



# Considérations techniques et caractérisation de l'environnement physique marin du secteur de Old Harry

Rapport  
**R-15-039-1248**

**Destinataire :**  
**MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES NATURELLES**  
**(MERN)**

**Deuxième révision**  
**Octobre 2015**

Captain Robert A. Bartlett Building  
Morrissey Road  
St. John's, NL  
Canada A1B 3X5

T: (709) 864-8354  
F: (709) 864-4706

[Info@c-core.ca](mailto:Info@c-core.ca)  
[www.c-core.ca](http://www.c-core.ca)

Société certifiée ISO 9001:2008

*Page laissée en blanc intentionnellement*

# **Considérations techniques et caractérisation de l'environnement physique marin du secteur de Old Harry**

## **Destinataire du rapport :**

MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES NATURELLES (MERN)

## **Auteur du rapport :**

C-CORE

## **Numéro de rapport C-CORE :**

R-15-039-1248

Deuxième révision

Octobre 2015



Captain Robert A. Bartlett Building  
Morrissey Road  
St. John's, NL  
Canada A1B 3X5

T: (709) 864-8354  
F: (709) 864-4706

[Info@c-core.ca](mailto:Info@c-core.ca)  
[www.c-core.ca](http://www.c-core.ca)

Société certifiée ISO 9001:2008

**Titre exact du présent rapport :**

C-CORE. (2015). *Considérations techniques et caractérisation de l'environnement physique marin du secteur de Old Harry*, C-CORE Rapport R-15-039-1248, Deuxième révision.

**Équipe chargée du projet**

Tony King (directeur de projet)

Grant Parr

Rob Briggs

Perry Moore

Martin Richard

Robert Burton

Rodney McAfee

Sylvia Bryson

Rocky Taylor (Memorial University/Centre for Arctic Resource Development)

Lesley James (Memorial University)

### HISTORIQUE DES RÉVISIONS

VERSION	NOM	SOCIÉTÉ	DATE DES MODIFICATIONS	COMMENTAIRES
1.0	Tony King	C-CORE	07/31/15	Ébauche pour examen
2.0	Tony King	C-CORE	10/02/15	Commentaires inclus

### LISTE DE DISTRIBUTION

ORGANISATION	NOM	NOMBRE D'EXEMPLAIRES
MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES NATURELLES (MERN)	Pierre Rhéaume Pascal Perron	1 (pdf)

## RÉSUMÉ

Dans le présent rapport, nous avons passé en revue les vents, les vagues, les courants, les embruns vergaçants, la visibilité, les glaces, les icebergs et les conditions géotechniques du site Old Harry dans le golfe du Saint-Laurent.

Les vents, les vagues et les courants sont raisonnablement bien compris à partir des prévisions rétrospectives et modèles existants, et la collecte de données en cours sur le site améliorera cette compréhension. Les statistiques sur les vents et les vagues sont fondées sur une analyse de la base de données MSC50. Selon cette base de données, la vitesse maximale du vent au cours des 100 dernières années est de 27,2 m/s, et la hauteur maximale des vagues au cours des 100 dernières années est de 10,9 m. L'étude des courants est fondée sur une analyse de données produites par le modèle actuel CECOM, qui a produit des courants simulés sur une période de 10 ans à intervalle d'une demi-heure à divers niveaux dans la colonne d'eau. La vitesse actuelle extrême sur 100 ans à 2 m de profondeur a été estimée à 1,17 m/s, et à 50 m, elle a été estimée à 0,69 m/s.

L'étude des embruns verglaçants est fondée sur un modèle qui utilise les paramètres environnementaux de simulation rétrospective comme la vitesse du vent, la température de l'air et de l'eau pour calculer un indice de givrage. L'étude de la visibilité est fondée sur des données produites par le modèle de simulation rétrospective North American Regional Reanalysis (NARR). Bien que ces modèles soient d'un usage très répandu et généralement accepté, ils n'ont pas été vérifiés ni étalonnés expressément pour le site Old Harry.

Les données existantes sur le fond marin provenant de la Commission géologique du Canada (CGC) et d'autres sources pour la région ont été examinées. Il n'a cependant pas été possible d'obtenir des données géotechniques propres au site.

Les données sur les glaces sous la forme de cartes du Service canadien des glaces fournissent une bonne compréhension de la fréquence, de la concentration et des types de glace sur le site, et il a été noté, par comparaison de données sur des intervalles de dix ans, que les conditions glacielles ont subi des changements à long terme qui ont eu tendance à réduire l'intensité des conditions glacielles. Pour la période de 10 ans comprise entre 2006 et 2015, on note trois années durant lesquelles il n'y a pas eu de banquise, une concentration maximale supérieure à neuf dixièmes (couverture de 90 %) a été atteinte pendant cinq ans, et en moyenne il n'y avait pas de glace (concentration  $\geq$  un dixième, ou couverture de 10 %) pendant quatre semaines. Il manque cependant d'information sur l'épaisseur de la banquise, la formation de crêtes de glace et la dérive de la banquise, données qui seront nécessaires pour une analyse détaillée.

L'information disponible est insuffisante pour estimer la fréquence des icebergs au site Old Harry. Selon l'information dont on dispose sur les icebergs, la fréquence de ces derniers serait très

faible, l'observation rapportée la plus rapprochée d'un iceberg depuis 1975 étant à 100 km du site Old Harry. Cependant, contrairement aux Grands Bancs, cette région ne fait pas l'objet d'une surveillance régulière des icebergs. Par conséquent, omettre le risque lié aux icebergs sur la base de ces données limitées pourrait mener à une sous-estimation du risque réel lié aux icebergs sur le site, ainsi le risque d'une possible collision malgré tout être pris en considération même si ce risque est faible en raison des conséquences que pourraient avoir un tel événement.

Les mesures suivantes sont proposées pour remédier aux lacunes dans nos connaissances ainsi qu'aux incertitudes qui en découlent :

- l'utilisation de données satellitaires pour mieux définir la fréquence des icebergs, ainsi que la distribution des glaces flottantes selon leur taille et la répartition de leurs épaisseurs;
- la collecte de données sur l'épaisseur et la dérive de la banquise au moyen d'un sonar à vision ascendante;
- la collecte de données sur les embruns verglaçants et la visibilité;
- la collecte de données géotechniques;
- l'analyse préliminaire des charges théoriques des glaces au moyen de la meilleure information disponible;
- la collecte de données sur la charge des glaces au moyen d'une bouée munie de panneaux de charge.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
1 INTRODUCTION .....	1
2 LES VENTS.....	4
2.1 Provenance des données .....	4
2.2 Valeurs extrêmes.....	5
2.3 Analyse statistique .....	6
2.3.1 Tableau récapitulatif .....	6
2.3.2 Histogramme.....	6
2.3.3 Probabilité de dépassement.....	7
2.3.4 Observations sur la notation de la direction du vent .....	8
2.3.5 Roses des vents .....	8
3 LES VAGUES.....	10
3.1 Provenance des données .....	10
3.2 Valeurs extrêmes.....	10
3.3 Analyse statistique .....	11
3.3.1 Tableau récapitulatif.....	11
3.3.2 Série chronologique des vagues .....	11
3.3.3 Histogrammes .....	13
3.3.4 Tableaux des probabilités de dépassement .....	14
3.3.5 Durée de la hauteur significative de vague inférieure au seuil fixé .....	16
3.3.6 Probabilité de réalisation simultanée de hauteurs significatives de vague et de périodes de vague .....	17
3.3.7 Rose des vagues .....	18
4 LES COURANTS.....	20
4.1 Aperçu .....	20
4.2 Observations sur les statistiques vectorielles .....	21
4.3 Observations sur la notation de la direction des courants .....	21
4.4 Bouée océanographique .....	21
4.4.1 Aperçu des données .....	21
4.4.2 Méthode de traitement .....	22
4.4.3 Résultats.....	22
4.5 Données modélisées .....	27
4.5.1 Aperçu des données .....	27
4.5.2 Méthode de traitement .....	27
4.5.3 Résultats.....	28

4.5.3.1	Profils en fonction de la profondeur.....	28
4.5.3.2	Séries chronologiques.....	29
4.5.3.3	Roses des courants .....	34
4.5.3.4	Valeur moyenne, valeur maximale et écart-type .....	37
4.5.3.5	Analyse des valeurs extrêmes (AVE).....	38
5	LES EMBRUNS VERGLAÇANTS.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.1	Contexte .....	41
5.2	Méthode d'analyse.....	42
5.3	Données d'entrée.....	44
5.3.1	OSTIA.....	44
5.3.2	Produit d'une réanalyse ERA-Interim .....	45
5.4	Méthode de calcul et observations.....	45
5.5	Résultats .....	46
6	LA VISIBILITÉ.....	52
6.1	Provenance et analyse des données .....	52
6.2	Résultats .....	54
7	LA GLACE DE BANQUISE.....	60
7.1	Données.....	60
7.1.1	Provenance des données .....	60
7.1.2	Traitement des données .....	62
7.1.3	Périodes de temps .....	63
7.1.4	Interpolation des données.....	64
7.1.5	Données manquantes ou sans objet .....	64
7.1.6	Information de base sur la glace de mer .....	64
7.1.6.1	Classification des glaces de la banquise .....	64
7.1.6.2	Concentration de glace et seuils de concentration .....	64
7.1.7	Eau libre et eau sans glace .....	65
7.2	Fréquence des glaces .....	65
7.2.1	Pourcentage de couverture .....	66
7.2.2	Nombre de jours avec de la glace.....	68
7.2.3	Pourcentage de jours avec de la glace.....	69
7.2.4	Série chronologique de la concentration de glace .....	69
7.3	Concentration de glace de banquise.....	74
7.4	Classification des glaces .....	76
7.4.1	Type de glace prédominant .....	77
7.4.2	Type de glace le plus épais.....	78
7.5	Épaisseur de la glace .....	82

7.6	Résumé des conditions glacielles .....	85
8	LES ICEBERGS .....	86
8.1	Introduction.....	86
8.2	Analyse de la base de données d'observation des icebergs PERD (2013) .....	88
8.3	Conclusions.....	93
9	LES PROPRIÉTÉS DU FOND MARIN.....	95
9.1	Introduction.....	95
9.2	Bathymétrie.....	95
9.3	Sédiments du fond marin .....	95
9.4	Géorisques.....	97
9.4.1	Phénomène de pression interstitielle.....	97
9.4.2	Instabilité du fond marin .....	97
9.4.3	Sismicité .....	97
10	LACUNES DE L'INFORMATION ET ÉTUDES SUPPLÉMENTAIRES À EFFECTUER .....	99
10.1	Fréquence des icebergs.....	99
10.2	Données sur la banquise .....	99
10.3	Embruns verglaçants et visibilité.....	100
10.4	Collecte de données géotechniques .....	100
10.5	Analyse des charges de glace .....	100
10.6	Collecte de données sur les charges de glace .....	101
11	CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES POUR LE FORAGE EN MER .....	102
11.1	Introduction.....	102
11.2	Forage en mer .....	102
11.3	Temps violent .....	105
11.4	Apport de la gestion des glaces.....	106
11.5	Ravitaillement et transbordement.....	107
11.6	Trafic maritime .....	107
11.7	Courants marins .....	109
11.8	Mouvement des glaces de mer .....	109
11.9	Propriétés du fond marin .....	109
12	CONCLUSIONS .....	110
13	RÉFÉRENCES .....	111
	ANNEXE A – LES VENTS .....	116
	ANNEXE B – LES VAGUES .....	128
	ANNEXE C – NOMBRE DE JOURS PAR MOIS AVEC DE LA GLACE .....	164

---

ANNEXE D – POURCENTAGE DE JOURS PAR MOIS AVEC DE LA GLACE.....	169
ANNEXE E – CONCENTRATION MENSUELLE .....	174
ANNEXE F – TYPE DE GLACE PRÉDOMINANT SELON LE MOIS.....	179
ANNEXE G – TYPE DE GLACE LE PLUS ÉPAIS SELON LE MOIS .....	184
ANNEXE H – PROBABILITÉ D'ÉPAISSEUR DE GLACE SELON LE MOIS.....	189

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Vitesses du vent extrêmes en fonction des périodes de retour .....	6
Tableau 2. Résumé des vitesses du vent .....	6
Tableau 3. Vitesse du vent et probabilité de dépassement par mois .....	8
Tableau 4. Hauteurs significatives de vague extrêmes.....	10
Tableau 5. Résumé des hauteurs significatives de vague.....	11
Tableau 6. Probabilité de dépassement mensuel des hauteurs significatives de vague .....	15
Tableau 7. Probabilité de dépassement mensuel des périodes spectrales de pointe .....	16
Tableau 8. Distribution de la réalisation simultanée de hauteurs significatives de vague et de périodes de vague .....	18
Tableau 9. Sommaire récapitulatif des données sur les courants produites par la bouée .....	22
Tableau 10. Amplitudes moyennes mensuelles des courants.....	38
Tableau 11. Amplitudes mensuelles maximales des courants .....	38
Tableau 12. Écarts-types des amplitudes des courants.....	38
Tableau 13. Données de l'analyse des valeurs extrêmes sur 10 ans.....	39
Tableau 14. Données de l'analyse des valeurs extrêmes sur 100 ans.....	40
Tableau 15. Types de glace définis par le SCG.....	65
Tableau 16. Comparaison entre les types de glace retenus et ceux du SCG.....	76
Tableau 17. Exemple de répartition de la glace prédominante et de la glace la plus épaisse.....	78
Tableau 18. Plage d'épaisseur par catégorie de glace.....	82
Tableau 19. Exemple de calcul de la probabilité moyenne des glaces selon les diverses plages d'épaisseur .....	83
Tableau 20. Observations d'icebergs tirées de la base de données sur l'observation d'icebergs PERD (2013) près du site Old Harry .....	91

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de Old Harry .....	3
Figure 2. Points de grille de la base de données MSC50 près de Old Harry .....	5
Figure 3. Histogramme de la vitesse horaire du vent .....	7
Figure 4. Rose des vents de janvier .....	9
Figure 5. Série chronologique des hauteurs de vague supérieures au seuil de 4 m .....	12
Figure 6. Histogramme des hauteurs significatives de vague .....	13
Figure 7. Histogramme de la période spectrale de pointe .....	14
Figure 8. Durée de hauteur significative de vague inférieure au seuil fixé en janvier .....	17
Figure 9. Hauteur, direction et fréquence des vagues en janvier .....	19
Figure 10. Carte reproduisant la zone d'intérêt et la position de Old Harry, de la bouée IML10, de la grille du modèle et du point de données du modèle utilisé dans l'étude (les positions des bouées les plus près de la zone couverte par la base de données IDO dont il n'a pas été tenu compte en raison de leur éloignement du site étudié sont indiquées aussi; la bouée IDO la plus rapprochée de Old Harry n'a fonctionné qu'un peu plus de un mois en 1979) .....	20
Figure 11. Graphiques de séries chronologiques indiquant l'amplitude (graphique supérieur) et la direction (graphique inférieur) des courants .....	24
Figure 12. Rose des courants à partir de données (non mises en moyenne) sur les courants (tranches de 15°) à 6 m .....	25
Figure 13. Rose des courants à partir de données (non mises en moyenne) sur les courants (tranches de 15°) à 0 m .....	26
Figure 14. Graphiques du profil en fonction de la profondeur représentant la moyenne mensuelle de l'amplitude des courants (graphique de gauche), l'amplitude mensuelle maximale des courants (au centre) et la moyenne mensuelle de la direction des courants (à droite) .....	28
Figure 15. Graphique de la série chronologique à 2 m de profondeur .....	30
Figure 16. Graphique de la série chronologique à 6 m de profondeur .....	31
Figure 17. Graphique de la série chronologique à 50 m de profondeur .....	32
Figure 18. Graphique de la série chronologique à 460 m de profondeur .....	33
Figure 19. Roses des courants selon la saison à 2 m de profondeur .....	34
Figure 20. Roses des courants selon la saison à 6 m de profondeur .....	35
Figure 21. Roses des courants selon la saison à 50 m de profondeur .....	36
Figure 22. Roses des courants selon la saison à 460 m de profondeur .....	37
Figure 23. Série chronologique de l'intensité du givrage pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré .....	47
Figure 24. Statistiques de probabilité de givrage (avec l'intensité de givrage correspondante) en jours juliens pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré .....	48
Figure 25. Proportion des années au cours desquelles les conditions favorisent le givrage, par degré d'intensité, en jours juliens pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré .....	49

Figure 26. Nombre moyen de jours par mois au cours desquels les conditions favorisent le givrage, par degré d'intensité, en jours juliens pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré .....	50
Figure 27. Pourcentage de jours en fonction de l'intensité du givrage annuel et hivernal pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré.....	51
Figure 28. Série chronologique d'épisodes de brouillard (en rouge) observés et d'épisodes de faible visibilité (en bleu) modélisés (visibilité <1 km) à l'Aéroport international de St. John (YYT) pour l'année 2012.....	54
Figure 29. Pourcentage du temps où la visibilité horizontale est inférieure à 1 km selon l'heure du jour et le mois de l'année, au lieu considéré.....	55
Figure 30. Pourcentage d'heures du jour par mois offrant une faible visibilité, à chacun des trois seuils, au lieu considéré .....	56
Figure 31. Nombre journalier moyen d'heures du jour offrant une visibilité supérieure à 1 km au lieu considéré .....	57
Figure 32. Pourcentage d'heures totales par mois offrant une faible visibilité à chacun des trois seuils, au lieu considéré .....	58
Figure 33. Nombre journalier moyen d'heures totales offrant une visibilité supérieure à 1 km au lieu considéré .....	59
Figure 34. Exemple de carte régionale hebdomadaire de la côte Est (SCG, 2015) .....	61
Figure 35. Exemple de carte journalière du golfe du Saint-Laurent.....	62
Figure 36. Localisation du secteur de Old Harry et de la zone d'intérêt .....	63
Figure 37. Exemple de pourcentage moyen de couverture de la zone d'intérêt par de la glace (2006-2015).....	67
Figure 38. Exemple de pourcentage maximal de couverture de la zone d'intérêt par de la glace (2006-2015).....	68
Figure 39. Exemple du nombre annuel de semaines avec de la glace .....	70
Figure 40. Exemple du pourcentage annuel de jours avec de la glace.....	71
Figure 41. Série chronologique de la concentration moyenne de glace .....	72
Figure 42. Série chronologique de la concentration maximale de glace.....	73
Figure 43. Concentration annuelle de glace lorsque celle-ci est présente.....	75
Figure 44. Type de glace prédominant sur une base annuelle.....	80
Figure 45. Type de glace le plus épais sur une base annuelle .....	81
Figure 46. Probabilité annuelle de présence de glace selon son épaisseur .....	84
Figure 47. Courants régionaux influant sur la dérive des icebergs (Garde côtière canadienne, 2015) .....	86
Figure 48. Carte des icebergs du Service canadien des glaces du 22 mai 2001 .....	87
Figure 49. Carte de la Patrouille internationale des glaces, mai 1962 .....	87
Figure 50. Carte d'analyse des icebergs du SCG du 16 mai 2008 (à remarquer, le nombre important d'icebergs longeant la côte sud de Terre-Neuve) .....	88
Figure 51. Observations d'icebergs tirées de la base de données sur les observations d'icebergs PERD (2013).....	89

---

Figure 52. Observations d'icebergs tirées de la base de données PERD (2013) aux environs de Old Harry .....	90
Figure 53. Observations d'icebergs tirées de la base de données sur les observations d'icebergs PERD (2013), de 1975 à 2012.....	92
Figure 54. Observations d'icebergs tirées de la base de données PERD (2013) aux environs de Old Harry (1975-2012) .....	93
Figure 55. Zones examinées par Canatec (1997) pour le risque de contact d'icebergs avec des superstructures en mer .....	94
Figure 56. Position approximative du prospect Old Harry avec ses caractéristiques géotechniques .....	96
Figure 57. Installations types de forage en eau profonde : plateforme semi-submersible (à gauche) et navire de forage (à droite) de MMS (2000) .....	104
Figure 58. Trafic maritime dans le golfe du Saint-Laurent. Nombre de navires (par cellule en minutes d'arc 2 × 2, de mars 2010 à février 2011), modifié par l'ajout du site Old Harry (LGL Limited, 2013) .....	108

## 1 INTRODUCTION

À partir du plan d'action gouvernemental sur le secteur des hydrocarbures, deux (2) évaluations environnementales stratégiques (EES), l'une globale et l'autre propre à Anticosti, ont été commandées par le gouvernement du Québec. Ces deux évaluations visent à faire le point sur l'état des connaissances et à acquérir l'information nécessaire pour définir une politique gouvernementale des hydrocarbures du point de vue environnemental, social, économique, de leur mise en valeur et de la sûreté de leur transport. Ce que cette démarche vise en définitive :

- acquérir une meilleure compréhension du potentiel économique à tirer des hydrocarbures sur le territoire;
- combler le manque d'information sur les techniques employées, y compris la fracturation hydraulique et les conditions d'exploration et d'exploitation en milieu marin;
- analyser les risques pour l'environnement et déterminer les mesures à prendre pour les limiter et assurer une bonne gestion;
- étudier les mécanismes de consultation et de dialogue, en suscitant l'adhésion des collectivités et favorisant le développement durable du territoire;
- répertorier les pratiques exemplaires devant être mises en œuvre par l'industrie et ses partenaires;
- étudier les besoins en pétrole et en gaz naturel;
- comparer les risques associés aux différents modes de transport;
- améliorer le cadre législatif et réglementaire.

Le prospect Old Harry (Figure 1) dans le golfe du Saint-Laurent pourrait receler d'importantes quantités d'hydrocarbures. Il a été demandé à C-CORE de faire un résumé de l'environnement physique marin de l'endroit. Les objectifs de l'étude (numéro GTEC09 de Chantier - Aspects Techniques) sont les suivants :

- déterminer et préciser les considérations techniques susceptibles d'influer sur les infrastructures de forage en mer, les activités de forage, notamment le ravitaillement et le transbordement, ainsi que les mesures propres aux conditions qui existent dans la région de Old Harry en ce qui a trait aux éléments suivants :
  - les vents, pour lesquels la moyenne mensuelle sera examinée, ainsi que leur distribution, les extrêmes décennaux et centennaux et les diagrammes en rosette;
  - les vagues, pour lesquelles la moyenne mensuelle sera examinée, leur distribution, les extrêmes décennaux et centennaux, le couple hauteur-période et la fenêtre d'exploitation mensuelle (seuils et durées sur une base mensuelle);

- les courants, pour lesquels un résumé des données existantes sera préparé à partir de systèmes d'ancrage et d'informations tirées de données modélisées sur les courants (s'il en existe);
- les embruns verglaçants;
- la visibilité, en particulier la fréquence à laquelle les conditions de visibilité peuvent empêcher le vol d'hélicoptères;
- la banquise, en particulier la fréquence, la concentration, la nature, l'épaisseur, la vitesse de dérive des glaces et leur évolution dans le temps;
- le risque d'irruption d'icebergs;
- les caractéristiques du fond marin, plus particulièrement pour les besoins d'ancrage et la conception des conduites montantes de production.
- Déterminer les lacunes de l'information et les études pouvant être requises pour parfaire nos connaissances.
- Dans le cadre de ce mandat, le contractant s'engage à déterminer les considérations générales concernant l'aménagement d'infrastructures de forage en mer, les forages, y compris le ravitaillement et le transbordement, et des mesures propres au contexte du secteur de Old Harry, en particulier en ce qui concerne les courants marins, les caractéristiques physiques du fond marin, le mouvement des glaces et les tempêtes océaniques.

Le présent rapport a été préparé au nom du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique annoncée le 30 mai 2014. Le gouvernement du Québec n'assume aucune responsabilité quant au contenu de ce document.

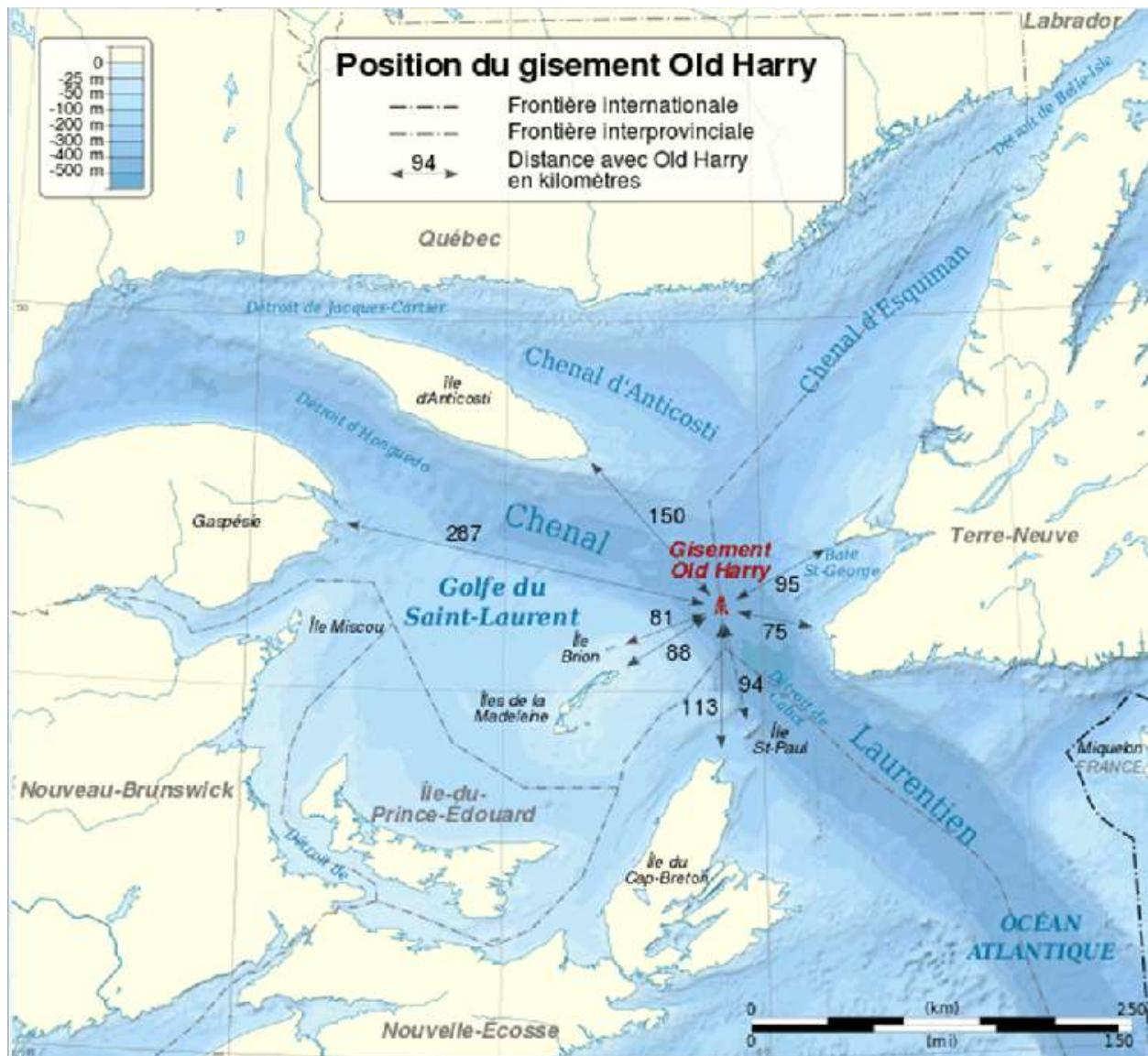


Figure 1. Localisation de Old Harry

Source : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Old\\_Harry\\_oil\\_field\\_location\\_map-fr.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Old_Harry_oil_field_location_map-fr.svg)

## 2 LES VENTS

### 2.1 PROVENANCE DES DONNÉES

Les données sur les vents proviennent essentiellement de la base de données MSC50 (Swail, Cardone, Ferguson, Gummer, Harris, Orelup and Cox, 1996). Cette base de données, établie par Oceanweather Inc. pour Environnement Canada, regroupe des données sur les simulations rétrospectives des vents et des vagues qui couvrent l'océan Atlantique au nord de l'équateur. Cet ensemble de données contient des enregistrements sur une heure ou trois heures des valeurs du vent et des vagues sur 60 ans, soit de 1954 à 2013. La *vitesse du vent* correspond à la moyenne sur une heure d'un vent effectif neutre en m/s à 10 m de hauteur. La *direction du vent* correspond en degrés à la direction d'origine du vent, dans le sens horaire à partir du nord. Les données de la base MSC50 sont présentées pour un certain nombre de points géographiques, généralement à une résolution de 0,5 degré pour les zones septentrionales et une résolution de 0,1 degré pour les zones méridionales comme les Grands Bancs et le golfe du Saint-Laurent (voir la Figure 2). Le point de données M6013509 de la base MSC50 occupant la position 48,1° N, 60,4° O, a été choisi pour représenter la zone d'intérêt.

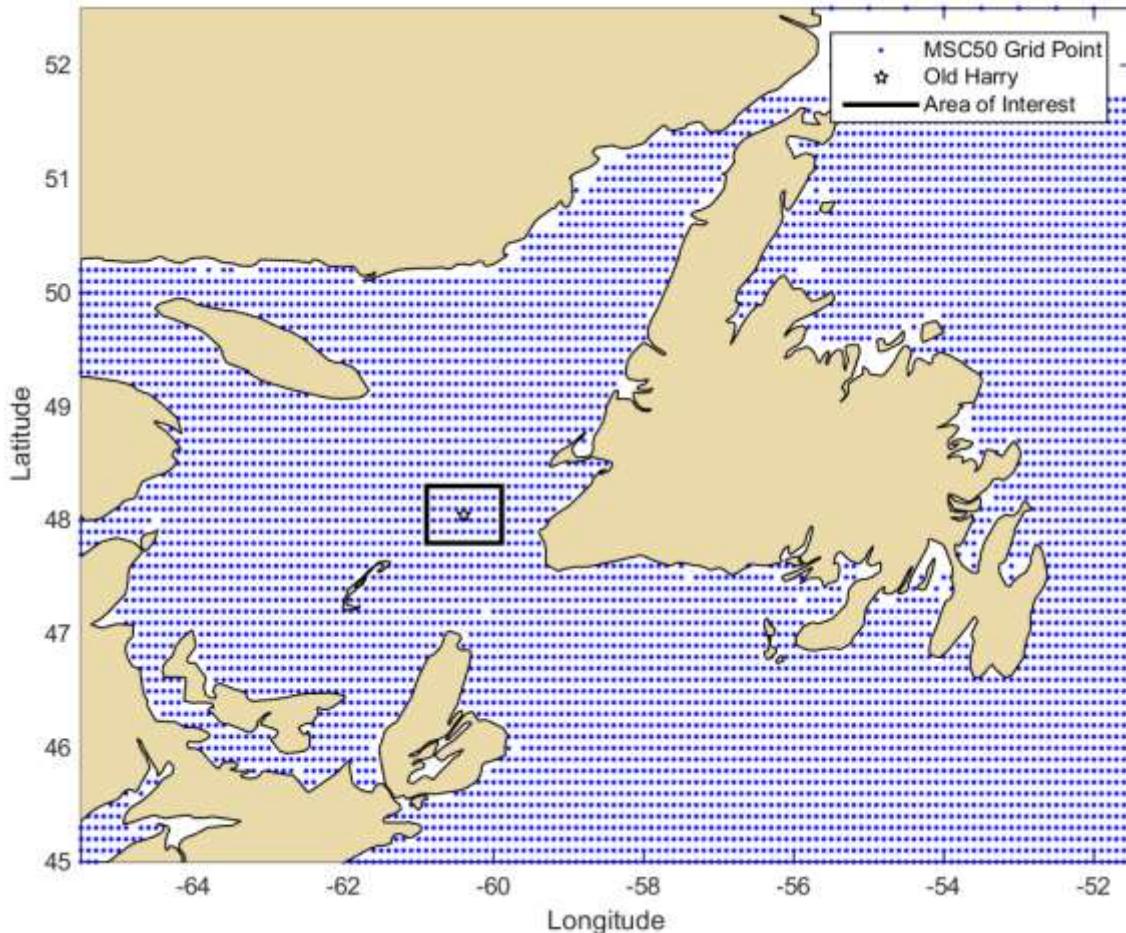


Figure 2. Points de grille de la base de données MSC50 près de Old Harry

## 2.2 VALEURS EXTRÊMES

L'intégralité des données de simulation rétrospective de la base MSC50 sur 60 ans a servi à décrire les vents de l'endroit. Les vitesses de vent extrêmes d'une période de retour de 10, 25, 50 et 100 ans ont été déterminées. Les données ont été détaillées par mois afin qu'elles rendent compte des tendances saisonnières. Les valeurs des périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans ont été déterminées par une analyse des valeurs extrêmes dépassant un seuil donné. Ce seuil a été fixé pour chaque mois de façon à conserver un minimum de 50 tempêtes sur la période de 60 ans, sans les pointes de vent sur 48 heures correspondant à un maximum local. Ces seuils ont été fixés pour être relevés et abaissés par tranches de 0,5 m/s jusqu'à l'atteinte du nombre minimal de tempêtes.

Les vitesses du vent des tempêtes ont été approximées avec une distribution de Weibull décalée, et les vitesses du vent au niveau de probabilité approprié pour les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans ont été déterminées à partir des paramètres de Weibull. La distribution a été décalée d'une valeur égale au seuil du mois considéré. Les vitesses mensuelles extrêmes du vent

sur 10, 25, 50 et 100 ans figurent au Tableau 1. Il convient de préciser que ce sont des vitesses moyennes du vent sur une heure, pas des rafales.

Tableau 1. Vitesses du vent extrêmes en fonction des périodes de retour

48.1°N -60.4°W		Wind Speed Extremes by Return Period												
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
WS (m/s)	10 Year	23.9	22.5	21.5	20.7	17.9	16.5	15.4	16.8	20.1	21.1	23	24.2	25
	25 Year	24.8	23.4	22.5	22.3	18.9	17.7	16.5	18	21.7	22.2	24.6	25.2	25.9
	50 Year	25.5	24.1	23.2	23.5	19.5	18.5	17.4	18.8	23	23.1	25.7	26	26.6
	100 Yr.	26.1	24.7	23.9	24.7	20.2	19.4	18.3	19.7	24.2	24	26.9	26.7	27.2

## 2.3 ANALYSE STATISTIQUE

### 2.3.1 Tableau récapitulatif

Un résumé des vitesses du vent est présenté au Tableau 2. Les paramètres qui y sont définis sont les suivants :

- Moyenne : moyenne scalaire des vitesses du vent sous forme de séries chronologiques
- Écart-type : écart-type des vitesses du vent des séries chronologiques
- Médiane : médiane des vitesses du vent des séries chronologiques
- P90 : 90<sup>e</sup> percentile des vitesses du vent des séries chronologiques
- Max. : valeur maximale des vitesses du vent des séries chronologiques
- Dir. dom. : direction dominante (la plus fréquente) sur des plages de 10 degrés

Tableau 2. Résumé des vitesses du vent

48.1°N -60.4°W		Summary Table - Wind Speed												
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Wind Speed (m/s)	Mean	10.4	8.6	8.2	7.5	6.2	5.7	5.7	6.3	7.6	8.9	9.8	10.6	8
	St. Dev.	4.1	4	4	3.8	3.4	3	2.8	2.9	3.4	3.6	3.9	4.2	4
	Median	10.1	8.2	7.8	7.1	5.9	5.4	5.5	6.1	7.4	8.7	9.5	10.3	7.5
	P90	15.9	14.1	13.7	12.7	10.8	9.9	9.4	10.1	12.1	13.8	15.2	16.3	13.4
	Max.	26.6	23.8	23.2	22.1	20.7	19.8	19.1	19.6	22.7	24	25.2	26	26.6
	Dom. Dir.	295	295	315	305	185	185	215	215	235	285	295	295	295

### 2.3.2 Histogramme

Un histogramme des vitesses du vent est présenté à la Figure 3.

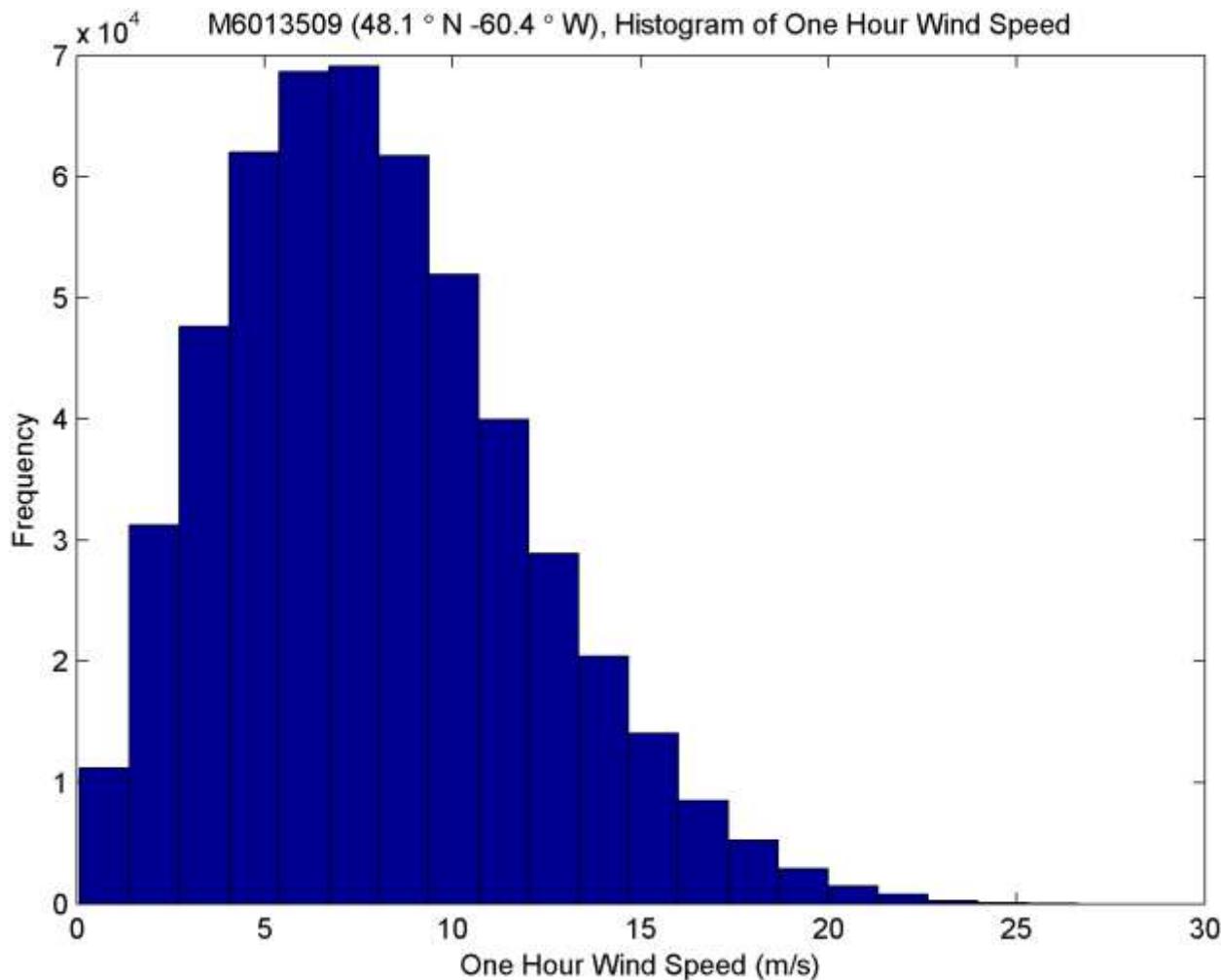


Figure 3. Histogramme de la vitesse horaire du vent

### 2.3.3 Probabilité de dépassement

Les probabilités de dépassement des vitesses du vent sont indiquées au Tableau 3. Les valeurs numériques représentent le nombre de fois (entre 0 et 1) que les vitesses du vent égalent ou dépassent les valeurs inscrites dans chaque rangée. Les données sont présentées pour chaque mois suivant une échelle de couleurs qui représentent les cas les plus probables. Les cas affectés d'une probabilité nulle (0) avec des cases de couleur cyan correspondent aux cases d'une probabilité inférieure à 0,0005 (chiffre arrondi à zéro). Les cas avec une case laissée en blanc et affectées d'une valeur nulle (0) signifient qu'il n'y avait pas de vitesses du vent supérieures à cette valeur dans l'ensemble des données de simulation rétrospective.

Tableau 3. Vitesse du vent et probabilité de dépassement par mois

48.1°N -60.4°W		Wind Speed - Probability of Exceedance by Month											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Wind Speed (m/s)	2	1	0.984	0.984	0.989	0.971	0.974	0.982	0.989	0.995	0.998	0.999	1
	4	0.985	0.931	0.915	0.888	0.805	0.786	0.816	0.873	0.825	0.861	0.96	0.987
	6	0.912	0.796	0.785	0.715	0.593	0.551	0.571	0.65	0.766	0.85	0.897	0.916
	8	0.776	0.615	0.584	0.513	0.382	0.323	0.311	0.388	0.546	0.678	0.744	0.788
	10	0.603	0.428	0.39	0.322	0.202	0.153	0.127	0.175	0.325	0.47	0.548	0.622
	12	0.424	0.264	0.228	0.182	0.092	0.053	0.037	0.059	0.162	0.269	0.358	0.44
	14	0.261	0.145	0.124	0.088	0.036	0.016	0.006	0.016	0.065	0.137	0.207	0.283
	16	0.142	0.07	0.059	0.036	0.01	0.003	0.001	0.003	0.022	0.055	0.108	0.16
	18	0.066	0.031	0.024	0.013	0.002	0.001	0	0.001	0.006	0.02	0.044	0.077
	20	0.027	0.012	0.007	0.004	0	0	0	0	0.002	0.005	0.013	0.033
	22	0.01	0.003	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0.004	0.011
	24	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.002
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 2.3.4 Observations sur la notation de la direction du vent

Lorsque la direction du vent correspond à une valeur numérique, elle indique en degrés la direction du vent d'origine, dans le sens horaire à partir du nord. Un vent de 0° est un vent qui souffle du nord, à 90° par rapport à l'est, à 180° par rapport au sud et à 270° par rapport à l'ouest.

### 2.3.5 Roses des vents

Pour quantifier la fréquence et la force des vents suivant leur direction, une série de graphiques similaires à la Figure 4 ont été créés. Les vents sont répartis en tranches de 10 degrés. La longueur radiale de chaque tranche représente la fréquence; la distribution des couleurs sur chaque barre représente la fréquence des vitesses du vent correspondant à la légende. Les représentations graphiques des roses des vents de chaque mois figurent à l'annexe A.

M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for January

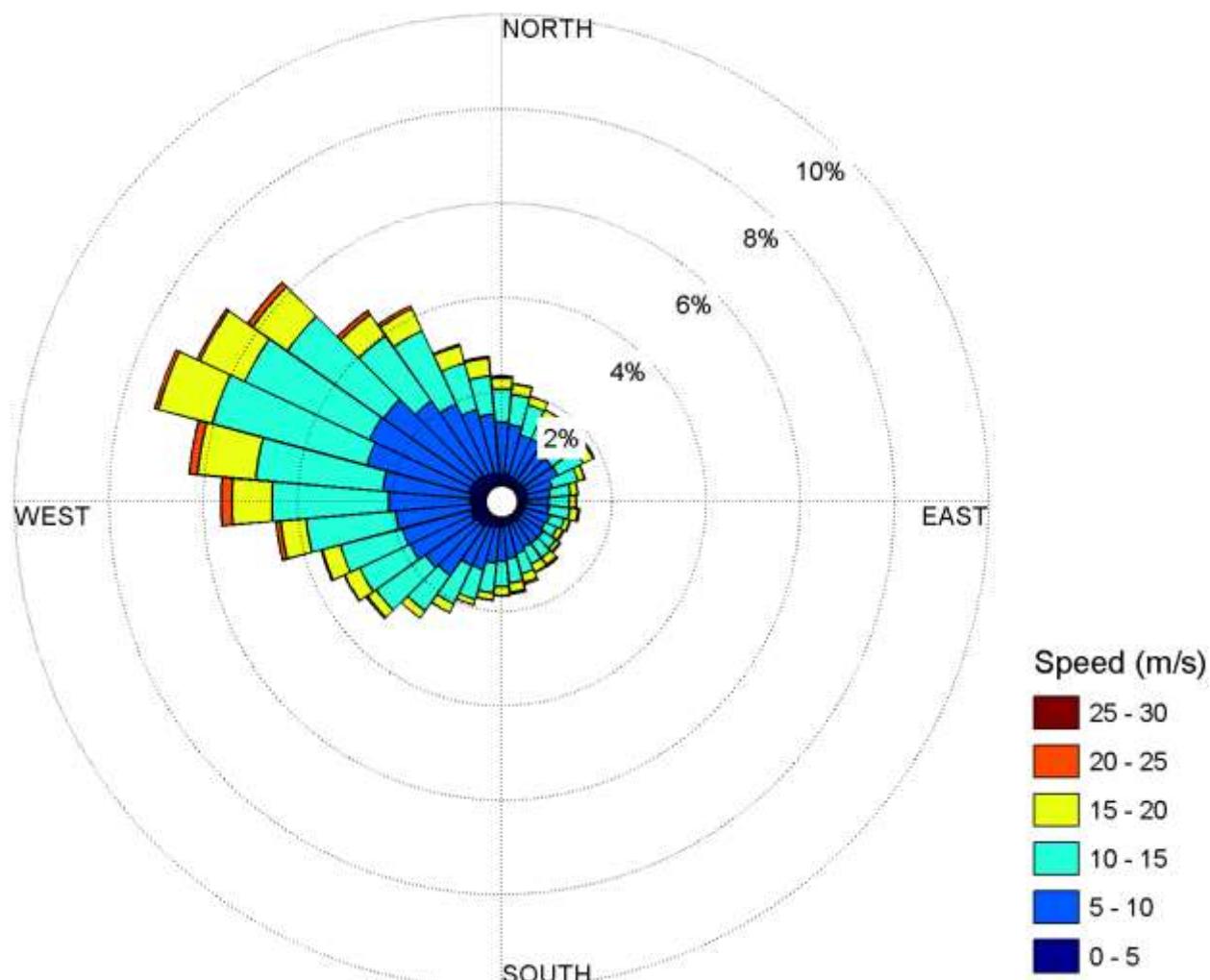


Figure 4. Rose des vents de janvier

### 3 LES VAGUES

#### 3.1 PROVENANCE DES DONNÉES

Comme pour l'analyse du vent, la principale source de données sur les vagues est l'ensemble de données MSC50 (Swail et al., 2006). Il s'agit d'un ensemble de données de simulation rétrospective sur le vent et les vagues des eaux extracôtières. Il contient des enregistrements sur une heure ou trois heures des valeurs du vent et des vagues sur 60 ans, de 1954 à 2013. Les valeurs de hauteur de vague correspondent à des *hauteurs de vague significatives (Hs)* en mètres. Des paramètres supplémentaires sur les caractéristiques des vagues comme la *période spectrale de pointe du spectre total (Tp)* en secondes et la *direction moyenne vectorielle du spectre total* (la direction indiquée en degrés de la provenance des vagues, dans le sens horaire à partir du nord) figurent dans l'ensemble de données et sont utilisés pour des analyses supplémentaires.

#### 3.2 VALEURS EXTRÊMES

Des hauteurs significatives de vague pour des périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans ont été établies au moyen d'une méthode des dépassements de seuil. Ce seuil a été fixé pour chaque mois, saison ou année de manière à produire au minimum 50 tempêtes sur la période de 60 ans. Les hauts de vague sur 48 heures d'un maximum local ont été exclus. Les hauteurs significatives de vague des tempêtes ont été approximées au moyen d'une méthode de distribution exponentielle décalée. La distribution a été décalée d'une valeur égale au seuil du mois considéré et les hauteurs de vague au niveau de probabilité appropriée pour les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans ont été établies. C'est la distribution exponentielle qui a produit le meilleur ajustement général aux données. Le Tableau 4 présente les hauteurs significatives de vague extrême du point de données M6013509 de l'ensemble MSC50.

Les valeurs des périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans supposent que la glace de mer reste constante, ces valeurs étant fondées sur les données des 60 dernières années (de 1954 à 2013). Comme la glace de mer est peu importante dans certaines zones, les valeurs théoriques hivernales des hauteurs de vague peuvent augmenter par suite d'une exposition accrue au vent.

Tableau 4. Hauteurs significatives de vague extrêmes

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height Extremes by Return Period												
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Hs	10 Year	7.9	6.2	5.9	5.7	5	4.3	3.8	4.5	5.7	6.5	7.4	8.4	9
	25 Year	8.7	7	6.7	6.5	5.7	4.9	4.2	5	6.3	7.1	8.1	9.1	9.7
	50 Year	9.3	7.7	7.3	7.1	6.2	5.3	4.6	5.5	6.8	7.5	8.7	9.7	10.3
	100 Yr.	9.9	8.3	7.9	7.7	6.7	5.7	4.9	5.9	7.3	8	9.2	10.3	10.9

### 3.3 ANALYSE STATISTIQUE

#### 3.3.1 Tableau récapitulatif

Un résumé des hauteurs significatives de vague figure au Tableau 5. Les paramètres définis dans le tableau sont les suivants :

- Moyenne – moyenne scalaire des hauteurs significatives de vague des séries chronologiques
- Écart-type : écart-type des hauteurs significatives de vague des séries chronologiques
- Moyenne : moyenne des hauteurs significatives de vague des séries chronologiques
- P90 : 90<sup>e</sup> percentile des hauteurs significatives de vague des séries chronologiques
- Max. : valeur maximale des hauteurs significatives de vague des séries chronologiques
- Dir. dom. : direction dominante (la plus fréquente) des vagues en compartiments de 10 degrés

Tableau 5. Résumé des hauteurs significatives de vague

48,1°N -60,4°W		Summary Table - Wave												
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Sig. Wave Height (m)	Mean	2.2	1	0.8	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.6	2	2.3	2.6	1.5
	St. Dev.	1.4	1.2	1.1	1	0.8	0.7	0.6	0.6	0.9	1.1	1.2	1.4	1.2
	Median	1.9	0.5	0	1.1	1.1	1	0.9	1	1.4	1.7	2	2.3	1.3
	P90	4.1	2.7	2.4	2.6	2.3	2	1.8	2	2.8	3.4	4	4.5	3.1
	Max.	9.2	7.9	6.5	6.9	6.2	5.8	4.9	7	7.4	9	9.2	9.4	9.4
	Dom. Dir.	295	295	345	145	155	155	195	215	215	285	285	295	155

#### 3.3.2 Série chronologique des vagues

Les graphiques des séries chronologiques reproduisent les vagues enregistrées sur 60 ans, y compris lorsqu'il y avait de la glace de mer, par rapport à un seuil. La Figure 5 présente l'enregistrement des vagues à un seuil de 4 m. Les zones laissées en blanc représentent les fois où la simulation rétrospective n'a pas produit de valeur pour la hauteur de vague du fait de la présence de glace (la hauteur des vagues est réputée être nulle alors). Les zones en vert représentent les hauteurs de vague inférieures au seuil (dans ce cas-ci, 4 m) sur trois jours ou plus; les zones en jaune, les hauteurs de vague inférieures au seuil sur trois jours ou moins et les zones rouges, les hauteurs de vague supérieures au seuil.

Une baisse des zones laissées en blanc du graphique de la série chronologique, représentant la glace, peut être observée de la fin des années 1990 à la dernière décennie. Cela signifie que les conditions glacielles sont moins prononcées depuis 1998 et que plus d'épisodes avec des vagues supérieures à 4 m ont eu lieu sur cette période.



Figure 5. Série chronologique des hauteurs de vague supérieures au seuil de 4 m

### 3.3.3 Histogrammes

Des histogrammes des hauteurs significatives de vague et des périodes correspondantes du point de données M6013509 de la base MSC50 sont reproduits à la Figure 6 et à la Figure 77.

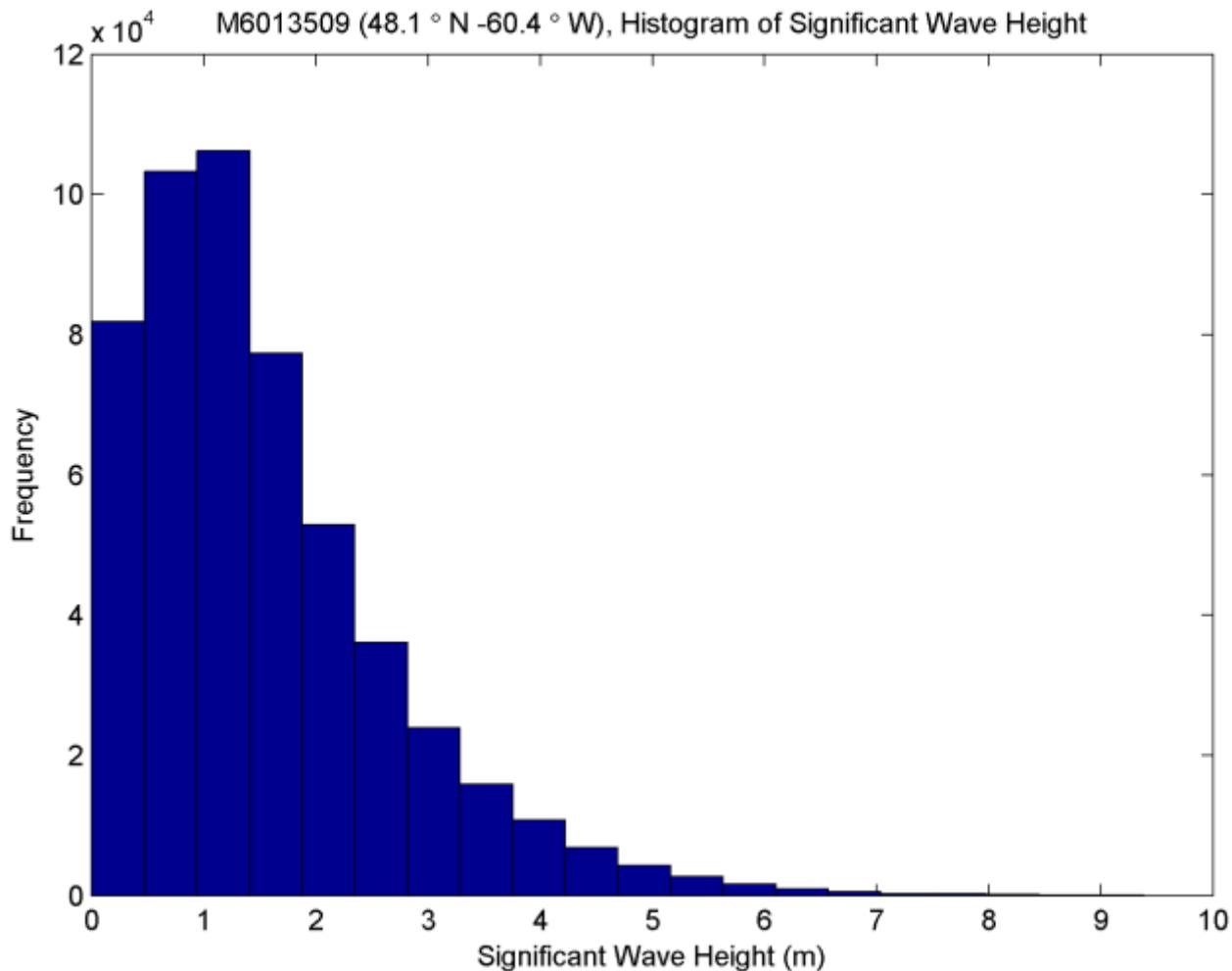


Figure 6. Histogramme des hauteurs significatives de vague

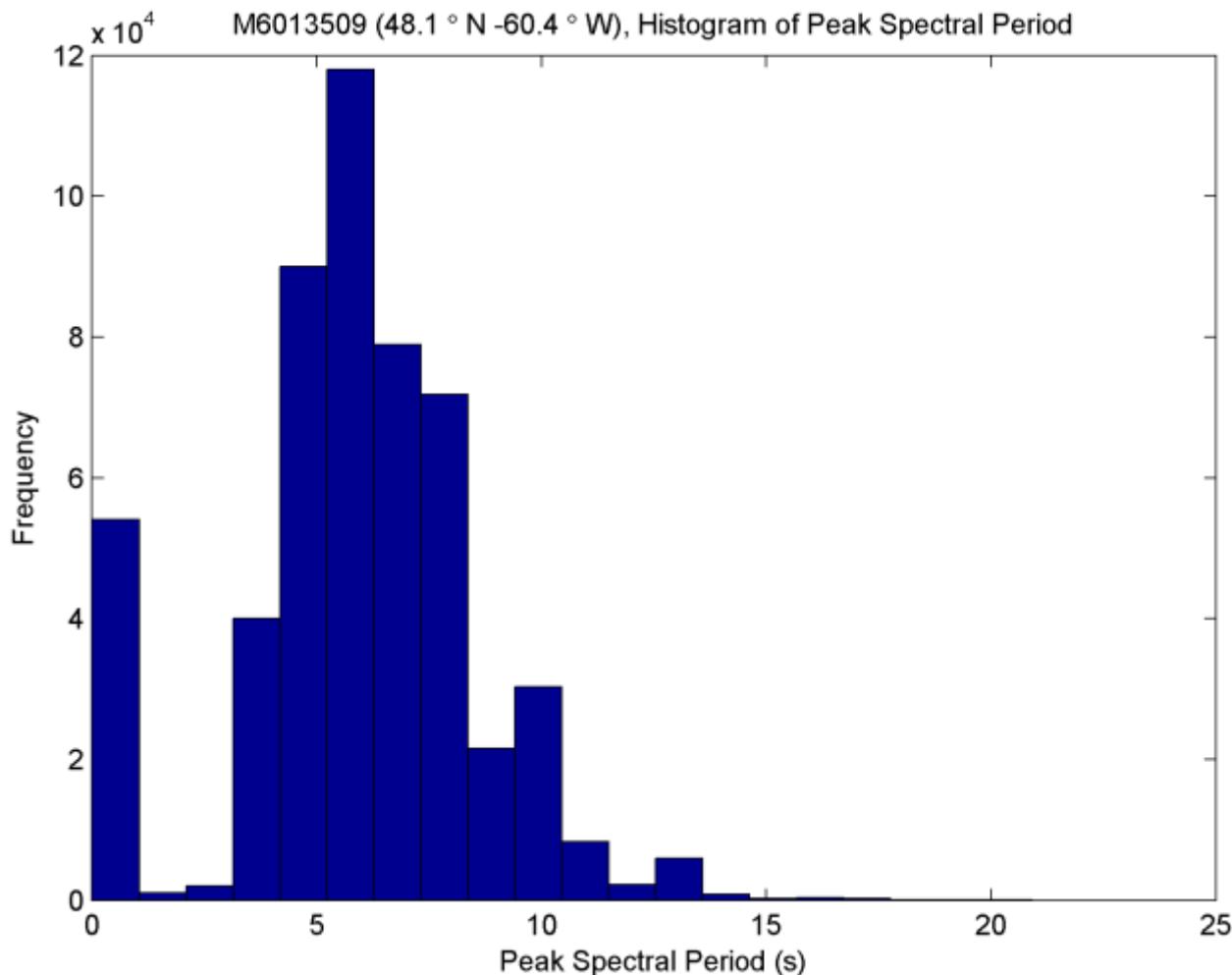


Figure 7. Histogramme de la période spectrale de pointe

### 3.3.4 Tableaux des probabilités de dépassement

La probabilité de dépassement des hauteurs significatives de vague et des périodes correspondantes figure au Tableau 6 et au Tableau 77 respectivement. Les valeurs numériques représentent la proportion du temps (de 0 à 1) durant laquelle les hauteurs de vague égalent ou dépassent les valeurs inscrites dans chaque rangée. Les données sont présentées pour chaque mois avec une échelle de couleurs représentant les cas les plus probables. Les cas où la valeur inscrite comme probabilité est zéro et où les cellules sont de couleur cyan représentent ceux où la probabilité était inférieure à 0,0005 (0,05 %). C'est le résultat d'un arrondissement. Les cas où la cellule est laissée en blanc et où la valeur affichée est zéro signifient qu'il n'y a pas de vitesse du vent supérieure à cette valeur dans l'ensemble des données de simulation rétrospective.

