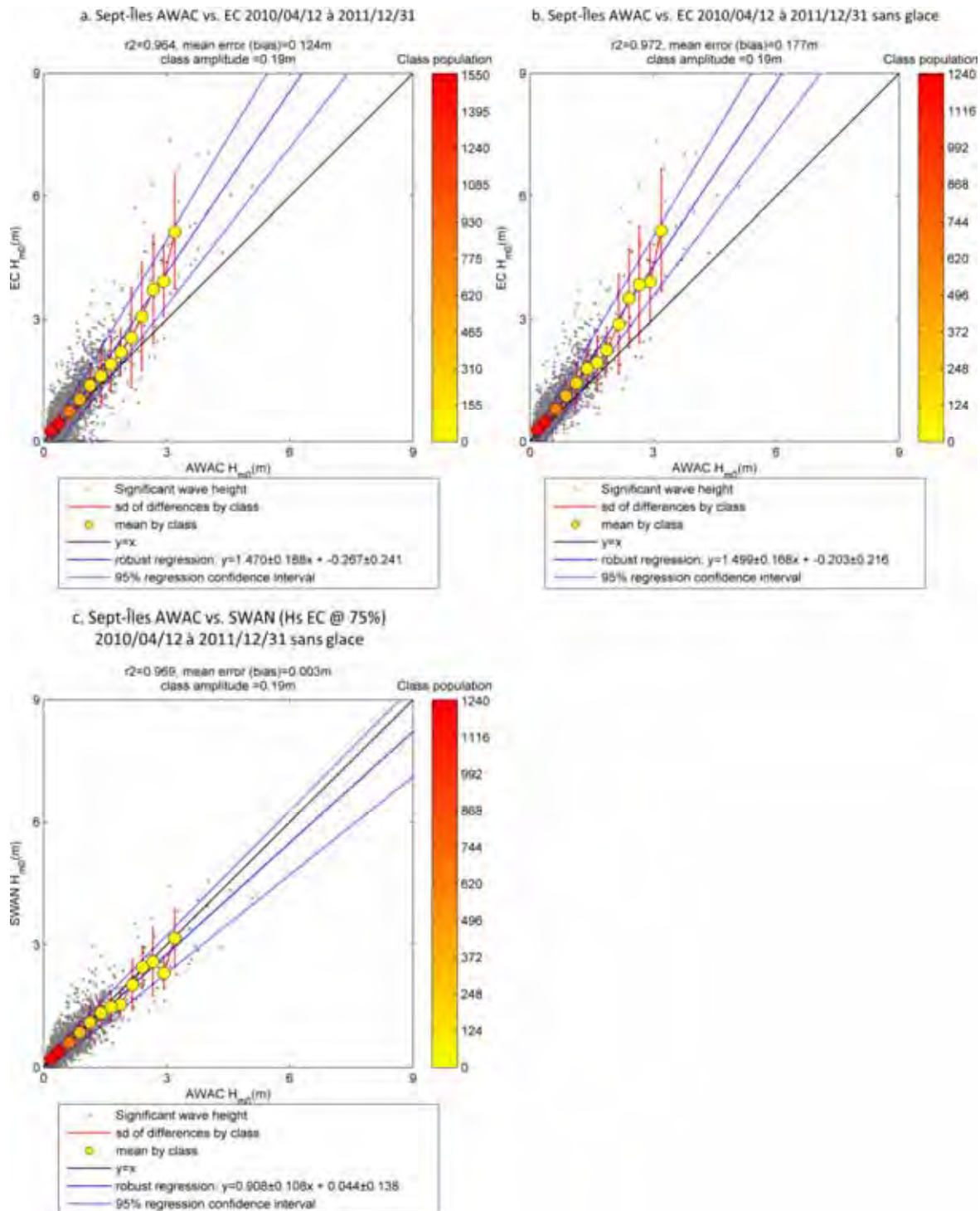


Figure 40 Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

MODÉLISATION DU RÉGIME DES VAGUES DU GOLFE ET DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT POUR
L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES CÔTIÈRES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

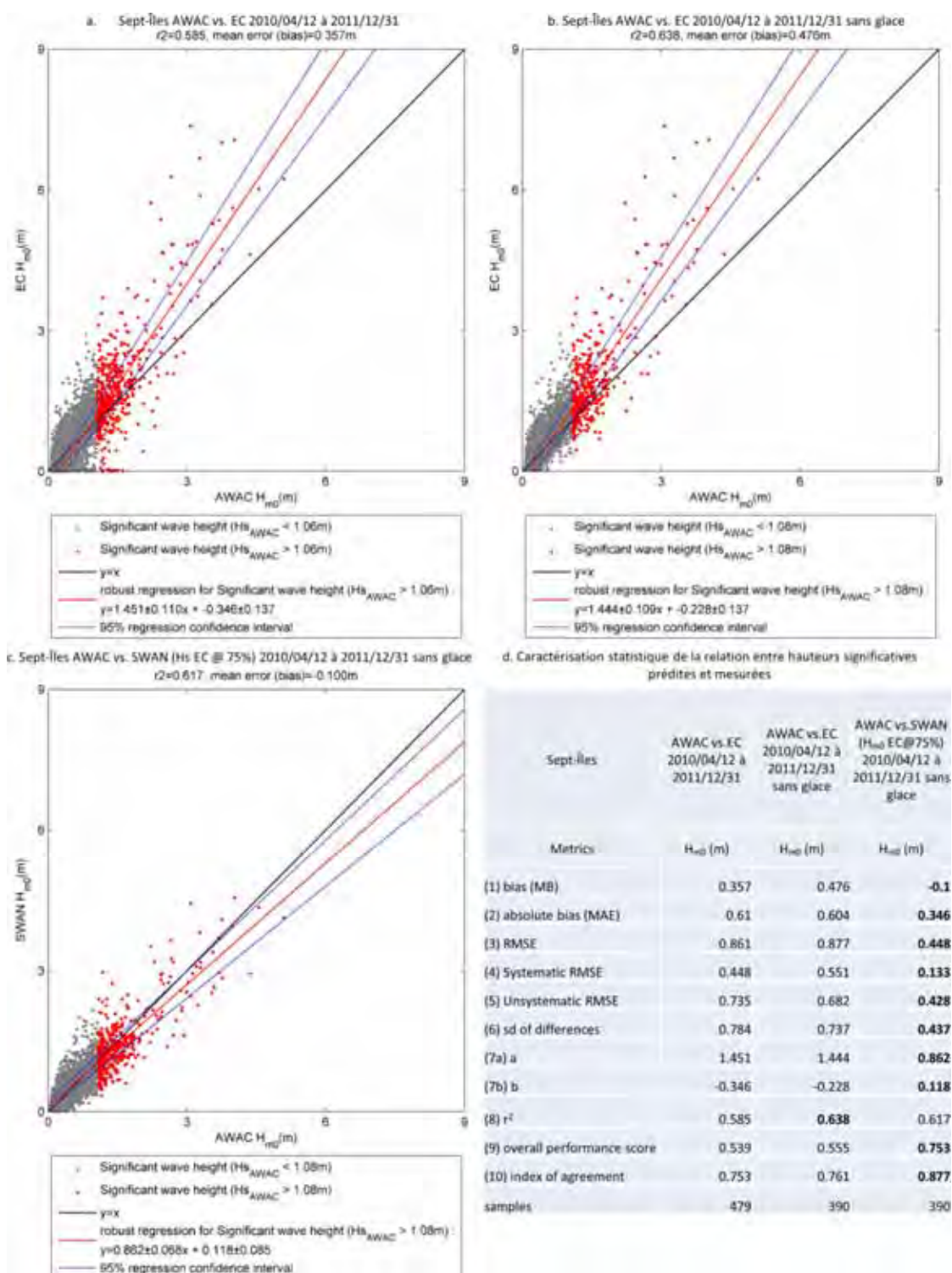


Figure 41 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre 10 % des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

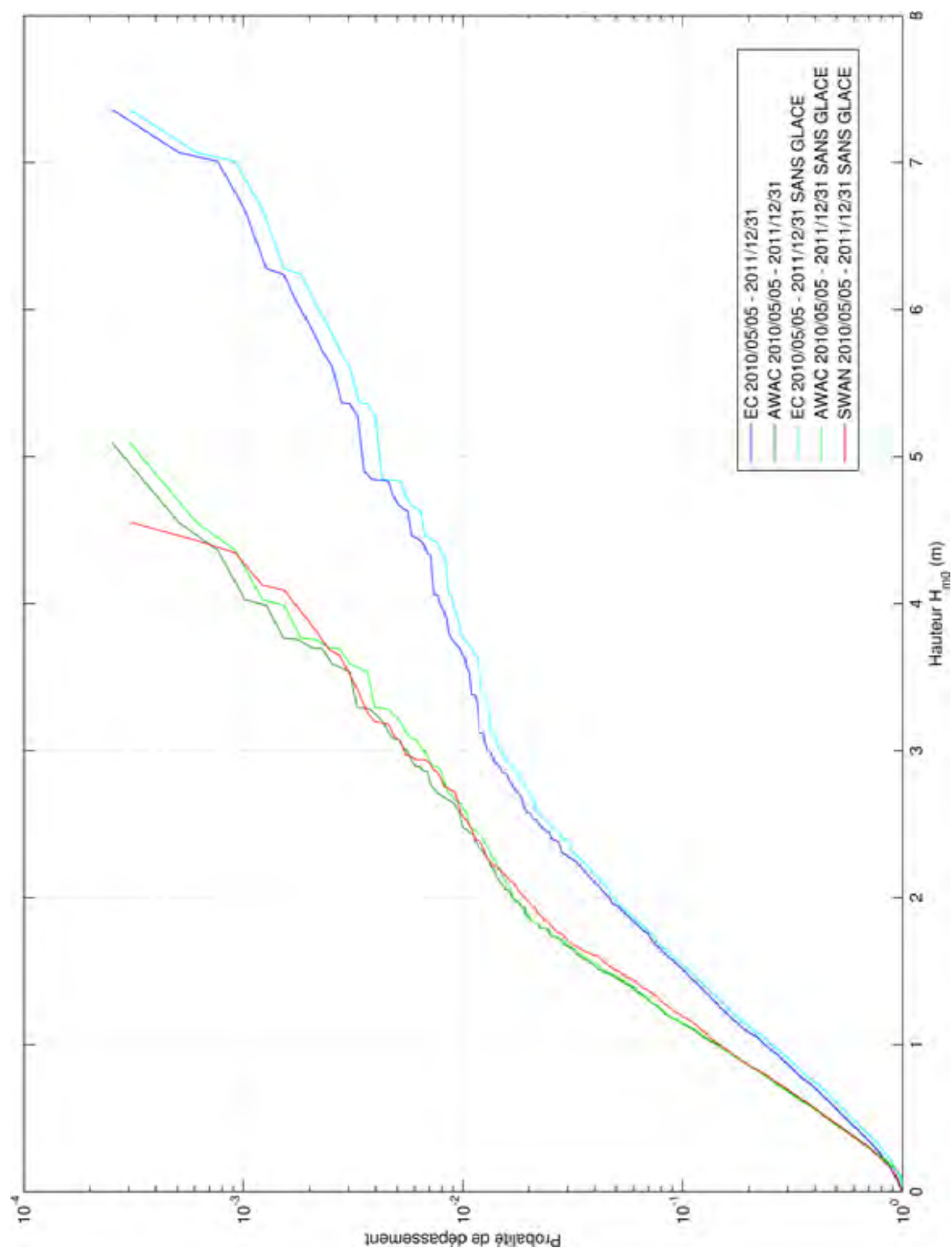


Figure 42 Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue

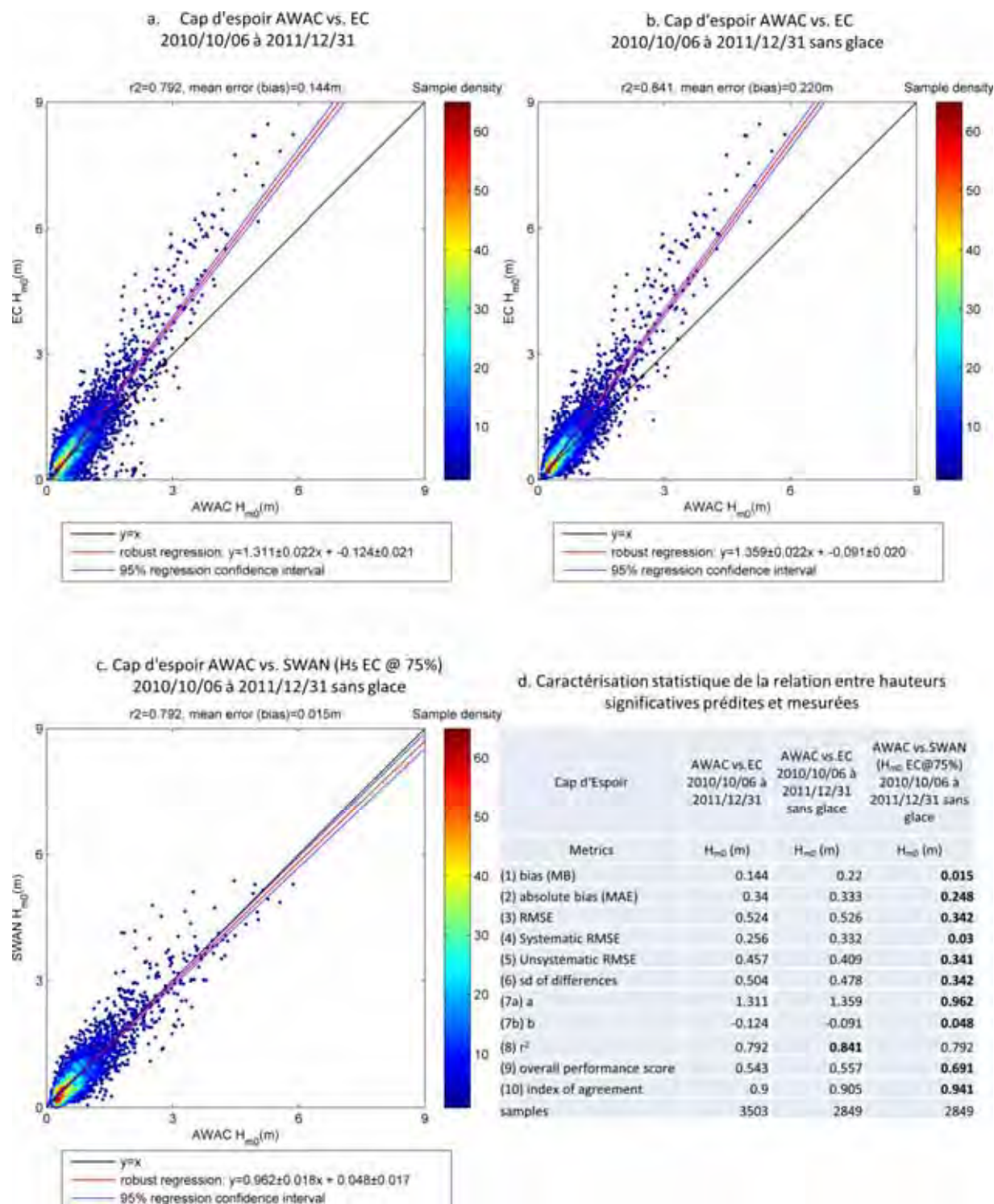


Figure 43 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011

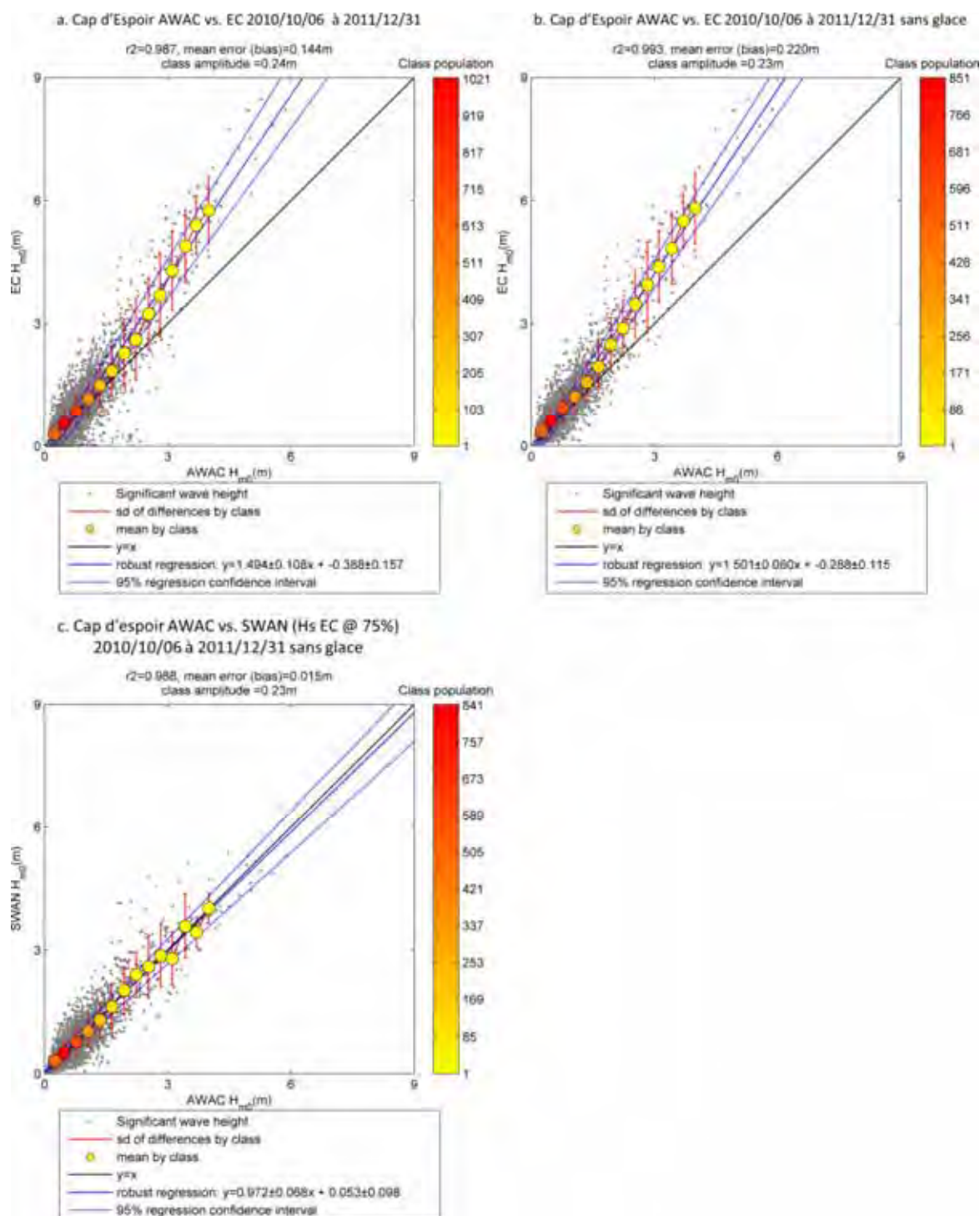


Figure 44 Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

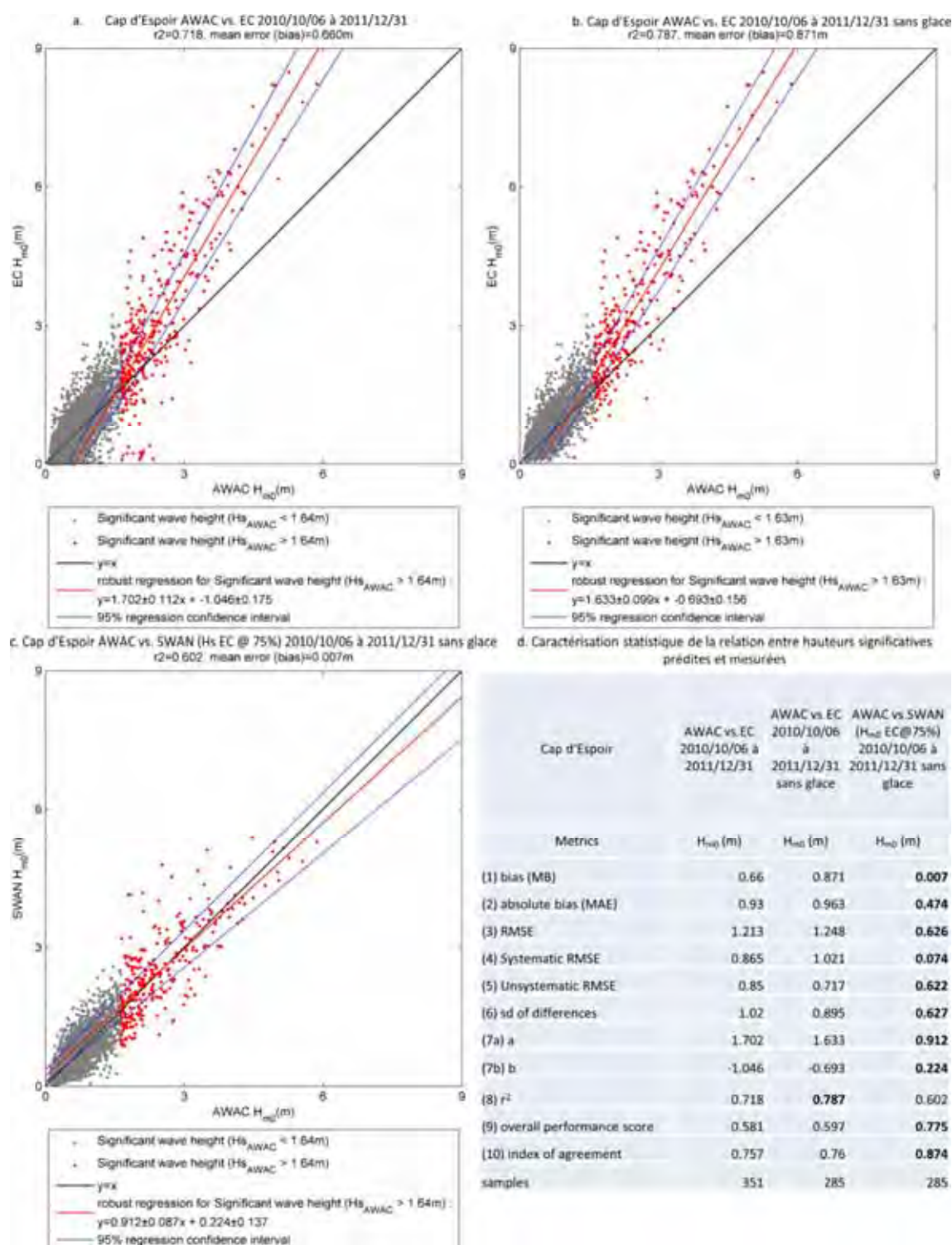


Figure 45 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre 10 % des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011

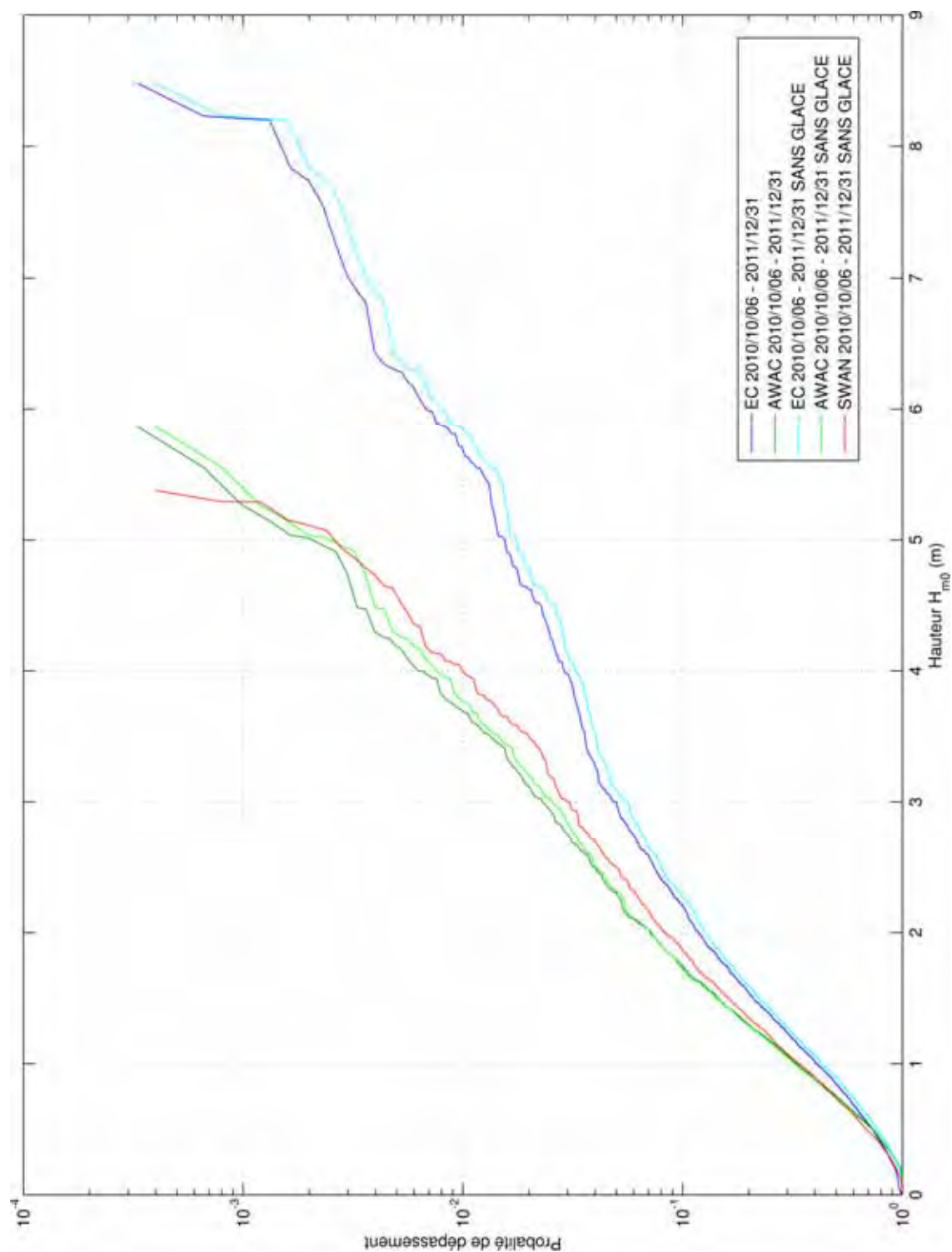


Figure 46 Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue

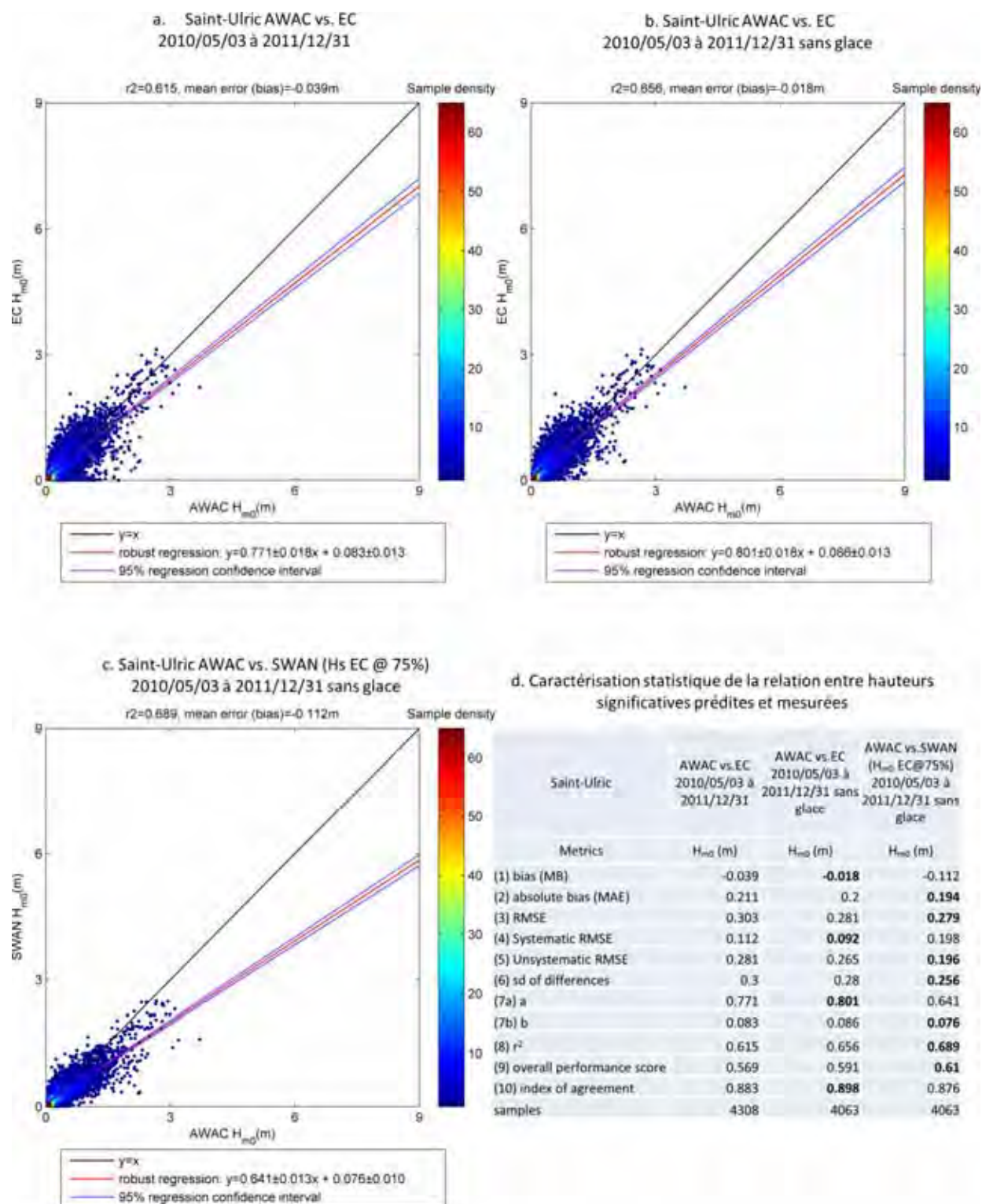


Figure 47 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

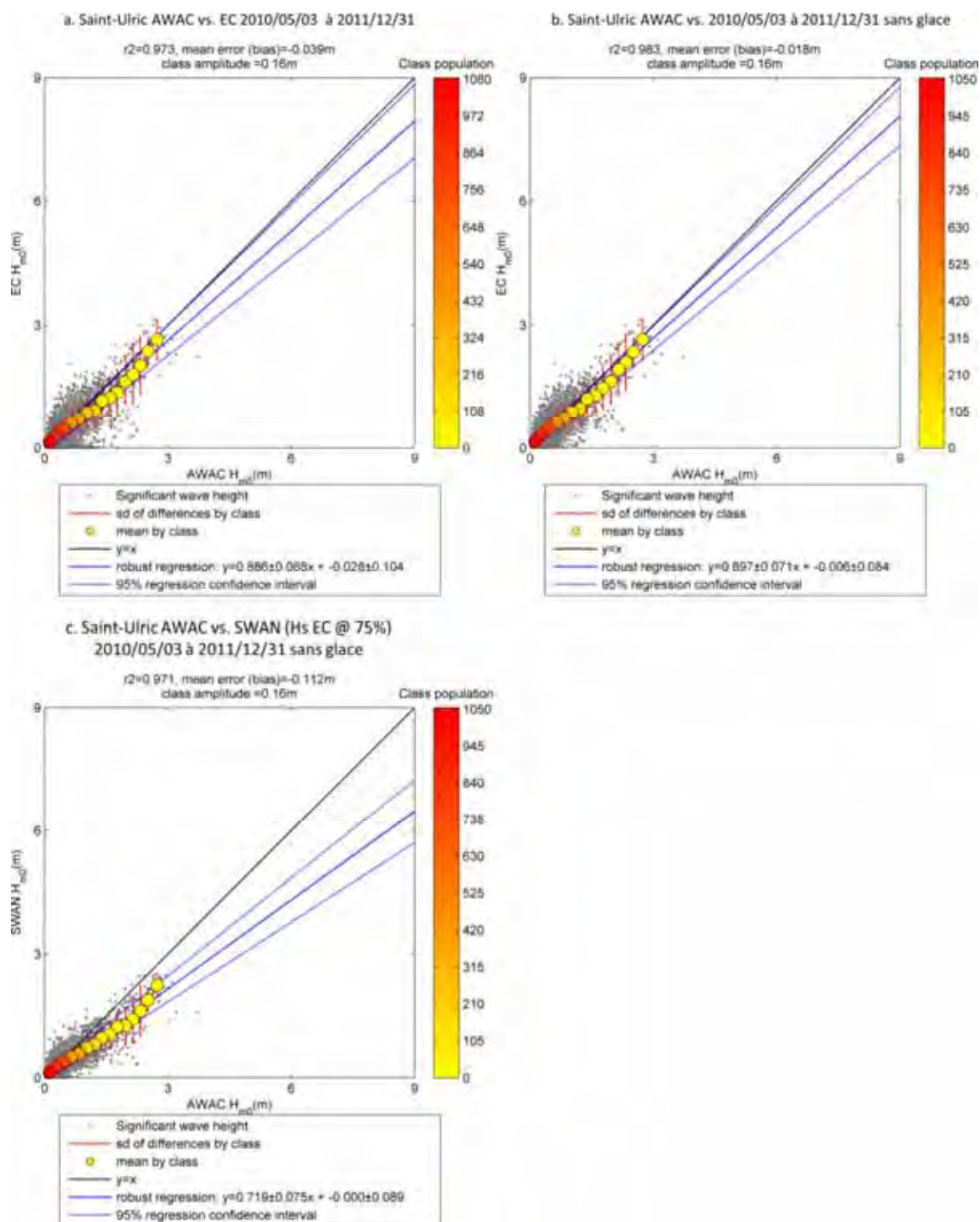


Figure 48 Population et valeur moyenne des classes de H_{m0} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

MODÉLISATION DU RÉGIME DES VAGUES DU GOLFE ET DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT POUR
L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES CÔTIÈRES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

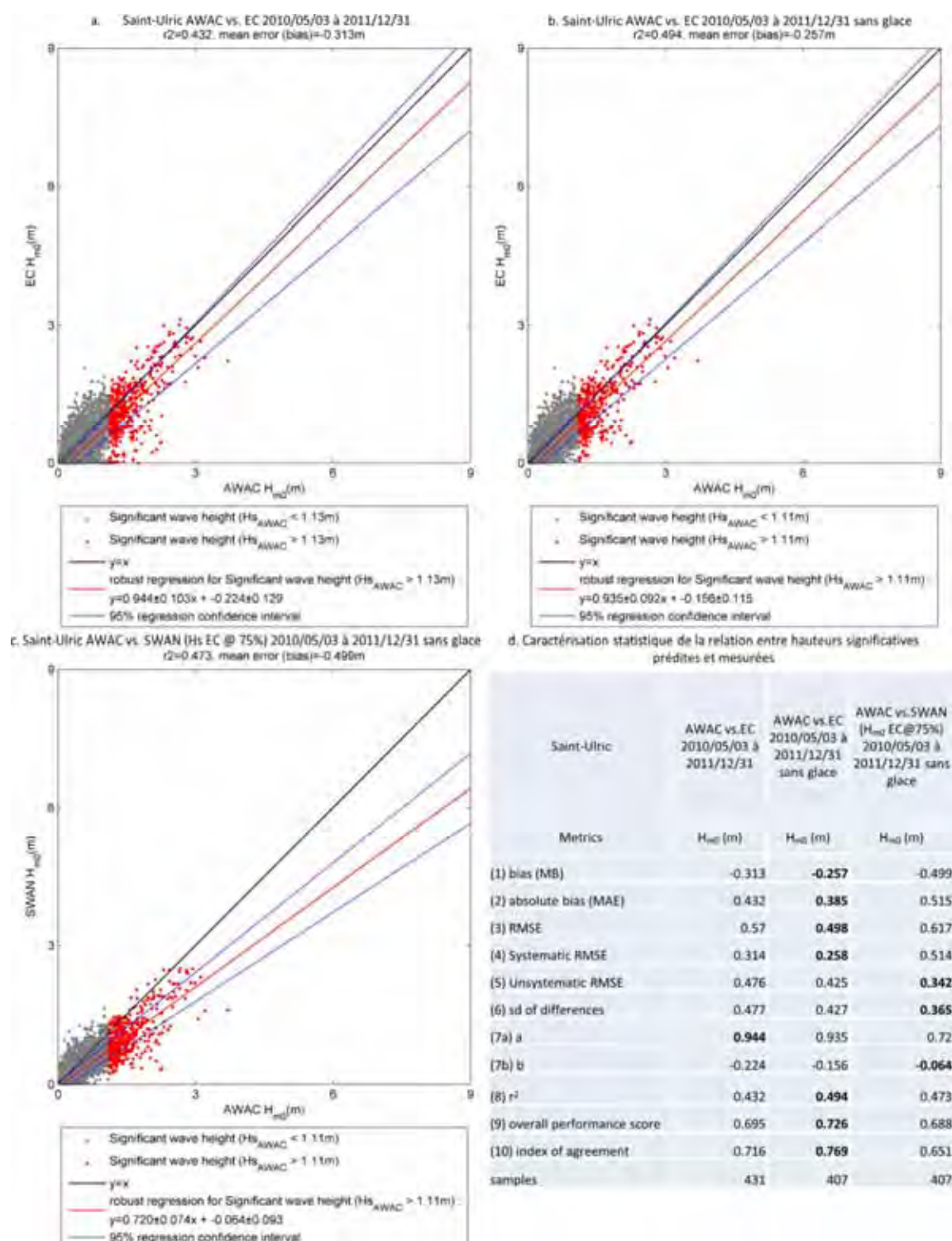


Figure 49 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre 10 % des plus hautes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

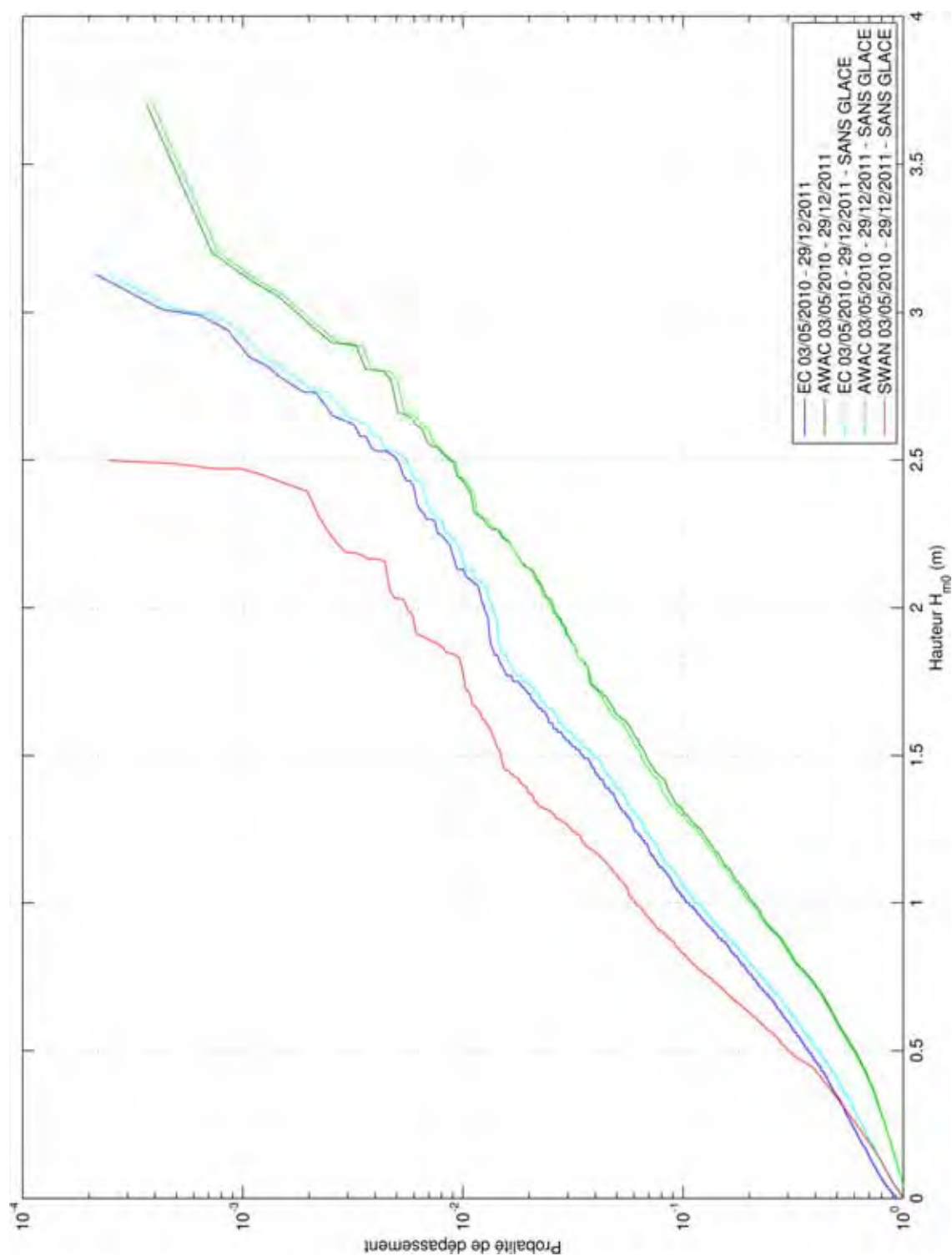


Figure 50 Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vagues pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse et exclue

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, mais en excluant les périodes avec de la glace, c'est-à-dire quand 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 une surévaluation des valeurs mesurées de 29 % (Sept-Îles) et de 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, d'une manière générale, les erreurs du modèle 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 mésoreliefs et microreliefs bathymétriques influençant la propagation et la distribution de l'énergie des vagues en domaine côtier;
- Le choix des profondeurs attribuées à chacune des tuiles 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 emboîtant un modèle vent-vagues 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. La résolution spatiale de ce modèle est de 200×200 m et il couvre 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. Cependant, tout comme le modèle EC, SWAN utilise les forçages de courants ambiants et de niveaux d'eau issus du MOR du golfe du Saint-Laurent. Les résultats non présentés (cf. Lambert, Neumeier et Jacob, 2012) issus de cette première série de propagation ramènent la tendance linéaire à une sous-évaluation de 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 du modèle EC et 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 de 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 les valeurs 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 de ceux 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 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 entre le modèle EC interpolé et l'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 est faible, voire inexistante, ce qui est confirmé par les coefficients de détermination (R^2 [8]; SI : 0,25; CPE : 0,51; STU : 0,34).

Pour SI et CPE, les biais moyens [1], respectivement de 0,66 s et de 0,77 s, sont très grands, ce qui indique 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 elle est influencée par la grande densité des périodes courtes (Figure 54). L'erreur absolue moyenne [2] est également grande, comprise entre 0,9 s (SI) et 1 s (CPE), tout comme la RMSE [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 la RMSE systématique [4], liée à la tendance à la surestimation du modèle, atteint également des valeurs élevées : 0,68 s pour SI et 0,78 s pour CPE. Cela confirme que la part majeure de la variance n'est pas représentée par la droite de régression. La très grande dispersion 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, soit d'un facteur de 1,4 pour SI et de 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, qui correspond à un facteur de 1,25.

Comparaison entre le modèle EC interpolé et l'AWAC, période d'englacement exclue

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 de la glace de mer à l'hiver 2010-2011 (cf. Tableau 5).

Dans le Golfe, les biais moyens [1] stagnent (SI : 0,6 s; CPE : 0,76 s), ce qui confirme la tendance à la surestimation 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 l'indiquent l'augmentation des corrélations entre valeurs prédites et mesurées (R^2 [8]; SI : 0,385; CPE : 0,616) et une réduction de l'écart-type de l'erreur [6]. L'erreur absolue moyenne [2] et la RMSE [3] diminuent elles aussi faiblement pour les deux sites. Ces diminutions s'expliquent par une réduction de l'erreur aléatoire, comme l'indique la $RMSE_u$ des deux sites (< 1 s). La part d'erreur liée à la surévaluation reste la même, avec des valeurs de $RMSE_s$ qui restent très proches des valeurs précédemment obtenues.

La distribution des nuages de points reste identique : les périodes courtes mesurées (de 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 SI, le graphe de dispersion par classes (Figure 52) met en évidence une surévaluation qui semble constante pour toutes les classes (+0,8 s). La dispersion augmente néanmoins plus fortement qu'à CPE (cf. ci-dessous) : elle atteint 1 s pour la classe 5 s et 2,5 s pour la classe 6,5 s. Les vagues les plus

longues présentent donc une très forte dispersion, certaines étant fortement surévaluées et d'autres, fortement sous-évaluées.

Par ailleurs, 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 ($4,5 \text{ s} < T_{02} < 11 \text{ s}$) 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 SI peut atteindre 50 % pour les vagues les plus hautes.

Pour CPE, le graphe de dispersion par classes (Figure 55) met en évidence une tendance non linéaire : les vagues les plus courtes ($2,5 \text{ s} < T_{02} < 3,5 \text{ s}$) présentent une surévaluation moyenne de 0,5 s, cette valeur diminuant pour les périodes intermédiaires ($3,5 \text{ s} < T_{02} < 5 \text{ s}$, $\sim 0,3 \text{ s}$). La surévaluation augmente ensuite progressivement pour les classes de vagues les plus longues ($T_{02} > 5 \text{ s}$) 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 de 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 STU, 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 des dix pourcents des vagues les plus grandes (Figure 59) montre 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 entre le modèle EC propagé par SWAN et l'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, Neumeier et Jacob (2012). Nous emboîtons un modèle de vagues (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 vagues par le vent de GEM à 10 m plutôt qu'à 40 m.

Pour CPE, les biais moyens [1] sont réduits 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 diminution systématique, ce qu'illustre la $RMSE_s$, 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 absolue 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 déplace sous la droite 1:1, ce qui est caractéristique d'une sous-évaluation 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 effet similaire. Le biais moyen [1] devient négatif (-0,24 s). La tendance à la sous-évaluation s'accroît pour les vagues les plus courtes, dont le nuage présente une meilleure concentration que précédemment ([6]; dispersion de l'erreur autour de l'erreur moyenne : 0,75 s), mais se déplace sous la droite 1:1. La $RMSE_s$ 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 à la surévaluation ni à la sous-évaluation.

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 du 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 de celui-ci demeure faible, avec des scores qui peuvent être considérés comme mauvais pour SI ou moyens pour CPE et STU.