Tableau 6. Probabilité de dépassement mensuel des hauteurs significatives de vague

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height - Probability of Exceedance by Month											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Sig. Wave Height (m)	1	0.8	0.393	0.312	0.523	0.541	0.476	0.453	0.532	0.72	0.84	0.9	0.929
	2	0.483	0.185	0.142	0.204	0.149	0.1	0.076	0.109	0.252	0.401	0.512	0.605
	3	0.243	0.074	0.053	0.066	0.038	0.017	0.007	0.017	0.071	0.157	0.241	0.328
	4	0.106	0.025	0.019	0.019	0.008	0.002	0.001	0.003	0.017	0.05	0.1	0.154
	5	0.04	0.008	0.006	0.005	0.001	0	0	0.001	0.004	0.013	0.035	0.065
	6	0.014	0.003	0	0.001	0	0	0	0	0.001	0.002	0.009	0.025
	7	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.002	0.008
	8	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.003
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 7. Probabilité de dépassement mensuel des périodes spectrales de pointe

48.1°N -60.4°W	Peak Spectral Period - Probability of Exceedance by Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	0.919	0.54	0.461	0.834	0.99	1	1	1	1	1	1	1
2	0.919	0.538	0.454	0.824	0.988	1	1	1	1	1	1	1
3	0.916	0.531	0.446	0.812	0.985	0.996	0.999	0.999	1	1	1	1
4	0.88	0.483	0.401	0.735	0.919	0.919	0.899	0.92	0.858	0.977	0.987	0.99
5	0.79	0.395	0.326	0.596	0.741	0.703	0.638	0.666	0.794	0.869	0.907	0.935
6	0.614	0.279	0.227	0.413	0.482	0.429	0.347	0.355	0.511	0.621	0.702	0.769
7	0.422	0.182	0.145	0.281	0.338	0.295	0.23	0.215	0.319	0.383	0.481	0.558
8	0.246	0.115	0.089	0.165	0.15	0.118	0.081	0.086	0.158	0.196	0.269	0.346
9	0.132	0.082	0.059	0.118	0.095	0.074	0.064	0.063	0.101	0.101	0.147	0.188
10	0.061	0.045	0.028	0.052	0.039	0.033	0.031	0.028	0.05	0.037	0.051	0.084
11	0.026	0.021	0.019	0.02	0.017	0.02	0.015	0.015	0.03	0.021	0.017	0.029
12	0.018	0.013	0.014	0.015	0.014	0.019	0.014	0.014	0.026	0.016	0.013	0.016
13	0.008	0.006	0.005	0.007	0.006	0.016	0.013	0.01	0.02	0.006	0.003	0.004
14	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.009	0.005	0.006	0.01	0.001	0	0
15	0	0.001	0	0	0.002	0.007	0.005	0.003	0.004	0	0	0
16	0	0.001	0	0	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0	0	0
17	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 3.3.5 Durée de la hauteur significative de vague inférieure au seuil fixé

Il peut falloir une certaine période durant laquelle les états de mer seront inférieurs à une certaine valeur pour pouvoir conduire une opération. La probabilité de hauteurs significatives de vague inférieures à certains seuils pour diverses périodes (en jours) a été calculée à partir des données de la base MSC50. Un exemple en est donné à la Figure 8. L'axe des x représente le nombre de jours au cours duquel la hauteur est inférieure au seuil fixé. L'axe des y, la probabilité de dépasser cette valeur, et les diverses lignes de couleur, différentes valeurs seuils de hauteur de vague. La probabilité de dépassement dans ce cas renvoie au nombre de jours, non à l'état de mer. Par exemple, la probabilité d'obtenir des états de mer inférieurs à 3 m pendant au moins 15 jours en janvier est d'environ  $1 \times 10^{-1}$  (10 %). La probabilité augmente en même temps que la hauteur significative seuil s'élève. Une série complète de graphiques du site pour chaque mois figure à l'annexe B.

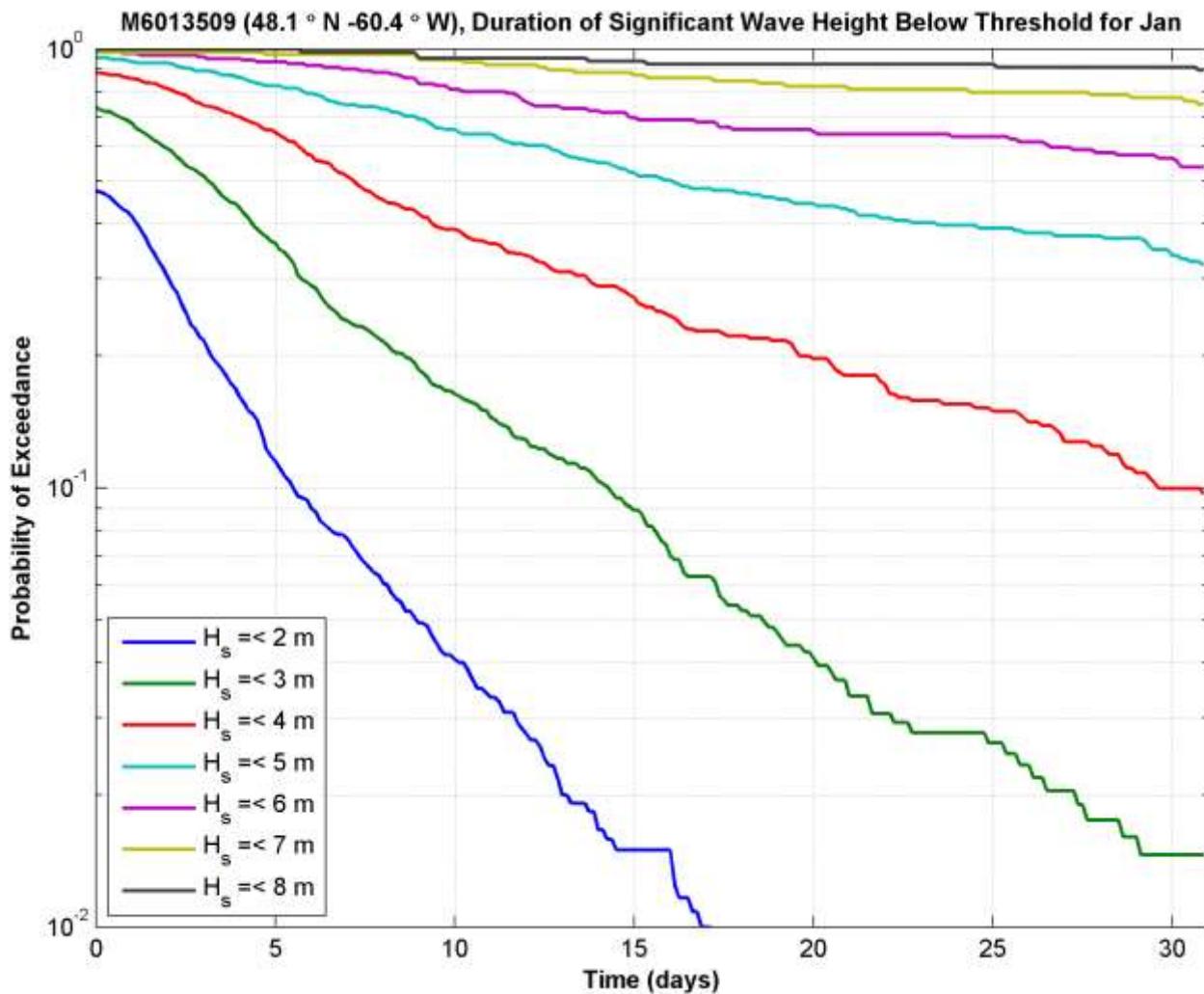


Figure 8. Durée de hauteur significative de vague inférieure au seuil fixé en janvier

### 3.3.6 Probabilité de réalisation simultanée de hauteurs significatives de vague et de périodes de vague

La distribution des probabilités de réalisation simultanée de hauteurs significatives de vague et de périodes de vague est reproduite au Tableau 8 pour janvier. Les colonnes sont réparties en compartiments de hauteur de vague et les rangées en compartiments de période de vague. Le pourcentage de fois que la situation se produit dans chaque compartiment sur la période de 60 ans est inscrit dans la cellule. Un jeu de couleurs correspondant sert à illustrer la fréquence d'apparition du phénomène pour les cellules, les valeurs en violet étant les plus élevées et celles en cyan les plus basses. Les graphiques font souvent état d'une probabilité élevée de vague de 0 à 1 m de hauteur pendant 0 à 1 seconde, ce qui indique souvent la présence de glace durant les mois d'hiver, mais aussi le fait que la mer est très calme en l'absence de glace. Les distributions de probabilités de réalisation simultanée pour chaque mois figurent à l'annexe B.

Tableau 8. Distribution de la réalisation simultanée de hauteurs significatives de vague et de périodes de vague

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for January											
		Sig. Wave Height (m)											
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Wave Period (s)	0-1	8.065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.423	0.553	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	0.8	5.054	0.132	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.188	11.326	3.226	0.011	0	0	0	0	0	0	0	0
	6-7	0.004	5.32	12.021	0.524	0.002	0	0	0	0	0	0	0
	7-8	0	0.715	10.197	10.047	0.374	0	0	0	0	0	0	0
	8-9	0.067	0.379	0.797	6.922	4.29	0.166	0	0	0	0	0	0
	9-10	0.047	0.11	0.189	0.421	4.366	2.33	0.143	0	0	0	0	0
	10-11	0.052	1.391	0.874	0.437	0.414	1.676	1.172	0.078	0	0	0	0
	11-12	0.094	0.556	0.32	0.22	0.081	0.06	0.24	0.408	0.197	0.007	0	0
	12-13	0.027	0.307	0.065	0.045	0.031	0.018	0.016	0.018	0.045	0.067	0	0
	13-14	0.052	0.869	0.217	0.11	0.103	0.007	0.016	0.025	0	0	0	0
	14-15	0	0.076	0.121	0.078	0	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0	0.013	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 3.3.7 Rose des vagues

Des graphiques comme celui reproduit à la Figure 9 ont créés afin de quantifier la fréquence et la force des vagues par direction. La direction des vagues correspond à la *direction moyenne vectorielle du spectre total* (la direction de provenance des vagues, dans le sens horaire à partir du nord, donnée en degrés). Les vagues sont réparties en tranches de 10 degrés. La longueur radiale de chaque tranche représente la fréquence des vagues et la distribution des couleurs dans chaque tranche représente la fréquence des hauteurs significatives de vague correspondant à la légende. Les roses des vagues de chaque mois figurent à l'annexe B.

M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for January

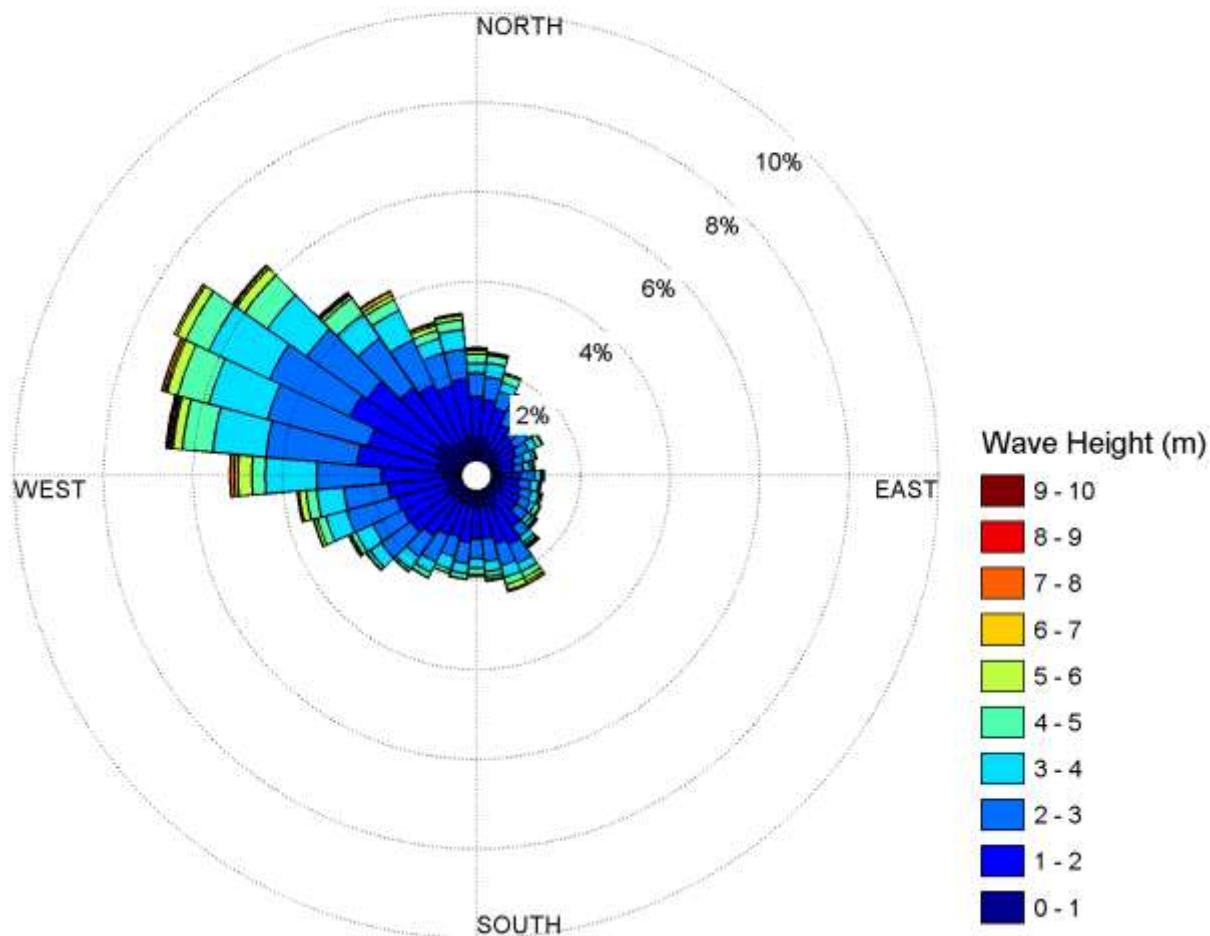


Figure 9. Hauteur, direction et fréquence des vagues en janvier

## 4 LES COURANTS

### 4.1 APERÇU

Les données sur les courants qui sont analysées dans la présente étude proviennent d'une bouée océanographique *in situ* et de données modélisées (les deux séries étant décrites plus en détail dans la section 4.4 et la section 4.5, respectivement). La position de la bouée et celle des données modélisées sur le site étudié sont indiquées à la Figure 10. La bouée, déployée en juin 2014, a transmis des données sur les courants présents à des profondeurs d'eau de 0 m et 6 m. Cet ensemble de données est non contigu. Il couvre une zone située à 10,5 km du site Old Harry. Les données modélisées ont été recueillies de janvier 2003 à août 2012. L'ensemble de données est contigu à des données produites toutes les 30 minutes à 21 points de profondeur sur toute la colonne d'eau. Le point de données le plus près est à 1,8 km du site Old Harry. Ce point se trouve en bordure du domaine modélisé. La bouée est à 12,0 km du point de données du modèle.

Il est aussi possible de consulter les données de la bouée sur l'Atlantique dans l'Inventaire des données océaniques (IDO) géré par le site Web du ministère de Pêches et Océans Canada. Comme les points de données les plus rapprochés, indiqués à la Figure 10 étaient à plus de 65 km du site Old Harry, ils n'ont pas été inclus dans la présente étude.

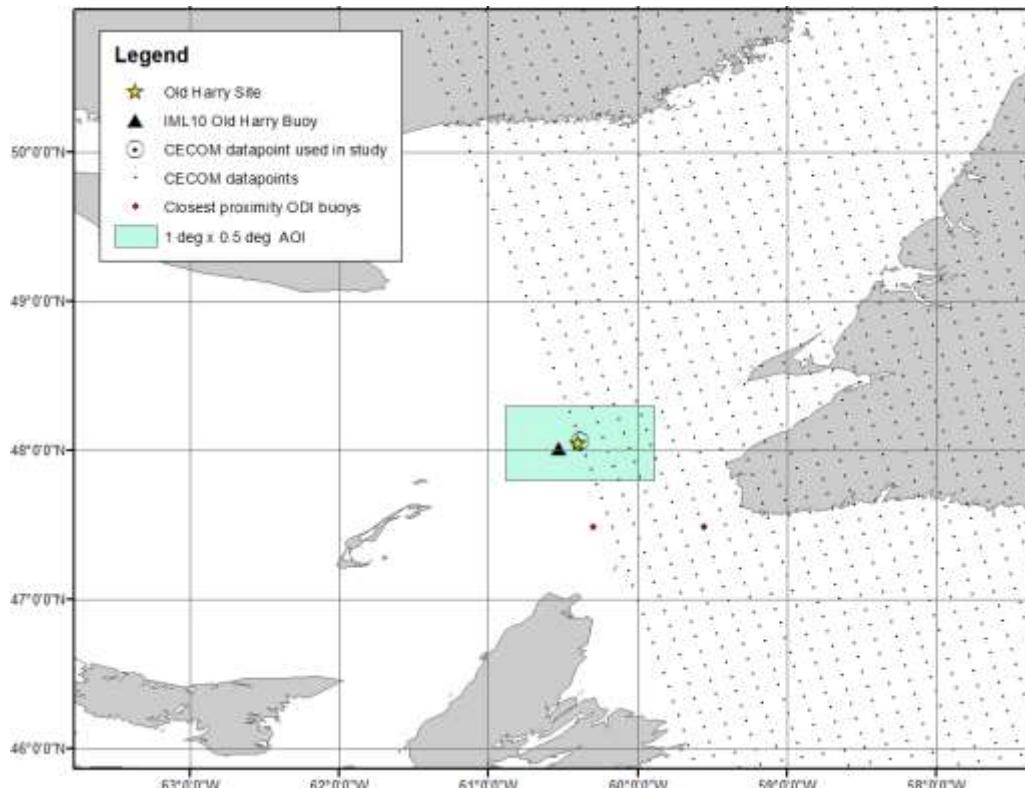


Figure 10. Carte reproduisant la zone d'intérêt et la position de Old Harry, de la bouée IML10, de la grille du modèle et du point de données du modèle utilisé dans l'étude (les positions des

bouées les plus près de la zone couverte par la base de données IDO dont il n'a pas été tenu compte en raison de leur éloignement du site étudié sont indiquées aussi; la bouée IDO la plus rapprochée de Old Harry n'a fonctionné qu'un peu plus de un mois en 1979)

## 4.2 OBSERVATIONS SUR LES STATISTIQUES VECTORIELLES

La moyenne scalaire a servi à calculer l'amplitude moyenne des vagues (Bailey 2000). La moyenne vectorielle a servi à calculer la direction moyenne des vagues (Bailey 2000). Ce choix se justifie par le fait que la moyenne scalaire est plus prudente pour calculer l'amplitude des courants, alors que la moyenne vectorielle représente plus fidèlement la direction moyenne. Le cas échéant, la méthode de Yamartino a servi à calculer l'écart-type des directions moyennes (Yamartino 1984; Bruce Turner 1986; Bailey 2000)

## 4.3 OBSERVATIONS SUR LA NOTATION DE LA DIRECTION DES COURANTS

La notation de la direction des courants est conforme à la méthode traditionnelle qui fixe à 0° le courant se dirigeant vers le nord, et, dans le sens horaire, à 90° le courant se dirigeant vers l'est, à 180° le courant se dirigeant vers le sud et à 270° le courant se dirigeant vers l'ouest.

## 4.4 BOUÉE OCÉANOGRAPHIQUE

### 4.4.1 Aperçu des données

Les données *in situ* proviennent du site Web de l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL)<sup>1</sup>. L'OGSL a pour mission de favoriser la mise en commun et le partage d'information scientifique sur l'écosystème du Saint-Laurent. Parmi les données acquises, cet observatoire rassemble les données de bouées océanographiques déployées autour du golfe du Saint-Laurent. La bouée IML-10, une bouée Viking de dernière génération, a été déployée dans 457 m d'eau à 48,00° N, 60,50° O (à environ 10 km à l'ouest de l'endroit où se trouve Old Harry) en juin 2014. La bouée enregistre de nombreux paramètres océanographiques et météorologiques, y compris les données sur les courants. Les données sur les courants sont mesurées au moyen d'un profileur de courant à effet Doppler<sup>2</sup>. La bouée enregistre l'amplitude et la direction des courants à 0 m et à 6 m; lorsque tout fonctionne correctement, l'enregistrement se fait toutes les 15 minutes. Les données peuvent être consultées sur le site Web de l'OGSL. Ces données ont été téléchargées le 20 juillet 2015. Un sommaire récapitulatif des données est présenté au Tableau 9.

<sup>1</sup> <http://slgo.ca/en/> site consulté la dernière fois en juillet 2015.

<sup>2</sup> <http://slgo.ca/en/obs/buoys/dfo/summary.html>

#### 4.4.2 Méthode de traitement

Le fichier des données brutes qui a été téléchargé à partir du site Web de l'OGSL contenait des entrées doubles de chaque entrée de données. Ces doublons ont été supprimés du fichier. Une entrée a été supprimée qui faisait état d'une vitesse du courant anormalement élevée (2015-07-10 08:03:00, 36.5 m/s). Aucune autre donnée n'a été supprimée.

Deux genres de graphiques sont présentés dans la section des résultats : (1) des graphiques des séries chronologiques de la moyenne journalière (sur 24 heures) de l'amplitude des courants, de l'amplitude maximale des courants et de la direction des courants à 0 m et 6 m; (2) des graphiques circulaires (roses) des courants de données non mises en moyenne.

Tableau 9. Sommaire récapitulatif des données sur les courants produites par la bouée

	0 m	6 m
Horodatage du premier point de données	2015-06-18 04:18:00	2014-06-05 22:33:00
Horodatage du dernier point de données	2015-07-19 22:18:00	2015-07-19 22:18:00
Contigu	Oui (une période, 32 jours)	Non. Trois périodes 2014-06-05->2014-08-13 (70 jours) 2014-09-16->2014-10-21 (36 jours) 2015-06-16->2015-07-19 (34 jours)
Nombre de données saisies	3 040 (environ 32 jours de données, à raison d'une lecture toutes les 15 minutes)	13 076 (environ 140 jours de données)
Pourcentage de couverture égale = données effectives saisies/couverture théorique, où la couverture théorique correspond au nombre de données saisies si la série chronologique était contiguë, ce qui suppose qu'un point de données est enregistré toutes les 15 minutes à partir du moment où la bouée est déployée jusqu'à ce que les données aient été téléchargées à partir du site Web. Cela équivaut à 39 264 données ou environ 409 journées de données.	7,7 %	33,3 %
Amplitude des courants (m/s)	Moyenne (pour les données saisies)	0,12
	Maximum	0,70
	Écart-type	0,15
Direction des courants (°)	Moyenne	339,93
	Écart-type	52,36
		0,12
		0,80
		0,10
		338,46
		68,98

#### 4.4.3 Résultats

Les graphiques des séries chronologiques sont reproduits à la Figure 11, les données sur l'amplitude des courants étant présentées dans le graphique supérieur et la direction des

courants dans le graphique inférieur. Les trois périodes de données pour l'ensemble des données de 6 m et l'unique période pour l'ensemble des données de 0 m sont clairement visibles. Le courant moyen journalier calculé à partir des données recueillies sur 6 m et 0 m dépasse rarement 0,3 m/s. Aucune direction dominante des courants n'est discernable.

Les roses des courants sont reproduites à la Figure 12 et à la Figure 13. La rose des courants est une forme d'histogramme circulaire qui représente la répartition de la vitesse et de la direction des courants en un endroit donné.

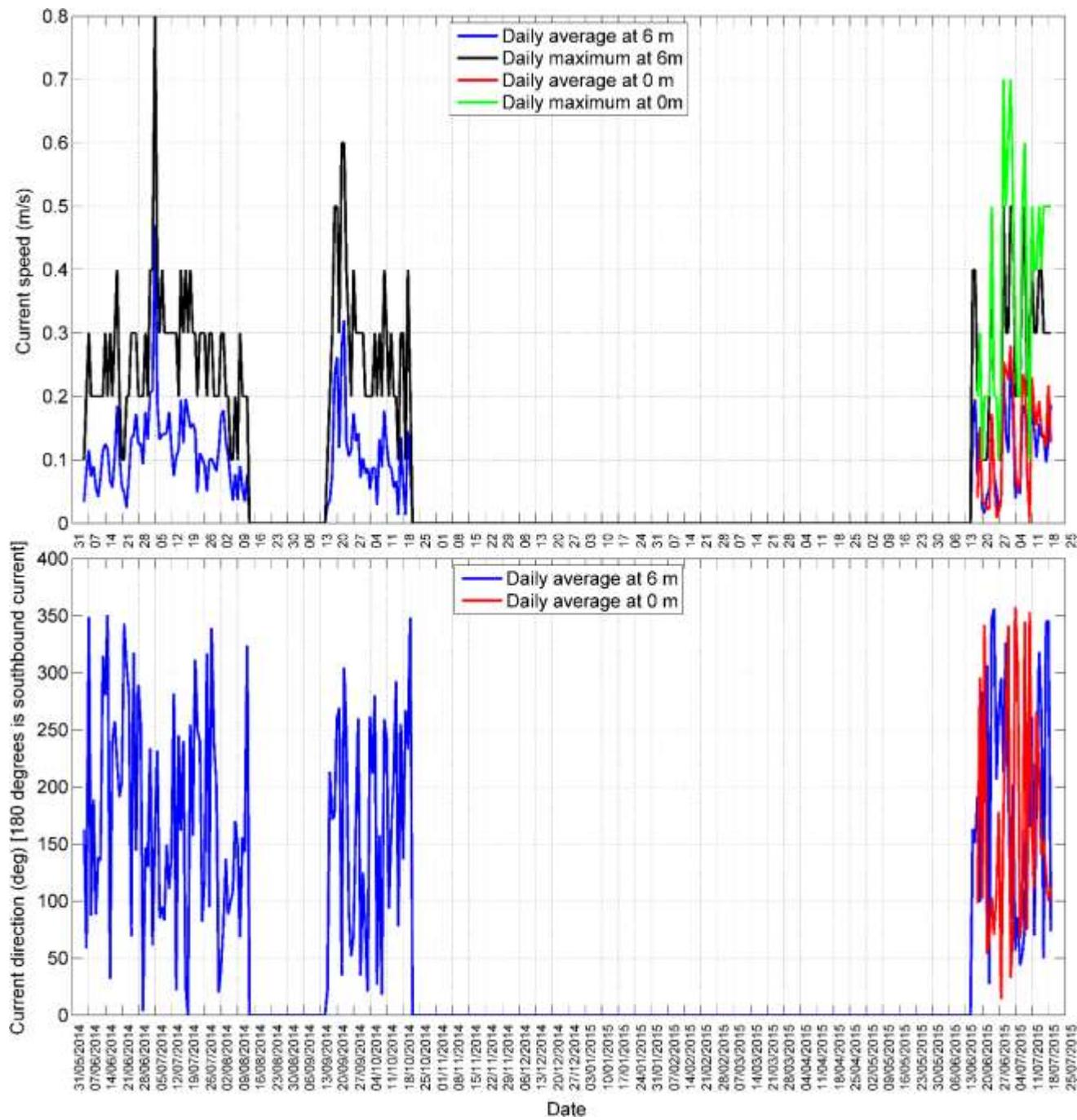


Figure 11. Graphiques de séries chronologiques indiquant l'amplitude (graphique supérieur) et la direction (graphique inférieur) des courants

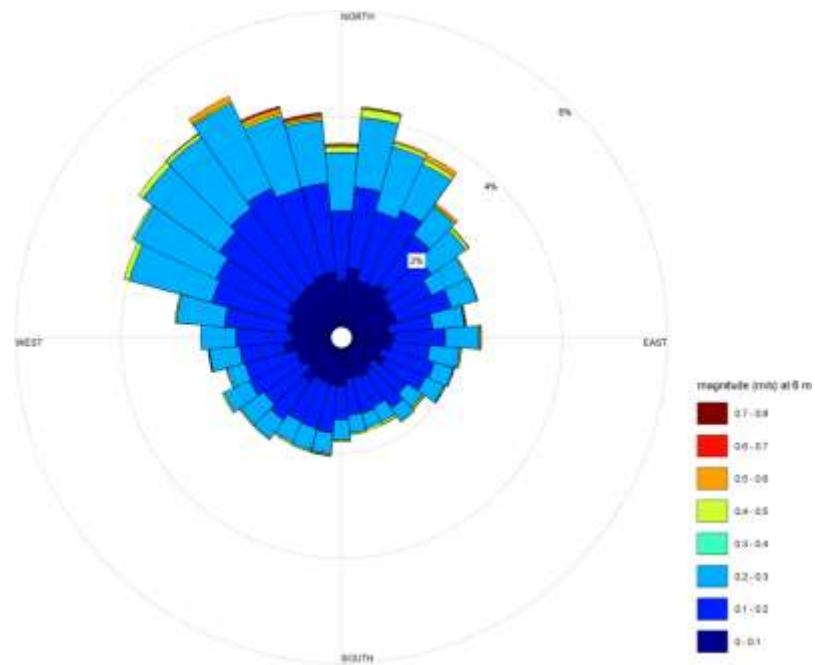


Figure 12. Rose des courants à partir de données (non mises en moyenne) sur les courants (tranches de 15°) à 6 m

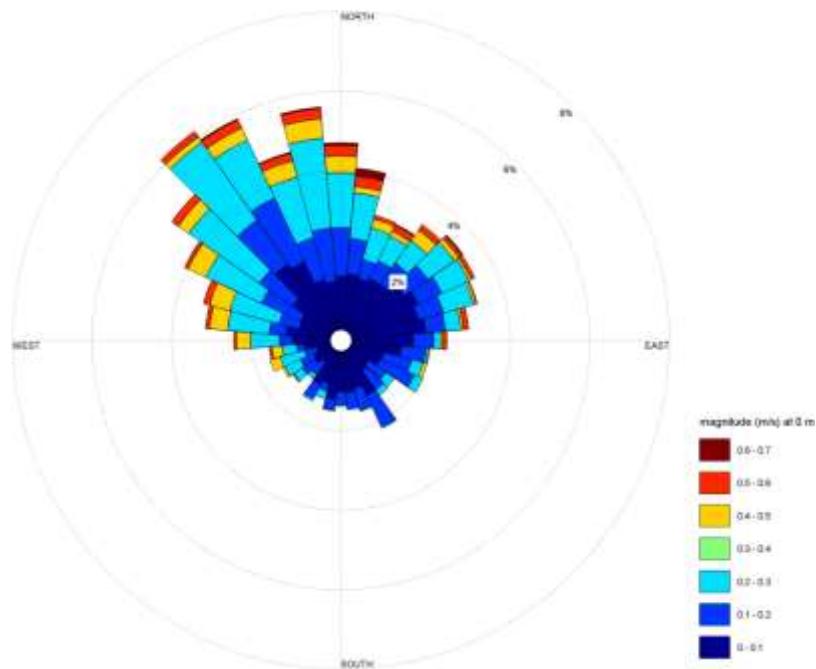


Figure 13. Rose des courants à partir de données (non mises en moyenne) sur les courants (tranches de 15°) à 0 m

## 4.5 DONNÉES MODÉLISÉES

### 4.5.1 Aperçu des données

Les données modélisées des courants ont été fournies par M. Yongsheg Wu (Pêches et Océans Canada) et extraites du modèle glace-océan couplé de la côte Est du Canada (Canadian East Coast Ocean Model [CECOM]). Le modèle CECOM est un modèle glace-océan couplé de l'évolution dynamique et thermodynamique de la glace, construit et tenu à jour par les chercheurs de l'Institut océanographique de Bedford. La composante océan repose sur le modèle océanique de Princeton et le modèle glacial est une composante à plusieurs catégories de glace. Le modèle a été employé dans de nombreuses études, notamment pour la circulation de plateformes de glace flottante à l'échelle d'un bassin, les prévisions océaniques à des fins opérationnelles, la variation saisonnière de la couverture de glace, la convection profonde, le couplage vagues-courant et la trajectoire de surface, le réchauffement des couches supérieures de l'océan et les variations de la distribution du phytoplancton induites par des tempêtes (Yao, Tang, and Peterson 2000; Tang et al. 2008; Wu, Tang, and Dunlap 2010).

La résolution spatiale du modèle est de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  avec une grille de coordonnées  $\sigma$  (sigma) généralisées de 21 niveaux à la verticale (c.-à-d. que l'espacement vertical est proportionnel à la profondeur, la concentration des points de données augmentant en direction de la surface). La portée temporelle va de janvier 2003 à août 2012 avec une résolution de 30 minutes.

### 4.5.2 Méthode de traitement

Les données du modèle CECOM sont sous le format NETCDF. Il y a un fichier NETCDF par an de données et chaque fichier est d'environ 80 gigaoctets. Le point de données le plus rapproché du site Old Harry a été repéré et toute la suite de données à ce point a été extraite. Les données du modèle CECOM sont générées sur une grille verticale à coordonnées  $\sigma$  à 21 niveaux; pour cette étude, nous avons défini quatre profondeurs d'intérêt : 2 m, 6 m, 50 m et 460 m; la profondeur de 2 m a été retenue pour représenter le courant de surface (nous n'utilisons pas la valeur de 0 m du modèle en raison du système de coordonnées  $\sigma$  qui peut générer de très fines couches près de la surface, et produire un courant excessif même au niveau modéré de vitesse du vent); la profondeur de 6 m a été retenue pour permettre une comparaison entre les données de la bouée et les celles du modèle CECOM. Le dernier point de données correspond au point le plus profond à cet endroit. Les données de ces niveaux sont des données interpolées à partir des coordonnées  $\sigma$  de la grille.

Les données sont présentées sous forme de graphiques profondeur-profil, de graphiques des séries chronologiques, de roses des courants et de tableaux d'analyse des moyennes, des écarts-types et des valeurs extrêmes.

### 4.5.3 Résultats

#### 4.5.3.1 Profils en fonction de la profondeur

Le graphique du profil en fonction de la profondeur est reproduit à la Figure 14. Les graphiques profil-profondeur présentent les amplitudes mensuelles moyennes, les amplitudes mensuelles maximales et la direction mensuelle moyenne sur toute la colonne d'eau. La moyenne mensuelle est la moyenne calculée pour toutes les données de chaque mois représenté dans l'ensemble de données, c.-à-d. que les données moyennes de janvier correspondent à la moyenne de toutes les données des mois de janvier des années dans l'ensemble de données. Le maximum mensuel est calculé de la même façon, c.-à-d. que les données maximales de janvier correspondent à l'amplitude maximale des courants établie à partir de toutes les données des mois de janvier. La moyenne mensuelle a été retenue parce qu'elle permet d'apprécier la variabilité du courant en profondeur sur un an sans encombrer les graphiques. Le point de données supérieur correspond à la donnée du niveau de profondeur de 2 m, toutes les données inférieures à ce point étant directement extraites de l'ensemble de données du modèle CECOM pour ce point de la grille. Cette fusion a été exécutée afin d'éviter d'obtenir des niveaux de profondeur trop fins/trop peu profonds dans les cellules de la grille où l'eau est peu profonde, c.-à-d. les cellules de la grille dont la bathymétrie en eau peu profonde produira des coordonnées sigma qui s'approchent d'une résolution en centimètres près de la surface pouvant produire un comportement non représentatif de l'interface air-surface (soit la limite supérieure de la profondeur de 2 m).

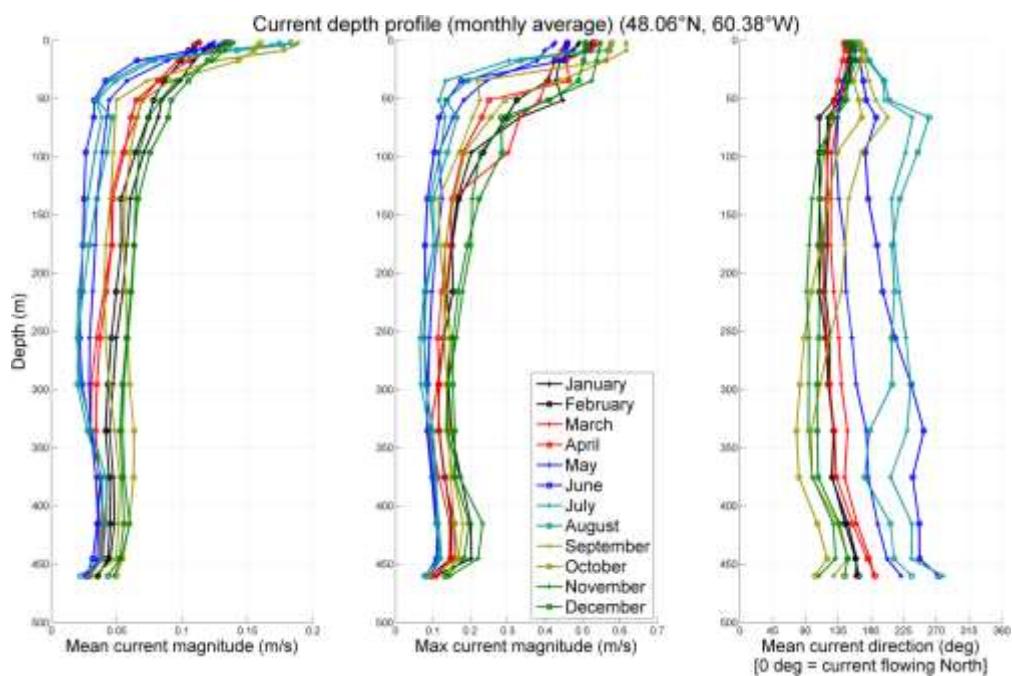


Figure 14. Graphiques du profil en fonction de la profondeur représentant la moyenne mensuelle de l'amplitude des courants (graphique de gauche), l'amplitude mensuelle maximale des courants (au centre) et la moyenne mensuelle de la direction des courants (à droite)

#### 4.5.3.2 Séries chronologiques

Des graphiques de séries chronologiques sont reproduits à titre d'exemple à la Figure 15, à la Figure 16, à la Figure 17 et à la Figure 18 avec les données sur l'amplitude des courants présentées dans le graphique supérieur et les données sur la direction des courants, dans le graphique inférieur. Pour chaque cellule de la grille, la série chronologique a été produite à chaque niveau de profondeur prédéterminé. Le calcul des moyennes suit la même logique que celle qui est expliquée à la section 4.5.3.1, sauf que la période retenue pour prendre la moyenne est d'une journée (24 heures). Les moyennes sur trois jours, sur un mois et sur une saison (un trimestre) sont calculées à partir de l'amplitude moyenne journalière et de la direction moyenne journalière. Le maximum correspond à l'amplitude maximale des courants pour chaque même jour dans l'ensemble de données, c.-à-d. le courant maximal pour tous les 1<sup>er</sup> janvier, le courant maximal pour tous les 2 janvier, etc. Les trois fenêtres d'échantillonnage différentes permettent d'apprécier la différence de variabilité chronologique des données.

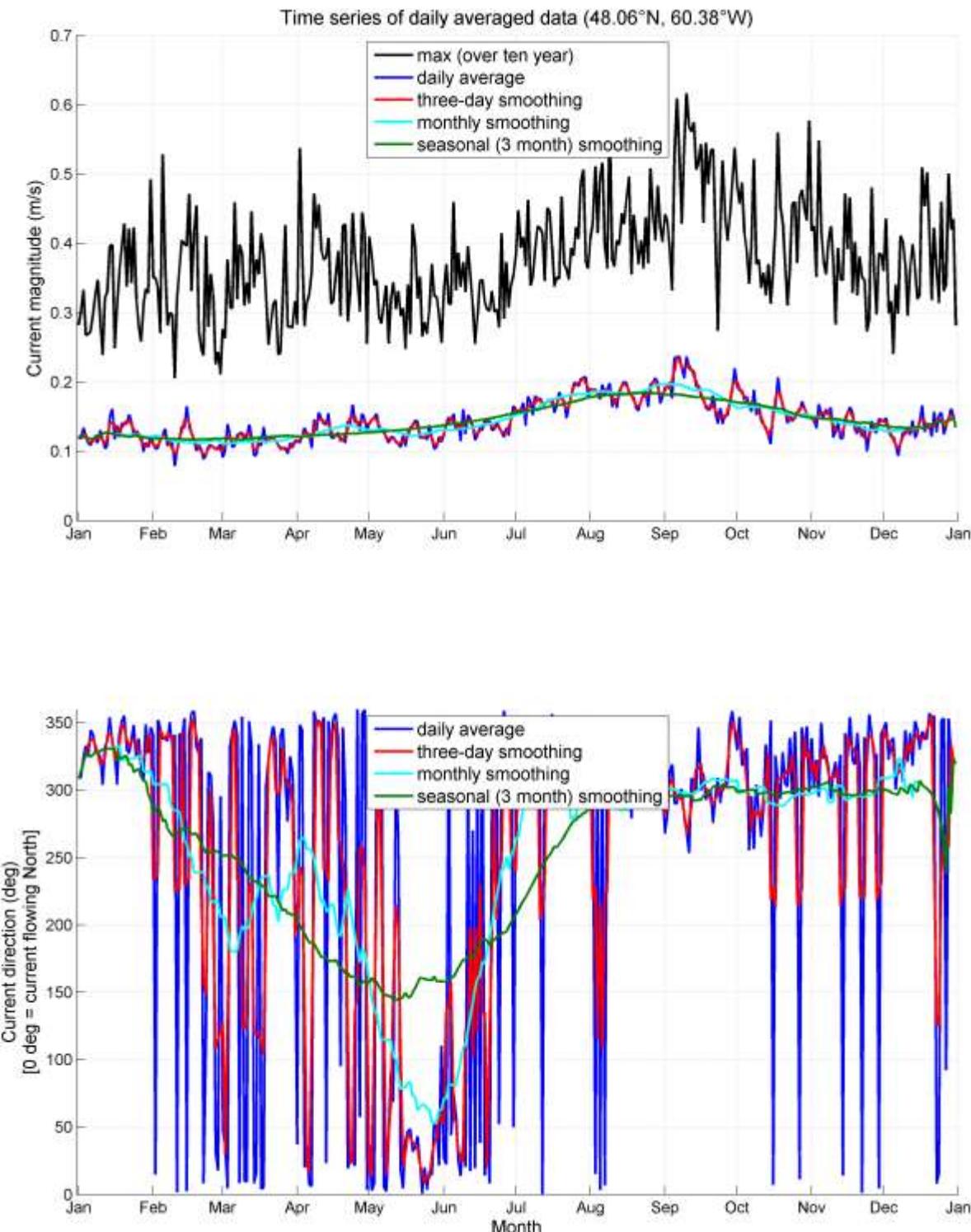


Figure 15. Graphique de la série chronologique à 2 m de profondeur

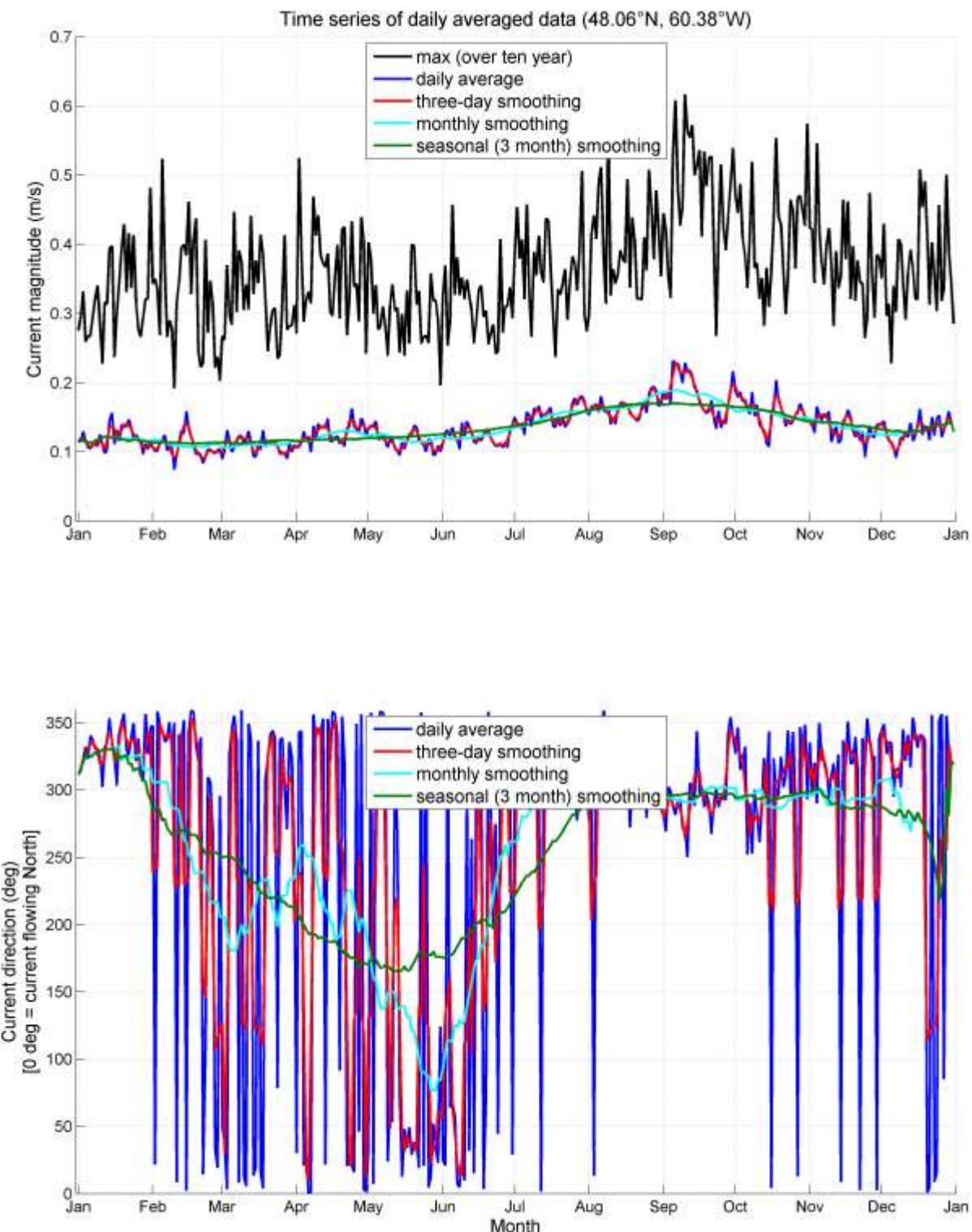


Figure 16. Graphique de la série chronologique à 6 m de profondeur

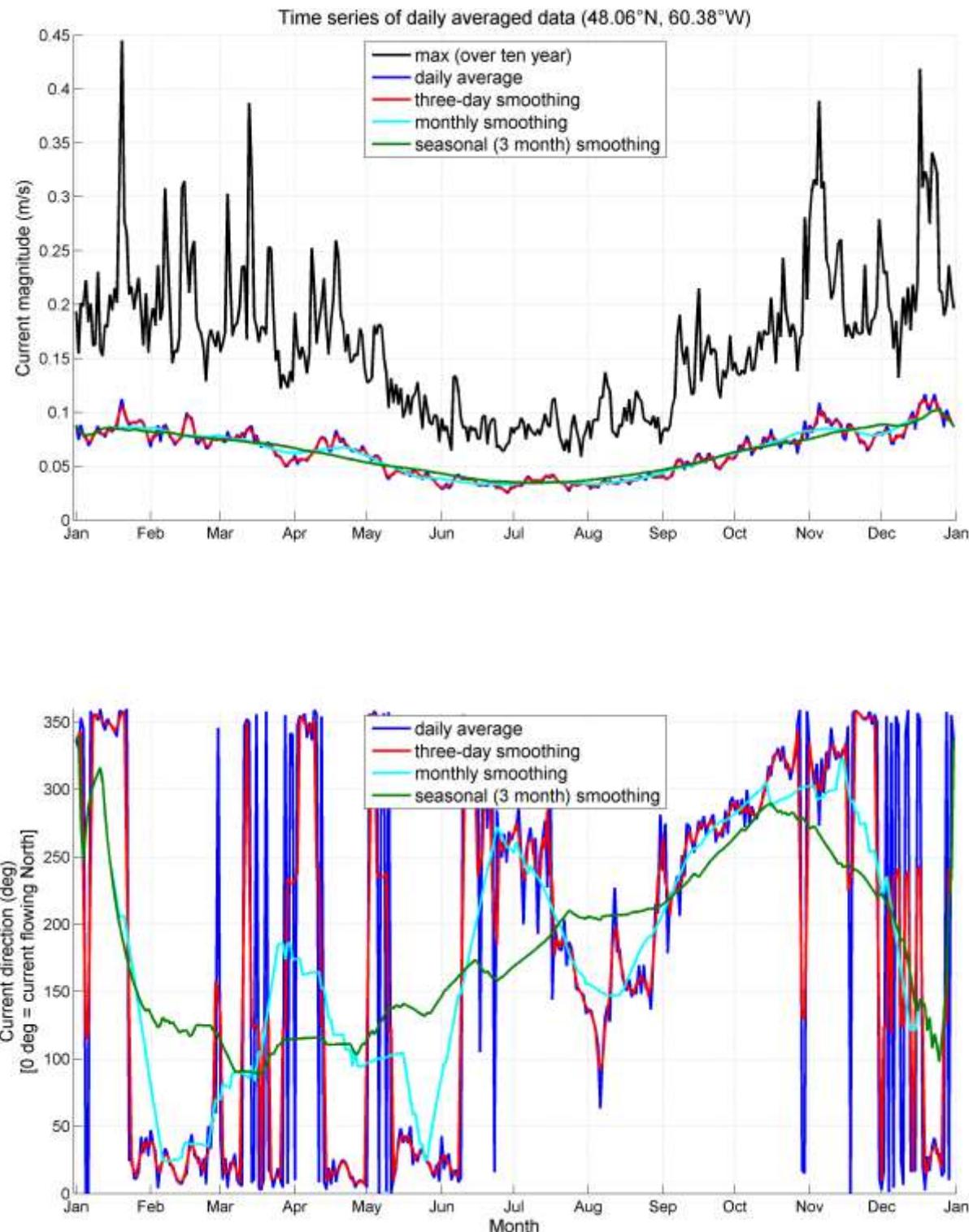


Figure 17. Graphique de la série chronologique à 50 m de profondeur

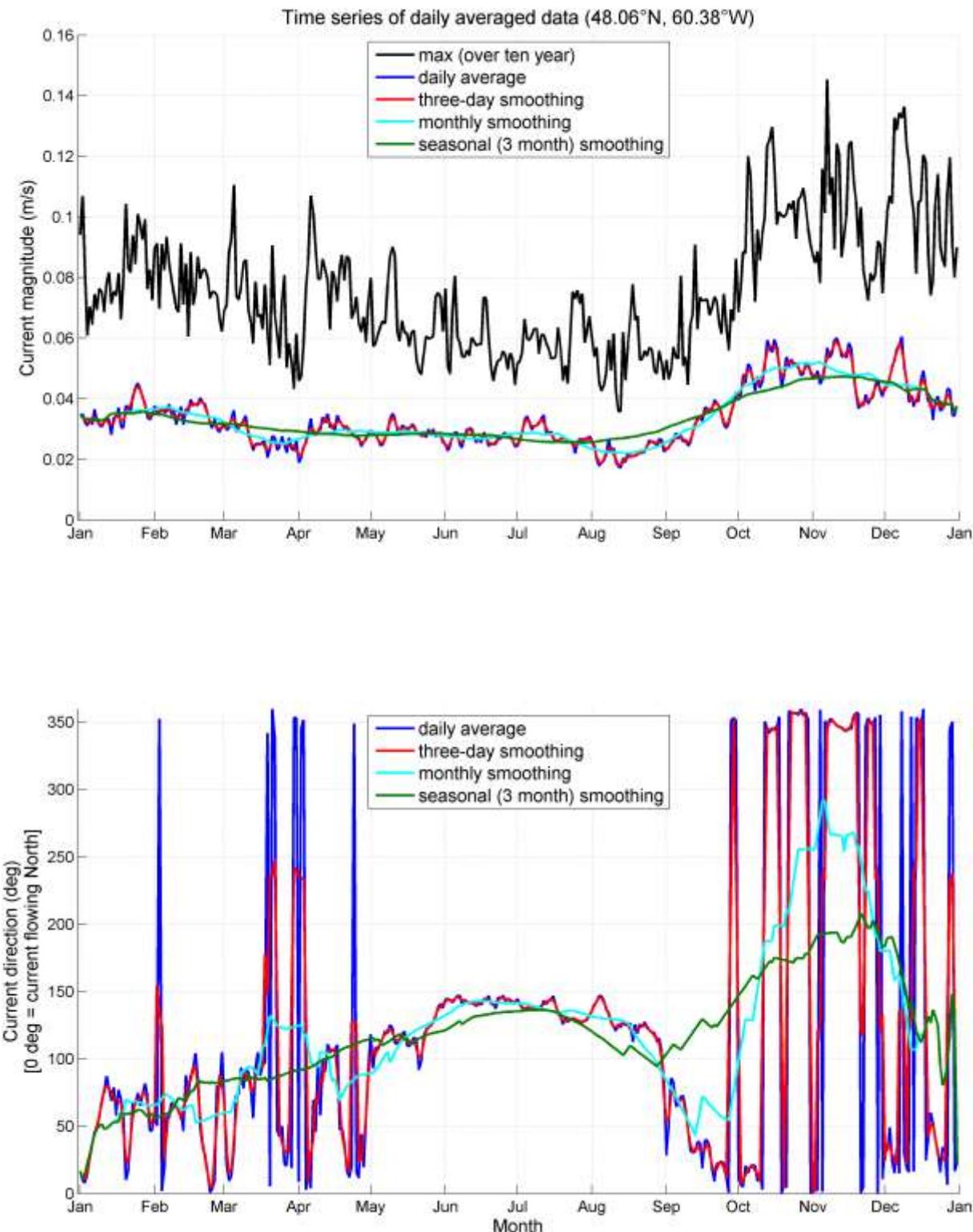


Figure 18. Graphique de la série chronologique à 460 m de profondeur

#### 4.5.3.3 Roses des courants

Des roses des courants sont reproduites de la Figure 19 à la Figure 22. La moyenne de la portée temporelle complète du modèle CECOM a été établie pour chaque saison à chaque profondeur. Les saisons sont définies de la façon suivante : l'hiver (décembre, janvier, février); le printemps (mars, avril, mai); l'été (juin, juillet, août) et l'automne (septembre, octobre, novembre).

Dans la figure donnée en exemple, le courant suit principalement la direction sud-est, la variabilité étant limitée au cours des quatre saisons. Ce résultat est conforme aux directions du courant observées dans les graphiques de l'échantillon en fonction de la profondeur et les graphiques des séries chronologiques. À remarquer que la légende des amplitudes dépend de la plage d'amplitude des données analysées pour chaque rose (la plage présentée n'est donc pas la même pour toutes les roses des courants).

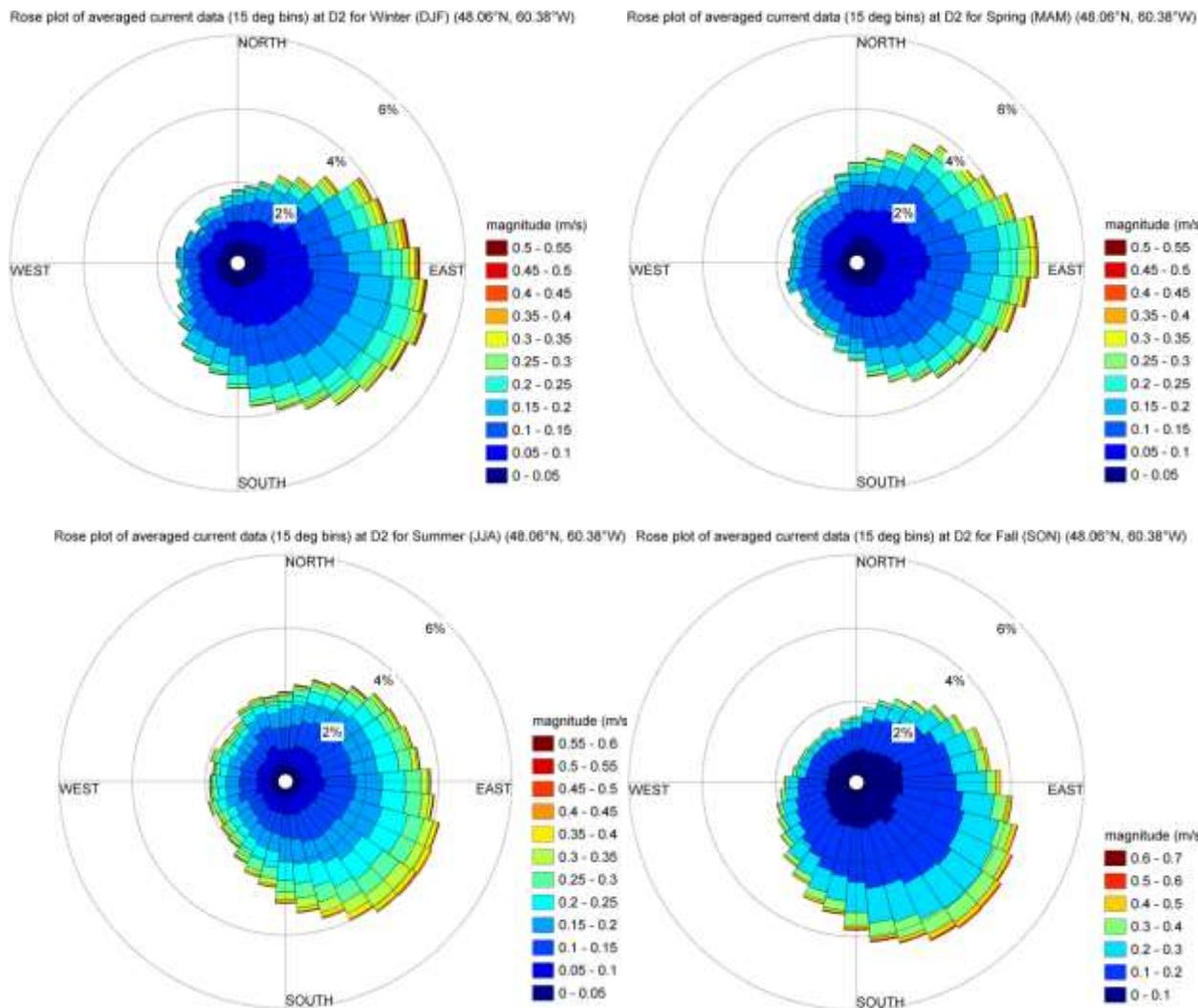


Figure 19. Roses des courants selon la saison à 2 m de profondeur

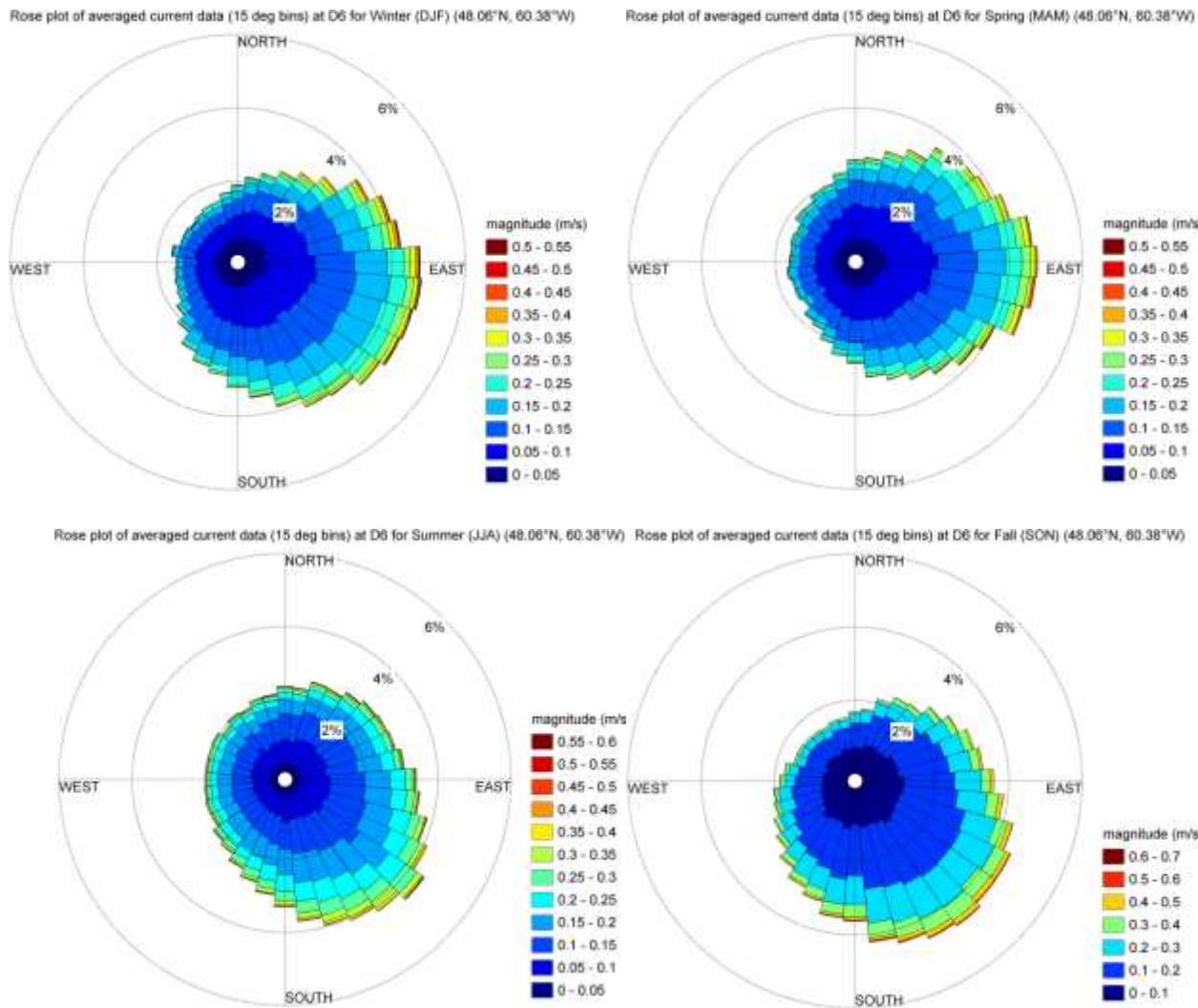


Figure 20. Roses des courants selon la saison à 6 m de profondeur

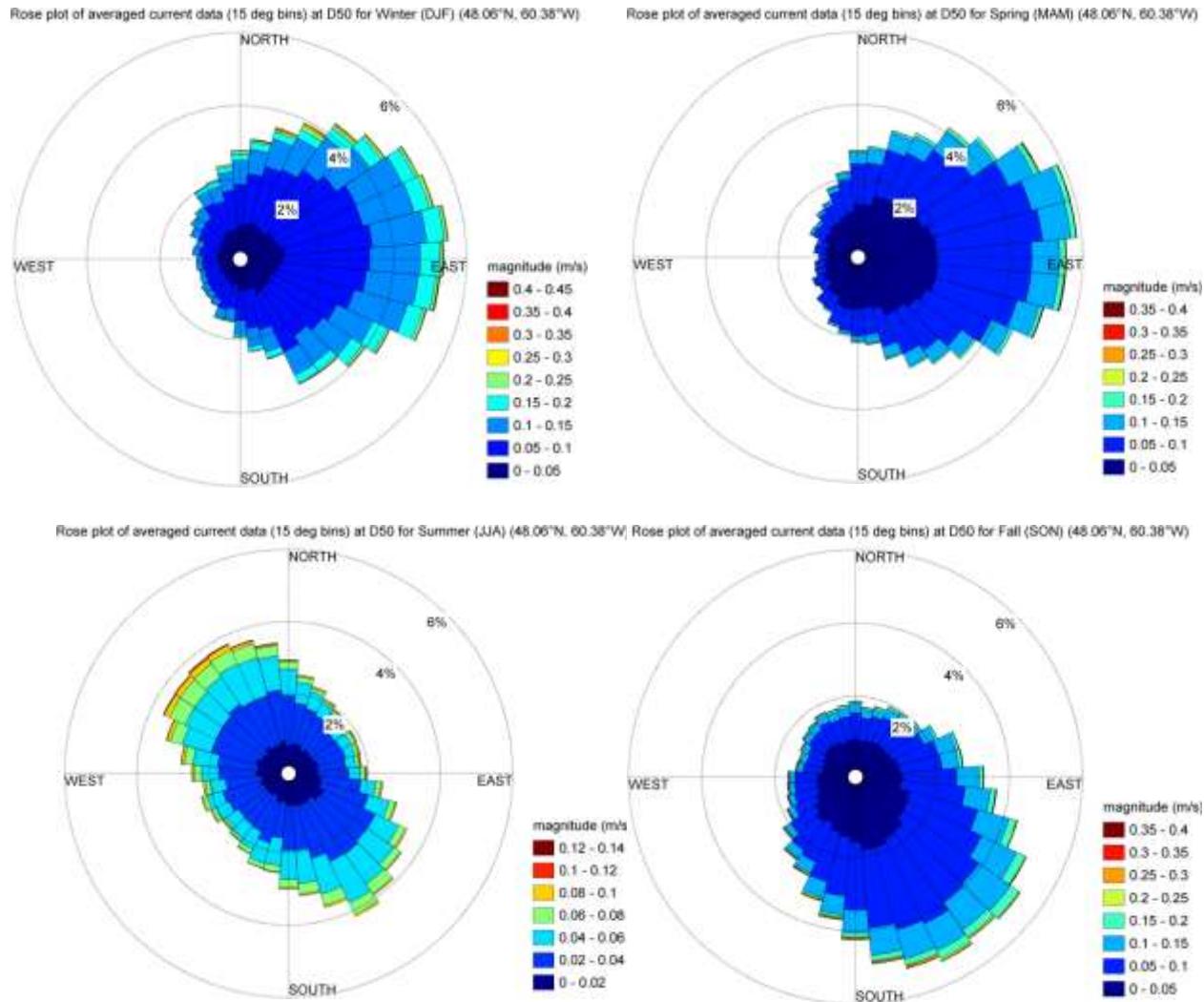


Figure 21. Roses des courants selon la saison à 50 m de profondeur

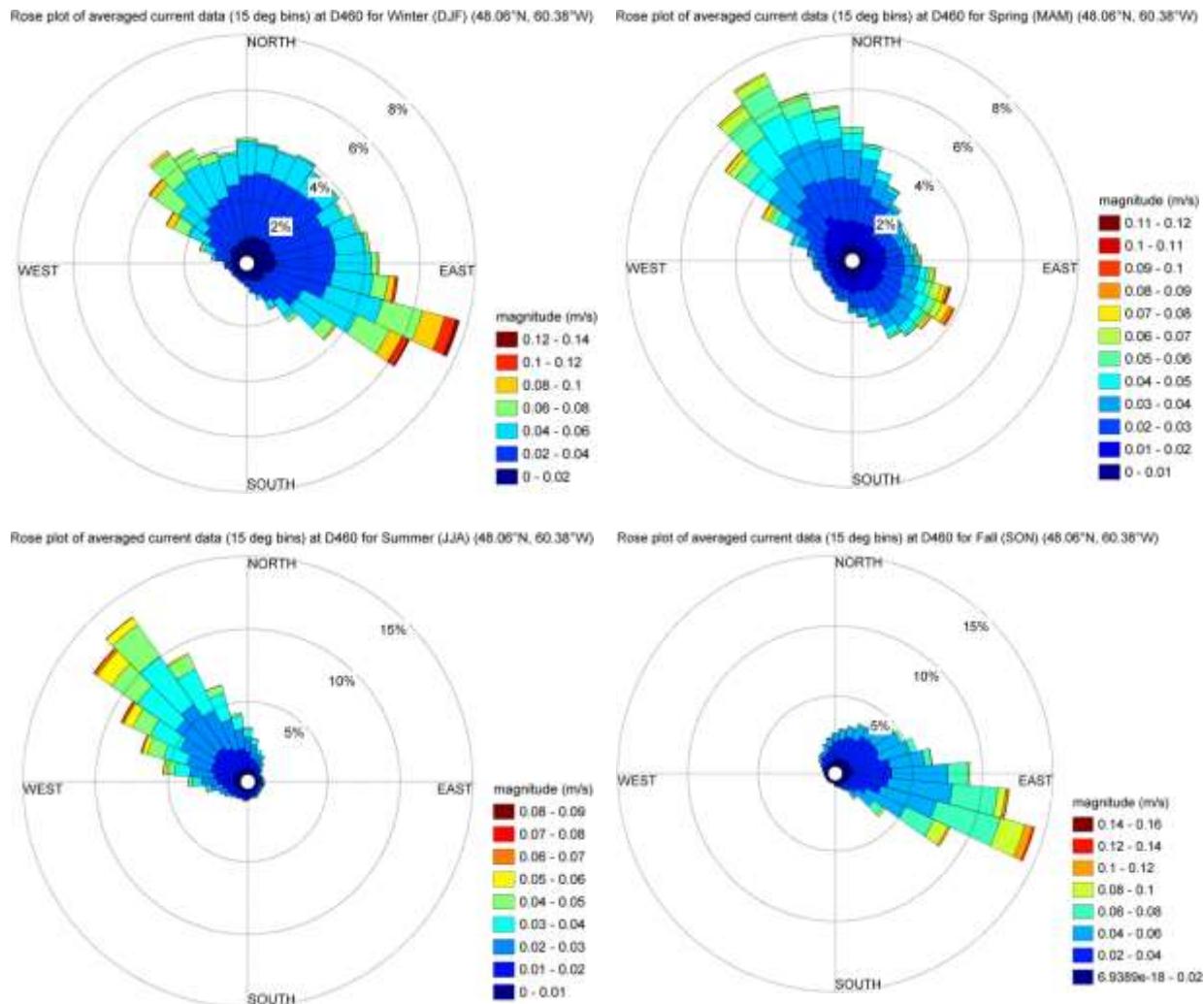


Figure 22. Roses des courants selon la saison à 460 m de profondeur

#### 4.5.3.4 Valeur moyenne, valeur maximale et écart-type

Le Tableau 10, le Tableau 11 et le Tableau 12 présentent les moyennes mensuelles, les moyennes maximales et les écarts-types mensuels de la vitesse des courants. La moyenne mensuelle est calculée de la façon expliquée à la section 4.5.3.1. La moyenne annuelle est calculée de la même façon que la mensuelle, sauf que les données n'ont pas été regroupées par mois. Les valeurs maximales et les écarts-types sont établis à partir des amplitudes obtenues.

Tableau 10. Amplitudes moyennes mensuelles des courants

48.06°N 60.38°W	Mean current magnitudes (m/s) at selected depth levels (0 indicates magnitude < 0.01 m/s. Colours binned every 0.2 m/s)			
	D2	D6	D50	D460
Jan	0.12	0.12	0.09	0.04
Feb	0.11	0.11	0.08	0.04
Mar	0.11	0.11	0.07	0.03
Apr	0.13	0.13	0.07	0.03
May	0.12	0.12	0.05	0.03
Jun	0.14	0.12	0.03	0.03
Jul	0.17	0.15	0.04	0.03
Aug	0.18	0.16	0.04	0.02
Sep	0.19	0.18	0.05	0.03
Oct	0.16	0.16	0.07	0.05
Nov	0.14	0.14	0.08	0.05
Dec	0.13	0.13	0.09	0.04
Year	0.14	0.13	0.06	0.03

Tableau 11. Amplitudes mensuelles maximales des courants

48.06°N 60.38°W	Maximum of current magnitudes (m/s) at selected depth levels (0 indicates magnitude < 0.01 m/s. Colours binned every 0.02 m/s)			
	D2	D6	D50	D460
Jan	0.49	0.48	0.45	0.11
Feb	0.53	0.52	0.31	0.09
Mar	0.46	0.45	0.39	0.11
Apr	0.54	0.52	0.26	0.11
May	0.43	0.4	0.18	0.09
Jun	0.46	0.46	0.13	0.08
Jul	0.51	0.51	0.11	0.08
Aug	0.58	0.57	0.14	0.08
Sep	0.62	0.62	0.22	0.09
Oct	0.58	0.57	0.28	0.13
Nov	0.55	0.55	0.39	0.15
Dec	0.51	0.51	0.42	0.14
Year	0.62	0.62	0.45	0.15

Tableau 12. Écarts-types des amplitudes des courants

48.06°N 60.38°W	Standard deviation of current magnitudes (m/s) at selected depth levels (0 indicates magnitude < 0.01 m/s. Colours binned every 0.02 m/s)			
	D2	D6	D50	D460
Jan	0.07	0.07	0.04	0.02
Feb	0.07	0.07	0.04	0.02
Mar	0.07	0.07	0.04	0.02
Apr	0.08	0.08	0.04	0.02
May	0.07	0.07	0.03	0.01
Jun	0.07	0.06	0.02	0.01
Jul	0.09	0.08	0.02	0.01
Aug	0.09	0.08	0.02	0.01
Sep	0.11	0.1	0.03	0.02
Oct	0.1	0.09	0.04	0.02
Nov	0.08	0.08	0.05	0.02
Dec	0.08	0.08	0.05	0.02
Year	0.09	0.08	0.04	0.02

#### 4.5.3.5 Analyse des valeurs extrêmes (AVE)

L'analyse des valeurs extrêmes (AVE) a été réalisée pour estimer une amplitude du courant pour chaque cellule de la grille, pour chaque mois, à chaque niveau de profondeur sur des périodes de retour de 10 ans et de 100 ans. Les données de l'AVE pour 10 ans et 100 ans figurent au Tableau 13 et au Tableau 14, respectivement. Les étapes suivantes ont été suivies pour calculer les données de l'AVE de chaque mois : (1) pour chaque cellule de la grille, pour chaque niveau de

profondeur, les valeurs maximales journalières de chaque mois ont été extraites; (2) cet ensemble de données de valeurs maximales a été ajusté pour produire une distribution log-normale à partir de laquelle les paramètres de l'estimation du maximum de vraisemblance (EMV) ont été établis. Cette analyse après ajustement optimal repose sur un examen visuel des distributions habituellement utilisées dans une analyse des valeurs extrêmes, l'ajustement à la distribution log-normale s'étant révélée la meilleure selon cet examen visuel (C-CORE 2015); (3) les paramètres de l'EMV ont ensuite servi à produire une fonction de distribution cumulative inverse log-normale à partir de laquelle les estimations des amplitudes des courants d'une récurrence de 10 ans et de 100 ans ont été calculées. La valeur annuelle de l'analyse des valeurs extrêmes a été calculée comme pour la mensuelle, mais les données n'ont pas été isolées en compartiments mensuels.

L'exactitude des estimations de l'analyse des valeurs extrêmes dépend de l'ajustement de l'ensemble des données à la distribution log-normale. Étant donné que les données de l'analyse sont réputées suivre la même distribution pour chaque cellule, certaines estimations peuvent être établies à partir d'ajustements imparfaits à la distribution. Dans ces cas, les estimations des valeurs extrêmes seront sous-estimées ou surestimées.

Tableau 13. Données de l'analyse des valeurs extrêmes sur 10 ans

48.06°N 60.38°W	Current magnitudes (m/s) for 10 Year Extreme at selected depth levels (0 indicates magnitude < 0.01 m/s. Colours binned every 0.2 m/s)			
	D2	D6	D50	D460
Jan	0.51	0.51	0.32	0.13
Feb	0.59	0.58	0.32	0.11
Mar	0.59	0.57	0.32	0.11
Apr	0.6	0.6	0.29	0.11
May	0.52	0.52	0.2	0.09
Jun	0.49	0.48	0.14	0.1
Jul	0.6	0.56	0.12	0.09
Aug	0.68	0.67	0.17	0.09
Sep	0.76	0.76	0.2	0.1
Oct	0.73	0.73	0.28	0.14
Nov	0.63	0.65	0.38	0.14
Dec	0.61	0.61	0.4	0.16
Year	0.91	0.89	0.51	0.19

Tableau 14. Données de l'analyse des valeurs extrêmes sur 100 ans

48.06°N 60.38°W	Current magnitudes (m/s) for 100 Year Extreme at selected depth levels (0 indicates magnitude < 0.01 m/s. Colours binned every 0.2 m/s)			
	D2	D6	D50	D460
Jan	0.66	0.67	0.41	0.16
Feb	0.81	0.82	0.42	0.13
Mar	0.81	0.79	0.43	0.15
Apr	0.8	0.81	0.4	0.15
May	0.67	0.7	0.27	0.12
Jun	0.61	0.62	0.18	0.12
Jul	0.74	0.71	0.15	0.12
Aug	0.86	0.88	0.23	0.11
Sep	0.98	1	0.26	0.13
Oct	0.98	0.98	0.36	0.17
Nov	0.83	0.87	0.52	0.17
Dec	0.81	0.81	0.54	0.21
Year	1.17	1.15	0.69	0.24

## 5 LES EMBRUNS VERGLAÇANTS

### 5.1 CONTEXTE

Le givrage des navires et des ouvrages extracôtiers peut poser des problèmes de manœuvrabilité et de sécurité. La forme de givrage la plus préoccupante qui touche les opérations maritimes près de la surface (navires, bouées, plateformes) est le givrage par les embruns (Guest, 2005). La glace ainsi accumulée peut réduire la stabilité (en particulier des petits navires mobiles); imposer une contrainte de charge supplémentaire aux éléments structuraux, poser des risques de glissade, bloquer l'accès à du matériel important ou le rendre inopérant (Ryerson, 2011) et accroître les forces latérales exercées par des interactions entre les vagues et l'ouvrage par suite d'une augmentation de la superficie transversale (Forest, Lozowski and Gagnon, 2005; Kojo, 1984).

Le calcul de la vitesse de givrage est une opération complexe. Les processus d'accumulation de glace sont régis par des facteurs environnementaux, mais ils dépendent aussi de la surface, du matériau et de la forme de l'élément structural subissant une accumulation de glace. Les méthodes quantitatives d'évaluation et de prévision du givrage des navires sont limitées.

Overland, Pease, Priesendorfer et Comiskey (1986) ont élaboré une méthode empirique, fondée sur des données sur le givrage de navires au large des côtes de l'Alaska, pour caractériser l'intensité des phénomènes de givrage des navires par les embruns de mer. Un indice prédicteur du givrage (PR) est établi à partir de variables météorologiques et utilisé pour reproduire la vitesse de givrage, selon les catégories suivantes : (1) pas de givrage, (2) givrage léger, (3) givrage modéré, (4) givrage fort et (5) givrage extrême. Ce modèle a par la suite été affiné par l'ajout d'ensembles de données provenant de la mer du Labrador pour son étalonnage (Overland, 1990). Par rapport aux autres modèles, cette méthode a l'avantage d'être plutôt simple et d'avoir été mise à l'épreuve pendant plusieurs décennies par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), qui fait des prédictions quotidiennes de givrage pour les régions sujettes à des conditions glacielles au moyen de cette méthode.

Il existe aussi des modèles plus complexes. Chung et al. (1998) et Lozowski, Szilder et Makkonen (2000) citent des modèles antérieurs de givrage des ouvrages extracôtiers par Ashcroft (1985) et Romagnoli (1988), ainsi que les modèles RIGICE (Roebber and Mitten, 1987; Mitten 1994) et ICEMOD (Horjen and Vefsnmo 1986a, 1986b; 1987; Horjen, Vefsnmo and Bjerke, 1988). Le modèle RIGICE est une simplification de ICEMOD (Forest et al., 2005). Le modèle RIGICE a été modifié et mis à l'essai par Lozowski, Forest, Chung et Szilder (2002) et affiné par la suite par Forest et al. (2005). Ce modèle se concentre sur la production d'embruns formés par l'impact des vagues sur les ouvrages. Dans le modèle RIGICE, le flux total d'eau donnant contre la plateforme, y compris les embruns des crêtes de vague emportées par le vent et les précipitations atmosphériques ainsi que les collisions entre les vagues et les ouvrages (fondées sur la vitesse et la direction du vent, la hauteur et la fréquence des vagues) sont calculés et les flux de transfert

thermiques servent à prédire l'accumulation de glace au moyen du modèle de couche limite de Makkonen (1985) pour une colonne cylindrique.

Jones et Andreas (2009) et Jones et Andreas (2012) décrivent un modèle de givrage par les embruns sur les ouvrages extracôtiers fixes. Leur modèle commence par une caractérisation du nuage d'embruns comme étant une fonction de la vitesse du vent et de la température de l'air, ainsi que de la vitesse de givrage théorique d'un cylindre. Il n'a pas été tenu compte du bilan thermique dans le modèle en raison du refroidissement rapide qui se produit. Le flux d'embruns provenant des moutons a été calculé à partir d'une fonction de Fairall et al., (1994) après la prise en considération de plusieurs modèles théoriques (Andreas, 2002).

Hansen (2012) a élaboré un modèle prédictif de givrage des ouvrages extracôtiers et des navires. Ce modèle tenait compte des embruns causés par le vent provenant des moutons suivant Jones et Andreas (2012), ainsi que des embruns provenant de l'impact des vagues, suivant Lozowski et al. (2000) et d'un modèle thermodynamique de givrage et d'une application à une géométrie de navire polygonale.

## 5.2 MÉTHODE D'ANALYSE

Dans ces travaux, la méthode décrite dans Overland et al. (1986) et Overland (1990) a servi à évaluer la manifestation et l'intensité des épisodes de givrage par les embruns à chaque bloc entre les années 2000 et 2014. Ce modèle est présenté brièvement ci-après.

Le bilan thermodynamique entre la chaleur latente libérée par la formation de la glace, la perte thermique par le refroidissement de l'eau (abaissement de la température de l'eau de mer au point de congélation, ruissellement à partir du navire d'une partie de l'eau refroidie) et le transfert thermique à partir de la surface (par convection de la chaleur sensible, du flux de chaleur issu de l'évaporation et du refroidissement radiatif) détermine la vitesse maximale d'accumulation de glace sur une surface. Ce qui peut se résumer par l'équation suivante (Jessup, 1985; in Overland et al., 1986) :

$$L_i \rho_i \frac{dh_i}{dt} + f \rho_w \frac{dh_w}{dt} c_w (T_w - T_f) + (1 - f) \rho_w \frac{dh_w}{dt} c_w (T_w - T_{runoff}) = C_H \rho_a c_a U [(T_f - T_a) + \eta (e_s - 0.9 e_a)] + \sigma (T_f^4 - \epsilon_a T_a^4) \quad (1)$$

dans laquelle

- $\rho_i$ ,  $\rho_w$ . et  $\rho_a$ . sont les densités de la glace, de l'eau et de l'air, respectivement;
- $T_f$ ,  $T_w$ . et  $T_a$ . sont les températures de l'eau salée au point de congélation, de l'eau salée et de l'air respectivement;
- $T_{runoff}$  est la température moyenne de ruissellement de l'eau qui s'écoule du navire;

- $f$  est la fraction de l'eau de mer donnant contre le navire et restant sur celui-ci et susceptible de givrer;
- $L_i$  est la chaleur latente de congélation de l'eau de mer;
- $c_w$  et  $c_a$  sont la chaleur massique de l'eau de mer et de l'air, respectivement;
- $h_i$  et  $h_w$  sont l'épaisseur de la glace accumulée et de l'eau de mer retenue respectivement;
- $C_H$  est le coefficient de transfert thermique;
- $U$  est la vitesse du vent;
- $e_s$  et  $e_a$  sont la tension de vapeur de l'air saturé et de l'air ambiant, respectivement;
- $\eta$  est une constante ( $\sim 16 \text{ }^{\circ}\text{C kPa}^{-1}$ );
- $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann;
- $\epsilon_a$  est l'émissivité de l'air (entre 0,5 et 1,0; les valeurs supérieures correspondant à des conditions de brume et de ciel couvert).

Les hypothèses suivantes ont été formulées (Overland et al., 1986) :

- L'écart entre  $T_f$  et  $T_a$  est utilisé plutôt qu'entre  $T_f$  et  $T_w$ ;
- La température de l'eau donnant contre le navire est proche de  $T_w$ ;
- La relation de dépendance entre le flux de chaleur sensible et la vitesse du vent est linéaire (ce qui convient aux couches limites très turbulentes – Kraus, 1972);
- L'eau sur le pont doit être au point de congélation avant qu'elle puisse givrer ( $T_{runoff} \approx T_f$ ; cela suppose que  $f$  peut aussi être considéré comme une fraction du givrage).
- Selon ces hypothèses, l'équation (1) s'établit de la façon suivante :

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{C_H \rho_a c_a U [(T_f - T_a) + \eta(e_s - 0.9e_a)] + \sigma(T_f^4 - \epsilon_a T_a^4)}{L_i \rho_i \left( 1 + \frac{c_w}{L_i f} (T_w - T_f) \right)} \quad (2)$$

On suppose que le facteur le plus important pour déterminer la vitesse de givrage est le flux de chaleur sensible de la surface de givrage vers l'air (Overland et al., 1986) et que la forme fonctionnelle de base de la dépendance de la vitesse de givrage en fonction des variables météorologiques est (Overland et al., 1986) :

$$\frac{dh_i}{dt} \propto PR \equiv \frac{U(T_f - T_a)}{1 + \Phi(T_w - T_f)} \quad (3)$$

où  $PR$  est l'indice prédicteur de givrage et  $\Phi \equiv c_w/(L_i f)$ . Le numérateur de l'équation (3) représente le transfert de chaleur sensible, tandis que le dénominateur tient compte à la fois de la dissipation de chaleur nécessaire pour que l'eau gèle (qui s'accumulerait alors sous forme de glace) et du passage de l'eau de mer au point de congélation.

Overland et al. (1986) ont supposé que les autres variables environnementales influant sur la vitesse de givrage (p. ex. la hauteur des vagues, l'humidité relative et le rayonnement) ne variaient pas assez de façon indépendante par rapport aux principales variables météorologiques (comme dans l'équation (3)) pour accroître la capacité de prévision.

Les données sur les épisodes de givrage sur (1) les navires (navires de pêche, navires de conditionnement du poisson, remorqueurs et navires de la Garde côtière) de 20 à 75 m de longueur naviguant dans les eaux de l'Alaska (voir Overland et al., 1986) et (2) des navires de pêche navigant dans la mer du Labrador (Zakrzewski et al., 1989, in Overland, 1990) ont servi à déterminer de façon empirique la valeur  $\Phi$ . Il a été supposé que les navires ne cherchaient pas activement à éviter le givrage en naviguant vent arrière, en se déplaçant à faible vitesse ou en évitant les eaux libres.

À partir des données d'une réanalyse, la formulation de l'indice  $PR$  a servi à calculer l'intensité prévue des épisodes de givrage par les embruns à chaque bloc entre les années 1990 et 2012. Les valeurs calculées de  $PR$  sont reliées à la vitesse et à l'intensité de givrage prévues, selon les catégories suivantes (Guest, 2005; Overland et al., 1986; Overland, 1990) :

- $PR \leq 0$ : pas de givrage;
- $PR$  entre 0 et 22 : givrage léger (vitesse de givrage  $<0,7$  cm/heure);
- $PR$  entre 22 et 53 : givrage modéré (vitesse de givrage entre 0,7 et 2,0 cm/heure);
- $PR$  entre 53 et 83 : givrage fort (vitesse de givrage entre 2,0 et 4,0 cm/heure);
- $PR > 83$  : givrage extrême (vitesse de givrage  $>4,0$  cm/heure).

### 5.3 DONNÉES D'ENTRÉE

Pour mettre en œuvre le modèle, les données de différents produits de réanalyse environnementale ont été utilisées. Ces derniers sont présentés brièvement ci-après.

#### 5.3.1 OSTIA

Des données du système Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) ont été utilisées. Le système OSTIA est géré par le Met Office (Royaume-Uni) et accessible par le truchement du MyOcean Project (<http://www.myocean.eu/>). Ce système fournit des cartes de suites ininterrompues de températures de la surface de la mer à une résolution horizontale pouvant atteindre  $0,05^\circ$  (6 km environ). Les données sont générées par des capteurs installés sur place et de données satellitaires provenant de radiomètres à infrarouges et à micro-ondes (Stark et al., 2007). Les données satellitaires du Group for High Resolution Sea Surface Temperatures (GHRSST) sont intégrées et évaluées pour chaque biais de capteur ( $\pm 0,25^\circ$ ) par comparaison des données avec des bases de données de référence et des observations faites sur place. Ces écarts sont ensuite pris en compte dans une méthode d'interpolation optimale qui produit des champs quadrillés de biais de chaque capteur (Donlon et al., 2012). Les données sur la concentration des

glaces générées par l’Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF) (Centre d’applications satellitaires : Océans et glaces de mer) de l’European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) (Organisation européenne pour l’exploitation des satellites météorologiques) font aussi partie du produit OSTIA.

### 5.3.2 *Produit d’une réanalyse ERA-Interim*

ERA-Interim est une réanalyse de l’atmosphère à l’échelle mondiale (Dee et al., 2011) produite par l’European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme). Le produit ERA-Interim offre une couverture mondiale à une résolution horizontale pouvant atteindre 0,125°. Cette réanalyse couvre la période de 1979 à nos jours, sauf pour deux mois. Les paramètres délimités par 37 niveaux de pression sont disponibles. Les conditions météorologiques, des vagues de l’océan et de la surface terrestre sont classées par paramètres de la surface aux trois heures, alors que les conditions de la troposphère et de la stratosphère sont enregistrées au moyen de paramètres des couches supérieures aux six heures. ERA-Interim a recours à une méthode avancée d’assimilation de données d’analyse des variations à quatre dimensions sur 12 heures.

## 5.4 MÉTHODE DE CALCUL ET OBSERVATIONS

L’équation (3) a servi à calculer  $PR$ , l’indice utilisé pour reproduire l’intensité des épisodes de givrage par les embruns. Des données environnementales de réanalyse ont été acquises pour la période de 2000 à 2014 inclusivement (les données avant 2000 présentaient des trous ou des valeurs nulles, ainsi que davantage de glace que les années plus récentes – voir la Figure 39 –, ce qui aurait diminué le givrage par la suppression d’embruns). Les variables suivantes ont été utilisées :

- température de la surface de la mer ( $T_w$ ) : ensemble de données OSTIA;
- vitesse du vent à 10 m de hauteur ( $U$ ) : ensemble de données ERA-Interim;
- température de l’air à 2 m de hauteur ( $T_a$ ) : ensemble de données ERA-Interim.

Comme il n’existait pas de données sur la salinité ( $S$ ) de la surface de la mer pour la zone d’intérêt, une valeur constante de -1,8 °C a été retenue comme point de congélation de l’eau de mer ( $T_f$ ). Pour toutes les variables, la valeur moyenne journalière a servi à calculer la valeur  $PR$  journalière.

Un seuil supérieur de la concentration de glace de mer a servi à déterminer si la production d’embruns (et par conséquent de givrage) était possible ou non, selon les hypothèses voulant que la présence de glace de mer réduit la zone des eaux libres pouvant produire des embruns et que les vagues sont atténuées par la présence de la glace de mer. La valeur à laquelle le seuil de concentration de glace de mer doit être fixé n’est pas claire. Chez Jones et Andreas (2013), une valeur de 15 % a été retenue. Cette valeur a aussi été retenue pour les présents travaux.

Le présent document ne contient pas d'analyse interprétative des résultats. Le lecteur doit cependant être conscient de certains points importants. Les estimations de l'intensité et de la probabilité de givrage fournies ont été obtenues au moyen d'un algorithme élaboré pour le givrage par les embruns sur les navires. De nombreux facteurs peuvent influer sur l'importance du givrage produit dans des conditions environnementales données comme la longueur du navire, sa vitesse, son cap et les dimensions des éléments de structure exposés aux embruns. Il est généralement admis, par exemple, que le givrage par les embruns augmente avec la vitesse de croisière du navire (Guest, 2005). La vitesse de givrage devrait ralentir si le navire navigue vent arrière ou si l'état de la mer est plus calme (Overland et al., 1986). Il existe aussi de grandes variations d'accumulations de givre selon la géométrie et l'emplacement de l'élément dont on examine le givrage. Chez Overland (1990), par exemple, on signale que l'accumulation de glace sur des structures isolées comme des grues peut être deux fois plus importante que sur des surfaces horizontales plates (exposition accrue à des conditions favorisant la perte de chaleur – à des vitesses accrues du vent – et à un taux de rencontre supérieur des gouttelettes d'embruns – structure moins à l'abri).

Sur les ouvrages extracôtiers, parce qu'ils sont essentiellement stationnaires, les embruns sont produits par les crêtes des vagues à la surface de l'océan (Guest, 2005; Jones and Andreas, 2009) et comme ces structures sont plus importantes et plus hautes que les navires, l'accumulation de glace variera selon la hauteur relative de la surface de la mer lorsque les gouttelettes d'eau se déposent sur la structure et givrent. Comme il est précisé chez Jones et Andreas (2009), ce genre de structure a également tendance à être assez exposé au niveau de l'eau, contrairement aux navires (ce qui peut influer sur la vitesse de givrage et son accumulation). La distribution verticale du nuage d'embruns est importante ainsi que la distribution granulométrique des gouttelettes (qui détermine la vitesse de refroidissement des gouttelettes – Overland, 1990).

## 5.5 RÉSULTATS

La Figure 23 illustre l'intensité calculée du givrage (à un seuil de concentration de glace de mer de 15 %), sous forme de séries chronologiques pour chaque année entre 2000 et 2014, en jours juliens. La Figure 24 illustre l'indice prédicteur de givrage calculé en jours juliens pour les années 2000 à 2014, établi à un seuil de concentration de glace de mer de 15 %. Le seuil de concentration de glace de mer sert à déterminer s'il y a possibilité d'embruns (et donc de givrage); pour une concentration de glace de mer supérieure à ce seuil, on suppose qu'il n'y a pas de givrage. Les points gris représentent la valeur *PR* de chaque jour (à remarquer que plusieurs valeurs nulles peuvent se chevaucher); la ligne noire correspond à la moyenne de chaque jour; les lignes bleues, rouges et vertes, aux 25<sup>e</sup>, 75<sup>e</sup> et 50<sup>e</sup> percentiles de chaque jour, respectivement. Les lignes ont été lissées par l'application d'un filtre moyen mobile de cinq jours et d'une fonction pondérale uniforme. Les catégories d'intensité de givrage sont établies suivant la description figurant à la fin de la section 5.2. De la même façon, la Figure 25 illustre le nombre d'années au cours desquelles les conditions favorisent le givrage, par degré d'intensité (c.-à-d., léger, modéré, fort et extrême), en jours juliens pour les années 1990 à 2012, calculé à un seuil de concentration de

glace de mer de 15 %. Les lignes sont lissées au moyen d'un filtre moyen mobile de cinq jours et d'une fonction de pondération uniforme. La Figure 26 est un diagramme en barres qui représente le nombre moyen de jours par mois au cours desquels les conditions favorisent le givrage pour chaque mois, par catégorie, pour la période de 1990 à 2012. La Figure 27 illustre les conditions de givrage sur la période de 2000 à 2014, en indiquant les conditions de givrage relativement constantes.

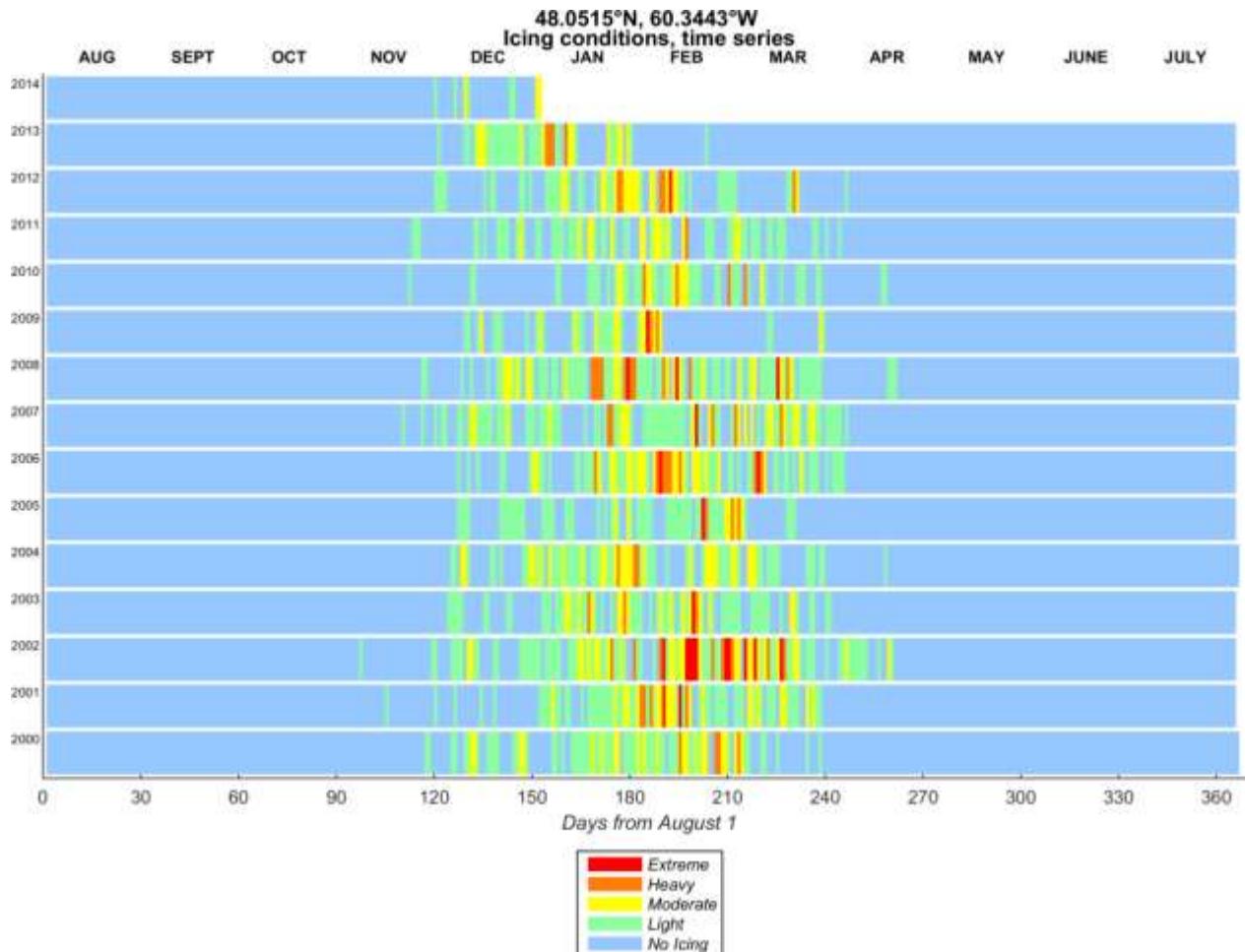


Figure 23. Série chronologique de l'intensité du givrage pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré

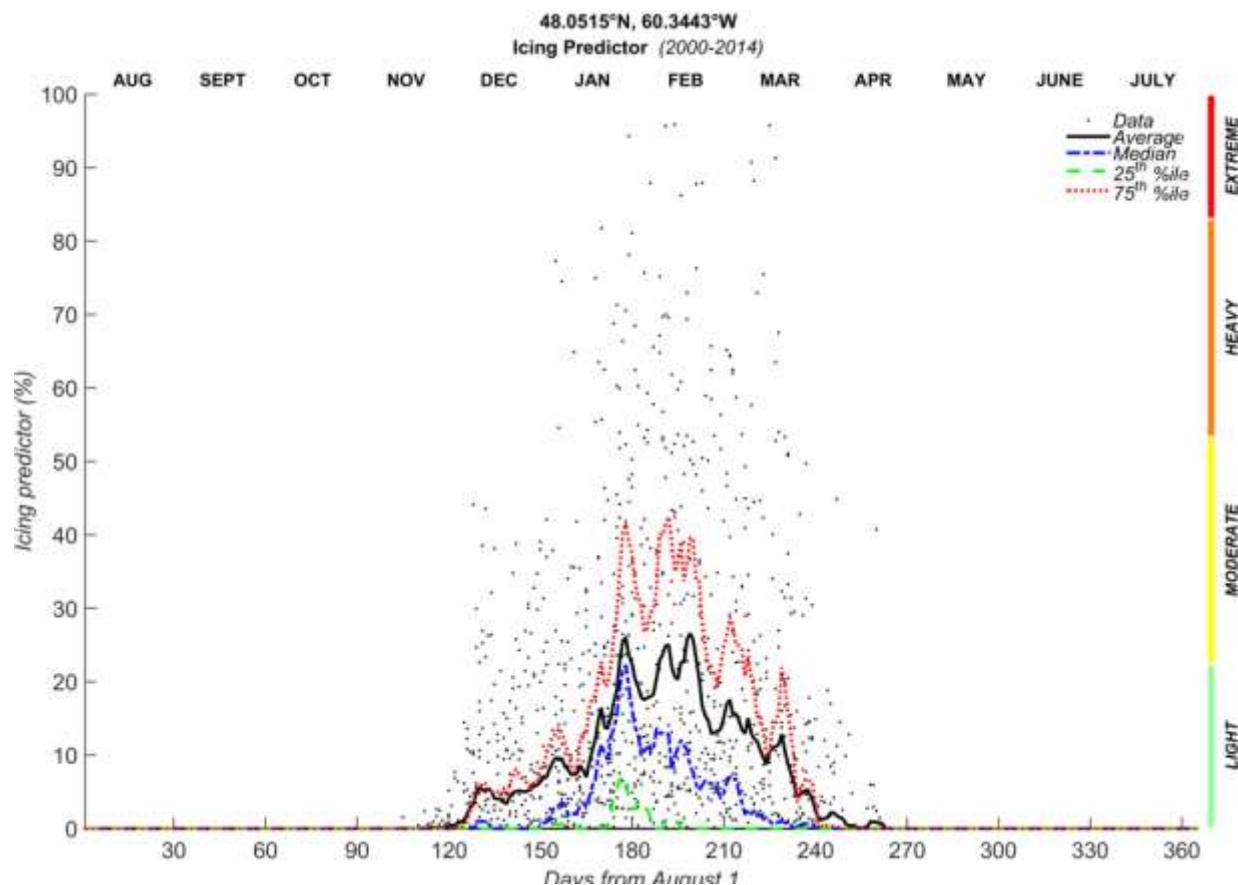


Figure 24. Statistiques de probabilité de givrage (avec l'intensité de givrage correspondante) en jours juliens pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré

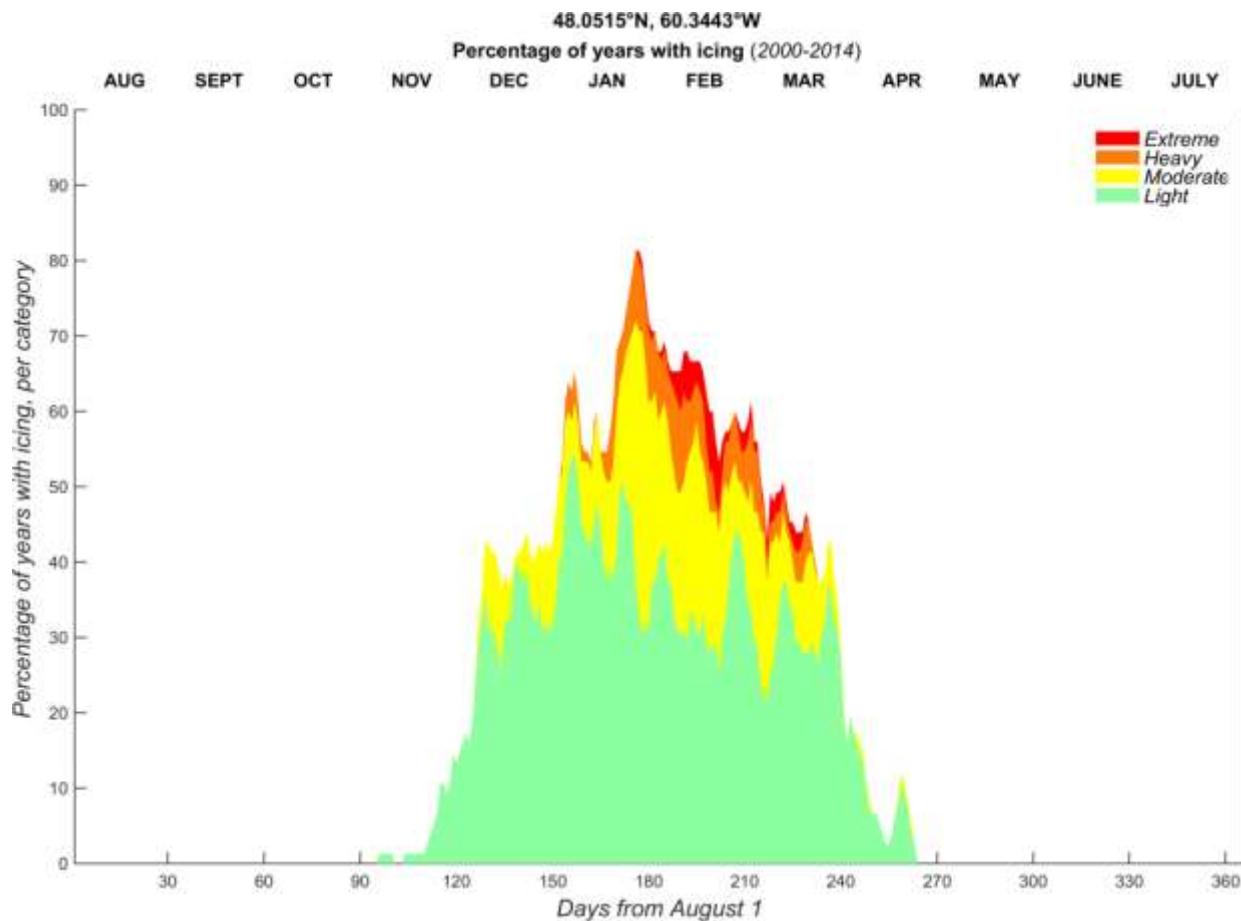


Figure 25. Proportion des années au cours desquelles les conditions favorisent le givrage, par degré d'intensité, en jours juliens pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré

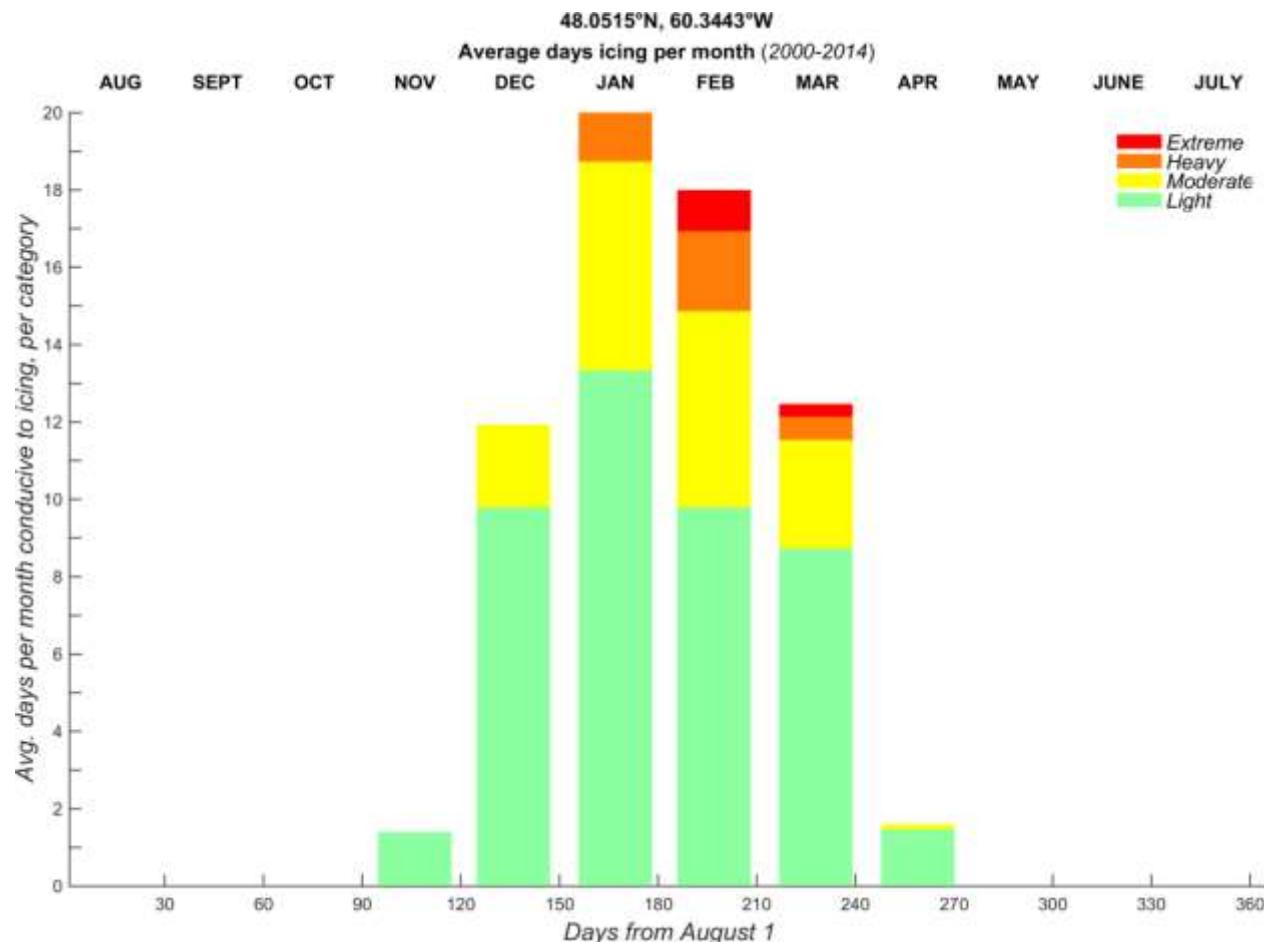


Figure 26. Nombre moyen de jours par mois au cours desquels les conditions favorisent le givrage, par degré d'intensité, en jours juliens pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré

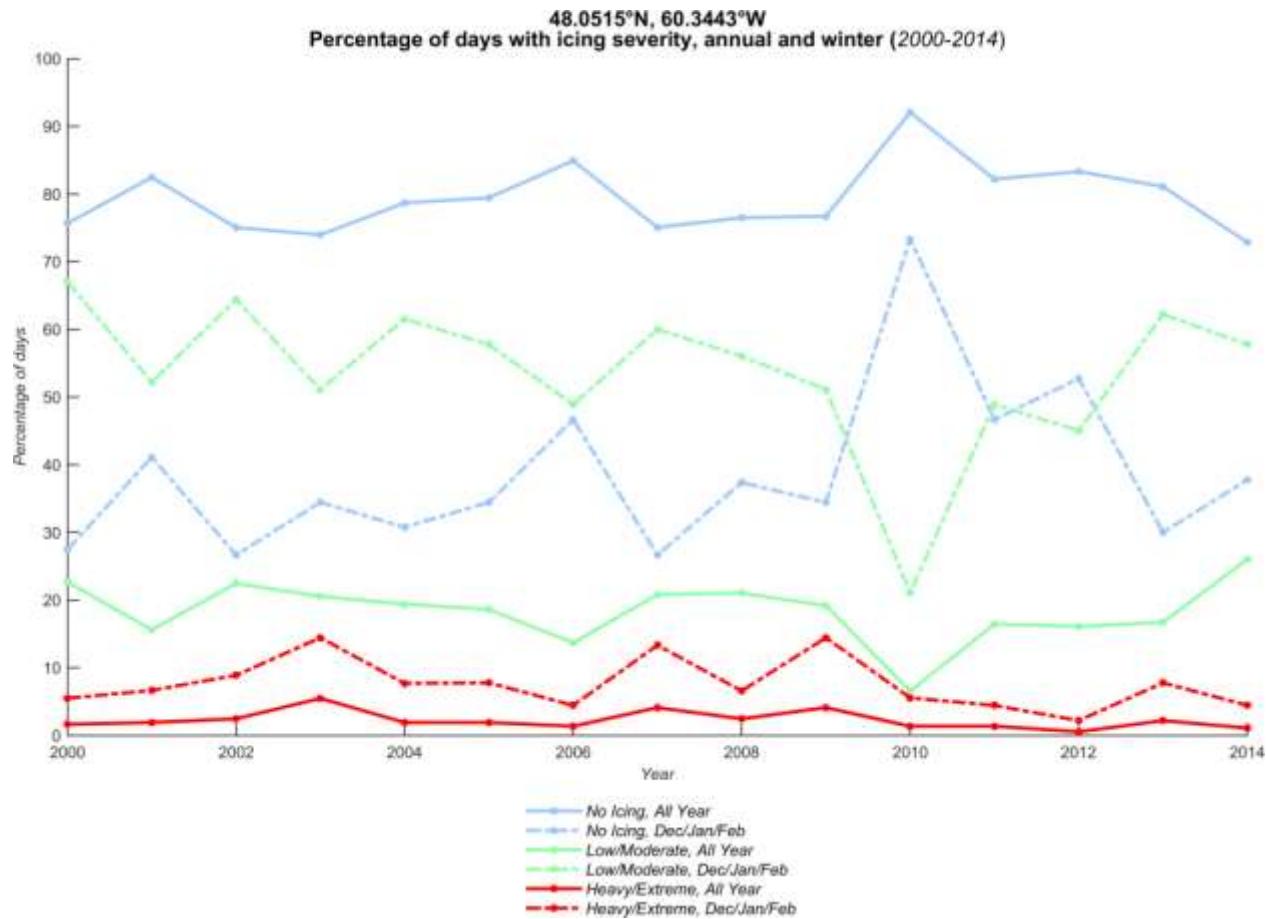


Figure 27. Pourcentage de jours en fonction de l'intensité du givrage annuel et hivernal pour les années 2000 à 2014 au lieu considéré

## 6 LA VISIBILITÉ

### 6.1 PROVENANCE ET ANALYSE DES DONNÉES

La visibilité est définie comme la distance la plus grande à laquelle certains objets peuvent être vus ou reconnus. La présente section ne porte que sur la visibilité par rapport au brouillard. Le brouillard est défini, d'un point de vue technique, comme une couche nuageuse qui se forme au niveau du sol. Il existe plusieurs types de brouillard, classés selon leur mode de formation (brouillard de rayonnement, brouillard d'advection, brouillard lié au relief, brouillard de pluie/postfrontal, brouillard de vallée, etc.) Sur la côte Est du Canada, les deux types les plus importants sont les brouillards de rayonnement et d'advection (Toth et al., 2011).

Le brouillard de rayonnement est causé par le refroidissement infrarouge nocturne de la surface inférieure (sol, eau, etc.) et de l'air, jusqu'à ce que l'air atteigne le point de rosée, après quoi il devient sursaturé et des gouttelettes de brouillard se forment par condensation. Au fur et à mesure que le brouillard s'épaissit, il y a de moins en moins de chaleur de rayonnement qui s'échappe dans l'atmosphère, ce qui a pour effet de ralentir la formation de brouillard. Le brouillard de rayonnement se forme et se dissipe localement, généralement au cours de la nuit ou tôt le matin (en l'absence de rayonnement solaire), par vent relativement calme (< 5 kt; Toth et al., 2010) et dure généralement quelques heures.

Le brouillard d'advection se produit lorsque (1) de l'air chaud atteint une surface plus froide ou (2) lorsque de l'air froid atteint une surface plus chaude. Dans le premier cas, l'air se refroidit jusqu'à ce qu'il y ait condensation (lorsque le point de rosée est atteint). Dans le second cas, lorsque la surface est de l'eau, quand de l'air sec et froid se déplace au-dessus de l'eau, il se produit une évaporation telle que la teneur en eau de la couche d'air située près de la surface augmente. L'important gradient de tension de vapeur ainsi créé provoque l'évaporation de molécules d'eau dans l'air jusqu'à ce qu'il en soit saturé. Lorsque le phénomène se produit avec assez de rapidité pour que la température de l'air ne change pas trop, il y a condensation et formation de brouillard. C'est courant dans les océans froids et, par conséquent, sur la côte Est du Canada. Si l'air est suffisamment froid, l'eau qui s'est évaporée peut aussi être sublimée en petits cristaux de glace. Le brouillard d'advection se produit par vent faible ou modéré (< 10 kt; Toth et al., 2010) et peut s'installer pour plusieurs jours.

Les manifestations de brouillard ont été estimées à partir de données sur la visibilité horizontale du modèle de simulation rétrospective North American Regional Reanalysis (NARR) produit par les National Centers for Environmental Prediction (NCEP) et le National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis. La visibilité horizontale dans NARR est modélisée suivant la méthode du système de visibilité mondial de la Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) des NCEP, à l'aide d'un algorithme élaboré par Stoltinga and Warner (1999). Voir aussi : <http://polar.ncep.noaa.gov/marine.meteorology/global.visibility/about.gvis.shtml>.

Dans cet algorithme, les coefficients d'extinction des divers types de précipitation sont calculés (en fonction de la concentration massique de chaque type d'hydrométéore, à savoir l'eau sous forme liquide des nuages, la glace de nuages, la pluie et la neige) et combinés linéairement pour établir un indice de visibilité. Les paramètres nécessaires au calcul de la concentration massique d'hydrométéores sont tirés du Global Forecast System (GFS) et comprennent la température de l'air, l'humidité relative, la pression de surface, les taux de précipitation synoptique et convective, l'eau précipitable, le rapport de mélange nuageux, la pluie assurée, la pluie verglaçante, le grésil et la neige. Les données sur la visibilité dans NARR sont produites à une résolution spatiale d'environ 32 km à une fréquence temporelle de trois heures.

Pour des besoins pratiques, différents seuils de visibilité horizontale sont traditionnellement associés à des épisodes météorologiques. Dans les lignes directrices de la norme ISO 19906 : 2010(E), les seuils de visibilité employés sont les suivants :

- 1 km (environ 0,5 mn) : seuil correspondant généralement à un temps couvert;
- 2 km (environ 1 mn) : seuil indiqué pour certaines régions en cas de tempête de neige;
- 5 mn (environ 9,25 km) : limite correspondant aux conditions météorologiques indiquées dans la norme pour diverses régions.

Une comparaison des données sur la visibilité horizontale avec la visibilité observée à l'Aéroport international de St. John's a été faite. La Figure 28 présente la série chronologique des épisodes de brouillard (en rouge) et des épisodes de faible visibilité (en bleu) modélisés (visibilité <1 km) à l'Aéroport international de St. John's (YYT) pour l'année 2012. Dans l'ensemble, les données modélisées de l'année en question sont en accord raisonnable avec les observations, le taux de concordance (vrai positif et vrai négatif) étant de 72,5 %, le taux de fausse alarme (faux positif) de 9,9 % et le taux des cas omis (faux négatif) de 17,6 %.

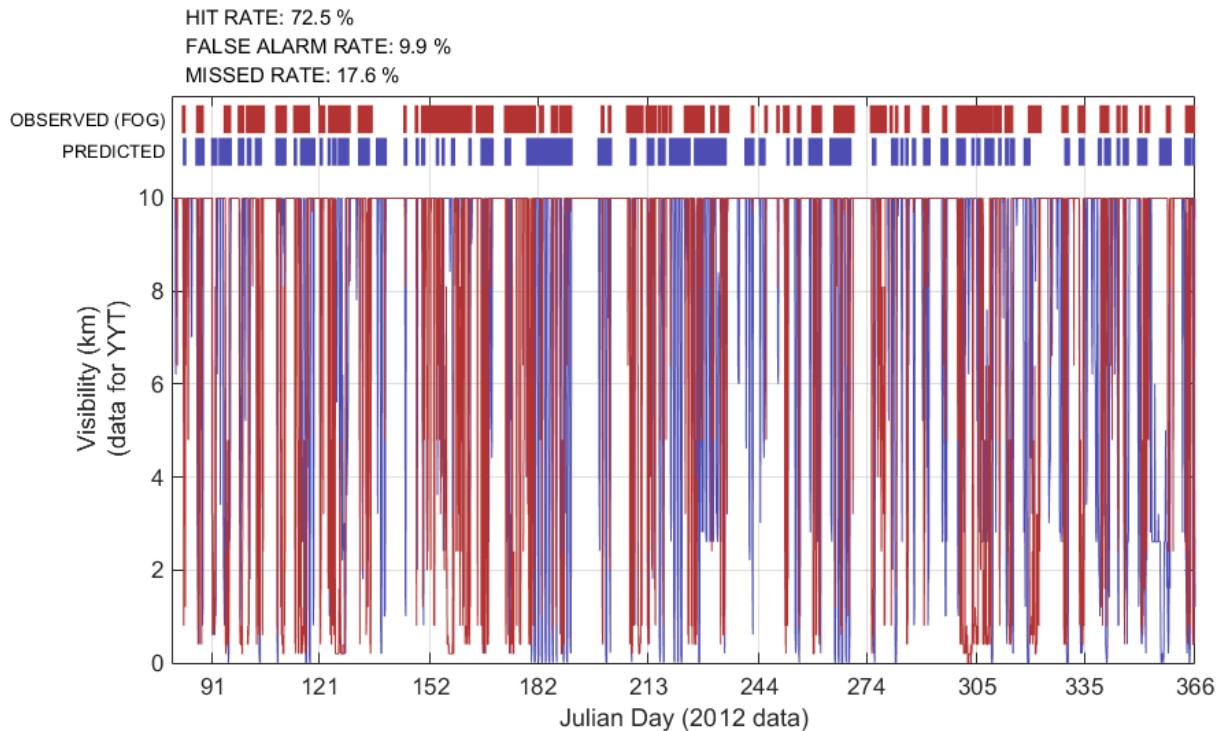


Figure 28. Série chronologique d'épisodes de brouillard (en rouge) observés et d'épisodes de faible visibilité (en bleu) modélisés (visibilité <1 km) à l'Aéroport international de St. John's (YYT) pour l'année 2012

## 6.2 RÉSULTATS

La Figure 29 présente le pourcentage de temps à visibilité horizontale inférieure à un kilomètre (km) en fonction de l'heure du jour et du mois de l'année, pour les données de 1979 à 2013 à la cellule 110. Pour chaque jour julien et heure du jour, 30 indices de visibilité existaient (pour les données recueillies sur les 30 années). Le pourcentage de temps est défini comme le nombre total d'années pour un jour julien et une heure du jour donnés, l'indice de faible visibilité étant divisé par le nombre total d'années disponible. L'heure du jour est donnée en temps universel coordonné (TUC). Les heures théoriques du lever et du coucher du soleil (comme fonction de la latitude/longitude, données en UTC) sont représentées par des lignes noires sur la figure. Des figures analogues sont fournies pour chacun des trois seuils de visibilité à chaque cellule, à savoir, un km, deux km et cinq milles nautiques (5 mn).