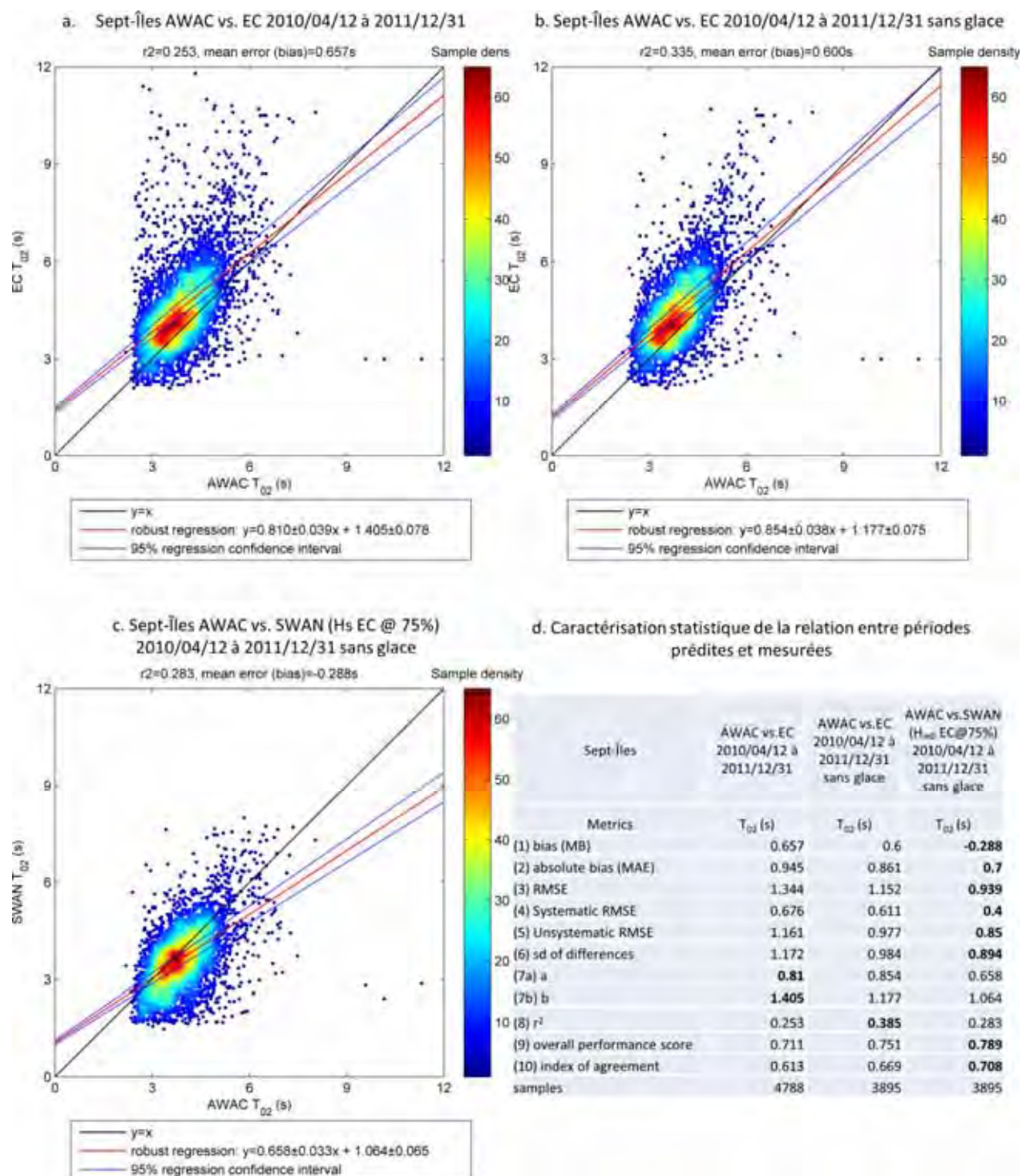


Figure 51 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

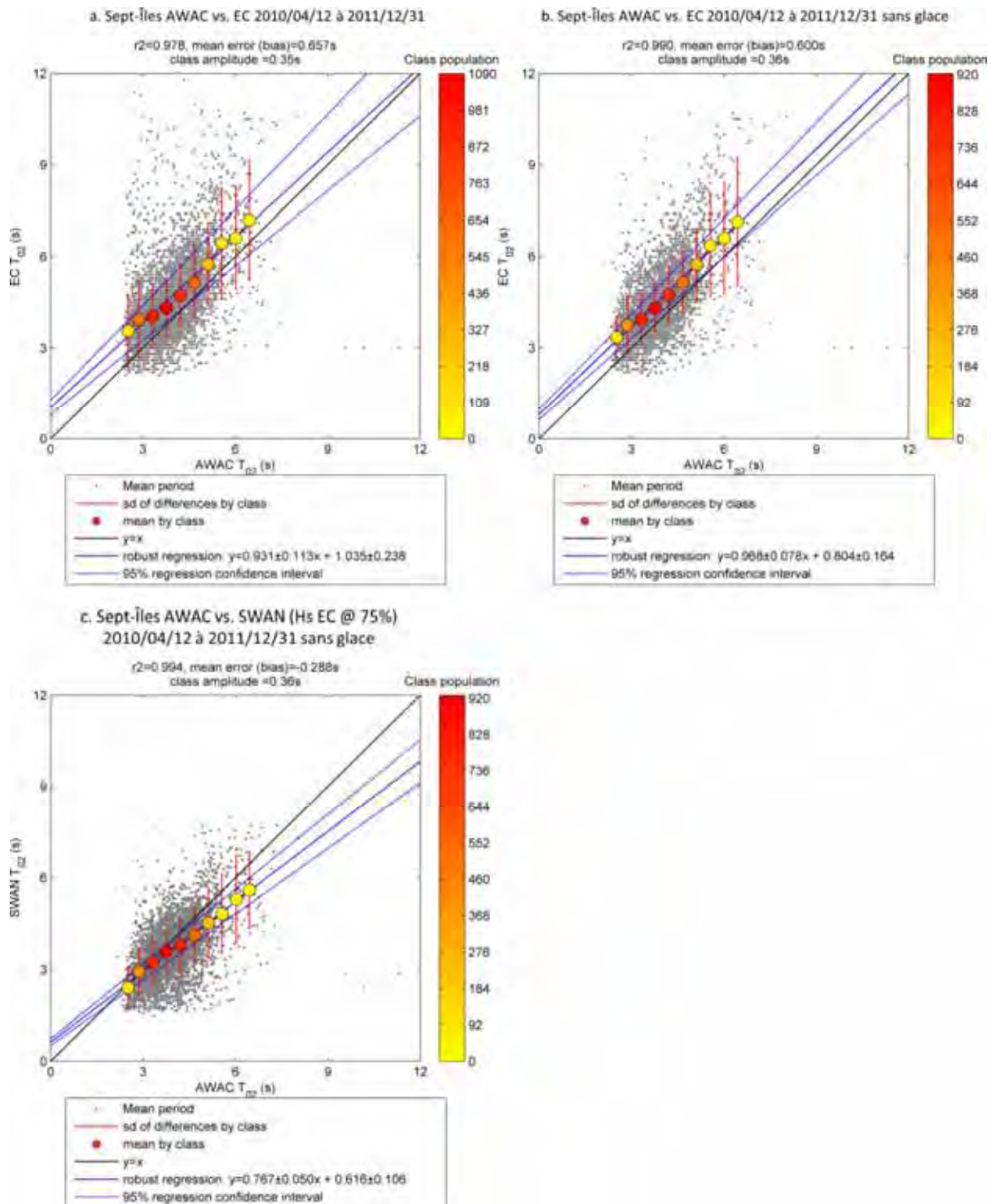


Figure 52 Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

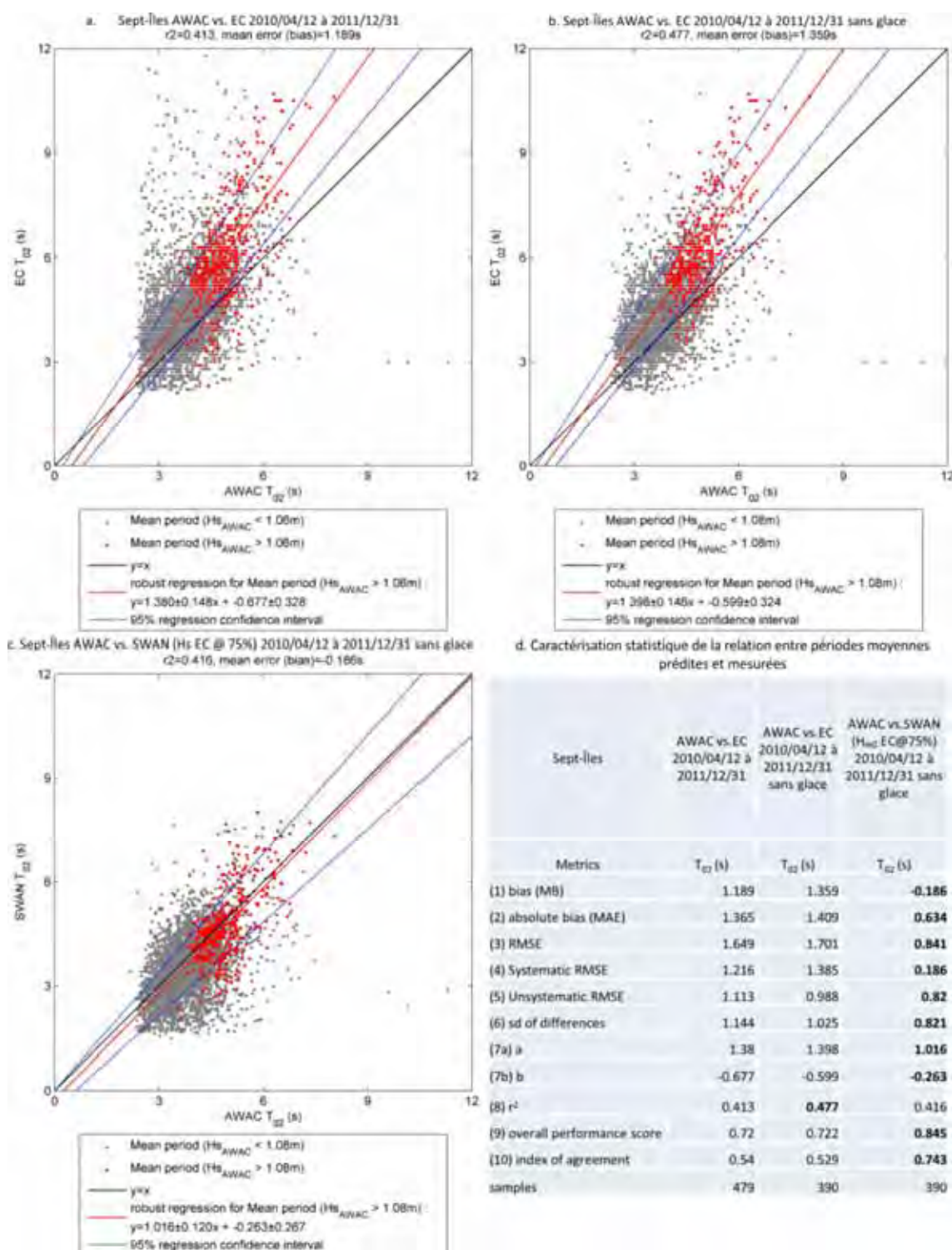


Figure 53 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant à 10 % des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

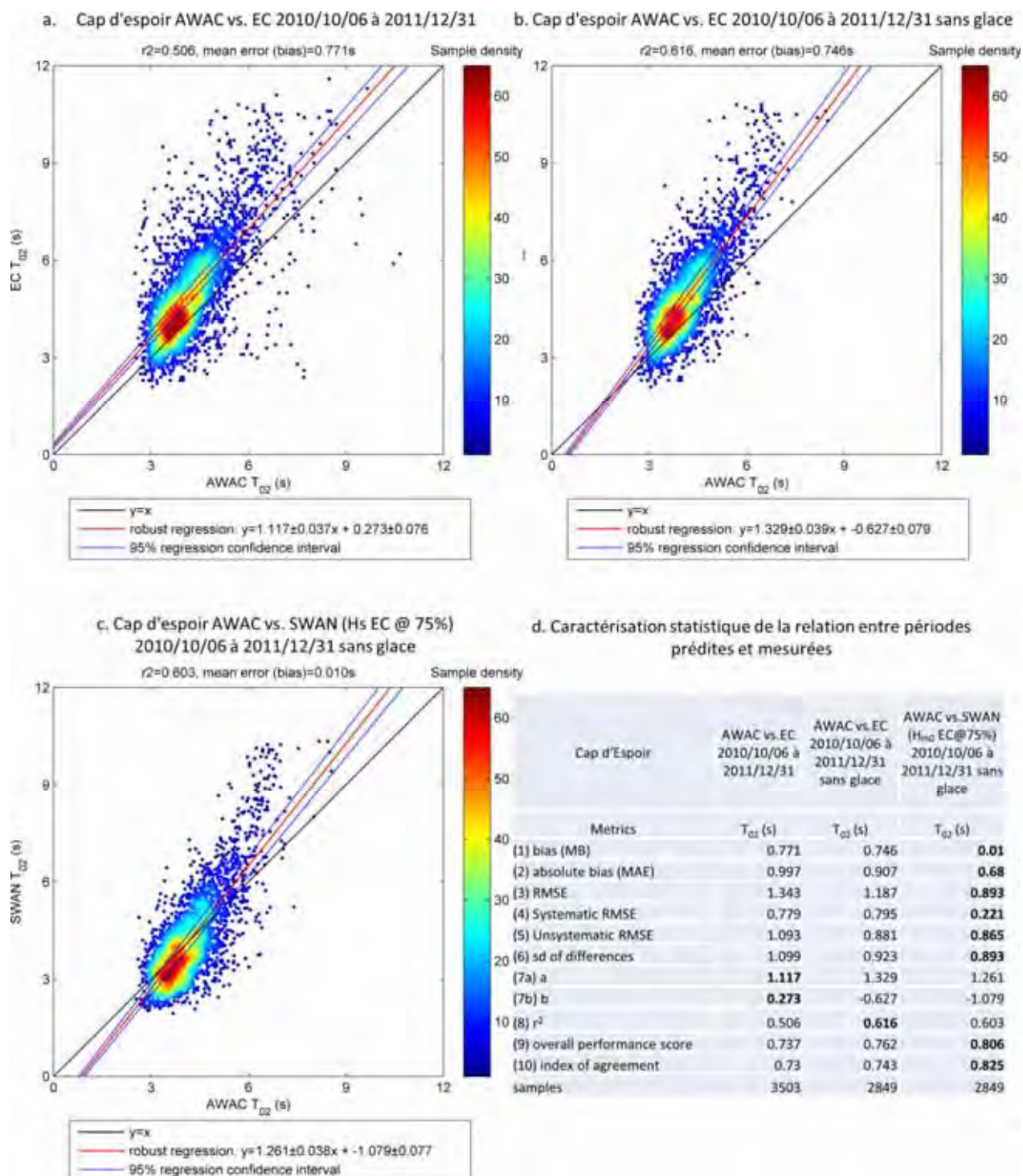


Figure 54 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011

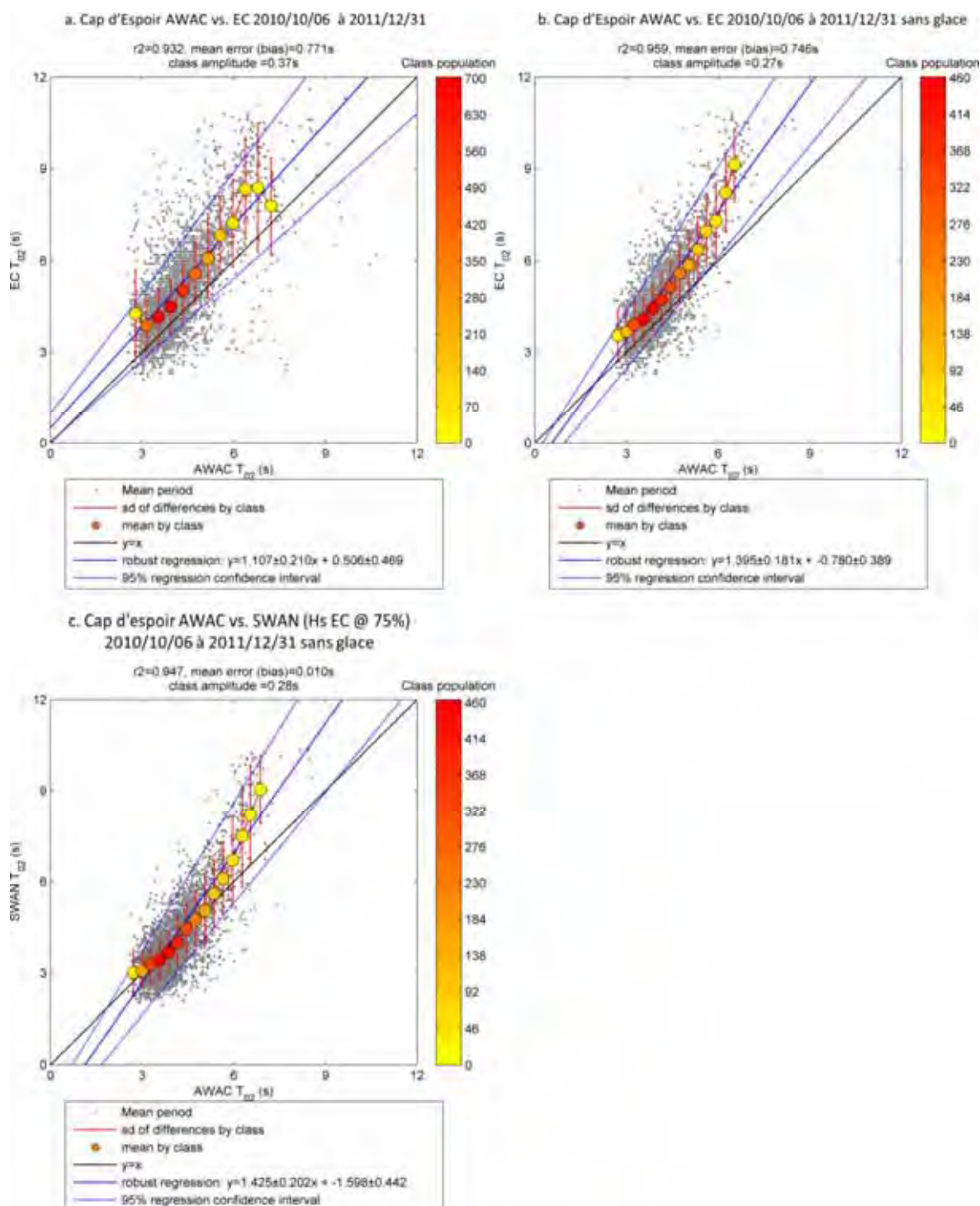


Figure 55 Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

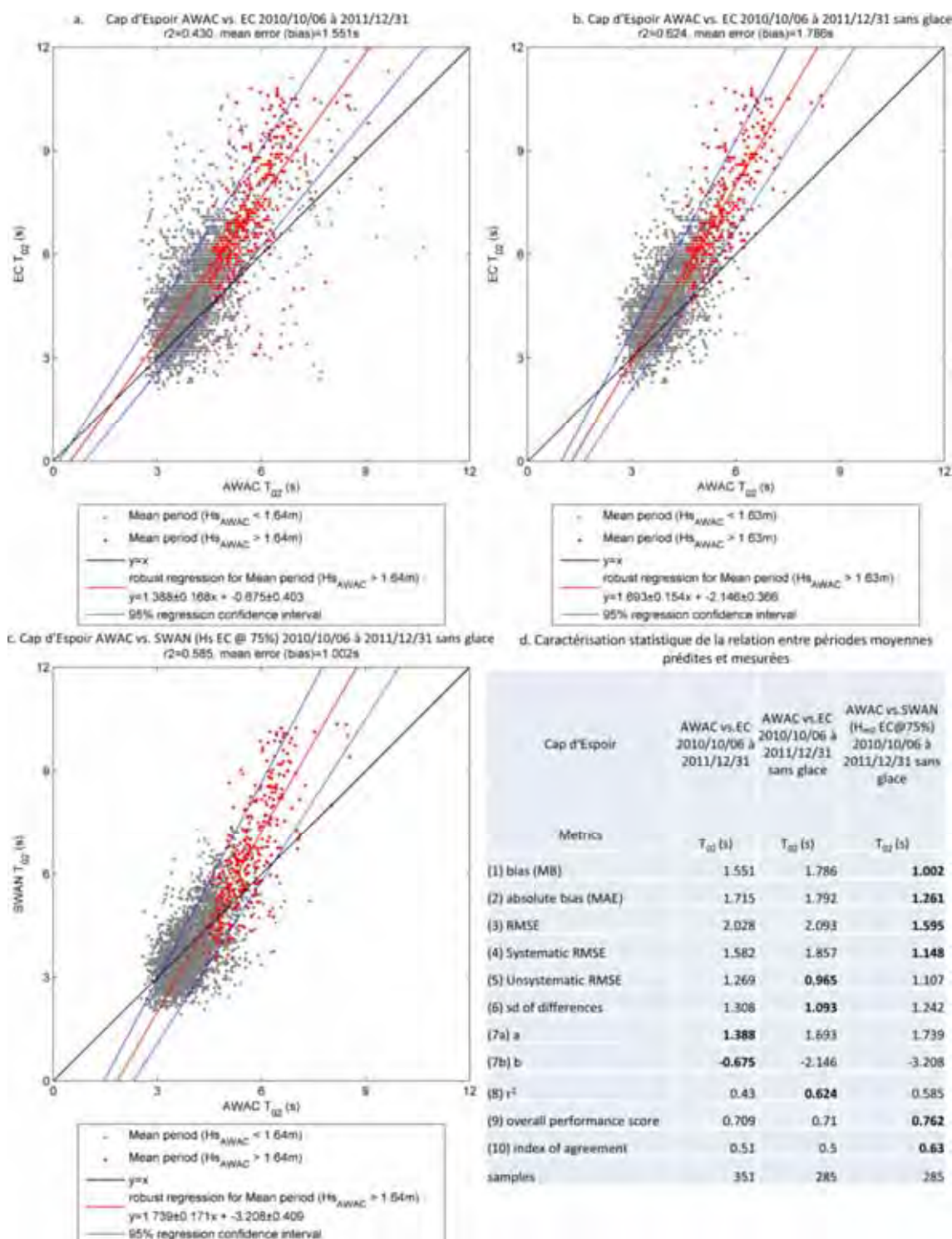


Figure 56 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant à 10 % des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011

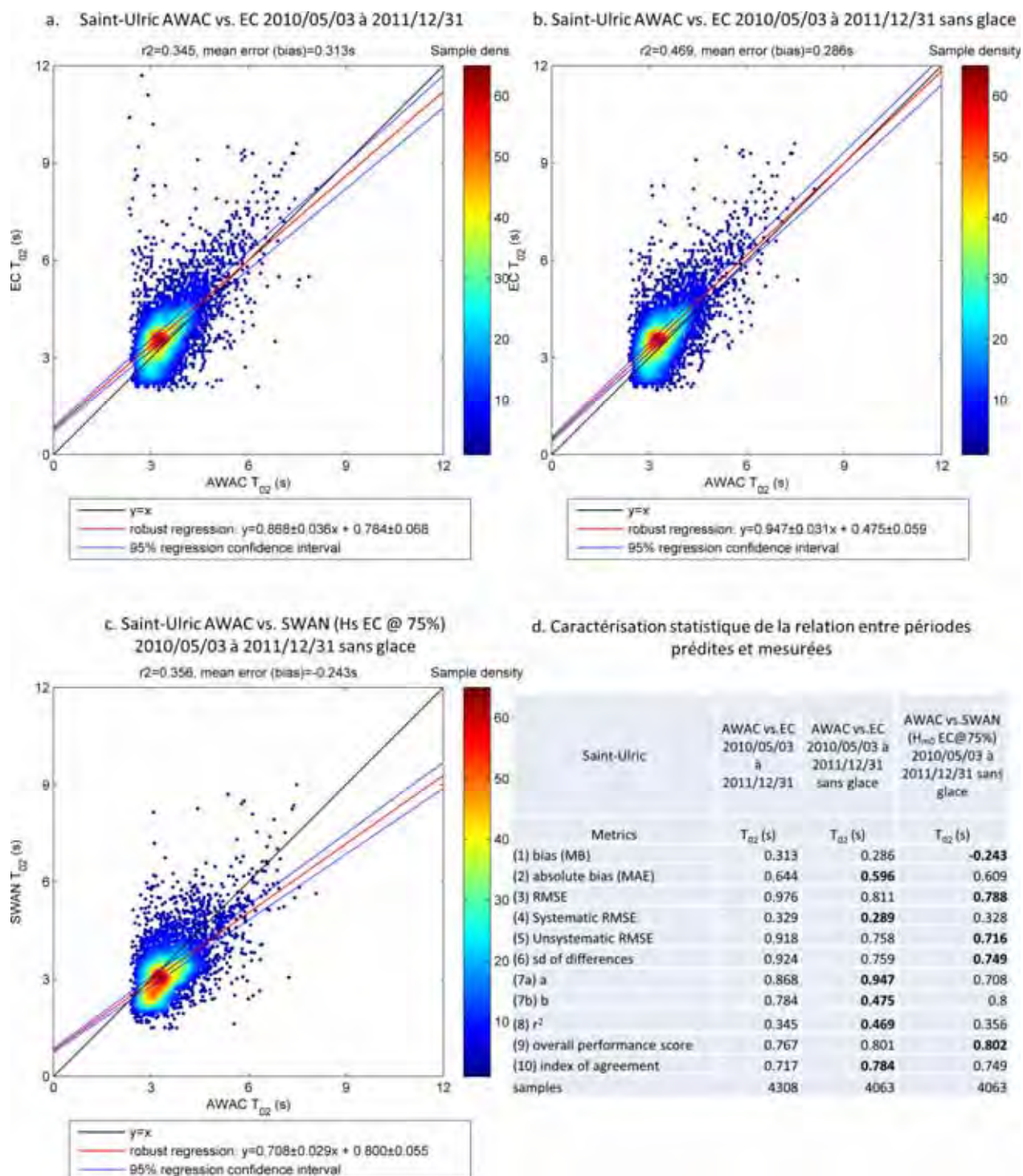


Figure 57 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

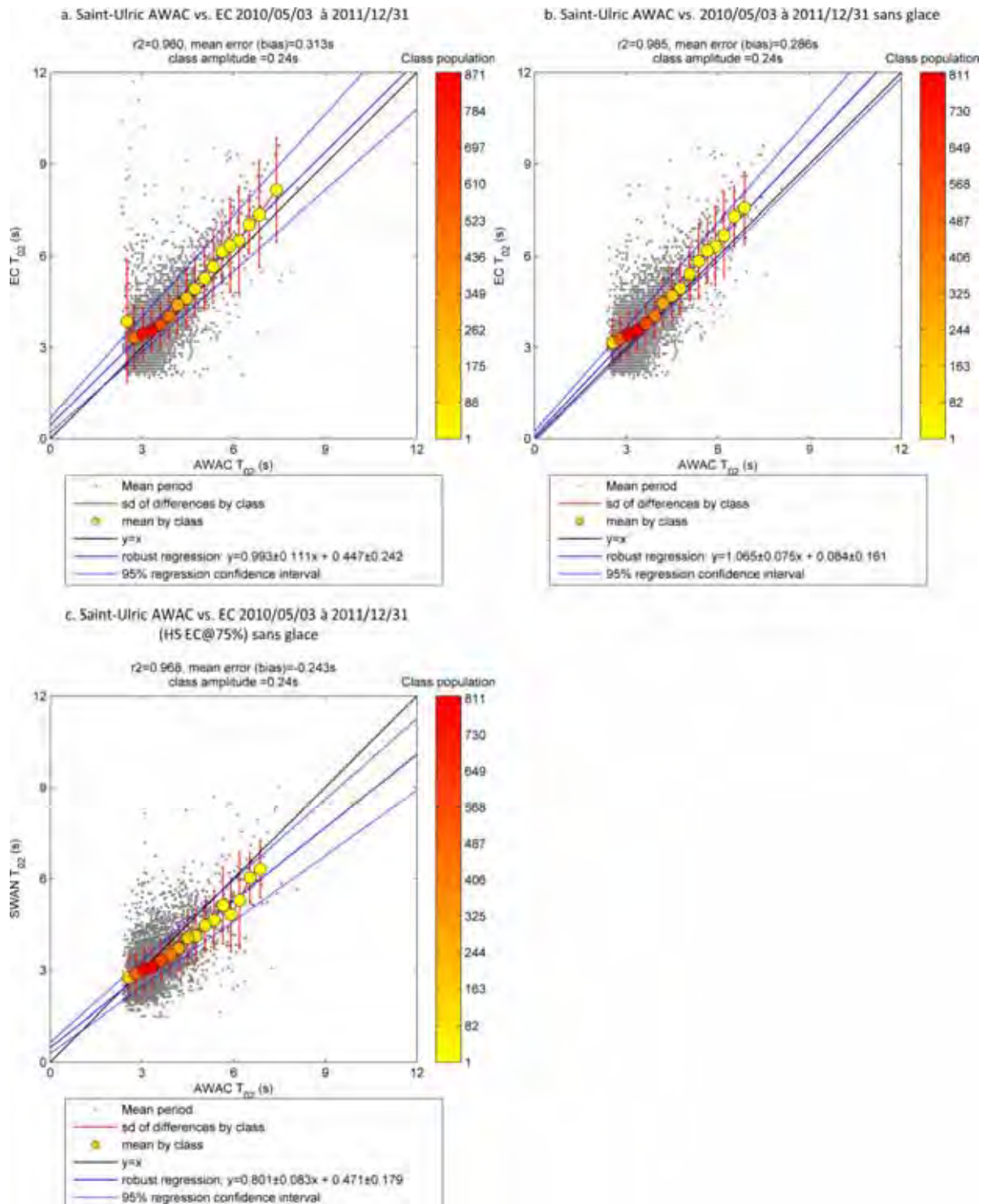


Figure 58 Population et valeur moyenne des classes de T_{02} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

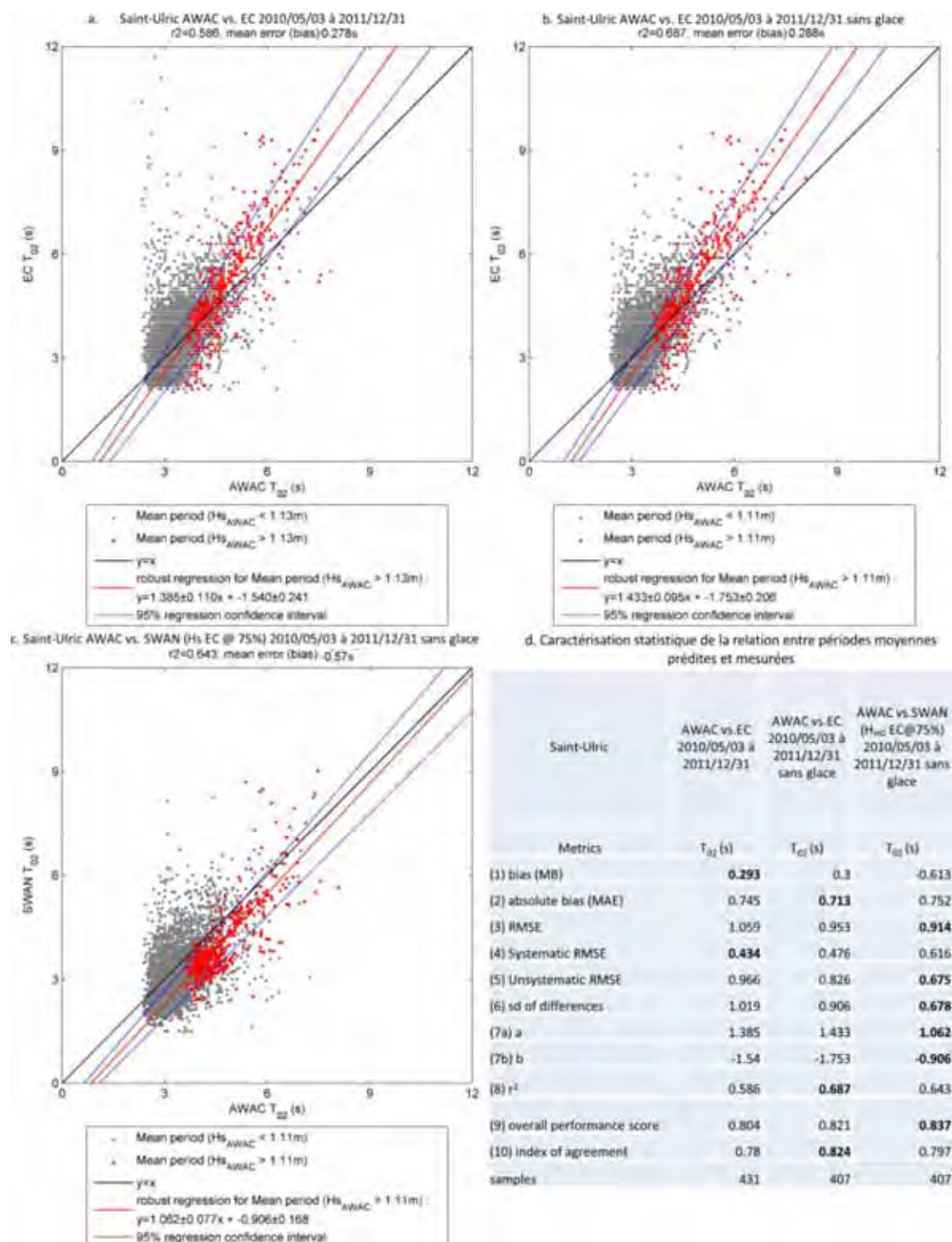


Figure 59 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les T_{02} correspondant à 10 % des plus grandes H_{m0} prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

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). Ce modèle montre 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 représentant 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 atténue légèrement la tendance à la sous-évaluation du modèle, sans modifier la différence de qualité entre les 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 à une légère sous-évaluation 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 ± 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 de ± 30 %) pour Sept-Îles et de 40 % (dispersion maximale de ± 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 semblable à celle du Golfe, mais 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 à 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} réduites à 75 % de leur valeur 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 ± 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 ni 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 ni de période.

5.1.4 Directions

La qualité de la prédiction des directions varie entre les trois sites.

Pour Sept-Îles, la comparaison des résultats du modèle EC avec les données expérimentales de l'AWAC témoigne d'une bonne sensibilité du modèle. En effet, la comparaison graphique des deux séries temporelles suggère une bonne corrélation entre les directions moyennes modélisées et mesurées. 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). L'erreur angulaire absolue moyenne [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, quant à eux, 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 surévaluation ou de sous-évaluation ne s'applique pas aux 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 EC avec les données expérimentales de l'AWAC montre une bonne sensibilité du modèle. En effet, la comparaison graphique des deux séries temporelles indique une corrélation satisfaisante entre les directions moyennes modélisées et mesurées. 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 deux mêmes directions dominantes. On observe par ailleurs un gain de précision, ce qui est confirmé par la concentration approximative [12], qui augmente légèrement (5,12), et par l'erreur angulaire absolue moyenne [11], qui diminue légèrement (19,34°). 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 avec les données expérimentales de l'AWAC témoigne d'une moins bonne sensibilité du modèle. En effet, 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°), qui sont les plus fréquentes. Cela est confirmé par la faible valeur de l'indice de concentration ([12]; 1,98). En conséquence, l'erreur angulaire absolue moyenne [11], qui est exprimée sur une plage de 0 à 180°, est élevée (37,12°). 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 du modèle EC et de la station AWAC, sans modification fondamentale.

La comparaison des résultats de SWAN forcé par les valeurs pondérées du modèle EC avec les données expérimentales de l'AWAC pour la période considérée est très proche de la comparaison précédente : la sensibilité du modèle est bonne, mais les séries sont peu corrélées. En effet, les deux séries temporelles présentent des écarts importants sur la quasi-totalité de la période. Le graphe de dispersion (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). L'erreur angulaire absolue moyenne [11], toujours élevée, diminue ([11]; 33,05°, soit une baisse de -5,1°). Le coefficient de corrélation

basé sur le sinus des valeurs augmente, quant à lui, 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 avec les données expérimentales de l'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. L'erreur angulaire absolue moyenne [11] est élevée ($36,76^\circ$) 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 du modèle EC et de la station AWAC, sans modification fondamentale.

La comparaison des résultats de SWAN forcé par les valeurs pondérées avec les données expérimentales de l'AWAC pour la période considérée montre toujours une bonne sensibilité du modèle. En effet, la comparaison graphique des deux séries temporelles suggère une corrélation satisfaisante entre les directions moyennes modélisées et mesurées. Le graphe de dispersion (Figure 66c) met en évidence une légère diminution de la dispersion, confirmée par la faible augmentation de la concentration approximative [12]. L'erreur angulaire absolue moyenne [11] diminue également légèrement ($26,93^\circ$).

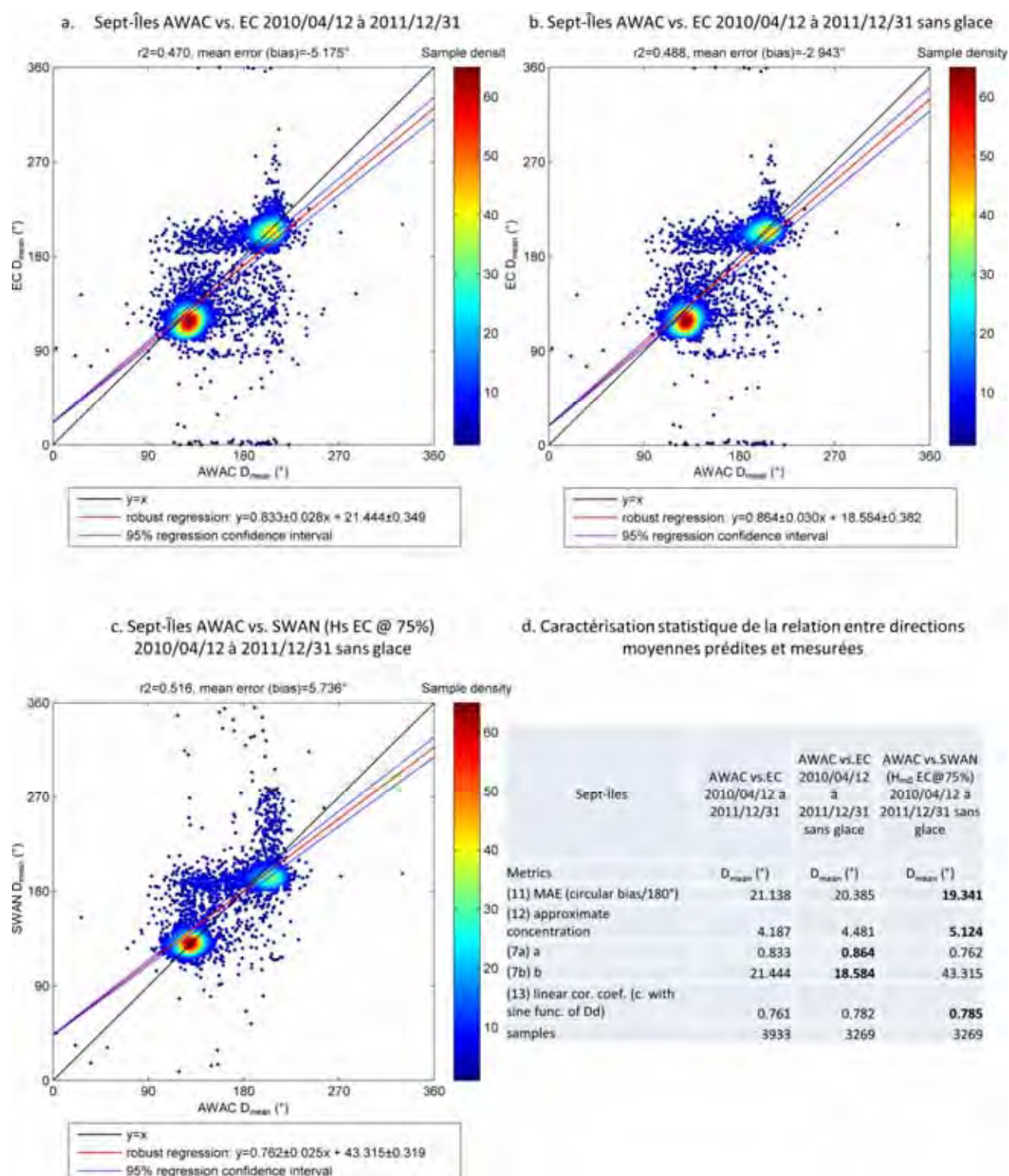


Figure 60 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les directions moyennes prédites et mesurées à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

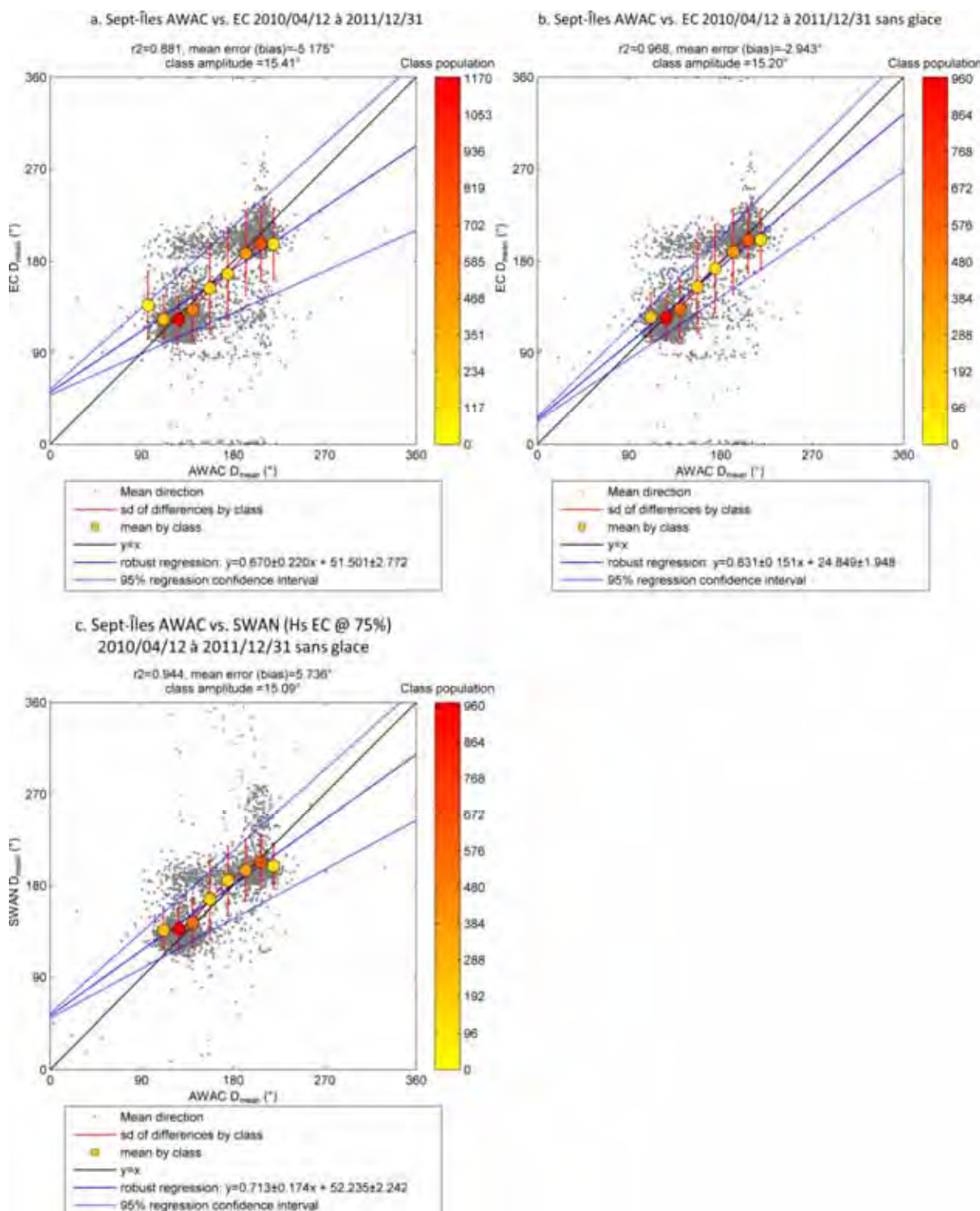


Figure 61 Population et valeur moyenne des classes de D_{mean} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

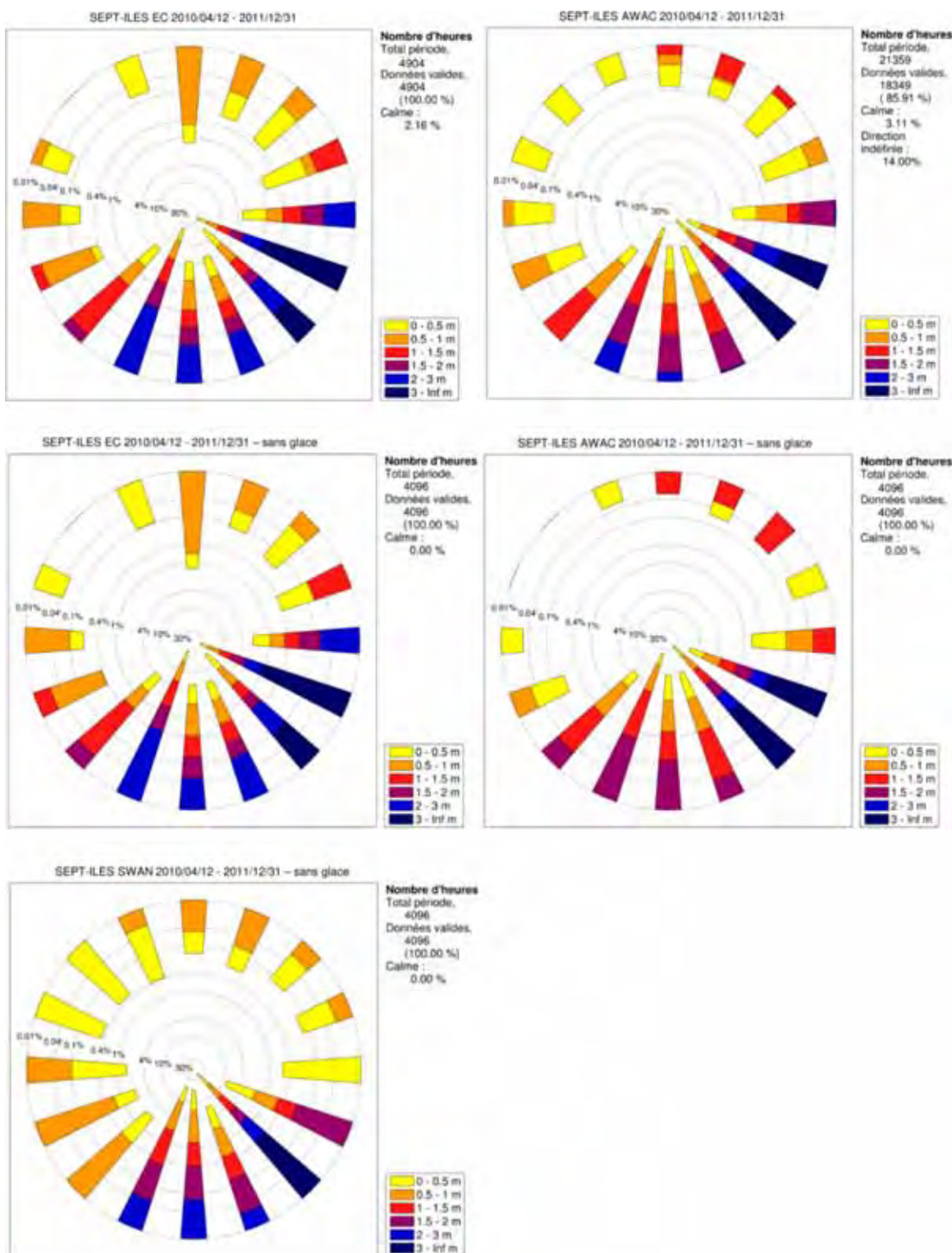


Figure 62 Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Sept-Îles

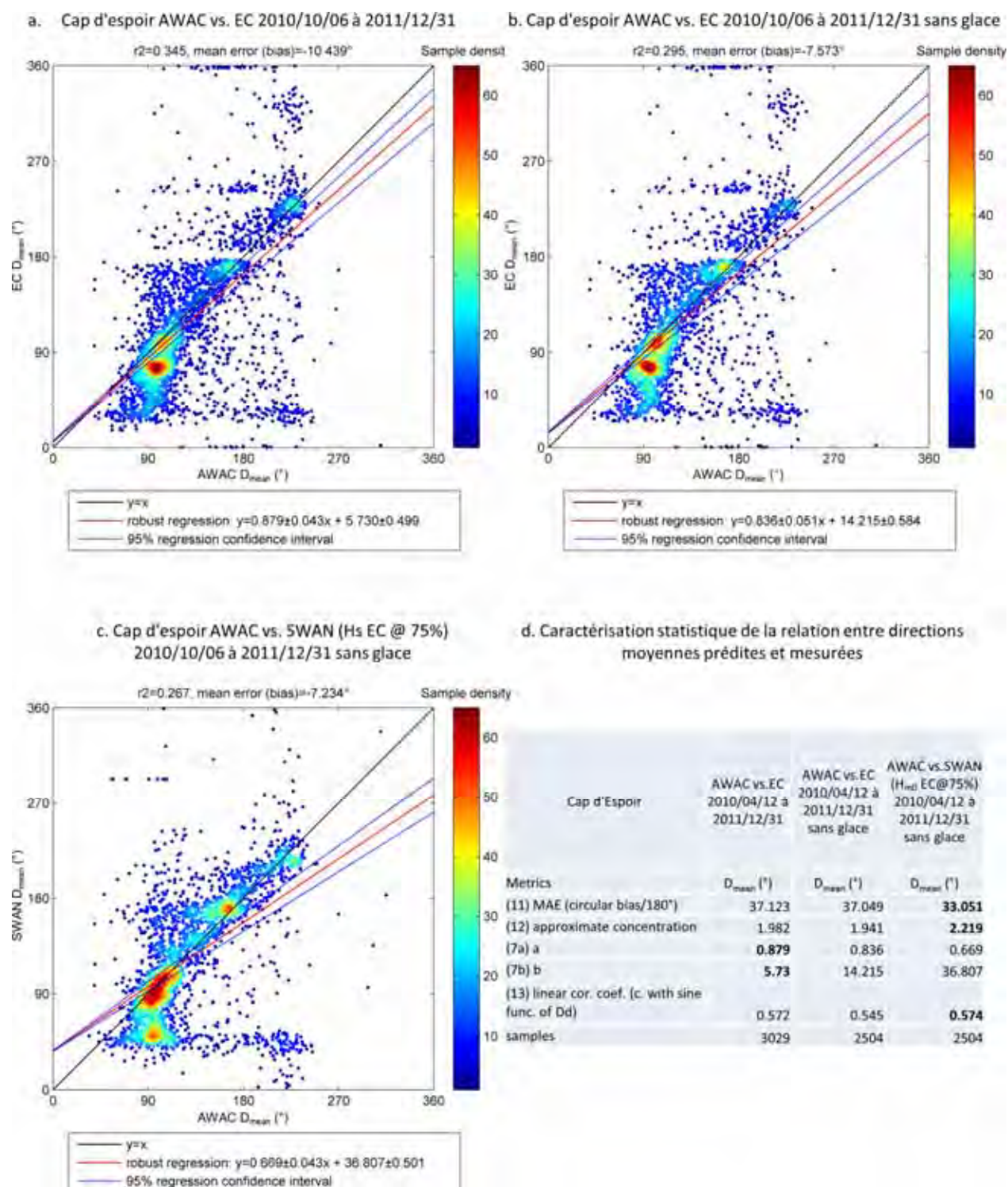


Figure 63 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les directions moyennes prédites et mesurées à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011

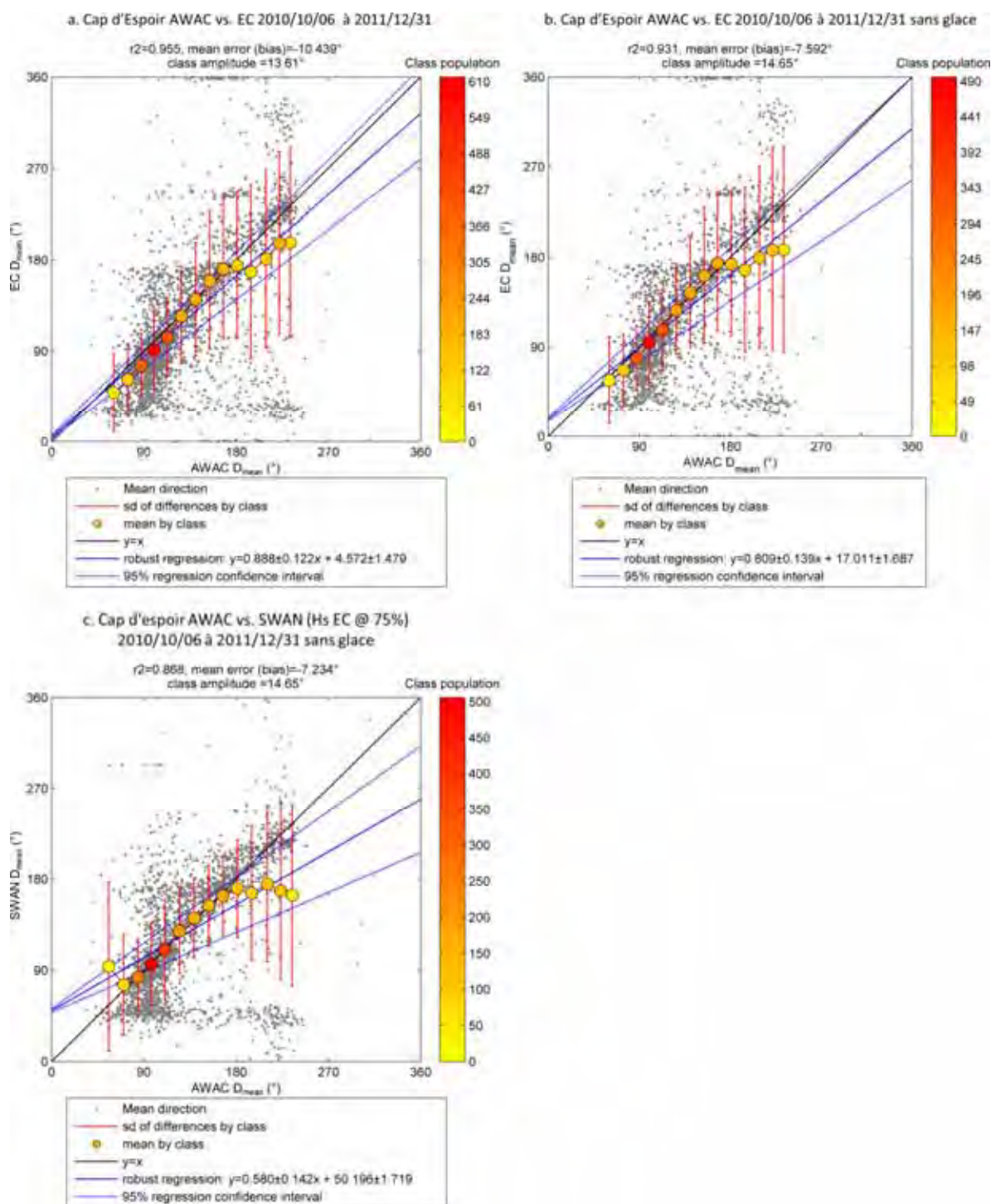


Figure 64 Population et valeur moyenne des classes de D_{mean} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

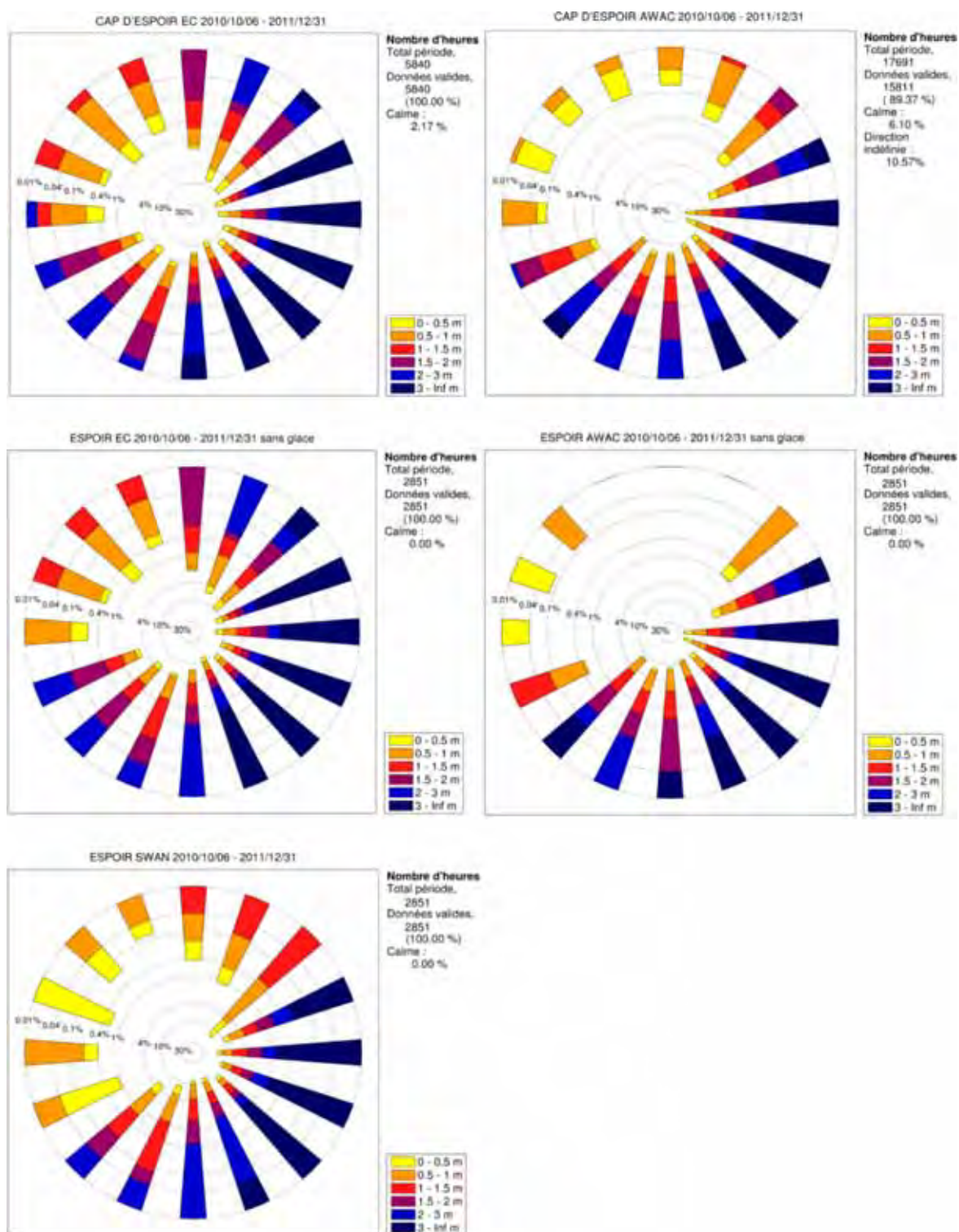


Figure 65 Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Cap d'Espoir

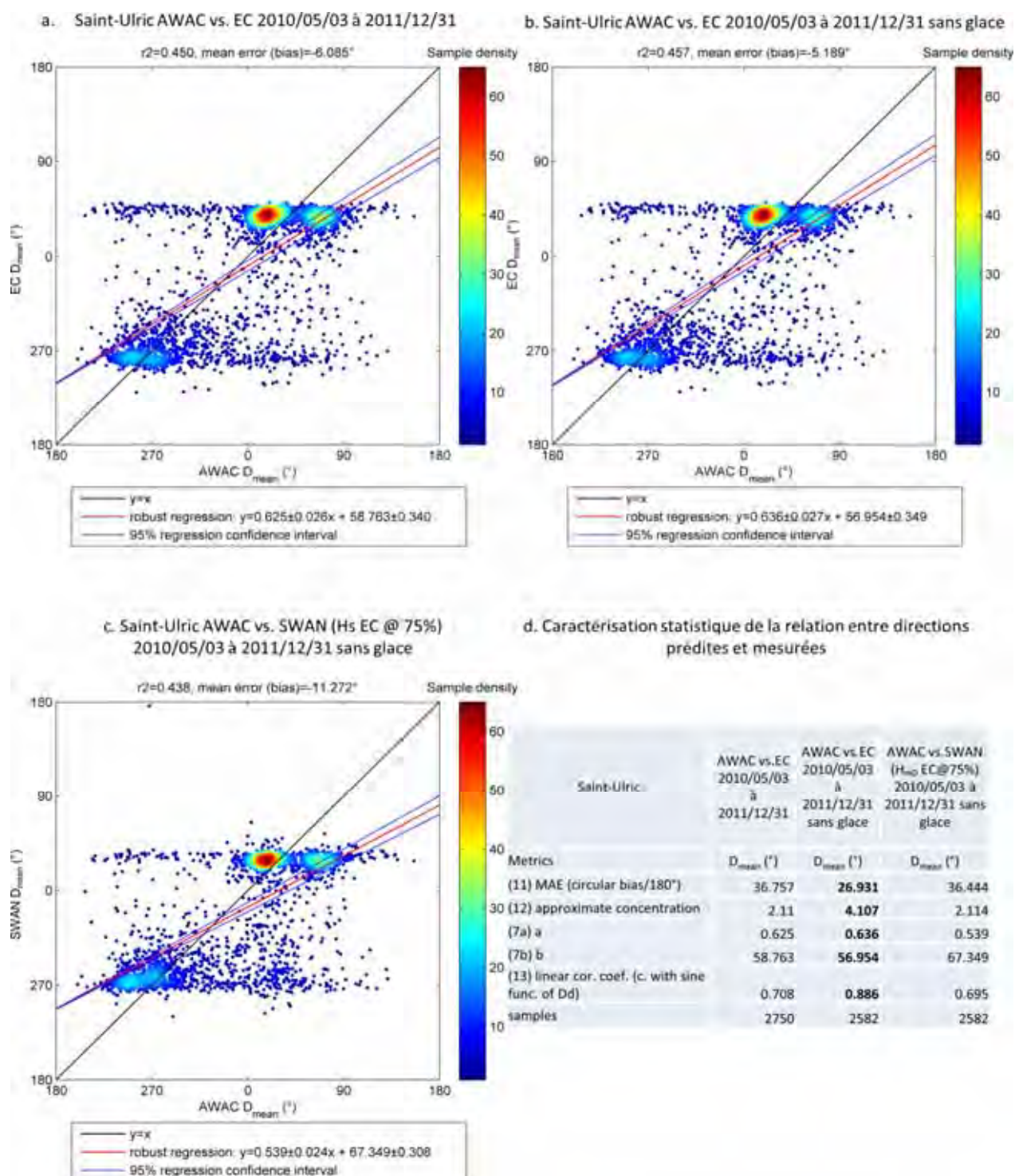


Figure 66 Graphiques de dispersion et caractérisation statistique des relations entre les directions moyennes prédites et mesurées à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

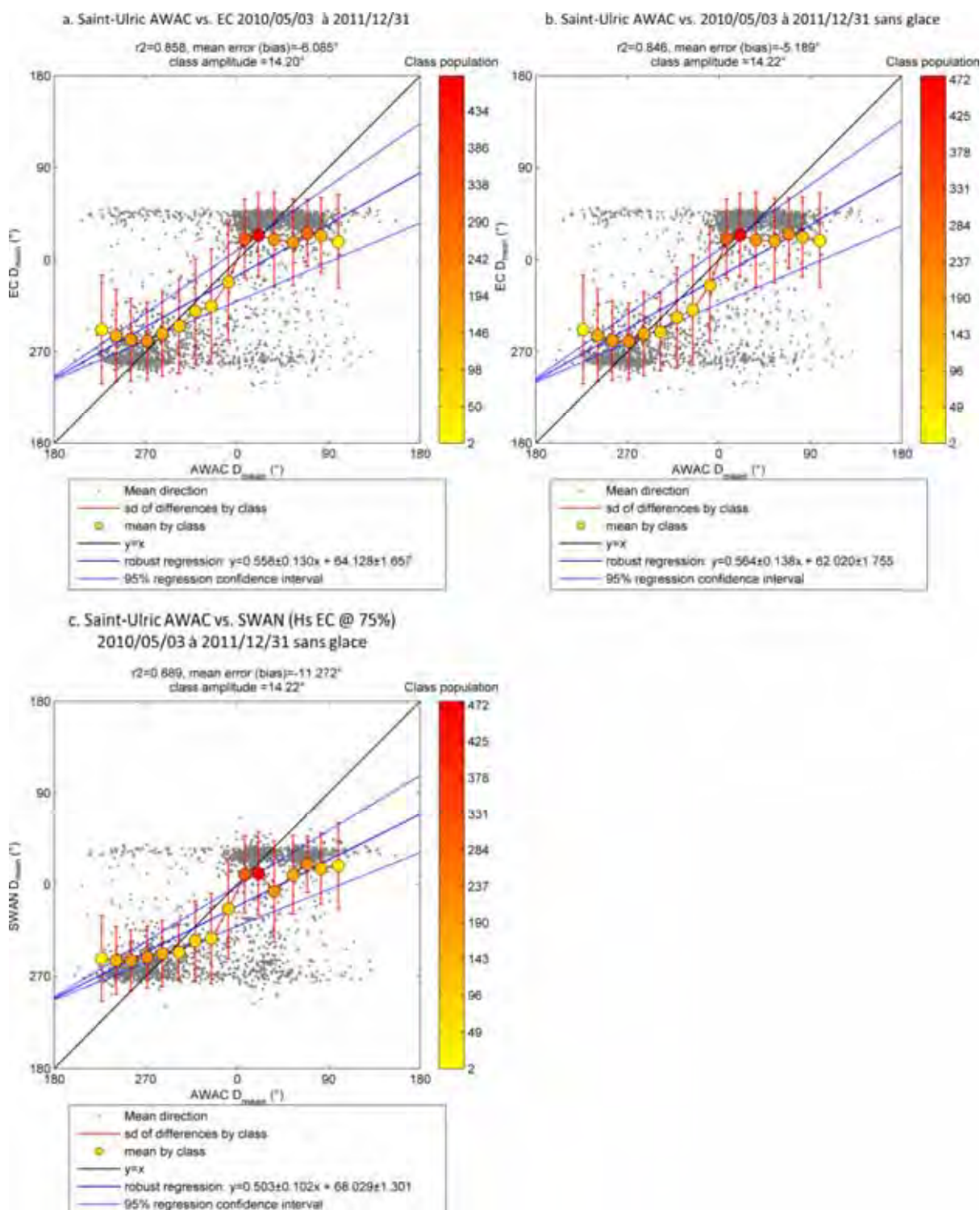


Figure 67 Population et valeur moyenne des classes de D_{mean} prédites et mesurées (classes d'amplitudes égales) à Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011. Régressions linéaires entre les moyennes des classes mesurées et prédites

MODÉLISATION DU RÉGIME DES VAGUES DU GOLFE ET DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT POUR
L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES CÔTIÈRES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

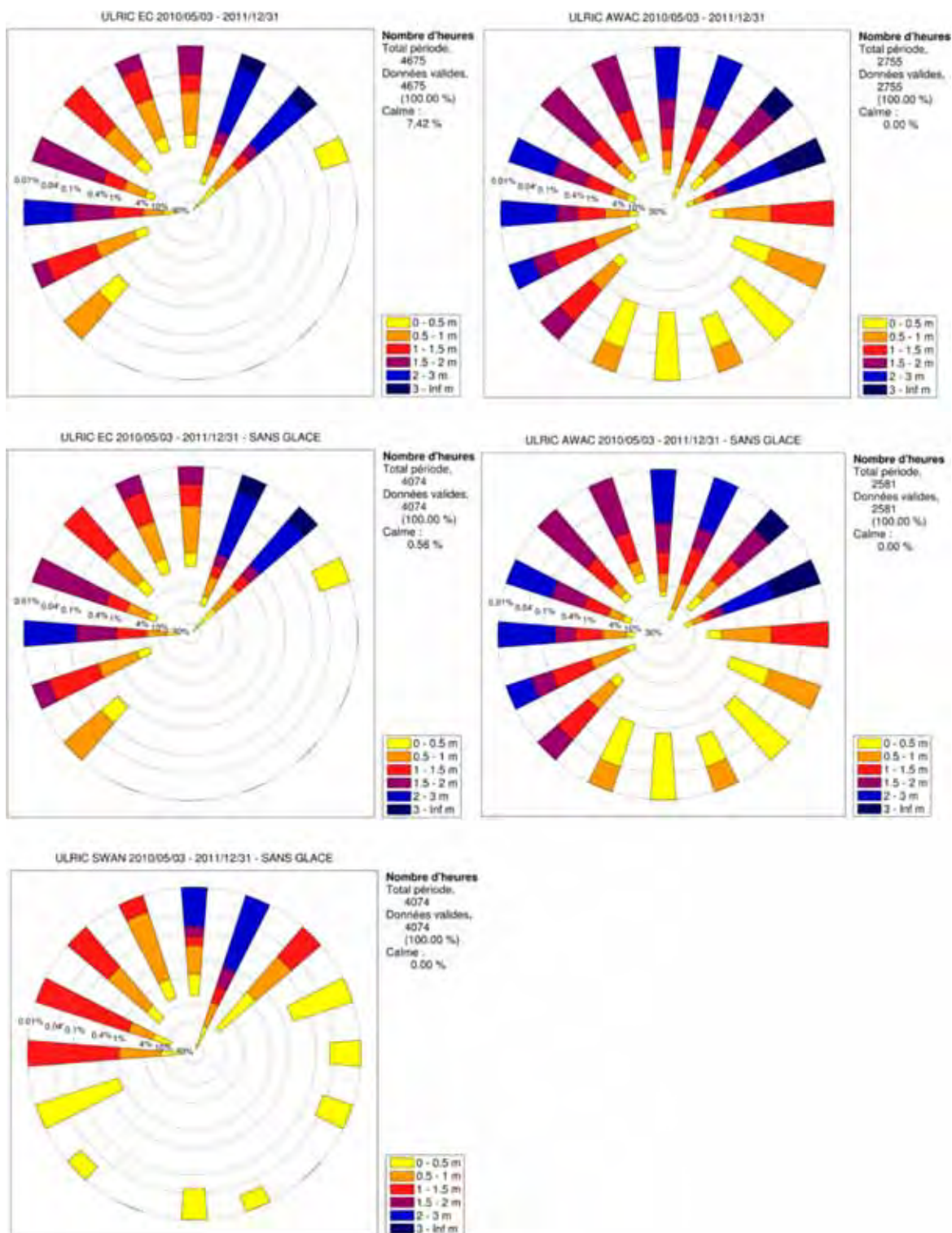


Figure 68 Directions de provenance des vagues et distribution des hauteurs significatives des vagues pour chaque direction pour le site de Saint-Ulric

Synthèse des comparaisons de directions

Comme 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 direction 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 un fetch compris entre 10 km et 15 km. L'utilisation de SWAN permet de diminuer les erreurs extrêmes et le nombre de vagues venant du nord au 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 secteur nord dans le modèle. Le nuage de points de cette direction est globalement bien concentré, quoiqu'il soit décalé de 40° vers l'est et qu'il présente des 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 des secteurs 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 fetchs limités. 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, de période moyenne et de direction moyenne des vagues prédites par le modèle EC

L'analyse des relations entre les paramètres de hauteur significative, de période moyenne et de 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 exclut 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'en-tête de celui-ci, les crochets ([]) indiquent que chaque classe de vagues inclut la limite inférieure, mais exclut 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	2 847	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
Biais	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
Biais	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
Biais	-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 (2 847 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 de 1,33. L'erreur liée aux écarts les plus grands (RMSE : 0,3 m) est deux fois plus élevée que le biais, 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 de 1,11. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont cependant élevées (0,78 s et 1,05 s), illustrant la présence d'écarts importants entre valeurs prédites et mesurées. Cela est confirmé par la dispersion, également élevée ($\sigma_d = 0,94$ s).

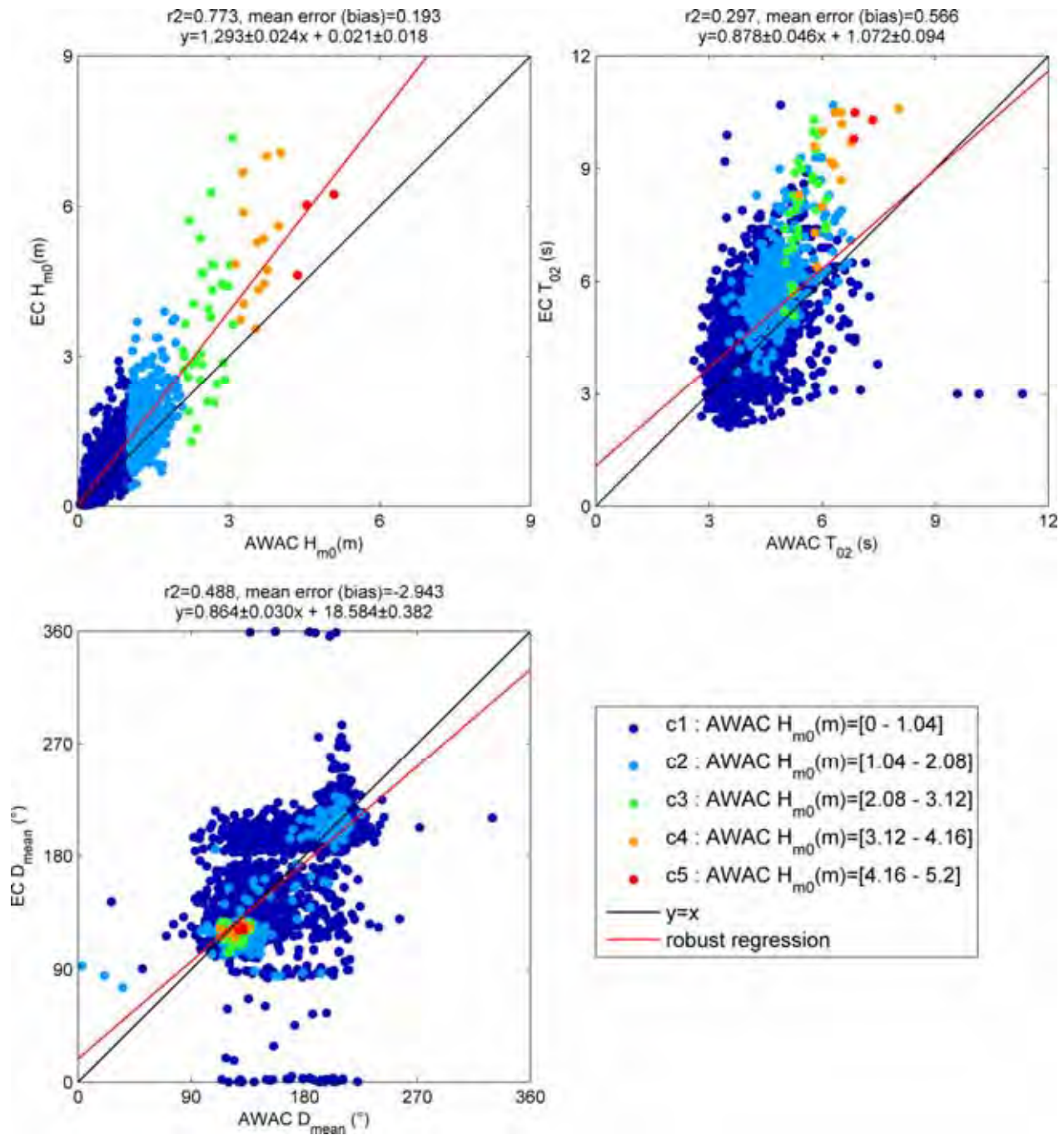


Figure 69 Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, des périodes moyennes et des directions moyennes par classes de hauteur significative pour le site de Sept-Îles du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

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 la RMSE sont élevées ($21,63^\circ$ et $34,63^\circ$), 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 important dans cette classe (+0,35 m) et représente une surévaluation des H_{m0} mesurées d'un facteur de 1,26. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont élevées (0,48 m et 0,64 m), illustrant la présence d'erreurs fortes. La dispersion aussi est élevée ($\sigma_d = 0,54$ m), l'écart-type de l'erreur représentant 40 % de la valeur moyenne mesurée.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,04 m et 2,08 m se situent majoritairement 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 de 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 comparativement à la classe précédente, ce qu'indique également la dispersion ($\sigma_d = 0,87$ s), légèrement plus faible que celle de 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 variant entre 90° et 225° . Le biais moyen est faible ($-8,1^\circ$), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont moins importantes que celles de la classe précédente ($14,4^\circ$ et $19,5^\circ$). Quelques erreurs fortes demeurent, mais la dispersion de l'erreur est deux fois plus faible que celle de la classe précédente, ce qui est confirmé par le graphe de dispersion. Les prévisions de direction 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) et représente une surévaluation d'un facteur de 1,44. L'erreur absolue moyenne est légèrement supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la surévaluation. La RMSE élevée (1,68 m) illustre la présence d'écarts forts entre mesures 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 varient 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 de 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). Quant à la dispersion, elle est plus importante que celle des 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 se situant entre 100° et 130°. Le biais moyen est faible (-9,8°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont plus faibles que celles de la classe précédente (11,1° et 12,1°). Ces valeurs illustrent l'absence d'erreur forte. La faible dispersion de l'erreur est confirmée par la valeur moindre de l'écart-type de l'erreur (7,2°) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de direction 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 de 4,16 à 5,2 m, les observations sont regroupées avec celles de la classe de 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) et représente une surévaluation de la moyenne des H_{m0} mesurées d'un facteur de 1,4. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. La RMSE observée est la plus forte, toutes classes confondues (1,79 m), les écarts les plus importants entre mesures et simulations se trouvant dans cette classe. La dispersion de l'erreur est cependant plus faible que dans la classe précédente ($\sigma_d = 1$ m), les écarts entre mesures et simulations sont légèrement plus homogènes.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 3,12 m varient 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 de 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 toutefois légèrement plus faible que dans 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 (-5,0°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont moins importantes que celles de la classe précédente (6,6° et 7,5°), illustrant l'absence d'erreur forte. La faible dispersion est confirmée par la valeur moindre de l'écart-type de l'erreur (5,5°) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de direction pour les plus hautes vagues sont fortement en accord avec les mesures.

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 figurent, quant à eux, dans la Figure 70.

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	1 910	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
Biais	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
Biais	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
Biais	-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

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 (1 910 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) et correspond à une surévaluation positive d'un facteur de 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 au biais. Cela est confirmé par la grande dispersion 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 de 1,15. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont cependant élevées (0,79 s et 1,03 s), illustrant la présence d'écarts importants 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 (de 45° à 250°). Le biais moyen est très faible (-9,1°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées, alors que l'erreur absolue moyenne et la RMSE sont très élevées (44,5° et 66,1°), mettant en lumière la présence d'erreurs très fortes, confirmée par la dispersion de l'erreur, également très élevée (65,4°). Le graphe de dispersion met en évidence la difficulté du modèle à reproduire la direction de certaines vagues du sud-sud-ouest (de 180 à 225°) dont les valeurs simulées, extrêmement dispersées, varient 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) et représente une surévaluation des H_{m0} mesurées d'un facteur de 1,2. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont élevées (0,48 m et 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.

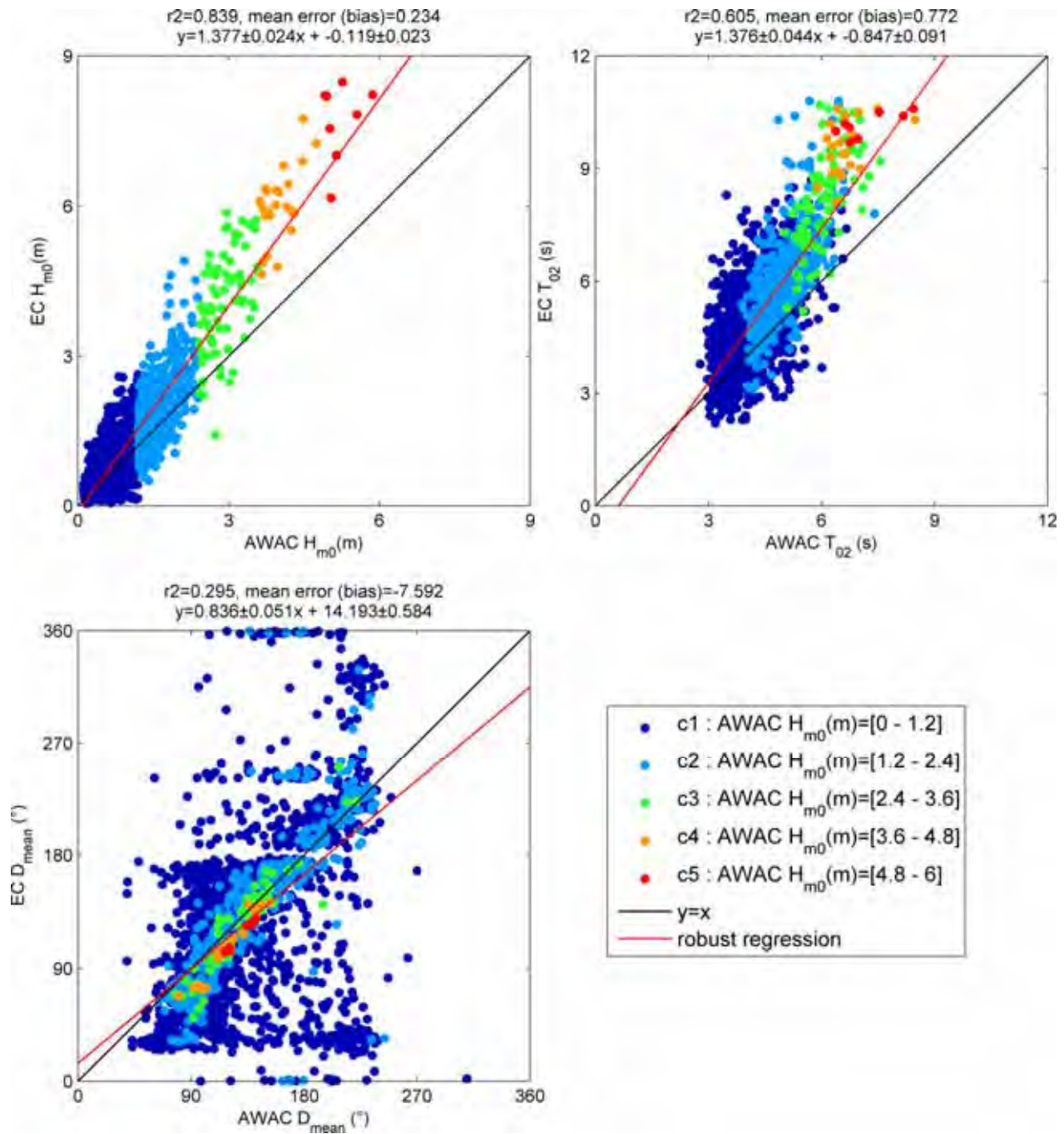


Figure 70 Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, des périodes moyennes et des directions moyennes par classes de hauteur significative pour le site de Cap d'Espoir du 6 octobre 2010 au 31 décembre 2011

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,2 m et 2,4 m se situent majoritairement 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 de 1,22. La proximité des valeurs de biais (1,12 s) et de MAE (1,17 s) 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 (de 45° à 250°). Le biais moyen est négligeable (-1,2°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue moyenne et la RMSE diminuent de moitié en comparaison de la classe précédente (19,8° et 36,9°), ce qui illustre la diminution des écarts extrêmes entre mesures et modèle. La plupart des erreurs sont ainsi inférieures à 60° et l'écart-type de l'erreur diminue également de moitié (36,9°), 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) et représente une surévaluation d'un facteur de 1,4. L'erreur absolue moyenne (1,26 m) est légèrement supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la surévaluation. La RMSE aussi est élevée (1,46 m). Quant à la dispersion, elle augmente par rapport aux valeurs précédentes (0,86 m) et 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 se situent 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 de 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 légèrement supérieure à celle des 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 (de 90° à 180°). Le biais moyen est faible (-7,1°). L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont deux fois plus faibles que celles de la classe précédente (12,9° et 16,4°). Ces valeurs illustrent l'absence d'erreur forte. La faible dispersion de l'erreur est confirmée par la valeur moindre de l'écart-type de l'erreur (14,9°) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de direction 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 de 4,8 à 6 m, les observations de celle-ci sont regroupées avec celles de la classe de 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) et représente une surévaluation d'un facteur de 1,5. La totalité des prédictions sont surévaluées, comme l'illustre la MAE identique au biais. La RMSE observée est la plus forte, 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 toutefois plus faible que dans la classe précédente ($\sigma_d = 0,65$ m), les écarts entre mesures et simulations étant légèrement plus homogènes.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m varient 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 de 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 cependant plus faible que celle des 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 (de 90° à 160°). Le biais moyen est faiblement négatif (-13,3°) et proche de l'erreur absolue moyenne (13,7°), ce qui indique une légère sous-évaluation des directions, que l'on retrouve sur le graphe de dispersion (Figure 70). La RMSE équivaut, quant à elle, à celle de la classe précédente (14,8°). 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°) illustrée par le graphe de dispersion. Les prévisions de direction pour les vagues de H_{m0} supérieure à 3,6 m, très faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

Site de Saint-Ulric

Les valeurs chiffrées citées ci-après sont présentées dans le Tableau 8. Les graphes de dispersion pour Saint-Ulric figurent, quant à eux, 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 (1 655 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 entre données modélisées et mesurées. L'erreur absolue moyenne (0,19 m), qui indique l'amplitude

moyenne des erreurs négatives et positives qui sont distribuées également de part et d'autre de la moyenne, est élevée en proportion de la moyenne mesurée. L'erreur liée aux erreurs les plus fortes (RMSE : 0,25 m) est plus élevée que l'erreur absolue moyenne. Cela est confirmé par la forte dispersion 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

Limite des classes H_{m0} (m)	[0-0,76[	[0,76-1,52[	[1,52-2,28[	[2,28-3,04[	[3,04-3,8[
Nombre d'échantillons	1 655	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
Biais	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
Biais	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
Biais	-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 légère surévaluation d'un facteur de 1,06. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont cependant élevées (0,56 s et 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).

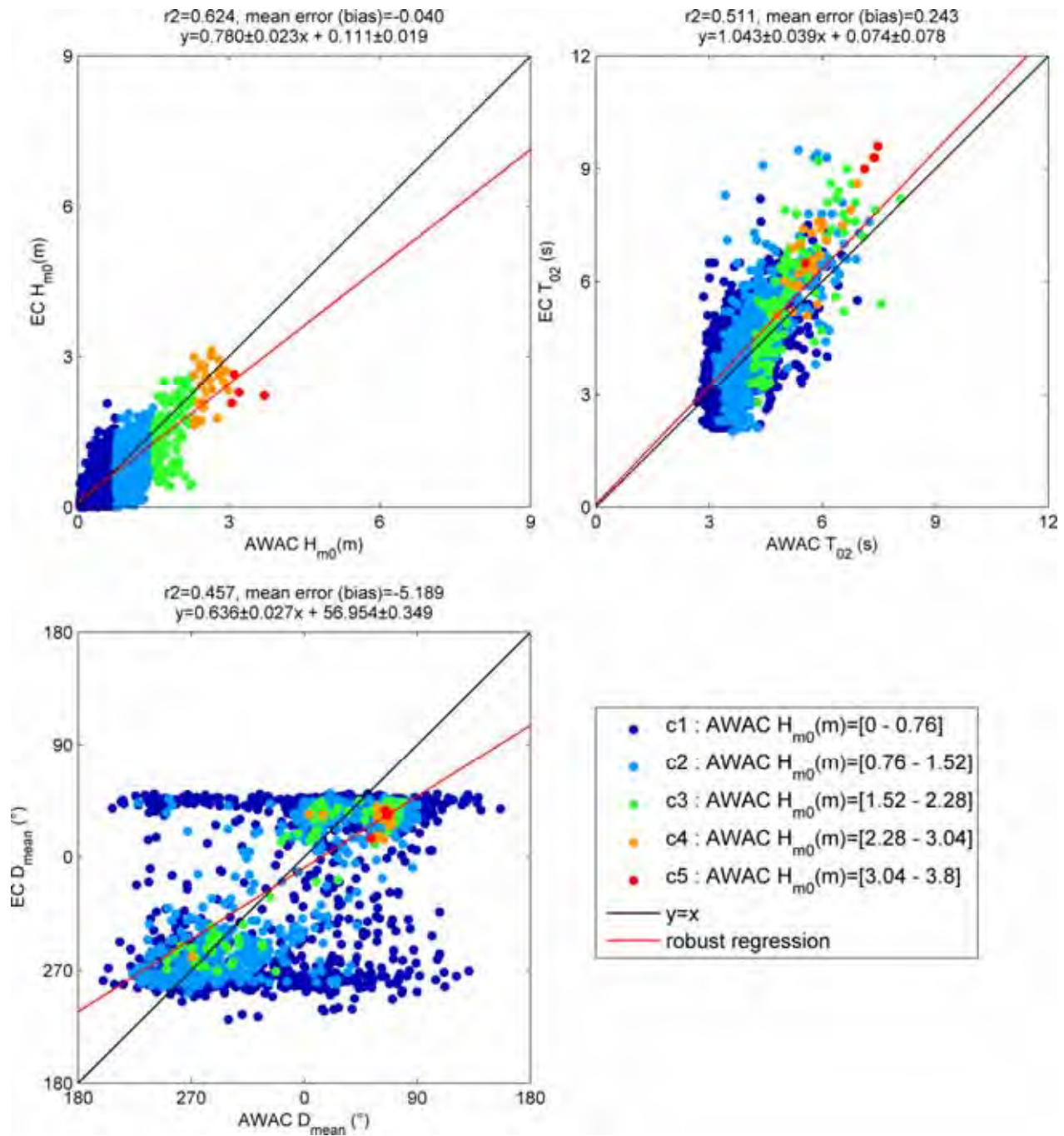


Figure 71 Graphiques de dispersion des hauteurs significatives, des périodes moyennes et des directions moyennes par classes de hauteur significative pour le site de Saint-Ulric du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

Les directions mesurées associées aux vagues de H_{m0} inférieure à 0,76 m proviennent principalement des secteurs sud-ouest à est (de 225° à 90°). Le biais moyen est très faible (-5,4°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. Toutefois, l'erreur absolue moyenne et la RMSE sont très élevées (41,2° et 59,1°), confirmant la présence d'erreurs très fortes. Cela est également illustré par la très grande dispersion de l'erreur (58,9°). 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) et représente une sous-évaluation des H_{m0} mesurées, soit un facteur de 0,85 entre modèle et observations. L'erreur absolue moyenne et la RMSE sont faibles (0,29 m et 0,36 m) : il y a peu d'erreurs fortes. La dispersion est, quant à elle, 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 se situent majoritairement 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 de 1,06. L'erreur moyenne absolue ainsi que la RMSE sont peu élevées (0,56 s et 0,81 s). La dispersion est également 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 (de 225° à 90°). Le biais moyen est très faible (-2,73°), illustrant une absence de tendance entre données prédites et mesurées. L'erreur absolue moyenne et la RMSE diminuent relativement à la classe précédente, avec des valeurs moyennes à faibles (27,7° et 35,0°). La dispersion diminue également (34,9°), ce qui s'explique par la réduction 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. La RMSE est faible (0,6 m), indiquant un petit nombre d'erreurs extrêmes. La dispersion augmente par rapport aux valeurs précédentes (0,51 m), mais représente toujours une

faible proportion (28 %) de la valeur moyenne mesurée, ce qui est caractéristique d'une dispersion moyenne.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} comprise entre 1,52 m et 2,28 m varient 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 de 1,08. L'erreur absolue moyenne et la RMSE augmentent (0,86 s et 1,07 s), mais restent faibles 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 (de 250° à 280° et de 350° à 80°). Le biais moyen est faiblement négatif (-10,9°) alors que l'erreur absolue moyenne et la RMSE diminuent relativement à la classe précédente, avec des valeurs moyennes à faibles (24,0° et 27,1°). La dispersion diminue également (24,9°), ce qui s'explique par l'absence d'erreurs extrêmes et par le déplacement 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 de 3,04 à 3,8 m, les observations de celle-ci sont regroupées avec celles de la classe de 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 et représente une sous-évaluation (-0,24 m), soit un facteur de 0,9 entre prédictions et observations. L'erreur absolue moyenne (0,44 m) est supérieure au biais, ce qui confirme la tendance générale à la sous-évaluation. La RMSE aussi est faible (0,51 m), indiquant un petit nombre d'erreurs extrêmes. La dispersion diminue par rapport aux valeurs précédentes (0,42 m) et représente toujours une proportion peu importante (15,6 %) de la valeur moyenne mesurée, ce qui est caractéristique d'une faible dispersion et d'une bonne précision du modèle.

Les périodes mesurées associées aux vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m se situent 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 de 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, quant à elle, plus faible que dans 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 celui des classes précédentes (-29,2°), l'erreur absolue moyenne et la RMSE conservant des valeurs comparables (32,7° et 33,8°). La dispersion atteint sa valeur la plus faible (16,7°) : les prévisions de direction

pour les vagues de H_{m0} supérieure à 2,28 m, très faiblement dispersées et sans tendance, sont en accord avec les mesures.

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, il 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 intermédiaires (< 2 m) d'un facteur de 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 de $1,45 \pm 0,44$. À Sept-Îles, les plus longues périodes correspondent non seulement aux plus hautes vagues, mais aussi à des vagues de hauteurs plus faibles qui sont mal prédites par le modèle, ce qui crée 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 de 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 de $1,31 \pm 0,28$.
- 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 direction brutaux. À Cap d'Espoir et à Saint-Ulric, les erreurs sont plus importantes et ne présentent pas de tendance particulière.
- Relation entre périodes et directions en fonction de la hauteur : Aux trois sites, pour les vagues inférieures à 2 m, le modèle prédit les paramètres de période et de direction avec une dispersion importante de l'erreur. Cette dispersion importante peut être liée aux données de vent 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 hauteur et de direction s'améliore, la dispersion et les erreurs extrêmes diminuant avec l'augmentation de la hauteur des vagues. Les directions prédites 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 entre 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 de la station de Mont-Louis et les résultats de la calibration ont contraint Environnement Canada à employer les vents à 40 m plutôt qu'à 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 touchant Saint-Ulric, qui se sont formées dans le champ de vent local. Il est donc normal que les vagues mesurées aux sites du Golfe soient plus longues et plus hautes.
- Dans les modèles vent-vagues spectraux, la croissance des vagues (c'est-à-dire le transfert d'énergie du vent aux 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 fetch et hauteur des vagues n'est donc pas linéaire. Associée à l'emploi de vents trop forts, cette relation peut expliquer la surévaluation systématique des hauteurs et des 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 heures) 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 moins bonne qualité des prédictions pour ces vagues, qui représentent la majeure partie des observations à Saint-Ulric.
- Les composantes du vent utilisées dans le modèle EC correspondent au vent à 40 m, logiquement 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 vents (GEM 15 km dégradé à 24 km en entrée du modèle EC) et l'influence des vents de terre lors de l'interpolation à 5 km peuvent être à l'origine d'un biais spatial entre les vents de l'Estuaire et ceux du Golfe, comme celui qui a été observé pour les vents issus de NARR et de 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 ($MERRA_{corr}$). 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, Voinov et Nikulin, 2013) et les diagrammes quantile-quantile (*Q-Q plot*, comparaison visuelle des distributions). La formule de fetch 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 semblable à celles de SPM77, JON73 ou WIL65.

Le **Tableau 9** présente le biais, la RMSE et le χ^2 de la H_s pour les cinq formules et les quatre sites. Pour chaque site, SPM84 est la formule qui surévalue le plus les vagues (biais positif) et qui 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 72). 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 de meilleurs résultats. La performance générale des quatre autres formules – SPM77, JON73, CEM03 et WIL65 – est relativement similaire, avec des valeurs comparables pour le biais, la RMSE et le χ^2 .

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

Pour toutes les formules de fetch, la comparaison est la plus mauvaise au site de Sept-Îles (AWAC-C; Figure 72C); 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* (Figure 72). 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 que l'on peut visualiser sur 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 à 0,59 m pour CEM03 (WIL65 a une RMSE un peu plus faible et 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 72D). Par ailleurs, la série de données de cette bouée est la plus longue (22 ans par rapport à 3 ans pour les AWAC). Or, la comparaison quantile-quantile entre les distributions mesurées et simulées pour la bouée C45138 est détériorée si seules les trois dernières années sont utilisées (2010-2012) au lieu de toute la série de données (1991-2012; Figure 73). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les erreurs non négligeables des comparaisons heure par heure (grande RMSE) s'équilibrent à long terme pour finalement produire un faible biais et une bonne correspondance des distributions. Donc, l'augmentation de la longueur des séries temporelles de H_s prédites par GENER devrait améliorer la représentativité des distributions produites et permettre la production de climats de vagues fiables.

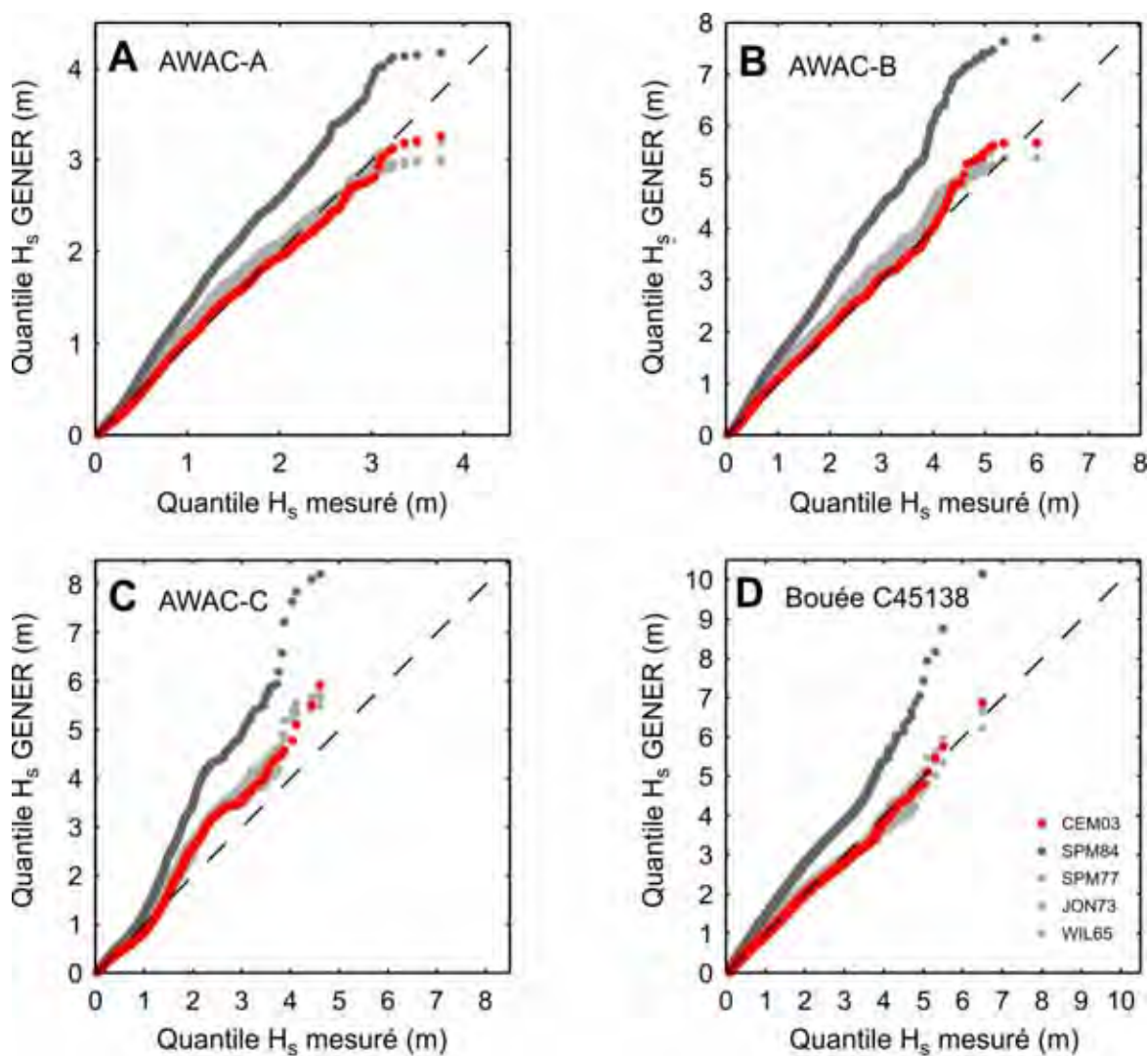


Figure 72 Diagrammes quantile-quantile (Q-Q plot) de H_s mesurée et de H_s prédite par GENER pour les quatre sites et les cinq formules de fetch

La formule de fetch du *Coastal Engineering Manual* (CEM03) est celle qui correspond le mieux aux quatre jeux de données disponibles. En effet, elle semble être la mieux adaptée à l'estuaire et au golfe du Saint-Laurent et **c'est pourquoi nous l'utiliserons pour la suite des travaux.**

Le calcul des fetchs pondérés en vue d'utiliser GENER nécessite de définir une distance maximale de fetch. Dans le cadre du projet, nous avons constaté que ce paramètre peut influencer les sorties de vagues de GENER, mais à un degré moindre que la qualité des vents donnés en entrée du 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'un fetch maximal de 500 km est généralement adéquate pour le calcul des fetchs pondérés. Cette

valeur convient à la géographie générale du golfe du 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 précisées à l'annexe 1.