La Figure 30 indique le pourcentage d'heures du jour par mois offrant une faible visibilité, à chacun des trois seuils, pour les données de 1985 à 2014 au lieu considéré. Les heures du jour ont été établies à partir des courbes du lever et du coucher du soleil, présentées à la Figure 29. La Figure 31 illustre des résultats du modèle suivant une présentation différente qui indique le nombre moyen d'heures du jour où la visibilité est supérieure à 1 km pour la cellule 110. La Figure

32 et la Figure 33 répètent l'analyse précédente, en se fondant sur le nombre total d'heures d'une journée (période de 24 heures) au lieu de se limiter aux heures du jour.

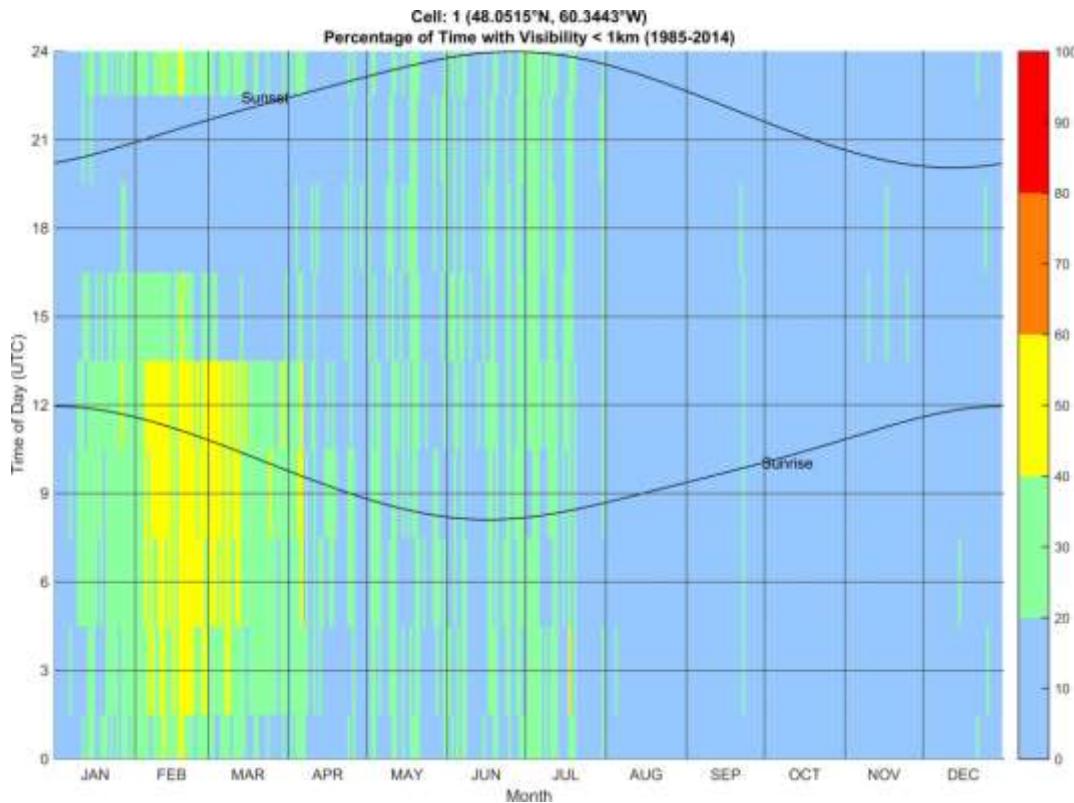


Figure 29. Pourcentage du temps où la visibilité horizontale est inférieure à 1 km selon l'heure du jour et le mois de l'année, au lieu considéré

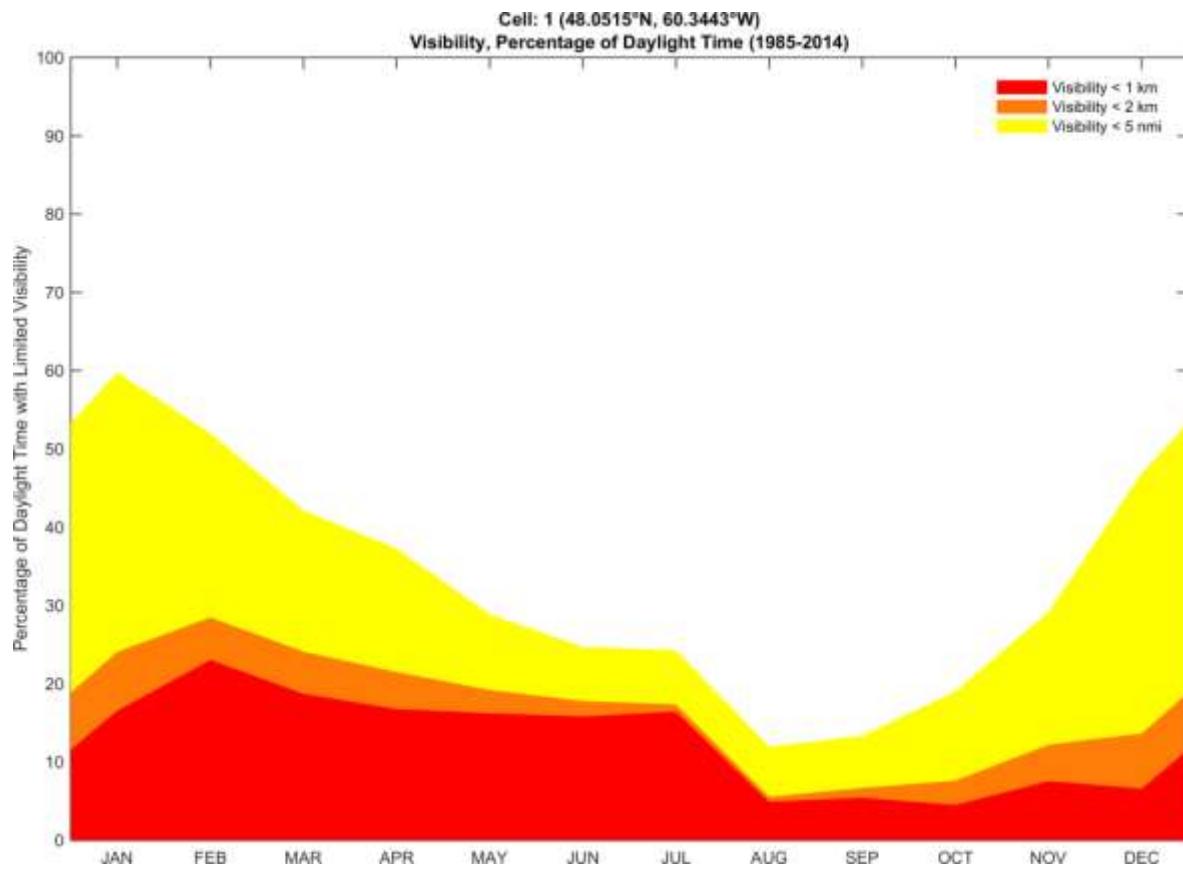


Figure 30. Pourcentage d'heures du jour par mois offrant une faible visibilité, à chacun des trois seuils, au lieu considéré

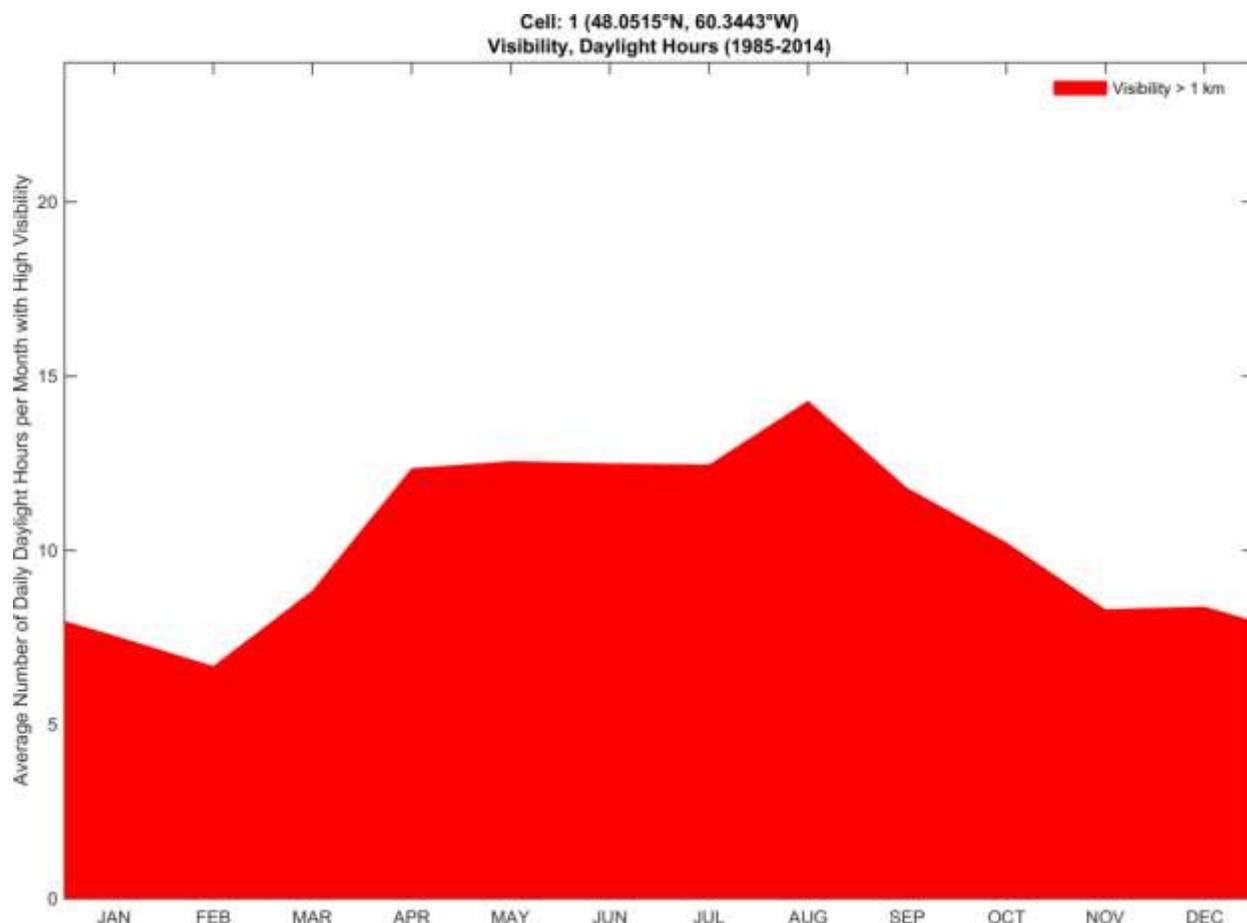


Figure 31. Nombre journalier moyen d'heures du jour offrant une visibilité supérieure à 1 km au lieu considéré

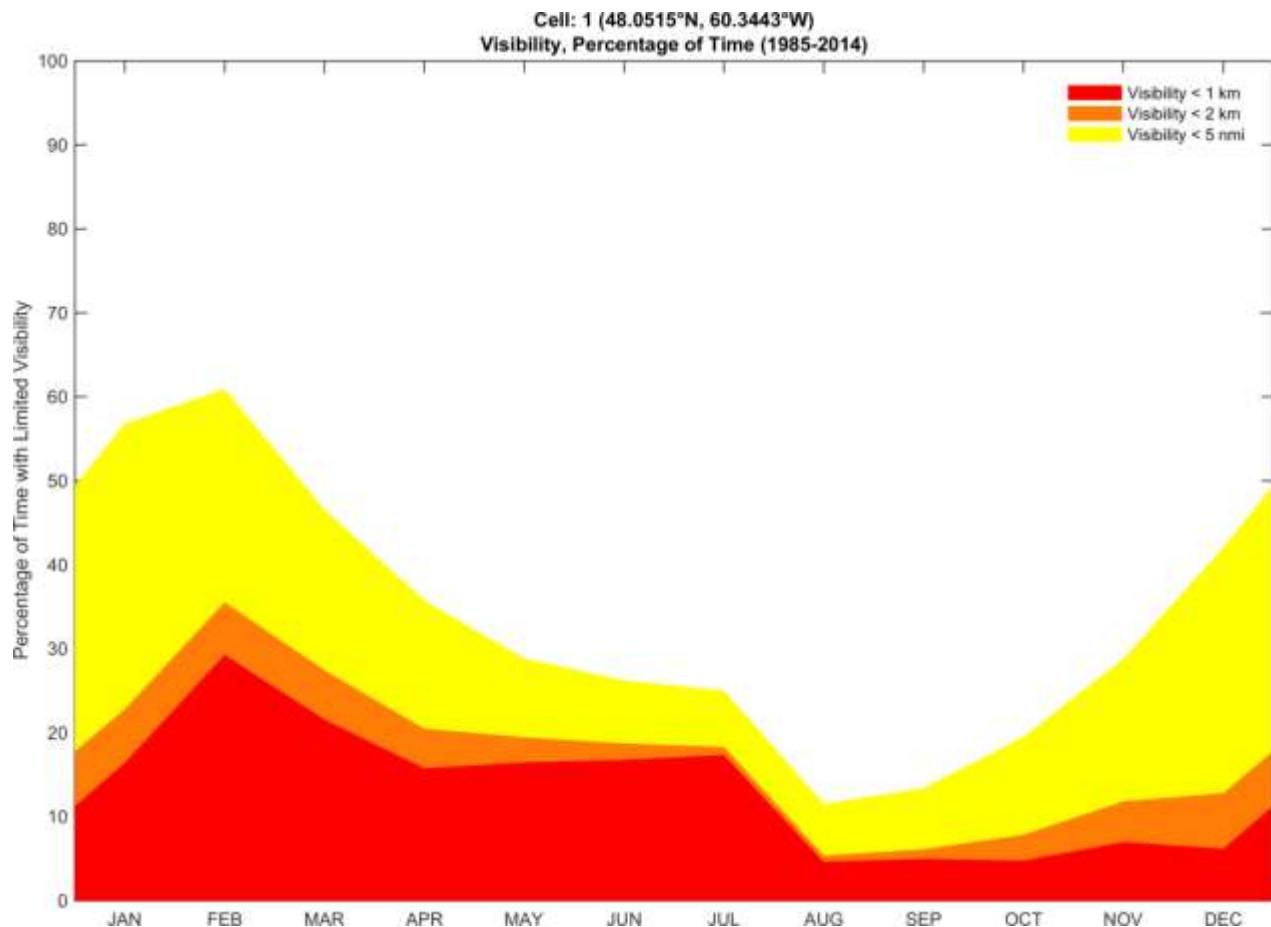


Figure 32. Pourcentage d'heures totales par mois offrant une faible visibilité à chacun des trois seuils, au lieu considéré

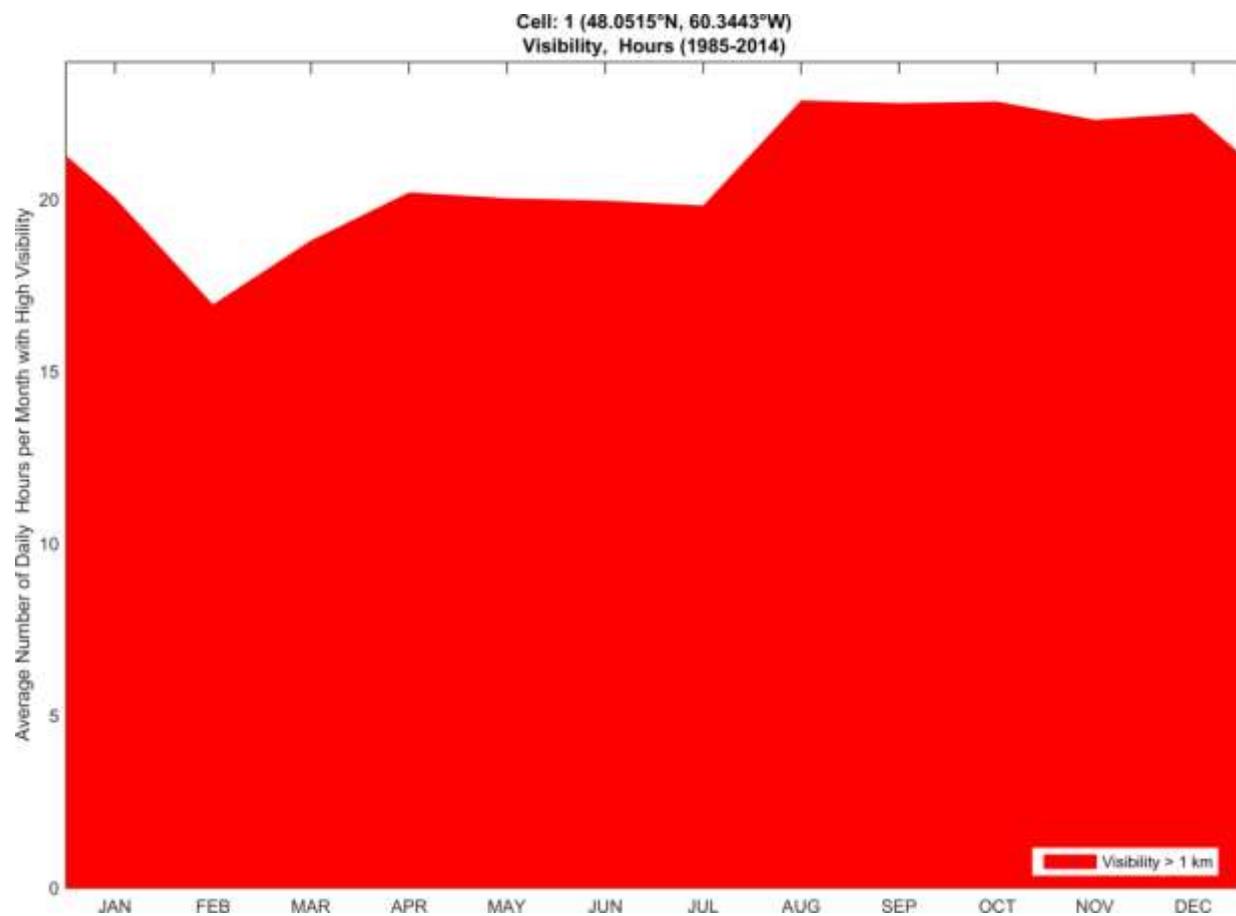


Figure 33. Nombre journalier moyen d'heures totales offrant une visibilité supérieure à 1 km au lieu considéré

## 7 LA GLACE DE BANQUISE

### 7.1 DONNÉES

L'analyse de la banquise d'une région est généralement réalisée avec des cartes archivées de la banquise. Pour les eaux canadiennes, les deux principales sources de cartes archivées sont le Service canadien des glaces (SCG) et le National Ice Center des États-Unis.

#### 7.1.1 *Provenance des données*

Les cartes archivées de la banquise produites par le SCG ont servi à analyser la banquise aux environs du secteur de Old Harry. Des cartes régionales hebdomadaires du SCG sont à la base de cette analyse. Le SCG observe plusieurs régions qui couvrent les eaux côtières et intérieures canadiennes; pour la présente étude, ce sont les cartes régionales hebdomadaires de la côte Est qui ont été analysées.

Les cartes régionales hebdomadaires sont produites par la fusion de cartes journalières des glaces. Les cartes régionales couvrent une zone géographique beaucoup plus grande que les cartes journalières, comme le montrent la Figure 34 et la Figure 35. L'échelle étant plus grande, certains détails qui figurent sur les cartes journalières ne peuvent pas être inclus. En outre, en raison de données disponibles limitées, notamment par la fréquence de passage des satellites sur orbite polaire, il est impossible de couvrir toute la région en une journée. Les images recueillies à partir de la carte régionale précédente servent à créer la carte régionale suivante et les « prévisions immédiates » servent à prédire la dérive, la dégradation et la formation des glaces pour estimer les conditions glacielles à la date de la carte régionale suivante. La résolution temporelle des cartes régionales empêche celles-ci de rendre compte des fluctuations journalières de la zone englacée figurant sur les cartes journalières. Comme les fluctuations journalières les plus fortes se trouvent près de la limite des glaces, l'examen des régions situées près de cette limite et durant les saisons de transition (englacement et déglacement), il faut s'attendre à des variations entre les cartes régionales et journalières.

Bien que les cartes journalières offrent certains avantages pour suivre le mouvement des glaces sur une courte période, les cartes hebdomadaires ont été utilisées pour l'analyse de la banquise pour deux raisons principalement, le format des données et la disponibilité des données :

- A. Format des données – La principale raison pour laquelle on utilise des cartes régionales est que les cartes journalières ne sont pas publiées sous un format compatible avec le Système d'information sur les glaces ou SIG ('.E00'). Un format compatible avec le SIG permet d'utiliser des algorithmes automatisés pour analyser et classer les données et ensuite les traiter sous forme de tableaux et de figures pour illustrer les conditions de la banquise dans la région. Sans format compatible avec le SIG, il faudrait procéder à une numérisation manuelle des cartes des glaces, une opération qui demande beaucoup de personnel et est extrêmement longue.

B. Disponibilité des données – La deuxième raison pour laquelle on utilise des cartes régionales est que celles-ci sont disponibles sur une période beaucoup plus longue, soit de 1969 à nos jours, alors que les cartes journalières n'existent que pour la période de 1999 à nos jours. Plus on dispose de données, plus l'étude de la banquise peut être poussée et plus on améliore la capacité de présenter l'évolution des conditions de la banquise dans le temps.

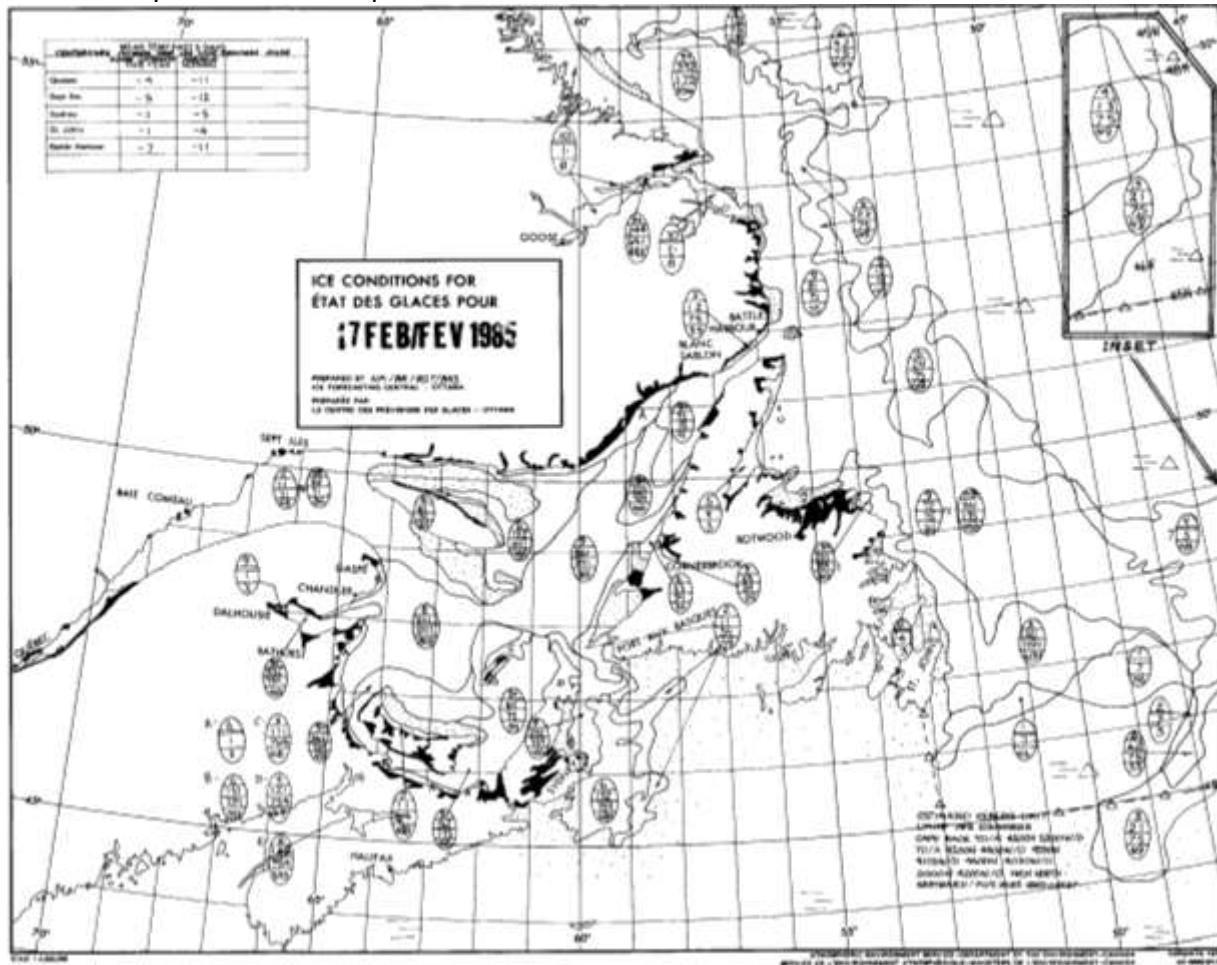


Figure 34. Exemple de carte régionale hebdomadaire de la côte Est (SCG, 2015)

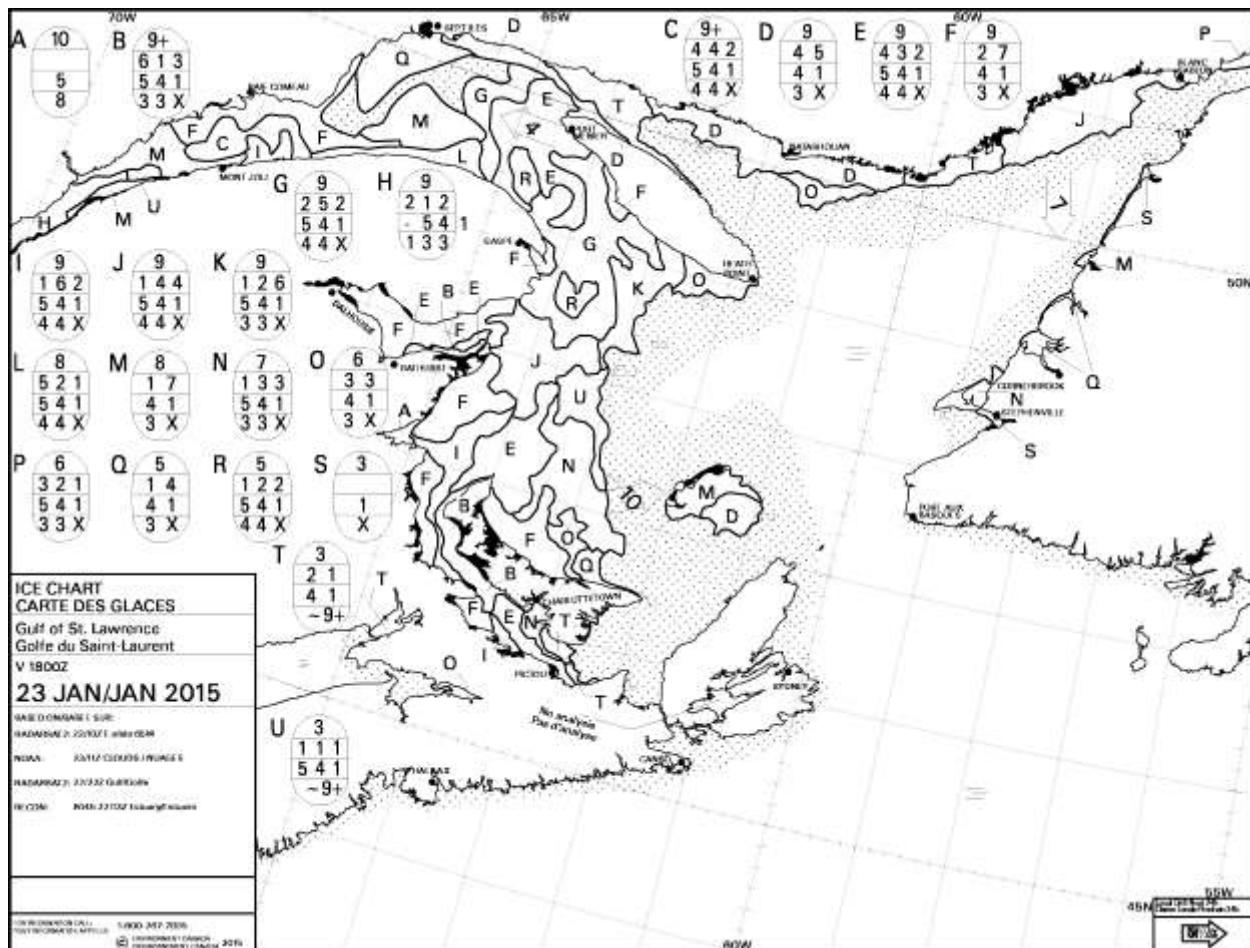


Figure 35. Exemple de carte journalière du golfe du Saint-Laurent

### 7.1.2 Traitement des données

Pour traiter les données sur la banquise, une zone d'intérêt a été générée pour le secteur de Old Harry. Centrée sur un point situé à environ 48,05°N et 60,39°O, la zone d'intérêt mesure 1° de longitude et 0,5° de latitude, comme il est indiqué à la Figure 36 ci-après. Cette zone d'intérêt a été subdivisée en 1 035 points de données distribués uniformément, avec une résolution spatiale de 2,5 km x 2,5 km.

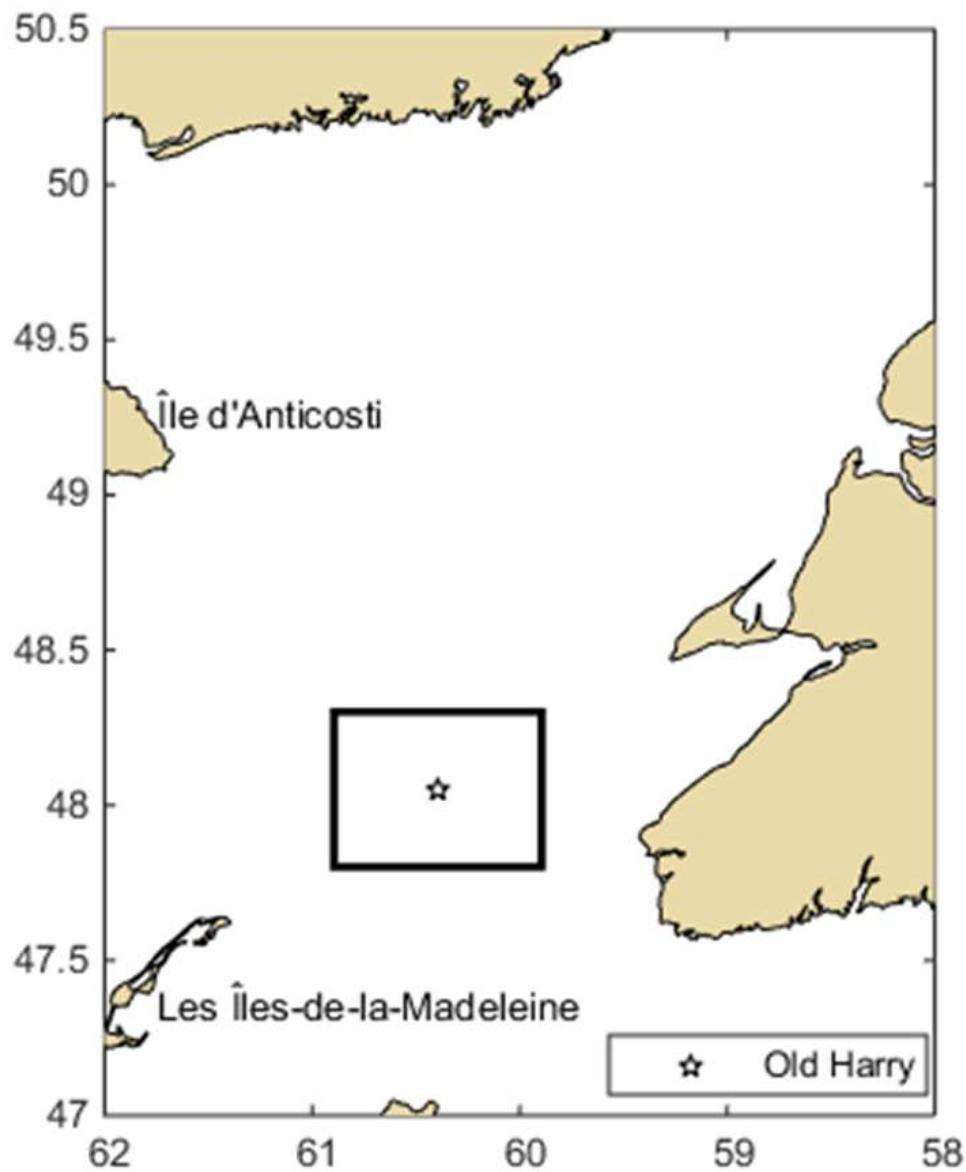


Figure 36. Localisation du secteur de Old Harry et de la zone d'intérêt

### 7.1.3 Périodes de temps

Les données ont été traitées pour les trois périodes suivantes : 1986-1995, 1996-2005 et 2006-2015. Les conditions glacielles des 10 dernières années revêtent un intérêt particulier, en ce qu'elles fournissent de l'information sur les conditions glacielles récentes. Les données acquises sur les 30 dernières années offrent la possibilité d'analyser les tendances dans le temps et peuvent jeter les bases d'une estimation des conditions glacielles futures. Les plages de 10 ans ont été considérées comme des intervalles de temps appropriés pour présenter les variations éventuelles des conditions glacielles au cours des 30 dernières années.

### 7.1.4 *Interpolation des données*

Les données sur la banquise dans la zone d'intérêt sont fondées sur les cartes des glaces mises à disposition par le SCG, soit généralement aucune carte à quatre ou cinq par mois. De façon générale, lorsqu'il n'y a pas de carte des glaces pour un mois donné, c'est qu'il n'y avait pas de glace. Par conséquent, les données non traitées sur la banquise sont disponibles de façon intermittente pour la zone d'intérêt. Ces données intermittentes sur la concentration des glaces ont été prélevées et interpolées sur la période 1986-2015 pour produire un point de données sur la concentration des glaces pour chaque jour sur cette période de 30 ans. Ces données interpolées ont été calculées pour chaque point de données situé dans la zone d'intérêt.

### 7.1.5 *Données manquantes ou sans objet*

L'emploi des mentions *No data* ou *ND* (pas de donnée) signale à la fois des données manquantes et des données sans objet ou inutilisables.

### 7.1.6 *Information de base sur la glace de mer*

L'information sur la banquise du SCG est présentée suivant le code normalisé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM), appelé le code de l'œuf. Le code de l'œuf sert à définir l'état de la banquise dans des régions prédéterminées, ou polygones, tels qu'ils sont présentés sur la carte des glaces. Par exemple, à la Figure 35, deux polygones décrivent les conditions glacielles près des Îles-de-la-Madeleine. Ces polygones portent les mentions « M » et « D » et correspondent à deux œufs distincts portant les lettres « M » et « D ».

#### 7.1.6.1 *Classification des glaces de la banquise*

Le code de l'œuf compte 14 catégories ou types de glace de la banquise, classés selon l'épaisseur et l'âge de la glace. Les 14 types de glace sont présentés au Tableau 15, allant du plus léger au plus lourd.

#### 7.1.6.2 *Concentration de glace et seuils de concentration*

Dans le code de l'œuf, la présence de la banquise est définie par la concentration des glaces présentes. Cette concentration est généralement exprimée en dixièmes, par exemple la concentration totale dans le polygone « M » de la Figure 35 est de huit dixièmes, ce qui signifie que ce polygone est couvert de glace à 80 pour cent. La concentration de glace dans une région peut avoir des répercussions sur les charges prévues sur une structure ou un navire, sans compter qu'elle gêne la procédure d'évacuation. Pour cette raison, lorsque c'est possible, les statistiques sur la banquise seront présentées suivant quatre seuils de concentration : un dixième, quatre dixièmes, six dixièmes et huit dixièmes.

Tableau 15. Types de glace définis par le SCG

	Type de glace
Léger	Nouvelle glace
	Nilas, glace vitrée
	Jeune glace
	Glace grise
	Glace blanchâtre
	Glace de première année
	Glace mince de première année
	Glace mince de première année – premier stade
	Glace mince de première année – deuxième stade
	Glace moyenne de première année
	Glace épaisse de première année
	Vieille glace
	Glace de deuxième année
Lourd	Glace de plusieurs années

### 7.1.7 *Eau libre et eau sans glace*

L'expression eau libre, tel qu'elle est utilisée dans le présent rapport, désigne les eaux dans lesquelles la concentration de glace est inférieure à un dixième. En revanche, l'expression sans glace désigne les eaux dans lesquelles il n'y a PAS de glace. Le SCG utilise souvent les désignations eau libre et sans glace sur ses cartes, ce qui trace une ligne de démarcation distincte de toutes les glaces connues, au-delà de laquelle l'eau est libre. Cependant, comme les zones géographiques couvertes par les cartes des glaces du SCG sont considérables et qu'il faut se rappeler qu'il n'existe aucune méthode de détection des glaces offrant un taux d'exactitude de 100 %, il est raisonnable de présumer que certains petits fragments de glace ou quantités à l'état de traces passent inaperçus.

## 7.2 FRÉQUENCE DES GLACES

La fréquence des glaces dans une région peut être présentée de nombreuses façons, chacune avec ses mérites et ses lacunes. Dans le présent rapport, elle est présentée de quatre façons :

- le pourcentage de couverture d'une zone d'intérêt
- le nombre de semaines avec de la glace,
- le pourcentage de jours avec de la glace,
- la série chronologique des glaces de la banquise

Sauf pour la série chronologique des glaces de la banquise, la fréquence des glaces a été analysée suivant les quatre seuils de concentration dont il est question à la section 7.1.6.2.

### **7.2.1 Pourcentage de couverture**

La probabilité de rencontrer de la glace en un endroit d'une zone d'intérêt correspond au pourcentage de cette zone recouverte de glace. Le pourcentage de couverture est calculé pour chacun des quatre seuils établis à la section 7.1.6.2. Avec les données sur la concentration des glaces de mer disponibles sur une grille de 2,5 km x 2,5 km, la zone d'intérêt est suivie uniformément du nord au sud et d'est en ouest et le pourcentage d'une zone d'intérêt couverte de glace correspond en pourcentage de points de donnée dans cette région pour laquelle la glace se trouve dans des concentrations supérieures ou égales aux seuils indiqués.

À partir des données interpolées sur la concentration, le nombre de points dans chaque zone d'intérêt pour lesquelles la concentration de glace est égale ou supérieure aux quatre seuils a été consigné pour chaque jour et chaque année de la période considérée. Le pourcentage de glace dans la zone d'intérêt correspond alors au nombre de points avec de la glace divisé par le nombre de points dans la zone d'intérêt, ce qui donne des pourcentages journaliers pour chaque année. Le pourcentage de couverture de chaque zone d'intérêt est ensuite présenté comme un pourcentage de couverture moyen et maximum pour chaque période. Un exemple du pourcentage moyen et maximum de couverture de glace est présenté ci-après dans la Figure 37 et la Figure 38, respectivement.

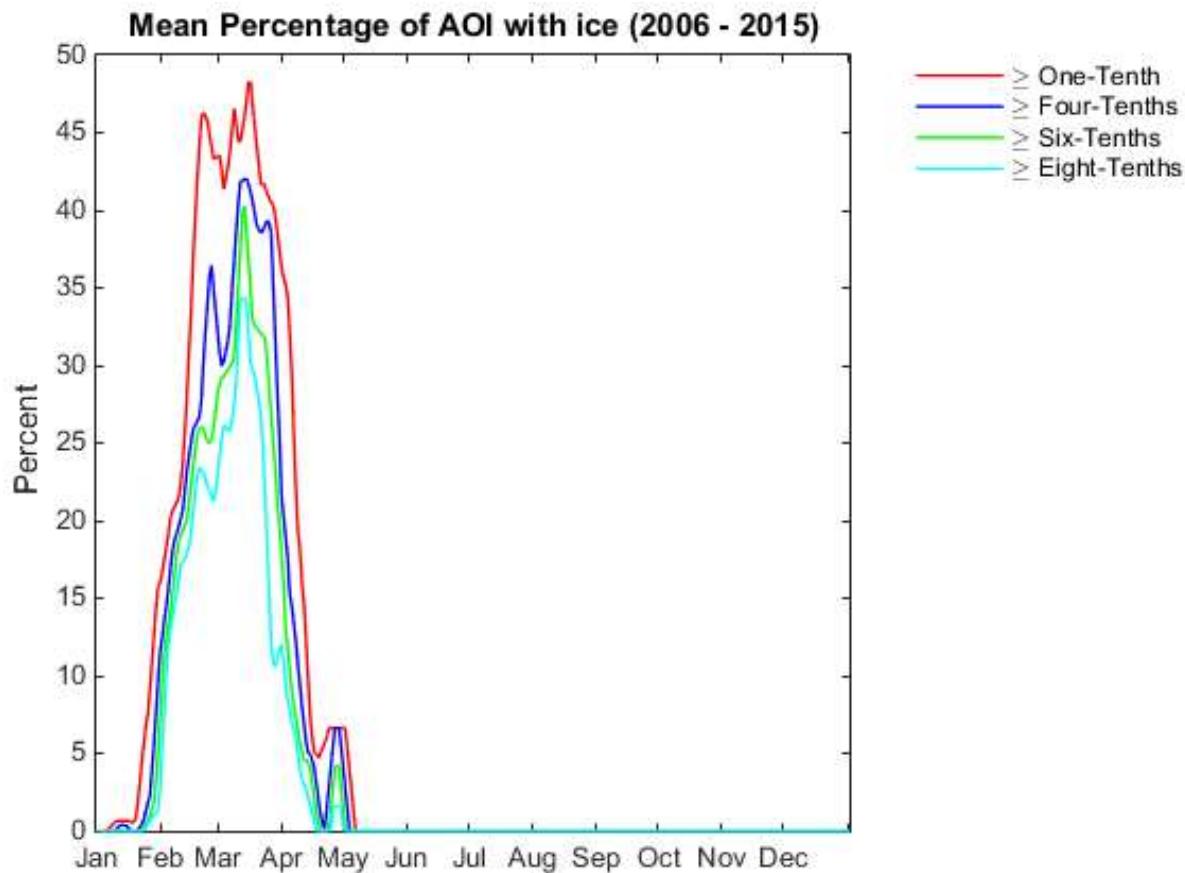


Figure 37. Exemple de pourcentage moyen de couverture de la zone d'intérêt par de la glace (2006-2015)

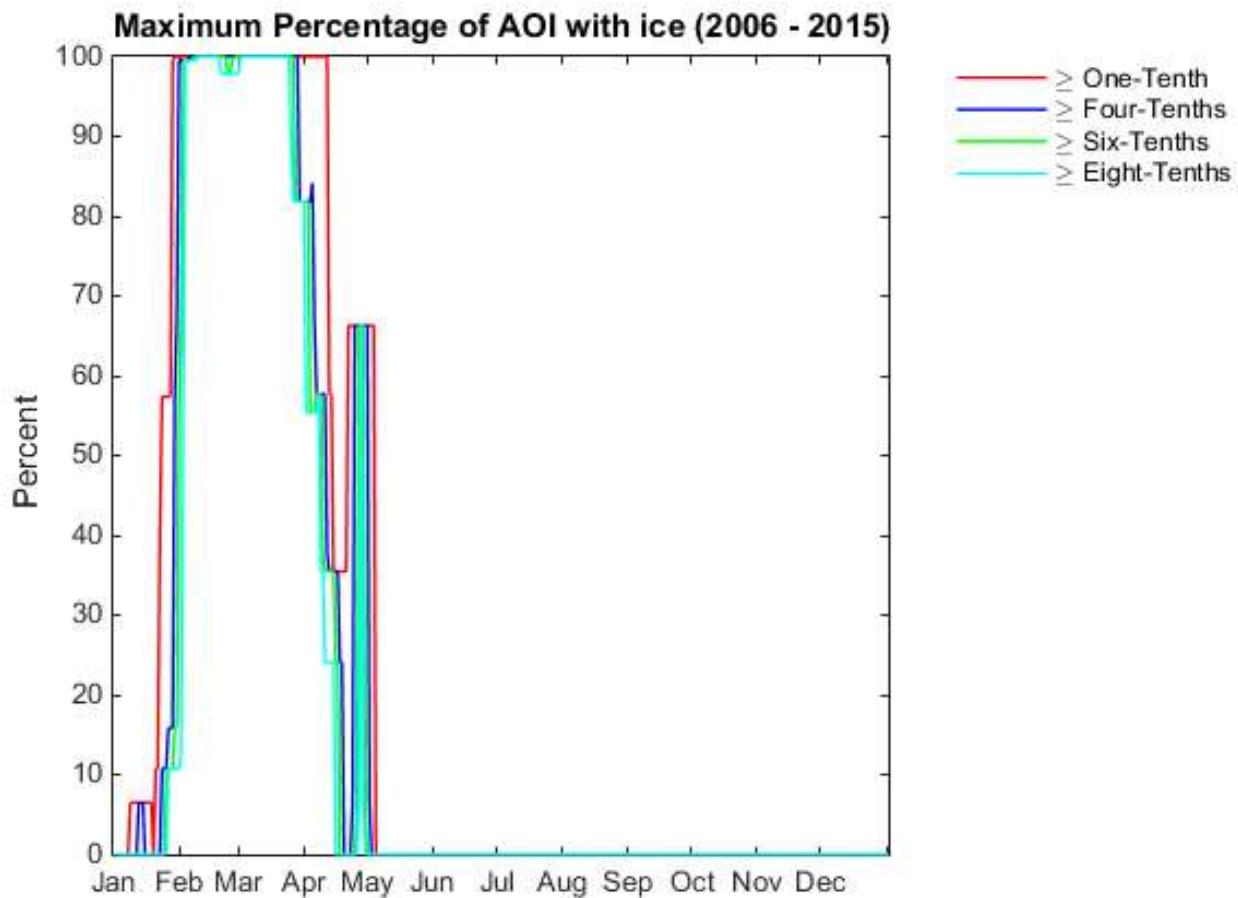


Figure 38. Exemple de pourcentage maximal de couverture de la zone d'intérêt par de la glace (2006-2015)

### 7.2.2 Nombre de jours avec de la glace

Le nombre de jours avec de la glace a été établi annuellement et mensuellement pour la zone d'intérêt, sur les trois périodes et aux quatre seuils de concentration précités. Les valeurs interpolées de la concentration de glace ont servi à produire les valeurs de concentration journalières dans toute la zone d'intérêt. Le nombre de jours au cours desquels la glace dépasse chacun des quatre seuils a été consigné mensuellement et annuellement pour chaque décennie. Un exemple du nombre annuel de semaines/de jours avec de la glace est donné ci-après à la Figure 39. Les données de la Figure 39 présentent la moyenne, le maximum, le 90<sup>e</sup> (P90), le 50<sup>e</sup> (P50) et le 10<sup>e</sup> (P10) percentiles du nombre de jours/semaines avec de la glace. Les graphiques annuels présentent les semaines avec de la glace. Les figures indiquant le nombre de jours par mois avec de la glace pour les mois de janvier à mai se trouvent à l'annexe C, les mois de juin à décembre n'étant pas inclus parce qu'il n'y a pas de glace.

Les calculs des percentiles sont exécutés à partir d'un système de classement indexé. Les données à partir desquelles le percentile doit être acquis sont d'abord classées par ordre ascendant, puis les percentiles P10, P50 et P90 sont extraits selon leur position dans les données classées. Les calculs des percentiles dans le présent rapport sont tous faits pour des données sur 10 ans, ce qui signifie que chaque variable à laquelle doit être affecté un percentile compte 10 points de données. Par conséquent, avec 10 points de données, la valeur P10 serait la deuxième (2<sup>e</sup>) valeur dans l'index trié, la valeur P50, la cinquième (5<sup>e</sup>) et la valeur P90, la neuvième (9<sup>e</sup>).

### **7.2.3 Pourcentage de jours avec de la glace**

Le pourcentage de jours avec de la glace est calculé annuellement et mensuellement pour chacune des trois périodes. Ce calcul a consisté à diviser le total du nombre de jours avec de la glace pour un mois et une période donnés par le nombre de jours du mois dans cette période. Par exemple, si pour le mois de mars entre 1986 et 1995, en un endroit donné, il y a eu 155 jours avec de la glace, le pourcentage de jours avec de la glace serait de 155 jours/ (31 jours en mars x 10 ans), soit 50 % de jours avec de la glace. Un exemple du pourcentage annuel de jours avec de la glace est donné à la Figure 40 , et présente le pourcentage de jours avec de la glace supérieur ou égal à un dixième, à quatre dixièmes, à six dixièmes et à huit dixièmes. Les figures indiquant les pourcentages mensuels de jours avec de la glace pour les mois de janvier à mai se trouvent à l'annexe D, les mois de juin à décembre étant exclus, parce qu'il n'y a pas de glace.

### **7.2.4 Série chronologique de la concentration de glace**

Une série chronologique des concentrations moyennes maximales de glace de la banquise dans la zone d'intérêt sur la période de 30 ans est présentée ci-après à la Figure 41 et à la Figure 42, respectivement. Les concentrations présentées à la Figure 41 et à la Figure 42 visent à être représentatives de toute la zone d'intérêt et sont calculées journallement pour chaque année de la période de 30 ans. À la Figure 41, les concentrations moyennes représentent la moyenne de tous les points situés dans la zone d'intérêt d'une concentration supérieure ou égale à un dixième. À la Figure 42, les valeurs représentent la concentration maximale présente dans tous les points de la zone d'intérêt. Ces graphiques des séries chronologiques donnent un bref aperçu des conditions glaciales dans toute la zone d'intérêt et de la façon dont ces conditions ont évolué sur la période de 30 ans.

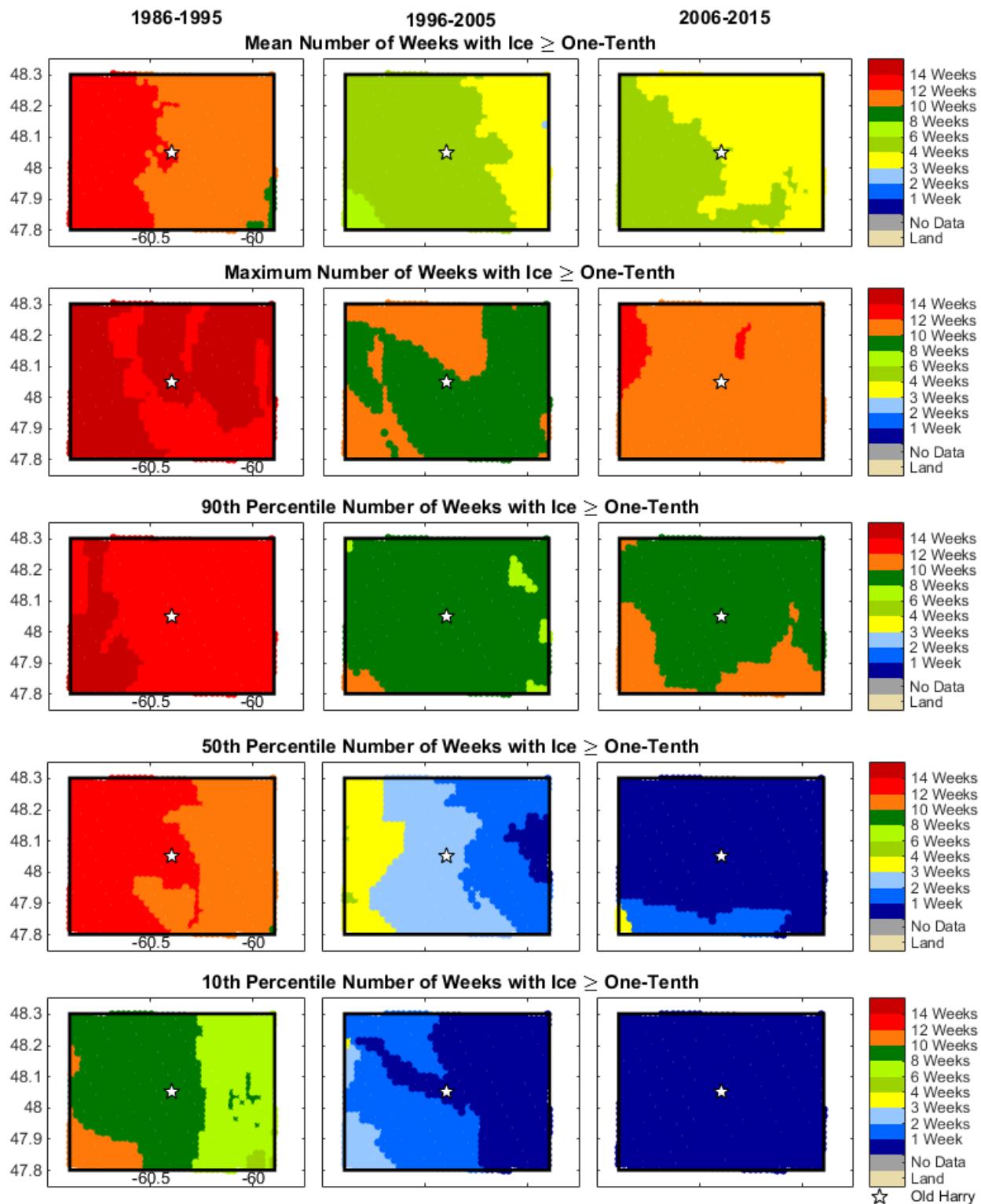


Figure 39. Exemple du nombre annuel de semaines avec de la glace

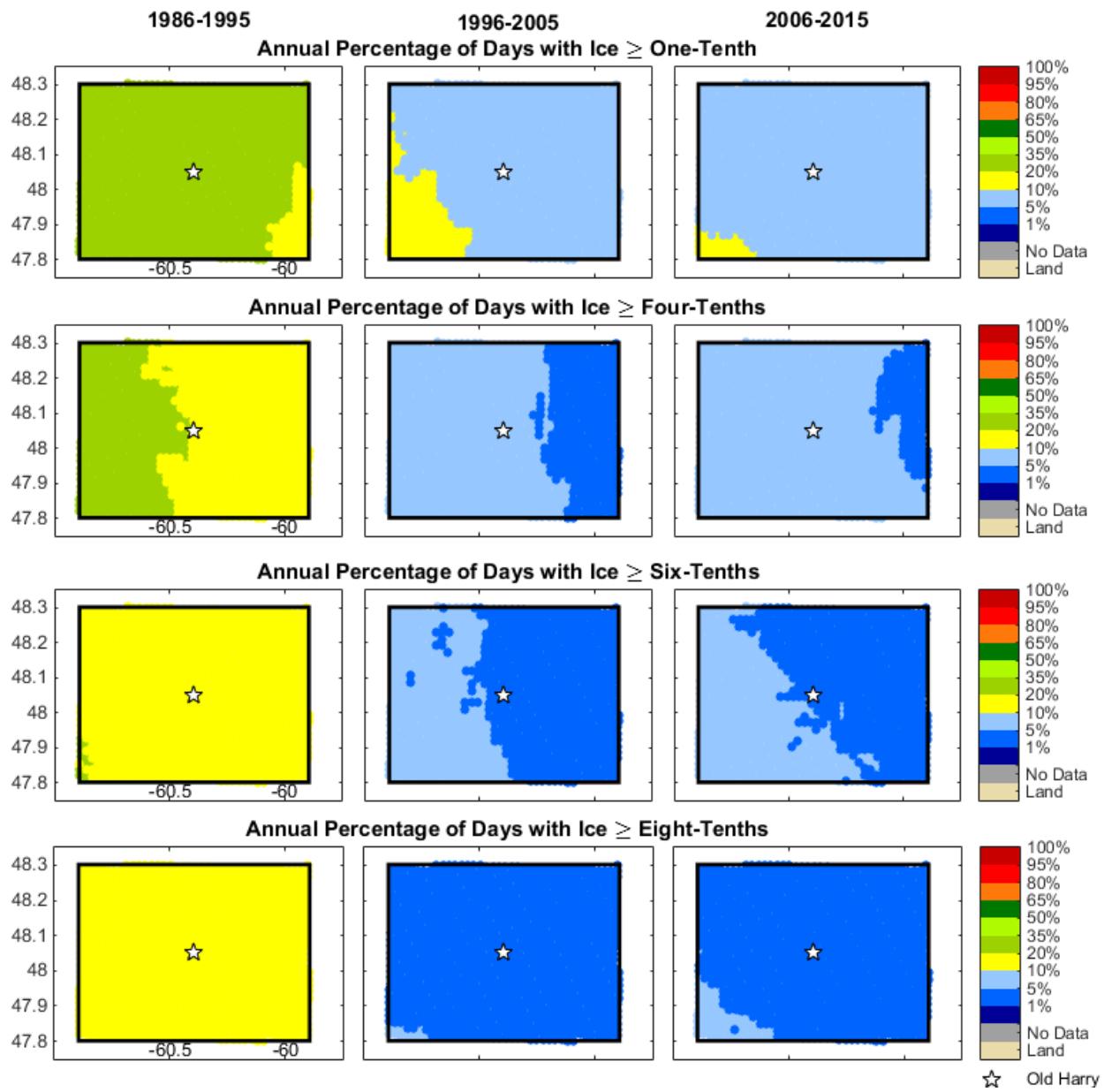


Figure 40. Exemple du pourcentage annuel de jours avec de la glace

### Mean Sea Ice Concentration (when present)

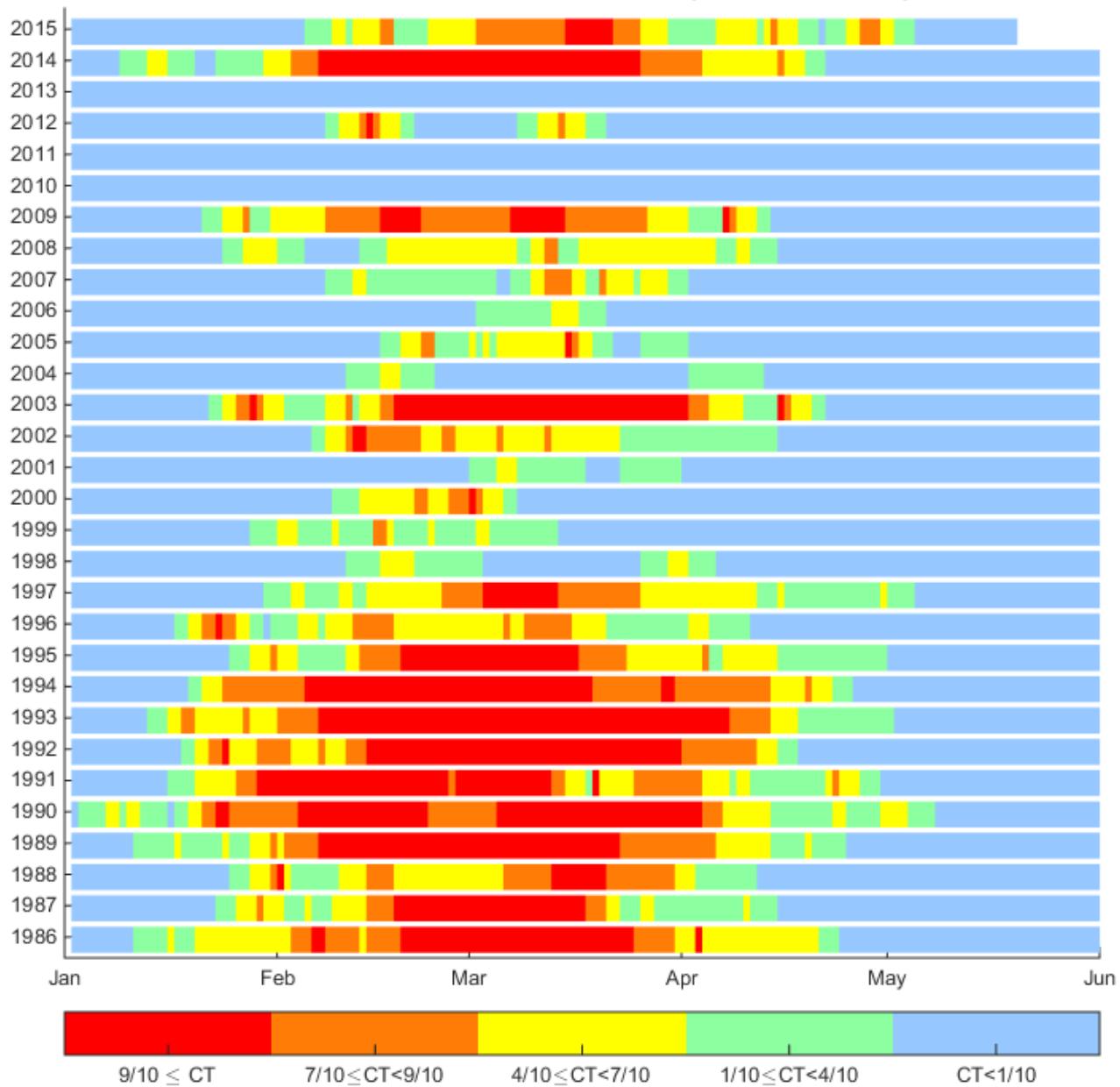


Figure 41. Série chronologique de la concentration moyenne de glace

### Maximum Sea Ice Concentration

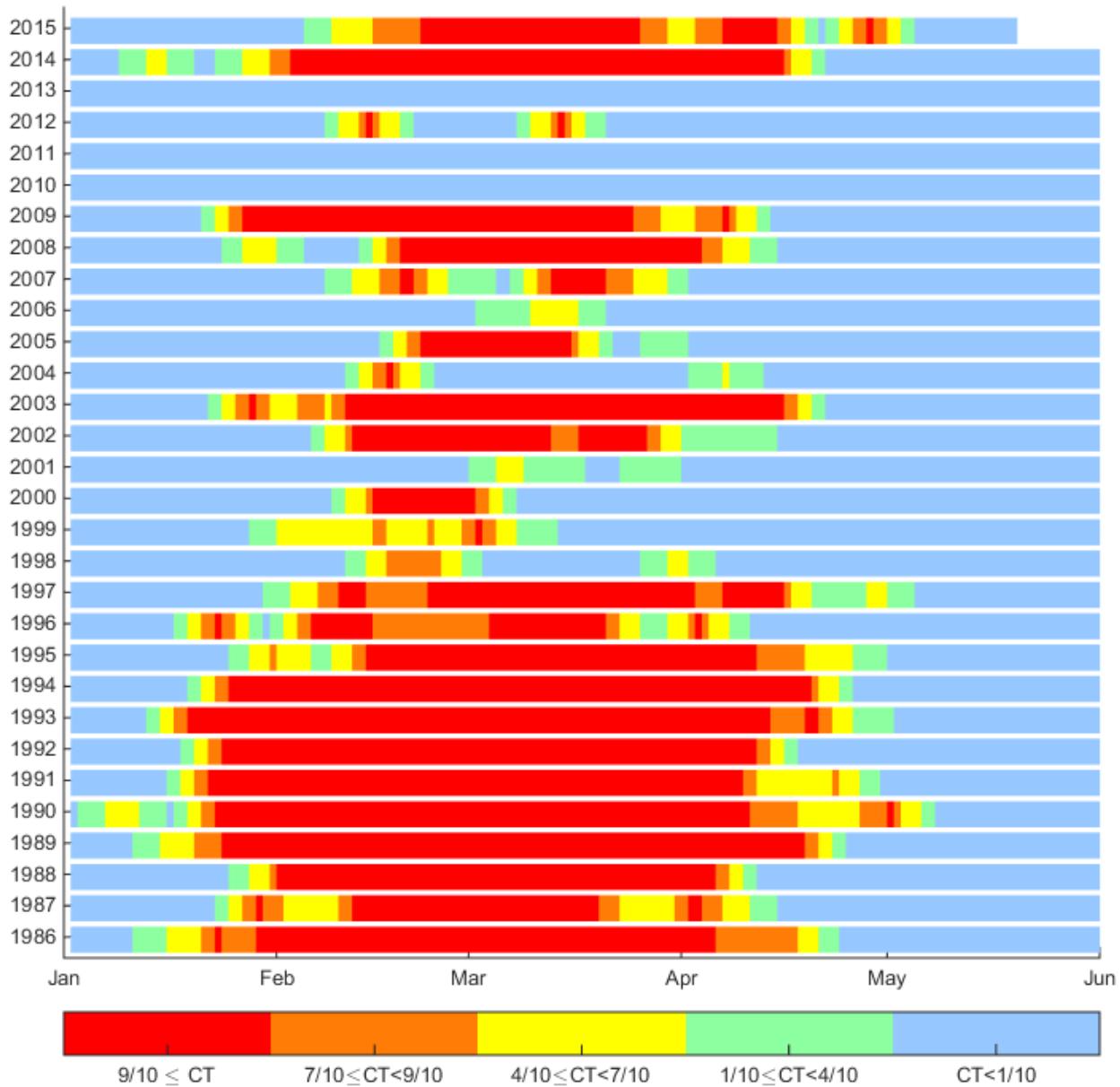


Figure 42. Série chronologique de la concentration maximale de glace

### 7.3 CONCENTRATION DE GLACE DE BANQUISE

La concentration de glace de banquise dans la zone d'intérêt sera présentée sous deux formes : la concentration annuelle et la concentration mensuelle lorsque la glace est présente. La méthode de calcul de la concentration de glace lorsqu'elle est présente ne tient compte que des concentrations supérieures ou égales à un dixième. Cette méthode permet de présenter les concentrations pertinentes, en particulier dans les régions où la présence de glace est faible.