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

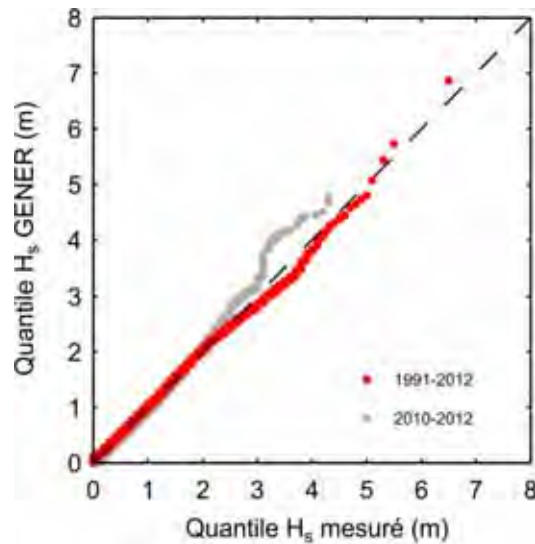


Figure 73 Diagramme quantile-quantile (*Q-Q plot*) comparant les mesures de la bouée C45138 (Mont-Louis) avec les résultats de GENER utilisant la formule CEM03 pour les périodes 1991-2012 et 2010-2012

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

La précédente validation de GENER a été réalisée avec les vents d'un modèle de réanalyse (MERRA), qui est contraint, à intervalles réguliers, par des observations météorologiques et qui, grâce à cela, reproduit fidèlement les événements climatiques réels. Par contre, pour simuler le climat de vagues futur, 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 tempête (durée, direction et vitesse de rotation des vents, etc.) produisent des climats de vagues similaires.

Au préalable, les distributions de vents MERRA_{corr} (vents corrigés, cf. section 2.4.1) et de MRCC-aev/ahj ont été examinées. Tant la comparaison des fortes vitesses (moyennes de 10 % des vitesses les plus rapides; figures 7, 10 et 11) que celle des vitesses extrêmes (moyennes de 1 % des vitesses les plus rapides; non illustré) indiquent des valeurs relativement proches pour les mêmes zones. À noter toutefois que les vents de ahj sont presque toujours plus rapides que les vents de aev. De même, la comparaison des roses des 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'étude (A : Saint-Ulric; B : Cap d'Espoir; C : Sept-Îles; ML : Mont-Louis; IMC : Pointe-aux-Loups). GENER a été utilisé 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 MERRA_{corr} (cf. section 2.4.1) sont comparées aux sorties de GENER alimenté par les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj.

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

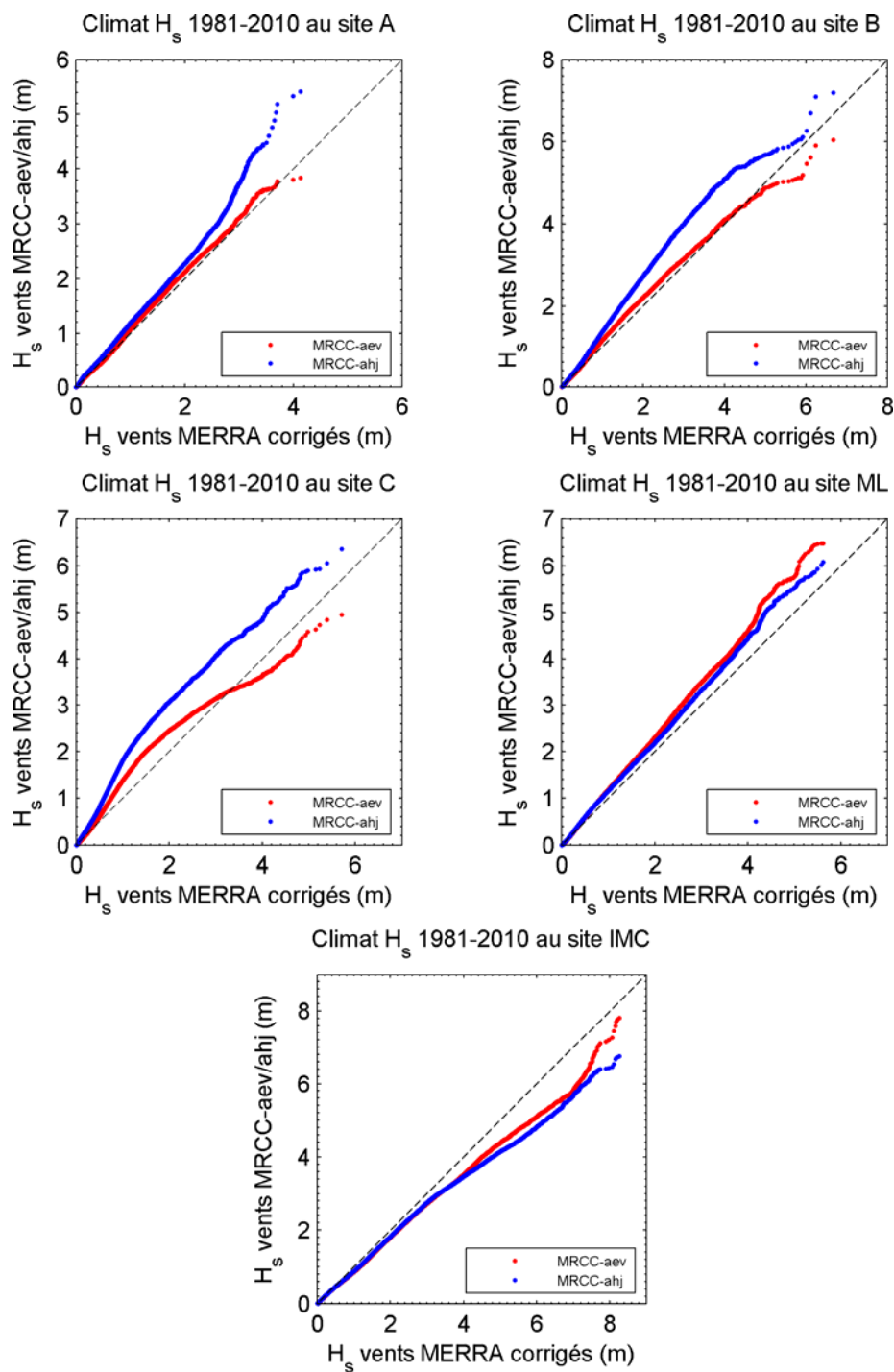


Figure 74 Diagrammes quantile-quantile comparant les climats de vagues calculés par GENER avec, d'une part, les vents MERRA_{corr} et, d'autre part, les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj, pour la période 1981-2010, aux cinq sites (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC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

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

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

Climat de vagues période 1981-2010, H_s (m)						
	Fréquence de dépassement			Période de retour		
	10 %	1 %	0,1 %	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 c'était le cas pour les distributions, MRCC-ahj concorde également moins bien avec MERRA_{corr} pour les vagues extrêmes. Cette simulation est la plus près de MERRA_{corr} à Mont-Louis. MRCC-ahj surévalue fortement les vagues à Saint-Ulric (+35 % pour les périodes de retour de 50 et de 100 ans). Elle surévalue aussi les vagues aux sites B et C. Cette surévaluation est toutefois plus faible pour les périodes de retour (vagues extrêmes) que pour les grandes vagues (Figure 74). Finalement, à Pointe-aux-Loups, MRCC-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, tant avec les vents MERRA_{corr} qu'avec ceux du MRCC (Figure 75). Les périodes de retour ont été calculées de manière automatique sans vérifier, 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 MRCC-aev et MRCC-ahj avec MERRA_{corr} montre d'intéressantes tendances spatiales (Figure 76). MRCC-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. La simulation MRCC-ahj suit, quant à elle, globalement la même tendance spatiale, avec une surévaluation dans l'estuaire maritime, au nord de la Gaspésie et aussi sur 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'étude. 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 de grandes étendues d'eau (MRCC y sous-évalue les vagues par rapport à MERRA_{corr}). Par contre, la différence entre ces modèles n'est probablement pas causée par la résolution de leurs grilles, car celles-ci ont une maille assez similaire (56 × 50 km pour MERRA et 45 × 45 km pour MRCC).

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

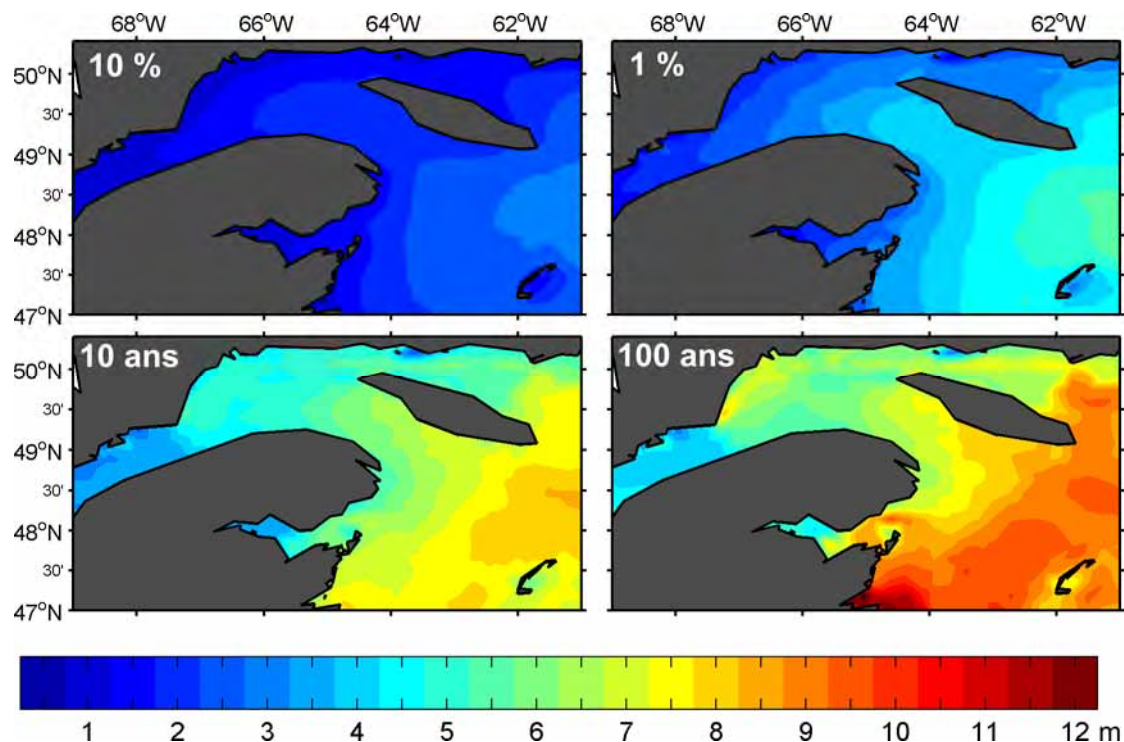


Figure 75 Climat de vagues calculé par GENER avec les vents MERRA_{corr} pour la période 1981-2010, avec les fréquences de dépassement 1 % et 10 % ainsi que les périodes de retour de 10 ans et de 100 ans

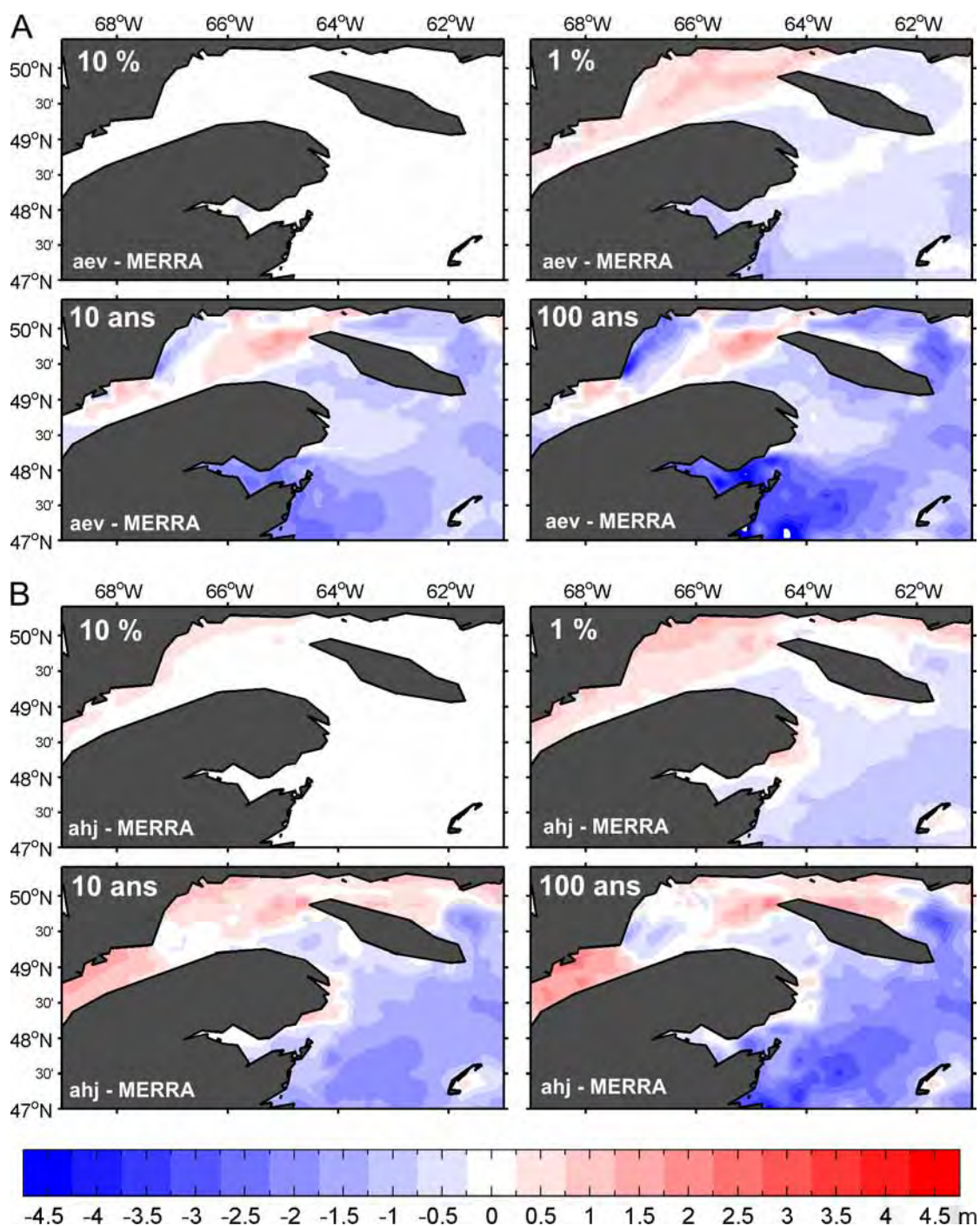


Figure 76 Comparaison des climats de vagues calculés par GENER avec, d'une part, les vents MERRA_{corr} et, d'autre part, les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj, pour la période 1981-2010. Sont présentées les différences MRCC moins MERRA_{corr} pour les fréquences de dépassement 1 % et 10 % ainsi que les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

5.4 Climat de vagues futur et comparaison avec le passé récent

Pour évaluer les modifications du climat de vagues au cours du XXI^e siècle, celui-ci 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). Ces comparaisons sont effectuées principalement avec 1) les hauteurs de vagues de fréquence de dépassement de 10 %, 1 % et 0,1 % distribution généralisée de Pareto (GPD); 2) les hauteurs de vagues de période de retour de 10, 50 et 100 ans; 3) l'énergie moyenne des vagues, ainsi que (iv; 4) les roses des vagues.

Deux simulations de vents d'une résolution temporelle suffisante sont disponibles sur ces périodes : MRCC-aev et MRCC-ahj (cf. section 2.4.2). Les vagues ont donc été calculées en alimentant GENER avec ces vents aux cinq sites d'étude, en utilisant la formule de fetch CEM03 et une distance maximale de 500 km dans le calcul des fetchs pondérés. Cela a produit 10 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 jeux de données (cf. 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 concernant la couverture de glace future, aucune variante de glace n'est sélectionnée comme étant 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 MOR*

Les 10 séries temporelles de vagues produites par GENER (5 sites × 2 simulations de vents) ont été atténuées par la glace en post-traitement, en suivant la méthode basée sur les sorties de glace du 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 de MRCC-aev ont été atténuées avec les coefficients d'atténuation obtenus à l'aide des sorties de la simulation MOR-aev (avec les températures de MRCC-aev); de même, les vagues calculées à partir des vents de MRCC-ahj ont été atténuées avec MOR-ahj. Les événements de vents et de froid d'une même simulation climatique sont donc combinés dans un enchaînement temporel.

Par la suite, tant 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 fréquence de dépassement de 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 simulations 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), que l'on considère ou non la glace pour la période future. Entre ces deux périodes, 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 est respectivement de 0,2 m et de 0,9 m, 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 existe une 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 de 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 Saint-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 tant 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 : dans tous les cas, mais à un degré moindre pour Saint-Ulric, l'atténuation des vagues par la glace devient quasi nulle ou complètement nulle avant la fin du XXI^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 Saint-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 qui en sont issus divergent. 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 de MRCC-ahj sont plus grandes que celles issues des simulations avec les vents de 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 retour 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

qu'avec la simulation MRCC-ahj, cette période correspond plutôt à celle où les hauteurs de vagues sont les plus faibles pour une période de retour donnée.

Bref, malgré la tendance explicite concernant la réduction future de l'atténuation des vagues par la glace dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent selon les simulations du MOR, les variations dans le climat de vagues futur de la région ne sont pas aussi évidentes et uniformes. En effet, on n'anticipe pas, avec cette réduction importante de l'atténuation par la glace des vagues en hiver, une diminution des hauteurs de vagues extrêmes pour la fin du XXI^e siècle. Il y aurait plutôt un 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 hivernales dans l'évaluation du climat de vagues, puisque l'atténuation par la glace est limitée et qu'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 de MRCC-aeV et l'atténuation des vagues selon la glace du MOR

MRCC-AEV							
	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie
	H _s (m)			H _s (m)			E _{moy} (J/m ²)
	10 %	1 %	0,1 %	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 de MRCC-ahj et l'atténuation des vagues selon la glace du MOR

MRCC-AHJ							
	Fréquence de dépassement			Période de retour			Énergie
	H _s (m)			H _s (m)			E _{moy} (J/m ²)
	10 %	1 %	0,1 %	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

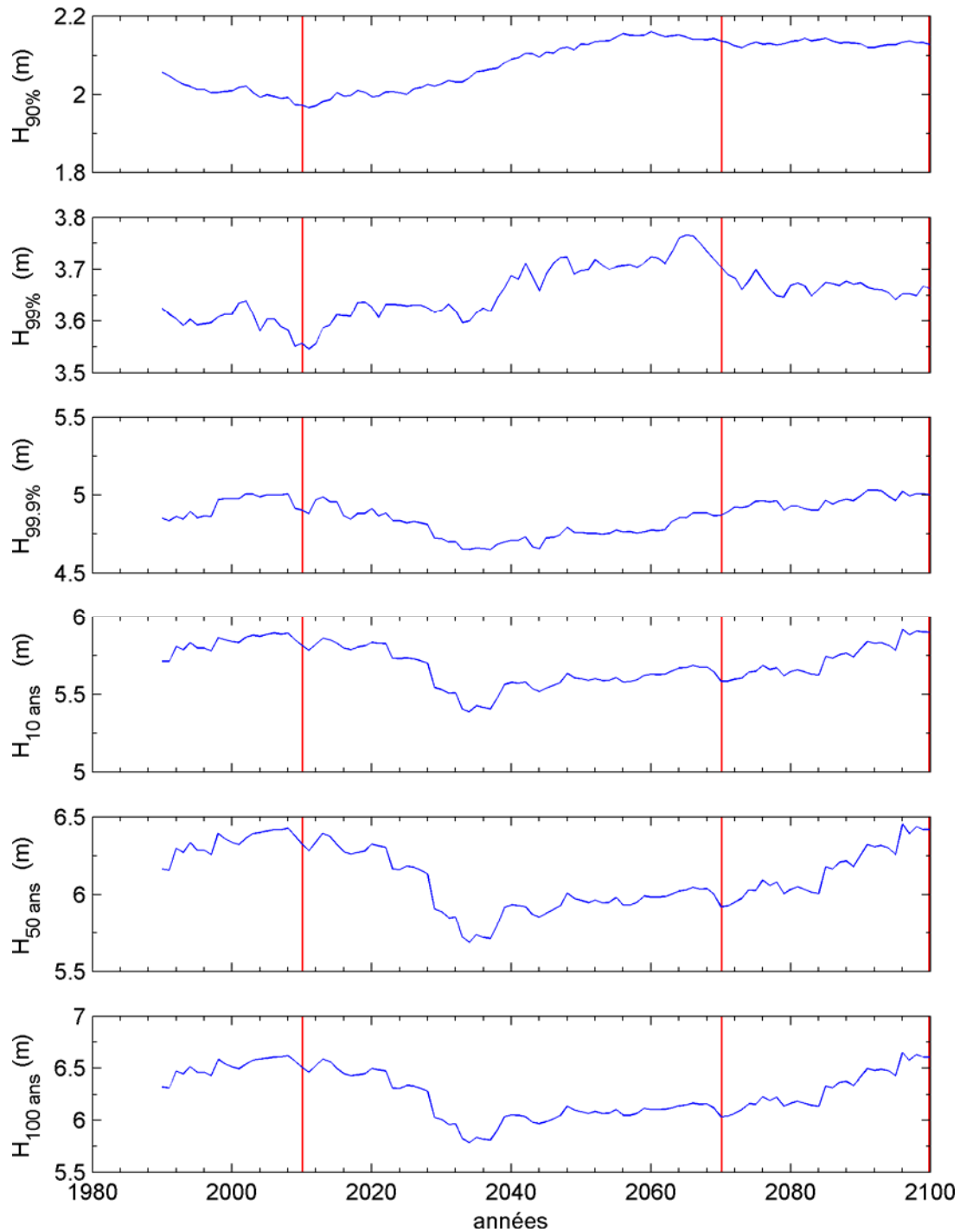


Figure 77 Variations des indicateurs climatiques calculés avec une fenêtre mobile de 30 ans pour le site de Mont-Louis avec les vents de MRCC-aev et l'atténuation des vagues selon la glace du MOR-aev (chaque valeur représente les 30 années précédentes). Les traits verticaux rouges indiquent les périodes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

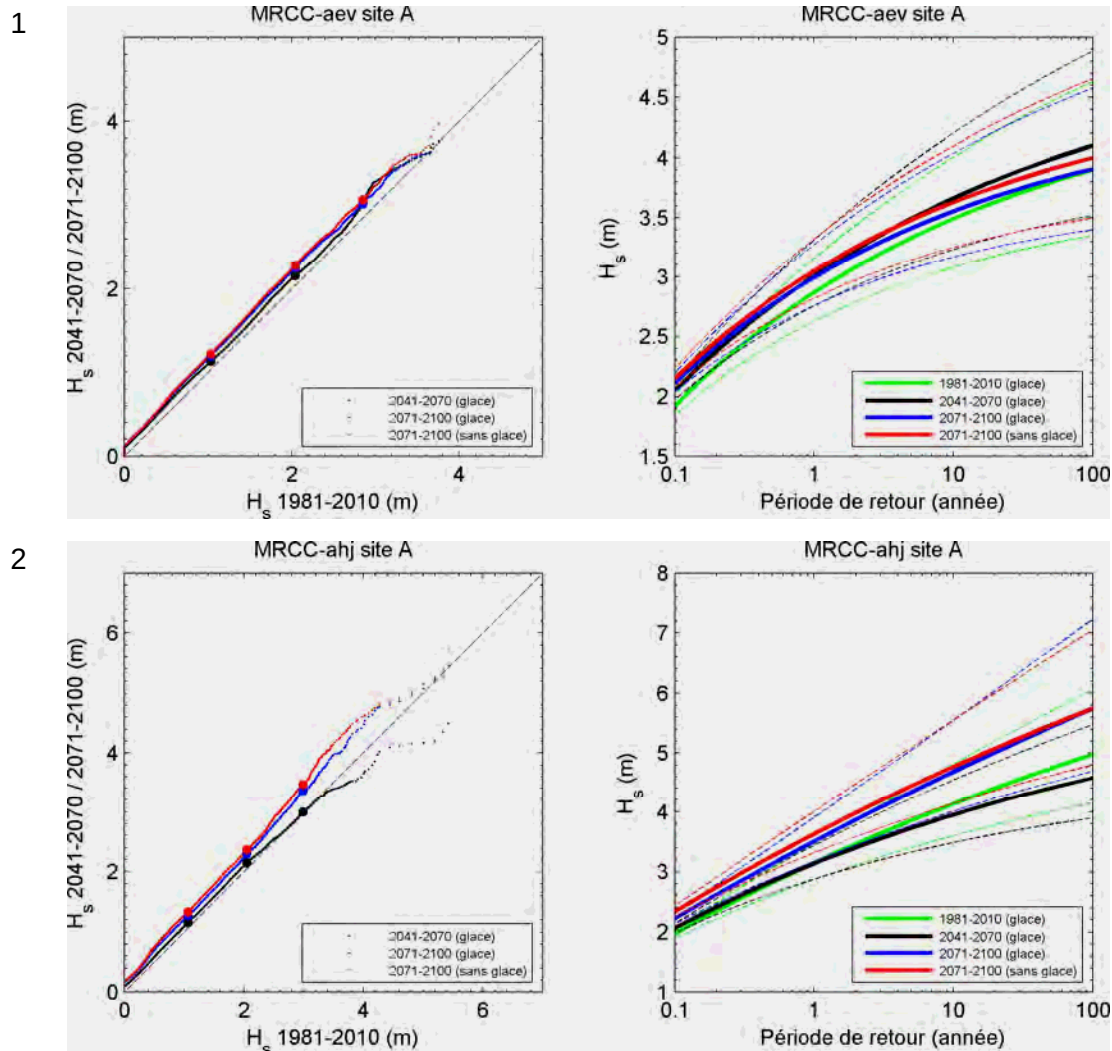


Figure 78 Pour chaque site et chaque simulation de vent, comparaison du climat de vagues 1981-2010 avec les climats futurs (2041-2070 et 2071-2100), calculés avec l'atténuation des vagues selon la glace du MOR ainsi que sans atténuation (pas de glace) pour la période 2071-2100.

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 à 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 le sont 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

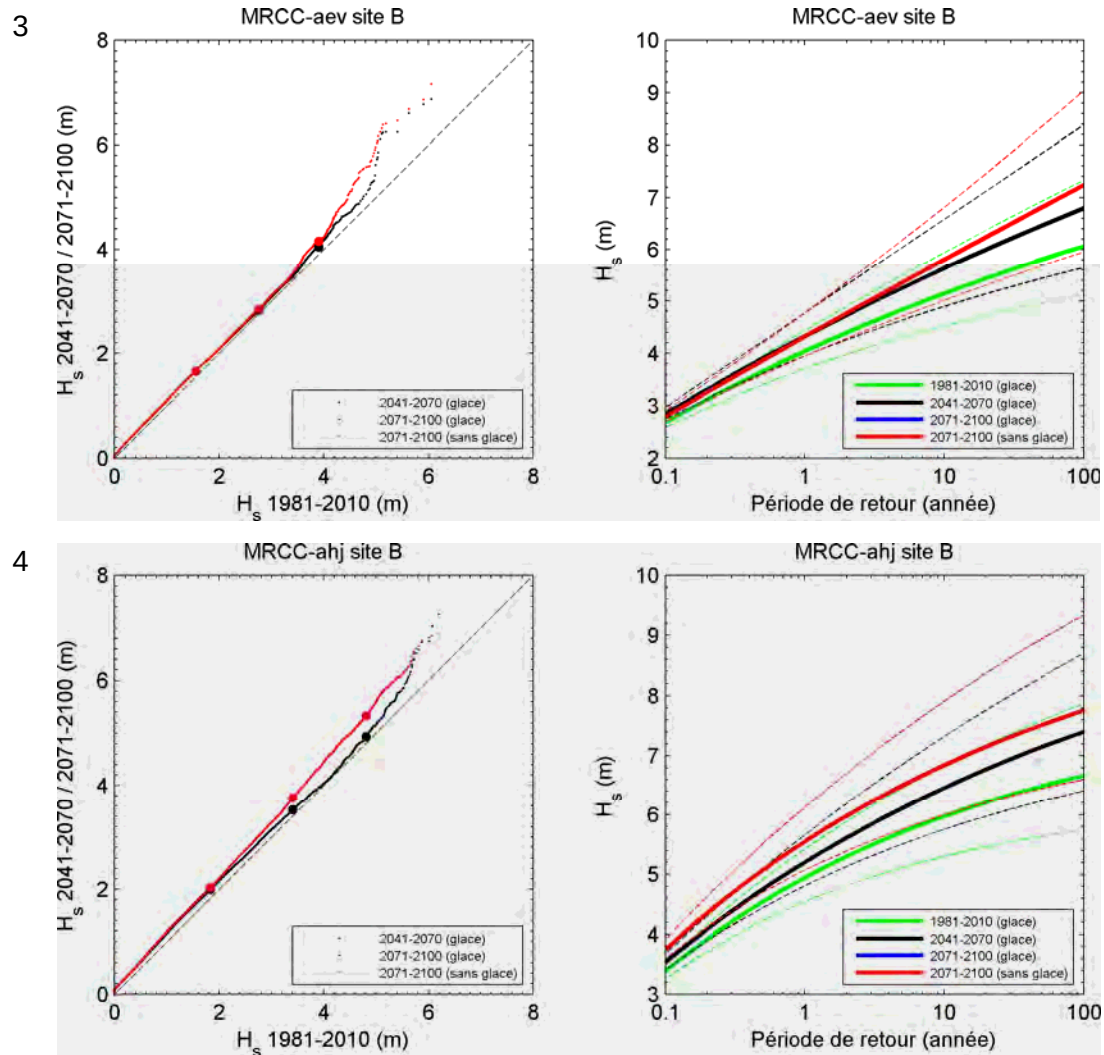


Figure 78 (suite)

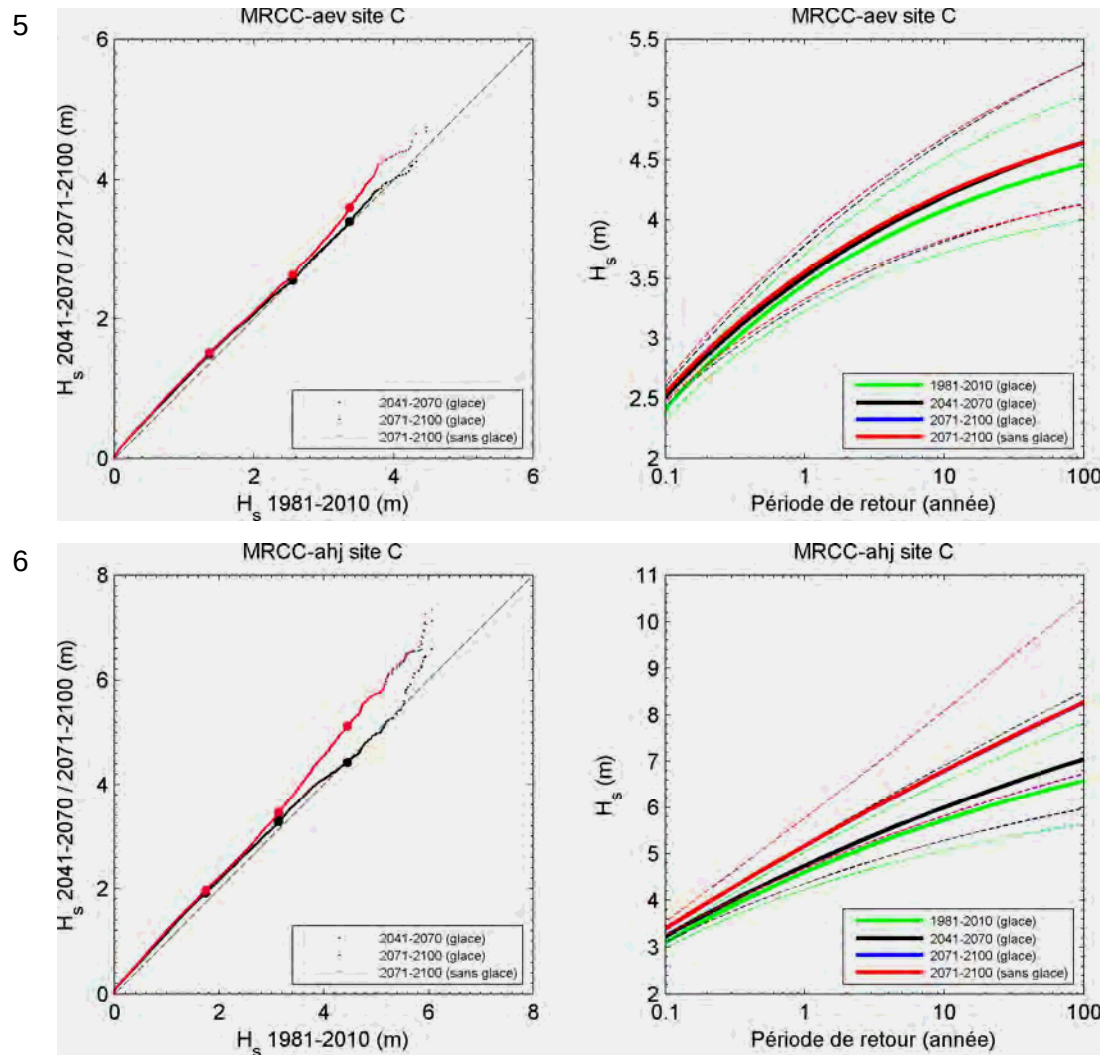
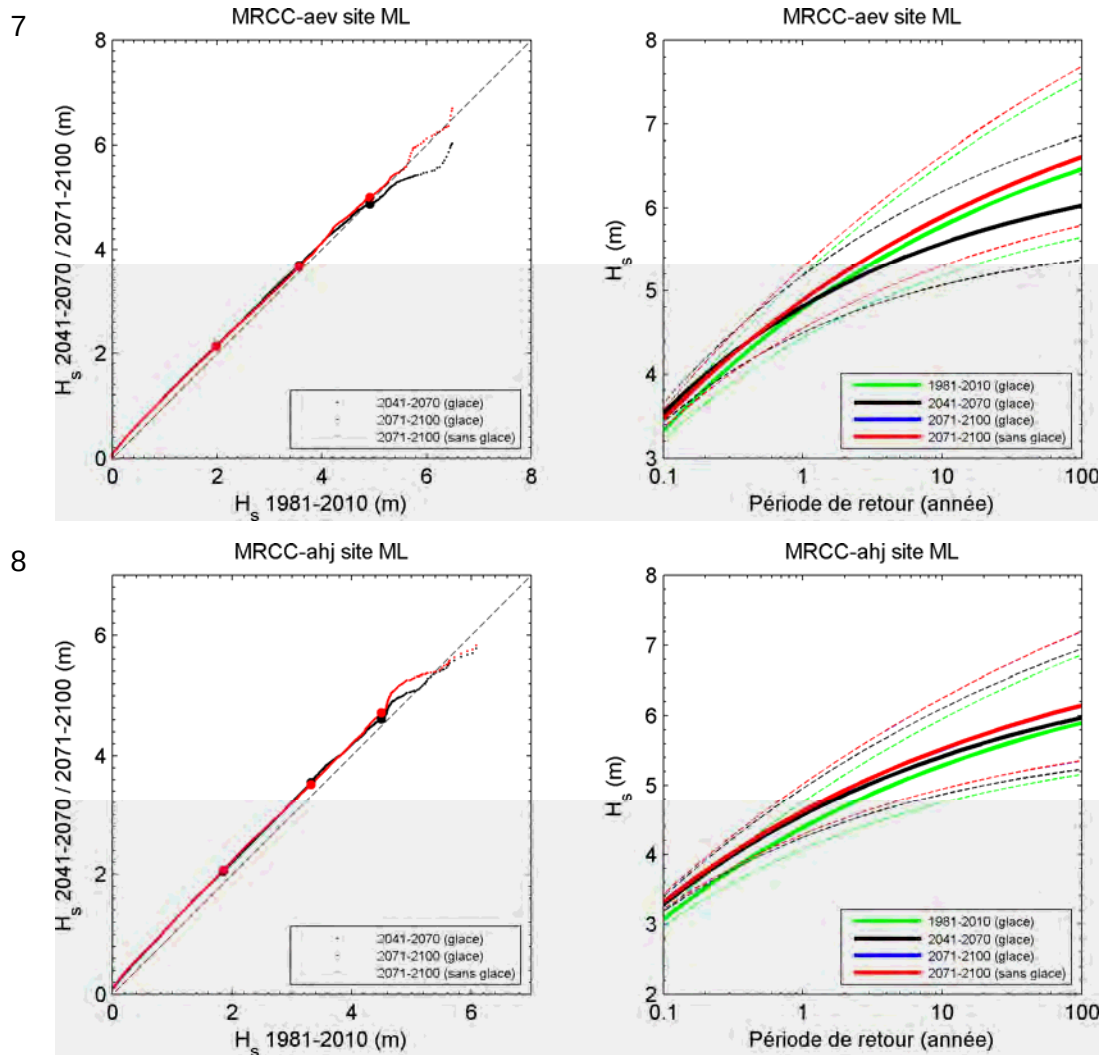


Figure 78 (suite)



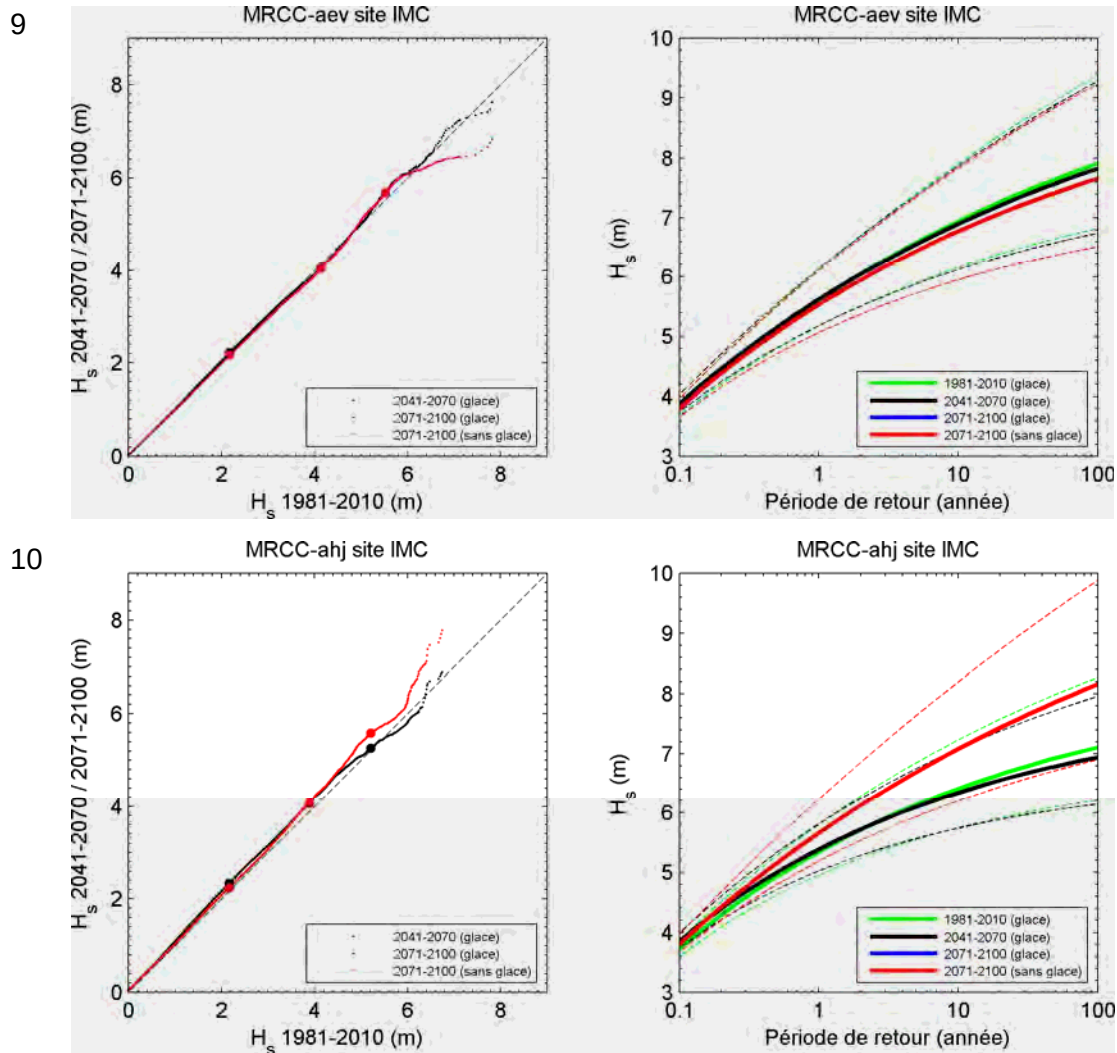


Figure 78 (suite)

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 (cf. 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 × 2 simulations de vents). Au total, 8 scénarios globaux (uniformes sur tout le Golfe) d'atténuation des vagues par la glace ont été appliqués à chacune des séries de vagues (Tableau 13). Ces scénarios sont basés sur des simulations du MRCC (aev, ahj et aev débiaisé; cf. section 2.4.2) et du CGCM (les 5 simulations avec le scénario A2, cf. section 4.3.1). En complément, 3 scénarios locaux (spécifiques à un site) basés sur les simulations du MRCC (aev, ahj et aev débiaisé) ont été appliqués aux séries de vagues, sauf pour Pointe-aux-Loups (Tableau 13). La résolution du CGCM était insuffisante pour le calcul des scénarios locaux.

Tableau 13 Liste des scénarios d'atténuation de glace (formules empiriques) appliqués en post-traitement aux 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 débiaisé ^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

^aPériode couverte : 1981-2100.

^bPériode couverte : 2000-2100.

Tant pour les séries de vagues sans atténuation par la glace que pour celles atténuées, le climat de vagues a été caractérisé pour trois périodes de 30 ans (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) en calculant les hauteurs de vagues de fréquence de dépassement de 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, seuls les 6 scénarios d'atténuation des vagues par la glace

basés sur le 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 entre les 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 ceux évalués avec les 11 scénarios de glace ($n = 11$; $n = 6$ 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 que, entre parenthèses, le minimum et le maximum des différents indicateurs climatiques obtenus avec les différents scénarios de glace (6 ou 11). Nous avons jugé raisonnable de comparer seulement les moyennes des indicateurs climatiques, puisque leur variabilité demeure limitée d'un scénario de glace à l'autre, comme le montrent les 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 diffèrent significativement entre les deux simulations de vents (MRCC-aev et MRCC-ahj) (Figure 80). Ces différences deviennent importantes pour les vagues extrêmes produites par des événements peu fréquents, et elles influencent nécessairement les périodes de retour calculées (Figure 80). Comme pour toutes les sorties de modèles climatiques, ce sont les variations à long terme qui sont intéressantes, tandis que les valeurs absolues sur une période donnée ne sont pas directement interprétables.

Les tableaux de résultats 14 à 18 montrent que, de manière générale, si l'on considère 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 (si l'on tient compte de 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 est de 0,3 m (vents de MRCC-aev) et de 0,8 m (vents de MRCC-ahj). Toutefois, l'ordre de grandeur des augmentations peut être différent d'une simulation à l'autre à un même site (MRCC-aev par rapport à MRCC-ahj), surtout pour les périodes de retour. L'ajustement des courbes de la 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 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 XXI^e siècle devient très limitée aux différents sites selon tous les scénarios de glace.

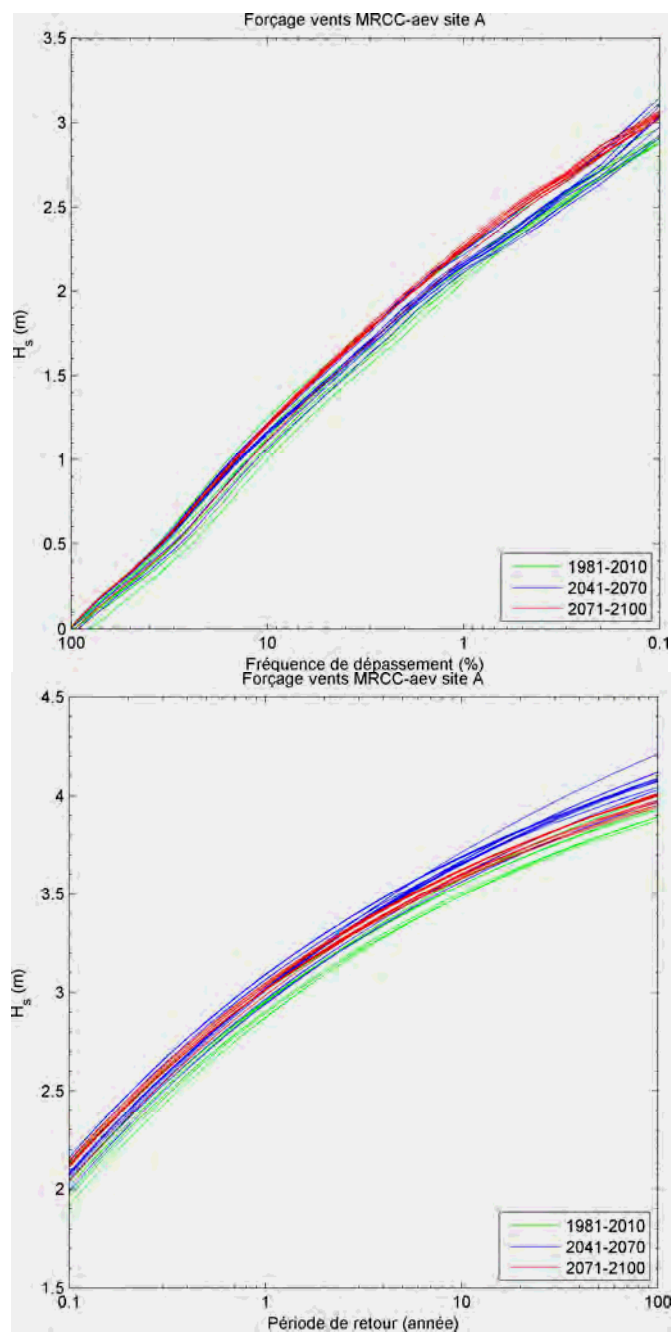


Figure 79 Exemple de la variabilité associée aux différents scénarios de glace (formules empiriques), avec les 3 périodes de 30 ans (en couleurs). En haut : fréquence de dépassement. En bas : période de retour

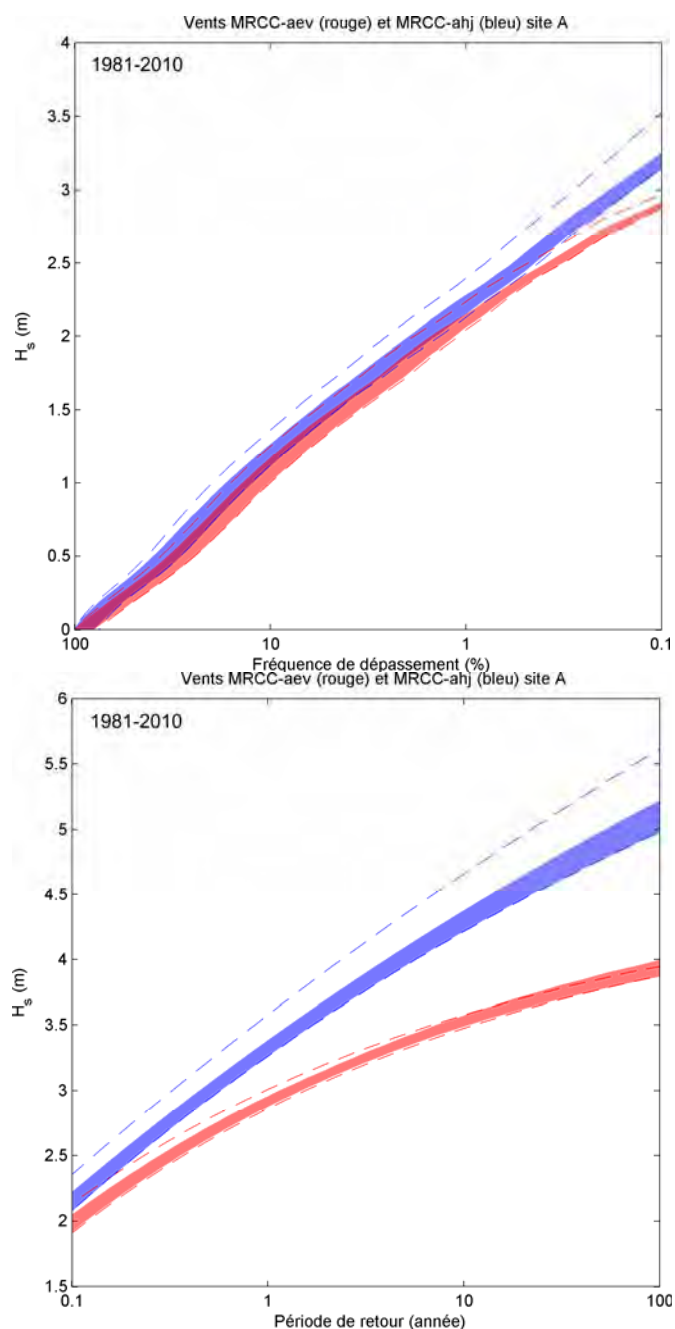


Figure 80 Comparaison des climats de vagues avec les vents de MRCC-aev (en rouge) et de MRCC-ahj (en bleu) selon différents scénarios de glace pour le site A, période 1981-2010. Le traitillé supérieur représente le scénario sans glace, la plage colorée est l'enveloppe de 6 scénarios de glace (formules empiriques) et le traitillé inférieur correspond à une couverture de glace continue du 15 décembre au 15 mars. En haut : fréquence de dépassement. En bas : 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 de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Saint-Ulric (site A). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans 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 de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Cap d'Espoir (site B). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans 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 de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Sept-Îles (site C). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans 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 de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Mont-Louis (site ML). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans 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 de MRCC-aev/ahj et l'atténuation des vagues selon les formules empiriques pour Pointe-aux-Loups (site IMC). Le symbole « n = » indique le nombre de formules empiriques utilisées. Les nombres écrits en grands caractères sont les moyennes de ces n formules, avec les valeurs minimales et maximales entre parenthèses. Les résultats de GENER sans 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 climat de vagues futur

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

Pour la période de retour de 50 ans, la tendance temporelle globale est effectivement positive si l'on considère 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). Elle est nettement moins marquée à Saint-Ulric (aev), à Sept-Îles (aev) et à Mont-Louis (ahj). Les changements varient fortement d'une période à l'autre à Saint-Ulric (ahj), à Mont-Louis (aev) et à Pointe-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 se situent typiquement entre 1 et 2,5 m, soit le 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 dans le golfe du Saint-Laurent avant la fin du XXI^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. Cela 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 pour le golfe du Saint-Laurent n'est peut-être pas nécessaire, puisque le scénario extrême (aucune atténuation) s'approche des scénarios considérant la glace.

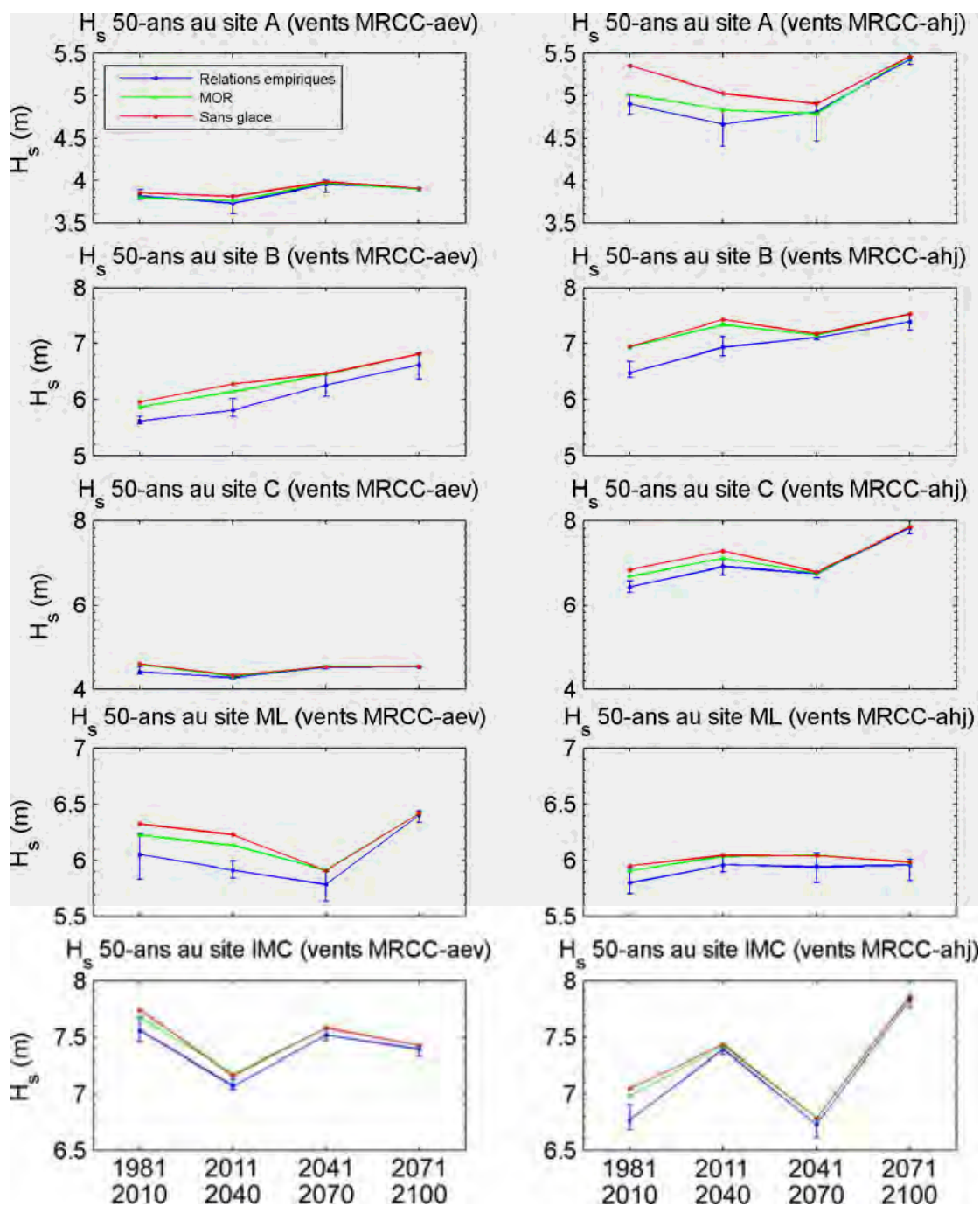


Figure 81 Évolution temporelle des climats de vagues (hauteur de la période de retour de 50 ans) sur des périodes de 30 ans pour les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj et pour les 5 sites d'étude (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations 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 MOR (en vert), sans aucune atténuation (en rouge)

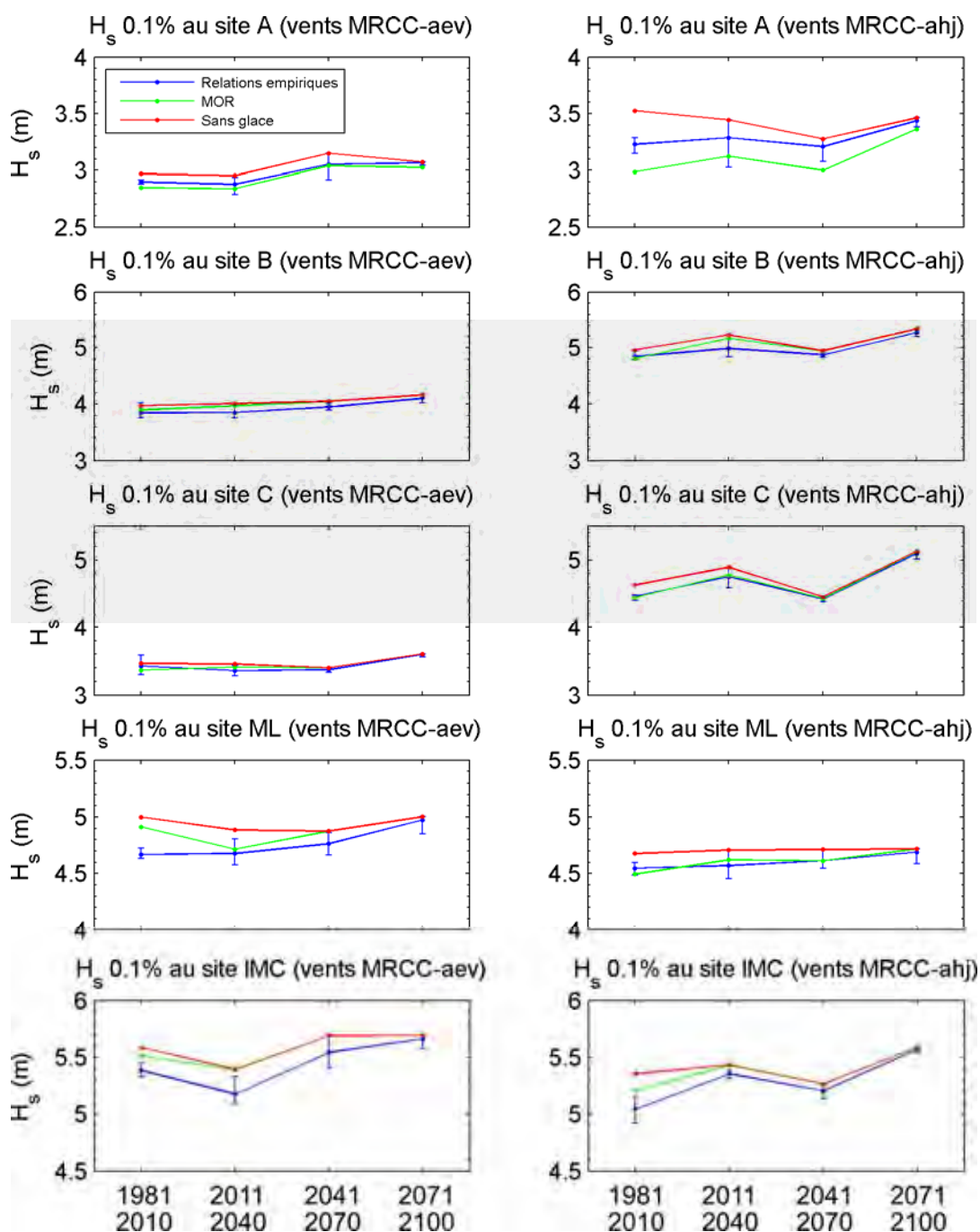


Figure 82 Évolution temporelle des climats de vagues (hauteur de fréquence de dépassement de 0,1 %) sur des périodes de 30 ans pour les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj et pour les 5 sites d'étude (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes 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 MOR (en vert), sans aucune atténuation (en rouge)

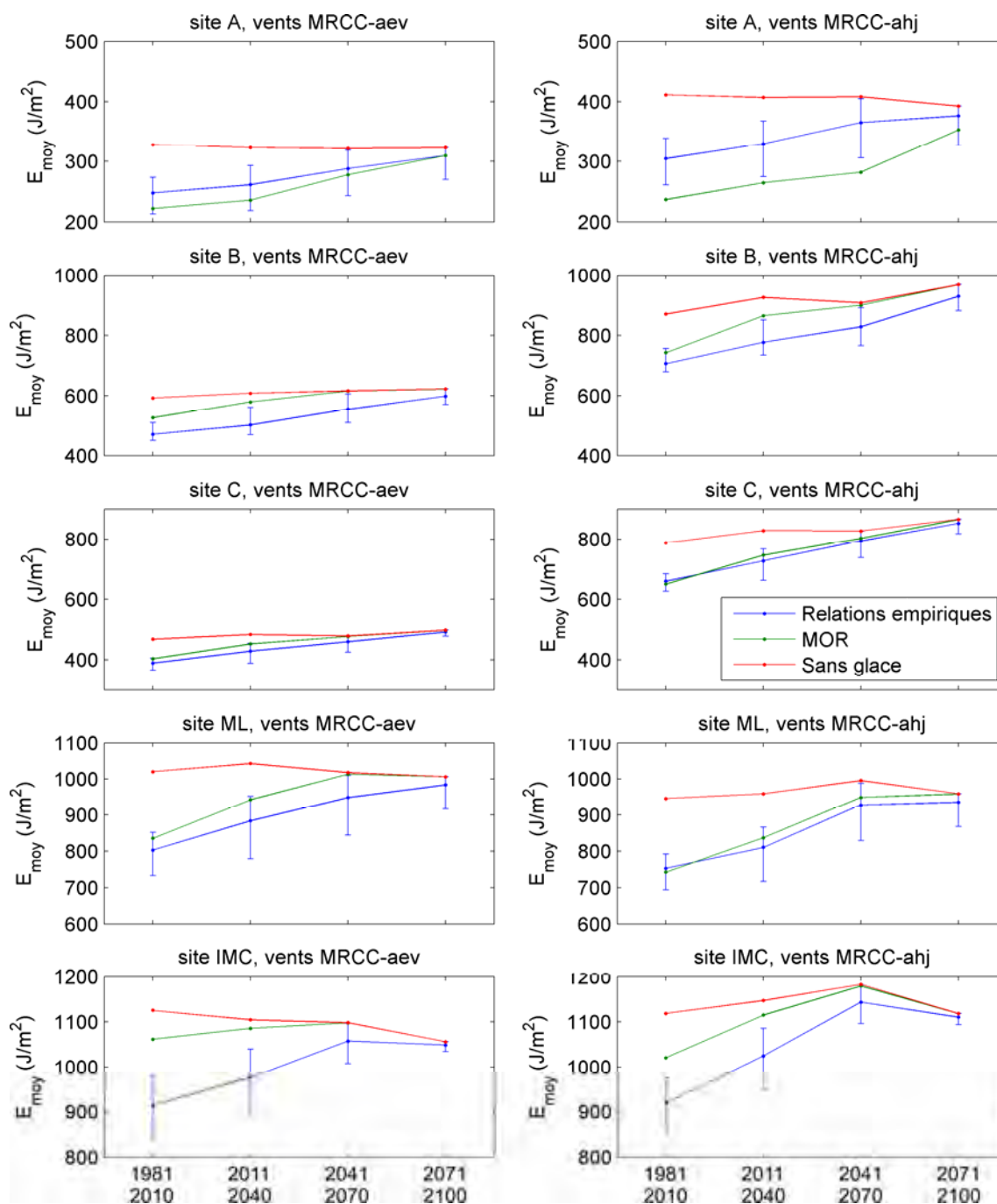


Figure 83 Évolution temporelle des climats de vagues (énergie moyenne des vagues) sur des périodes de 30 ans pour les vents de MRCC-aev et de MRCC-ahj et pour les 5 sites d'étude (A : Saint-Ulric, B : Cap d'Espoir, C : Sept-Îles, ML : Mont-Louis, IMC : Pointe-aux-Loups). Différentes estimations de l'atténuation des vagues par la glace sont présentées : la moyenne et l'intervalle avec les formules empiriques (en bleu), selon la glace du MOR (en vert), sans aucune atténuation (en rouge)

Les tendances sont similaires pour la fréquence de dépassement de 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 n'est considérée, l'énergie des vagues est relativement stable entre les différentes périodes de 30 ans (trait rouge sur la Figure 83). Cependant, 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 des vagues aux cinq sites d'étude avec les deux simulations de vents (MRCC-aev et MRCC-ahj), ainsi que les différences entre les roses des vagues des trois périodes. Les limites de l'échelle de couleurs 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 par rapport à 1981-2010, et 2071-2100 par rapport à 1981-2010), les barres sur le cercle extérieur représentent la variation de la fréquence de la plus grande classe de vagues dans chaque direction. De la même façon, les barres du cercle intermédiaire correspondent à la deuxième plus grande classe de vagues et celles du cercle intérieur, à 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 de la barre d'échelle bleue adjacente. Les variations de provenance des événements extrêmes se trouvent sur le cercle extérieur.

Les roses des 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 fetchs, et que ces derniers sont invariables (à l'échelle de temps étudiée). De fines variations existent néanmoins, qui sont bien visibles 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 vents; 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, pour la période 2071-2100, c'est également le cas de 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 de MRCC-aev, une diminution des vagues du nord-ouest.

Néanmoins, il faut souligner que les différences de roses des 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 climat de vagues futur 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, Zwiers et Swail, 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 changements climatiques A2 a été utilisé parmi les différents scénarios 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 GES 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).

Par ailleurs, des écarts non négligeables entre les vents issus des simulations MRCC-aev et MRCC-ahj ont été remarqués, même si ces simulations sont basées sur le même scénario de changements climatiques (A2). 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 de 1 m pour Sept-Îles). Wang et Swail (2006) ont mis en évidence comment des modèles climatiques différents, bien que basés sur un même scénario de changements climatiques, peuvent occasionner des écarts dans les climats de vagues. Les simulations MRCC-aev et MRCC-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 entre d'une part les simulations de vagues utilisant les vents du MRCC et d'autre part le climat de vagues 1981-2010 basé sur la réanalyse MERRA_{corr} ont également montré des écarts importants (section 5.3). Les variations passé-futur des hauteurs de vagues produites avec les vents du 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.

En outre, seuls les changements dans le climat de vagues annuel ont été étudiés ici. 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; Hundefcha *et al.*, 2008). Il pourrait également être pertinent d'étudier l'évolution dans le temps de la variabilité inter saisonnière du climat de vagues. Par exemple, Casas-Prat et Sierra (2011) ont analysé des scénarios futurs de vagues pour 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).

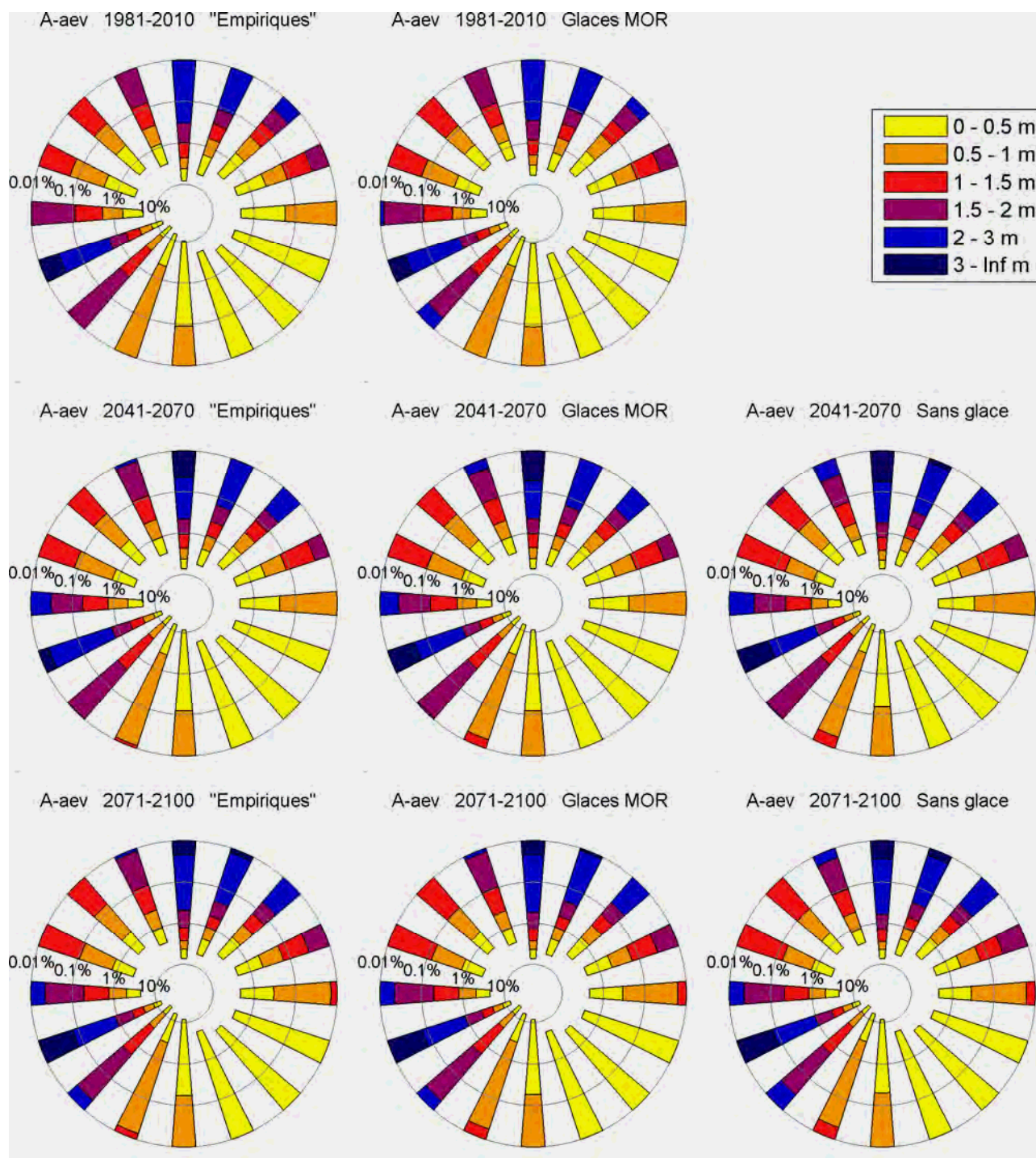


Figure 84 Roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

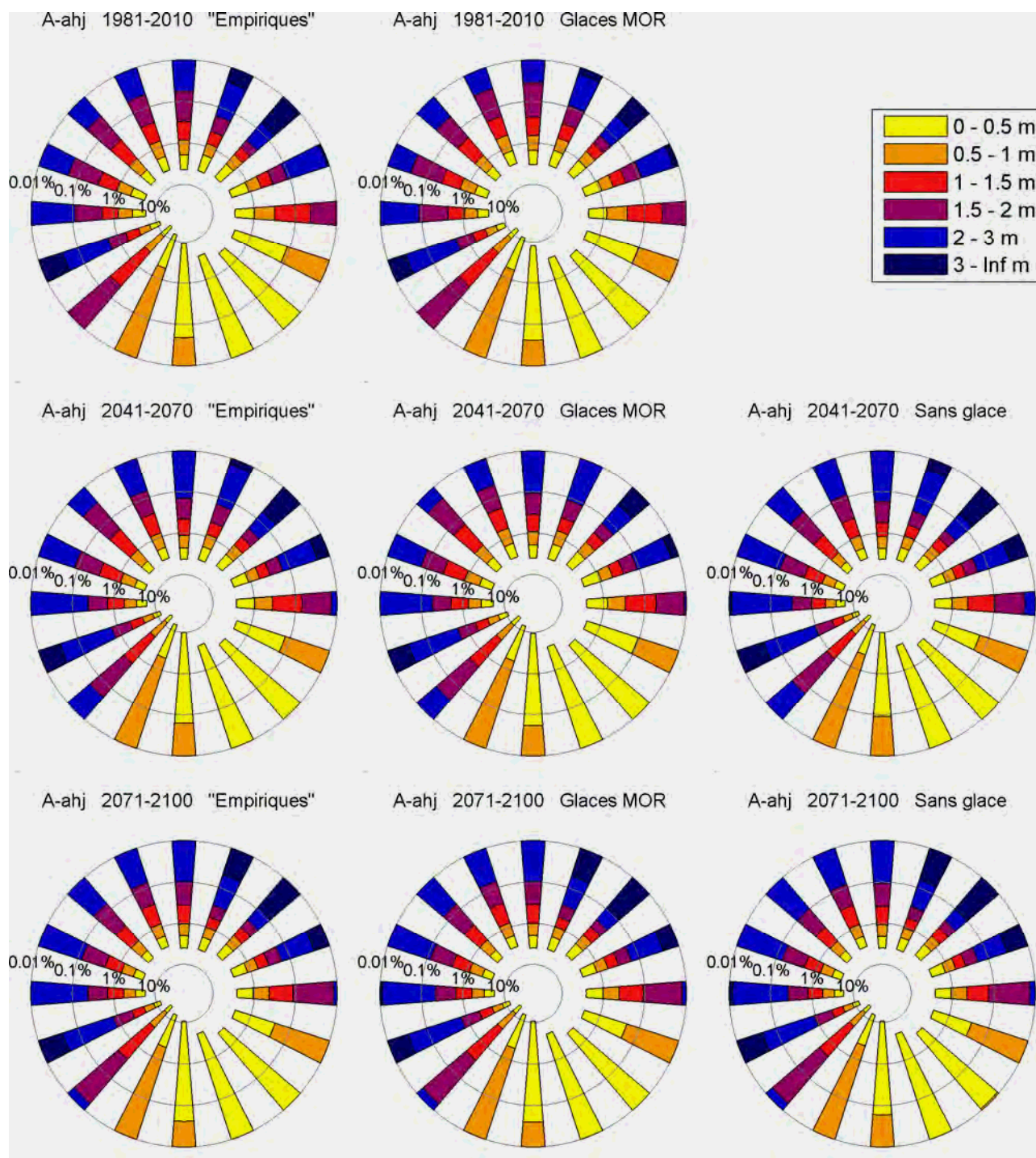


Figure 85 Roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

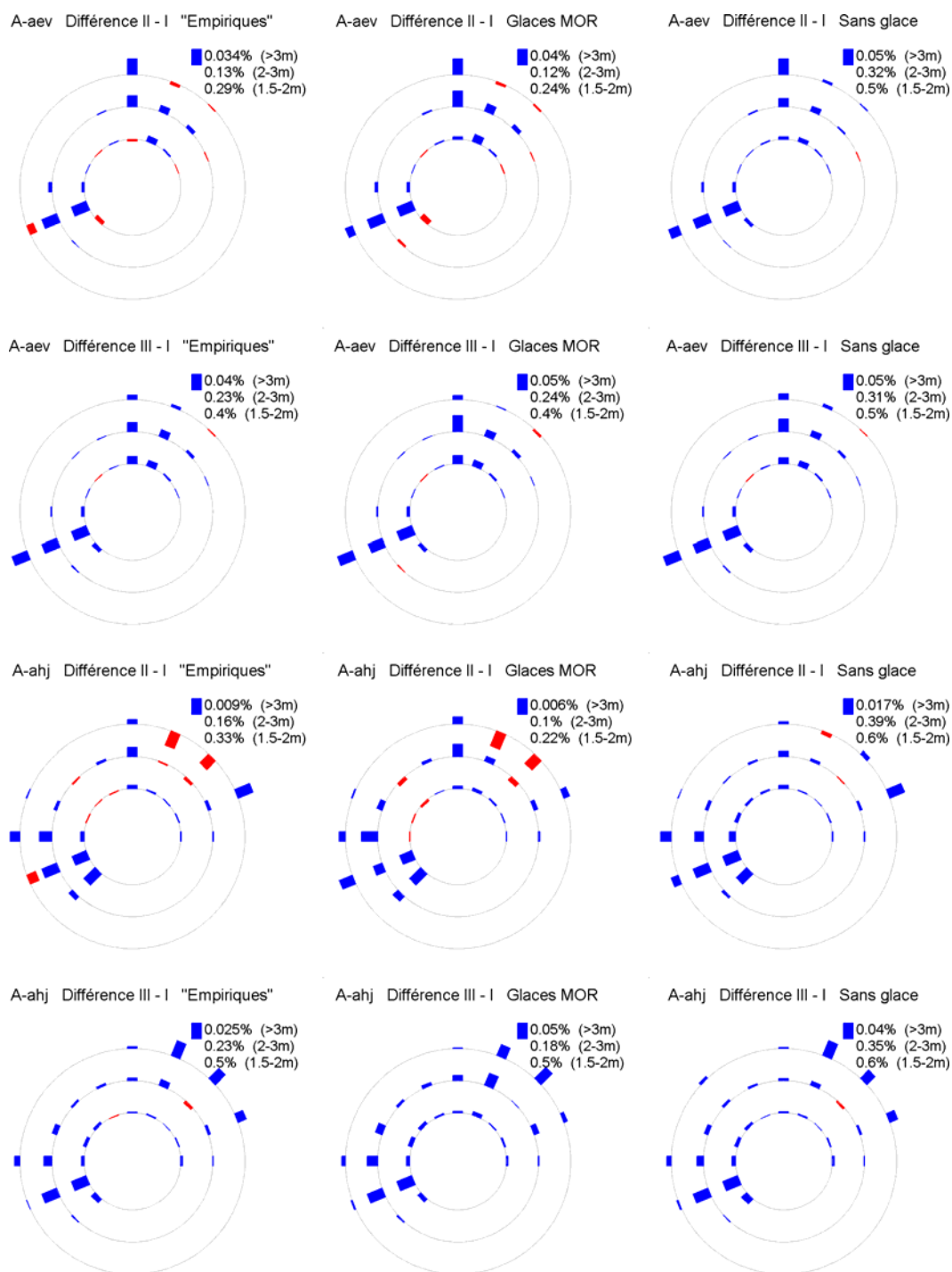


Figure 86 Différences entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Saint-Ulric avec les vents de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 217 pour les explications)

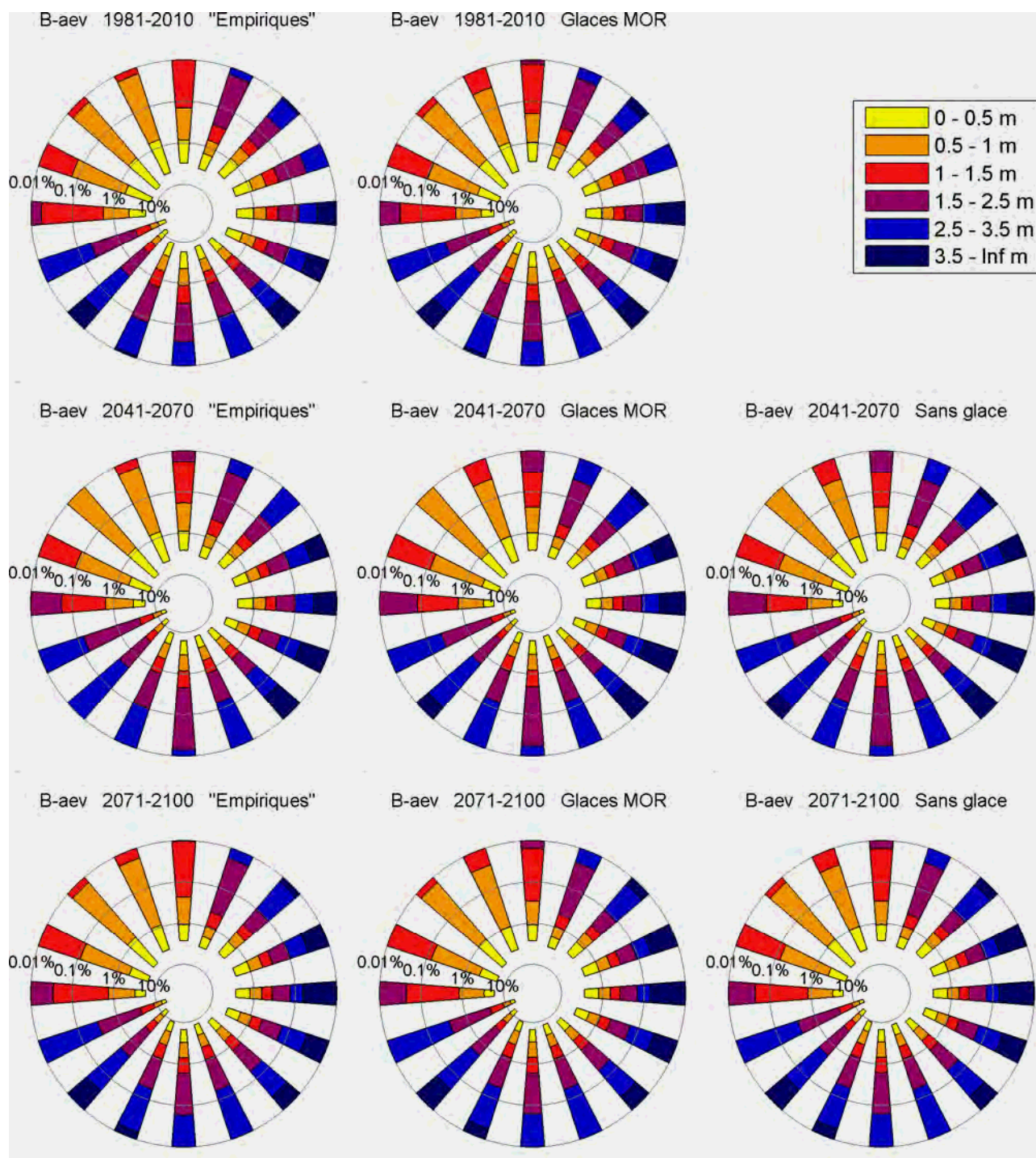


Figure 87 Roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

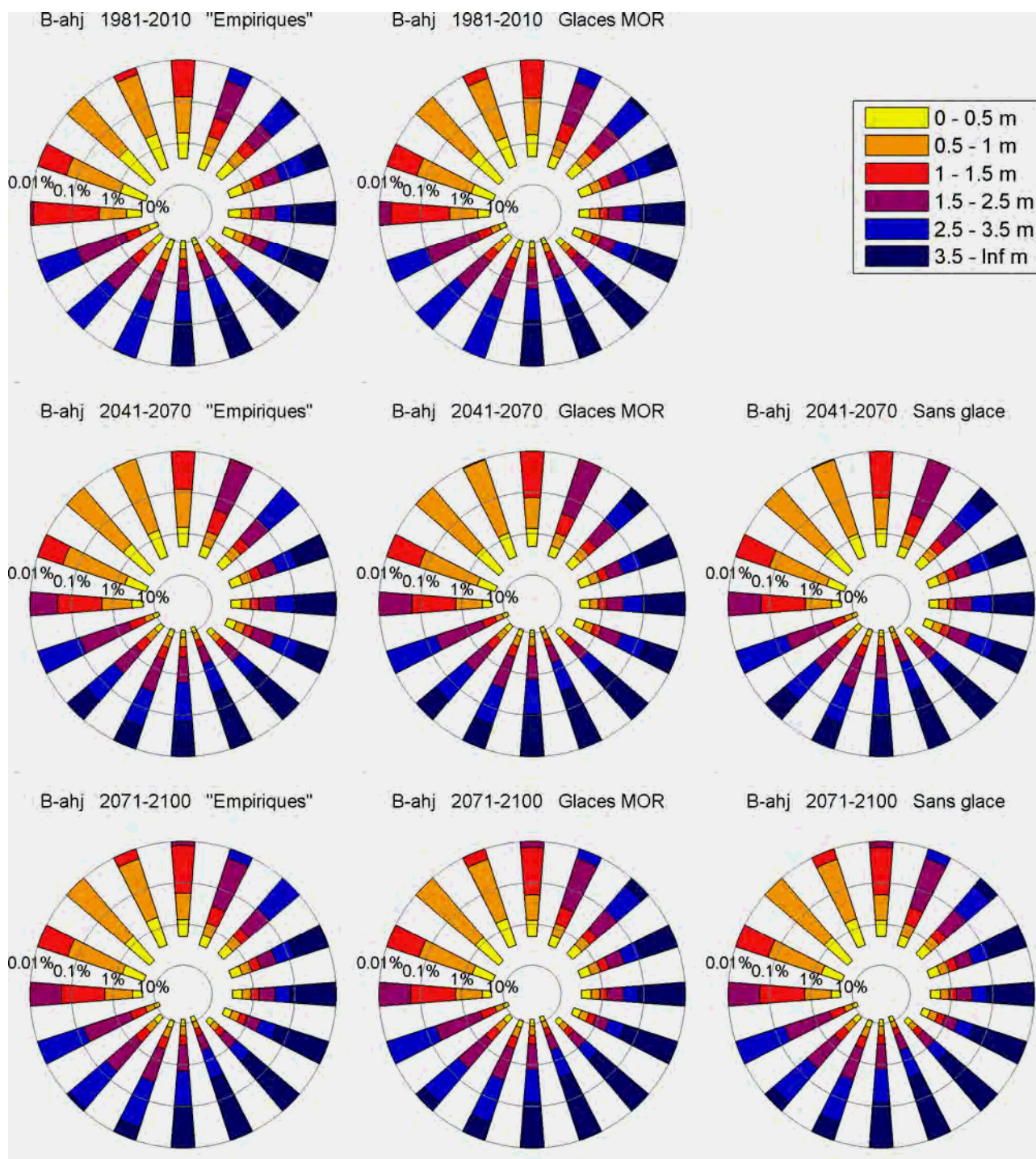


Figure 88 Roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

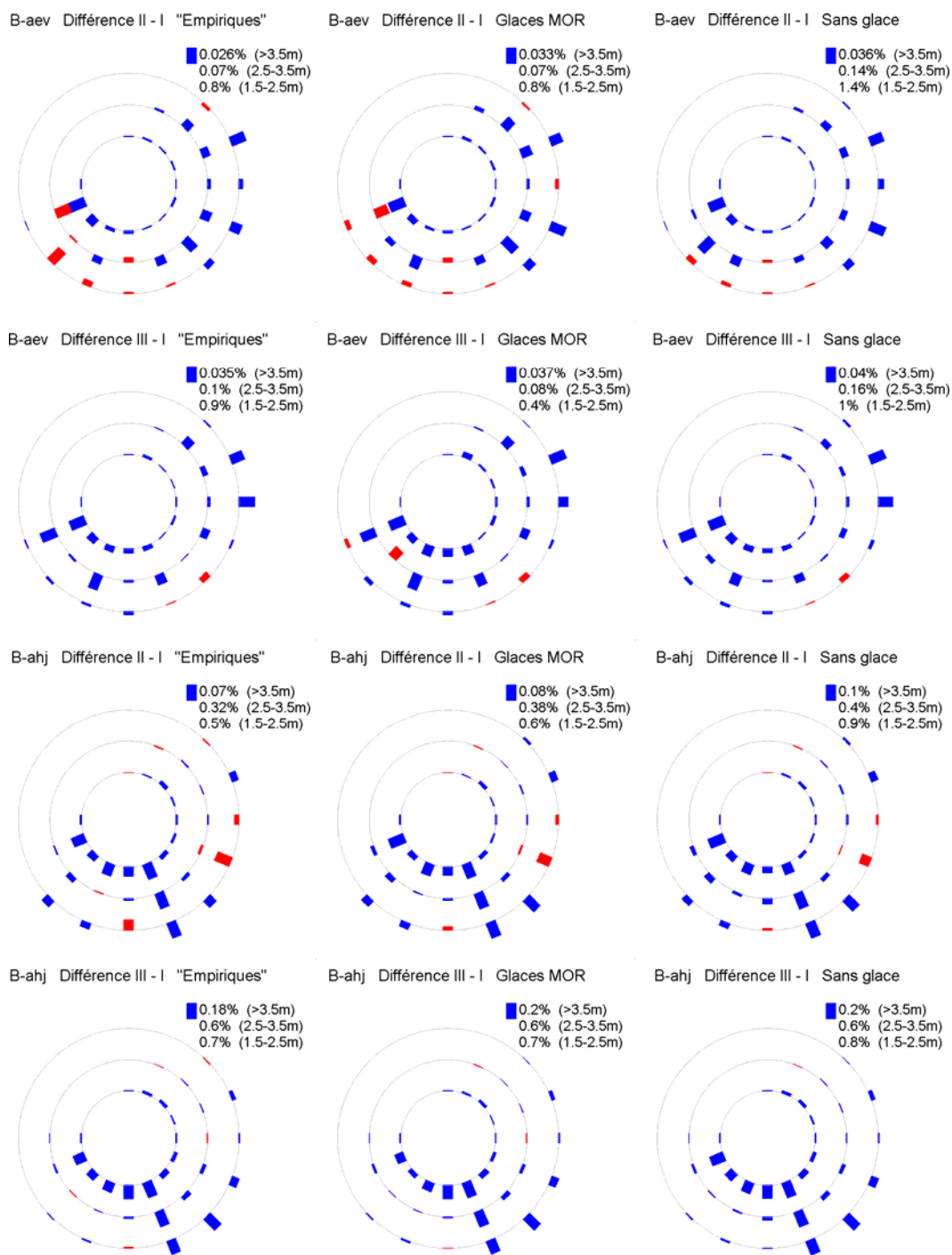


Figure 89 Différences entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Cap d'Espoir avec les vents de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 217 pour les explications)

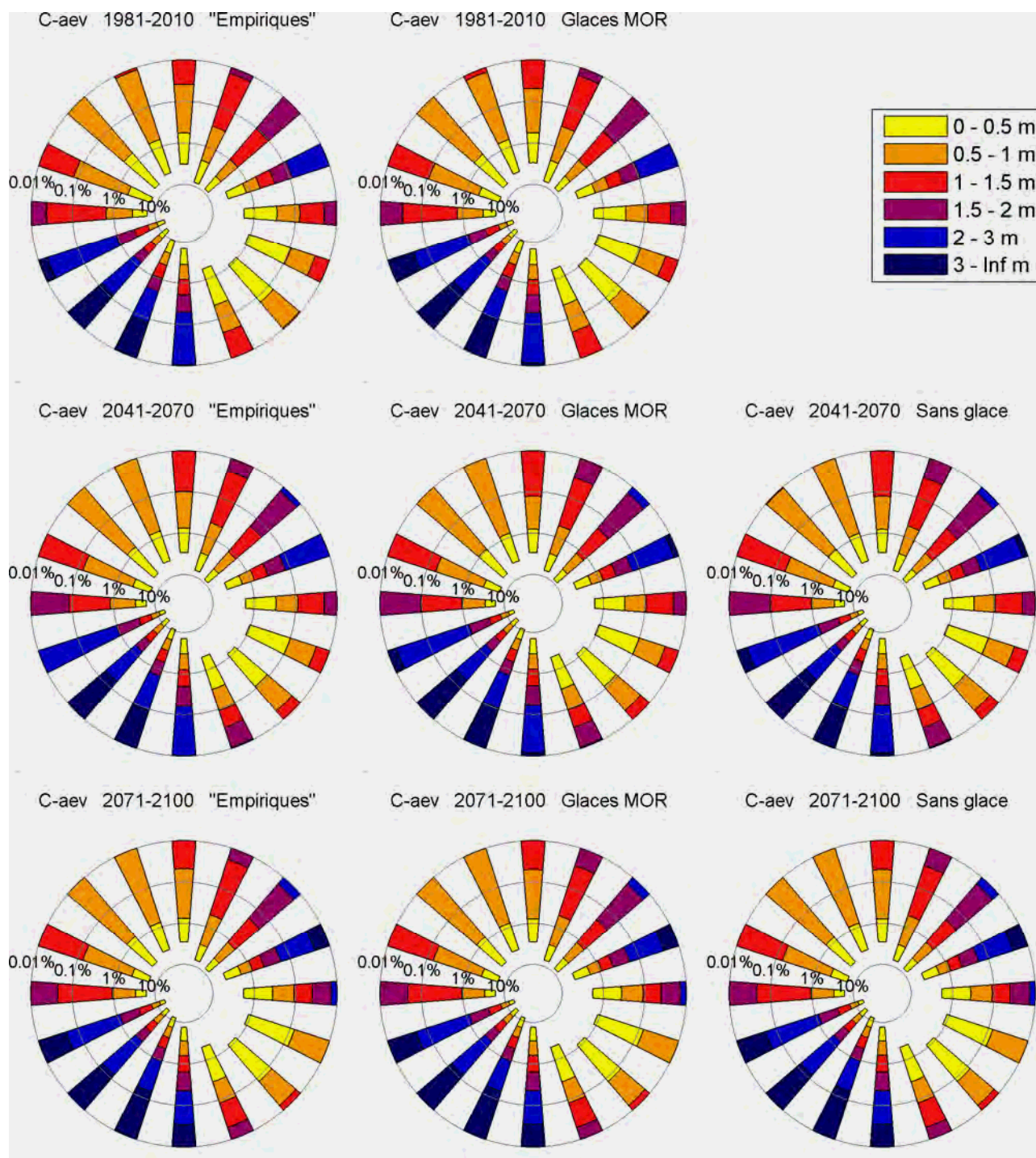


Figure 90 Roses des vagues à Sept-Îles avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)

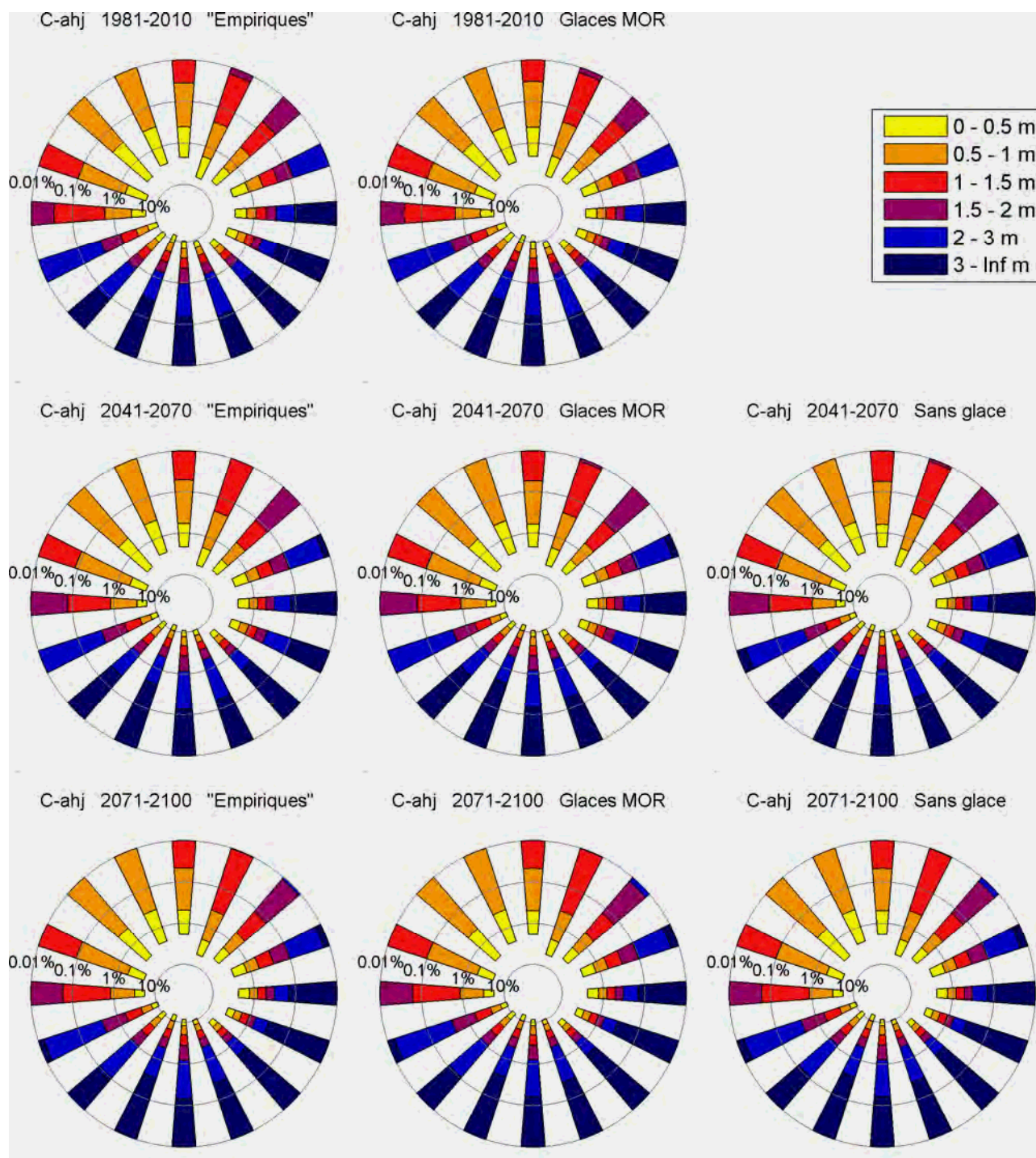


Figure 91 Roses des vagues à Sept-Îles avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune atténuation)