À l'aide des concentrations interpolées, la concentration de glace de mer à chaque point de données dans la zone d'intérêt a été enregistrée journallement pendant chacune des trois décennies. Ces données ont ensuite été analysées mensuellement et annuellement, pour calculer les concentrations moyennes, maximales, P90, P50 et P10 pour chaque point de données. Les percentiles ont été calculés selon la méthode de classement indexé décrite à la section 7.2.2. Les concentrations annuelles sont présentées à la Figure 43 ci-après, les figures contenant la concentration mensuelle lorsque la glace était présente pour les mois de janvier à mai se trouvent à l'annexe E, les mois de juin à décembre étant exclus parce qu'il n'y avait pas de glace.

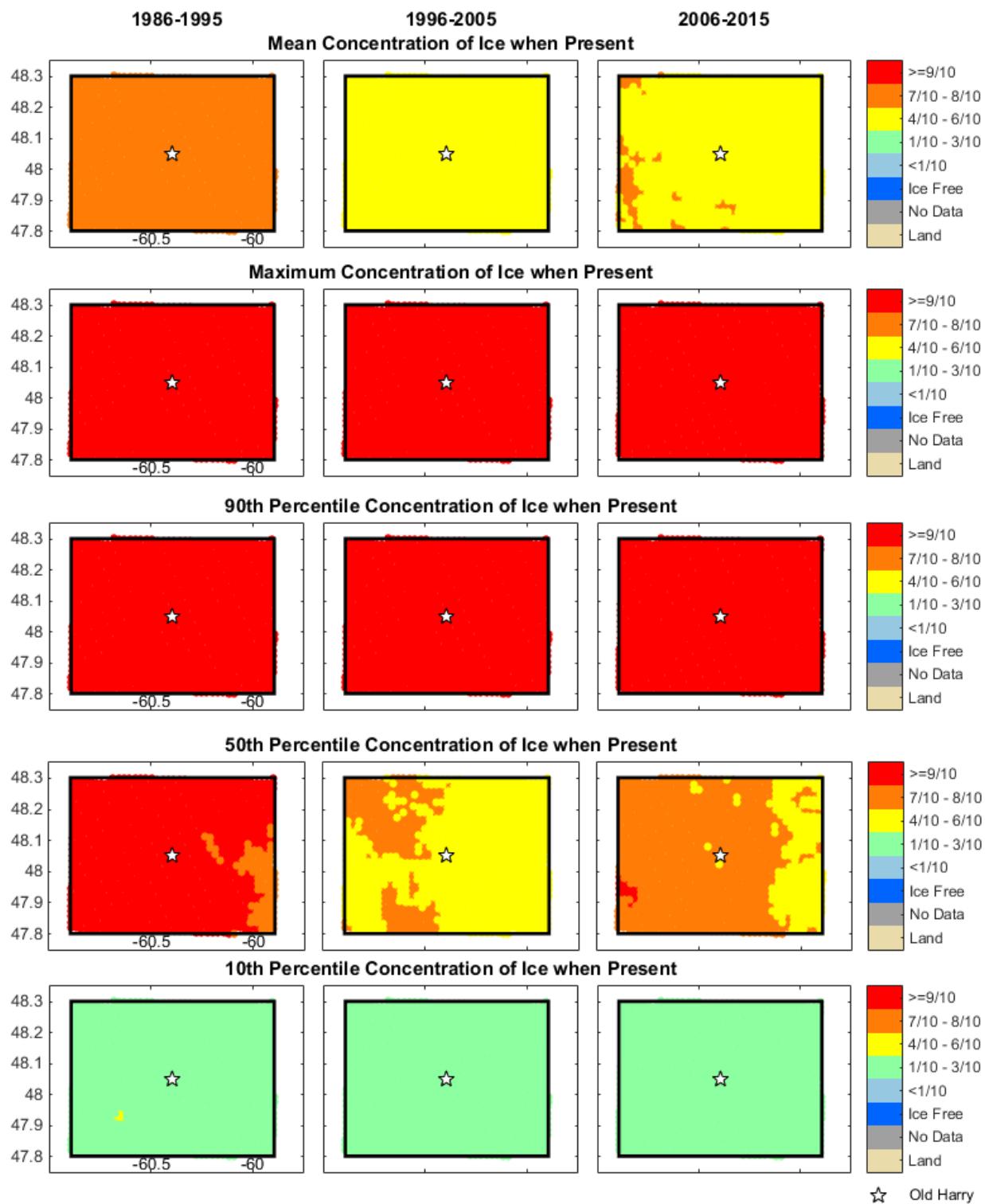


Figure 43. Concentration annuelle de glace lorsque celle-ci est présente

## 7.4 CLASSIFICATION DES GLACES

La classification des glaces de la banquise se fait généralement suivant les 14 types de glace dont il est question à la section 7.1.6.1 et présentés au Tableau 15. Pour les besoins de la présente étude, les 14 catégories de glace du SCG ont été ramenées à neuf (9) catégories, présentées dans le Tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16. Comparaison entre les types de glace retenus et ceux du SCG

	Type de glace	Type de glace du SCG
Léger	Inconnu <1/10	
	Nouvelle glace	Nouvelle glace
		Nilas, glace vitrée
	Glace blanchâtre	Jeune glace
	Glace grise	Glace grise
	Glace blanchâtre	Glace blanchâtre
	Sarrasin	Glace de première année
	Glace mince de première année	Glace mince de première année
		Glace mince de première année – premier stade
		Glace de première année – deuxième stade
	Glace moyenne de première année	Glace moyenne de première année
	Glace épaisse de première année	Glace épaisse de première année
Lourd	Vieille glace	Vieille glace
		Glace de deuxième année
		Glace de plusieurs années

Le type « Inconnu <1/10 » n'existe pas dans la classification type des glaces du SCG. La classification du SCG comprend cependant l'« eau bergée », soit les eaux dans lesquelles des fragments d'iceberg ont été repérés. La catégorie « Inconnu <1/10 » englobe l'« eau bergée ». La « glace blanchâtre » comprend à la fois la « glace blanchâtre » et la « jeune glace » figurant dans les catégories du SCG, mais la catégorie « jeune glace » est rarement utilisée par le SCG, si toutefois elle l'est. Le « sarrasin » est une catégorie de glace qui ne figure pas dans la liste du SCG; cependant, une étude de l'existence de la glace « de première année » dans la classification

du SCG a révélé que cette catégorie ne figurait que lorsque des sarrasins étaient présents. C'est la raison pour laquelle la « glace de première année » a été rebaptisée « sarrasin ». La glace mince de première année – premier et deuxième stades a été regroupée dans la catégorie « Glace mince de première année », la catégorie premier et deuxième stades étant rarement utilisée, si toutefois elle l'est. Les catégories « vieille glace », « glace de deuxième année » et « glace de plusieurs années » ont été regroupées dans la catégorie « vieille glace ».

Bien que d'un point de vue technique ce ne soit pas une catégorie de glace, la catégorie « sans glace » a été ajoutée pour aider à faire la distinction entre les régions où il n'y avait pas de glace et celles pour lesquelles il n'existe pas de données. Les catégories « sans glace » et « inconnu <1/10 » ne sont utilisées que lorsqu'il n'en existe pas d'autres.

La représentation de la classification des glaces de mer a fait appel à deux critères : la glace dominante et la glace la plus épaisse. Les deux critères sont expliqués séparément dans les sections qui suivent.

#### **7.4.1 Type de glace prédominant**

Le type de glace prédominant désigne le type de glace dont la concentration est la plus importante. La sélection d'un type de glace prédominant se fait sans égard à la classification glaces, sauf lorsque la catégorie désigne une zone « sans glace » ou « inconnu <1/10 », auquel cas il convient de sélectionner la catégorie supérieure présente qui est la plus importante. De la même façon, la catégorie « inconnu <1/10 » l'emporte sur la catégorie « sans glace » en de toute autre catégorie. La seule autre exception à l'utilisation de la classification des glaces se présente pour sélectionner un type de glace prédominant lorsque deux types de glace sont présents à la même concentration, auquel cas c'est le type de glace le plus épais qui est sélectionné. Un exemple de la répartition des types de glace prédominants et le plus épais figure au

Tableau 17.

Tableau 17. Exemple de répartition de la glace prédominante et de la glace la plus épaisse

Couverture partielle	Carte 1		Carte 2		Carte 3		Carte 4							
	Type	CT	Type	CT	Type	CT	Type	CT						
Partielle (A)	Moyenne	5	Épaisse	1	Nouvelle	1	Moyenne	3						
Partielle (B)	Mince	4	Moyenne	1	IN	0,3	Mince	6						
Partielle (C)	EL	1	Mince	8	EL	9	Grise	1						
Glace prédominante	Moyenne		Mince		Nouvelle		Mince							
Glace la plus épaisse	Moyenne		Épaisse		Nouvelle		Moyenne							
EL – Eau libre														
GB- Glace blanchâtre														
IN- Inconnu <1/10														
Glace prédominante : la plus fréquente	Mince													
Glace prédominante : la plus épaisse	Moyenne													
Glace la plus épaisse : la plus fréquente	Moyenne													
Glace la plus épaisse : la plus épaisse	Épaisse													

Le type de glace prédominant a été déterminé à partir de données tirées directement de graphiques des glaces de mer sans interpolation. La concentration de chaque type de glace a été consignée pour chaque point de données et chaque graphique, après quoi le type de glace prédominant a été déterminé de façon indépendante pour chaque point de données et chaque graphique. Les résultats des types de glace prédominants ont ensuite été rangés en deux catégories : (1) le type de glace prédominant revenant le plus souvent au cours d'une période donnée et (2) le type de glace le plus épais prédominant ayant été enregistré au cours de cette période. Outre la détermination des types de glace prédominants revenant le plus souvent et le plus épais au cours d'une période donnée, la concentration maximale de chaque catégorie a été établie. La synthèse des types de glace prédominants a été réalisée sur une base annuelle et mensuelle. La synthèse annuelle est présentée à la Figure 44, les figures contenant les types de glace prédominants des mois de janvier à mai sont présentées à l'annexe F, les mois de juin à décembre étant exclus étant donné l'absence de glace.

#### 7.4.2 Type de glace le plus épais

Le type de glace le plus épais correspond au type de glace le plus épais ou le plus lourd en un point donné. En l'absence de glace, le type de glace le plus épais correspond à la catégorie « sans glace ».

Le type de glace le plus épais a été déterminé à partir de données tirées directement de graphiques des glaces de mer sans interpolation. La concentration de chaque type de glace a été consignée pour chaque point de données et chaque graphique, après quoi le type de glace le plus épais a été déterminé de façon indépendante pour chaque point de données et chaque graphique. Les résultats des types de glace le plus épais ont ensuite été rangés en deux catégories : (1) le type de glace le plus épais revenant le plus souvent au cours d'une période donnée et (2) le type de glace le plus épais enregistré au cours de cette période. Outre la détermination des types de glace le plus épais revenant le plus souvent et le plus épais au cours d'une période donnée, la concentration maximale de chaque catégorie a été établie. La synthèse des types de glace le plus épais a été réalisée sur une base annuelle et mensuelle. La synthèse annuelle est présentée à la Figure 44, les figures contenant les types de glace le plus épais des mois de janvier à mai sont présentées à l'annexe G, les mois de juin à décembre étant exclus étant donné l'absence de glace.

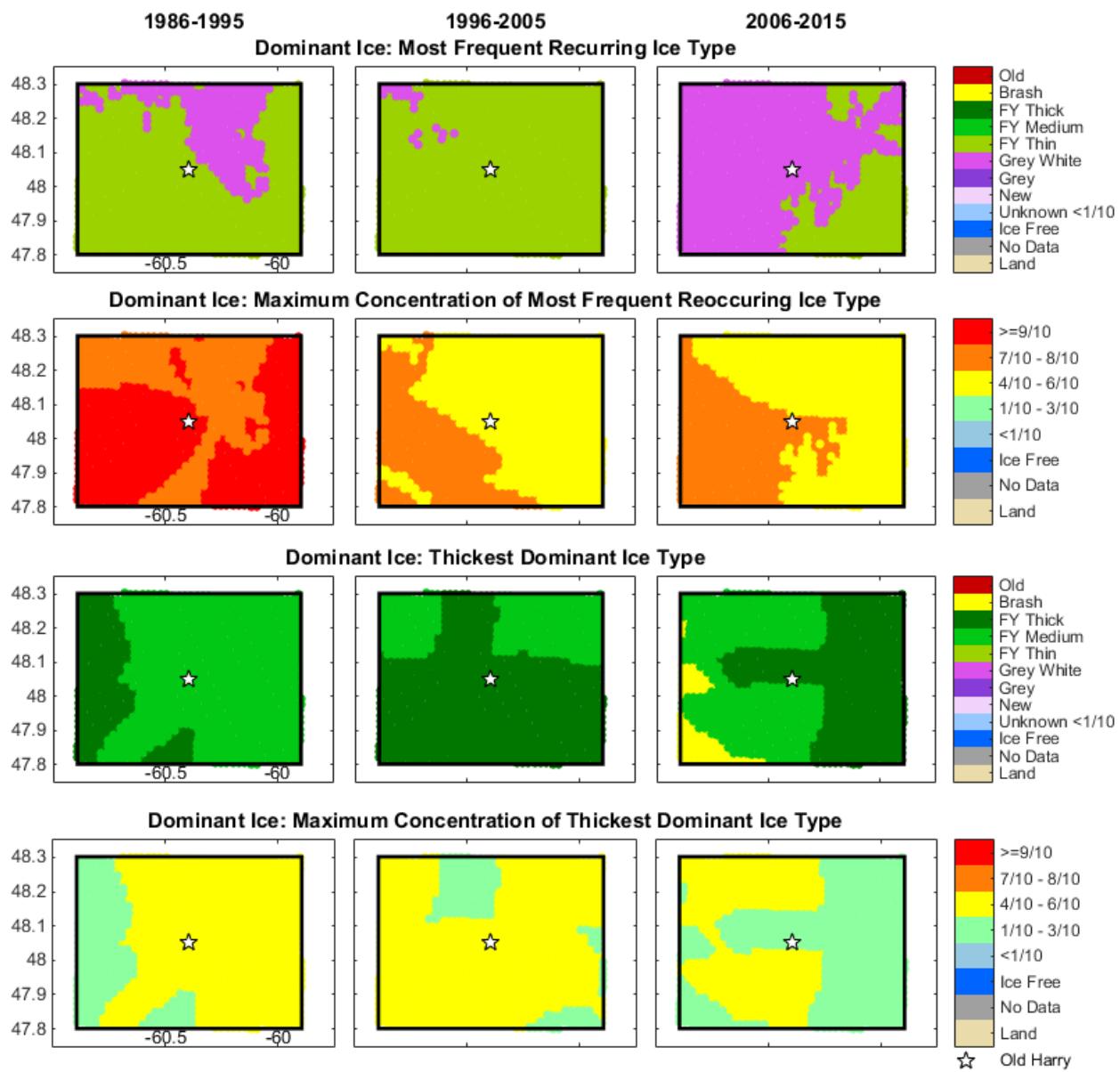


Figure 44. Type de glace prédominant sur une base annuelle

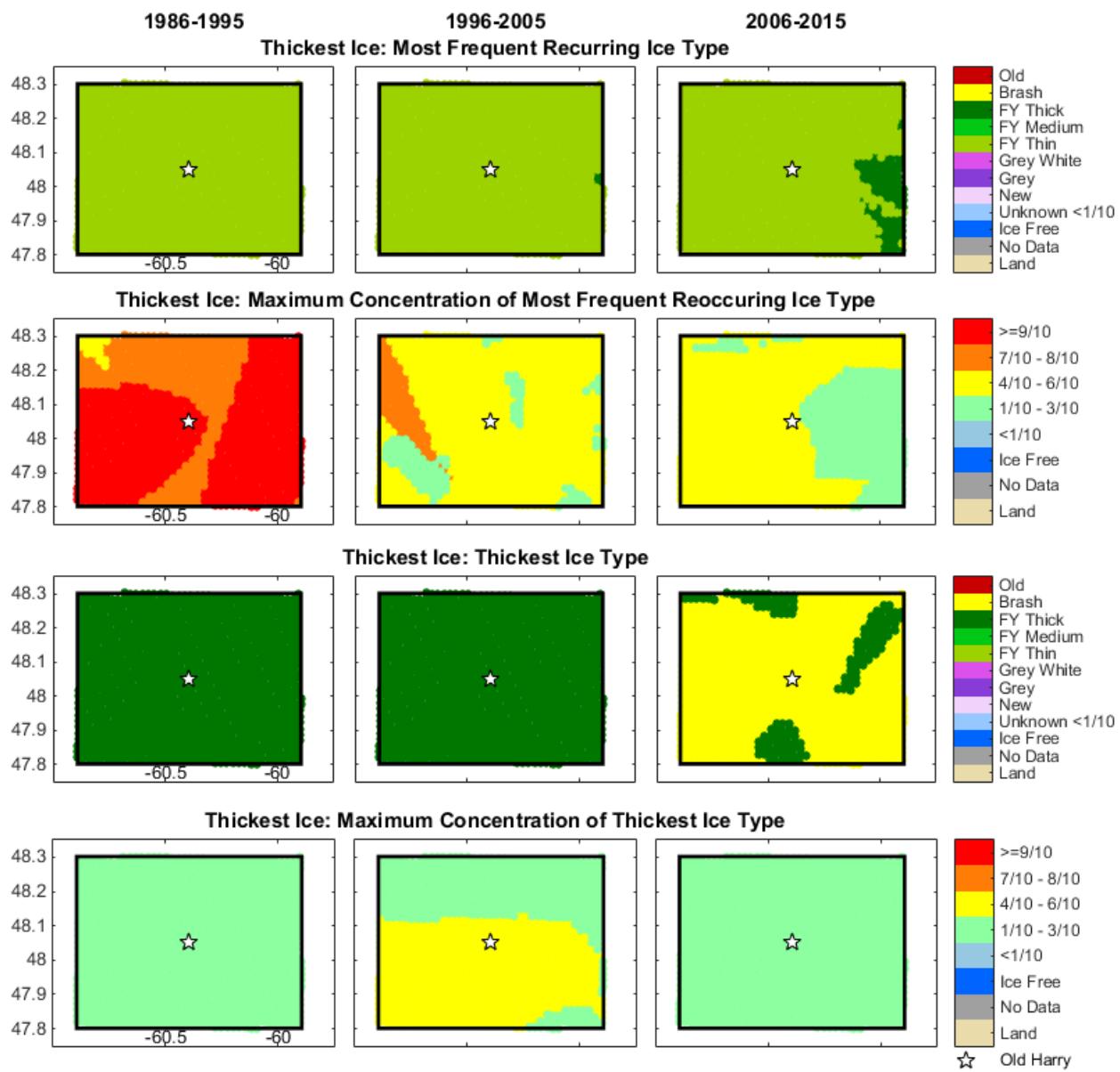


Figure 45. Type de glace le plus épais sur une base annuelle

## 7.5 ÉPAISSEUR DE LA GLACE

L'épaisseur de la glace présentée par le SCG est généralement fondée sur la classification des glaces, l'épaisseur correspondant généralement à une fourchette comprise entre une borne supérieure et inférieure, comme l'indique le Tableau 18.

Tableau 18. Plage d'épaisseur par catégorie de glace

Type de glace	Épaisseur (cm)
Nouvelle glace	<10
Glace blanchâtre	10-15
Glace grise	15-30
Glace mince de première année	30-70
Glace moyenne de première année	70-120
Glace épaisse de première année	>120
Sarrasin	-
Vieille glace	-

Les six catégories avec les plages d'épaisseur indiquées du Tableau 18 ont été regroupées en cinq nouvelles catégories d'épaisseur de la façon suivante :

- Toutes les glaces : tous les types, de la nouvelle à l'ancienne
- Épaisseur inférieure à 30 cm : nouvelle glace, glace blanchâtre et glace grise
- Épaisseur supérieure à 30 cm : glace mince, moyenne et épaisse de première année avec les sarrasins et la vieille glace
- Épaisseur supérieure à 70 cm : glace moyenne et épaisse de première année avec les sarrasins et la vieille glace
- Épaisseur supérieure à 120 cm : glace épaisse de première année, sarrasins et vieille glace

À partir de données tirées directement des graphiques de la banquise, sans interpolation, la probabilité de rencontrer les glaces de ces catégories ont été calculées sur une base annuelle et mensuelle pour chaque point de données de la zone d'intérêt, pour chacune des trois décennies. La probabilité de rencontrer ces glaces a été établie pour chaque point et chaque graphique selon la concentration de glace présente dans chacune des cinq catégories. Le Tableau 19 donne un exemple de calcul pour un point donné et quatre graphiques types; cette méthode permet de calculer la probabilité moyenne des glaces pour chaque plage d'épaisseur pour chaque point de la zone d'intérêt sur une base annuelle et mensuelle. La probabilité annuelle des glaces pour

chacune des trois décennies est présentée à la Figure 46. Les figures indiquant la probabilité mensuelle des glaces des mois de janvier à mai figurent à l'annexe H, les mois de juin à décembre étant exclus étant donné l'absence de glace.

Tableau 19. Exemple de calcul de la probabilité moyenne des glaces selon les diverses plages d'épaisseur

Couverture partielle	Carte 1		Carte 2		Carte 3		Carte 4	
	Type	CT	Type	CT	Type	CT	Type	CT
Partielle (A)	Moyenne	5	Épaisse	1	Nouvelle	1	Moyenne	3
Partielle (B)	Mince	4	Moyenne	1	IN	0,3	Mince	6
Partielle (C)	EL	1	Mince	8	EL	9	Grise	1

Pourcentage								
	Carte 1		Carte 2		Carte 3			
Toutes	0,9		1		0,1		1	0,75
<30cm	0		0		0,1		0,1	0,05
>30cm	0,9		1		0		0,9	0,7
>70cm	0,5		0,2		0		0,3	0,25
>120cm	0		0,1		0		0	0,025

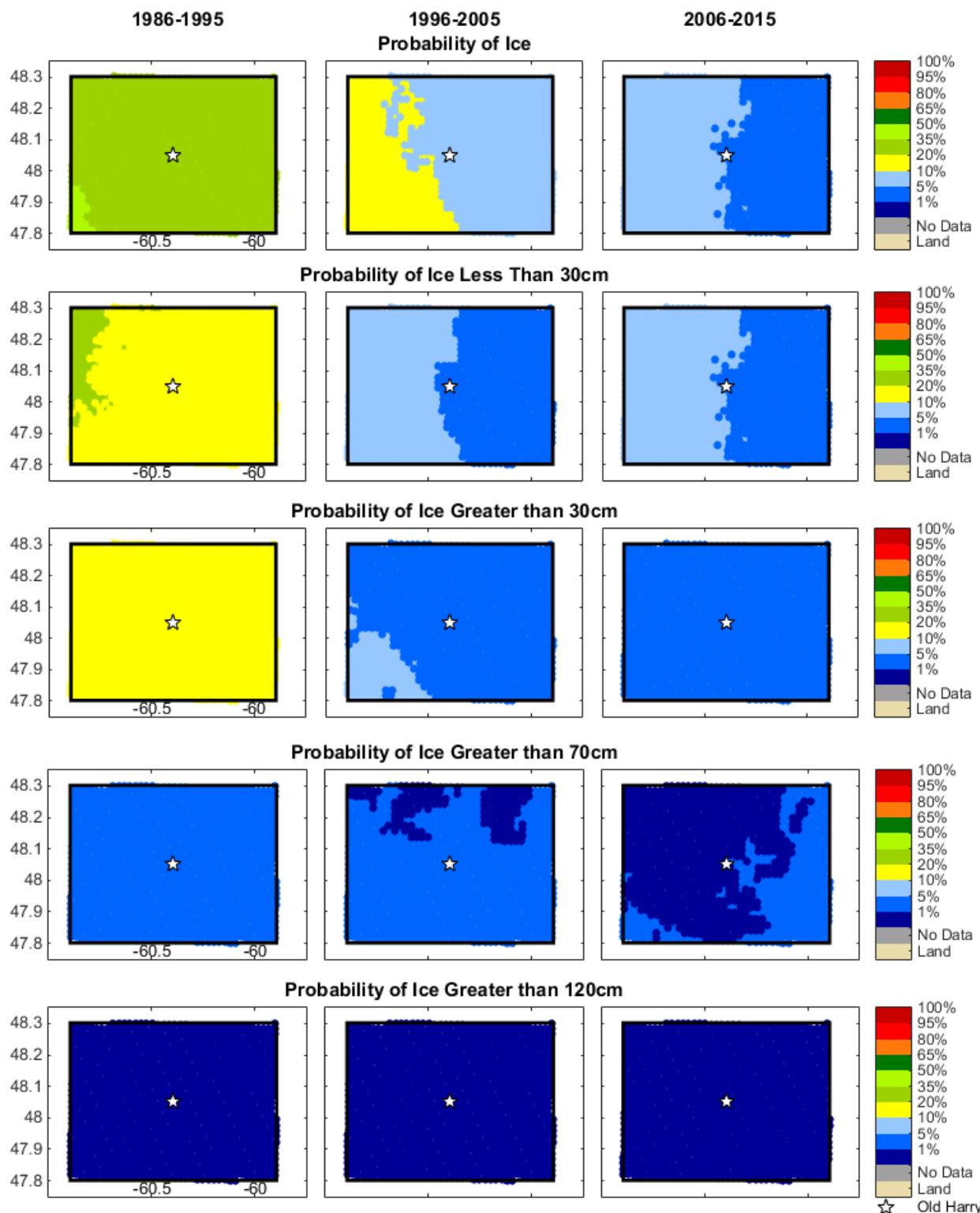


Figure 46. Probabilité annuelle de présence de glace selon son épaisseur

## 7.6 RÉSUMÉ DES CONDITIONS GLACIELLES

1986-1995 – La banquise commence à se former de la mi-janvier à la fin janvier, les concentrations moyennes de glace dépassent généralement quatre dixièmes avant la fin de janvier. Les concentrations moyennes dépassent les neuf dixièmes avant la fin de février 9 années sur 10. Le pourcentage moyen de couverture de la zone d'intérêt atteint 100 % environ de la mi-février à la mi-mars, le pourcentage de couverture minimum de 50 % étant maintenu de la fin janvier à la fin avril. Les glaces sont présentes au cours de chacune des 10 années, le nombre annuel moyen de jours avec la glace oscillant entre 75 jours et 125 jours. L'état de la banquise se dégrade rapidement à la fin de la saison, la glace étant rarement présente après la fin d'avril.

1996-2005 – La formation de la banquise au cours de la période 1996-2005 a été beaucoup moins importante que pendant la décennie 1986-1995. Il n'y a eu que trois années au cours desquelles il y avait de la glace avant le 1<sup>er</sup> février. Les concentrations maximales régulièrement supérieures à neuf dixièmes n'ont été observées que 6 années sur 10. Le pourcentage moyen de la couverture de la zone d'intérêt frôle les 60 % de la fin mars au début d'avril, le pourcentage de couverture minimum de 20 % est observé du début de février à la mi-avril. Bien que la banquise se soit formée au cours de chacune des 10 années, le nombre de jours au cours desquels il y avait de la glace a diminué fortement pour osciller entre 15 jours et 75 jours. L'état de la banquise s'est dégradé rapidement à la fin de la saison, la glace étant rarement présente après la fin d'avril.

2006-2015 – Lorsque la banquise est présente, son importance durant la décennie 2006-2015 est comparable à celle qui a été observée sur la période 1996-2005. Il n'y a que trois années au cours desquelles la glace s'est formée avant le 1<sup>er</sup> février. Les concentrations maximales régulièrement supérieures à neuf dixièmes n'ont été observées que 5 années sur 10. Le pourcentage moyen de couverture de la zone d'intérêt a varié entre 42 % et 47 % de la fin de février à la fin d'avril, le pourcentage minimum de couverture de 10 % ayant été observé du début de février à la mi-avril. La banquise a été absente de la zone d'intérêt 3 années sur 10. Cependant, le nombre moyen de jours avec de la glace est très comparable à ce qui a été observé au cours de la période 1996-2005, la moyenne ayant oscillé entre 15 jours et 57 jours. L'état de la banquise s'est dégradé rapidement à la fin de la saison, la glace étant rarement présente après la fin d'avril.

Lorsqu'il sera possible d'obtenir plus de précisions sur les activités d'exploitation, notamment les coordonnées des installations de forage et de production, des informations plus précises sur le site pourront être traitées et fournir un meilleur résumé de l'état de la banquise au lieu considéré dans la zone d'intérêt.

## 8 LES ICEBERGS

### 8.1 INTRODUCTION

Il arrive que des icebergs soient signalés dans le golfe du Saint-Laurent. La configuration générale de leur circulation dans la région est représentée à la Figure 47. Les icebergs traversent souvent le détroit de Belle-Isle entre Terre-Neuve-et-Labrador et pénètrent parfois dans les eaux proches du site Old Harry (Figure 48). Il arrive qu'un nombre important d'icebergs dérivent dans le chenal d'Avalon de part et d'autre des côtes de Terre-Neuve et longent la côte sud de cette province pour être déportés dans le détroit de Cabot (voir les exemples à la Figure 49 et à la Figure 50) où ils peuvent pénétrer dans le golfe du Saint-Laurent et se rendre par la suite au site Old Harry.

Dans le cadre du rapport de C-CORE (2005a) intitulé *Characterization of the Ice Free Season Offshore Newfoundland*, il avait été demandé aux résidents de Port-au-Port d'observer s'il y avait des icebergs dans la région, et il n'y en a eu aucun. Dans un cas, un pêcheur à la retraite (né en 1925) a déclaré n'avoir jamais vu d'iceberg aux environs de la péninsule Port-au-Port (Roy Gaudon Sr., 2005, communication personnelle), ce qui incite à penser que dans cette région les icebergs doivent être considérés comme peu fréquents.

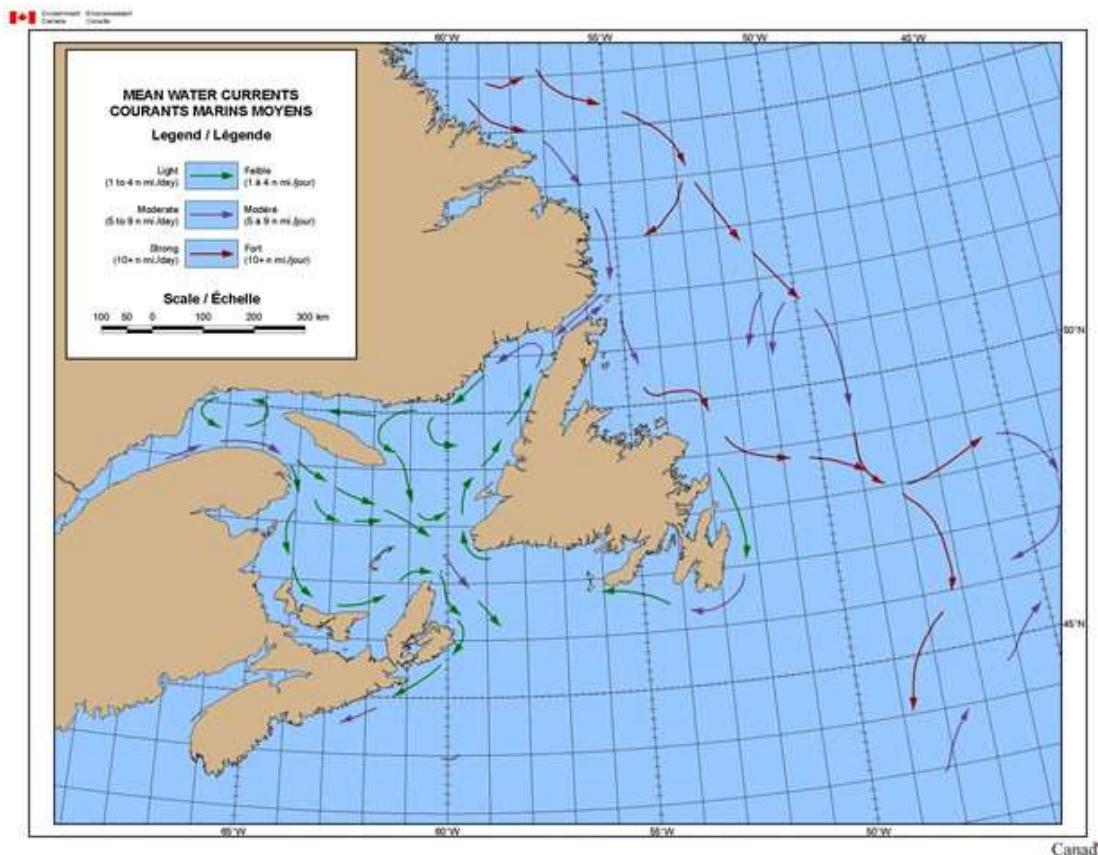


Figure 47. Courants régionaux influant sur la dérive des icebergs  
(Garde côtière canadienne, 2015)

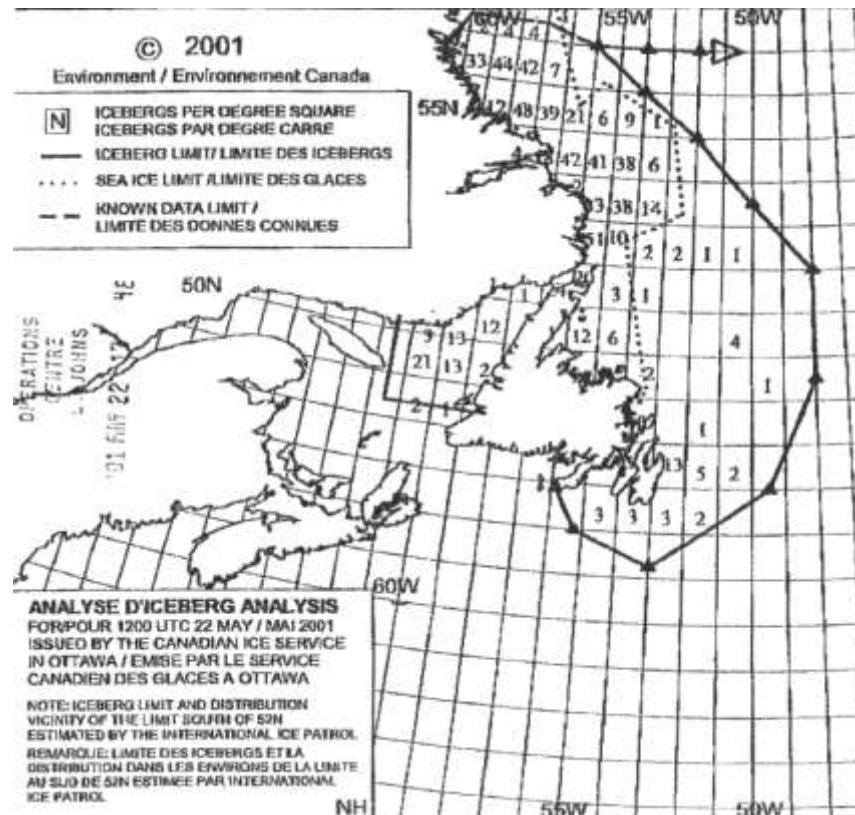


Figure 48. Carte des icebergs du Service canadien des glaces du 22 mai 2001

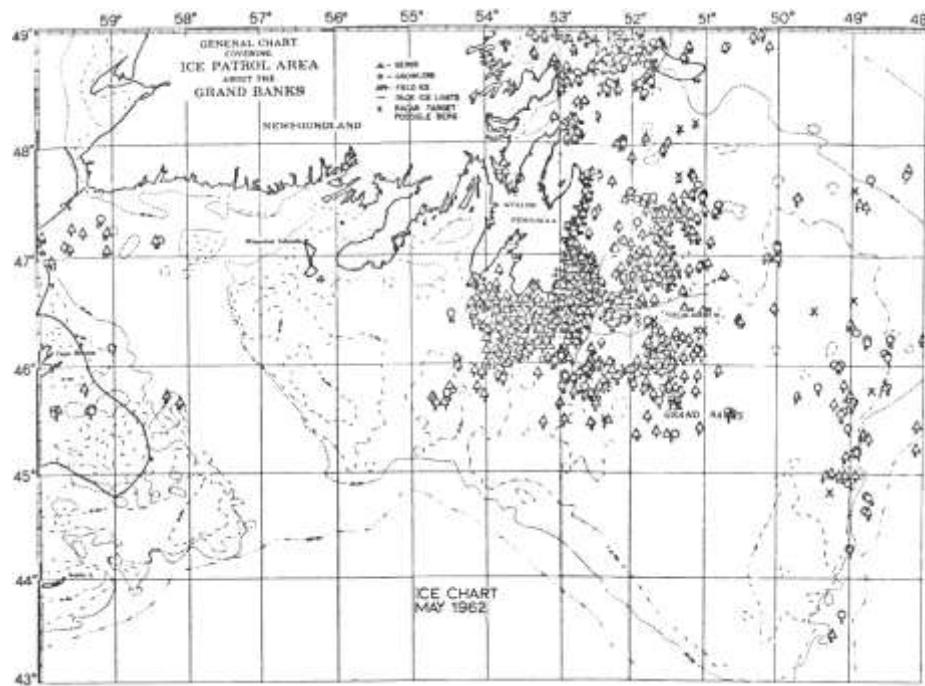


Figure 49. Carte de la Patrouille internationale des glaces, mai 1962

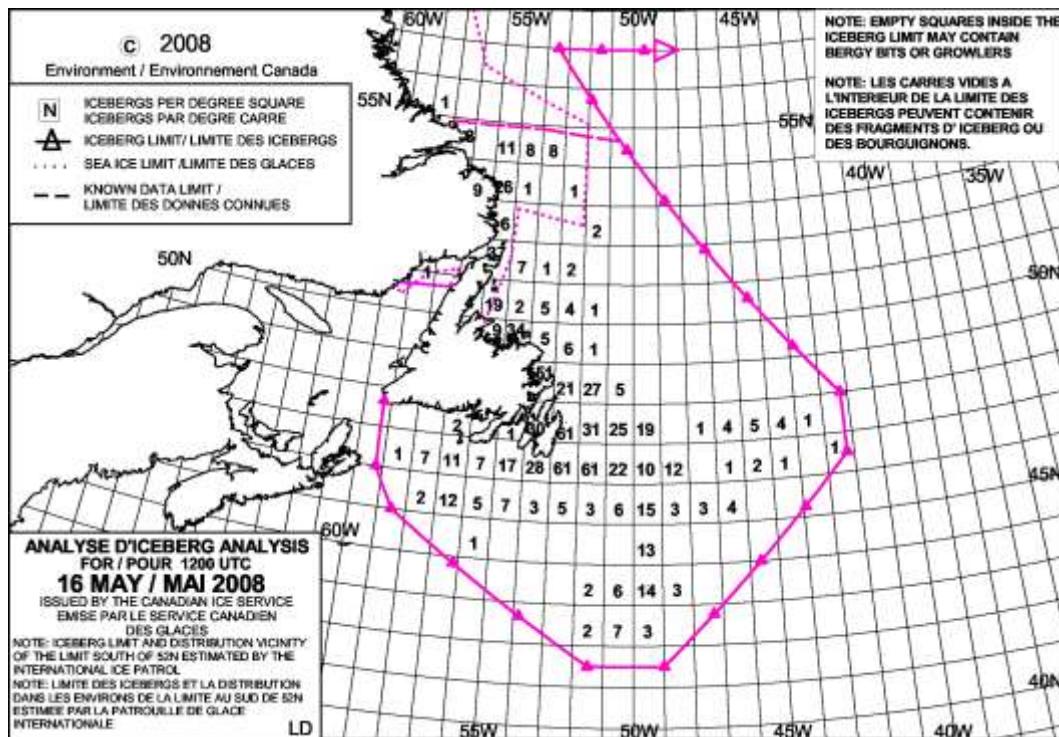


Figure 50. Carte d'analyse des icebergs du SCG du 16 mai 2008  
(à remarquer, le nombre important d'icebergs longeant la côte sud de Terre-Neuve)

## 8.2 ANALYSE DE LA BASE DE DONNÉES D'OBSERVATION DES ICEBERGS PERD (2013)

La Figure 51 présente les observations d'icebergs tirées de la base de données sur les observations d'icebergs PERD (2013). Cette base de données comprend des observations historiques qui remontent au XVII<sup>e</sup> siècle et se terminent en 2012, pour un total de 387 783 enregistrements. Elle combine des données de diverses sources comme la Patrouille internationale des glaces, le Service canadien des glaces, la surveillance et de la gestion des glaces dans le cadre d'activités de recherche, de prospection et de mise en valeur d'hydrocarbures au large des côtes, des observations de navires et de phares.

La Figure 52 représente les observations aux environs du site Old Harry. Il y a eu 24 observations d'icebergs dans un bloc mesurant 1° de longitude et 0,5° de latitude centré sur le site Old Harry. Ces observations sont résumées au

Tableau 20. Les glaces recensées sont considérées pour moitié comme des bourguignons (petits fragments d'iceberg) et le reste, à une exception près, comme de petits icebergs. L'observation la plus récente remonte à 1972. Dans les observations faites depuis 1975 (Figure 53), la plupart des icebergs observés se trouvent à l'extérieur du golfe du Saint-Laurent. Comme le montre la Figure 54, aucun iceberg se trouvant aux environs de Old Harry ne figure dans la base de données de 1975-2012, l'observation la plus proche sur cette période étant à 100 km de Old Harry. Les icebergs se trouvant près de Old Harry à la Figure 48 ne figurent pas dans la base de données PERD, ce qui porte à croire qu'il peut s'agir de positions d'icebergs modélisées. À remarquer qu'il est possible que des icebergs aient été présents sans avoir été enregistrés dans la base de données.

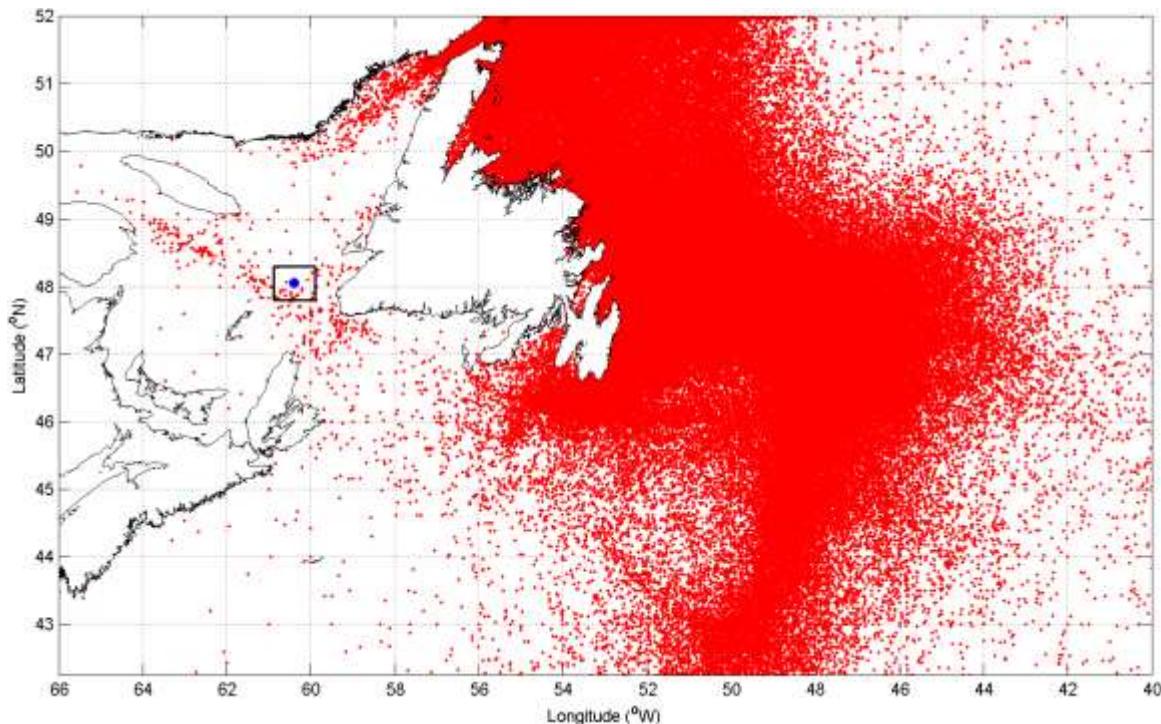


Figure 51. Observations d'icebergs tirées de la base de données sur les observations d'icebergs PERD (2013)

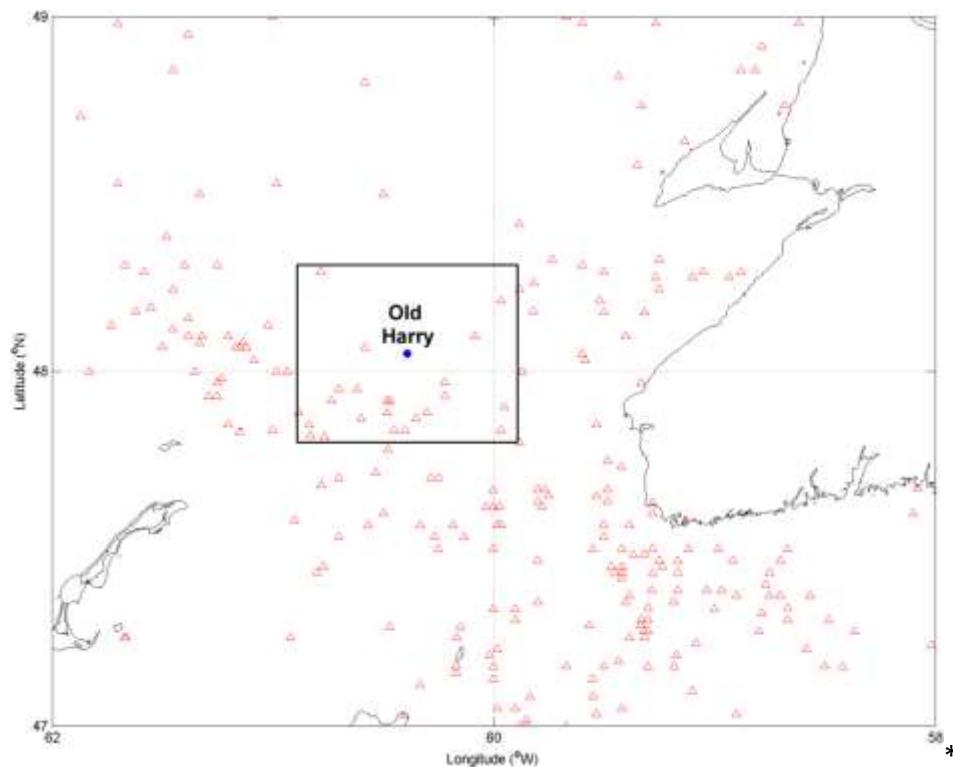


Figure 52. Observations d'icebergs tirées de la base de données PERD (2013) aux environs de Old Harry

Tableau 20. Observations d'icebergs tirées de la base de données sur l'observation d'icebergs PERD (2013) près du site Old Harry

Point d'observation	Méthode d'observation	Latitude (°N)	Longitude (°O)	Date	Taille
Navire	Visuelle	47,8167	60,7667	24/04/1930	Bourguignon
Navire	Visuelle	47,8200	60,8300	16/05/1915	Bourguignon
Divers	Inconnue	47,8330	60,4000	29/04/1960	Petite
Divers	Inconnue	47,8330	59,9670	20/04/1962	Petite
Divers	Inconnue	47,8330	59,9670	20/04/1962	Petite
Navire	Visuelle	47,8333	60,4500	24/04/1930	Bourguignon
Divers	Inconnue	47,8500	60,8330	01/05/1960	Petite
Divers	Inconnue	47,8670	60,6000	14/05/1965	Petite
Divers	Inconnue	47,8670	60,3500	28/04/1960	Petite
Divers	Inconnue	47,8830	60,8830	01/05/1960	Bourguignon
Divers	Inconnue	47,8830	60,4830	28/04/1960	Petite
Divers	Inconnue	47,8830	60,3000	31/05/1961	Bourguignon
Navire	Visuelle	47,9000	59,9500	14/04/1930	Bourguignon
Navire	Visuelle	47,9167	60,4667	23/04/1930	Bourguignon
Divers	Inconnue	47,9170	60,7330	01/05/1960	Petite
Divers	Inconnue	47,9170	60,4830	29/04/1960	Petite
Divers	Inconnue	47,9330	60,2170	18/04/1962	Grande
Divers	Inconnue	47,9500	60,7000	09/05/1960	Bourguignon
Divers	Inconnue	47,9500	60,6170	01/05/1960	Petite
Navire	Visuelle	47,9700	60,2200	25/04/1924	Bourguignon
Divers	Inconnue	48,0670	60,5830	24/04/1960	Bourguignon
Aéronef	Visuelle	48,1000	60,0830	27/04/1960	Grande
Divers	Inconnue	48,2000	59,9670	28/03/1972	Bourguignon
Divers	Inconnue	48,2830	60,7830	27/05/1961	Bourguignon

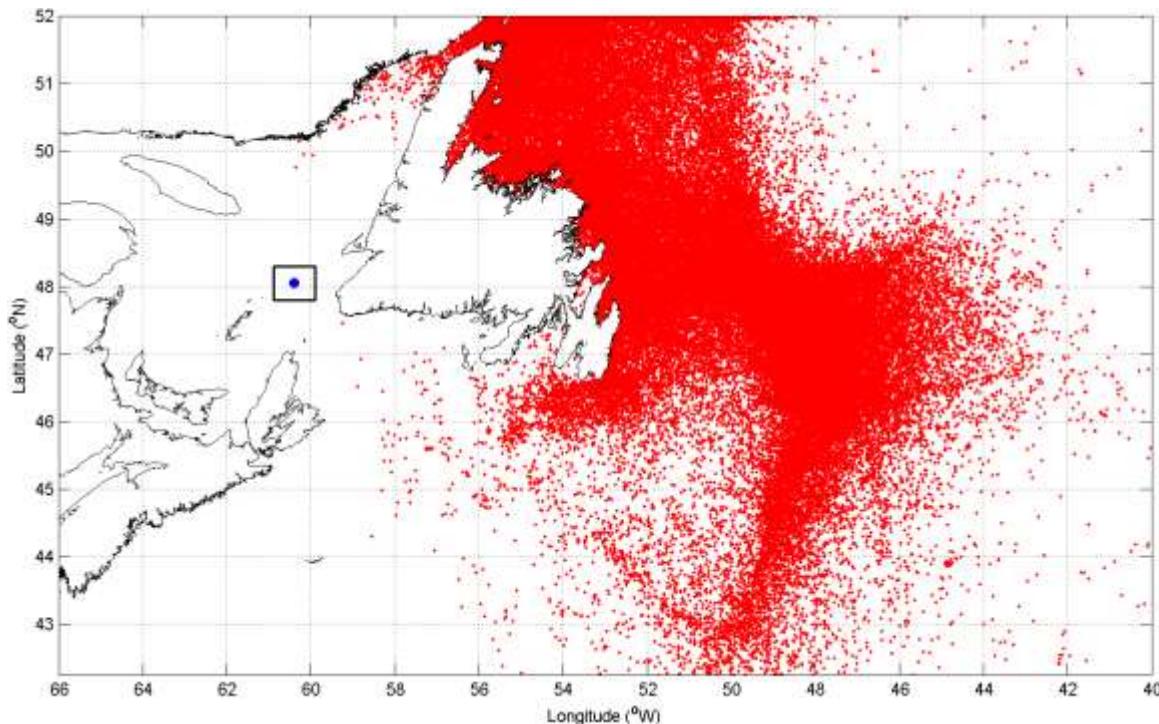


Figure 53. Observations d'icebergs tirées de la base de données sur les observations d'icebergs PERD (2013), de 1975 à 2012

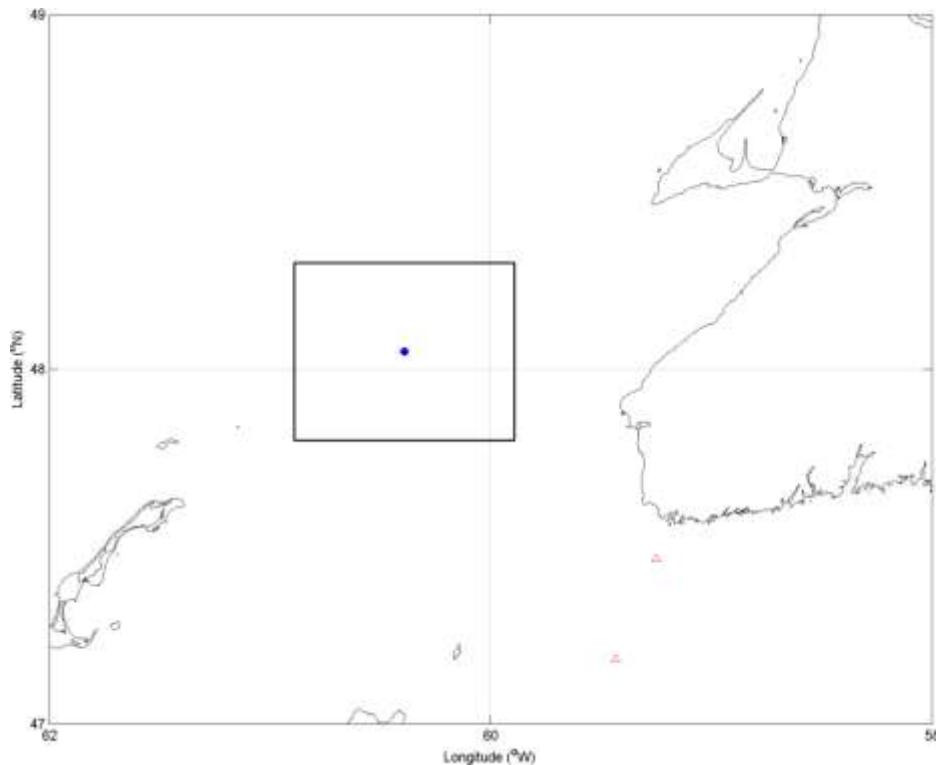


Figure 54. Observations d'icebergs tirées de la base de données PERD (2013) aux environs de Old Harry (1975-2012)

### 8.3 CONCLUSIONS

Jusqu'ici, les données disponibles sont jugées insuffisantes pour produire une estimation précise de la fréquence des icebergs au site Old Harry, mais elles sont suffisantes pour conclure qu'ils sont assez rares. Canatec (1997) a utilisé des données IIP et SCG pour calculer la fréquence des icebergs dans certaines zones au large de la côte ouest de Terre-Neuve (Figure 55) et Sandwell (1998) a utilisé ces données pour générer les charges d'impact des icebergs. À la Figure 55, dans la zone 1 (la plus rapprochée du site Old Harry), le taux d'impact annuel d'icebergs sur une structure d'un diamètre de 100 m a été estimé à 0,008 par an (période de retour de 125 ans) ou de 0,016 par an en tenant compte des bourguignons. C'est un taux estinférieur à celui observé sur une installation située dans le bassin Jeanne d'Arc (Hibernia) au large de la côte Est de Terre-Neuve par presqu'un ordre de grandeur, ce qui est considéré comme élevé (surestimation du risque). Cependant, même si le taux de contact effectif tourne autour de 0,001 par an (période de retour de 1 000 ans), en vertu du code de conception des superstructures en mer applicable (ISO 19906), il faudrait quand même tenir compte des charges d'iceberg pour toute installation qui serait aménagée au site Old Harry. Toute installation d'exploration pétrolière devrait pouvoir quitter les lieux advenant le passage d'un iceberg, en supposant qu'un programme de surveillance des icebergs approprié soit en place. Étant donné la profondeur de l'eau, toute structure de production au site Old Harry devrait être flottante et pourvue d'un dispositif de déconnexion.