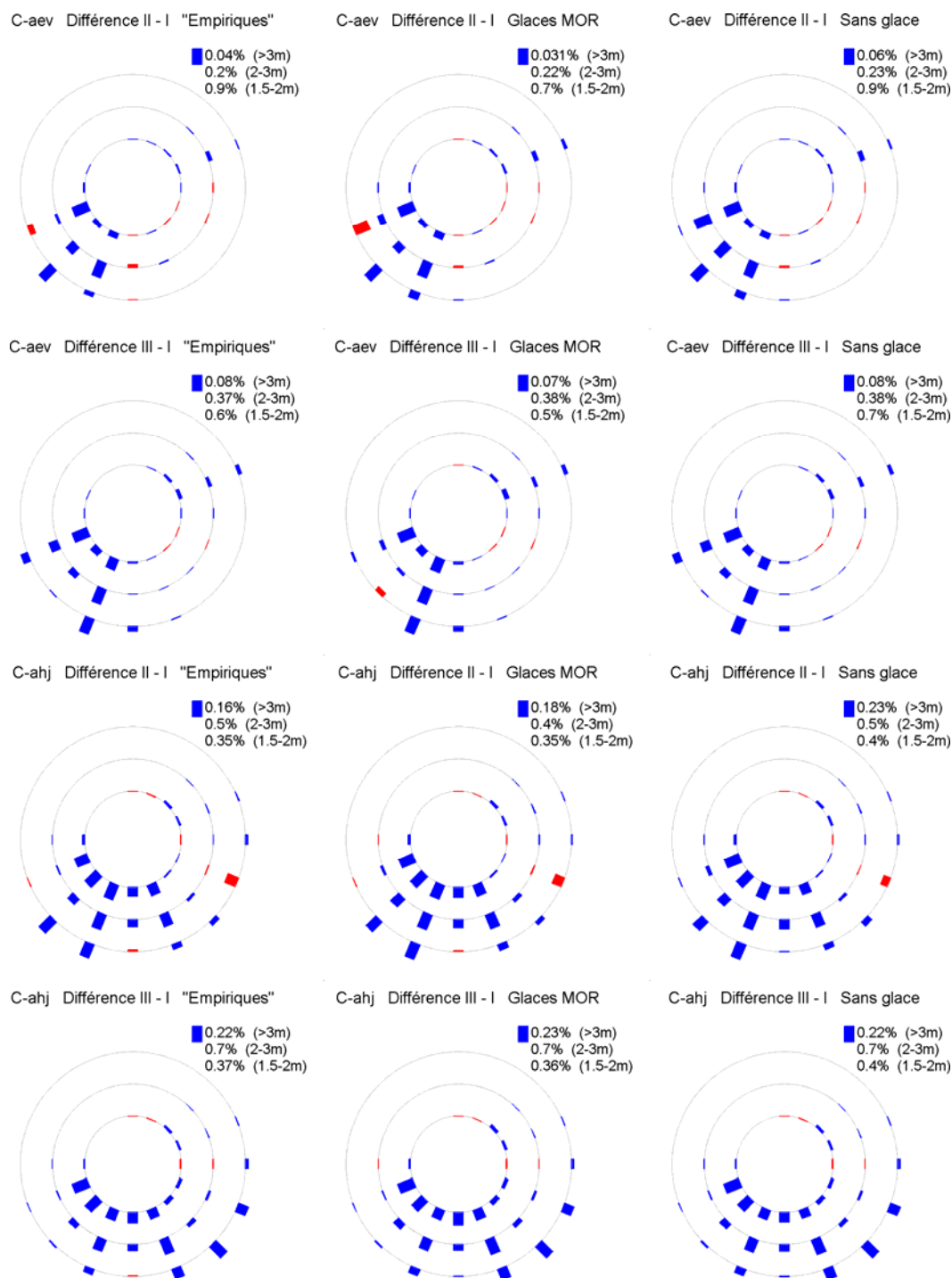


Figure 92 Différences entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Sept-Îles avec les vents de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 217 pour les explications)

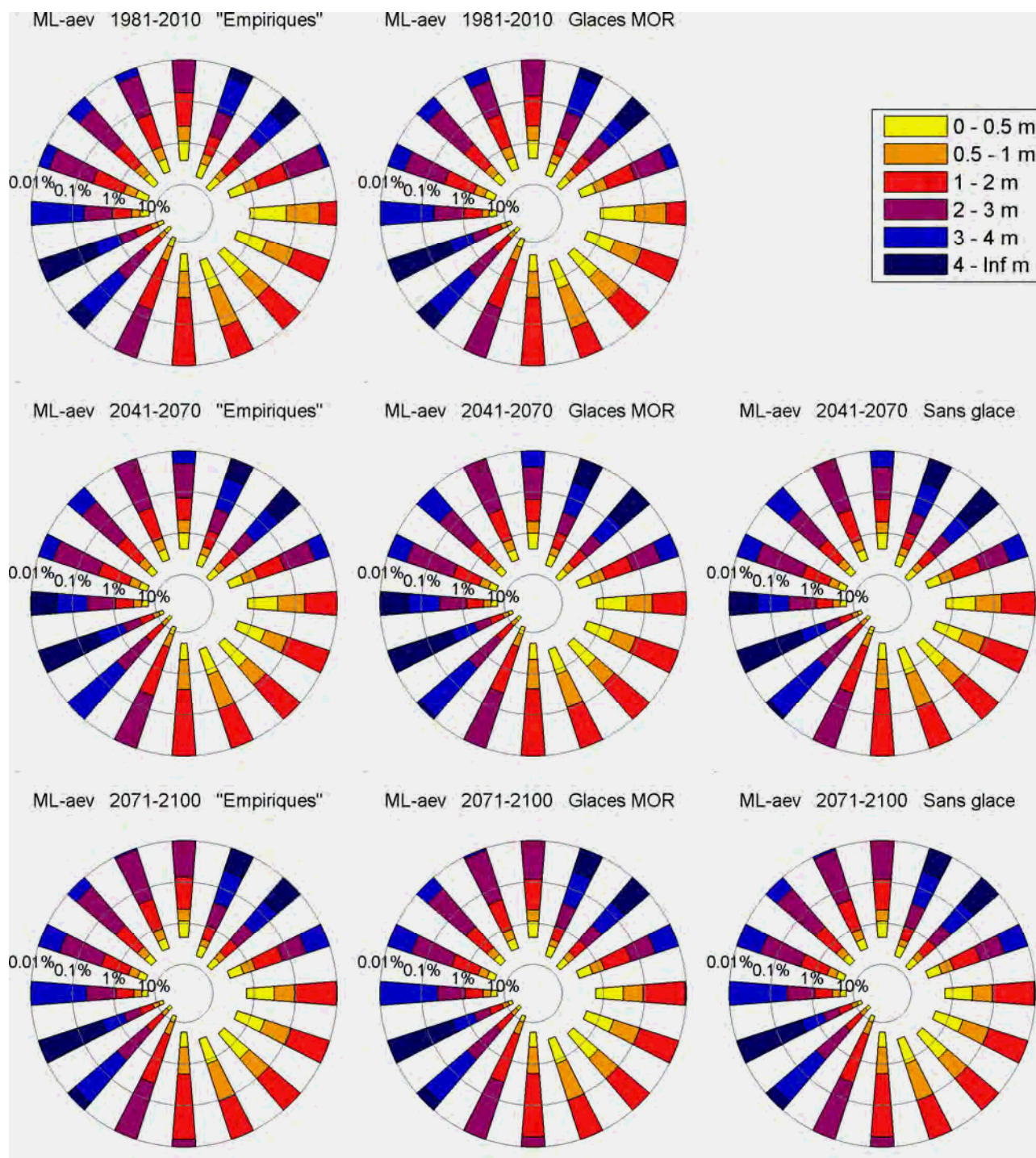


Figure 93 Roses des vagues à Mont-Louis avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

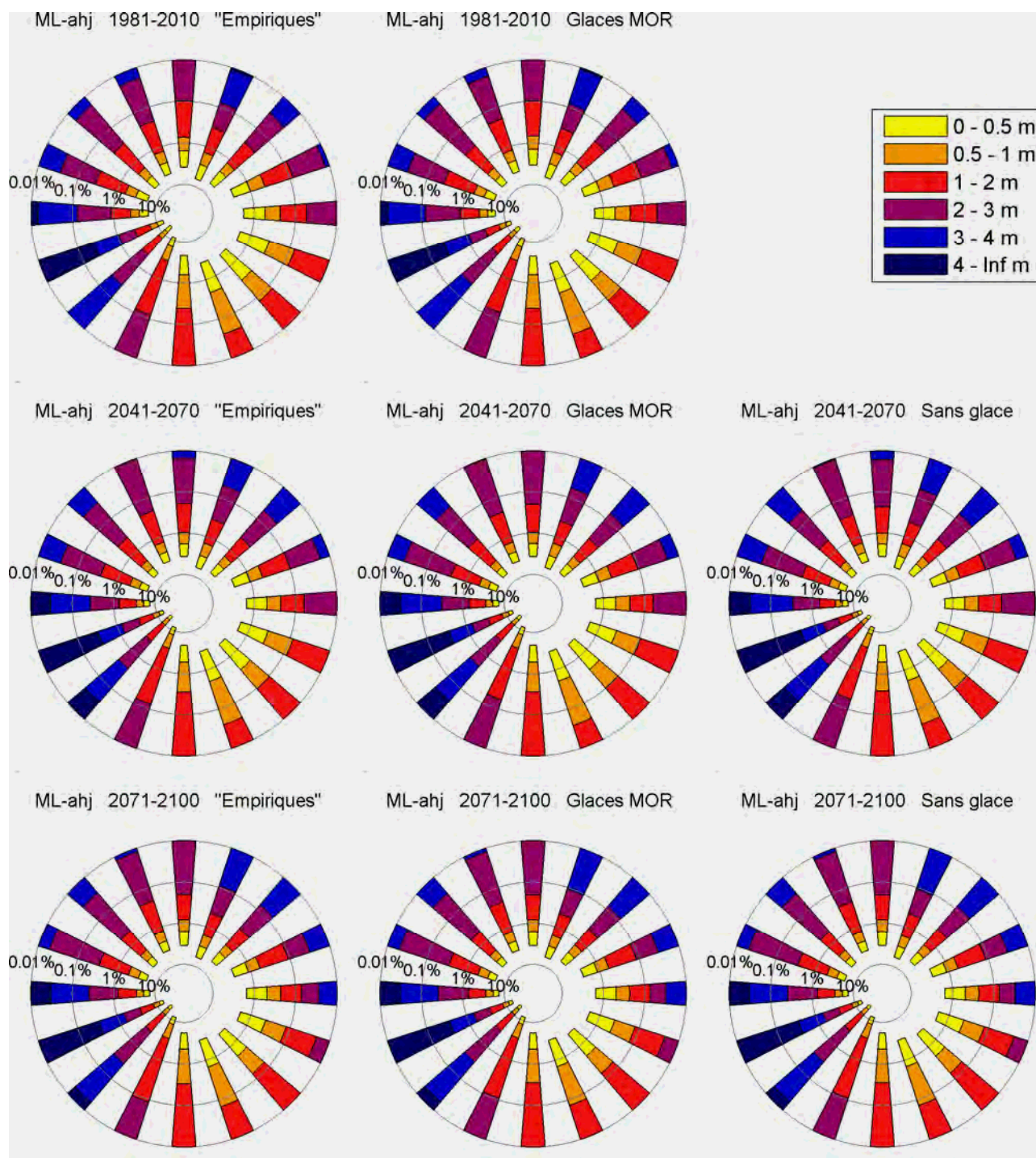


Figure 94 Roses des vagues à Mont-Louis avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

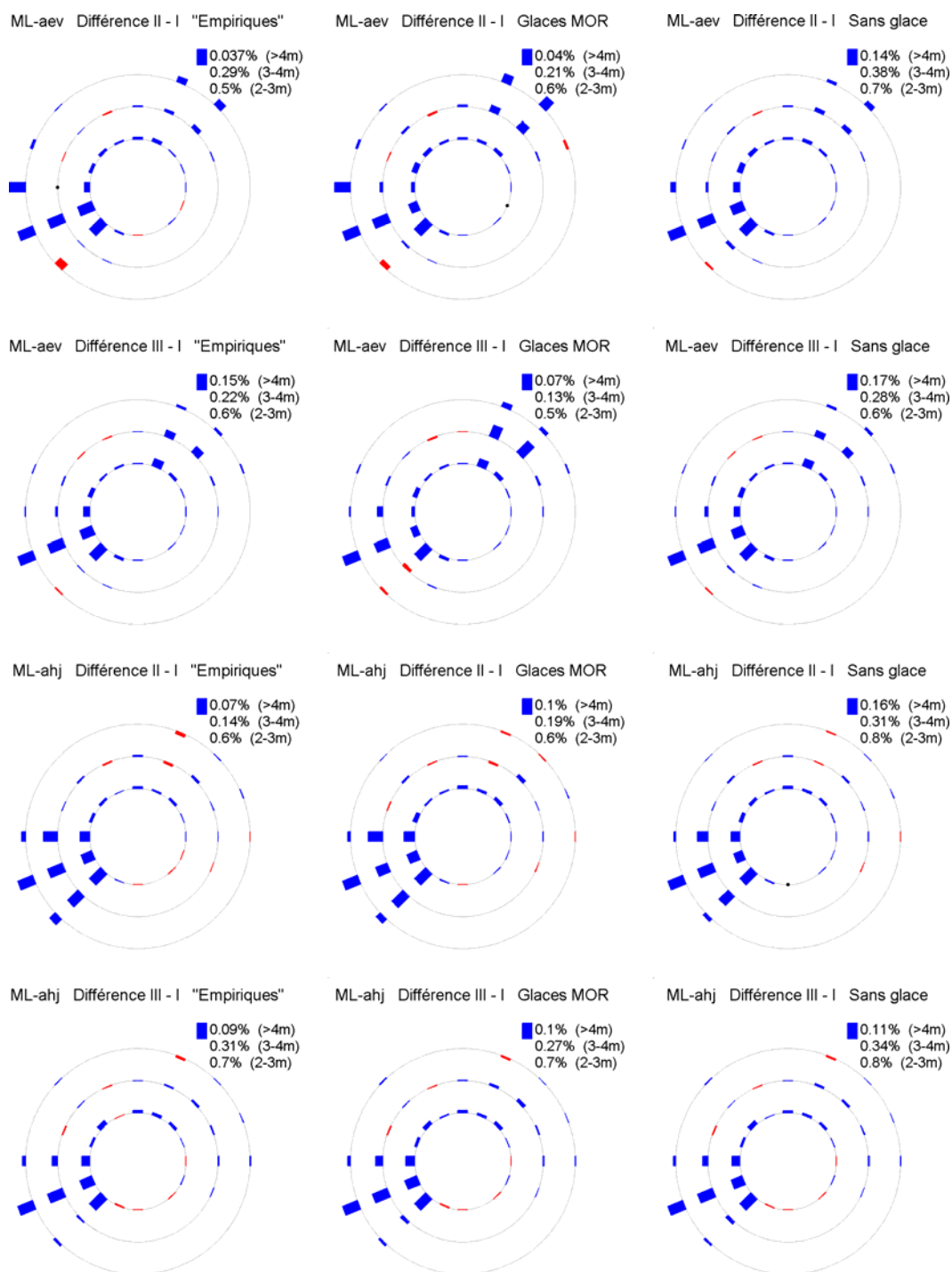


Figure 95 Différences entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Mont-Louis avec les vents de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 217 pour les explications)

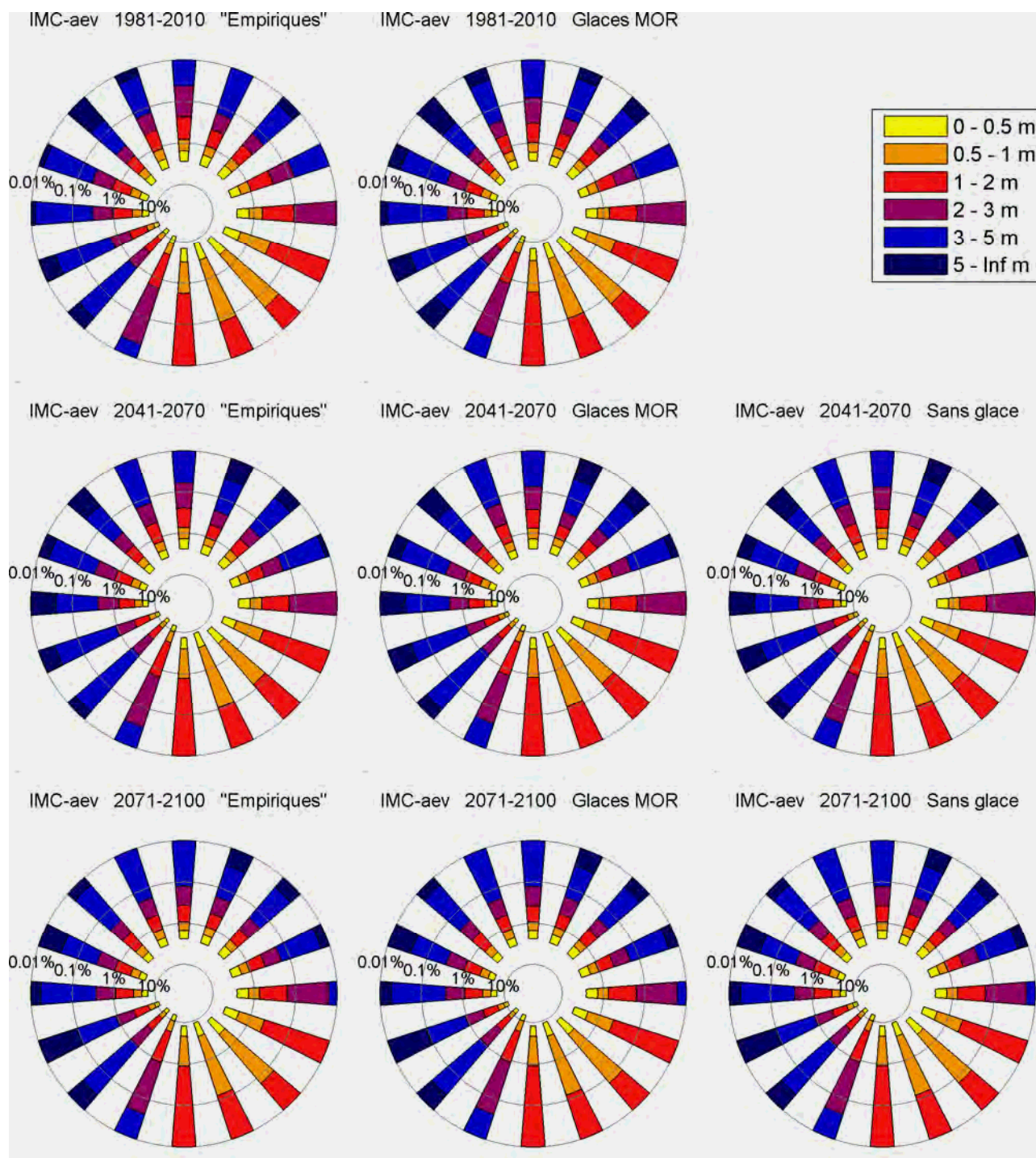


Figure 96 Roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents de MRCC-aev pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

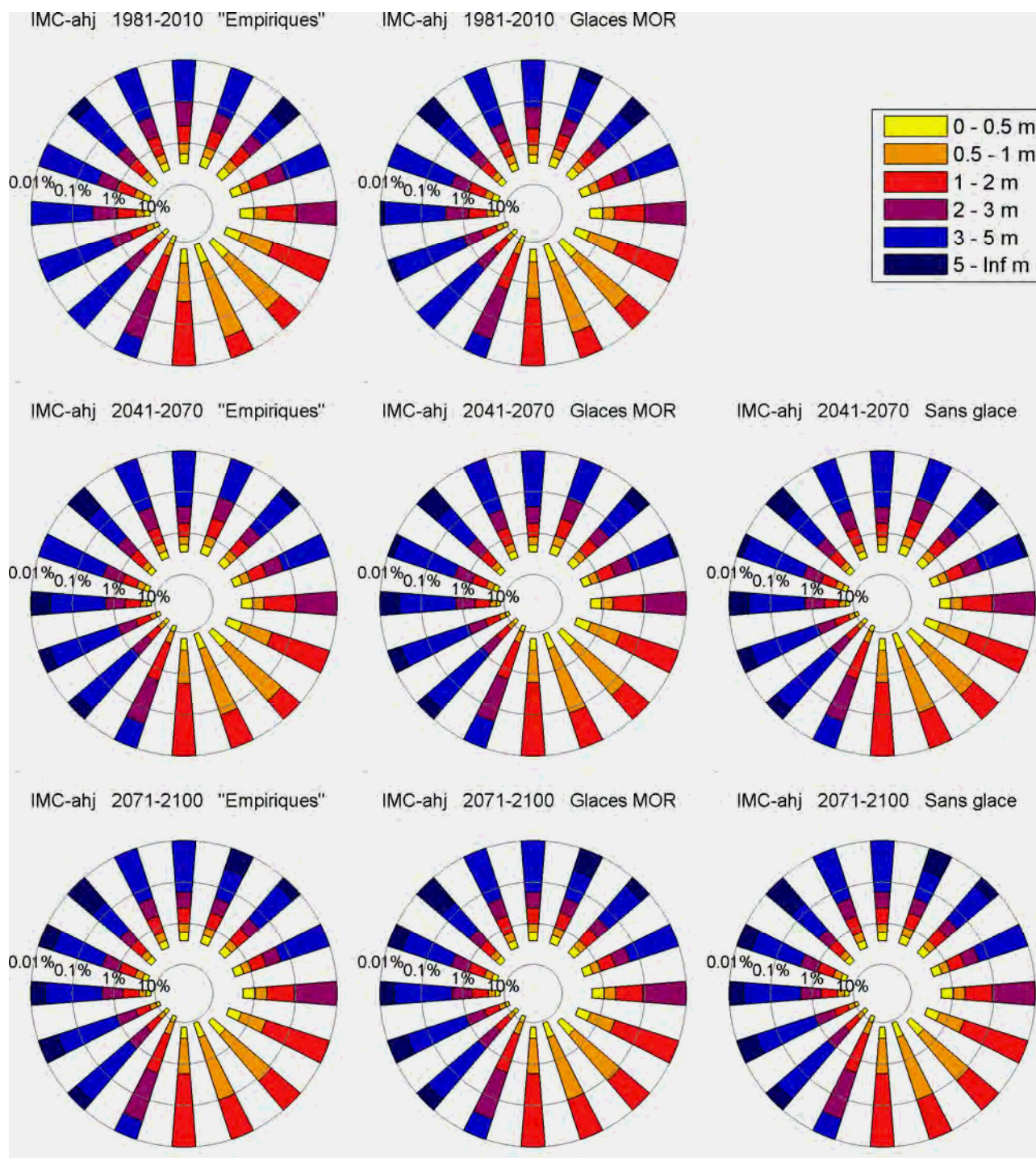


Figure 97 Roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents de MRCC-ahj pour trois périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (aucune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

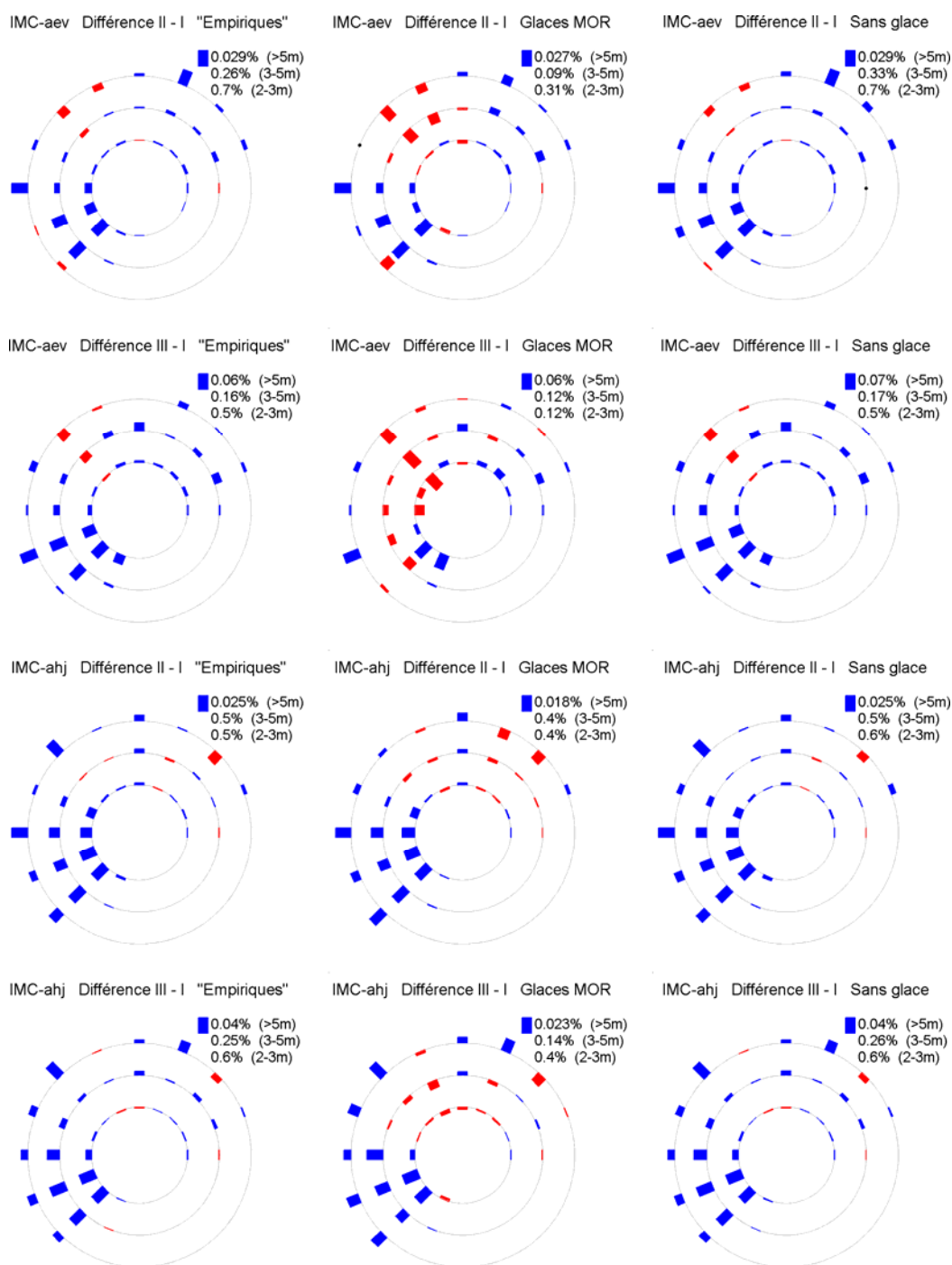


Figure 98 Différences entre les périodes 1981-2010 (I), 2041-2070 (II) et 2071-2100 (III) pour les trois plus grandes classes des roses des vagues à Pointe-aux-Loups avec les vents de MRCC-aev/ahj et pour trois scénarios d'atténuation des vagues par la glace : à gauche, avec les formules empiriques, au centre, selon la glace du MOR et à droite, en absence de glace (cf. p. 217 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 surestime les hauteurs dans le Golfe (Cap d'Espoir et Sept-Îles) d'un facteur de ~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'il y ait 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 présentent une forte dispersion pour Cap d'Espoir et Saint-Ulric. Celles des plus hautes vagues sont correctement représentées pour les sites du Golfe, mais pas pour Saint-Ulric.

Il existe donc une dichotomie entre les simulations réalisées pour les sites du Golfe et celui de l'Estuaire. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette différence : le modèle EC utilise les vents de 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 longs dans le Golfe et l'âge des vagues atteignant Cap d'Espoir et Sept-Îles est plus important que celui des vagues touchant Saint-Ulric; et Saint-Ulric reçoit de l'énergie des vagues générées dans le Golfe et ayant lentement tourné autour du nord de la Gaspésie, ce qui n'est pas simple à bien modéliser.

Il était prévu initialement de valider GENER avec le modèle EC, mais à cause des surévaluations de celui-ci 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 vents 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 adoptées pour prédire le couvert de glace futur, soit les formules empiriques utilisant les degrés-jours de gel et les sorties de glace du MOR, indiquent des tendances similaires pour la période 1970-2070 selon le scénario A2. La durée d'englacement, le couvert de glace et l'atténuation des vagues par la glace diminueront progressivement. Ils deviendront négligeables à la fin du XXI^e siècle et, selon certaines projections de glace, dès les environs de 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 qui existe entre les différentes projections de glace. Malgré cette incertitude, l'atténuation des vagues par la glace pourrait probablement être ignorée à partir d'environ 2080

pour des études simplifiées du climat de vagues au large, 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 de 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). Cette hausse est marquée pour l'énergie moyenne des vagues et elle est plus variable pour les vagues extrêmes, selon les sites, les simulations de vents et les différentes projections de glace, avec, par exemple, une augmentation entre 5 cm et 1 m pour les hauteurs de période de retour de 50 ans. La tendance est moins claire si les périodes intermédiaires 2011-2040 et 2041-2070 sont aussi considérées, avec, dans certains cas, des baisses passagères des vagues extrêmes (mais pas de l'énergie moyenne des vagues).

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

7 RÉFÉRENCES

- ASSEL, R. A. (1980). "Maximum freezing degree-days as a winter severity index for the great lakes, 1897-1977". *Monthly Weather Review*, vol. 108, p. 1440-1445.
- BALAKRISHNAN, N., V. VOINOV et M. S. NIKULIN (2013). *Chi-squared goodness of fit tests with applications*. Amsterdam, Academic Press, 256 p.
- BATTJES, J. A., et J. P. F. M. JANSSEN (1978). « Energy loss and set-up due to breaking of random wave ». Dans *Proc. 16th Conf. Coastal Engineering (Hamburg)*, New York, ASCE, p. 569-587.
- BERNATCHEZ, P., et J. M. M. DUBOIS (2004). "Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien". *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, p. 45-71.
- BIRD, E. C. F. (1985). *Coastline changes: A global review*. Chichester, Wiley, 219 p.
- BISMUTH, E., U. NEUMEIER et D. DUMONT (2012). « Impact du couvert de glace sur le régime de vagues du Saint-Laurent ». Dans *Colloque Québec-Océan, 7-9 décembre 2012, Montréal, Québec, Québec-Océan*.
- BOOIJ, N., R. C. RIS et L. H. HOLTHUIJSEN (1999). "A third-generation wave model for coastal regions, 1, Model description and validation". *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, n° C4, p. 7649-7666.
- BOWERS, J. A., I. D. MORTON et G. I. MOULD (2000). "Directional statistics of the wind and waves". *Applied Ocean Research*, vol. 22, n° 1, p. 13-30.
- CAIRES, S., et S. STERL (2005). "100-year return value estimate for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data". *Journal of Climate*, vol. 18, p. 1032-1048.
- CASAS-PRAT, M., et J. P. SIERRA (2011). "Future scenario simulations of wave climate in the NW Mediterranean Sea". *Journal of Coastal Research*, SI 64, p. 200-204.
- CAVALERI, L., et P. MALANOTTE-RIZZOLI (1981). "Wind wave prediction in shallow water: theory and applications". *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, n° C11, p. 10961-10973.
- CAYA, D., et R. LAPRISE (1999). "A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: the Canadian RCM". *Monthly Weather Review*, vol. 127, n° 3, p. 341-362.
- CERC (1984). *Shore protection manual*. Washington, Coastal Engineering Research Center, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. Government Printing Office, pagination multiple.
- CHARLES, E., D. IDIER, P. DELECLUSE, M. DEQUE et G. Le COZANNET (2012). "Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France". *Ocean Dynamics*, vol. 62, p. 831-848. doi : 10.1007/s10236-012-0534-8.

COLES, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London, Springer, 208 p.

DEBERNARD, J. B., et L. P. ROED (2008). "Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas: a revisit". *Tellus*, vol. 60A, p. 427-438. doi : 10.1111/j.1600-0870.2008.00312.x.

DESJARDINS, L., et Y. OUELLET (1984). « Modèles numériques utilisés pour la conception des ouvrages maritimes ». Dans *Comptes rendus du Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique*, Montréal, Association canadienne-française pour l'avancement des sciences, p. 187-224. [Colloque tenu dans le cadre du 52^e Congrès annuel de l'ACFAS].

DE WINTER, R. C., A. STERL, J. W. DE VRIES, S. L. WEBER et G. RUESSINK (2012). "The effect of climate change on extreme waves in front of the Dutch coast". *Ocean Dynamics*, vol. 62, p. 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". Dans *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, Ottawa, Conseil national de recherches Canada, p. 47-61.

DRAGANI, W. C., E. GARAVENTO, C. G. SIMIONATO, M. N. NUNEZ, P. MARTIN et M. I. CAMPOS (2008). "Wave simulation in the outer Rio de la Plata estuary: evaluation of SWAN model". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 134, n° 5, p. 299-305.

DYKES, J. D., D. W. WANG et J. W. BOOK (2009). "An evaluation of a high resolution operational wave forecasting system in the Adriatic sea". *Journal of Marine Systems*, vol. 78, p. S255-S271.

ETAMAD-SHAHIDI, A., M. H. KAZEMINARZHAD et S. J. MOUSAVI (2009). "On the prediction of wave parameters using simplified method". *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 505-509.

FISHER, N. I. (1993). *Statistical analysis of circular data*. Cambridge, Cambridge University Press, 277 p.

FREQUEST, D. (2005). *MANICE : manuel des normes d'observation des glaces*. 9^e édition, Ottawa, Environnement Canada, Service canadien des glaces, 155 p.

GIEC (2007). « Résumé à l'intention des décideurs ». Dans SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR et H. L. MILLER (dir.). *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, Cambridge University Press, p. 1-18.

GORRELL, L., B. RAUBENHEIMER, S. ELGAR et R. T. GUZA (2011). "SWAN predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry". *Coastal Engineering*, vol. 58, p. 510-516.

- HANSON, J. L., B. A. TRACY, H. L. TOLMAN et R. DOUGLAS SCOTT (2009). "Pacific hindcast of three numerical wave models". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 26, p. 1614-1633.
- HASSELMANN, K., T. P. BARNETT, E. BOUWS, H. CARLSON, D. E. CARTWRIGHT, K. ENKE, J. A. EWING, H. GIENAPP, D. E. HASSELMANN, P. KRUSEMAN, A. MEERBURG, P. MÜLLER, D. J. OLBERS, K. RICHTER, W. SELL et H. WALDEN (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)". *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungsheft A12*, p. 3-95.
- HEMER, M. A., X. L. WANG, R. WEISSE et V. R. SWAIL (2012). "Advancing wind-waves climate science: the COWCLIP project". *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, p. 791-796. doi : 10.1175/BAMS-D-11-00184.1.
- HOLTHUIJSEN, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*, Cambridge, Cambridge University Press, 387 p.
- HSU, Y. L., W. E. ROGERS et J. D. DYKES (2002). "WAM performance in the Gulf of Mexico with COAMPS wind". Dans *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, October 21-25, Banff, Alberta, Canada*, Toronto, Meteorological Service of Canada, p. 151-159.
- HUNDECHA, Y., A. ST-HILAIRE, T. B. M. J. OUARDA, S. EL ADLOUNI et P. GACHON (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*, vol. 47, p. 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*. Sous la direction de S. SOLOMON, D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR et H. L. MILLER, Cambridge, Cambridge University Press, 996 p.
- JACOB, D., W. PERRIE, B. TOULANY, F. SAUCIER, D. LEFAIVRE et V. TURCOTTE (2004). "Wave model validation in the St. Lawrence River Estuary". Dans *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, October 21-25, Banff, Alberta, Canada*, Toronto, Meteorological Service of Canada, p. 477-483.
- JONATHAN, P., et K. EWANS (2013). "Statistical modelling of extreme ocean environments". *Ocean Engineering*, vol. 62, p. 91-109.
- JUNGCLAUS, J. H., M. BOTZET, H. HAAK, N. KEENLYSIDE, J. J. LUO, M. LATIF, J. MAROTZKE, U. MIKOLAJEWICZ et E. ROECKNER (2006). "Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM". *Journal of Climate*, vol. 19, p. 3952-3972.
- KAMPHUIS, J. W. (2010). *Introduction to coastal engineering and management*. Singapour, World Scientific Publishing, 525 p. (Advances Series on Ocean Engineering).

KANAMITSU, M., W. EBISUZAKI, J. WOOLLEN, S. K. YANG, J. J. HNILO, M. FIORINO et G. L. POTTER (2002). "NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2)". *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, p. 1631-1643.

KOMAR, P. D. (1998). "Wave erosion of a massive artificial coastal landslide". *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 23, p. 415-428.

KOMEN, G. J., L. CAVALERI, M. DONELAN, K. HASSELMANN, S. HASSELMANN et P. A. E. M. JANSSEN (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. New York, Cambridge University Press, 532 p.

LAMBERT, A., U. NEUMEIER, J.-P. SAVARD, D. JACOB et D. DUMONT (2011). « Modélisation du futur climat de vagues dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent : présentation du projet ». Dans *10^e Assemblée générale annuelle de Québec-Océan, 17-18 novembre 2010, Lac-Delage, Québec, Québec-Océan*.

LAMBERT, A., U. NEUMEIER et D. JACOB (2012). *Évaluation du modèle WAM opéré par Environnement Canada dans le golfe du Saint-Laurent : résultats préliminaires pour les tempêtes de l'automne 2010*, Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski. [Rapport technique remis au ministère des Transports du Québec].

LAMBERT, A., U. NEUMEIER, S. DREJZA, J.-P. SAVARD et D. JACOB (2012a). « Modélisation des tempêtes de décembre 2010 sur le littoral de Sept-Îles, golfe du Saint-Laurent ». Dans *Colloque Québec-Océan, 7-9 décembre 2012, Montréal, Québec, Québec-Océan*.

LAMBERT, A., U. NEUMEIER, D. JACOB et J.-P. SAVARD (2012b). "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., Y. GODA, P. J. HAWKES, E. MANSARD, M. J. MARTÍN, E. PELTIER, E. F. THOMPSON et G. VAN VLEDDER (1994). "Recommended practice for extreme wave analysis". *Journal of Hydraulic Research*, vol. 32, p. 803-814.

MEARNS, L. O., et al. (2007, updated 2012). *The North American regional climate change assessment program dataset*. Boulder, CO, National Center for Atmospheric Research Earth System Grid Data Portal. doi : 10.5065/D6RN35ST.

MEARNS, L. O., W. J. GUTOWSKI, R. JONES, L.-Y. LEUNG, S. MCGINNIS, A. M. B., NUNES et Y. QIAN (2009). "A regional climate change assessment program for North America". *EOS*, vol. 90, n° 36, p. 311-312.

MESINGER, F., G. DIMEGO, E. KALNAY, K. MITCHELL, P. C. SHAFRAN, W. EBISUZAKI, D. JOVIC, J. WOOLLEN, E. ROGERS, E. H. BERBERY, M. B. EK, Y. FAN, R. GRUMBINE, W. HIGGINS, H. LI, Y. LIN, G. MANIKIN, D. PARRISH et W. SHI (2006). "North American regional reanalysis". *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 87, p. 343-360.

- MEYSSIGNAC, B., et A. CAZENAVE (2012). "Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability". *Journal of Geodynamics*, vol. 58, p. 96-109. doi : 10.1016/j.jog.2012.03.005.
- MOEINI, M. H., et A. ETEMAD-SHAHIDI (2007). "Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie". *Applied Ocean Research*, vol. 29, p. 137-145.
- MONBALIU, J., J. C. HARGREAVES, J.-C. CARRETERO, H. GERRITSEN et R. FLATHER. R. (1999). "Wave modelling in the PROMISE project". *Coastal Engineering*, vol. 37, p. 379-407.
- MORI, N., T. YASUDA, H. MASE, T. TOM et Y. OKU (2010). "Projection of extreme wave climate change under global warming". *Hydrological Research Letters*, vol. 4, p. 15-19.
- MORIASI, D. N., J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGNER, R. D. HARMEL et T. L. VEITH (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *Transactions of the ASABE*, vol. 50, n° 3, p. 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, Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xiii + 267 p.
- MUSIC, B., et D. CAYA (2007). "Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM)". *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 5, p. 969-988. doi : 10.1175/JHM627.1.
- NAKICENOVIC, N., et R. SWART (2000). *IPCC special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the IPCC*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 599 p.
- NEUMEIER, U., J.-P. SAVARD, D. JACOB, A. LAMBERT, D. DUMONT, B. RUEST et B. BISMUTH (2012). « Modélisation du futur régime des vagues de l'estuaire et du golfe du St-Laurent ». Dans 5^e *Symposium scientifique d'Ouranos, 19-21 novembre 2012, Montréal*, Montréal, Ouranos.
- OCDI (2002). *Technical standards and commentaries of port and harbour facilities in Japan*, Tokyo, The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Daikousha Printing, 600 p.
- PADILLA-HERNANDEZ, R., W. PERRIE, B. TOULANY, P. C. SMITH, W. ZHANG et S. JIMENEZ-HERNANDEZ (2004). "An Intercomparison of Modern Operational Wave Models". Dans RESIO, D., et V. SWAIL (dir.). *Proc. 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 5 p.
- PASKOFF, R. (2001). *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité*. Paris, Institut océanographique, 190 p.
- RESIO, D., S. BRATOS et E. THOMPSON (2002). "Meteorology and wave climate". Dans VINCENT, L., et Z. DEMIRBILEK (dir.). *Coastal Engineering*

Manual, Part II, Hydrodynamics, Chapter II-2, Engineer Manual 1110-2-1100, Washington, U. S. Army Corps of Engineers, 77 p.

RIENECKER, M. M., M. J. SUAREZ, R. GELARO, R. TODLING, J. BACMEISTER, E. LIU, M. G. BOSILOVICH, S. D. SCHUBERT, L. TAKACS, G. K. KIM, S. BLOOM, J. Y. CHEN, D. COLLINS, A. CONATY, A. DA SILVA, W. GU, J. JOINER, R. D. KOSTER, R. LUCCHESI, A. MOLOD, T. OWENS, S. PAWSON, P. PEGION, C. R. REDDER, R. REICHLE, F. R. ROBERTSON, A. G. RUDDICK, M. SIENKIEWICZ et J. WOOLLEN (2011). "MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications". *Journal of Climate*, vol. 24, p. 3624-3648.

ROGERS, W. E., J. M. KAIHATU, L. HSU, R. E. JENSEN, J. D. DYKES et K. T. HOLLAND (2007). "Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight". *Coastal Engineering*, vol. 54, p. 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*, vol. 98, p. 4713-4726.

RUEST, B., U. NEUMEIER, D. DUMONT et A. LAMBERT (2012). « Évaluation du climat de vagues du golfe du Saint-Laurent à l'aide d'un modèle de vagues paramétrique ». Dans *Colloque Québec-Océan 2012, 7-9 décembre, Montréal, Québec, Québec-Océan*.

RUEST, B., U. NEUMEIER, D. DUMONT et A. LAMBERT (2013). "Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model". Dans BONNETON, P., et T. GARLAN (dir.). *Proceedings of Coastal Dynamics 2013*, Brest, France, SHOM, p. 1363-1374.

SAUCIER, F. J., F. ROY, D. GILBERT, P. PELLERIN et H. RITCHIE (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*, vol. 108, n° C8, p. 3269. doi : 10.1029/2000JC000686.

SAVILLE, T. (1954). *The effect of fetch width on wave generation*. Washington, U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 9 p. [Technical Memorandum 70].

SCINOCCA, J. F., N. A. MCFARLANE, M. LAZARE, J. LI et D. PLUMMER (2008). "Technical note: the CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere". *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, p. 7055-7074. doi : 10.5194/acp-8-7055-2008.

SENNEVILLE, S., et F. J. SAUCIER (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., S. St-ONGE DROUIN, M. CORRIVEAU, P. BERNATCHEZ, S. BÉLANGER, S. TOLSZCZUK-LECLERC, D. DUMONT, A.-C. BIHAN-POUDEC et Z. BELEMALEM (2013). *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*, Québec, 53 p. [Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec].

STONE, G. W., et J. D. ORFORD (2004). "Storms and their significance in coastal morpho-sedimentary dynamics". *Marine Geology*, vol. 210, p. 1-5.

TEENA, N. V., V. SANIL KUMAR, K. SUDHEESH et R. SAJEEV (2012). "Statistical analysis on extreme wave height". *Natural Hazards*, vol. 64, p. 223-236.

TRACY, B. A. (2002). "Directional characteristics of the 1990-1999 wave information studies Gulf of Mexico hindcast. Dans *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, October 21-25, Banff, Alberta, Canada*, Toronto, Meteorological Service of Canada, p. 87-96.

TROIN, M., D. CAYA, D. et J. A. VELÁZQUEZ (à paraître). *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*. Washington. U. S. Army Corps of Engineers, U. S. Government Printing Office, 3 volumes, pagination multiple.

WAMDI GROUP (1988). "The WAM model – A third generation ocean wave prediction model". *Journal of Physical Oceanography*, vol. 18, p. 1775-1810.

WANG, X., et V. SWAIL (2006). "Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights". *Climate Dynamics*, vol. 26, p. 109-126. doi : 10.1007/s00382-005-0080-x.

WANG, X., F. ZWIERS et V. Swail (2004). "North Atlantic Ocean wave climate change scenarios for the twenty-first century". *Journal of Climate*, vol. 17, p. 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 of the American Meteorologist Society*, vol. 63, n° 11, p. 1309-1313.

WILLMOTT, C. J. (1984). "On the evaluation of model performance in physical geography". Dans GAILE, G. L., et C. J. WILLMOTT (dir.) *Spatial statistics and models*, Dordrecht, Pays-Bas, D. Reidel, p. 443-460.

WILLMOTT, C. J., S. G. ACKLESON, R. E. DAVIS, J. J. FEDDEMA, K. M. KLINK, D. R. LEGATES, J. O'DONNELL et C. M. ROWE (1985). "Statistics for the evaluation and comparison of models". *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, n° C5, p. 8995-9005.

WILSON, B. W. (1965). "Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959". *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, vol. 18, p. 114-130. doi : 10.1007/BF02333333.

YAMAGUCHI, M., Y. HATADA et H. NONAKA (2004). "Intercomparison of wave data hindcast in Lake Erie". Dans RESIO, D., et V. SWAIL. *Proc. 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, North Shore (Hawaii), U.S. Army Engineer Research and Development Center, 11 p.

ZAMBRESKY, L. (1989). *A verification study of the global WAM model, December 1987-November 1988*. Reading, England, European Center for Medium-Range Weather Forecasts, 86 p. [Technical Report 63].

ANNEXE 1
FETCHS PONDÉRÉS AUX SITES D'ÉTUDE

Tableau 19 Fetch pondérés en kilomètres aux sites d'étude

Direction	Saint-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

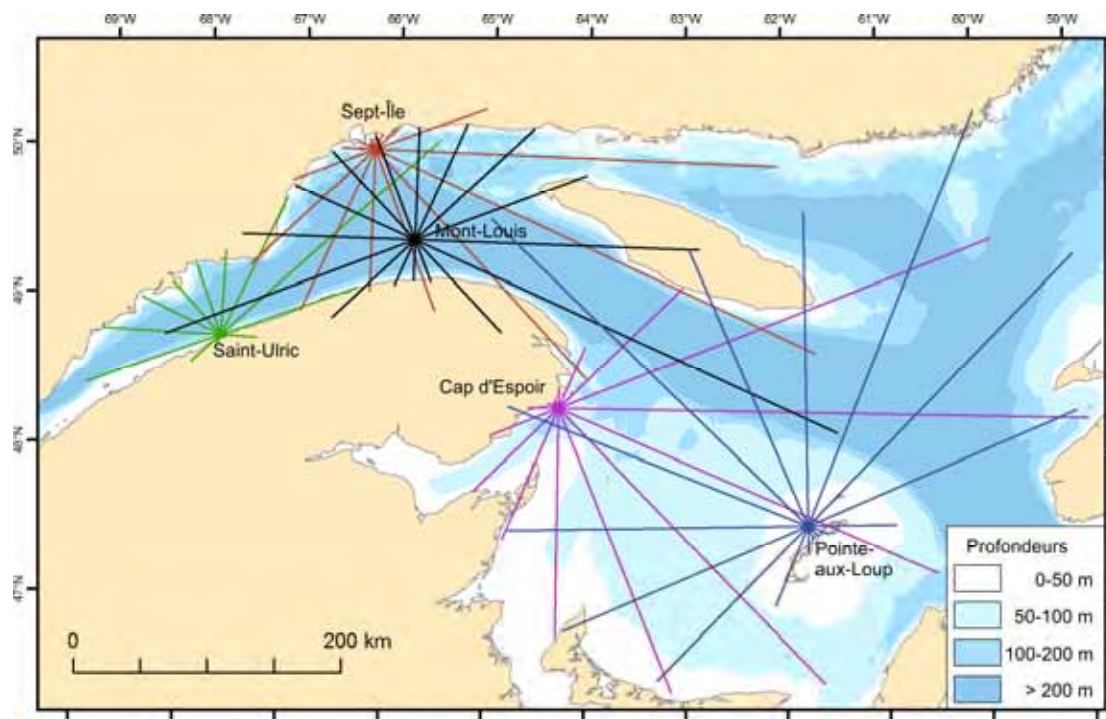


Figure 99 Illustration graphique des fetchs pondérés aux sites d'étude

ANNEXE 2
DESCRIPTION DE GENEVEUX

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

Les parties calcul et entrée-sortie des fichiers du code de GENER (c'est-à-dire tout, à part les boîtes de dialogue de l'interface Microsoft Visual C++ et la production de graphiques) ont été adaptées 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 Microsoft Visual C++ ont été corrigées :

- Tous les fichiers intermédiaires et les fichiers de sortie sont maintenant des fichiers texte ASCII;
- Les dates et heures du fichier d'entrée sont conservées dans tous les calculs et sont écrites dans les fichiers de sortie;
- Les trous de 1 à 4 heures dans le fichier d'entrée sont interpolés. Plusieurs tests de cohérence ont été ajoutés pour les données du fichier d'entrée et pour différents paramètres;
- Les vitesses et les directions de vent peuvent maintenant être exprimées par des chiffres décimaux et les directions, 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).

Utilisation de GENEREUX

On peut utiliser GENEREUX 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 ou Donelan), les dates de début et de fin, et d'autres options.

La commande « genereux » sans argument affiche l'aide-mémoire suivant :

Utilisation : `genereux -p fichier_param [-s|-s10] fichier_data options`

Tous les paramètres sont facultatifs, sauf -p et -s (ou -s10), et 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 bisextile (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 demandent 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 vents bruts (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 fetchs, 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 vents bruts : nom du fichier intermédiaire de vents lissés avec l'extension *.vent*, nom du fichier de vagues avec l'extension *.vague*, nom du fichier de statistiques 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 vagues 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 SPM77. Avec « -m all » ou « -m tout », les calculs sont successivement faits 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 vagues utilisé est écrit dans l'en-tête de tous les fichiers de sortie.

Paramètre d'appel	Nom court	Nom long	Référence
-m 0 (par défaut)	SPM77	<i>Shore Protection Manual 1977</i>	USACE (1977)
-m 1	SPM84	<i>Shore Protection Manual 1984</i>	CERC (1984)
-m 2	JON73	Jonswap	Hasselmann <i>et al.</i> (1973)
-m 3	CEM03	<i>Coastal Engineering Manual</i>	Resio, Bratos et Thompson (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. Elles doivent être écrites dans le format AAAA-MM-JJ. Par défaut, les dates 1900-01-01 à 2199-12-31 sont utilisées. Si la date de début n'est pas un 1^{er} 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 l'option -i aux options -d et -f. Ainsi, tous les jours suivant le jour -d et précédant le jour -f seront ignorés, les années traitées allant de l'année -d à l'année -f.

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

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 un trou dans la série de données de vent.

Avec l'option -c, un nom de projet, qui supplantera le nom de projet lu dans le fichier de paramètres, peut être fourni (cela est utile pour utiliser un seul fichier de paramètres définissant le fetch avec plusieurs fichiers de vents). Cette option doit être la dernière inscrite sur la ligne de commande; tout le reste de la ligne formera le nom de projet.

Par défaut, le fichier de statistiques n'est pas écrit. Il doit être demandé avec l'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 1,5 m). Par défaut ou avec l'option -fr, le fichier de statistiques est en français. Avec l'option -en, le fichier de statistiques est en anglais.

Lorsque que le fichier de statistiques est demandé (-t), un fichier de même nom avec l'extension .rose est écrit. Celui-ci peut être utilisé pour produire une rose des vagues (cf. ci-dessous).

Lorsque le fichier de statistiques est demandé (-t), un fichier de même nom avec l'extension *.hist* est écrit. Celui-ci contient des statistiques par direction et par intervalle de période (cf. ci-dessous). Avec l'option -hp, il est possible de spécifier la limite inférieure du premier intervalle de période (par défaut : 2 s) et la taille de chaque intervalle de période (par 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. Seuls les quatre premiers caractères du mot clé sont testés, sans tenir compte des différences majuscules/minuscules. 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 directions (*Directions*) et les fetchs pondérés en kilomètres (*Fetch*) sont les deux seules informations obligatoires.

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

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

Les fetchs pondérés (*Fetch*) doivent être compris entre 0 et 1 000 km.

Les profondeurs moyennes en mètres (*Profondeur*) sont optionnelles. La valeur par défaut est de 1 000 m (ce qui utilise la version eau profonde des équations de fetch). Pour toutes les directions dont la profondeur est de 0 m, le 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 et les valeurs doivent être comprises entre 0 et 10.

Représentation des directions dans GENEREUX

Toutes les directions de vent, de vagues, de fetch, etc. sont les directions de provenance.

GENEREUX travaille avec 8 ou 16 directions. Il est fortement recommandé d'utiliser 16 directions. Chaque direction représente un secteur de 45° ou 22,5°.

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

Dans le fichier de vents lissés et dans le fichier de vagues, le premier secteur est NE/NNE et le dernier secteur est N. La direction en degrés d'un secteur peut être calculée ainsi :

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

Dans le fichier de vents lissés, le secteur 0 indique le calme plat, le secteur -1, des valeurs manquantes et le secteur -2, un saut temporel.

Format du fichier de vents bruts (fichier d'entrée)

Le fichier d'entrée doit correspondre exactement 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 de toute valeur autre que 076 et 070); l'ordre de ces deux lignes n'a pas d'importance. Les vitesses de vent sont exprimées en kilomètres par heure (km/h) et mesurées, en principe, à 10 m au-dessus du sol ou de l'eau. Les directions sont exprimées en degrés (option -s) ou en dizaines de degrés (option -s10). Les valeurs peuvent être des nombres entiers ou des chiffres décimaux, mais elles doivent toujours être écrites sur 6 positions.

Chaque ligne doit avoir le format suivant :

Colonnes 1 à 7	: Identifiant de station (doit être identique aux 7 derniers caractères du nom du fichier avant l'extension)
Colonnes 8 à 15	: Date de format AAAAMMJJ
Colonnes 16 à 18	: Type de valeur (vitesse : 076 ou 070; direction : 075)
Colonnes 19 à 24	: Valeur 1 (pour heure 00:00)
Colonne 25	: Validité valeur 1 (valide si caractère espace, sinon donnée manquante ou erronée)
Colonnes 26 à 31	: Valeur 2 (pour heure 01:00)
Colonne 32	: Validité valeur 2 (valide si caractère espace)
Colonnes 180 à 185	: Valeur 24 (pour heure 23:00)
Colonne 186	: Validité valeur 24 (valide si caractère espace)

Format du fichier de vents lissés (fichier intermédiaire)

Les six premières lignes sont l'en-tête, soit l'identifiant de la station, le nom de la station, le nombre de directions, 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 heures (nbHeures), la direction (numéro de secteur) et les vitesses en kilomètres par heure 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'en-tête, soit le nom du projet, l'identifiant de la station, le nom de la station, le nombre de directions, la date de début et la date de fin (comme indiquées par les options -d et -f), les facteurs de vent et les fetchs.

La ligne 10 est l'en-tête des colonnes de données.

Les données sont présentées 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 pour lesquelles les valeurs sont marquées manquantes ou erronées dans le fichier d'entrée de vents bruts sont représentées par direction = -9, H_s = -9, T_s = -9. Le secteur 0 indique que le calme plat règne et que toutes les vagues de la période précédente se sont atténuées.

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

Avec l'option -t sont produits les 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 les 8 premières lignes indiquent, pour chaque direction, les pourcentages de dépassement pour différentes hauteurs de vagues. La première ligne est la direction N, 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 (par exemple, « nord-est »); 2) période (limite inférieure); 3) direction en degrés; 4) moyenne des H_s ; 5) « 1.0 »; 6) proportion d'heures de ce secteur ou de cette période; 7) nombre d'heures de ce secteur et de cette période dans une année.

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

Il existe trois modifications par rapport à l'ancien fichier **.waves**. Premièrement, 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). Deuxièmement, 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. Enfin, le nombre d'heures dans une année (septième colonne) est maintenant calculé 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 MATLABgener_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;
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=datenum(debut);
case {'fin', '-fin'}
fin=val;
    fin=datenum(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, 'no
                                fig', 'w16', 'max500'))'/1000;
    d_ang=360/16;
end

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

if ~strcmpi(option,'prx')
load coast;
fetch=(fetch_distance(coast,[coor_pt(2)
                                coor_pt(1)], 'nofig', 'w16', 'max50
                                0'))'/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);

    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);

% 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

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

windcos(:,i)=wind(:,i).*cos(fetch(i,2)-dirc(:,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)=dirc(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 GENEUREUX

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 DES PARAMÈTRES DE VAGUES

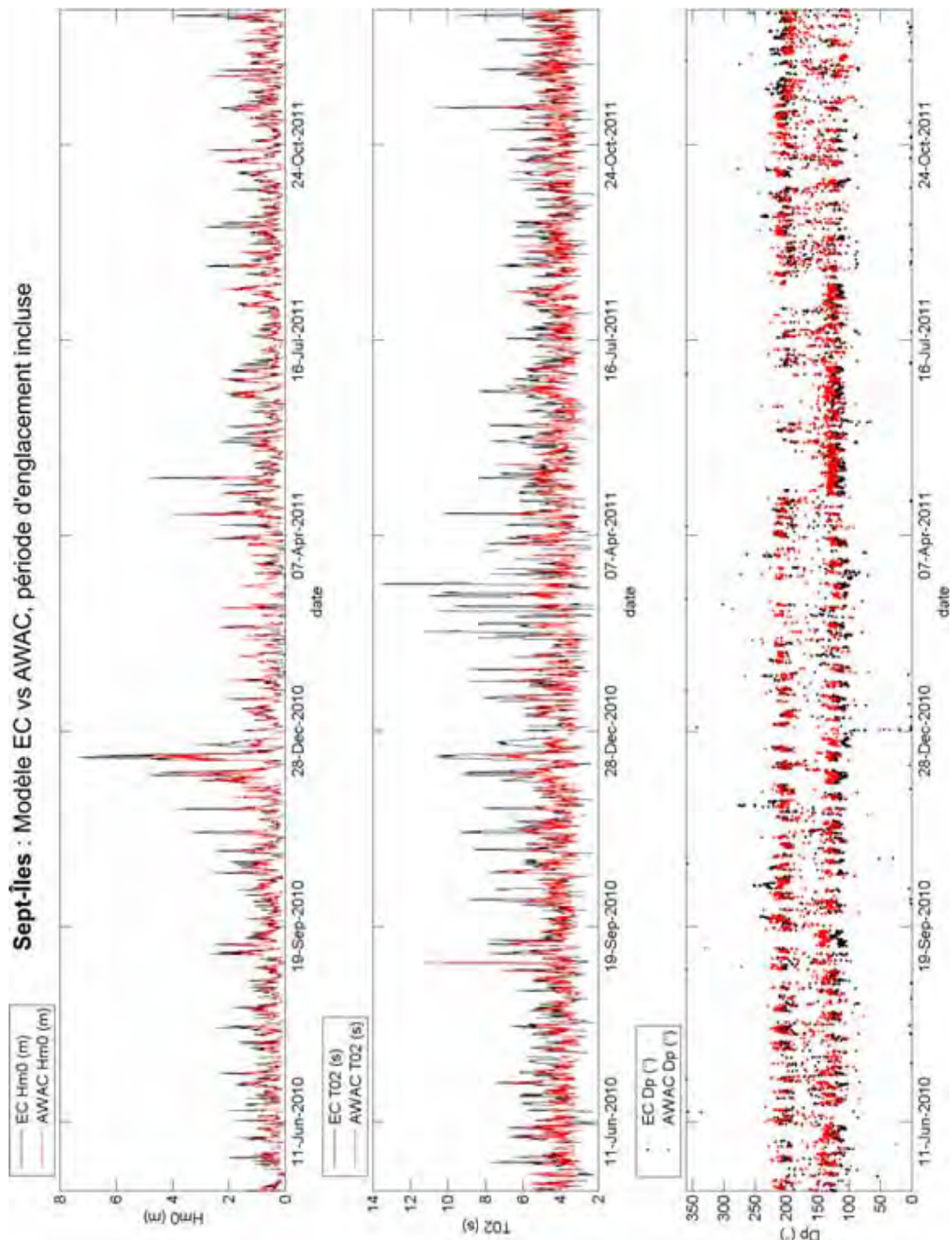


Figure 100 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

Sept-Îles : Modèle EC vs AWAC, période englacement incluse

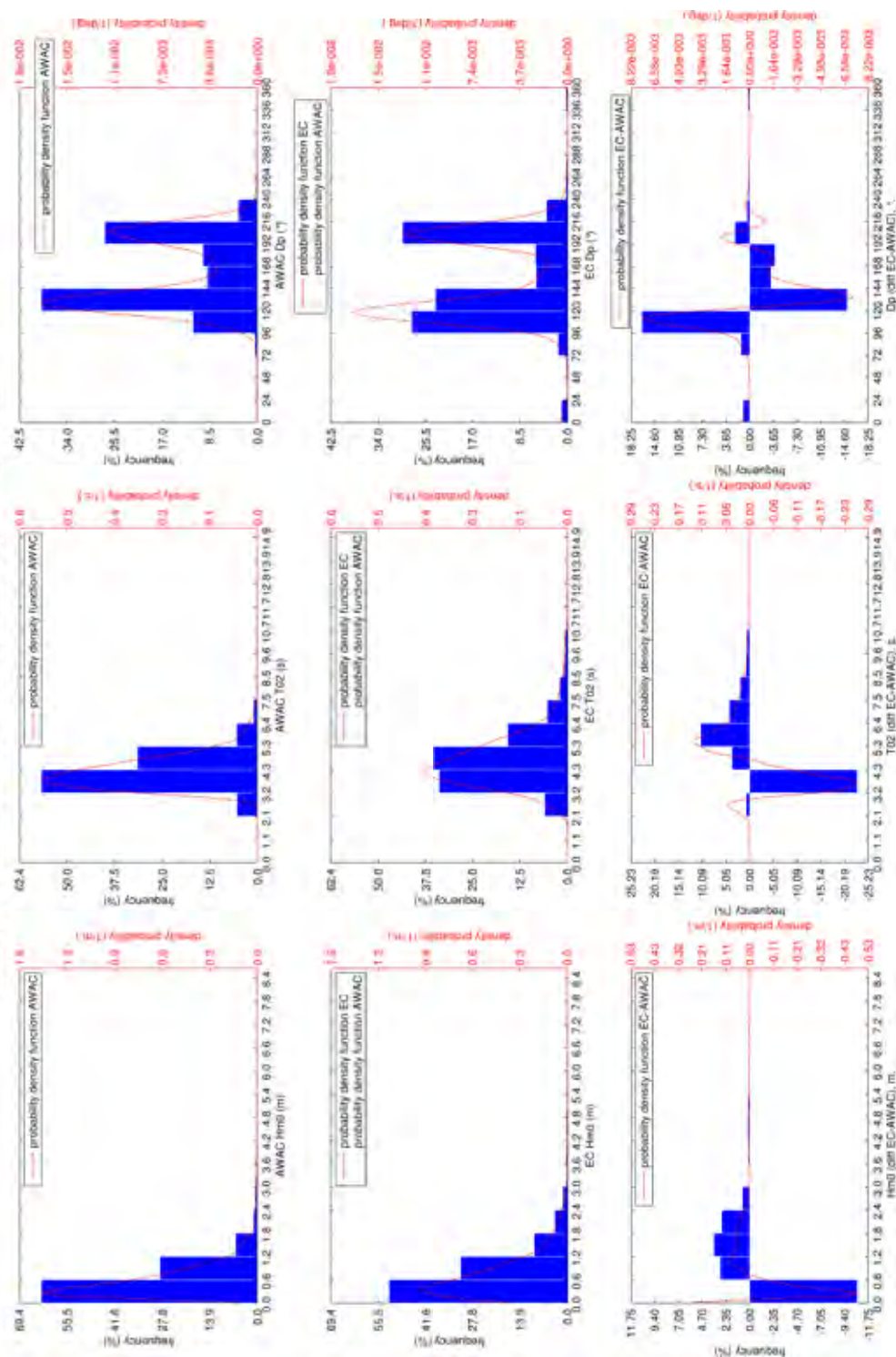


Figure 101 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse

Sept-îles : Modèle EC vs AWAC, période englacement exclue

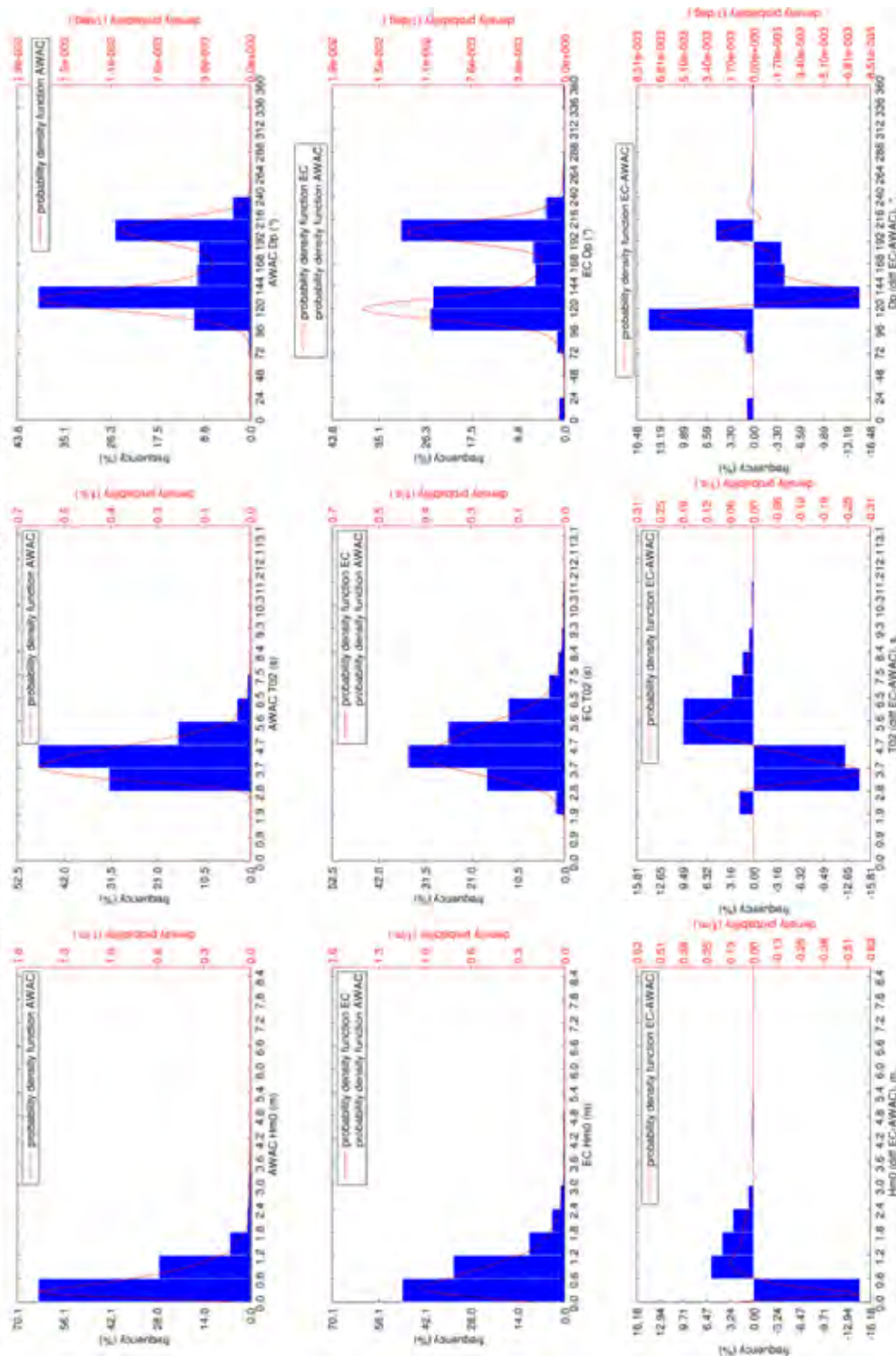


Figure 102 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Sept-îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue

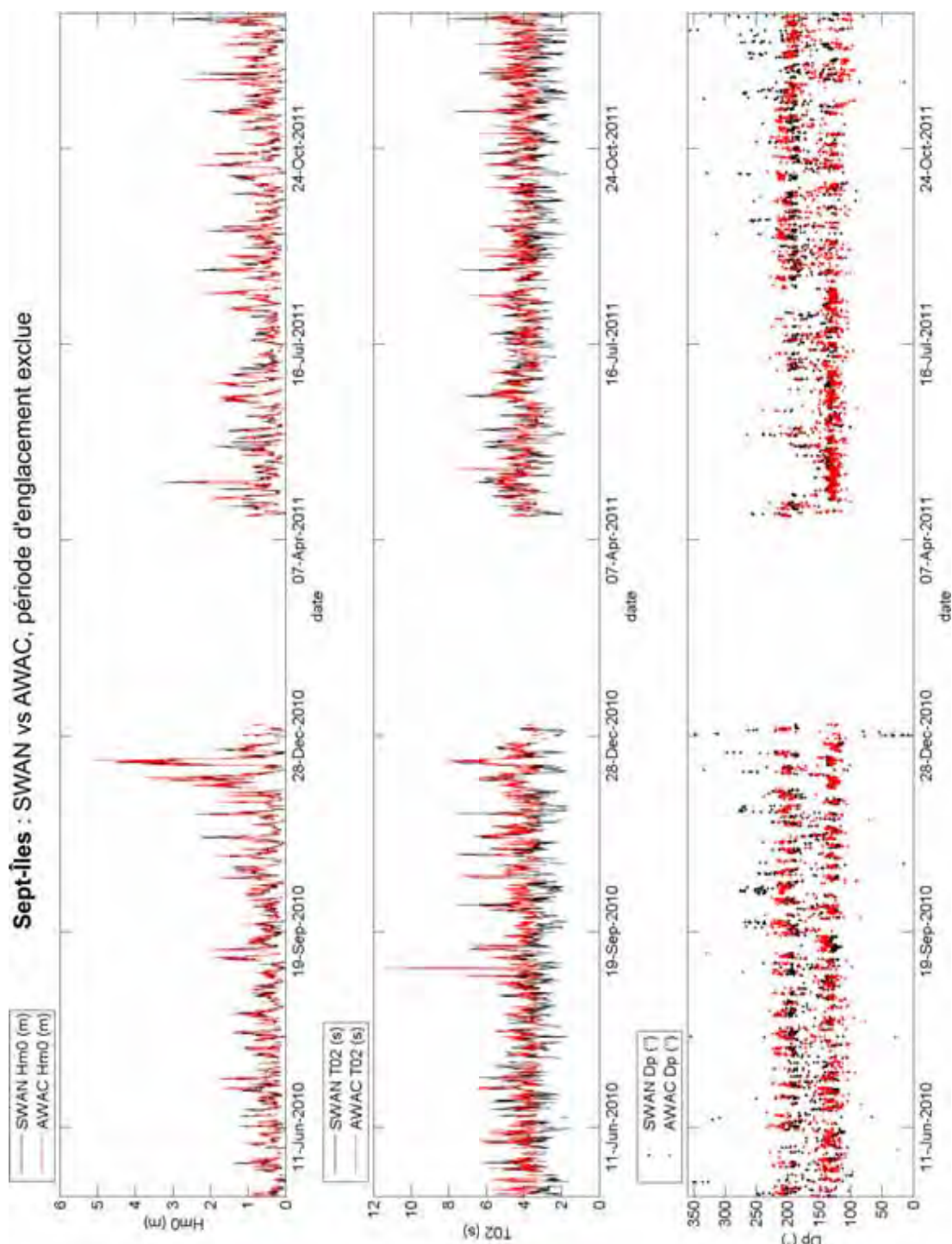


Figure 103 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25 % appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011

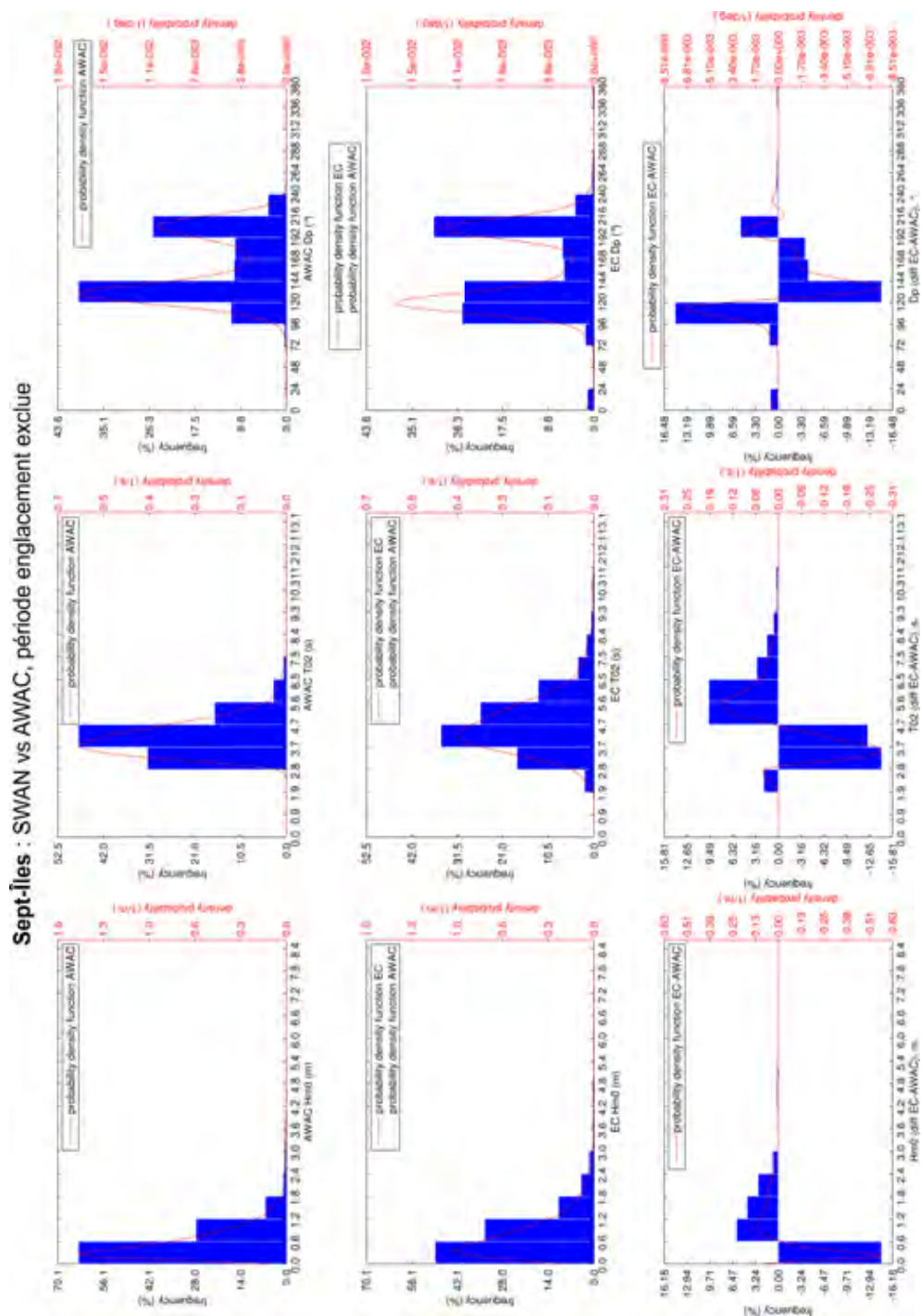


Figure 104 Distribution des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25% appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Sept-Îles pour la période du 5 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue

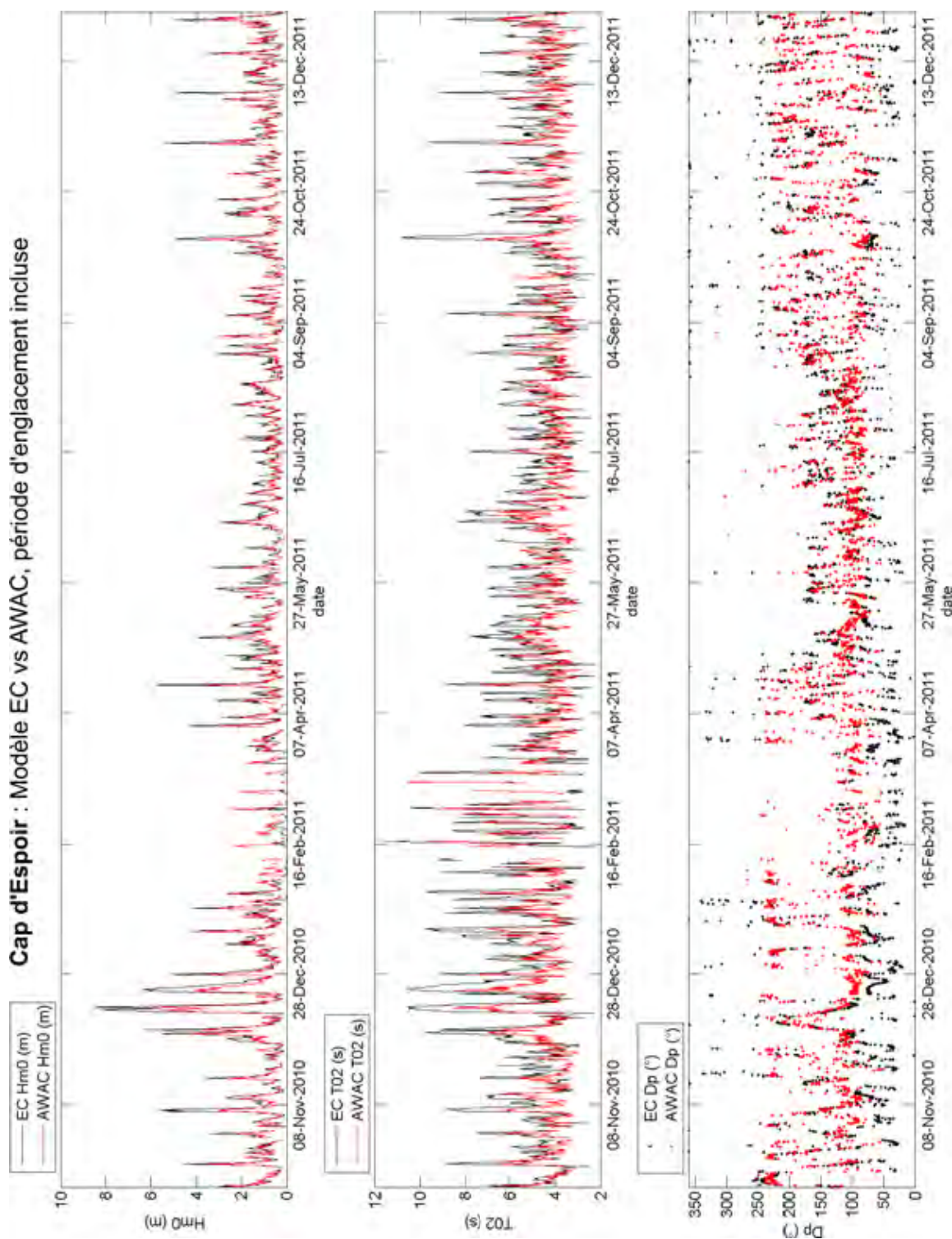


Figure 105 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011

Cap d'Espoir : Modèle EC vs AWAC, période englacement incluse

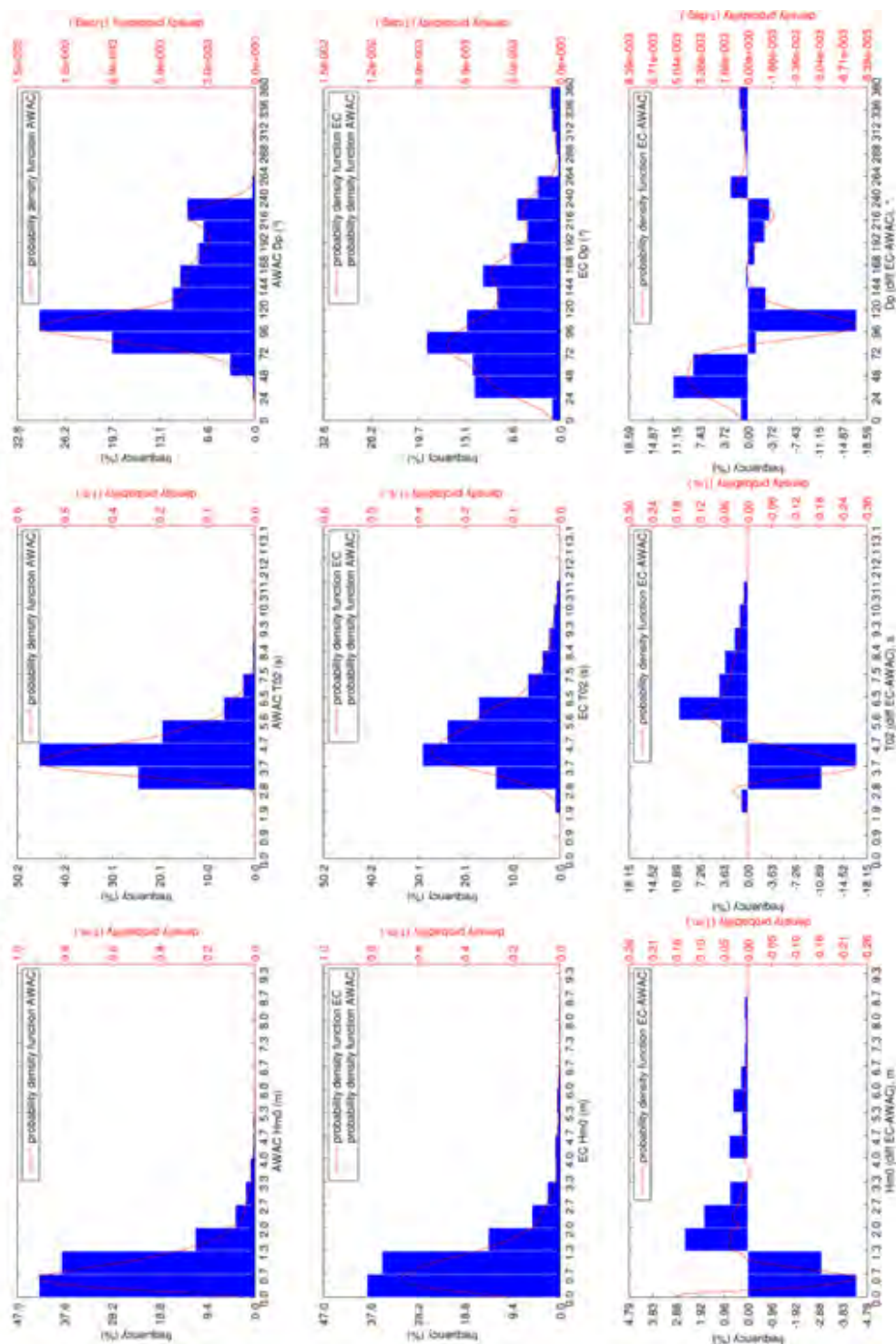


Figure 106 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse

Cap d'Espoir : Modèle EC vs AWAC, période englacement exclue

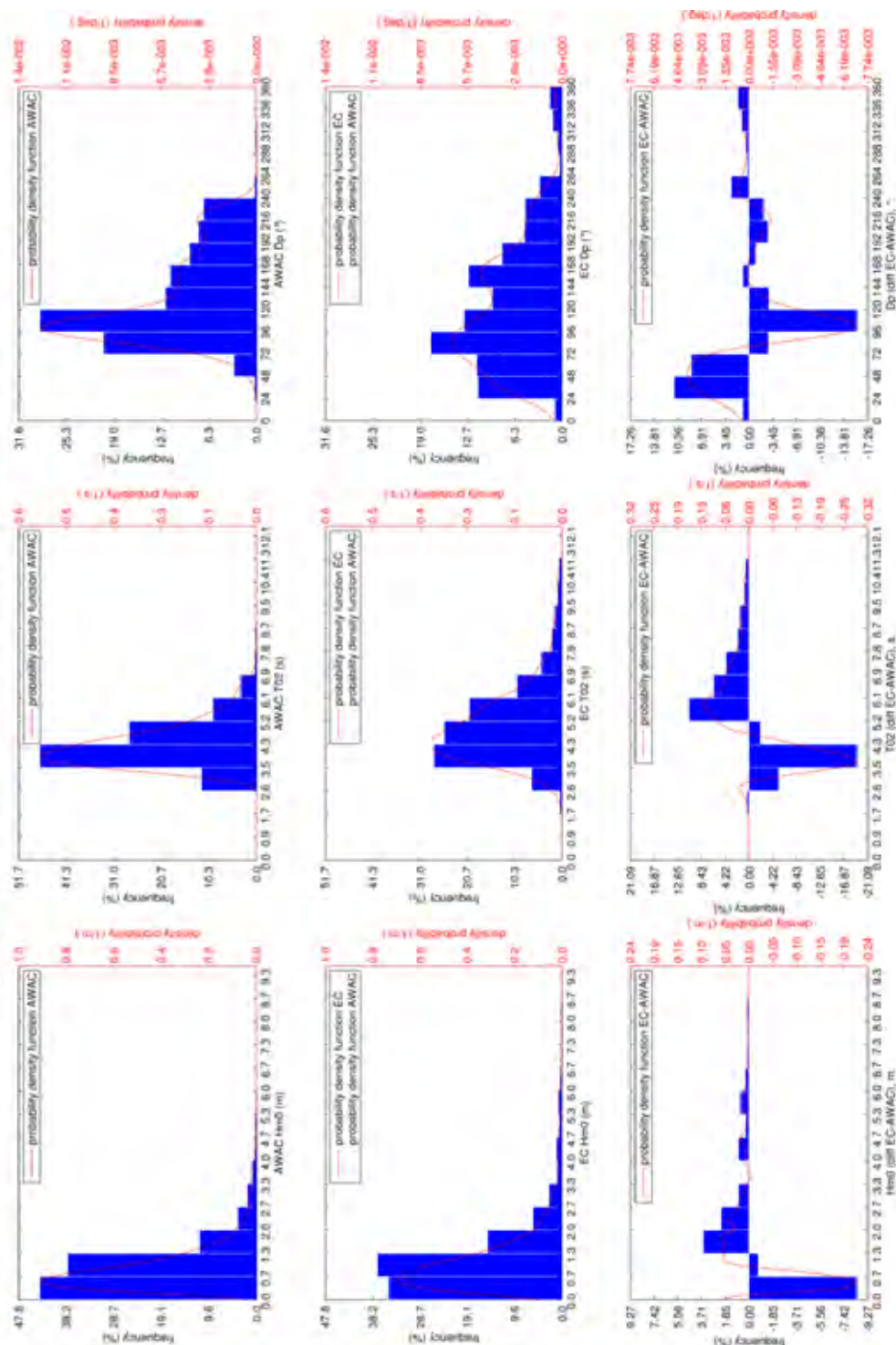


Figure 107 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue

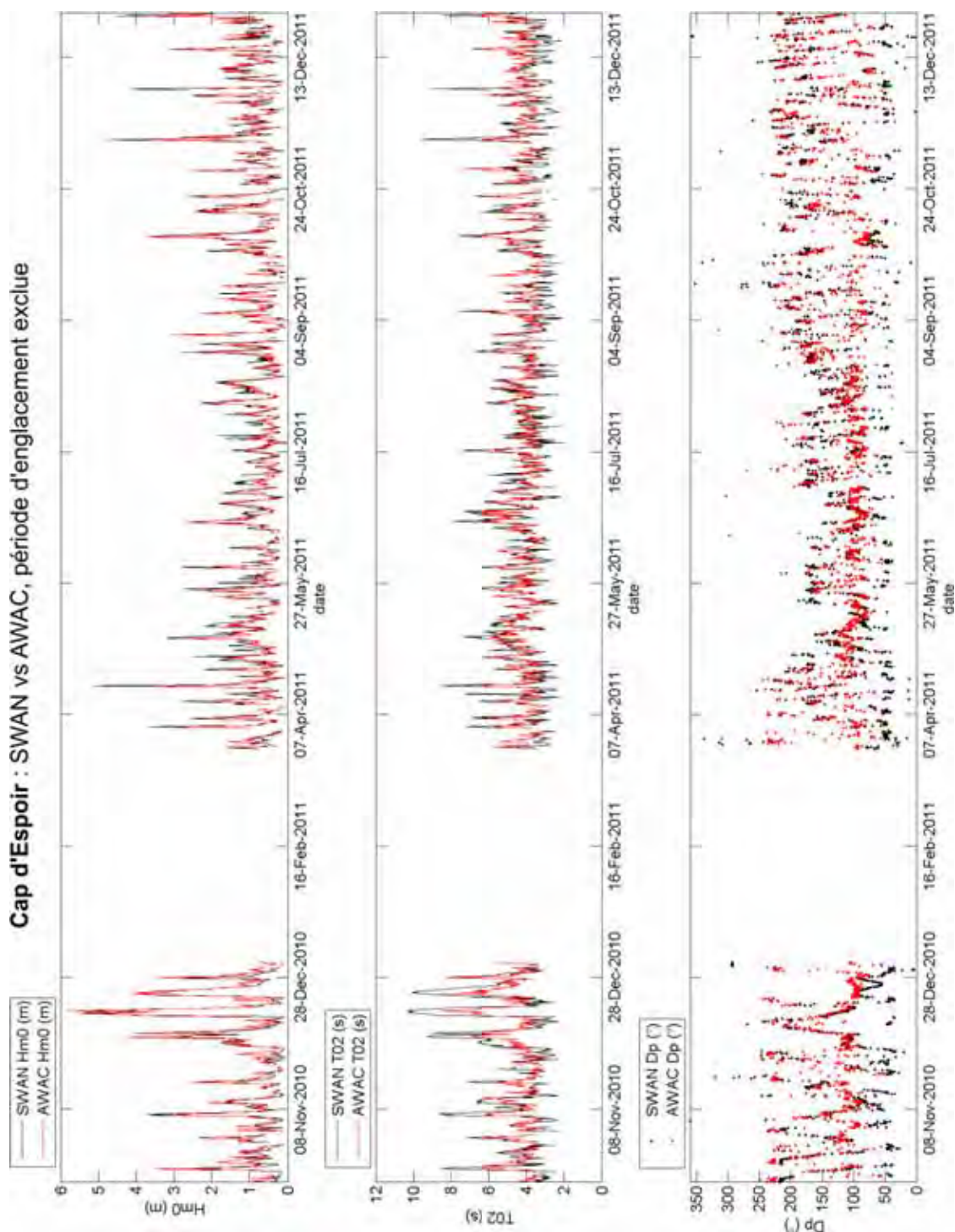


Figure 108 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25 % appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011

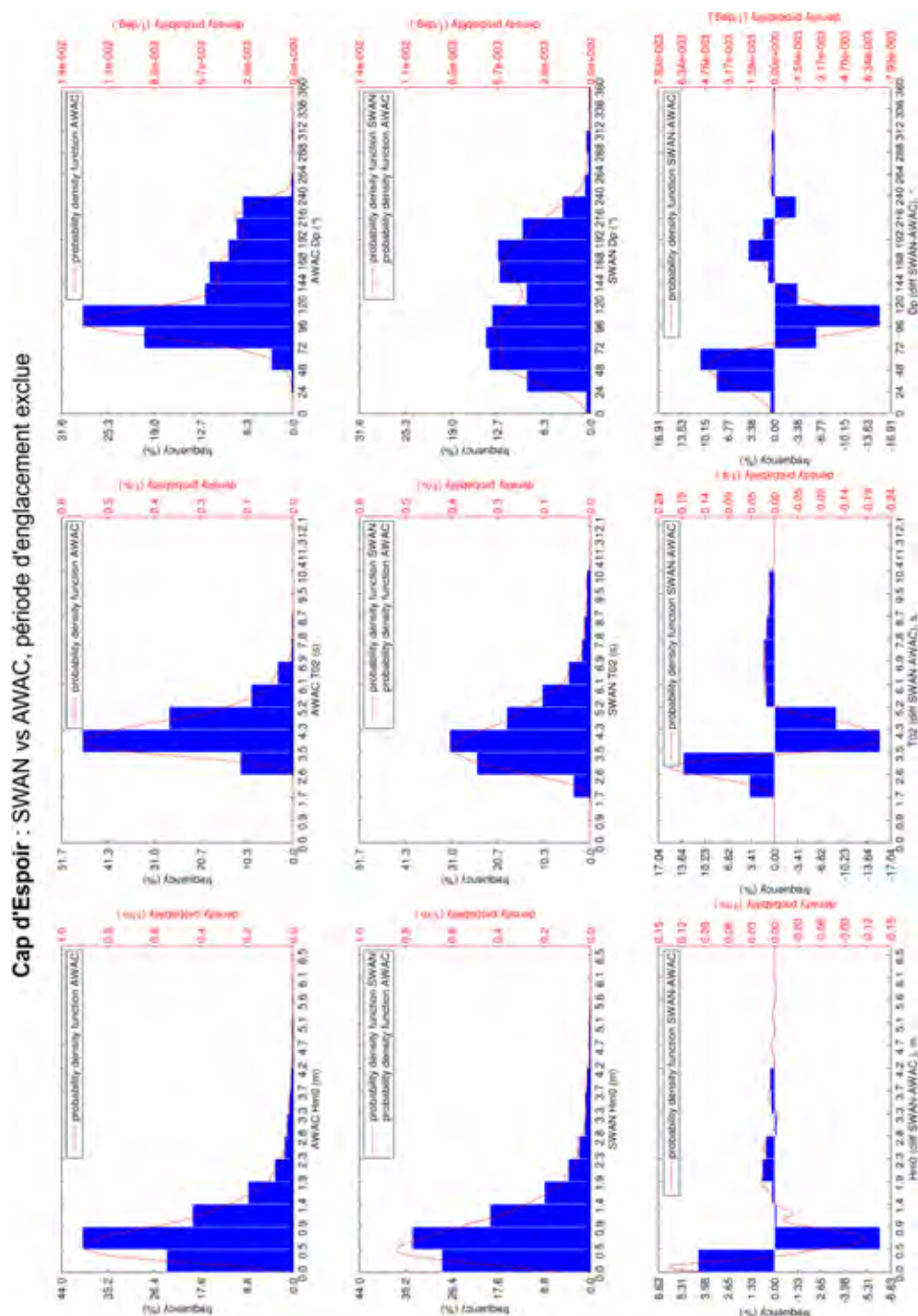


Figure 109 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation linéaire de 25 % appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Cap d'Espoir pour la période du 12 octobre 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue