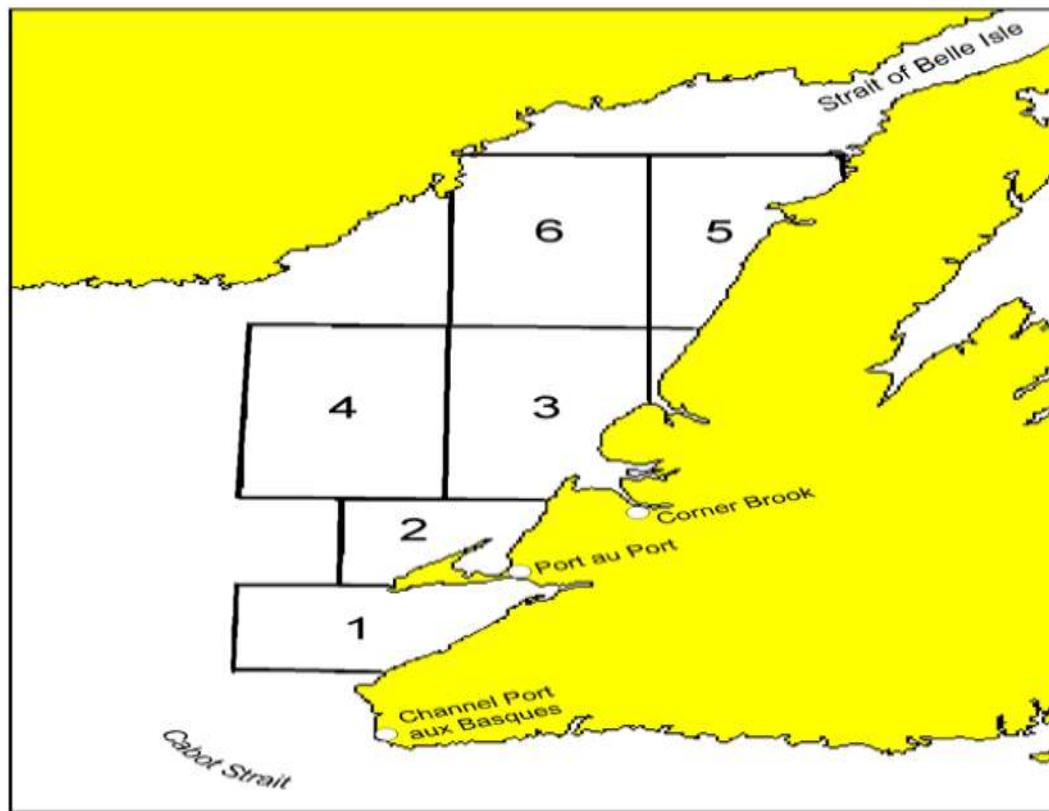


Figure 55. Zones examinées par Canatec (1997)  
pour le risque de contact d'icebergs avec des superstructures en mer

## 9 LES PROPRIÉTÉS DU FOND MARIN

### 9.1 INTRODUCTION

Le texte qui suit est un résumé de l'information géotechnique qui existe sur le prospect Old Harry dans le golfe du Saint-Laurent. Cette zone d'exploration se trouve à 48,05 N, 60,39 O, soit dans le chenal Laurentien, au nord de l'île du Cap-Breton et à peu près à mi-chemin entre les îles-de-la-Madeleine et la péninsule Port-au-Port dans la partie occidentale de Terre-Neuve, comme il est indiqué à la Figure 56.

Un examen de la documentation a été réalisé pour compiler l'information qui existe actuellement sur la bathymétrie locale, les sédiments du fond marin, la géologie du Quaternaire et les géorisques aux environs du site proposé pour Old Harry. Il existe plusieurs ressources à la Commission géologique du Canada, au Service hydrographique du Canada ainsi que plusieurs publications. Ces ressources ont permis d'établir un résumé général des conditions du fond marin qui ont été confirmées par l'étude des géorisques du bloc de permis EL 1105 réalisée par Fugro GeoSurveys Inc., au nom de Corridor Resources, en octobre 2010. Ce rapport n'a pas été rendu public. Ces conclusions cependant sont résumées dans un rapport d'évaluation environnementale du Programme de forage d'exploration du prospect Old Harry préparé par Stantec (2013) au nom de Corridor Resources.

### 9.2 BATHYMETRIE

Le prospect Old Harry est situé presque au milieu du chenal Laurentien. Ce chenal est une vallée en forme de U encastrée entre le plateau madelinien et le plateau du sud-ouest de l'île de Terre-Neuve (Stantec, 2013). La cartographie bathymétrique fournie par le Service hydrographique du Canada (Loring and Nota, 1973) fait état de pentes plongeant très progressivement depuis la surface jusqu'au fond du chenal et de bords plongeant abruptement entre le chenal et les plateaux adjacents. Cependant, les bords du chenal seraient à plus de 30 km de la zone d'exploration projetée, comme l'indique la Figure 56. La profondeur de l'eau à l'intérieur du bloc de permis varie entre 462 m et 482 m avec un pendage local du fond marin de moins de 1° (Stantec, 2013).

### 9.3 SÉDIMENTS DU FOND MARIN

Il y a consensus entre plusieurs sources voulant que l'épaisseur des sédiments dans le périmètre du prospect Old Harry soit plutôt minime en termes relatifs. Trois tills distincts ont été recensés dans le golfe du Saint-Laurent : le till supérieur, le till moyen et le till inférieur. Dans la zone étudiée pour Old Harry, le till supérieur et le till moyen ont subi une érosion avant l'accumulation de 4 à 10 m de sédiments glaciomarins et de 2 à 5 m de calcilutites meubles (Josenhans, 2007; Josenhans and Lehman, 1999; Loring and Nota, 1973). L'étude des géorisques réalisée par Fugro GeoSurveys précise que la boue marine superficielle (calcilutite) avait entre 9 et 28 m d'épaisseur, mais sans doute 15 m à l'endroit prévu pour le forage du puits (Stantec, 2013).

Les sédiments glaciomarins et les boues postglaciaires sont généralement composés à plus de 60 % d'argile, à plus de 30 % de limon et à moins de 5 % de particules de sable. Des particules grossières (galets ou roches) peuvent être présentes à l'occasion, ayant été déposées par le transport glacial (Stantec, 2013). La teneur en carbonates des sédiments postglaciaires se situerait entre 5 % et 30 % en masse (Loring and Nota, 1973). Dans la documentation, les indications de résistance au cisaillement sont très limitées. Les échantillons prélevés dans le chenal Laurentien, à l'est de l'île du Cap-Breton, présentent un profil sédimentaire comparable à celui qui est prévu à l'emplacement de Old Harry. La zone approximative d'où proviennent les échantillons prélevés est indiquée à la Figure 56. Ces échantillons étaient composés de sédiments meubles qui présentaient des résistances au cisaillement sans drainage inférieures à 10 kPa. Les boues glaciomarines présentaient une consistance un peu plus ferme, comprise entre 10 kPa et 35 kPa (résistance au cisaillement sans drainage). Les tills glaciaires avaient été fortement surconsolidés avec des résistances au cisaillement sans drainage supérieures à 100 kPa (King, 2014). Il est probable que les dépôts postglaciaires et glaciaires respectifs à Old Harry présentent des résistances au cisaillement sans drainage comparables à celles des échantillons prélevés à l'est du Cap-Breton.

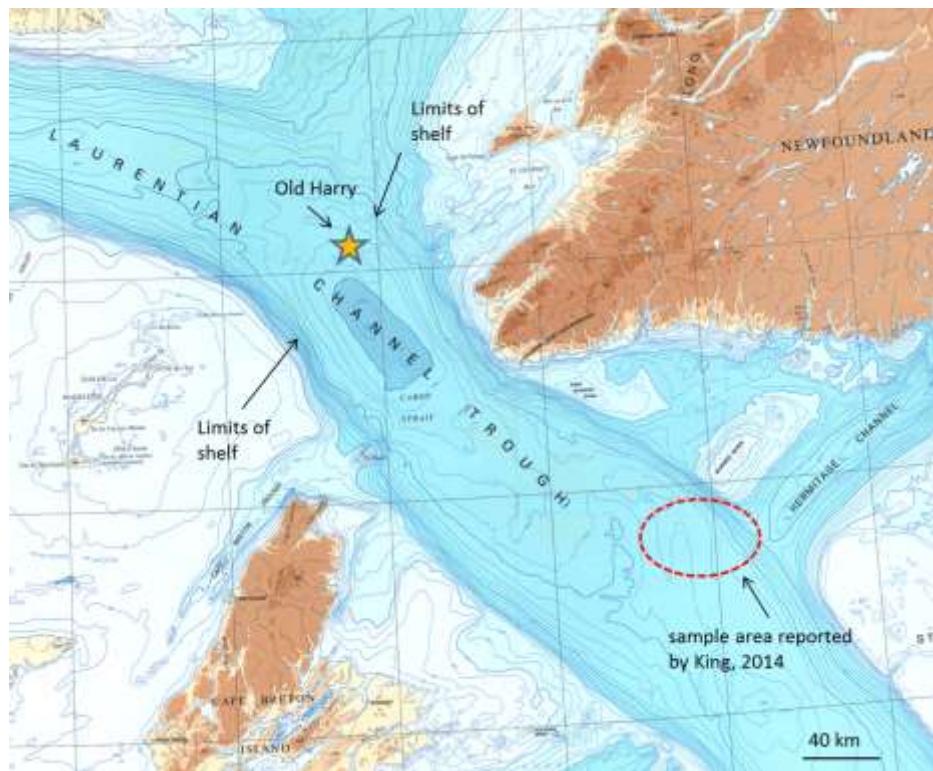


Figure 56. Position approximative du prospect Old Harry avec ses caractéristiques géotechniques

## 9.4 GÉORISQUES

Une étude des géorisques du bloc de permis EL 1105 a été réalisée par Fugro GeoSurveys Inc. au nom de Corridor Resources en octobre 2010. Cette étude a examiné plusieurs différents géorisques qui sont typiques du milieu marin comme les zones faillées, l'accumulation de gaz à faible profondeur, l'existence possible d'hydrates de gaz, divers phénomènes de pression interstitielle, la sismicité et l'instabilité du fond marin et du plateau continental. Des précisions sur chacune de ces catégories figurent dans l'évaluation environnementale préparée par Stantec (2013). Les points saillants du rapport sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

### 9.4.1 *Phénomène de pression interstitielle*

Des marques d'échappement ont été repérées dans toute la zone étudiée, dont les dimensions types étaient de 50 m de largeur sur 100 m longueur. Ces marques sont causées par l'expulsion d'eau ou de gaz des sédiments profonds et peuvent indiquer la présence de gaz ou d'hydrates de gaz qui se sont accumulés à faible profondeur avec un risque accru d'instabilité des talus. Bien que le risque localisé d'accumulation de gaz à faible profondeur ne puisse pas être exclu entièrement, l'étude géophysique n'a pas relevé la présence d'une zone de gaz en surpression près du forage projeté du puits. En outre, les sédiments sur le site projeté du forage du puits Old Harry sont composés de grains fins et ne présentent pas la porosité voulue pour la formation de quantités massives d'hydrates; par conséquent, la probabilité de formation d'hydrates de gaz et qu'ils restent stables sur le fond marin ou à proximité est faible (Stantec, 2013).

### 9.4.2 *Instabilité du fond marin*

L'instabilité des talus du fond marin s'observe habituellement près des régions côtières et des talus continentaux où le relief est très accidenté et soumis à des facteurs comme l'action des vagues, les courants littoraux, l'érosion glacière et la sismicité. Dans certaines régions du golfe du Saint-Laurent, en particulier dans l'estuaire du fleuve, le fjord du Saguenay, la plate-forme Néo-Écossaise et le plateau de Saint-Pierre-et-Miquelon, il existe de nombreuses évidences d'instabilité du versant littoral et de ruptures du sous-sol marin (Mosher, 2008; Mosher et. al., 2004). Le site Old Harry est suffisamment éloigné de la rive et du plateau continental et ne présente pas la morphologie locale du fond marin liée à une instabilité. Il est donc peu probable que le fond marin devienne instable dans la région avoisinant le site Old Harry.

### 9.4.3 *Sismicité*

L'activité sismique déclenche souvent des effondrements du talus sous-marin. Selon la carte des risques sismiques de 2010 obtenue auprès de la Commission géologique du Canada (Ressources naturelles Canada, 2014), les environs du site Old Harry sont considérés comme posant un risque sismique relativement faible. Il convient de remarquer que la cartographie des risques sismiques est fondée sur le danger auquel est exposée une habitation individuelle sur un terrain plutôt que des structures particulières comme une tête de puits sur le fond marin. Par conséquent, des

analyses propres au site devraient être réalisées à partir des paramètres du sol de l'endroit précis et des contraintes fondées sur les infrastructures proposées sur place.

Un réseau de failles existe dans la partie sud de la zone étudiée, à environ 1 200 m au sud-est de l'emplacement prévu pour le puits. Ce réseau est considéré comme inactif et ne devrait donc pas modifier la sismicité locale.

## 10 LACUNES DE L'INFORMATION ET ÉTUDES SUPPLÉMENTAIRES À EFFECTUER

### 10.1 FRÉQUENCE DES ICEBERGS

La fréquence des icebergs dans le golfe du Saint-Laurent est mal définie, car jusqu'ici cela n'a pas été un sujet de préoccupation pour les activités de prospection ou de mise en valeur d'hydrocarbures en mer. Historiquement, la collecte d'une quantité suffisante de données offrant la qualité et la fiabilité requises pour l'évaluation de risques (activité qui s'étale généralement sur plusieurs années) a été une opération onéreuse en raison du coût des vols de surveillance aérienne. Cependant, le lancement récent du satellite Sentinel-1 permet désormais d'avoir accès à des données de haute résolution gratuites sur la région pouvant servir à construire la base de données nécessaire. C-CORE a fait une évaluation initiale de l'utilisation de Sentinel-1 dans la mer du Labrador et constaté que ces données étaient très utiles pour l'évaluation des icebergs, car elles amélioraient nettement les densités d'icebergs par rapport aux satellites précédents, aussi bien par la résolution que par la répétitivité de couverture. Ces données n'ont commencé à être disponibles qu'en juin 2015. Au départ, il pourrait s'agir d'une analyse de données récentes (juin-juillet 2015) sur les icebergs dans le détroit de Belle-Isle et la zone située juste au sud du golfe du Saint-Laurent. Si cette analyse convient, elle pourrait se poursuivre sous forme d'analyses annuelles courantes. C-CORE a proposé dernièrement de procéder à des analyses courantes similaires de données de Sentinel-1 sur les bassins en eau profonde récemment découverts dans la mer du Labrador. Une évaluation des données de Sentinel-1 pour le soutien opérationnel d'activités d'exploration et de production est aussi proposée, étant donné que ces données sont disponibles avec un temps de réponse rapide (quelques heures). Ces activités pourraient aussi compléter d'autres activités extracôtières, dans le golfe du Saint-Laurent (ex. île d'Anticosti).

### 10.2 DONNÉES SUR LA BANQUISE

L'épaisseur moyenne de la banquise est souvent décrite au moyen de catégories de glace tirées des cartes de glace du SCG. Cette source ne rend cependant pas compte de la variabilité attribuable à la glace déformée, à la formation de crêtes de glace, aux chenaux reglacés, etc. et ne fournit pas de données sur les vitesses de dérive de la banquise. La meilleure source de données serait un sonar à vision ascendante ou un profileur de glace qui serait ancré sur le site Old Harry. Ces installations comprennent généralement un profileur de courant à effet Doppler qui mesure la dérive de la banquise. Cette information est extrêmement importante pour définir les charges de glace sur les structures et pour déterminer les besoins en gestion des glaces et la catégorie de navire requise pour conduire des opérations toute l'année ou les faciliter. Ces données doivent être recueillies sur plusieurs saisons afin qu'il soit possible de définir la variabilité annuelle des caractéristiques de la banquise. Ces données pourraient être complétées par celles du satellite Cryosat, de la mission d'exploration de la Terre de l'ESA visant à mesurer le franc-bord de glace et, par déduction, l'épaisseur de la glace. Si l'ancrage d'un sonar à vision ascendante est trop onéreux, une solution moins chère serait d'évaluer les données du Cryosat, fusionnées avec les archives existantes de données satellitaires SAR et la collection de cartes des

glaces du SCG. Ces données ne révéleront cependant pas la profondeur des quilles de glace ni la déformation des glaces que permet le sonar à vision ascendante.

Il est proposé aussi d'évaluer la répartition des glaces flottantes au site Old Harry, étant donné que les fourchettes indiquées sur les cartes du SCG sont insuffisantes pour produire les calculs des charges de la banquise. Cette opération peut être réalisée à l'aide des archives satellitaires haute résolution SAR, disponibles à partir de diverses sources (ex. ESA, NASA, le catalogue de données polaires - <https://www.polardata.ca/pdcsearch/>).

### **10.3 EMBRUNS VERGLAÇANTS ET VISIBILITÉ**

Les résultats des embruns verglaçants et de la visibilité présentés dans ce rapport reposent sur des modèles numériques et nécessitent un étalonnage et une vérification au moyen de mesures prises sur place. Ces instruments pourraient être ajoutés à la bouée océanographique existante à Old Harry et faire partie de l'Observatoire global du Saint-Laurent (<http://slgo.ca/observations/?lg=en>).

### **10.4 COLLECTE DE DONNÉES GÉOTECHNIQUES**

Il ressort de l'examen de la documentation présentée à la section 9 que les lacunes les plus importantes de l'information concernent les paramètres géotechniques du site. Les paramètres techniques du site sont nécessaires à la conception des infrastructures sous-marines (capacité portante des semelles, protection latérale des tubes conducteurs (avec colonnes montantes tensionnées), interaction entre les colonnes montantes et le fond marin pour les colonnes montantes caténaires en acier (l'enfoncement des colonnes montantes caténaires en acier peut modifier la durée de vie de l'installation), etc.).

L'information préliminaire relative à la stratigraphie indique que l'infrastructure sous-marine à venir sur le fond marin sera déposée sur plusieurs mètres de sédiments postglaciaires et glaciomarins à grains fins meubles, reposant sur une mince couche de till glaciaire surconsolidé reposant sur le socle rocheux. La capacité portante et la protection latérale assurées par les sédiments meubles supérieurs seront relativement limitées.

Une étude géotechnique détaillée sera nécessaire pour déterminer les caractéristiques physiques et les paramètres techniques des dépôts postglaciaires et glaciomarins non perturbés qui se trouvent sur place.

### **10.5 ANALYSE DES CHARGES DE GLACE**

Il est proposé qu'une évaluation préliminaire soit faite des charges de la banquise sur les structures d'exploration et de production proposées au site Old Harry à partir des meilleures données environnementales existantes sur le site (avec des hypothèses raisonnables formulées à partir de sites analogues en l'absence de données) ainsi qu'une analyse des données existantes

sur la pression d'écrasement exercée par les glaces de première année. Les données sur la pression d'écrasement par les glaces de première année proviendront de données sur le pont de la Confédération, un phare instrumenté de la mer Baltique (STRICE) et de mesures prises à bord d'un navire au cours de la traversée de l'Arctique (brise-glace Polar Sea). Les essais de sensibilité réalisés à partir de variations raisonnables des paramètres les plus importants qui régissent les charges de glace permettront d'évaluer la sensibilité aux charges théoriques.

Cette analyse permettrait d'évaluer les avantages éventuels d'une collecte de données sur place, les charges de glace théoriques sur les options qui s'offrent pour l'exploration et la production, ainsi que les besoins en navires (brise-glace) pour les opérations de soutien et de gestion des glaces. Il est supposé à ce stade que les installations aménagées sur place en présence de la banquise auront recours à la gestion des glaces pour réduire les charges de la banquise par une réduction de la taille des glaces flottantes. Il sera très utile aussi d'évaluer le besoin de maintien en position des diverses installations, la capacité de les déconnecter quand elles sont soumises à des charges de glace, les besoins en amarrage et les moyens d'ancrage.

## 10.6 COLLECTE DE DONNÉES SUR LES CHARGES DE GLACE

La mesure des charges de glace sur place à partir d'une plateforme instrumentée (bouée pourvue de panneaux de charge de glace) serait très utile, en particulier si les résultats sont jumelés à d'autres mesures comme l'épaisseur de la banquise (au moyen d'un sonar à vision ascendante) et l'enregistrement des conditions glacielles et environnementales des alentours. Les charges de glace recueillies sur quelques années pourraient être corrélées aux conditions glacielles, permettant ainsi l'extrapolation des charges auxquelles il faudrait s'attendre au cours des années de conditions extrêmes. Pour le moment, de telles mesures propres au site sont rares, mais elles permettraient d'éviter tout conservatisme inutile en matière de conception.

## 11 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES POUR LE FORAGE EN MER

### 11.1 INTRODUCTION

La présente section traite des considérations générales concernant l'aménagement d'infrastructures de forage en zone extracôtière, les forages, y compris le ravitaillement et le transbordement et certaines mesures particulières devant s'appliquer au secteur Old Harry, en particulier en ce qui a trait aux courants marins, aux propriétés physiques du fond marin, au mouvement des glaces et aux tempêtes océaniques. Le texte des sections 11.2 à 11.5 est tiré du rapport complémentaire intitulé *Technical Considerations and Measures Specific to Offshore Drilling Infrastrucures & Activities* (Recovery Factor Inc., 2015), auquel de légers changements ont été apportés.

### 11.2 FORAGE EN MER

Après que d'éventuelles ressources d'hydrocarbures sont repérées au moyen d'études géologiques et de campagnes de sondage sismique, il faut forer des puits d'exploration pour confirmer la présence de pétrole ou de gaz. Lorsque la présence de ces ressources est confirmée, il faut alors entreprendre des forages de délimitation pour mieux définir les quantités d'hydrocarbures et mieux caractériser la géologie du gisement. Lorsque la mise en valeur des ressources atteint le stade de la production, il faut forer davantage de puits pour lancer et soutenir la production d'hydrocarbures.

Pour forer au large des côtes, il faut une plateforme de forage autonome flottante ou ancrée sur le fond, qui comprend la tour de forage et son équipement, un puits central ou un autre accès à la surface de l'eau, les quartiers de l'équipage, une héliplateforme ainsi que du matériel d'intervention d'urgence. Ces plateformes sont généralement assistées par des navires de ravitaillement (généralement de un à trois navires) et des hélicoptères. Les appareils de forage extracôtiers sont mobiles ou fixes. Les plateformes fixes sont généralement utilisées pour la production dans les régions où l'on peut aménager des structures arrimées au fond, tandis que les unités de forage en mer mobiles sont utilisées pour le forage de puits d'exploration, de délimitation ou de production. Comme le présent chapitre est axé sur les activités d'exploration, l'accent sera mis sur les unités mobiles.

Les types les plus courants d'unités de forage en mer mobiles sur la côte Est du Canada sont les plateformes autoélévatrices, les navires de forage et les plateformes semi-submersibles. Les plateformes autoélévatrices sont constituées d'une coque principale dynamique fixée à des jambes mobiles qui peuvent être abaissées sur le fond marin pendant les opérations de façon à éléver la coque au-dessus de la surface de la mer. Comme la coque est dynamique et qu'elle supporte le pont principal, le matériel de forage, les quartiers de l'équipage et d'autres machines nécessaires au forage, les jambes peuvent être remontées et la plateforme flottante peut aller et venir entre les sites cibles (souvent elle est remorquée ou tirée par un bâtiment pour charges lourdes plutôt qu'être autopropulsée). Comme ce genre de plateforme est ancrée dans le fond,

elle ne peut être utilisée que dans des eaux peu profondes, généralement dans moins de 120 m (CAPP, 2001) et ne convient pas à la zone d'intérêt examinée dans la présente étude.

Pour le site Old Harry, du fait de la profondeur de l'eau, il faut utiliser des plateformes de forage flottantes comme les plateformes submersibles et les navires de forage illustrés à la Figure 57. Dans le cadre d'opérations conduites dans d'autres régions subarctiques du monde, il est important de signaler que l'expérience acquise au large de Terre-Neuve-et-Labrador est tout à fait pertinente étant donné que les activités d'exploration et de production dans les régions de la mer de Bohai, de la mer Caspienne, du golfe de Cook et de l'île Sakhalin se déroulent en eau peu profonde où les plateformes fixées au fond (plateformes élévatrices pour l'exploration, structures à jacket, à caisson, structures gravitaires et îles artificielles pour la production) sont le plus souvent utilisées. Il convient de préciser que pour des régions arctiques comme la mer de Beaufort, des plateformes de forage spécialisées qui résistent aux glaces (ex. la plateforme Kulluk) ont été conçues et construites sur mesure pour étendre la saison de forage aux saisons intermédiaires des glaces, avec un importante logistique en gestion des glaces. Pour pouvoir manœuvrer davantage dans les glaces, ces plateformes ont dû réduire leur efficacité en eau libre et elles ne donnent pas de bons résultats par mer forte. Étant donné la longueur et la nature de la saison en eau libre dans la zone d'intérêt et le fait que les navires de forage et les plateformes semi-submersibles sont davantage adaptés aux opérations en eau libre, ces plateformes de forage spécialisées n'ont pas été prises en considération.

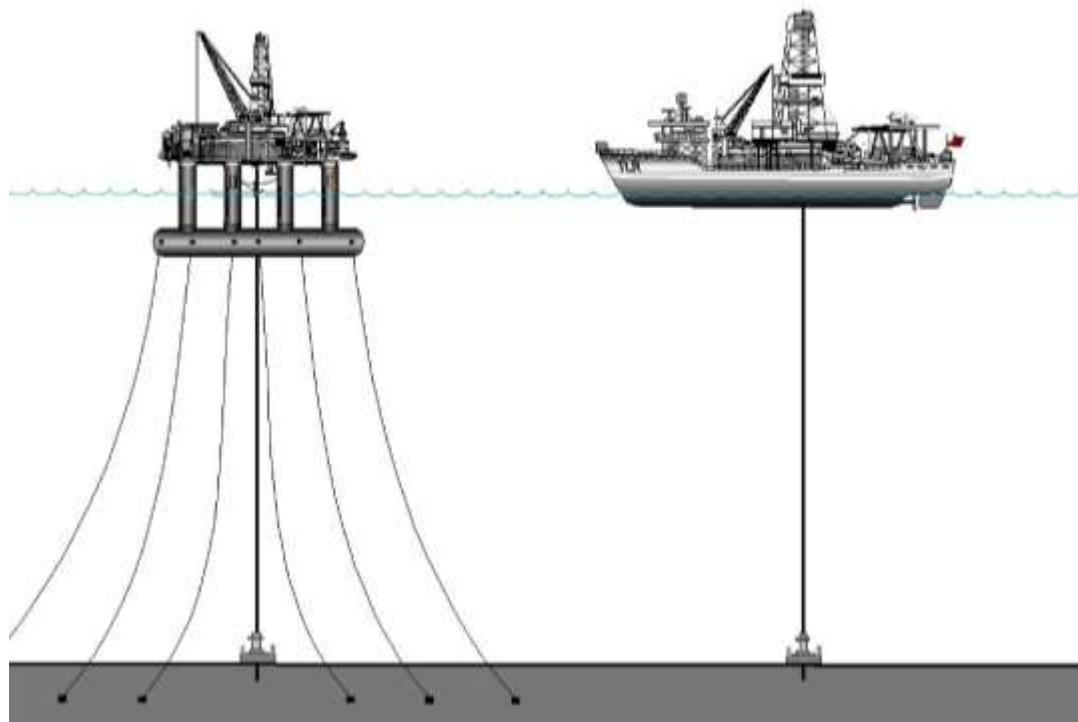


Figure 57. Installations types de forage en eau profonde : plateforme semi-submersible (à gauche) et navire de forage (à droite) de MMS (2000)

Selon l'expérience que l'industrie a acquise sur les Grands Bancs, il est de plus supposé que les activités saisonnières de forage seront planifiées pour avoir lieu au cours de la saison libre de glace afin d'éviter les moments de l'année où la glace de mer risque d'être présente. Il serait ainsi possible d'utiliser une plateforme qui ne résiste pas aux glaces, plus facile à se procurer et moins chère que les appareils de forage spécialisés résistant aux glaces. De nombreux autres facteurs doivent cependant être pris en considération dans le choix d'un appareil pour une campagne de forage donnée, notamment la profondeur de l'eau à l'emplacement du puits, les glaces, la météorologie océanique, l'état du fond marin, la profondeur de forage visée et les besoins de déconnexion et de mobilité compte tenu des tempêtes et des glaces prévues dans la région. Comme des irruptions d'icebergs et de fragments de glace peuvent toujours se produire, même durant la saison sans glace, il est essentiel d'examiner attentivement les besoins éventuels d'aide en gestion des glaces.

Comme l'illustre la Figure 57, une plateforme semi-submersible est constituée de pontons étanches à l'eau ballastés qui sont raccordés au pont de forage et aux installations de surface par des éléments porteurs qui émergent de l'eau. Comme ces colonnes verticales présentent une surface de flottaison moindre qu'un bâtiment classique offrant un déplacement similaire et que les pontons sont davantage immergés dans la colonne d'eau, une plateforme semi-submersible est moins exposée à la charge causée par l'action des vagues. C'est la raison pour laquelle les

plateformes semi-sabmersibles peuvent évoluer dans des mers plus agitées que les navires de forage comparables. Les plateformes semi-sabmersibles peuvent en outre être conçues de façon à ce que le pont et les installations de forage se trouvent nettement au-dessus de la ligne de flottaison, tout en conservant de bonnes caractéristiques de stabilité et de tenue en mer. Cependant, du fait de la surface de flottaison réduite, ce type de plateforme est plus sensible aux variations des charges et il est important que la plateforme soit soigneusement ajustée pour que sa stabilité soit préservée.

Les navires de forage ont une coque plus classique qui offre la flottabilité de soutien nécessaire pour supporter le pont de forage et les autres installations (voir la Figure 57). Au cours des opérations de forage, la conduite montante de production est déposée sur le fond marin à partir du navire et pourvu d'un bloc d'obturation de puits qui relie la conduite à la tête du puits. Le bloc obturateur sert à colmater, à contrôler et à surveiller les puits afin d'éviter d'en perdre la maîtrise tout en permettant de déconnecter rapidement et en toute sécurité la conduite montante de la tête du puits s'il devient nécessaire de déplacer la plateforme dans une situation d'urgence. Afin de donner accès au train de tiges et à la conduite montante à la surface de la mer, les navires de forage sont pourvus d'un puits central aménagé au-dessous de la tour de forage qui crée une ouverture dans la coque. Comme les navires de forage sont généralement autopropulsés, ils sont plus mobiles que les plateformes semi-sabmersibles types, ce qui leur permet de passer rapidement d'un cycle de forage à un autre par leurs propres moyens.

Au cours des opérations de forage, les plateformes sont maintenues en position au moyen d'un système d'ancrage par lignes ou d'un système de positionnement dynamique, ou d'une combinaison des deux. Lorsque la profondeur de l'eau est inférieure à 1 000 m dans un milieu où des charges élevées sont à prévoir pour le maintien en position, les systèmes d'ancrage sont souvent utilisés car leur capacité de charge est supérieure à celle des systèmes à propulseur. Bien qu'il existe différents systèmes d'ancrage, des remorqueurs-manipulateurs d'ancres sont généralement nécessaires pour faciliter le déploiement de 8 à 12 ancre et le raccordement du bâtiment au système d'ancrage. Lorsque la profondeur de l'eau est supérieure à 1 000 m, des décalages plus importants du bâtiment peuvent être autorisés car la longueur accrue de la conduite montante et du train de tiges permet de plus amples mouvements sans surcharger le système. Dans ce cas, l'emploi d'un système de positionnement dynamique peut être indiqué. Ce système a en outre l'avantage de permettre des connexions et déconnexions rapides, ce qui peut se révéler avantageux lorsqu'il faut se déplacer précipitamment, la déconnexion pouvant être rapide en cas de temps violent ou d'irruption de glaces.

### 11.3 TEMPS VIOLENT

Les plateformes et les bâtiments évoluant sur le site Old Harry doivent pouvoir affronter diverses conditions de temps violent. Des vents forts et des vagues houleuses peuvent endommager les installations, ou si la plateforme est remorquée par temps violent, le dispositif de remorquage peut céder ou la tour de forage devenir instable. Un temps violent sur le site ou au cours du

transport vers le site jumelé à une erreur humaine, à une panne des machines, à une rupture du câble de remorque ou à une fatigue des structures risque même d'occasionner la perte de l'installation de forage. Si les conditions météorologiques se dégradent au cours des opérations de forage, une réponse modulée est prévue. Les opérations normales se poursuivront jusqu'à ce qu'une limite opérationnelle précise soit atteinte (c.-à-d. une limite de tangage ou de roulis), au-dessus de laquelle la plateforme cesse l'activité de forage, mais reste sur place et raccordée à la conduite montante. Si le temps devient plus mauvais, la plateforme atteindra des limites au-dessus desquelles elle doit se déconnecter de la conduite montante et quitter les lieux. Lorsque les conditions météorologiques s'amélioreront, la plateforme pourra se reconnecter et reprendre le forage. Bien que des limites comparables puissent être prévues pour les opérations de forage à bord d'un navire de forage ou d'une plateforme semi-sabordable, les réactions de l'installation au tangage et au roulis doivent être prises en considération de façon détaillée au cours de la planification des activités étant donné que chaque bâtiment réagit de façon différente (selon le type, l'âge et la conception). Comme il est précisé ci-après, dans les conditions environnementales qui existent au site Old Harry, il est essentiel d'accorder toute l'attention voulue au risque d'éruption de glace dans la zone d'exploitation aux environs de l'installation de forage, car ces formations glaciales peuvent accroître sensiblement le risque de dommage et de perte à ces structures extracôtières.

#### **11.4 APPOINT DE LA GESTION DES GLACES**

Vu l'expérience acquise dans le secteur sur les Grands Bancs, on suppose que les forages se feront durant la saison sans glace à partir d'une unité mobile de forage en mer équipée d'un dispositif de déconnexion, de façon à opérer uniquement pendant les périodes de l'année où la glace de mer est absente du secteur. L'information sur la saison des glaces présentée à la section 7 indique que la période de forage la plus vraisemblable pourrait débuter dès le mois de mai lorsque les glaces de mer se sont retirées, la période d'eau libre continuant habituellement jusqu'à la fin de décembre. Comme il existe un risque d'irruptions peu fréquentes d'icebergs dans la région de Old Harry pendant la saison sans glace, il est essentiel de faire une évaluation détaillée du risque de collision avec un iceberg pendant la période libre de glace (ex. C-CORE, 2005b) pour toutes les campagnes de forage dans cette région. La mise en œuvre d'un plan de gestion des glaces pourrait s'imposer, ce qui suppose de pouvoir détecter dans les eaux d'amont l'irruption possible d'icebergs dans la région et de déconnecter l'installation en toute sécurité et de quitter les lieux pour éviter un impact en cas de menace imminente posée par l'arrivée d'un iceberg. Quant à savoir si la gestion physique des glaces (c.-à-d. remorquer ou non un iceberg) est nécessaire, tout dépendra de l'information détaillée sur les conditions glaciales prévues pour l'endroit au cours de la période visée, compte tenu de l'efficacité des dispositifs de détection et de surveillance des glaces, des modèles prévisionnels de dérive des icebergs et du temps qu'il faudra pour déconnecter la plateforme et quitter les lieux. Cette question est essentielle sur le plan de la sécurité, car la fiabilité générale du système, qui tient compte de la fiabilité de la gestion des glaces jumelée à la fiabilité des structures, doit répondre à des objectifs fixés par des codes (ex.

ISO 19906). La gestion physique s'imposera si les risques courus en son absence sont jugés trop élevés par rapport aux objectifs de sécurité spécifiés (C-CORE, 2005b).

Si la probabilité d'une collision avec un iceberg est suffisamment faible, la déconnexion de l'installation suffira à ramener le risque de contact à un niveau acceptable, ce qui rendra la gestion physique des glaces inutile. Cependant, un programme de surveillance à long terme sera quand même nécessaire pour s'assurer d'être informé suffisamment à l'avance pour se déconnecter en toute sécurité. Il faudra aussi évaluer le taux d'efficacité des opérations de déconnexion.

## 11.5 RAVITAILLEMENT ET TRANSBORDEMENT

Les navires d'approvisionnement en mer assurent généralement les services de ravitaillement en combustible et de transbordement nécessaires pendant une campagne de forage. Au cours de ces opérations, les navires d'approvisionnement peuvent faire plusieurs aller-retour par semaine à la plateforme, un navire de réserve spécialisé demeurant auprès de l'unité de forage pendant toute la campagne. Les activités d'exploration du site Old Harry doivent normalement avoir lieu au cours de la saison d'eau libre, mais si des opérations doivent se dérouler dans les glaces, il faudra s'assurer que les bâtiments utilisés sont conçus pour la catégorie de glace prévue.

Pour les opérations sur les Grands Bancs, les exploitants doivent respecter le règlement sur le forage et la production pétrolière au large des côtes de Terre-Neuve qui prescrit une zone de sécurité autour de la plateforme dont le périmètre est de 500 m à partir du bord extérieur de l'installation. L'exploitant a en outre la responsabilité de communiquer les limites de la zone de sécurité et la nature des installations se trouvant dans cette zone et les dangers auxquels peuvent être exposés les navires et les aéronefs circulant dans la région (SOR/2009-316, 2015). Si la plateforme de forage est ancrée, alors la partie du règlement sur les collisions de la *Loi sur la marine marchande du Canada* s'applique et la zone de sécurité de la plateforme devra correspondre à une limite définie par une zone tampon de 50 m autour du dispositif d'ancrage ou à la zone de sécurité de 500 m précitée si celle-ci lui est supérieure. Des zones de sécurité similaires seront nécessaires pour les campagnes de forage au site Old Harry. L'incidence de ces zones de sécurité sur la navigation et les autres activités maritimes dans le secteur doit être prise en considération dans les travaux de planification. Le Québec ne disposait pas d'un cadre réglementaire au moment de la production du présent rapport qui s'appliquerait à Old Harry, mais une loi sera adoptée pour combler ce vide réglementaire.

## 11.6 TRAFIC MARITIME

Une quantité importante de marchandise passe par le golfe du Saint-Laurent et environ 6 400 navires commerciaux emprunteraient le détroit de Cabot chaque année (Pêches et Océans Canada, 2005). La Figure 58 représente une carte de la densité du trafic maritime dans le golfe Saint-Laurent produite par le Système d'identification et de suivi des navires à grande distance (LGL Limited, 2013), le site Old Harry ayant été superposé. Les données sur la circulation de

navires couvrant la période de mars 2010 à février 2011 ont été analysées, le nombre de bâtiments étant classé par cellule en minutes d'arc  $2 \times 2$  (chacune couvrant environ  $9 \text{ km}^2$  à la latitude de Old Harry). Bien que la densité du trafic à Old Harry soit relativement faible (entre 1 et 10 navires), le site est à environ 15 km des principaux flux du trafic maritime dans le secteur, dont la densité varie entre 250 et 1 061 navires. Par conséquent, bien que le site Old Harry ne soit pas directement dans l'axe du principal du flux du trafic maritime, il faudra néanmoins recourir à des aides à la navigation et à des systèmes d'avertissement appropriés des navires qui sont susceptibles de s'approcher d'une installation en service à cet endroit.

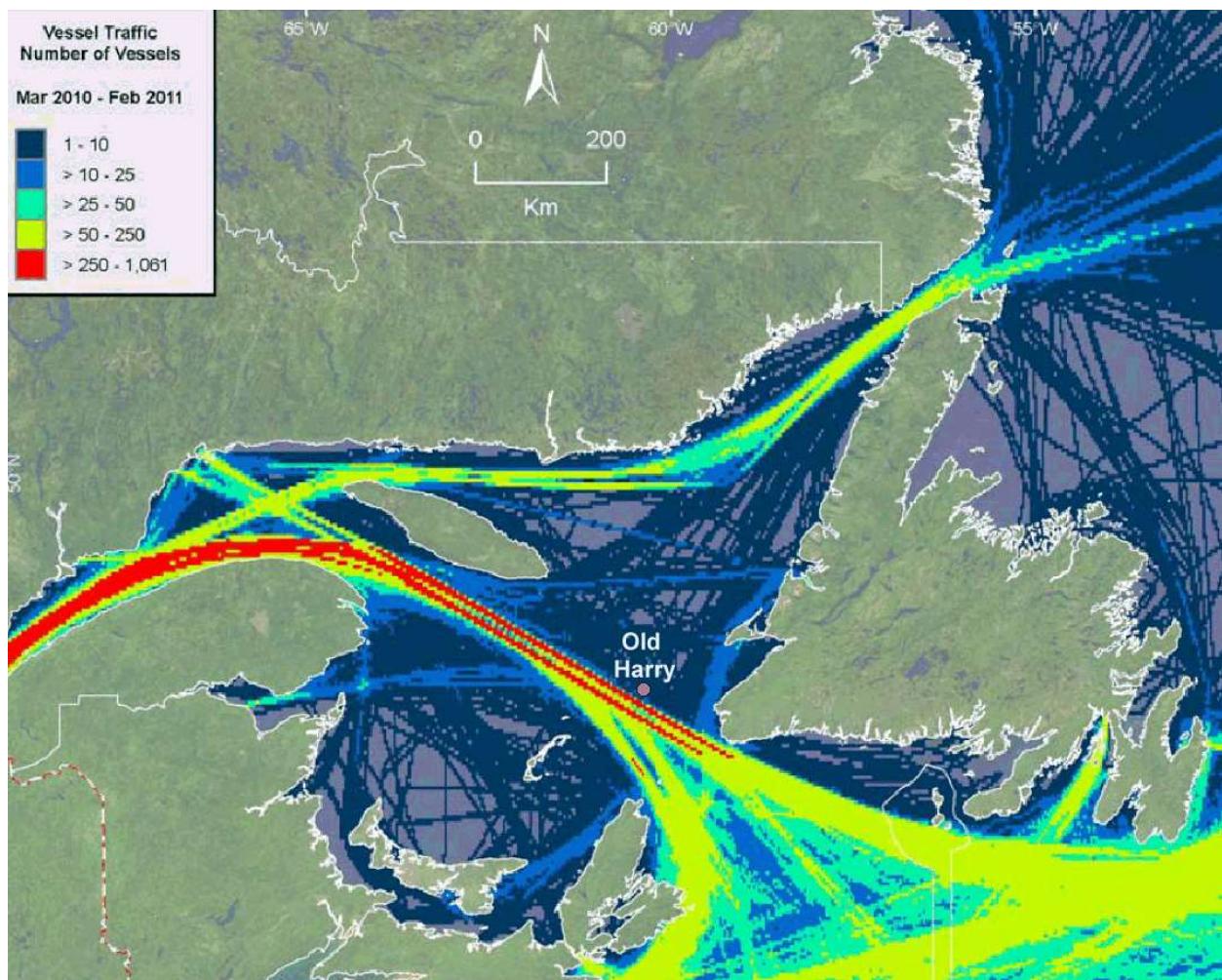


Figure 58. Trafic maritime dans le golfe du Saint-Laurent. Nombre de navires (par cellule en minutes d'arc  $2 \times 2$ , de mars 2010 à février 2011), modifié par l'ajout du site Old Harry (LGL Limited, 2013)

## 11.7 COURANTS MARINS

Les courants marins représentent une charge susceptible d'être imposée à la plateforme de forage, à sa conduite montante et à son système d'ancrage. Les données modélisées existantes sur les courants révèlent que ceux-ci ne constituent pas un facteur important pour le site Old Harry. Il faut toutefois le faire confirmer par des données mesurées qui sont actuellement recueillies sur place. Il faudra recueillir des données sur plusieurs années (10 ans) avant qu'il soit possible de faire des extrapolations des valeurs extrêmes pour les besoins de conception.

## 11.8 MOUVEMENT DES GLACES DE MER

C'est le mouvement des glaces de mer par rapport à l'installation de forage qui produit des charges sur la structure et le système d'ancrage. Malheureusement, en ce moment, il n'existe pas de données mesurées sur la dérive de la banquise à ce site pour la présente analyse. Des estimations peuvent être faites pour les glaces flottantes (floes) qui sont fondées sur les vitesses du vent ou les courants, mais ces estimations ne sont généralement pas fiables pour de fortes concentrations de glace. Pour avoir des données fiables, il faudra prendre des mesures sur place.

## 11.9 PROPRIÉTÉS DU FOND MARIN

La capacité de l'installation de forage à maintenir sa position au cours de tempêtes ou d'interactions éventuelles avec des glaces dépendra de la capacité de son système d'ancrage, qui (si les câbles d'ancrage sont d'une résistance suffisante) dépendra en définitive de la capacité du système de résister aux charges qui lui sont imposées. Le choix et la conception du système d'ancrage passeront par une compréhension approfondie des propriétés du fond marin. Pour acquérir cette compréhension, il faudra faire des prélèvements et des essais appropriés sur le fond marin au site Old Harry. Parmi les techniques d'échantillonnage pourraient figurer l'échantillonnage par grappillage, le carottage à faible profondeur, le vibrocarottage, le forage, l'essai de pénétration au cône et l'évaluation des propriétés géophysiques à faible profondeur visant à évaluer la stratigraphie des sédiments superficiels. Les échantillons pourraient être soumis à une analyse granulométrique, à la détermination de la teneur en eau et en matières organiques, à la détermination des limites d'Atterberg, de la résistance au cisaillement et à des essais triaxiaux.

## 12 CONCLUSIONS

Dans le présent rapport, nous avons passé en revue les vents, les vagues, les courants, les embruns verglaçants, la visibilité, la banquise, les icebergs et les conditions géotechniques du site Old Harry dans le golfe du Saint-Laurent. Les vents, les vagues et les courants sont raisonnablement bien compris à partir des prévisions rétrospectives et des modèles, et la collecte de données en cours sur le site améliorera cette compréhension. Les analyses des embruns verglaçants et de la visibilité sont fondées sur des modèles qui, bien qu'ils soient généralement reconnus, n'ont pas été vérifiés ni étalonnés expressément pour le site Old Harry. Les données géotechniques requises sur le fond marin manquent à cet endroit. Les données sur la banquise sous la forme de cartes du SCG fournissent une bonne compréhension de la fréquence, de la concentration et des types de glace sur le site, et il a été noté par la comparaison de données sur des intervalles de dix ans que les conditions glacielles montrent des changements à long terme qui se traduisent par une diminution de l'intensité des conditions glacielles. Il manque cependant d'informations sur l'épaisseur de la banquise, la formation des crêtes de glace et la dérive des glaces, données qui seront nécessaires pour une analyse détaillée. L'information existante sur les icebergs indique que leur fréquence est très faible, l'observation la plus rapprochée d'un iceberg rapportée depuis 1975 étant à 100 km du site Old Harry. Cependant, contrairement aux Grands Bancs, cette zone ne fait pas l'objet d'une surveillance régulière des icebergs. Par conséquent, faire abstraction du risque lié aux icebergs sur la base de ces données limitées reviendrait à sous-estimer le risque réel qu'ils posent à cet endroit; en raison des conséquences qu'aurait une collision, le risque que posent les icebergs devrait être malgré tout pris en considération même s'il semble à priori très faible.

Les connaissances manquantes et les études complémentaires proposées sont présentées à la section 10. Elles sont résumées ci-dessous :

- l'utilisation de données satellitaires pour mieux définir la fréquence des icebergs, ainsi que la distribution des glaces flottantes selon leur taille et la répartition de leurs épaisseurs;
- la collecte de données sur l'épaisseur et la dérive de la banquise au moyen d'un sonar à vision ascendante;
- la collecte de données sur les embruns verglaçants et la visibilité;
- la collecte de données géotechniques;
- l'analyse préliminaire des charges théoriques des glaces au moyen de la meilleure information disponible;
- la collecte de données sur la charge des glaces au moyen d'une bouée munie de panneaux de charge.

## 13 RÉFÉRENCES

- Ashcroft, J. (1985). Potential ice and snow accretion on North Sea rigs and platforms. *Marine Technical Note no. 1*, British Meteorological Office, Bracknell.
- AMEC (2014). *Western Newfoundland & Labrador Offshore Area: Strategic Environmental Assessment*. Final Report Prepared for Canada-Newfoundland and Labrador Offshore Petroleum Board by AMEC Environment & Infrastructure. April 2014.
- Bailey, Desmond T. (2000). *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. DIANE Publishing.
- Bruce Turner, D. (1986). "Comparison of Three Methods for Calculating the Standard Deviation of the Wind Direction." *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25 (5): 703–7. doi:10.1175/1520-0450(1986)025<0703:COTMFC>2.0.CO;2.
- C-CORE (2005a). "Characterization of Ice-Free Season for Offshore Newfoundland", C CORE Report Number R-04-093-341, Version 2, May.
- C-CORE (2005b). "Characterization of Ice-Free Season for Offshore Newfoundland – Addendum: Calculation of Iceberg Collision Risk during Ice-Free Season", C-CORE Report Number R-04-093-341, Version 2, May.
- C-CORE (2015). "Metocean Climate Study Offshore Newfoundland & Labrador STUDY MAIN REPORT Volume 1: Full Data Summary Report." Nalcor Energy Oil and Gas.
- CAN/CSA-S471-92 (2008). General Requirements, Design Criteria, the Environment, and Loads. Canadian Standards Association.
- CAPP (2001). "Offshore Drilling Waste Management Review." Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP). Technical Report, 2001-0007: 268 pp.
- Canadian Coast Guard (2015). "Chapter 3: Ice Climatology and Environmental Conditions" <http://www.ccg-gcc.gc.ca/Icebreaking/Ice-Navigation-Canadian-Waters/Ice-Climatology-and-Environmental-Conditions>
- Canadian Ice Services (2015), Weekly Regional Sea Ice Charts, [www.ec.gc.ca/glaces-ice](http://www.ec.gc.ca/glaces-ice).
- Canatec (1997). A Review of the Environmental Conditions on the West Coast of Newfoundland. Prepared for National Research Council, PERD/CHC Report 20-34.
- Chung, K.K., Forest, T.W., Lozowski, E.P., Gagnon, R., Faulkner, B., Chekhar, M. (1998). Application of New Measurement and Simulation Methods to Marine Icing on Offshore Structures. Proc. 8th (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, May 24-29, 1998.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Källberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and F. Vitart (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828.

- Donlon, C.J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., and Wimmer, W. (2012). The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of the Environment*. doi: 10.1016/j.rse.2010.10.017 2011.
- Fairall, C.W., Kepert, J.D. and Holland, G.J. (1994). The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean. *Global Atmos. Ocean System* 2:121-142.
- Fisheries and Oceans Canada (2005). The Gulf of St Lawrence, A Unique Ecosystem. [http://www.dfo-mpo.gc.ca/library/318989\\_e.pdf](http://www.dfo-mpo.gc.ca/library/318989_e.pdf)
- Forest, T.W., Lozowski, E.P., Gagnon, R.E. (2005). Estimating marine icing on offshore structures using ROGICE04. IWAIS XI, Montreal Canada, June 2005.
- Guest, P. (2005). Mariners Weather Log – Vessel Icing, NOAA, Vol. 49, No. 3, December 2005, ([http://www.vos.noaa.gov/MWL/dec\\_05/ves.shtml](http://www.vos.noaa.gov/MWL/dec_05/ves.shtml)) – accessed March 2014.
- Hansen, E.S. (2012). Numerical modeling of marine icing on offshore structures and vessels. M. Sc. thesis, NTNU Department of Physics, Trondheim, Norway, June 2012.
- Horjen, I. and Vefsnmo, S. (1986a). Computer modelling of sea spray icing on marine structures. In Proc. Symp. On Automation for Safety in Shipping and Offshore Operations, Trondheim, Norway (ed. G. Kuo et al.) pp. 315-323. Elsevier.
- Horjen, I. and Vefsnmo, S. (1986b). Calibration of ICEMOD – extension to a time-dependent model. Norwegian Hydrodynamic Laboratories Report STF60 F86040.
- Horjen, I. and Vefsnmo, S. (1987). Time-dependent sea spray icing on ships and drilling rigs – a theoretical analysis. Norwegian Hydrodynamic Laboratories Report STF60 F87130.
- Horjen, I., Vefsnmo, S., and Bjerke, P.L. (1988). Sea spray icing on rigs and supply vessels. ESARC Report no. 15, Norwegian Hydrodynamic Laboratories Report STF60 F88137.
- ISO 19906 (2010). Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Standard. ISO19906:2010(E). First edition. 2010.
- Jessup, R.G. (1985). Forecasting techniques for ice accretion on different types of marine structures, including ships, platforms and coastal facilities. *Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities*, Rep. 15, WMO, Canada, 90 pp.
- Jones, K.F. and Andreas, E.L. (2009). Sea Spray Icing of Drilling and Production Platforms. ERDC/CRREL TR-09-3, February 2009.
- Jones, K.F. and Andreas, E.L. (2012). Sea spray concentrations and the icing of fixed offshore structures. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138, 131-144, January.
- Jones, K.F. and Andreas, E.L. (2013). Sea Spray and Icing in the Emerging Open Water of the Arctic Ocean. Progress report to the Office of Naval Research (ONR), Science and Technology (<http://www.onr.navy.mil/reports/FY13/agjones.pdf>).
- Josenhans, H. (2007). Atlas of the Marine Environment and Seabed Geology of the Gulf of St. Lawrence. Geological Survey of Canada Open File 5346.
- Josenhans, H. and Lehman. (1999). Late glacial stratigraphy and history of the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Canadian Journal of Earth Science*. Vol 36 No 8. pp. 1327-1345.
- King, E.L. (2014). The shallow geology of a portion of Laurentian Channel east of Cape Breton Island, offshore Nova Scotia and Newfoundland and Labrador. Geological Survey of Canada Open File 6731: 1-26

- Kojo, T.L. (1984). Superstructure icing in the North Chukchi, South Chukchi and Hope Basin areas. Report for the Outer Continental Shelf Environmental Assessment Program Research Unit 519, pp.: 303-360.
- Kraus, E.B. (1972). Atmosphere-ocean interaction. Oxford University Press, London, 275 pp.
- LGL Limited (2013). Environmental Assessment of Shell Canada Ltd.'s Shelburne Basin 3-D Seismic Survey. LGL Rep. SA1175. Rep. by LGL Limited, St. John's, NL and Mahone Bay, NS, for Shell Canada Limited, Calgary, AB. 127p + Appendices.
- Loring, D.H. and Nota, D.J.G., 1973. Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence. Scale 1:1,000,000; Fisheries and Marine Service, Environment Canada, Ottawa, ON. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 182.
- Lozowski, E.P., Szilder, K. and Makkonen, L. (2000). Computer simulation of marine ice accretion. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 358, 2811-2845, November 2000.
- Lozowski, E.P., Forest, T., Chung, V. and Szilder, K. (2002). Study of marine icing. Institute for Marine Dynamics, National Research Council of Canada, St. John's, NL, Report CR-2002-03, 88pp., 2002.
- Makkonen, L. (1985). Heat transfer and icing of a rough cylinder. *Cold Regions Science and Techno9logy* 10:105-116.
- Mitten, P. (1994). Measurement and modelling of spray icing on offshore structures. Final Report to Atmospheric Environment Service of Canada, Contract no. 07SE. KM169-8-7439.
- MMS (2000). "Gulf of Mexico Deepwater Operations and Activities. Environmental Assessment" U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans. Figure II-5. May 2000.
- Mosher, D.C., D.J.W.P. Piper, D.C. Campbell and K.A. Jenner (2004). Near surface geology and sediment failure geohazards of the central Scotian Slope. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 88: 703-723.
- Mosher, David C. (2008). Submarine Mass Movements In Canada: Geohazards With Far-Reaching Implications In : J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management. Presse de l'Université Laval, Québec, 594 p.
- Natural Resources Canada (2014). *Simplified seismic hazard map for Canada*. Available at: <http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/simphaz-eng.php>
- Overland, J.E., Pease, C.H., Preisendorfer, R.W. and A.L. Comiskey (1986). Prediction of vessel icing. *Journal of climate and applied meteorology*, Vol. 25, No. 12, pp.: 1793-1806.
- Overland, J.E. (1990). Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures. *Weather and forecasting*. Vol. 5, pp.: 62-77.
- PERD (2013). PERD Iceberg Sighting Database 2013. Submitted by BMT Fleet Technology Limited to the Canadian Hydraulics Centre, National Research Council Canada, March.
- Roebber, P. and Mitten, P. (1987). Modelling and measurement of icing in Canadian waters. Canadian Climate Centre Report 87-15.

Recovery Factor Inc. (2015). GTEC07: Technical Considerations and Measures Specific to Offshore Drilling Infrastrucures & Activities, Confidential Report for the Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.

Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles, July 2015.

Romagnoli, R. (1988). Ice growth modeling for icing control purposes of offshore marine units employed by the petroleum industry. In Proc. Int. Association for Hydraulic Research Symposium on Ice, Sapporo, Japan, pp. 486-497.

Ryerson, C.C. (2011). Ice protection of offshore platforms. Cold Regions Science and Technology, 65, 97-110, 2011.

Sandwell (1998). Ice Regimes Off the West Coast of Newfoundland. Report Prepared for National Research Council, PERD/CHC Report 20-35.

Stantec (2013). *Environmental Assessment of the Old Harry Prospect Exploration Drilling Program*. Prepared by Stantec for Corridor Resources Inc.

Stark, J.D., Donlon, C.J., Martin, M.J. and M.E. McCulloch (2007). OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. Proc., Oceans 2007, Europe, Aberdeen, Scotland, IEEE, 331-334.

Stolina, M.T. and Warner, T.T. (1999). "Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event." *Journal of Applied Meteorology*. Volume 38: pp. 385-404.

Swail, V.R., Cardone, V.J., Ferguson, M., Gummer, D.J., Harris, E.L., Orelup, E.A. and Cox, A.T. (1996). The MSC50 Wind and Wave Reanalysis. 9<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, September 25-29, Victoria, B.C., Canada.

Tang, Chung Liang, T Yao, W Perrie, BM Detracey, B Toulany, E Dunlap, and Y Wu. (2008). "BIO Ice-Ocean and Wave Forecasting Models and Systems for Eastern Canadian Waters." Fisheries and Oceans Canada.

Toth, G., Gultepe, I., Milbrandt, J., Hansen, B., Pearson, G., Fogarty, C. and W. Burrows (2011). The Environment Canada Handbook on Fog and Fog Forecasting. Environment Canada Monograph En56-231/2010, 117 pp.

Wu, Y., Tang, C. and Dunlap, E. (2010). "Assimilation of Sea Surface Temperature into CECOM by Flux Correction." *Ocean Dynamics* 60 (2): 403-12. doi:10.1007/s10236-010-0266-6.

Yamartino, R. J. (1984). "A Comparison of Several 'Single-Pass' Estimators of the Standard Deviation of Wind Direction." *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 (9): 1362-66. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1362:ACOSPE>2.0.CO;2.