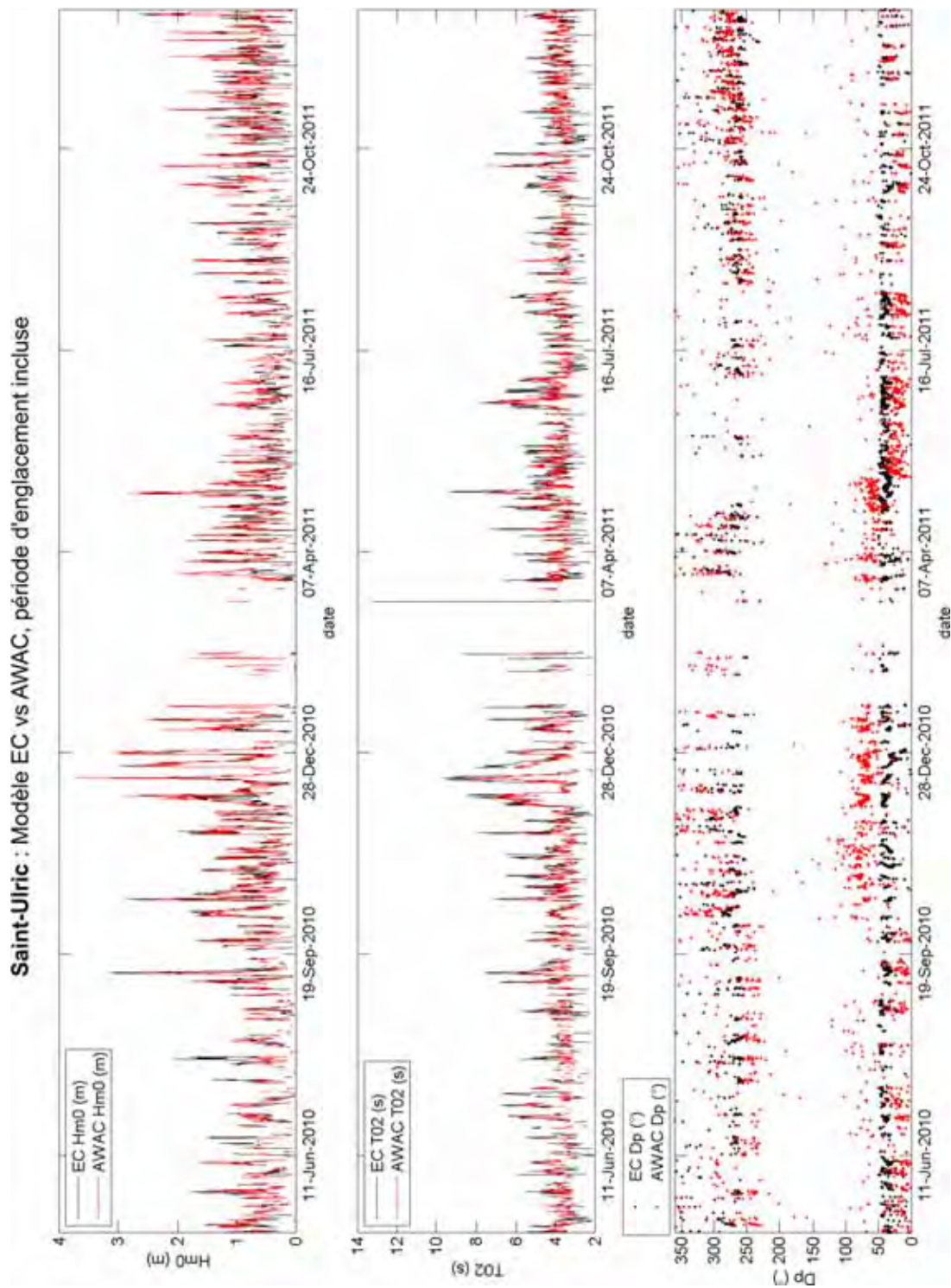


Figure 110 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

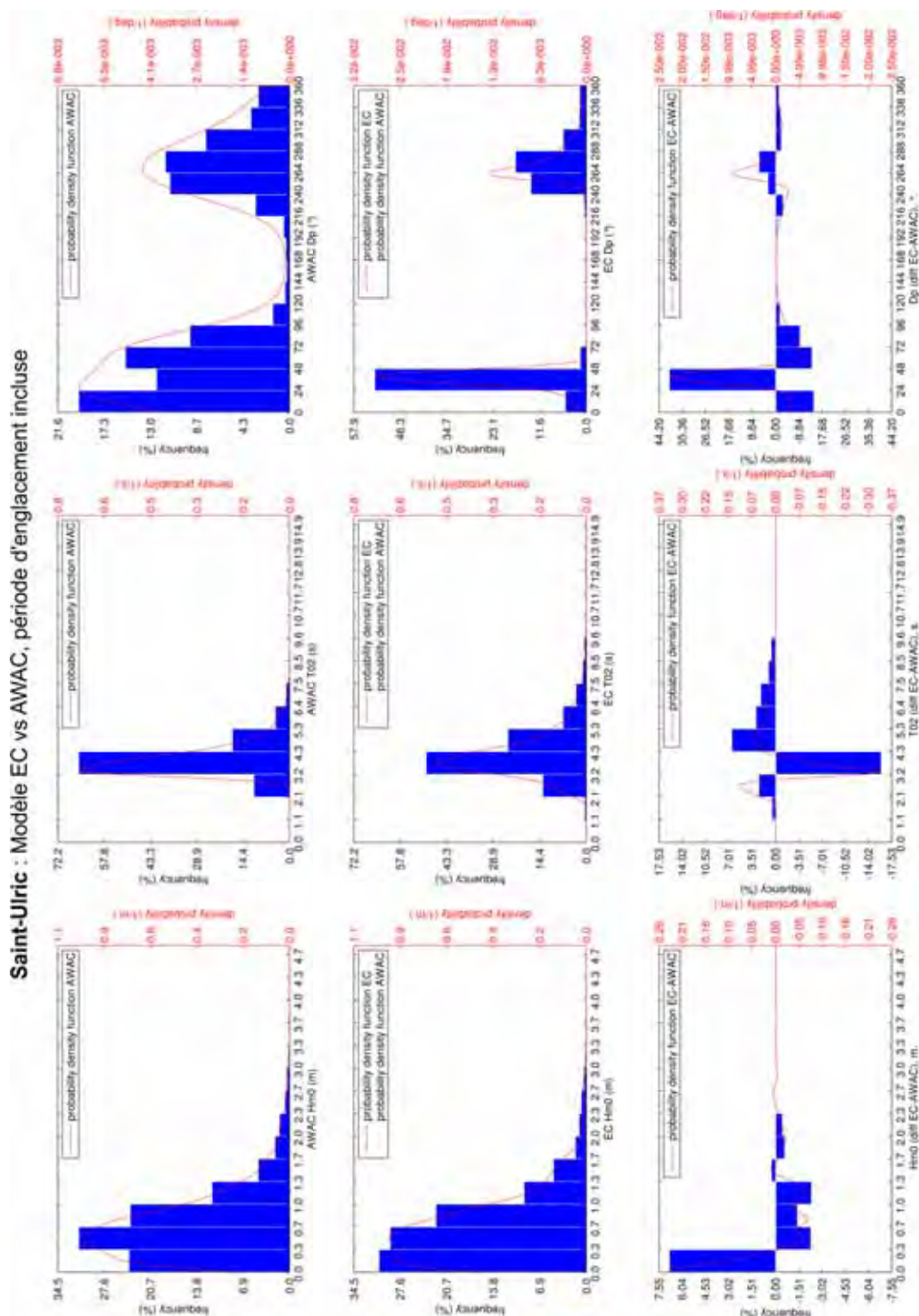


Figure 111 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement incluse

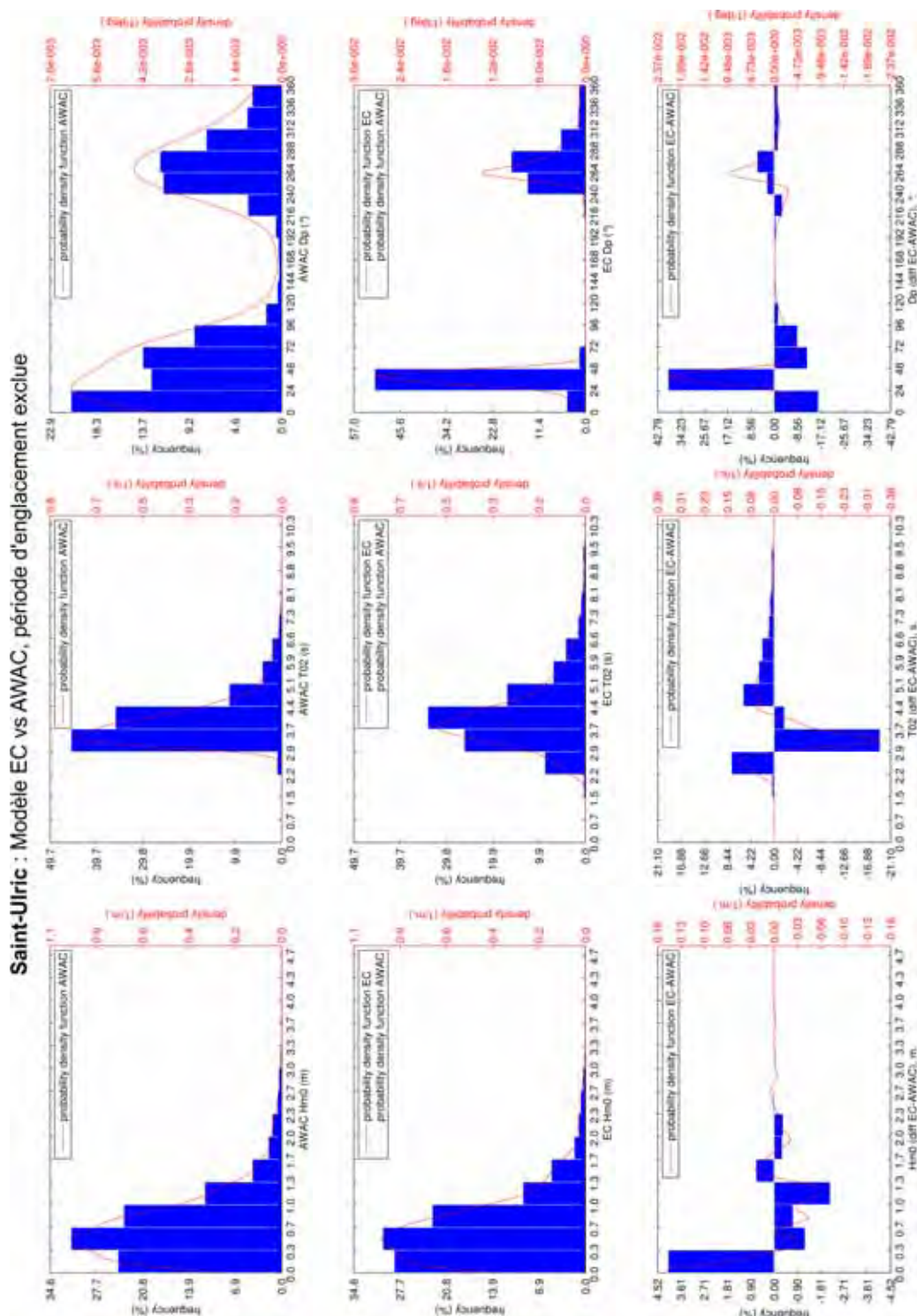


Figure 112 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (modèle EC interpolé) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue

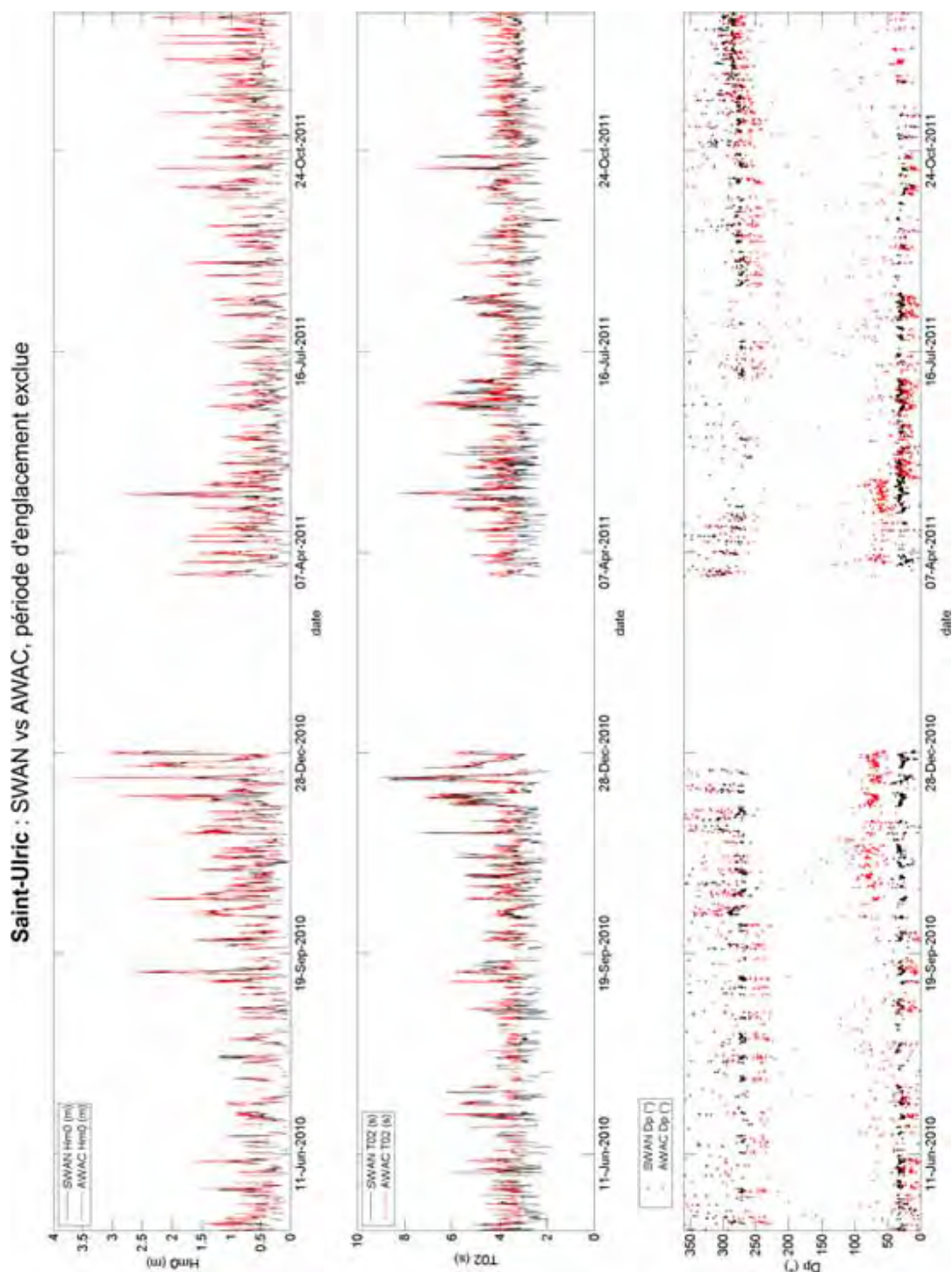


Figure 113 Séries chronologiques des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation de 25 % appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011

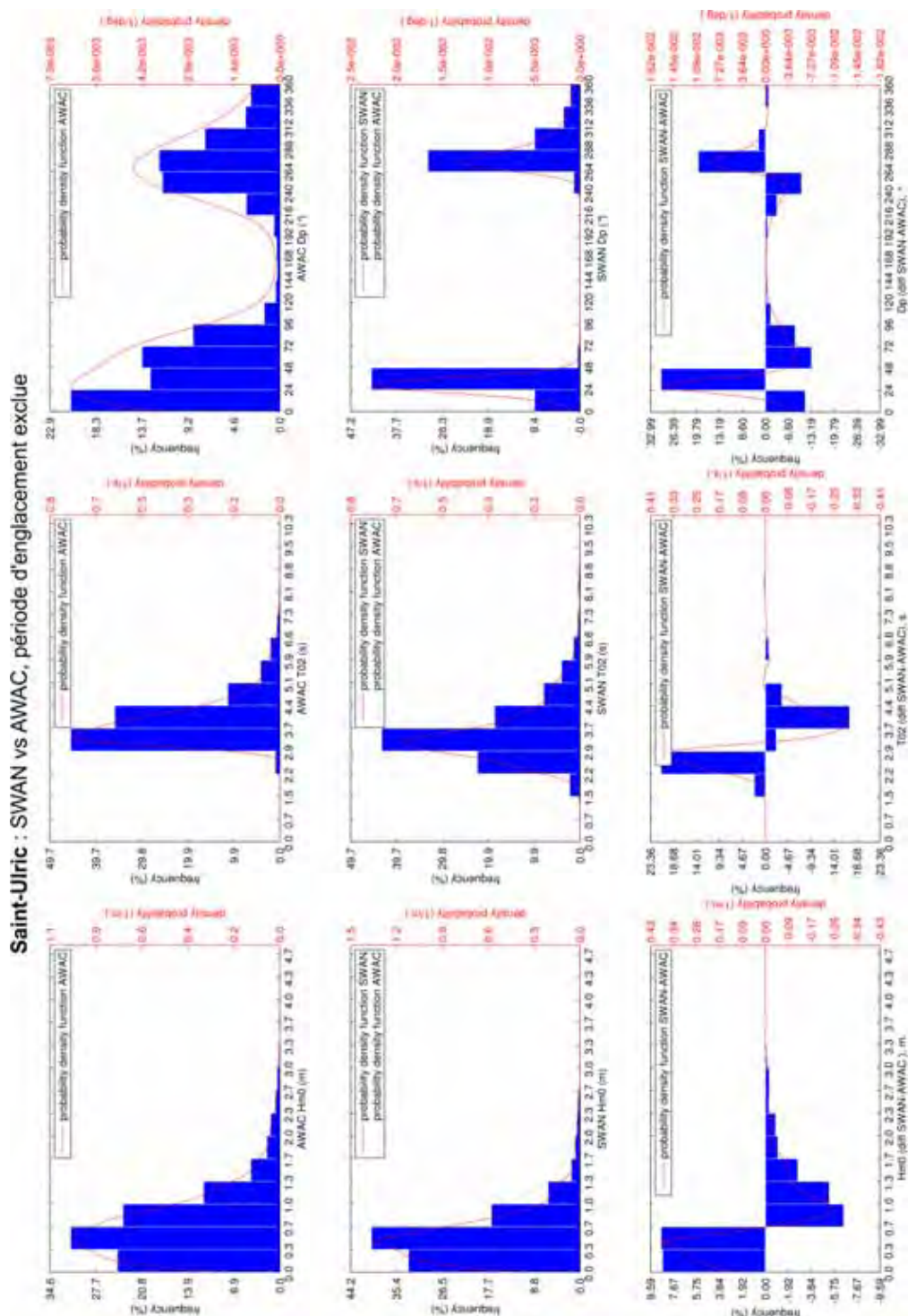


Figure 114 Distributions des paramètres de vagues mesurés (mouillage AWAC) et calculés (SWAN forcé par le modèle EC avec facteur d'atténuation de 25 % appliqué sur les hauteurs significatives) au site de Saint-Ulric pour la période du 3 mai 2010 au 31 décembre 2011, période d'englacement exclue

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 des 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 établies 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 de 1 % ($H_s 1 \%$) et des hauteurs H_s ayant une période de retour de 50 ans ($H_s 50 \text{ ans}$) 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. Cette influence 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, quant à elle, les $H_s 50 \text{ ans}$, pour les mêmes périodes. Lorsque seule l'évolution du vent est prise en compte (panneaux de gauche), les résultats ne montrent pas une influence claire des 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 correspond à une augmentation des $H_s 1 \%$ de l'ordre de 8 à 10 % et des $H_s 50 \text{ ans}$ de l'ordre de 10 à 20 %. En résumé, l'évolution de la glace de mer au cours du XXI^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 $H_s 50 \text{ ans}$) au cours du XXI^e siècle, effet qui devient négligeable d'ici 2100.

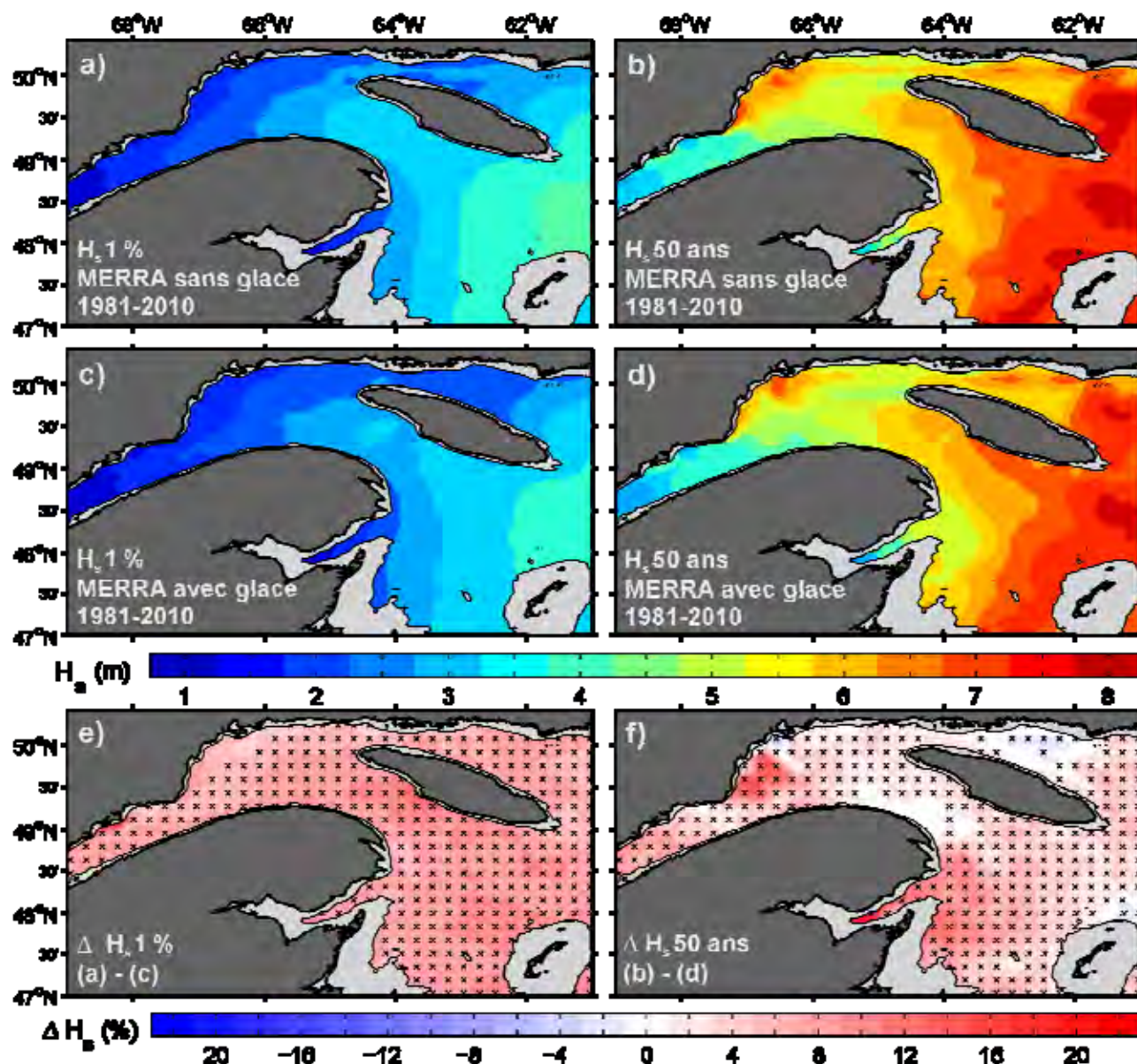


Figure 115 Climat de vagues (H_s 1 % et H_s 50 ans) pour la période 1981-2010 évalué à partir de la réanalyse MERRA, sans glace de mer (a et b) et avec glace de mer (c et d). Les écarts entre les climats évalués sans et avec glace ([sans glace] - [avec glace]) sont présentés en (e) et en (f). Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 %

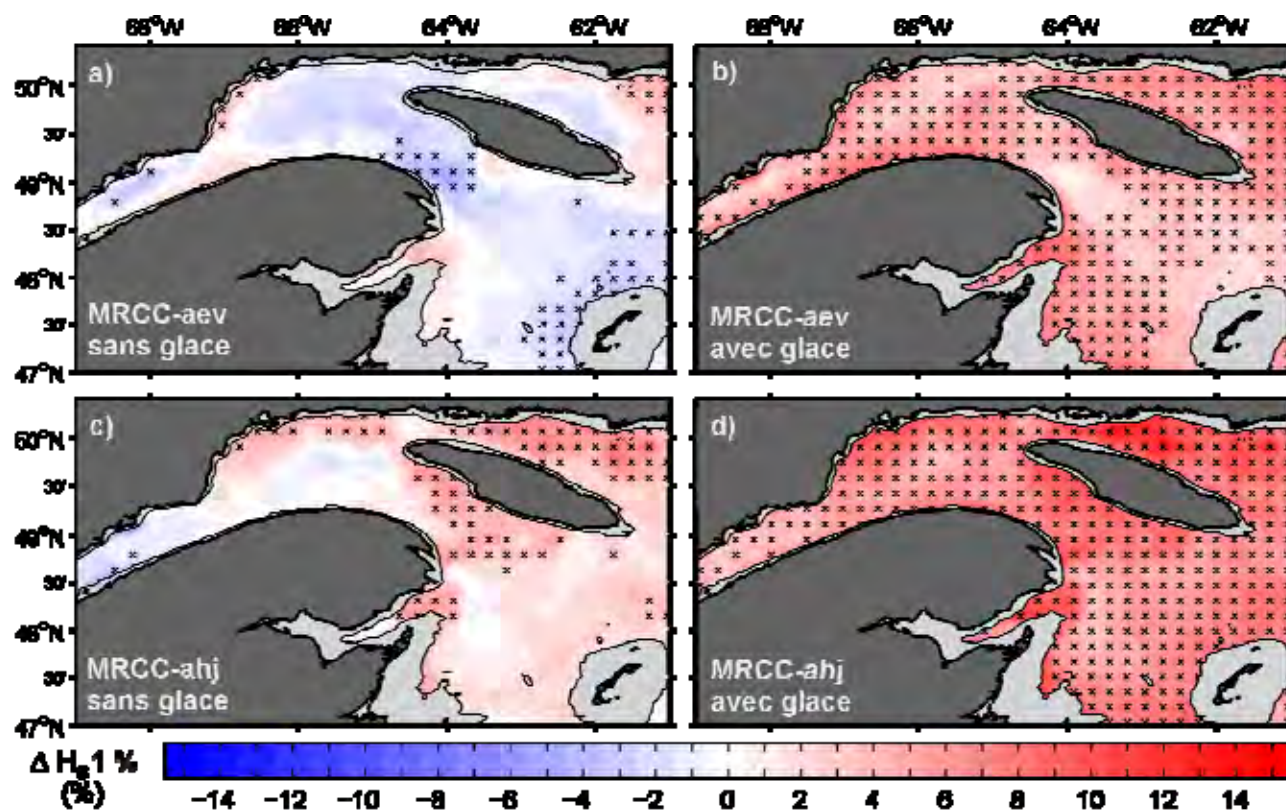


Figure 116 Écarts des H_s 1 % entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 évalués à partir des simulations MRCC-aev (a et b) et MRCC-ahj (c et d), sans glace de mer (a et c) et avec glace de mer (b et d). Les écarts calculés $[(2071-2100) - (1981-2010)]$ sont exprimés en pourcentage et les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 %

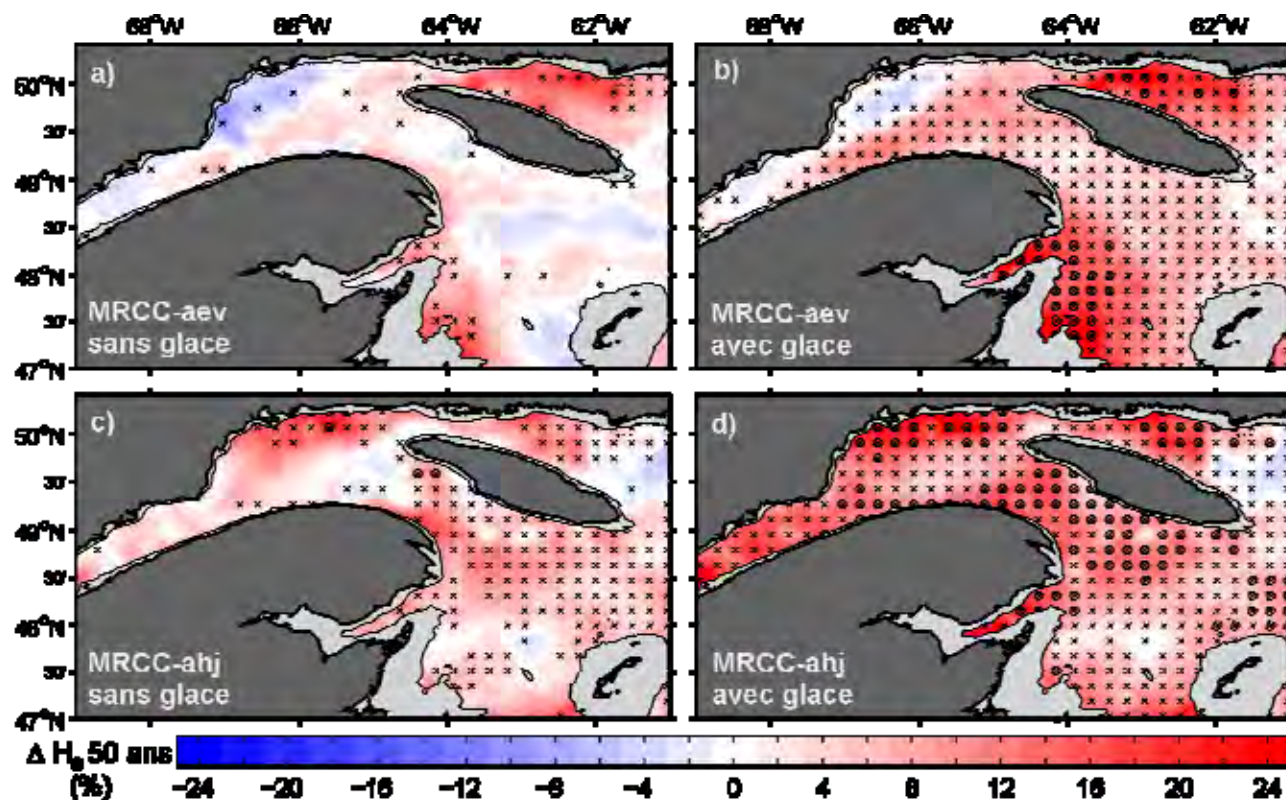


Figure 117 Écarts des H_s , 50 ans entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 évalués à partir des simulations MRCC-aev (a et b) et MRCC-ahj (c et d), sans glace de mer (a et c) et avec glace de mer (b et d). Les écarts calculés ([2071-2100] - [1981-2010]) sont exprimés en pourcentage. Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 % et ceux marqués d'un « o » correspondent aux écarts plus grands que l'intervalle de confiance à 95 % de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée de Pareto)

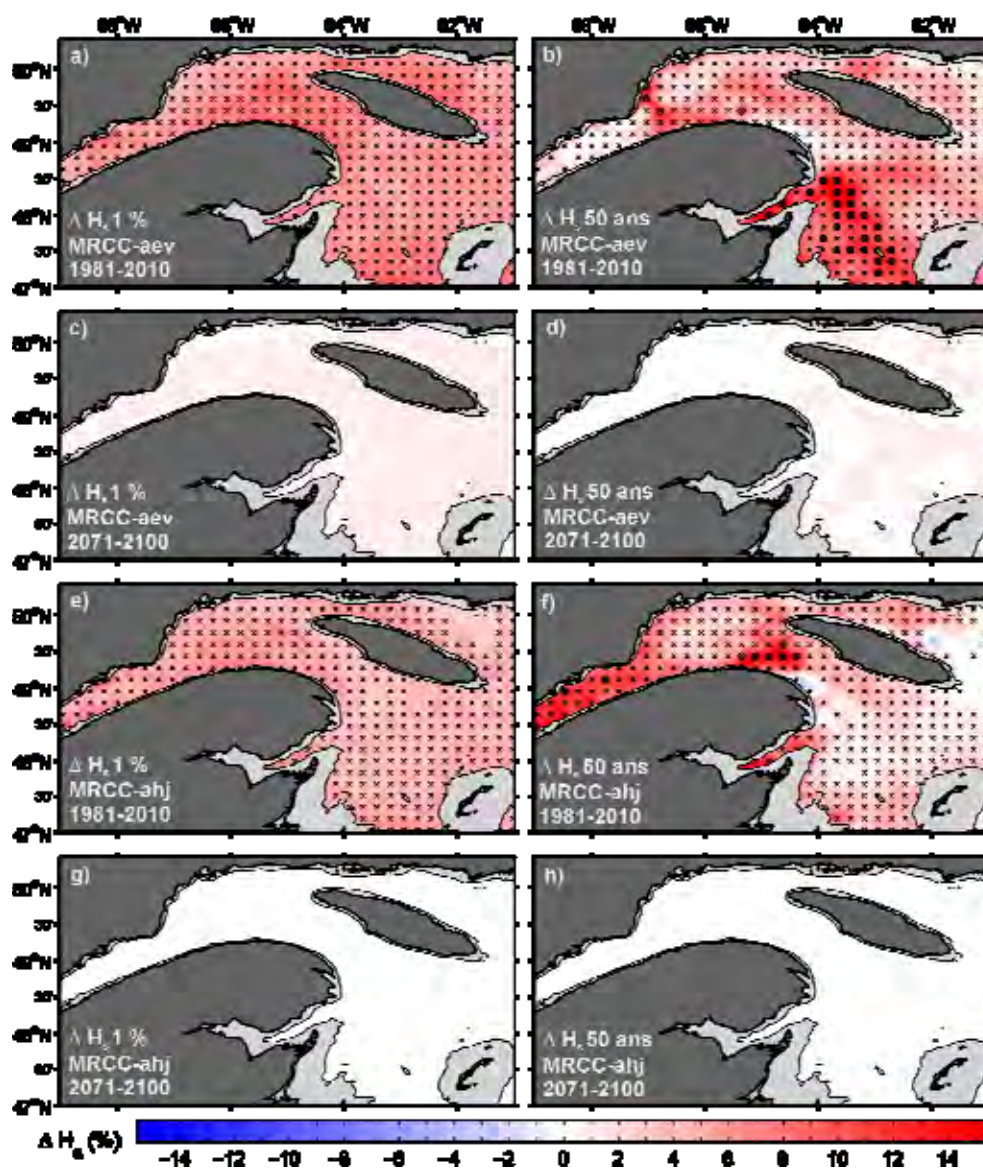
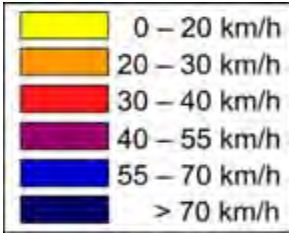


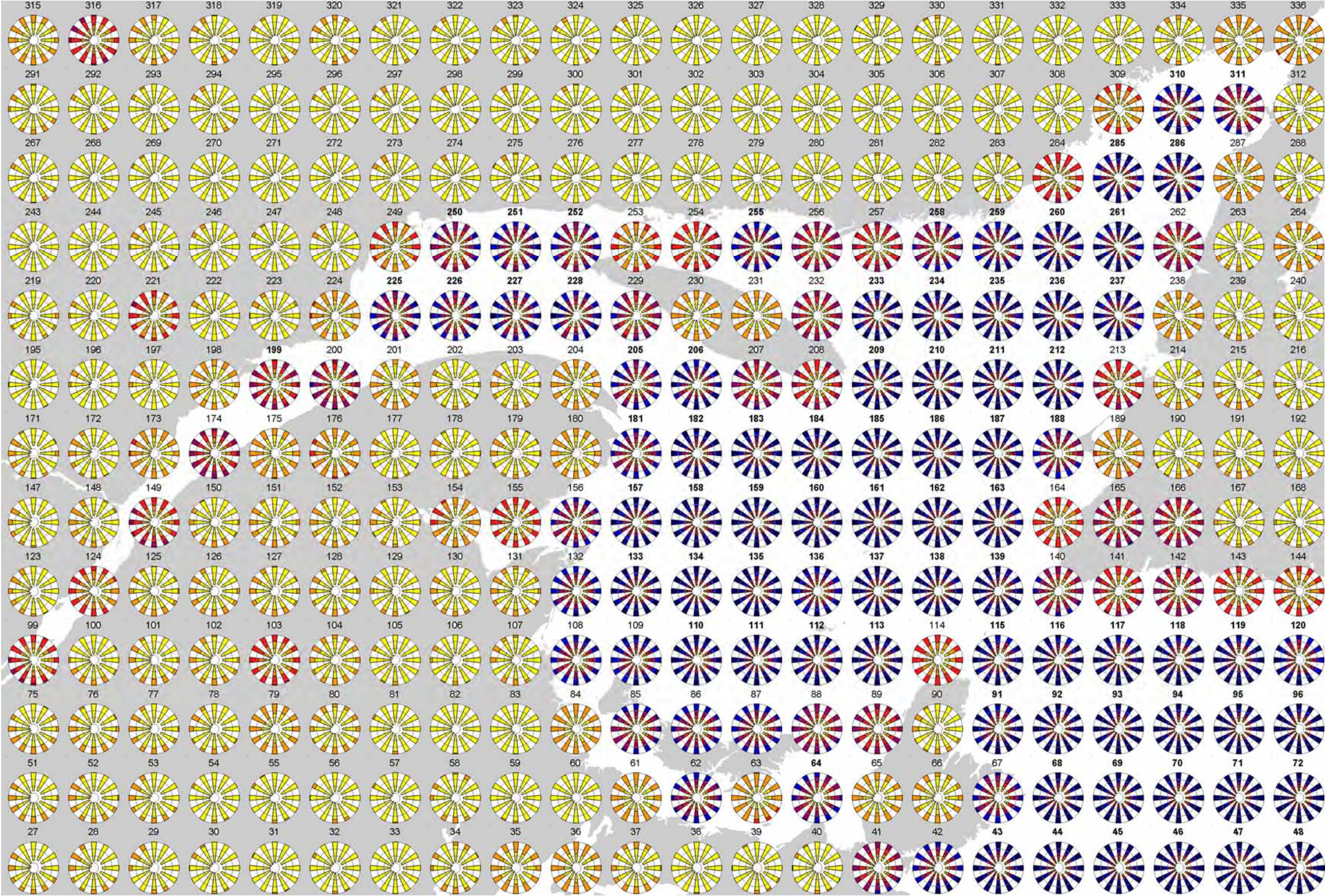
Figure 118 Écarts en pourcentage entre les climats de vagues (H_s 1 % et H_s 50 ans) évalués avec et sans glace de mer ([sans glace] – [avec glace]) pour les périodes 1981-2010 (a, b, e et f) et 2071-2100 (c, d, g et h), à partir des simulations MRCC-aev (a, b, c et d) et MRCC-ahj (e, f, g et h). Les points marqués d'un « x » représentent les écarts statistiquement significatifs au seuil de 95 % et ceux marqués d'un « o » correspondent aux écarts plus grands que l'intervalle de confiance à 95 % de la distribution des valeurs extrêmes ajustée (distribution généralisée de Pareto)

ANNEXE 6
ROSES DES VENTS DE MERRA (NON CORRIGÉ) 1981-2012
POUR L'ENSEMBLE DU GOLFE

VENT MERRA1981-2012
(NON CORRIGÉ)

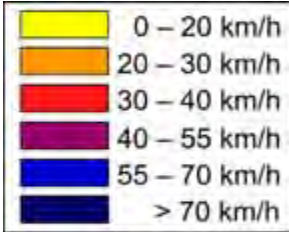


Les quatre cercles repré-
sentent, de l'extérieur vers le
centre, 0,01 %, 0,1 %, 1 % et
10 %.

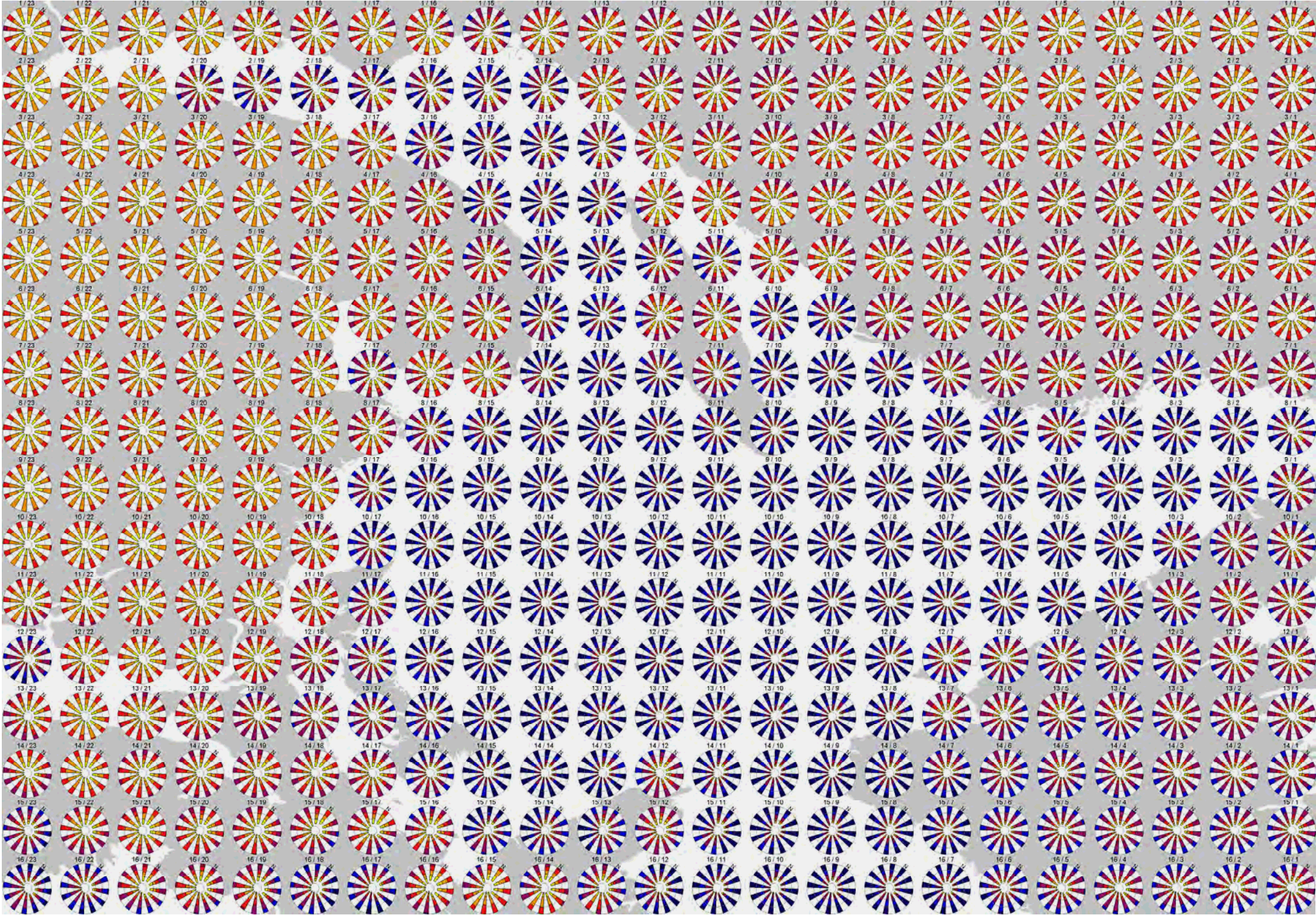


ANNEXE 7
ROSES DES VENTS DE MRCC-AEV 1981-2010
POUR L'ENSEMBLE DU GOLFE

MRCC-AEV 1981-2010

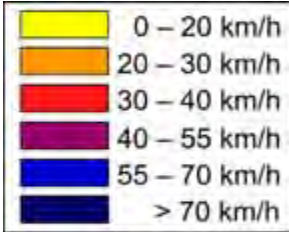


Les quatre cercles représentent, de l'extérieur vers le centre, 0,01 %, 0,1 %, 1 % et 10 %.

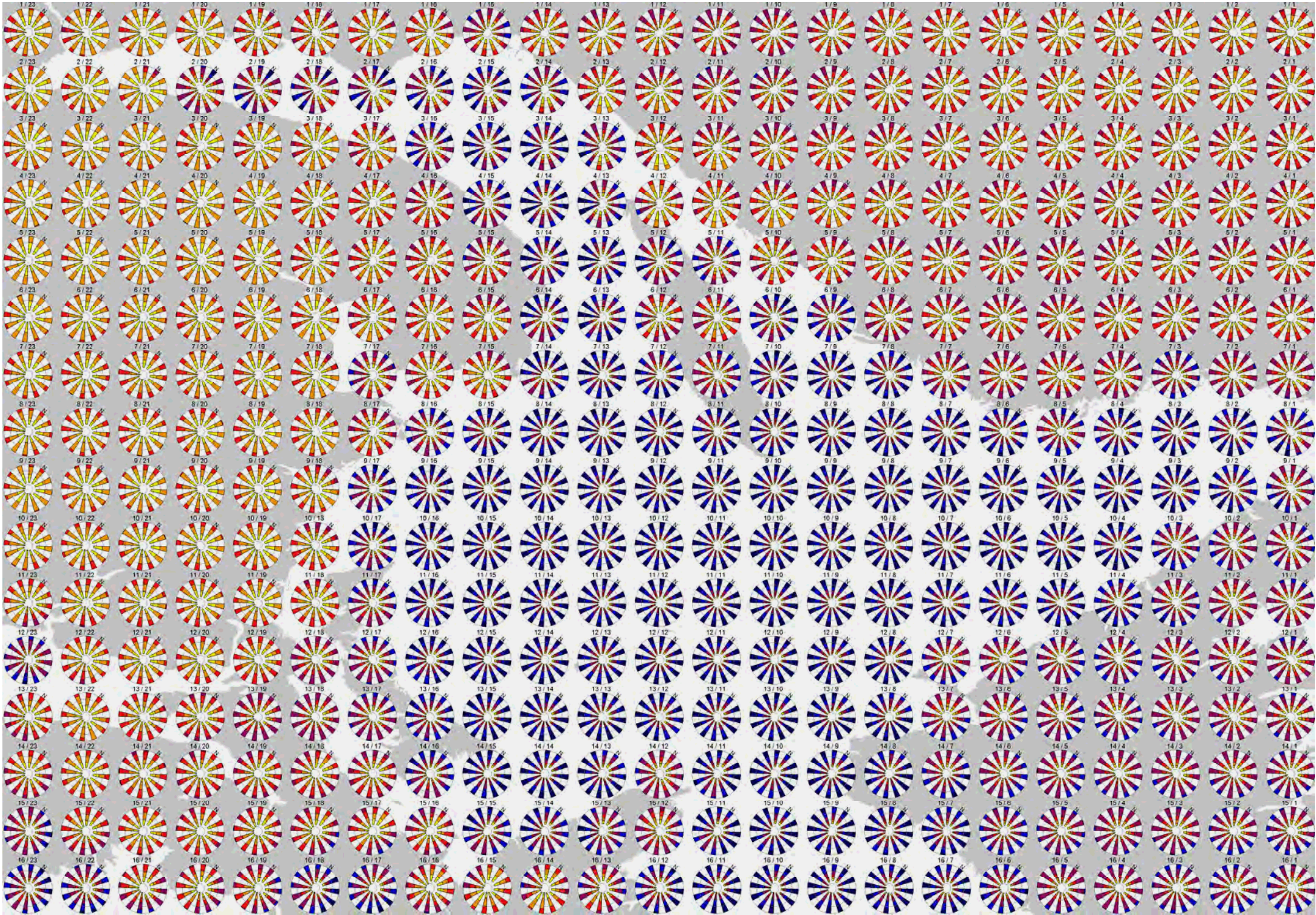


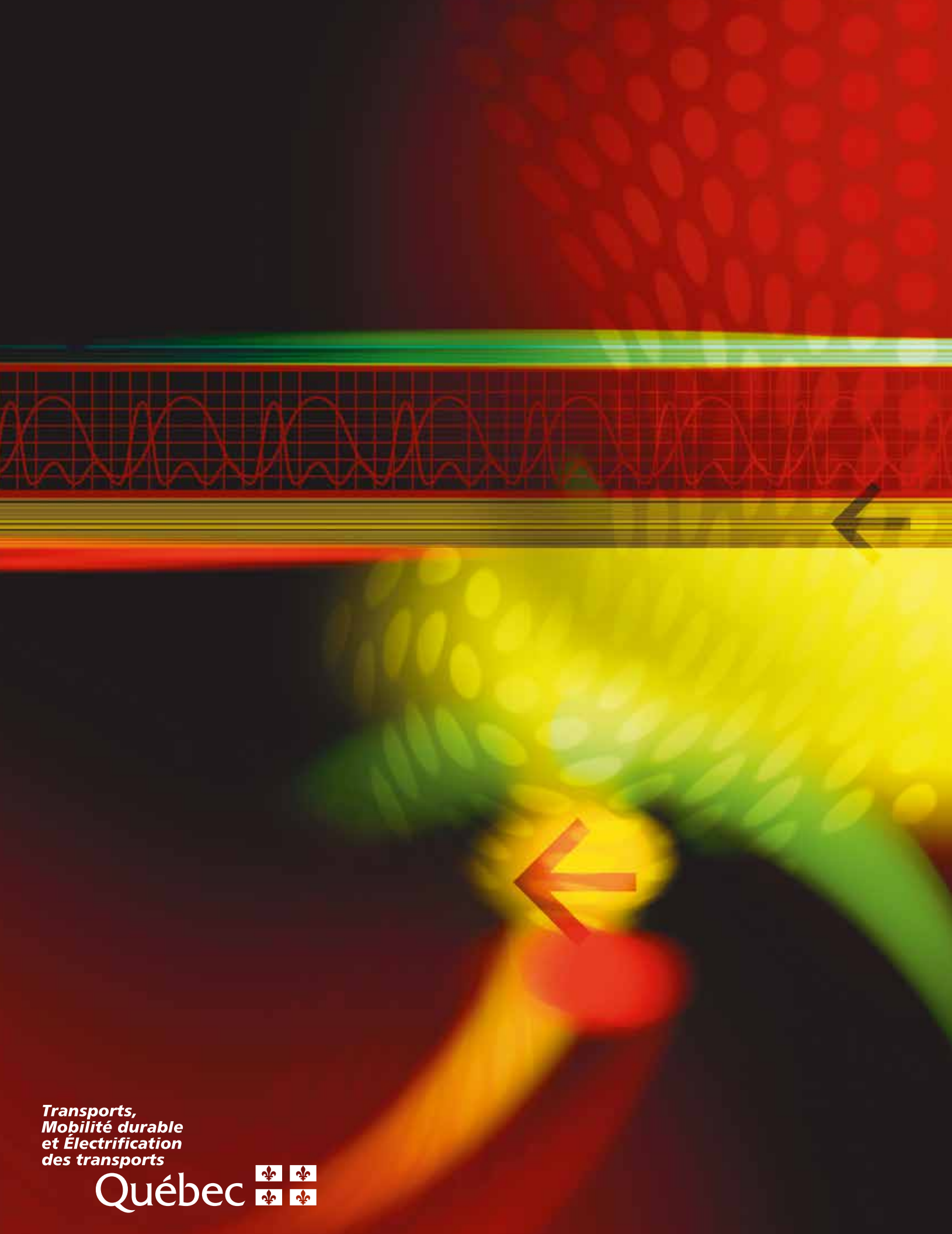
ANNEXE 8
ROSES DES VENTS DE MRCC-AHJ 1981-2010
POUR L'ENSEMBLE DU GOLFE

VENT MRCC-AHJ 1981-2010



Les quatre cercles représentent, de l'extérieur vers le centre, 0,01 %, 0,1 %, 1 % et 10 %.





*Transports,
Mobilité durable
et Électrification
des transports*

Québec  
 