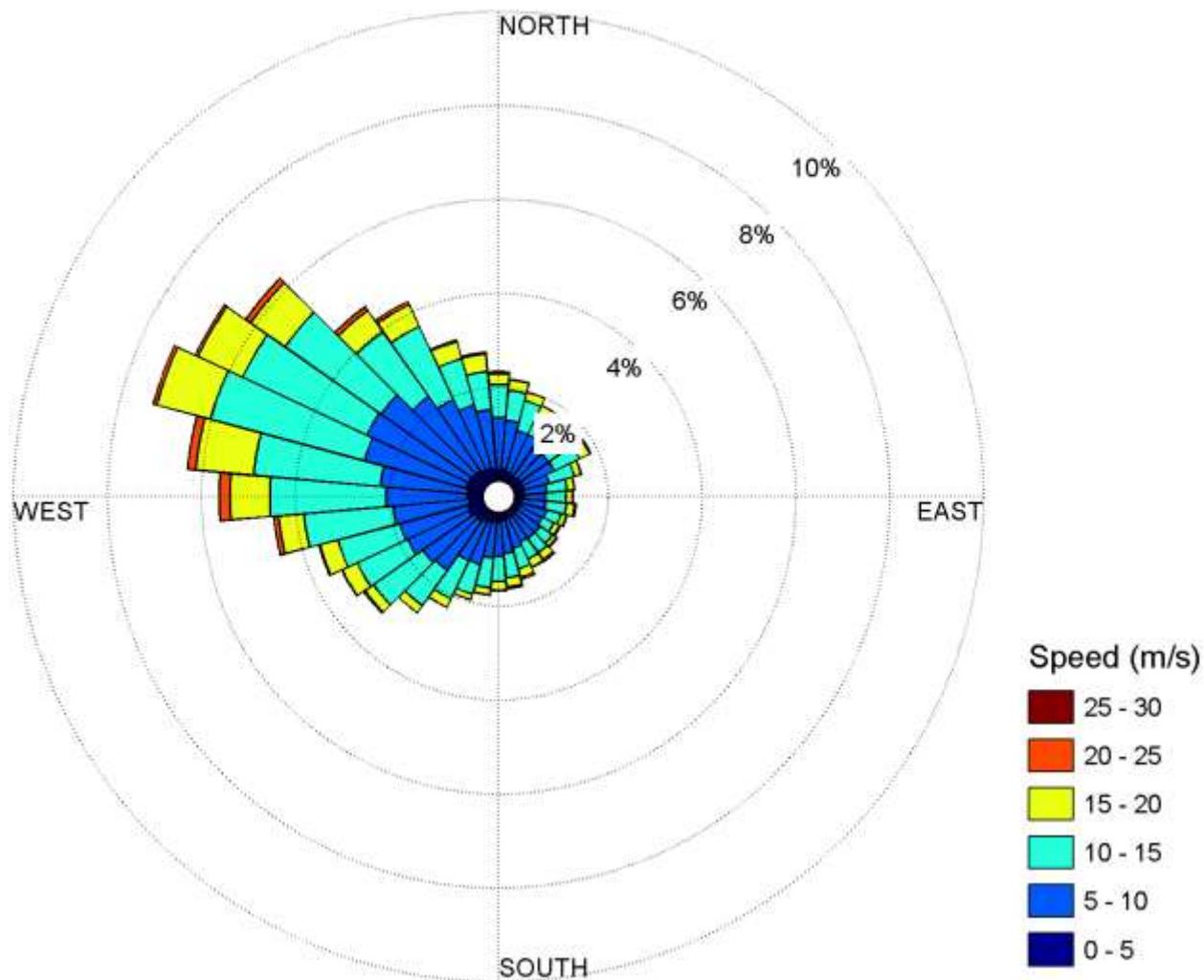
Yao, T, CL Tang, and IK Peterson (2000). "Modeling the Seasonal Variation of Sea Ice in the Labrador Sea with a Coupled Multicategory Ice Model and the Princeton Ocean Model." *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012) 105 (C1): 1153-65.

Zakrzewski, W.P., Lozowski, E.P. and I. Horjen (1989). The use of ship icing models for forecasting icing rates on sea-going ships. Proceedings of the 10th international conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, June 1989, Luleå, Sweden.

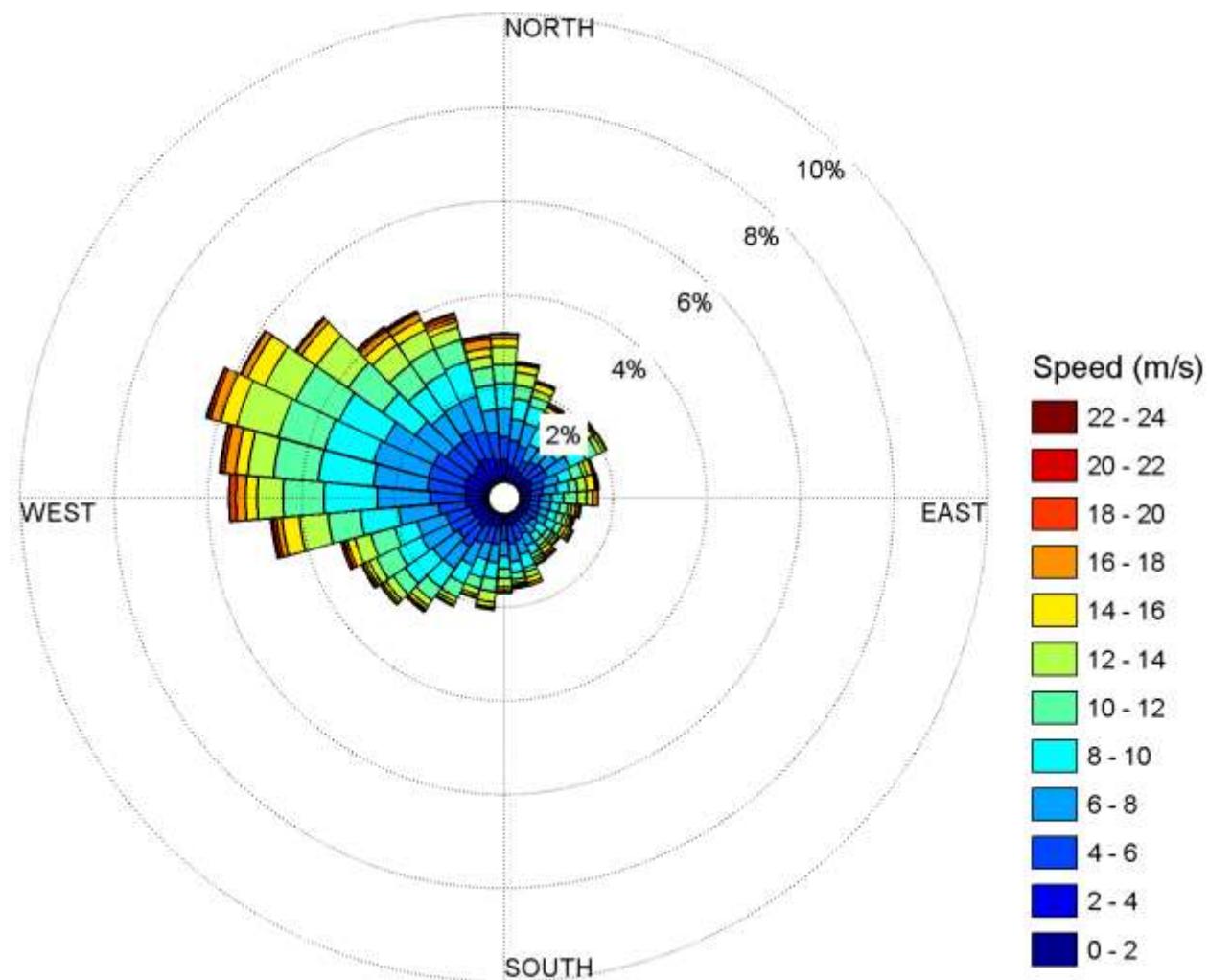


**ANNEXE A – LES VENTS**

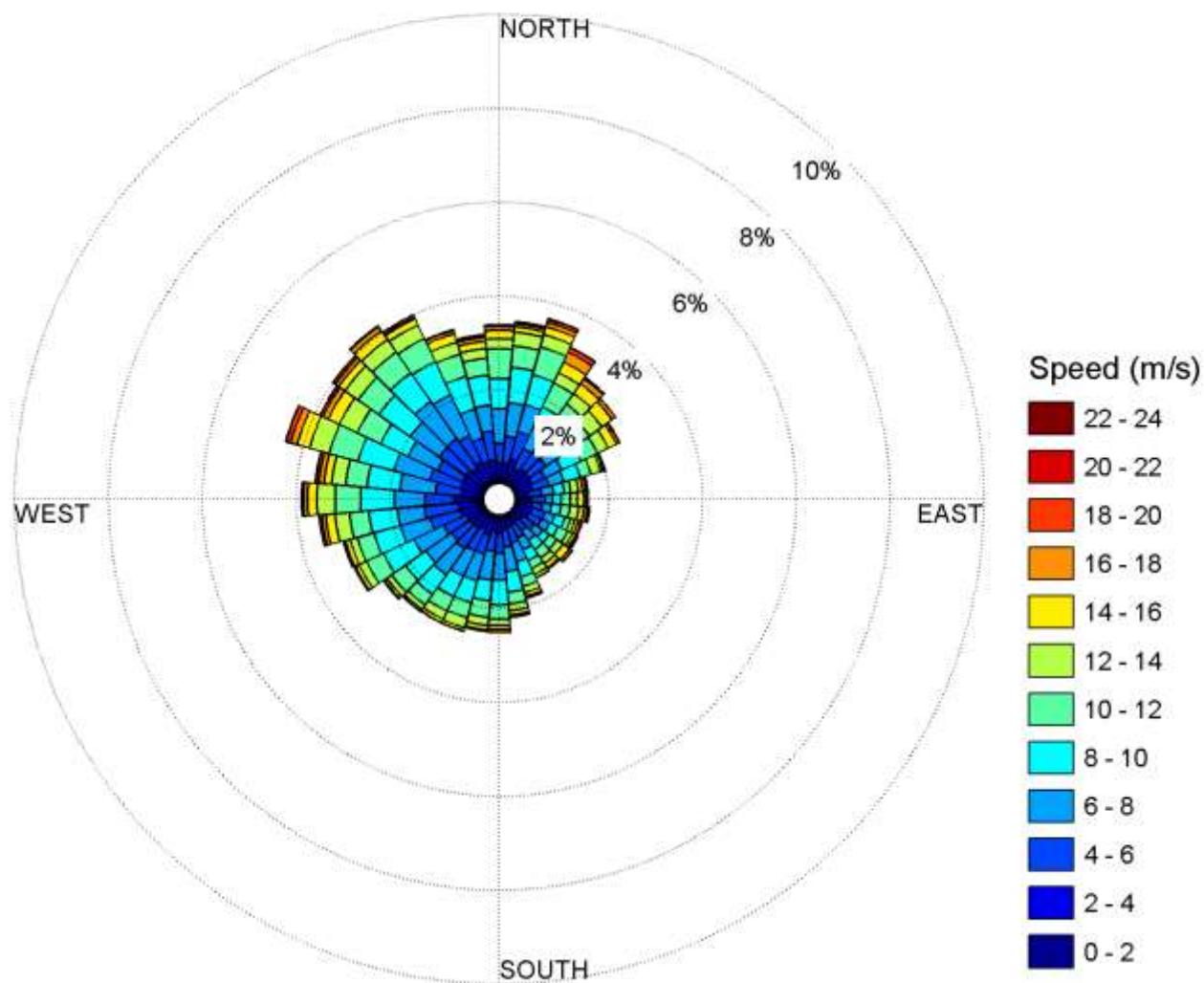
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for January



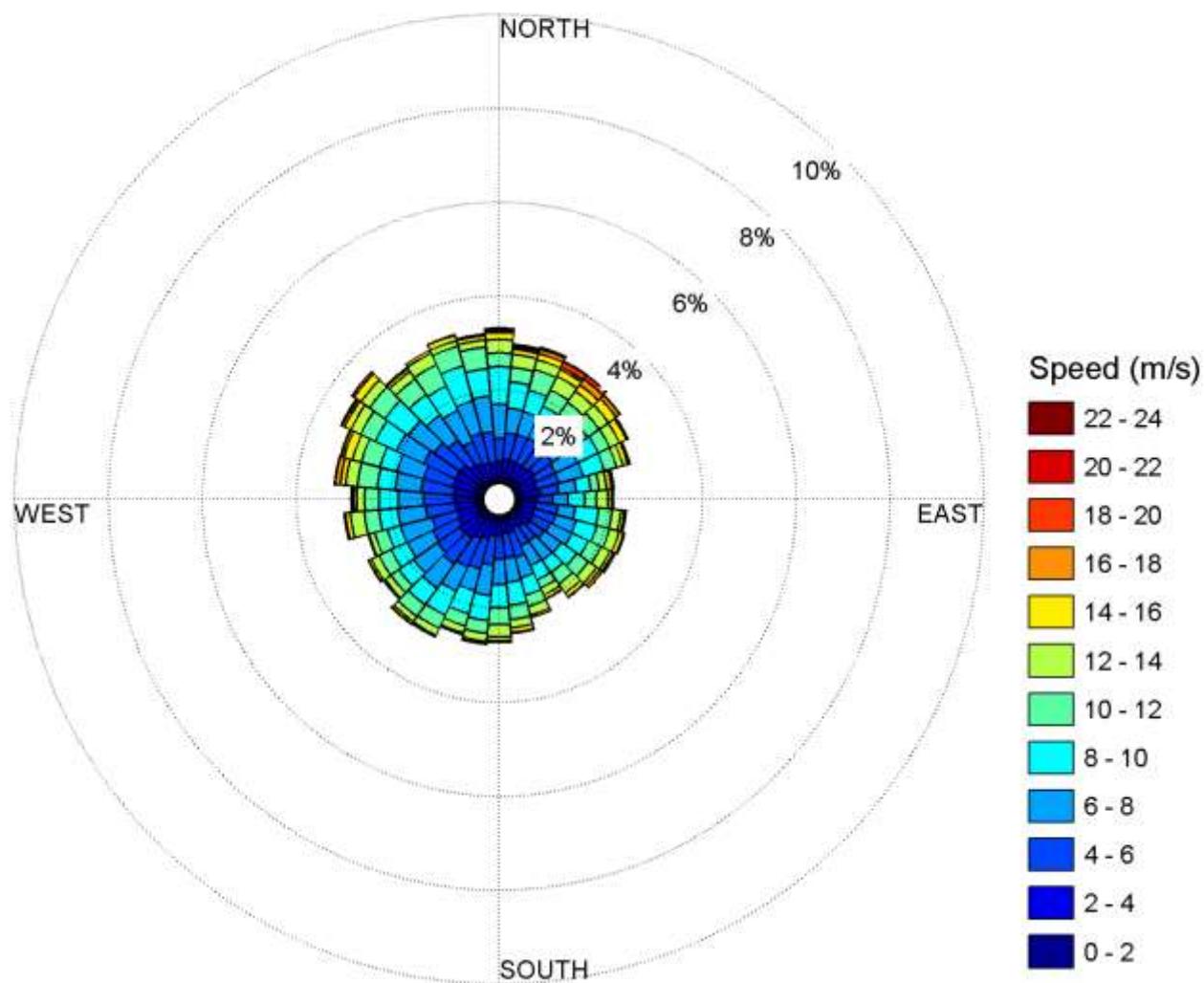
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for February



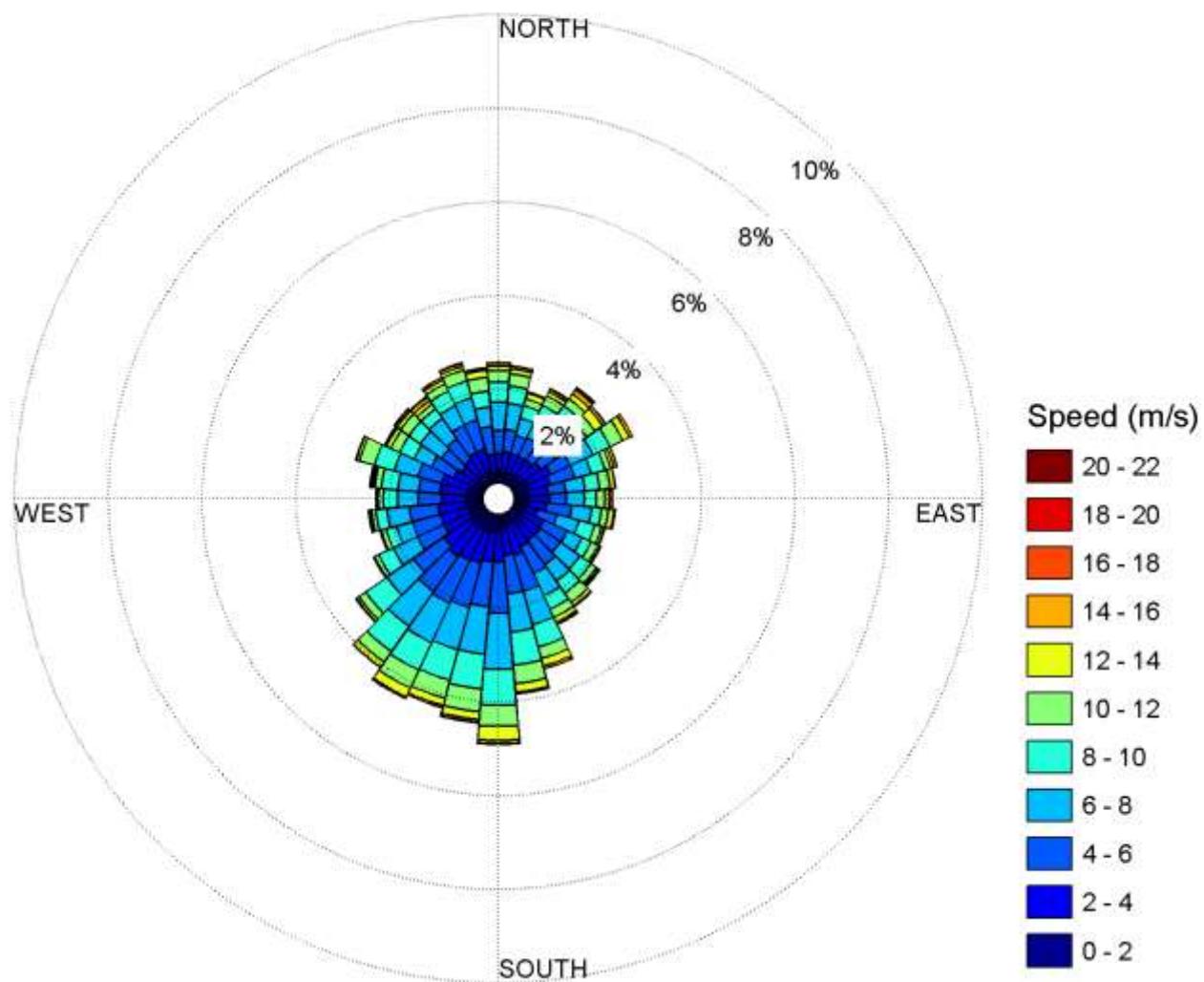
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for March



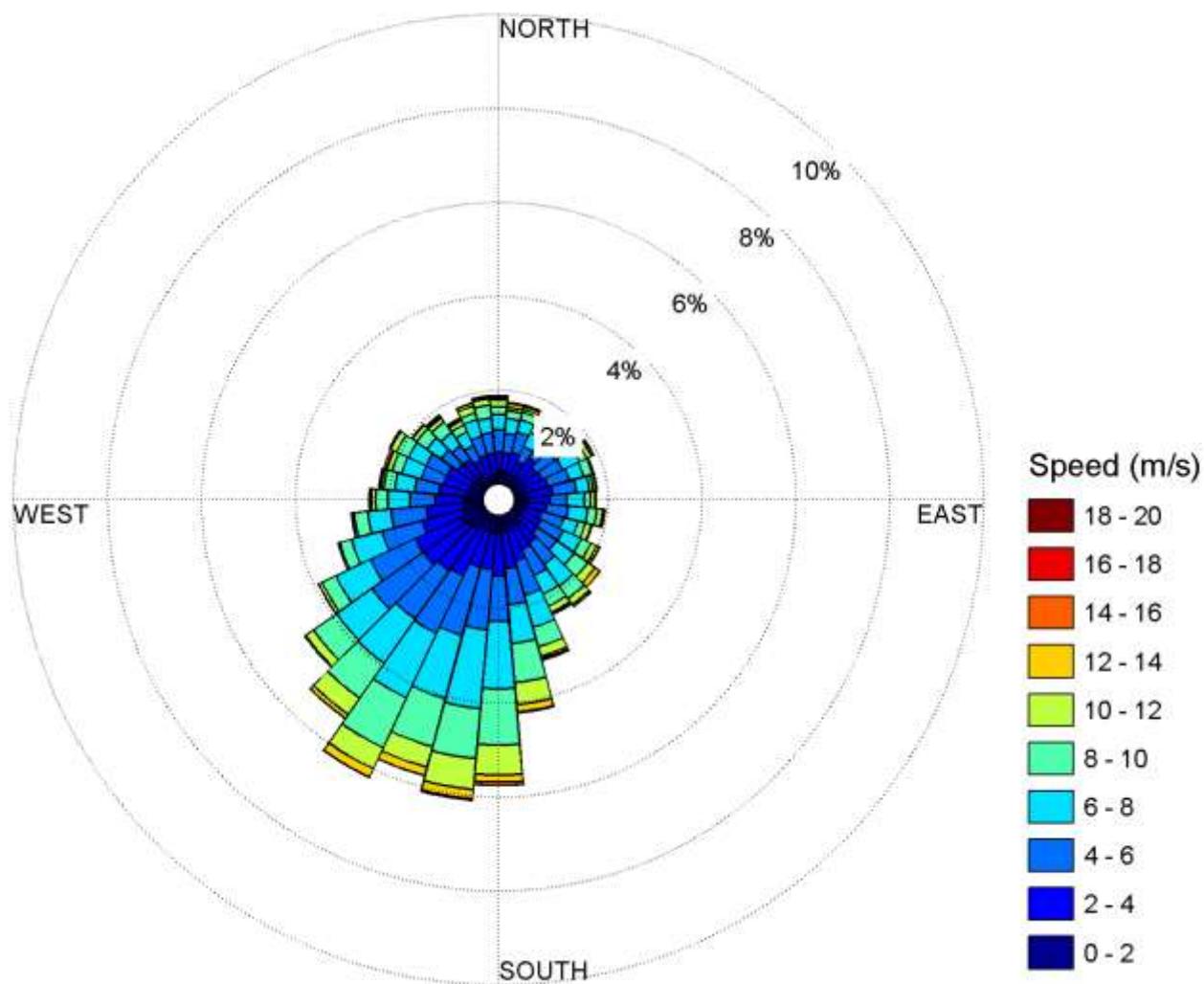
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for April



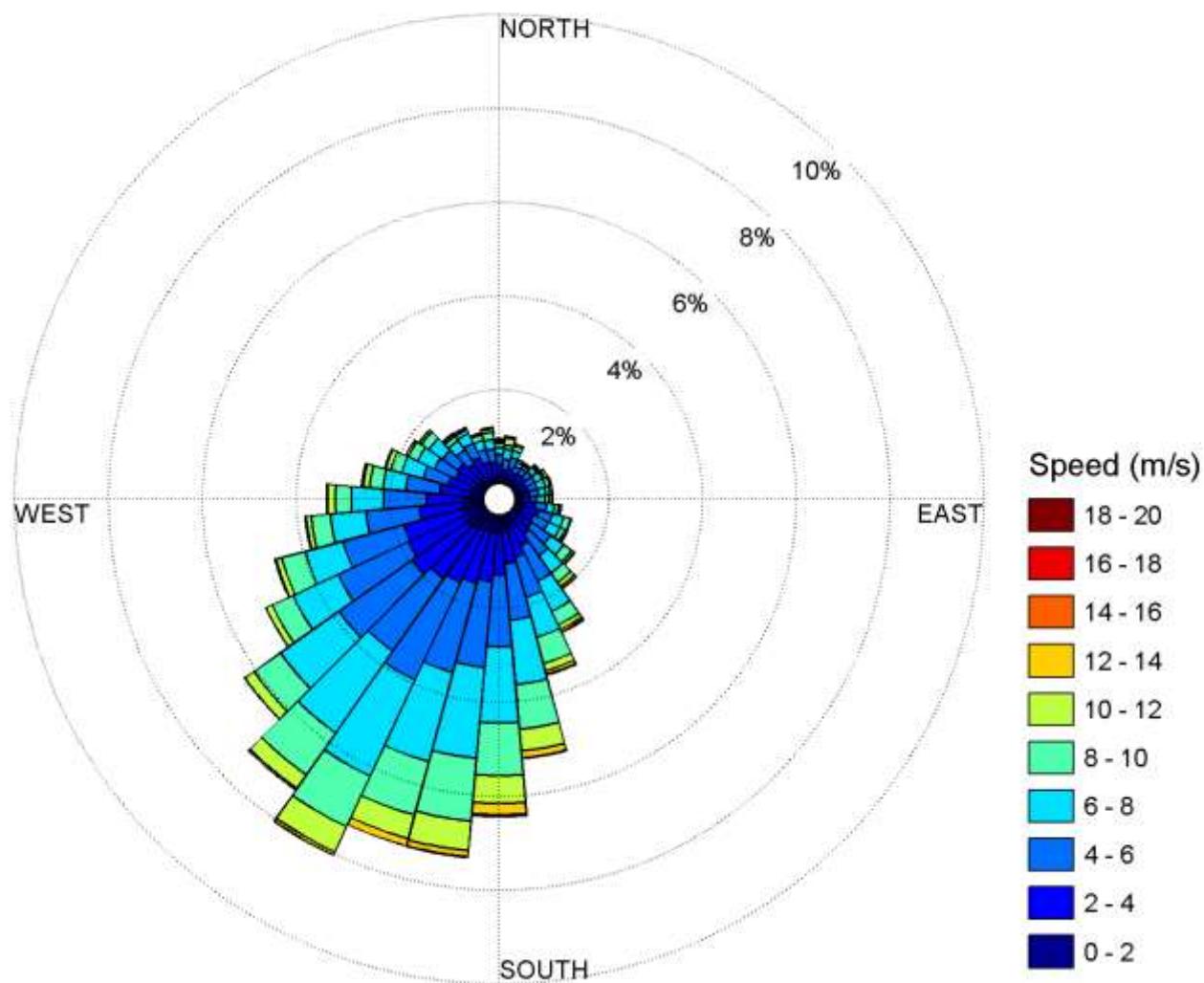
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for May



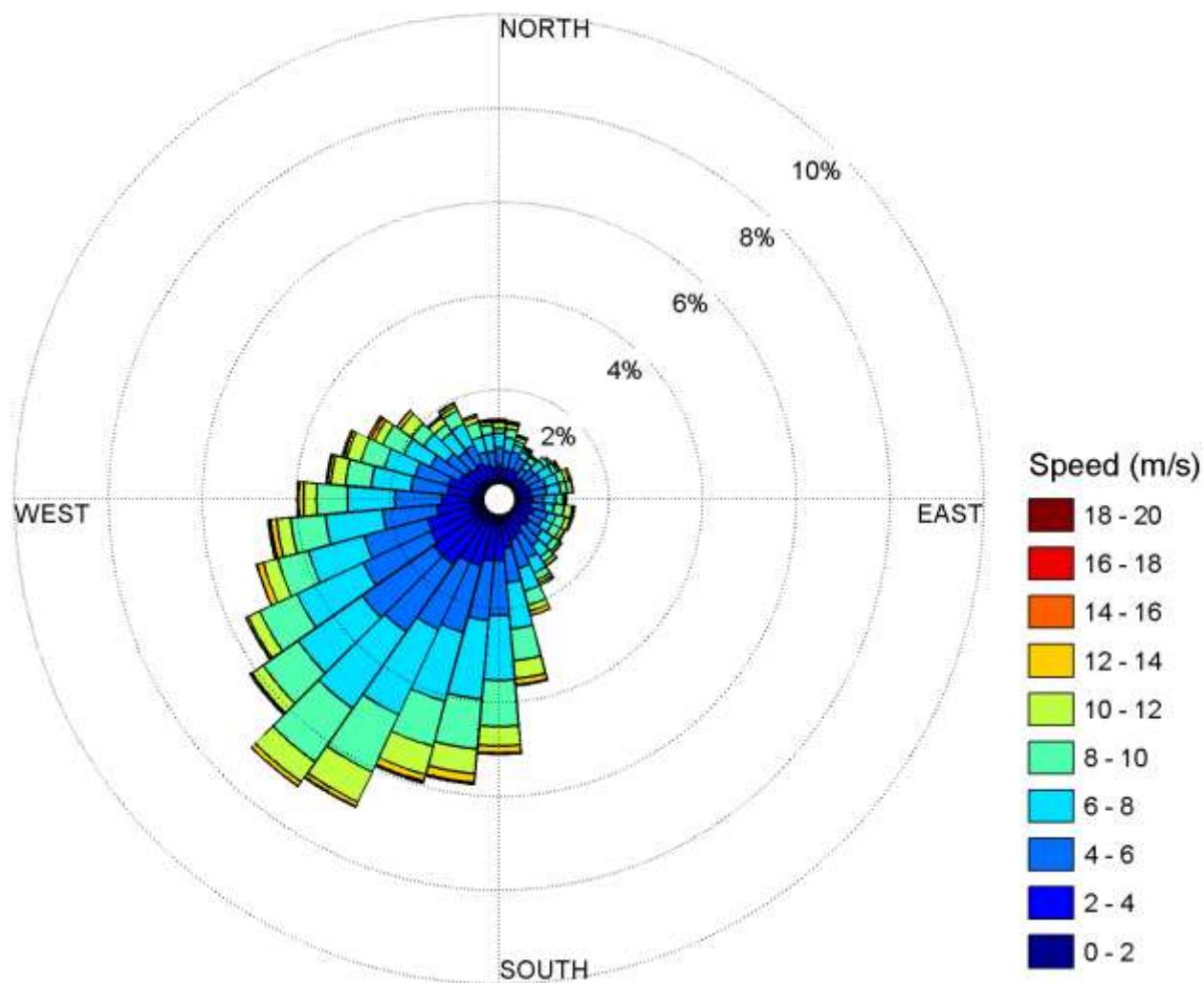
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for June



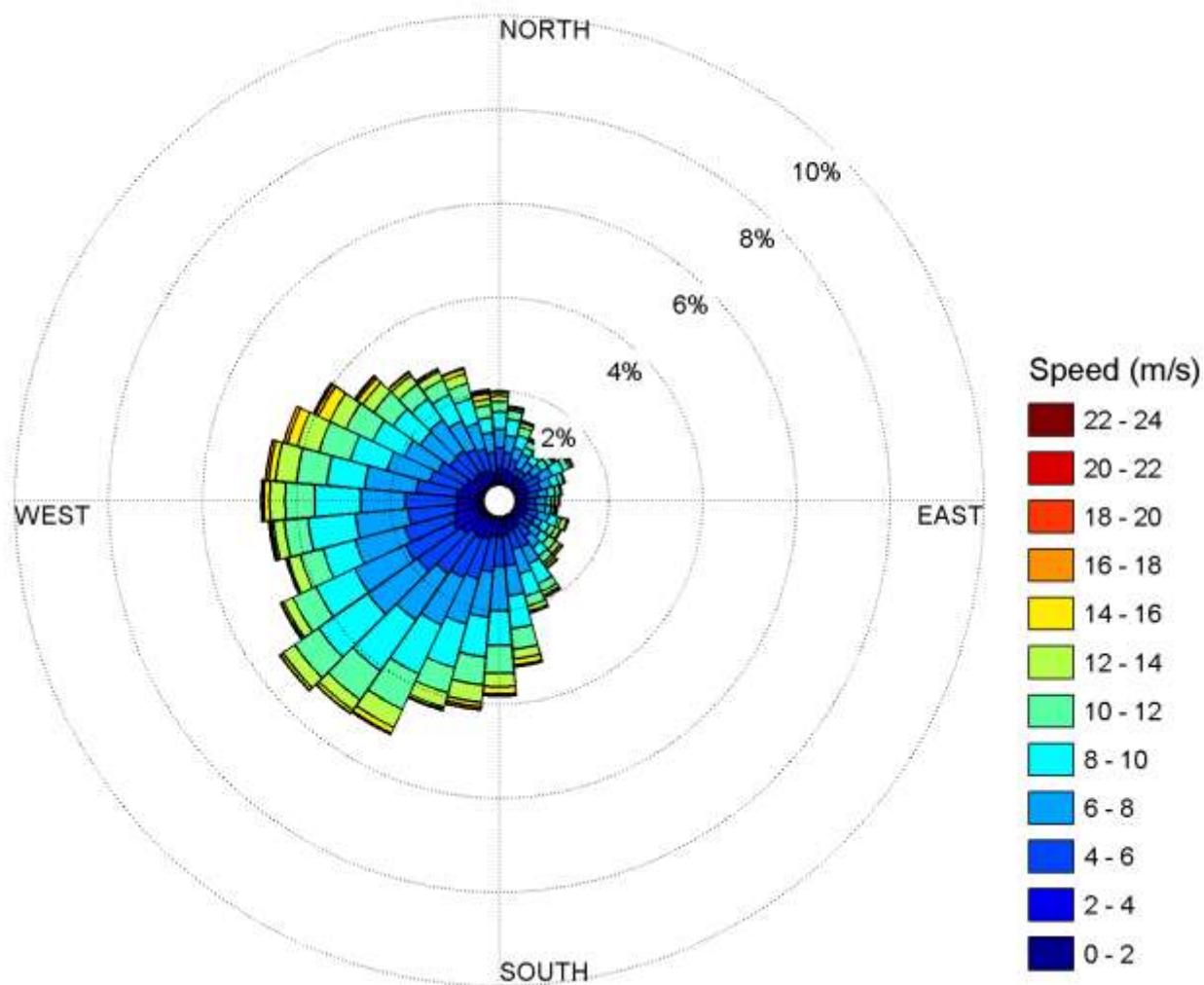
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for July



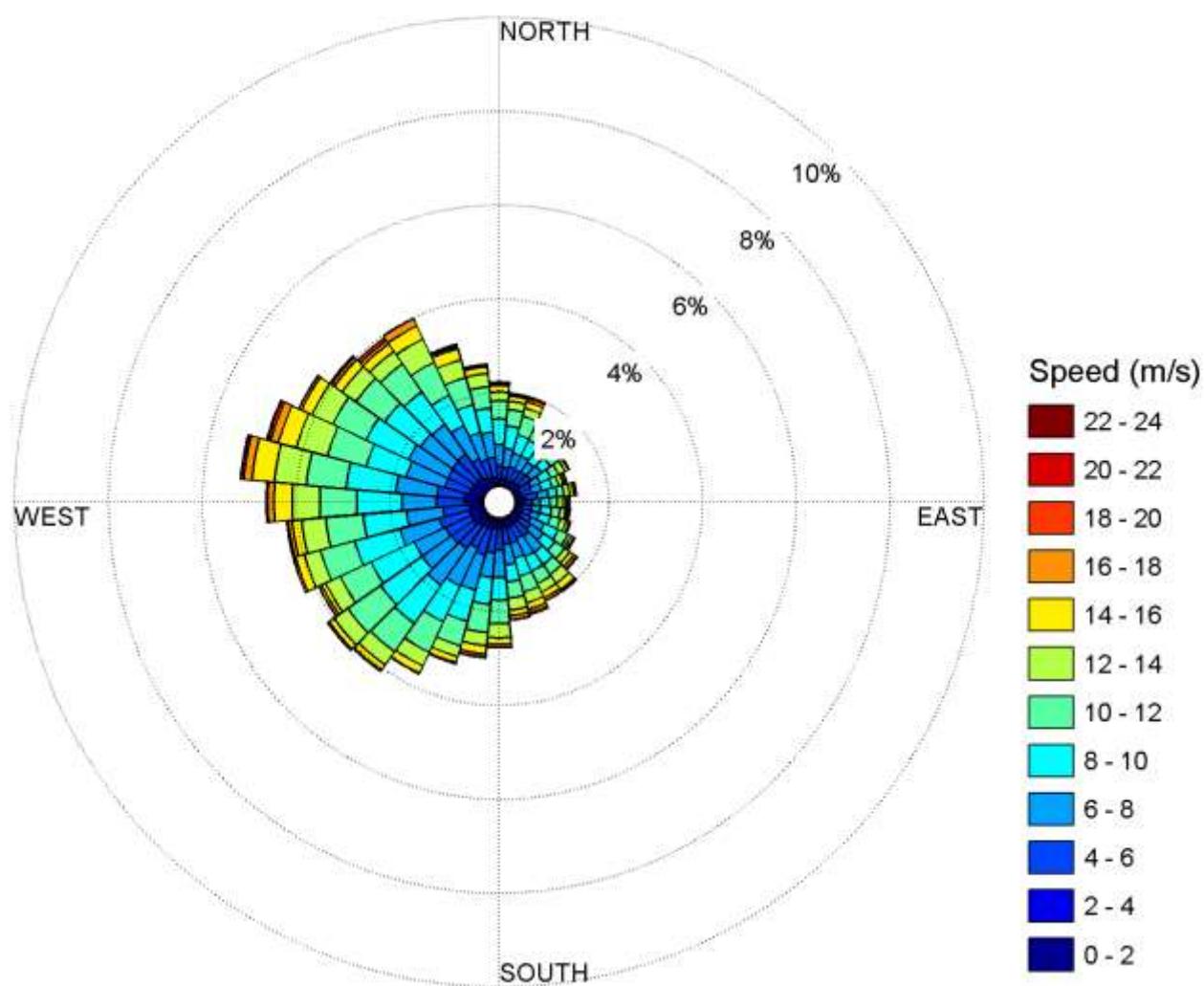
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for August



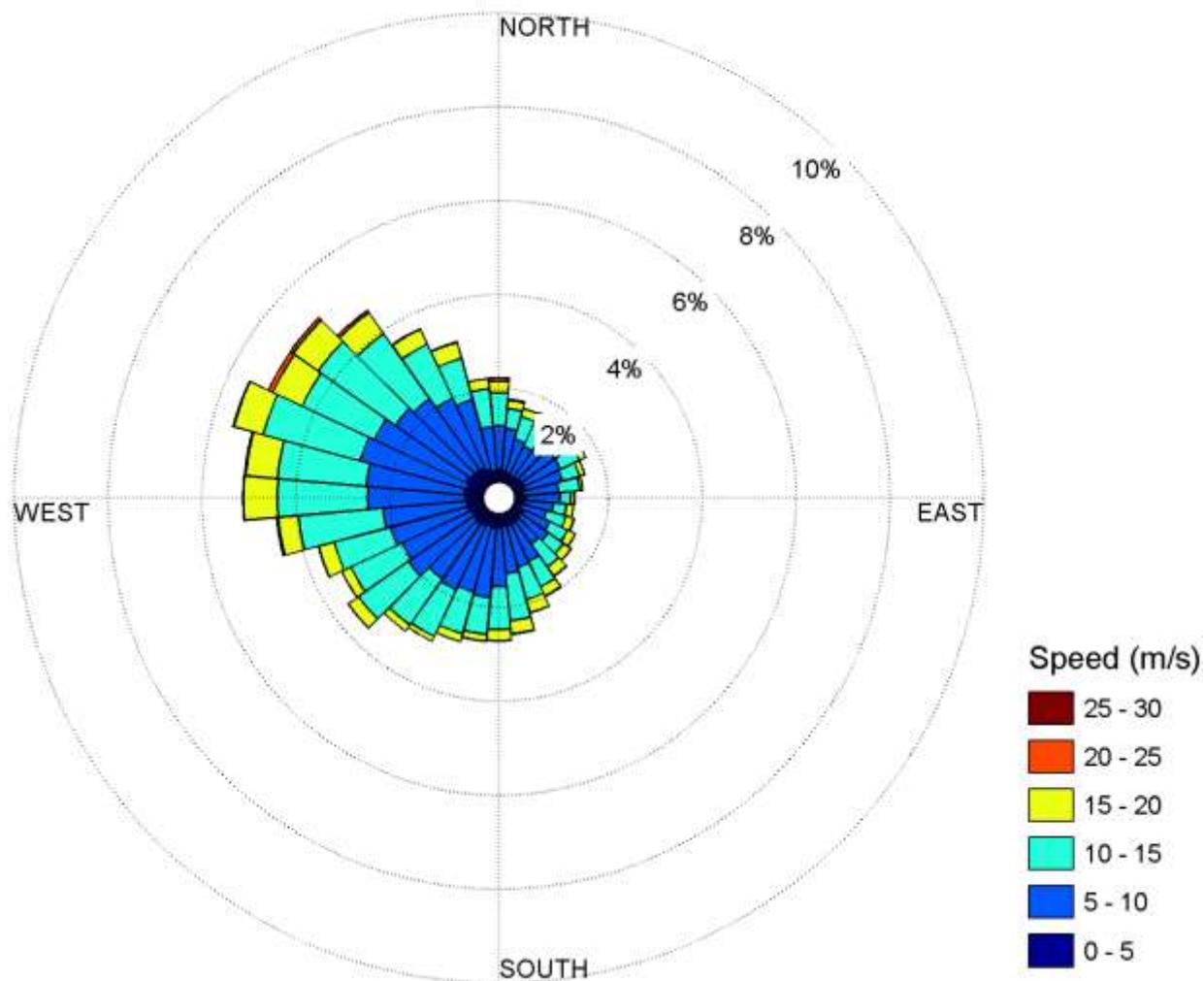
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for September



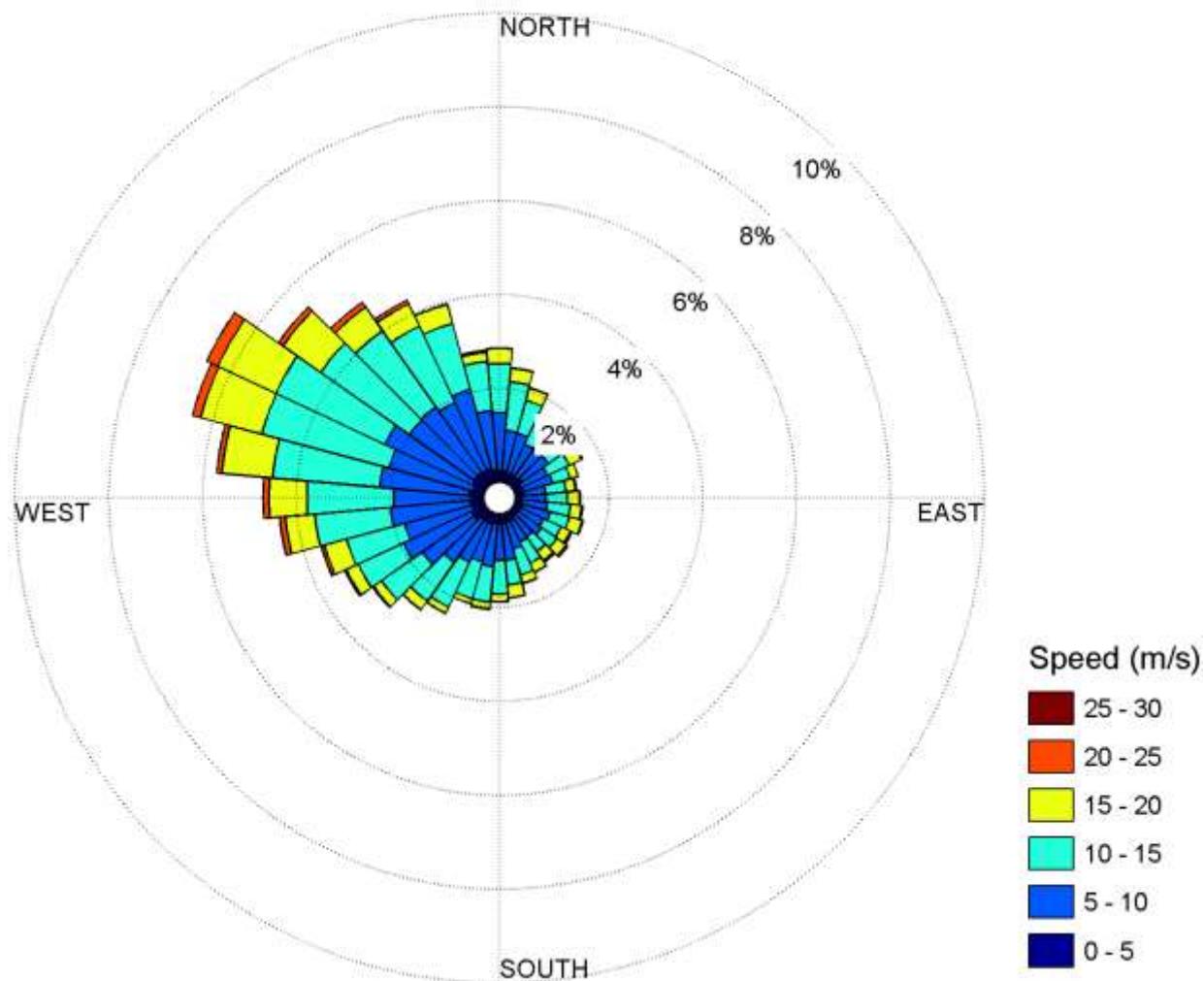
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for October



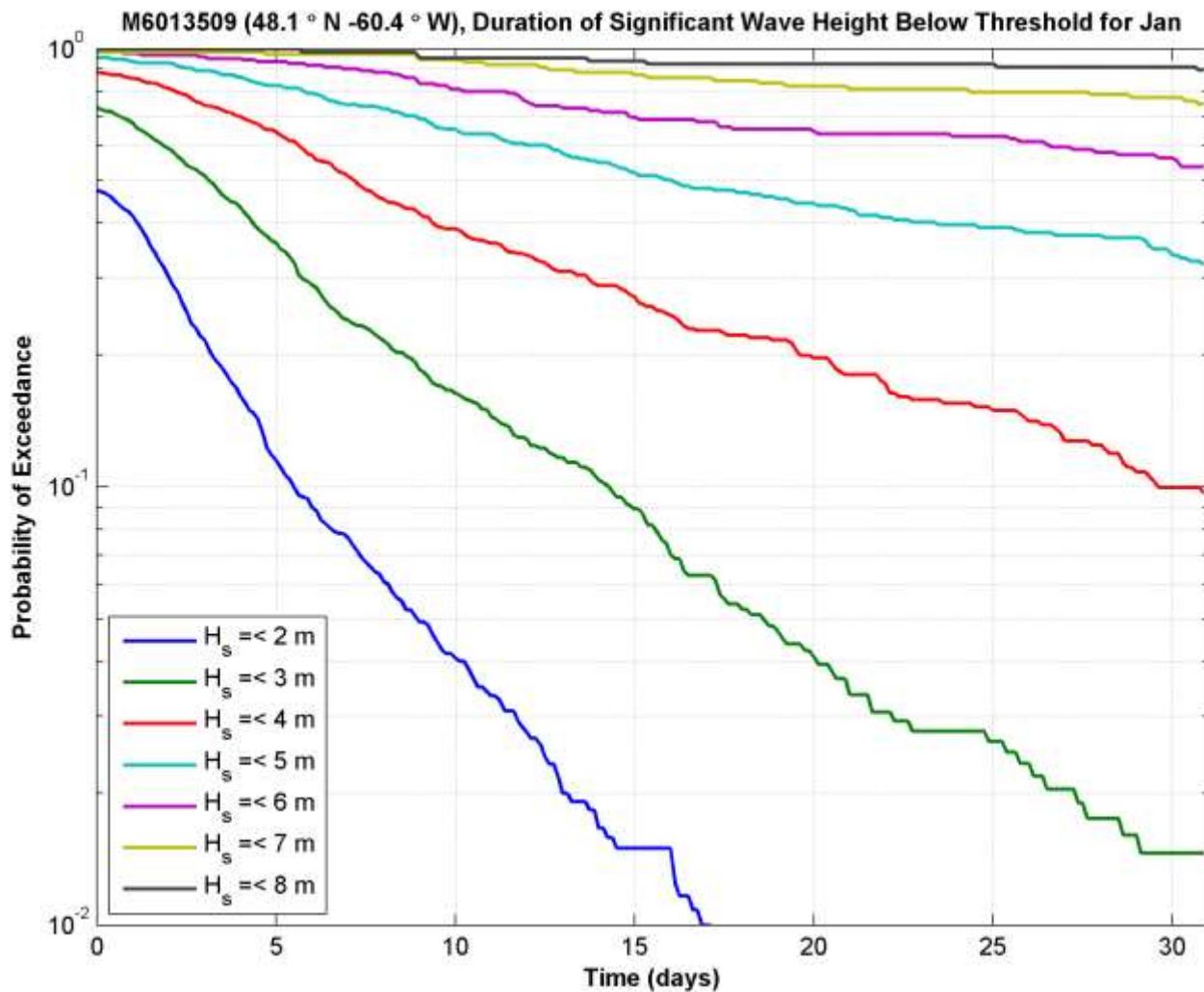
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for November

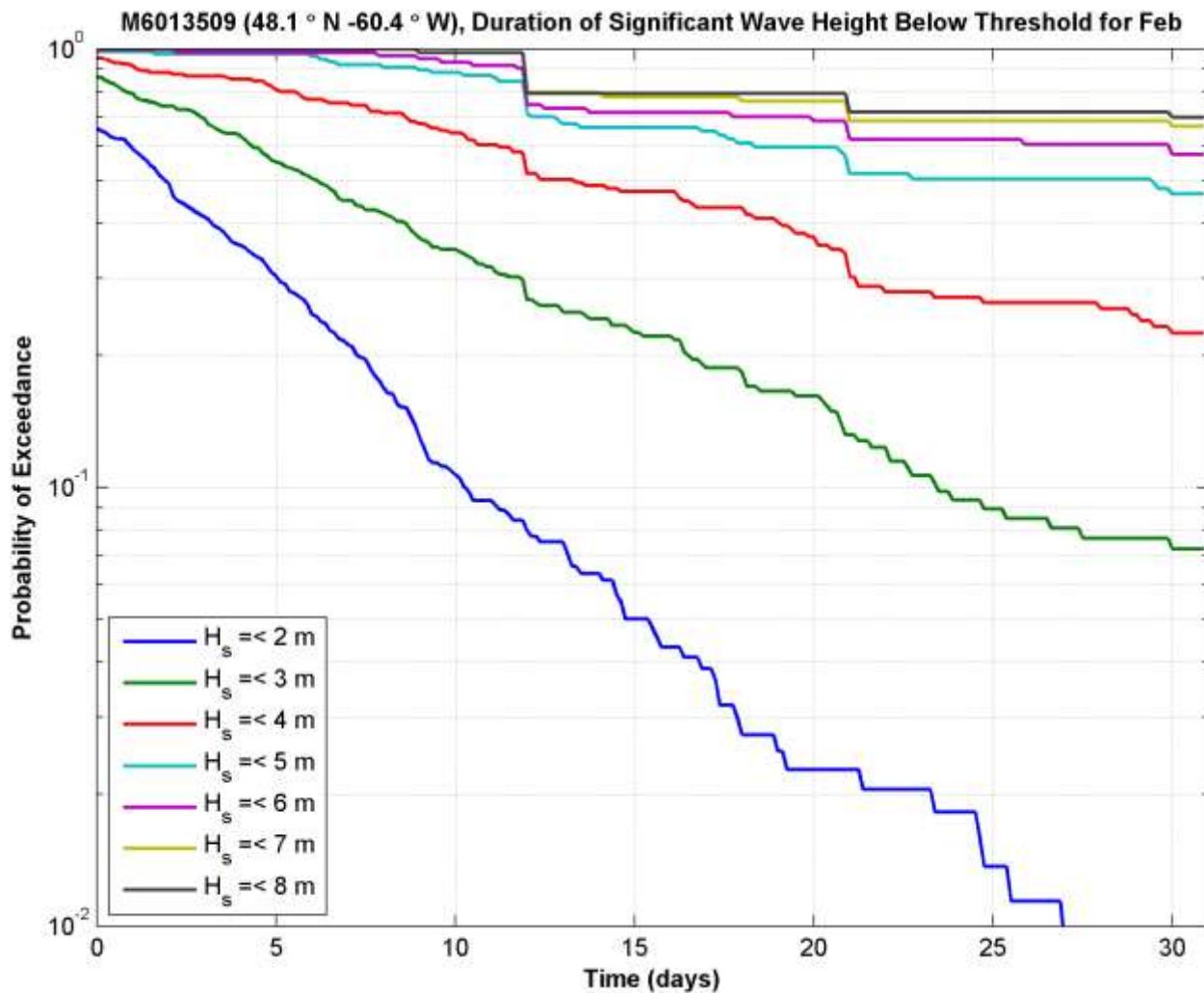


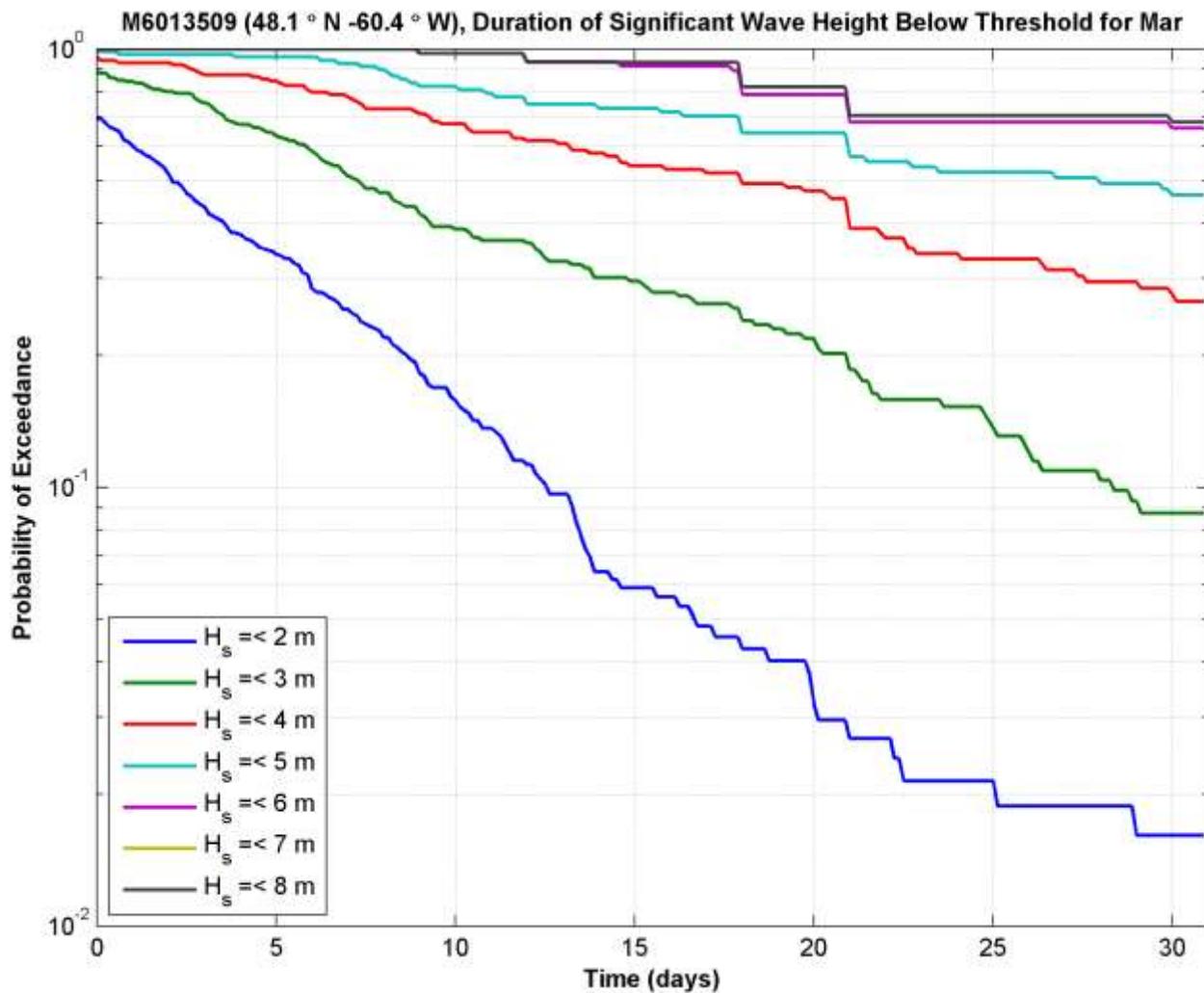
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wind Speed and Direction for December

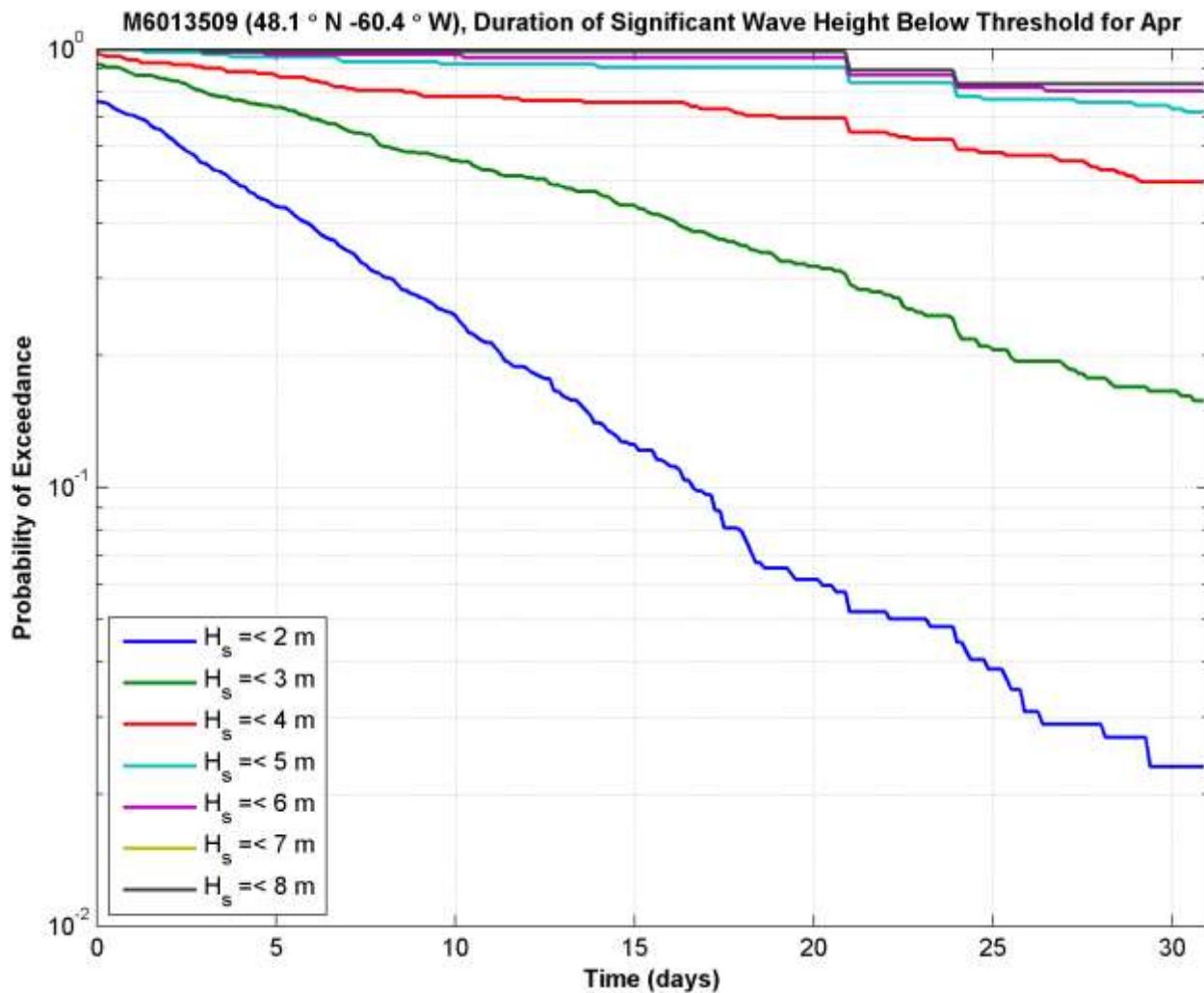


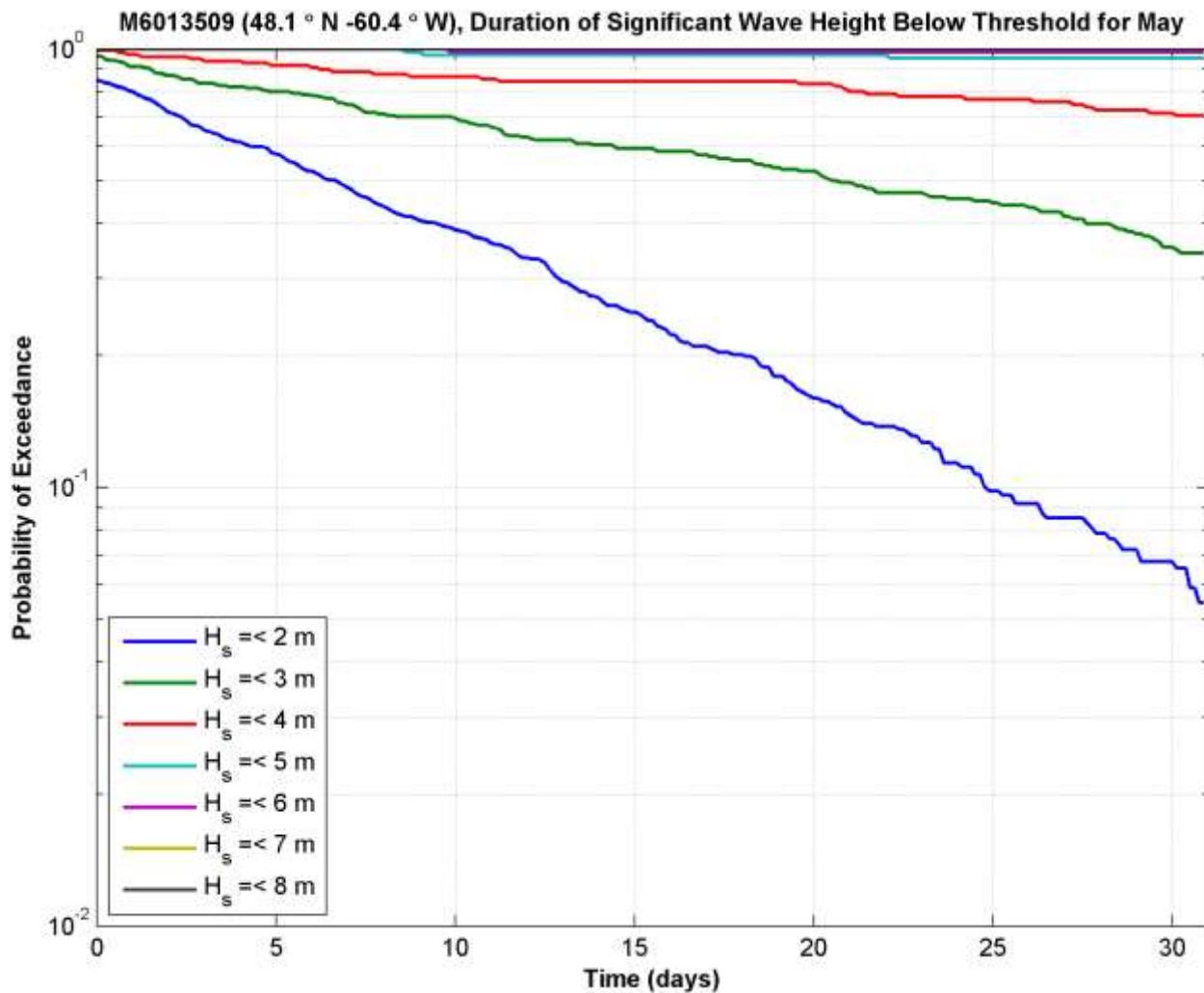
## ANNEXE B – LES VAGUES

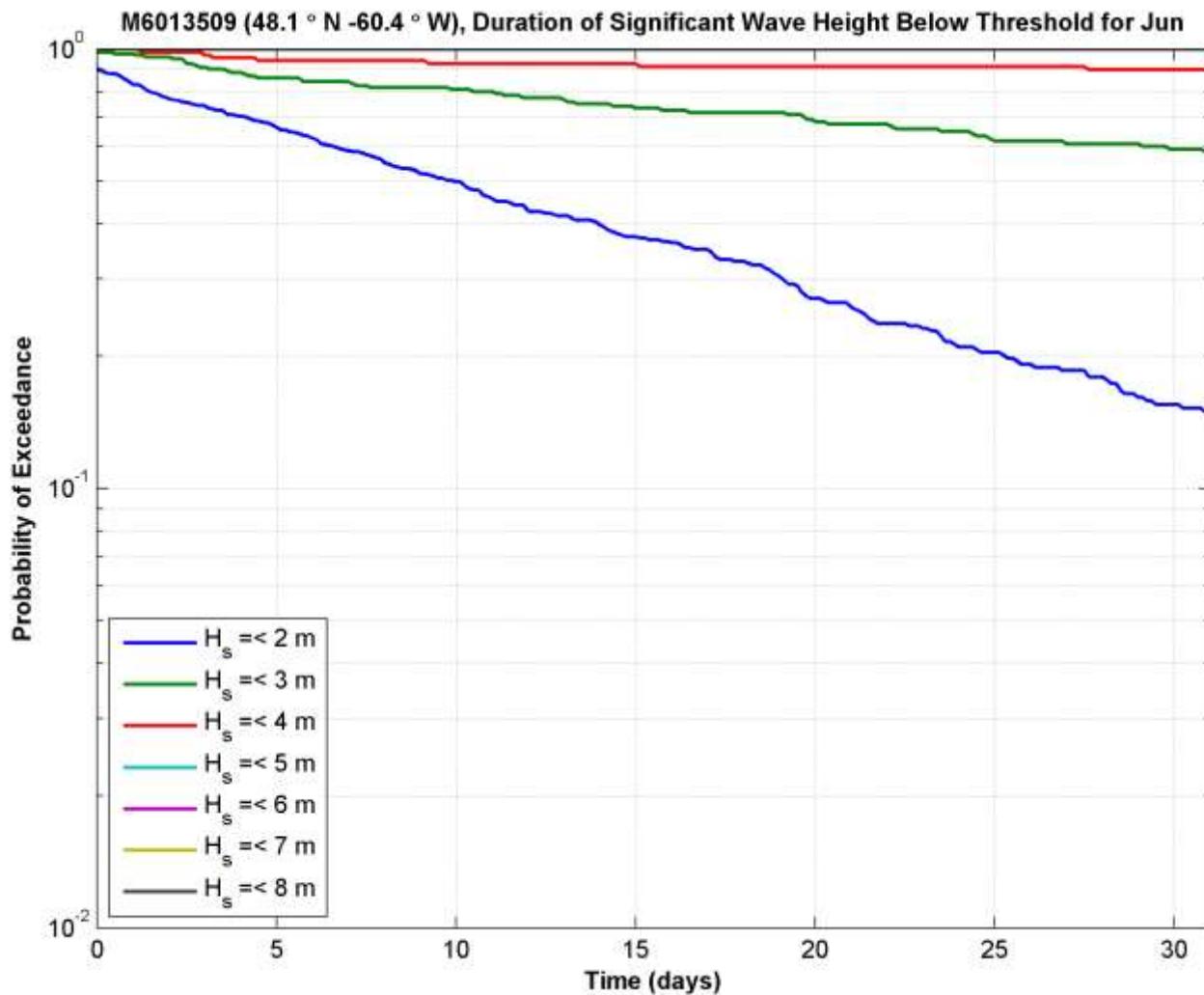


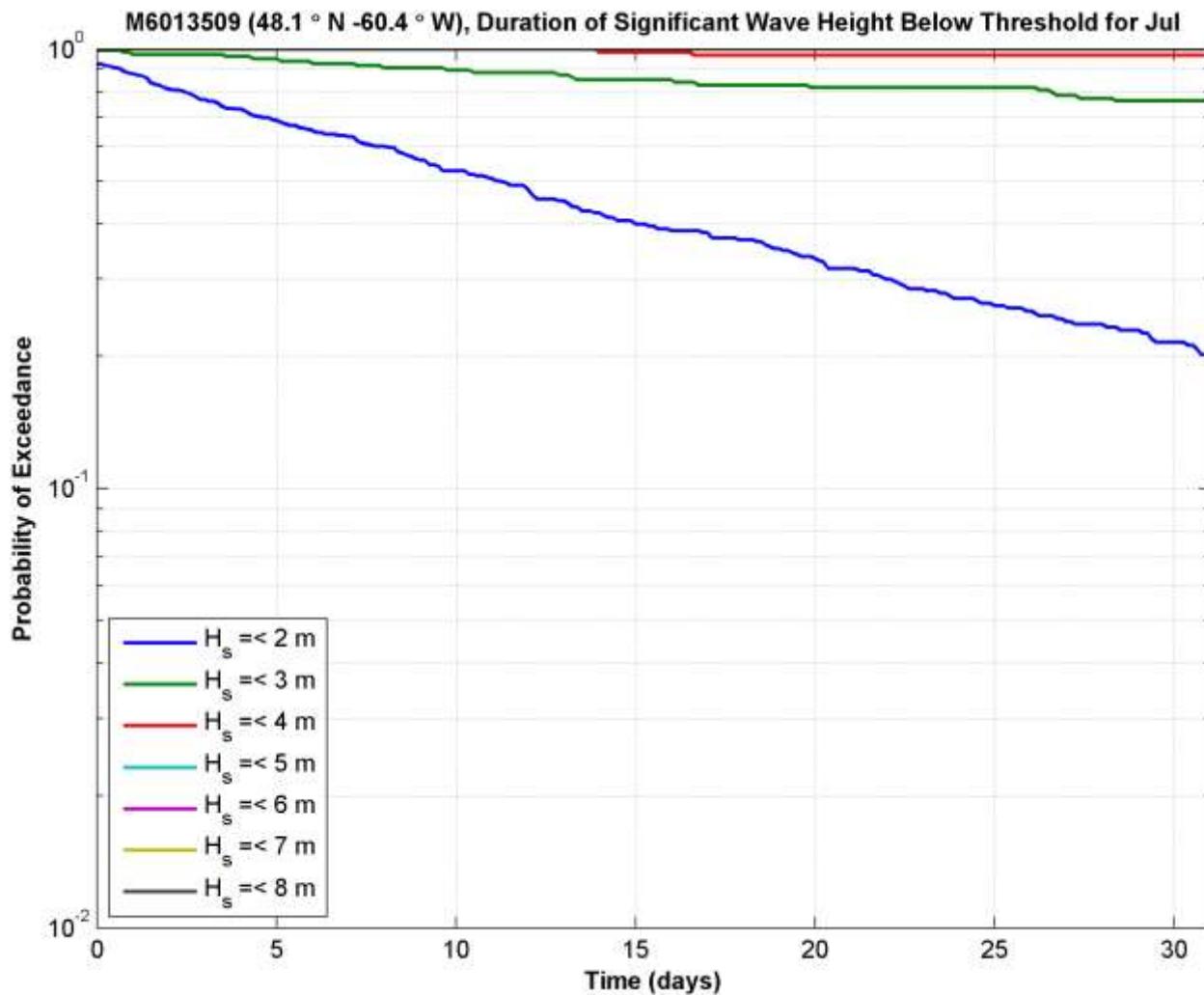


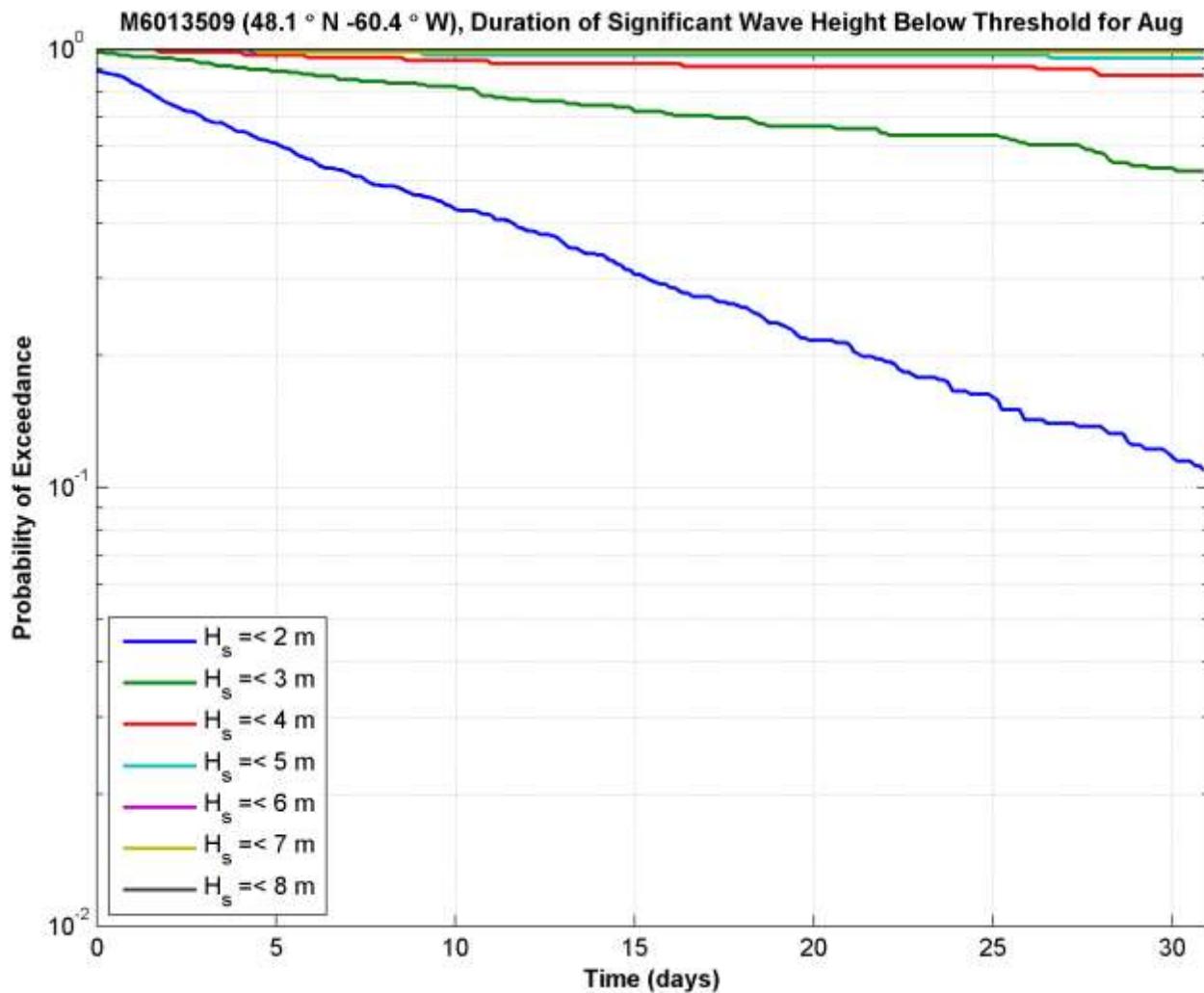


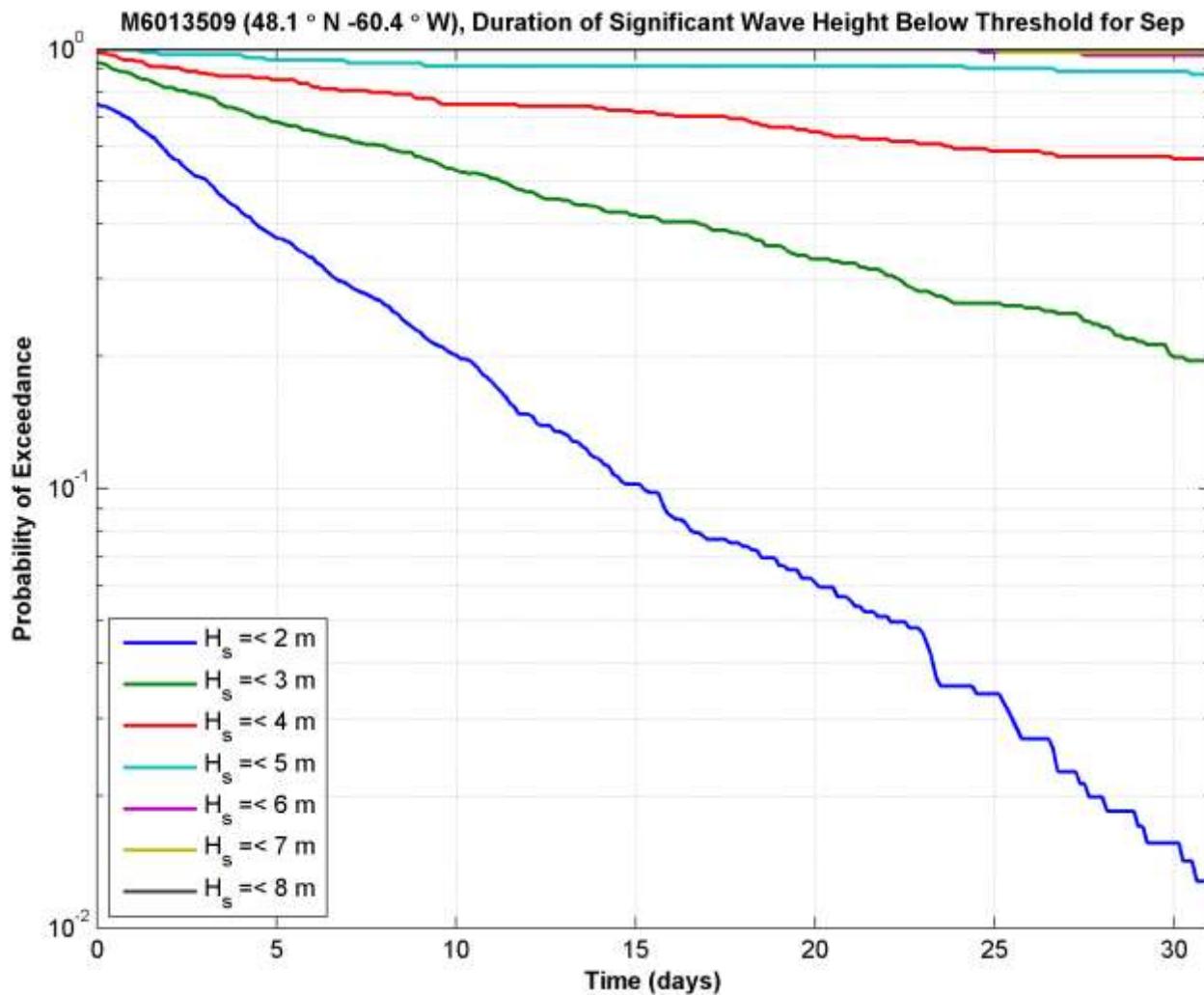


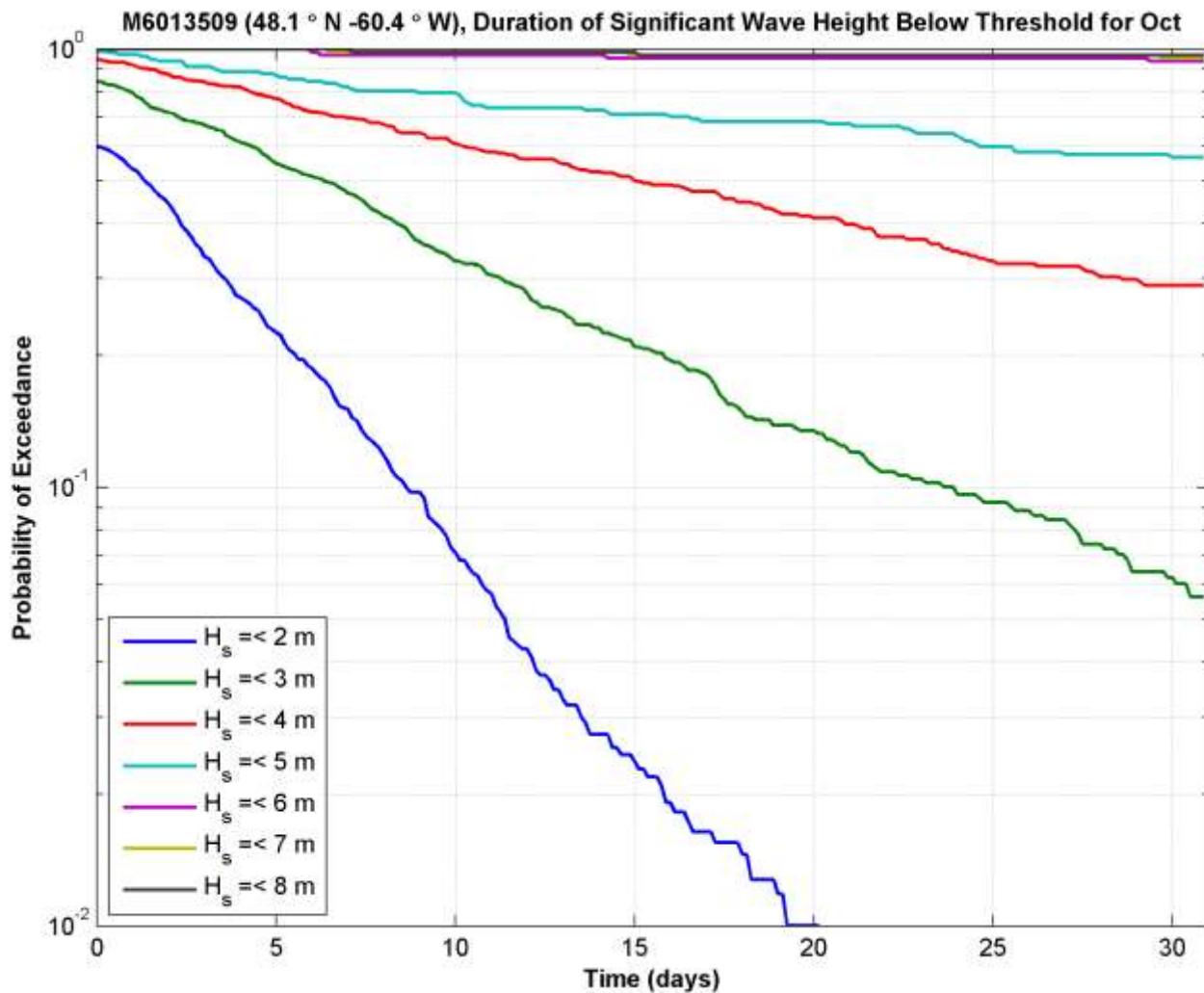


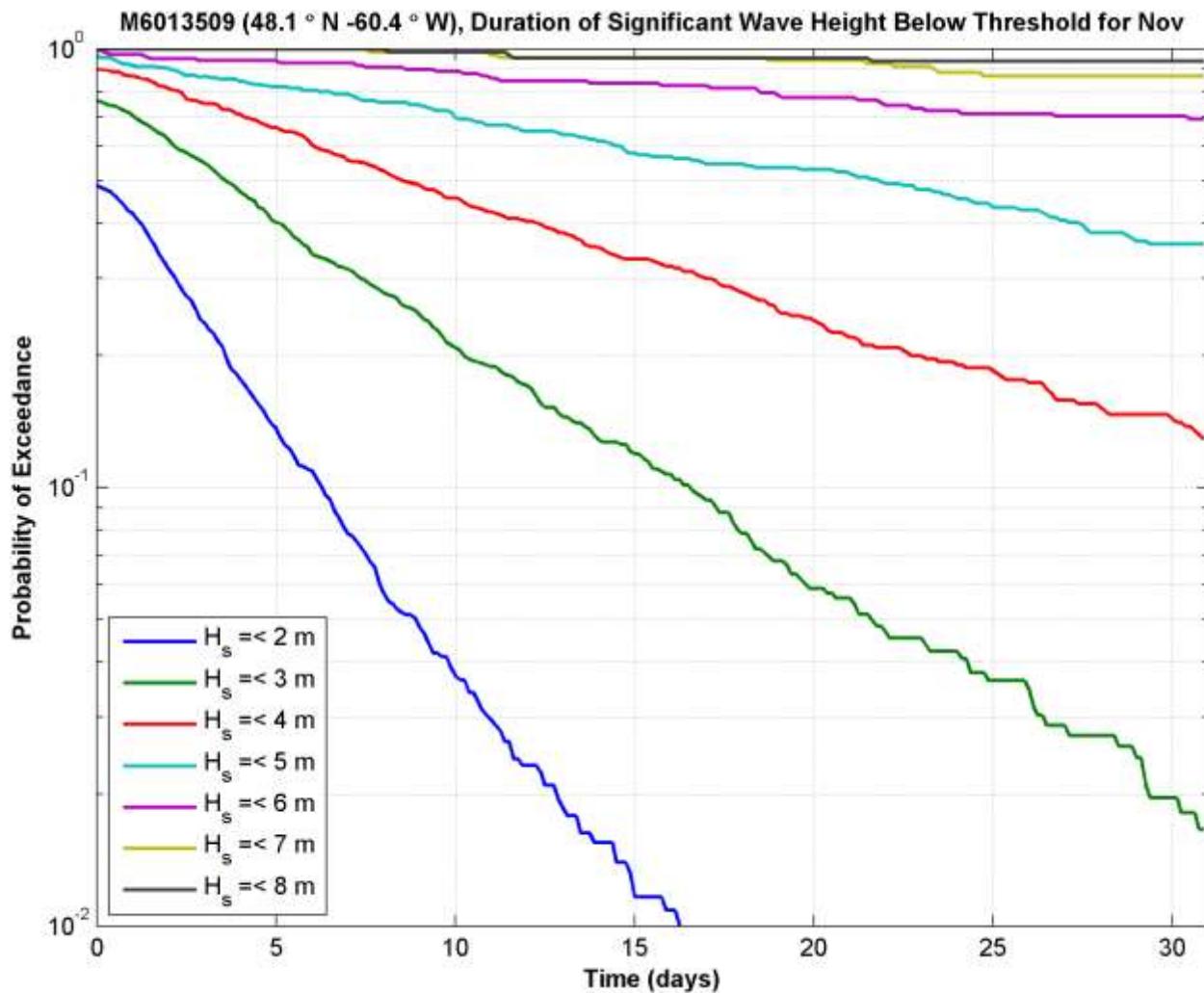


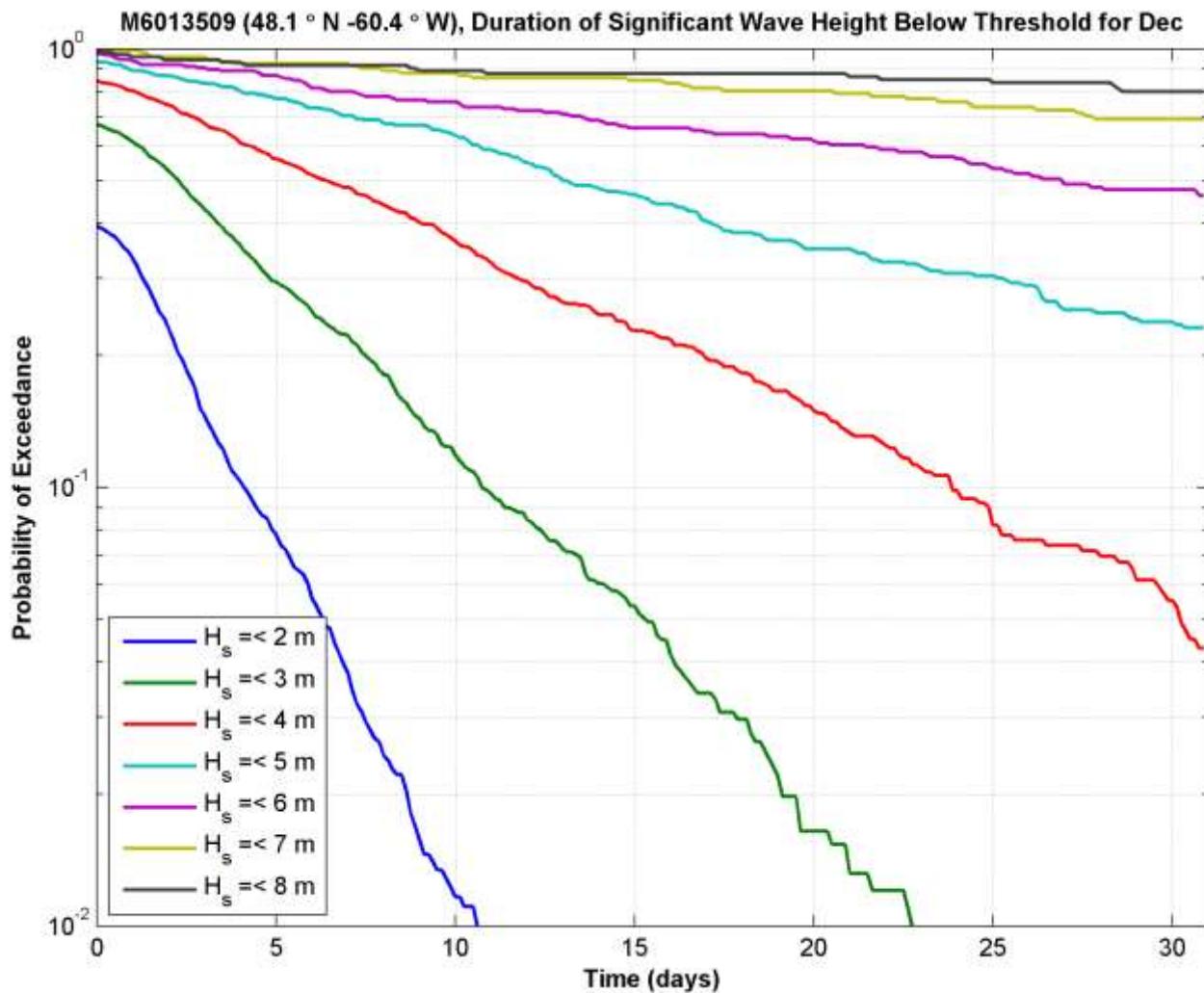












48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for January											
		Sig. Wave Height (m)											
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Wave Period (s)	0-1	8.065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.423	0.553	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	0.8	5.054	0.132	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.188	11.326	3.226	0.011	0	0	0	0	0	0	0	0
	6-7	0.004	5.32	12.021	0.524	0.002	0	0	0	0	0	0	0
	7-8	0	0.715	10.197	10.047	0.374	0	0	0	0	0	0	0
	8-9	0.067	0.379	0.797	6.922	4.29	0.166	0	0	0	0	0	0
	9-10	0.047	0.11	0.199	0.421	4.366	2.33	0.143	0	0	0	0	0
	10-11	0.052	1.391	0.874	0.437	0.414	1.676	1.172	0.078	0	0	0	0
	11-12	0.094	0.556	0.32	0.22	0.081	0.06	0.24	0.408	0.197	0.007	0	0
	12-13	0.027	0.307	0.085	0.045	0.031	0.018	0.016	0.018	0.045	0.067	0	0
	13-14	0.052	0.869	0.217	0.11	0.103	0.007	0.016	0.025	0	0	0	0
	14-15	0	0.076	0.121	0.078	0	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0	0.013	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for February									
		Sig. Wave Height (m)									
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Wave Period (s)	0-1	45.961	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0.086	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.425	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.986	0.551	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	1.836	5.841	0.059	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.342	8.166	2.08	0.007	0	0	0	0	0	0
	6-7	0.007	2.942	7.82	0.388	0.002	0	0	0	0	0
	7-8	0.047	0.401	3.891	4.194	0.199	0	0	0	0	0
	8-9	0.049	0.14	0.285	2.136	1.549	0.084	0	0	0	0
	9-10	0.061	0.093	0.12	0.118	1.01	0.524	0.049	0	0	0
	10-11	0.256	2.021	0.956	0.28	0.135	0.273	0.317	0.007	0	0
	11-12	0.103	0.563	0.393	0.138	0.047	0.017	0.039	0.044	0	0
	12-13	0.042	0.548	0.086	0.027	0.002	0.007	0.01	0.002	0.007	0
	13-14	0.088	0.622	0.093	0.081	0.069	0.017	0.005	0.005	0.005	0
	14-15	0	0.096	0.061	0	0.01	0	0	0	0	0
	15-16	0	0.012	0.002	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0.022	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.002	0	0	0	0.005	0	0	0	0	0
	18-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19-20	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for March								
		Sig. Wave Height (m)								
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Wave Period (s)	0-1	53.622	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0.594	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.748	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	1.154	0.419	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	1.906	4.675	0.043	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.338	7.905	1.472	0	0	0	0	0	0
	6-7	0.013	2.722	5.804	0.22	0.002	0	0	0	0
	7-8	0.06	0.569	3.976	2.744	0.114	0	0	0	0
	8-9	0.074	0.459	0.332	1.723	1.024	0.049	0	0	0
	9-10	0.025	0.146	0.199	0.179	0.992	0.399	0.022	0	0
	10-11	0.172	0.966	0.789	0.318	0.134	0.356	0.222	0	0
	11-12	0.15	0.417	0.025	0.018	0.011	0	0	0	0
	12-13	0.065	0.249	0.029	0.011	0.02	0.007	0.011	0	0
	13-14	0.26	0.753	0.168	0.025	0.018	0	0	0	0
	14-15	0.022	0.049	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0
	18-19	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0
	19-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W	Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for April								
	Sig. Wave Height (m)								
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Wave Period (s)	0-1	16.262	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0.836	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	1.069	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	1.898	0.657	0	0	0	0	0	0
	4-5	3.197	8.549	0.079	0	0	0	0	0
	5-6	0.729	14.863	2.178	0.005	0	0	0	0
	6-7	0.125	5.877	9.521	0.134	0	0	0	0
	7-8	0.419	1.778	6.549	4.407	0.086	0	0	0
	8-9	0.25	1.715	0.935	3.354	1.065	0.032	0	0
	9-10	0.076	0.657	0.16	0.183	1.056	0.294	0	0
	10-11	1.12	3.671	1.53	0.387	0.171	0.375	0.134	0
	11-12	0.336	1.067	0.148	0.079	0.005	0.005	0.063	0.058
	12-13	0.113	0.273	0.144	0.019	0.005	0.005	0	0
	13-14	0.519	0.639	0.016	0.019	0.019	0.005	0	0
	14-15	0.044	0.019	0.03	0	0	0	0	0
	15-16	0	0.016	0	0	0	0	0	0
	16-17	0	0.009	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.002	0	0	0	0	0	0	0
	18-19	0	0	0	0	0	0	0	0
	19-20	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-21	0.014	0	0	0	0	0	0	0
	21-22	0.009	0	0	0	0	0	0	0
	22-23	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for May								
		Sig. Wave Height (m)								
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Wave Period (s)	0-1	0.97	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0.123	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.217	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.701	0.327	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	2.811	10.108	0.081	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.954	21.832	2.238	0	0	0	0	0	0
	6-7	0.6	9.039	10.6	0.09	0	0	0	0	0
	7-8	1.839	5.04	6.38	3.327	0.069	0	0	0	0
	8-9	1.478	6.064	0.78	2.487	0.54	0.009	0	0	0
	9-10	0.414	0.974	0.159	0.13	0.641	0.184	0.007	0	0
	10-11	1.024	3.58	0.86	0.094	0.052	0.081	0.02	0	0
	11-12	0.323	1.033	0.099	0.016	0	0	0.016	0	0
	12-13	0.04	0.152	0.06	0.052	0	0	0	0	0
	13-14	0.699	0.276	0.009	0.013	0.018	0	0	0	0
	14-15	0.085	0	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0.022	0	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0.043	0.036	0	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.054	0	0	0	0	0	0	0	0
	18-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19-20	0.031	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for June							
		Sig. Wave Height (m)							
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
Wave Period (s)	0-1	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.065	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.907	0.306	0	0	0	0	0	0
	4-5	2.963	12.412	0.046	0	0	0	0	0
	5-6	1.681	25.007	1.745	0	0	0	0	0
	6-7	0.947	9.449	9.933	0.012	0	0	0	0
	7-8	2.738	6.192	5.444	2.086	0.005	0	0	0
	8-9	1.579	6.002	0.512	1.225	0.273	0	0	0
	9-10	0.245	0.669	0.144	0.065	0.294	0.023	0	0
	10-11	1.544	2.058	0.528	0.072	0.005	0.035	0.016	0
	11-12	0.331	0.488	0.025	0	0	0	0	0
	12-13	0	0.016	0	0	0	0	0	0
	13-14	0.502	0.451	0	0	0	0	0	0
	14-15	0.093	0.074	0.005	0.007	0	0	0	0
	15-16	0.021	0.049	0	0	0	0	0	0
	16-17	0.13	0.377	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.016	0.116	0	0	0	0	0	0
	18-19	0.019	0.014	0	0	0	0	0	0
	19-20	0.014	0.028	0	0	0	0	0	0
	20-21	0	0	0	0	0	0	0	0
	21-22	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for July						
		Sig. Wave Height (m)						
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
Wave Period (s)	0-1	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.905	0.379	0	0	0	0	0
	4-5	3.427	16.649	0.022	0	0	0	0
	5-6	1.254	28.533	1.25	0	0	0	0
	6-7	1.203	9.328	10.09	0.02	0	0	0
	7-8	2.173	5.954	4.7	1.577	0.002	0	0
	8-9	1.022	3.331	0.448	0.746	0.072	0	0
	9-10	0.211	0.318	0.099	0.06	0.105	0.022	0
	10-11	1.79	1.543	0.262	0.009	0.004	0	0
	11-12	0.211	0.697	0.047	0.004	0.002	0	0
	12-13	0	0.085	0	0	0	0	0
	13-14	0.547	0.379	0	0	0	0	0
	14-15	0	0.045	0	0	0	0	0
	15-16	0.022	0.022	0	0	0	0	0
	16-17	0.13	0.108	0	0	0	0	0
	17-18	0.049	0.101	0	0	0	0	0
	18-19	0.02	0.022	0	0	0	0	0
	19-20	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W	Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for August									
	Sig. Wave Height (m)									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Wave Period (s)	0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0.007	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.383	0.374	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	2.457	15.786	0.031	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.809	29.294	1.846	0.002	0	0	0	0	0
	6-7	0.865	9.512	12.173	0.034	0	0	0	0	0
	7-8	1.216	4.951	5.549	2.328	0.002	0	0	0	0
	8-9	0.428	2.959	0.446	1.375	0.19	0	0	0	0
	9-10	0.159	0.309	0.052	0.083	0.287	0.045	0	0	0
	10-11	1.745	1.546	0.282	0.065	0.011	0.034	0.02	0	0
	11-12	0.172	0.73	0.027	0	0.002	0	0	0	0
	12-13	0.013	0.074	0.007	0	0	0	0	0	0
	13-14	0.327	0.273	0.074	0	0.007	0.007	0.004	0.004	0
	14-15	0.013	0.177	0.029	0	0.002	0	0	0	0
	15-16	0.025	0.056	0.004	0	0	0	0	0	0
	16-17	0.052	0.022	0	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.011	0.076	0	0	0	0	0	0	0
	18-19	0	0.034	0	0	0	0	0	0	0
	19-20	0	0.092	0	0	0	0	0	0	0
	20-21	0	0.013	0	0	0	0	0	0	0
	21-22	0	0.016	0	0	0	0	0	0	0
	22-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0

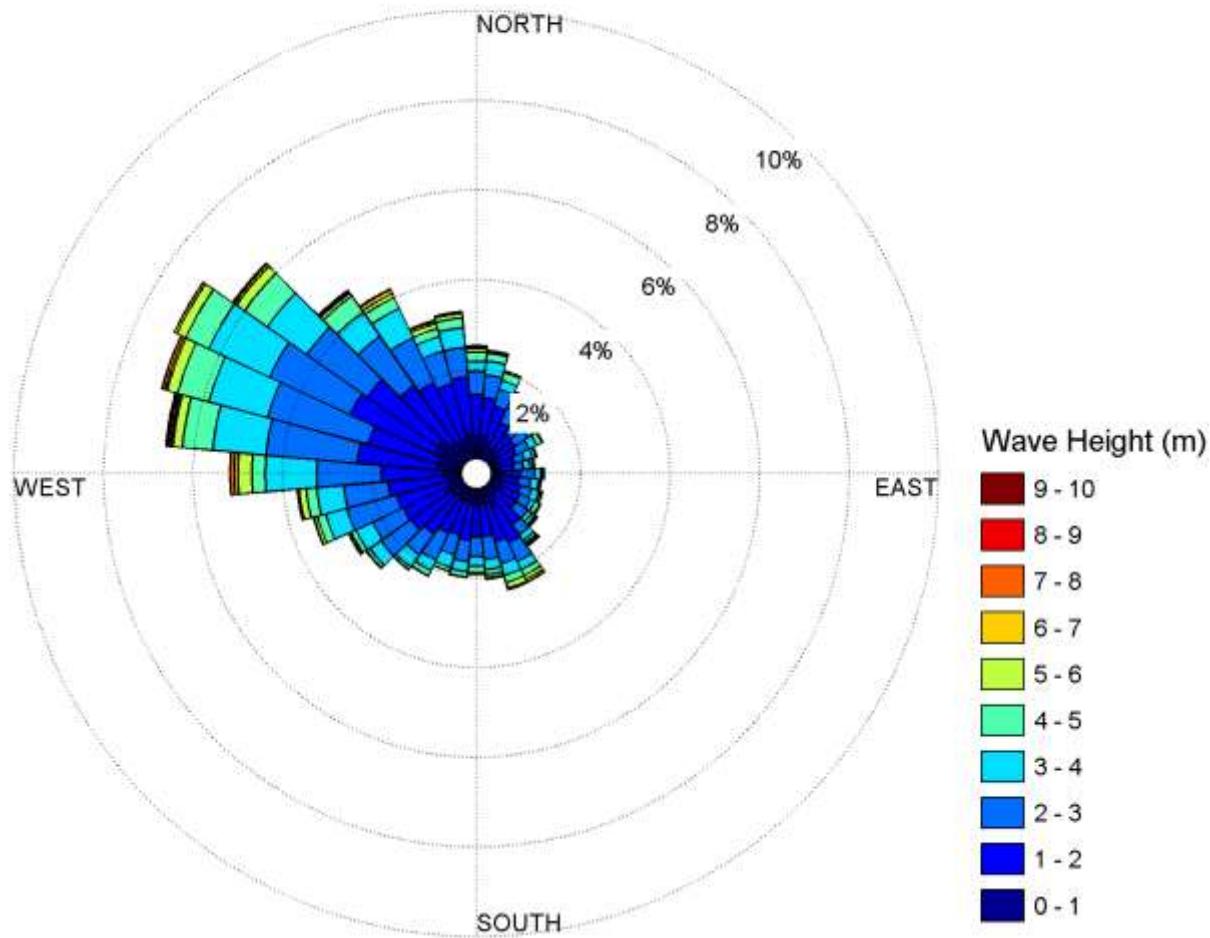
48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for September									
		Sig. Wave Height (m)									
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Wave Period (s)	0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.252	0.227	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	0.889	8.993	0.074	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.229	22.206	3.012	0	0	0	0	0	0	0
	6-7	0.016	8.394	15.266	0.146	0.002	0	0	0	0	0
	7-8	0.259	2.618	9.951	6.127	0.016	0	0	0	0	0
	8-9	0.606	2.681	0.815	4.072	1.359	0.007	0	0	0	0
	9-10	0.162	0.301	0.081	0.194	1.264	0.333	0.002	0	0	0
	10-11	0.866	3.097	0.787	0.044	0.053	0.243	0.12	0.002	0	0
	11-12	0.292	0.87	0.039	0.002	0	0	0.06	0.025	0	0
	12-13	0.023	0.25	0.088	0.014	0	0	0	0	0	0
	13-14	0.169	0.965	0.25	0.065	0	0	0	0	0	0
	14-15	0.023	0.465	0.049	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0.051	0.174	0.03	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0.007	0.13	0.009	0	0	0	0	0	0	0
	17-18	0.007	0.125	0.03	0.005	0	0	0	0	0	0
	18-19	0	0.002	0	0.012	0	0	0	0	0	0
	19-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N 60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for October									
		Sig. Wave Height (m)									
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Wave Period (s)	0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.146	0.155	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	0.513	4.924	0.121	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.159	17.025	2.722	0.007	0	0	0	0	0	0
	6-7	0	8.488	15.903	0.204	0	0	0	0	0	0
	7-8	0.078	1.924	13.134	7.715	0.134	0	0	0	0	0
	8-9	0.179	1.763	0.99	6.933	2.802	0.09	0	0	0	0
	9-10	0.025	0.363	0.318	0.432	3.362	1.06	0.02	0	0	0
	10-11	0.204	2.068	1.181	0.495	0.318	0.932	0.267	0	0	0
	11-12	0.056	0.54	0.081	0.034	0.02	0.009	0.052	0.076	0.034	0.002
	12-13	0.031	0.269	0.074	0.016	0.013	0.002	0	0	0.027	0.031
	13-14	0.175	0.925	0.092	0.067	0.045	0.013	0	0	0	0
	14-15	0.036	0.06	0.025	0.009	0	0	0	0	0	0
	15-16	0	0	0.018	0.002	0	0	0	0	0	0
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17-18	0	0	0.009	0.004	0	0	0	0	0	0
	18-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

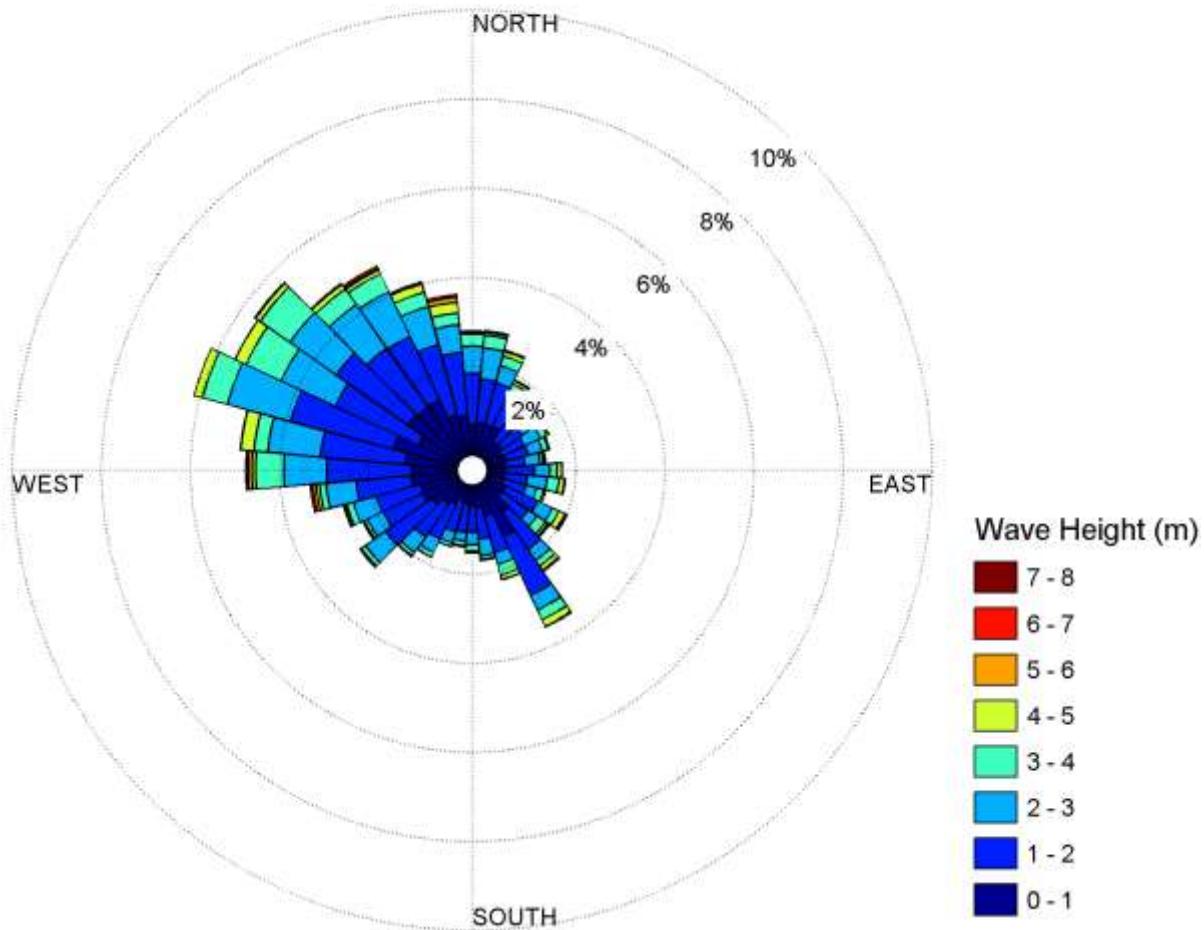
48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for November											
		Sig. Wave Height (m)											
Wave Period (s)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	
	0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.037	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	0.181	3.623	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.023	12.16	2.912	0.007	0	0	0	0	0	0	0	0
	6-7	0	7.169	14.201	0.333	0	0	0	0	0	0	0	0
	7-8	0.072	1.063	12.998	9.079	0.186	0	0	0	0	0	0	0
	8-9	0.063	1.34	1.563	8.866	3.623	0.102	0	0	0	0	0	0
	9-10	0.028	0.178	0.35	0.653	5.245	2.12	0.021	0	0	0	0	0
	10-11	0.063	2.322	1.852	0.644	0.463	2.023	1.042	0.035	0	0	0	0
	11-12	0	0.567	0.285	0.174	0.028	0.014	0.287	0.28	0.09	0	0	0
	12-13	0	0.095	0.042	0.06	0.019	0.009	0	0.005	0.016	0.019	0	0
	13-14	0.051	0.451	0.396	0.123	0.072	0.039	0.002	0	0	0	0	0
	14-15	0	0.046	0	0.012	0	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

48.1°N -60.4°W		Significant Wave Height and Period - Joint Probability Distribution for December											
		Sig. Wave Height (m)											
Wave Period (s)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	
	0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	0.004	0.058	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-5	0.134	2.545	0.168	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5-6	0.025	6.492	2.616	0.011	0	0	0	0	0	0	0	0
	6-7	0	6.346	12.22	0.54	0	0	0	0	0	0	0	0
	7-8	0	0.921	13.049	9.993	0.249	0	0	0	0	0	0	0
	8-9	0.009	0.439	1.237	9.545	5.11	0.255	0	0	0	0	0	0
	9-10	0.004	0.105	0.168	0.927	6.694	2.572	0.099	0	0	0	0	0
	10-11	0.027	1.752	1.853	0.697	0.668	2.928	1.904	0.134	0.002	0	0	0
	11-12	0.011	0.475	0.367	0.3	0.204	0.078	0.582	0.862	0.307	0.007	0	0
	12-13	0	0.412	0.164	0.108	0.034	0.007	0.013	0.016	0.094	0.072	0	0
	13-14	0.038	0.65	0.365	0.231	0.047	0.004	0	0	0.004	0	0	0
	14-15	0	0	0.038	0.002	0.007	0	0	0	0	0	0	0
	15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

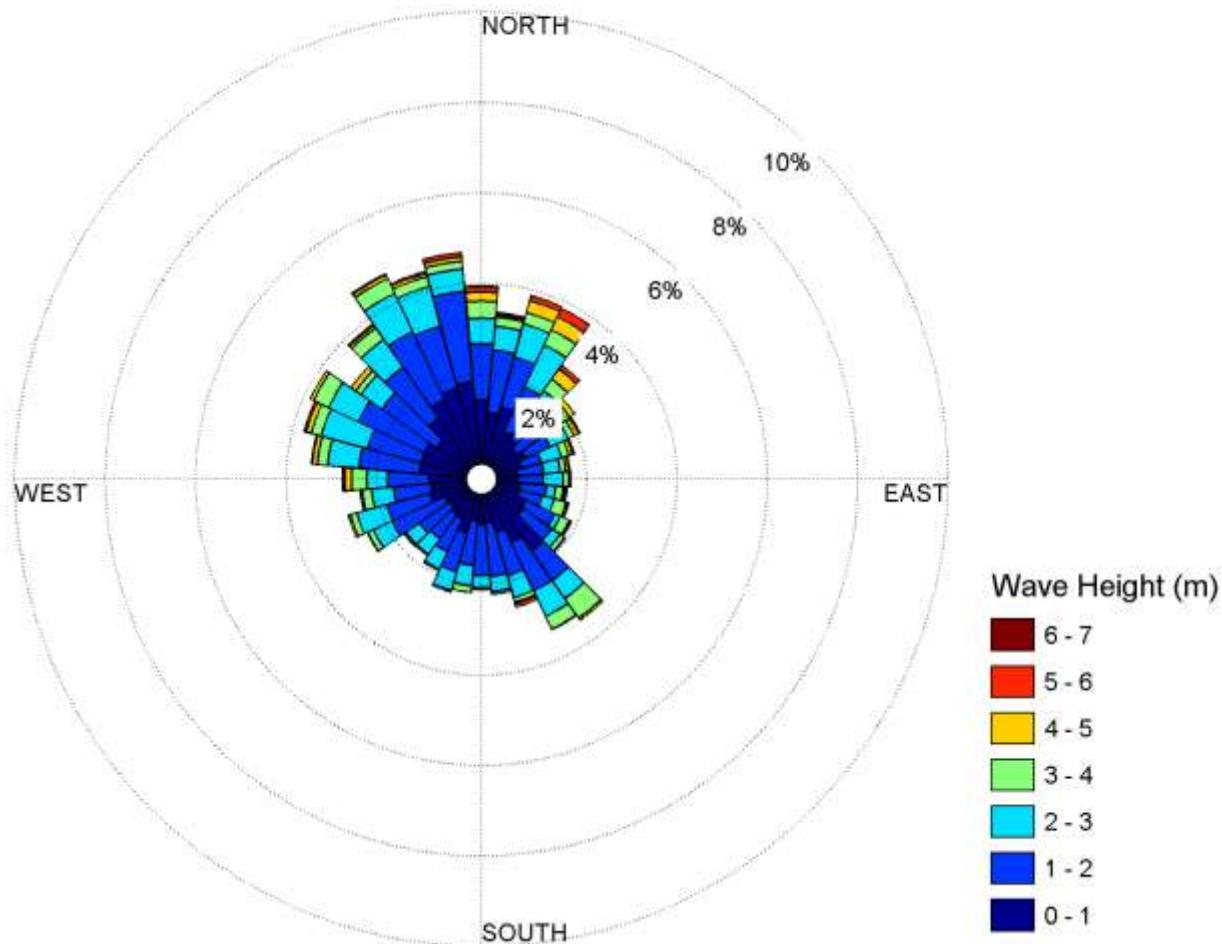
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for January



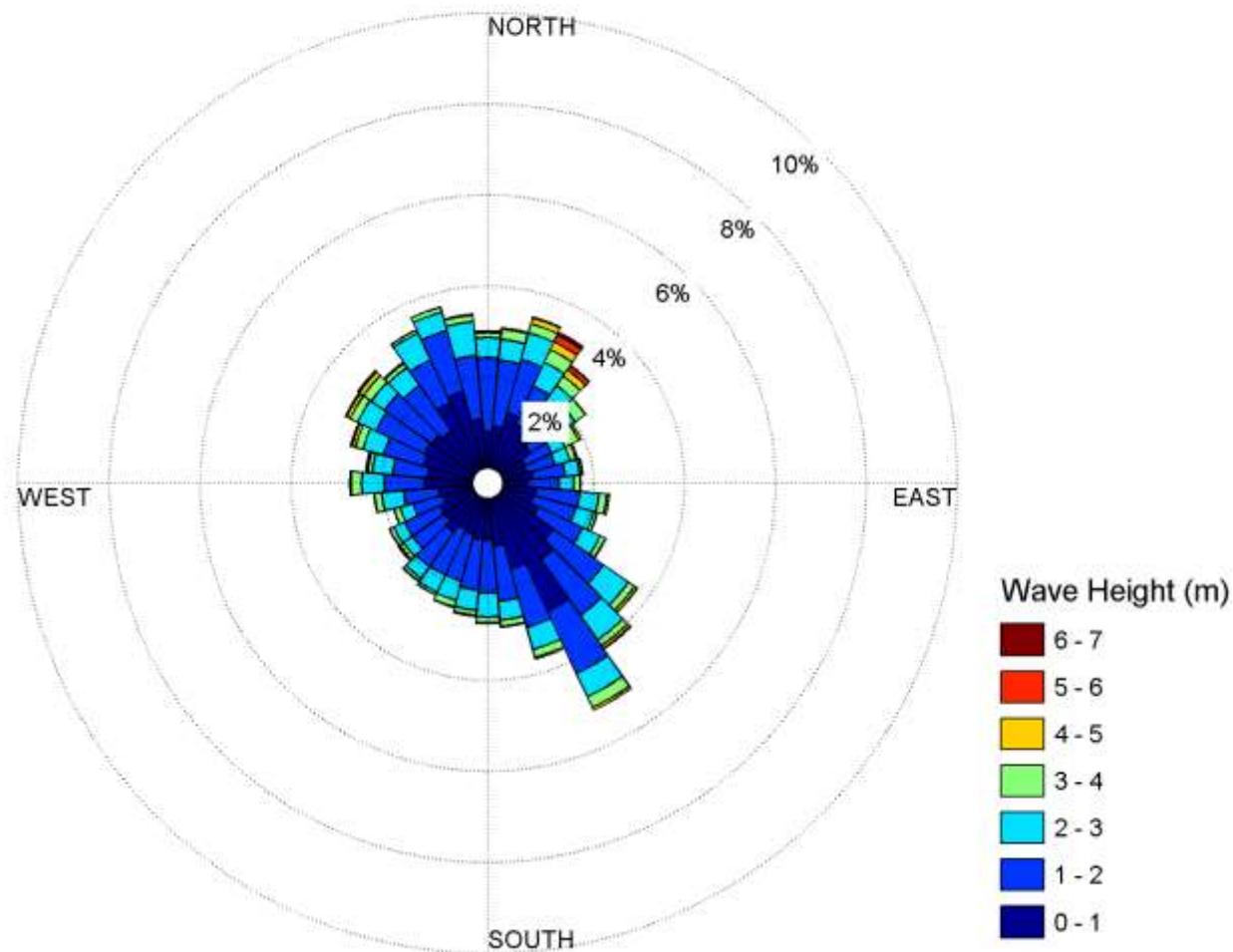
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for February



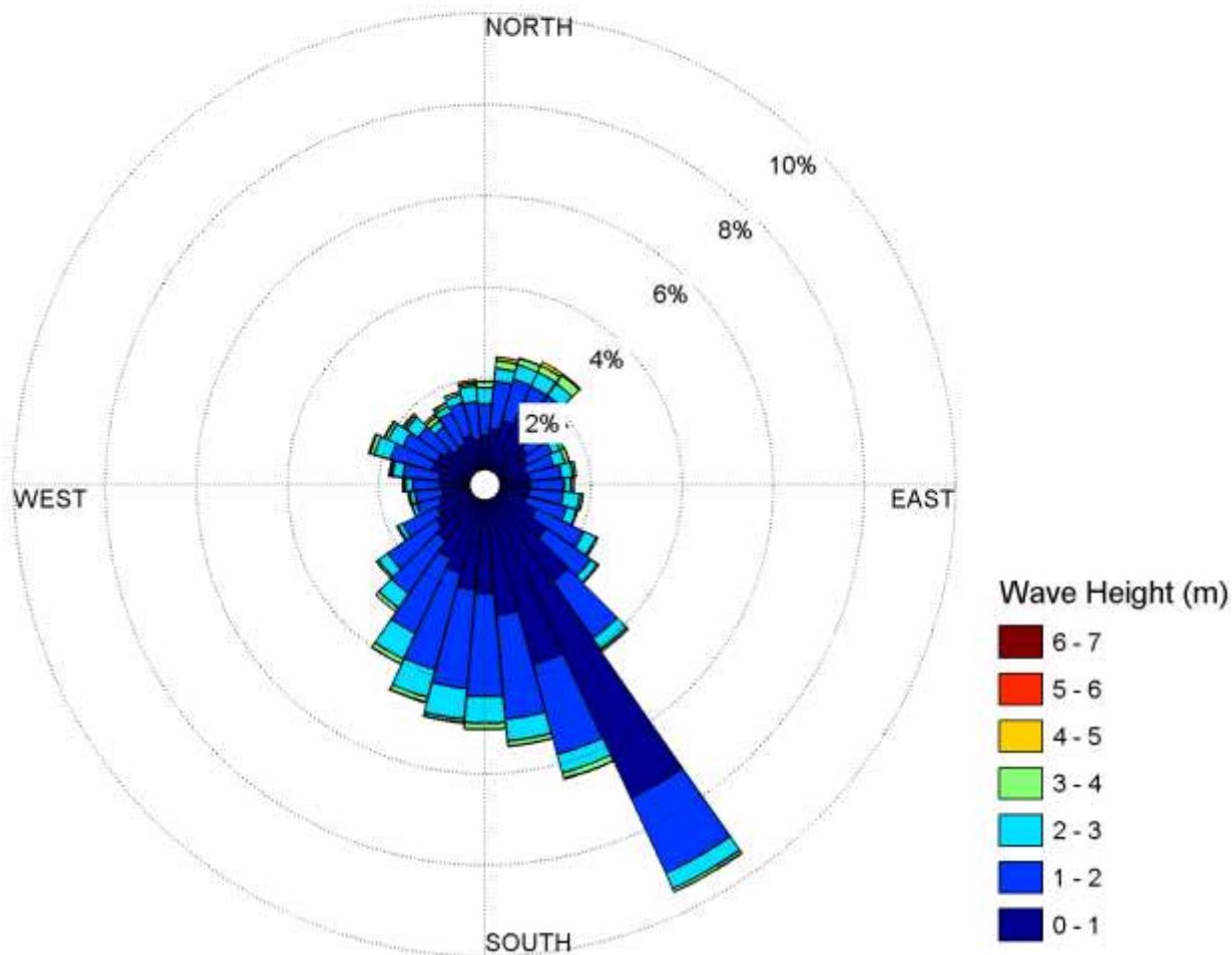
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for March



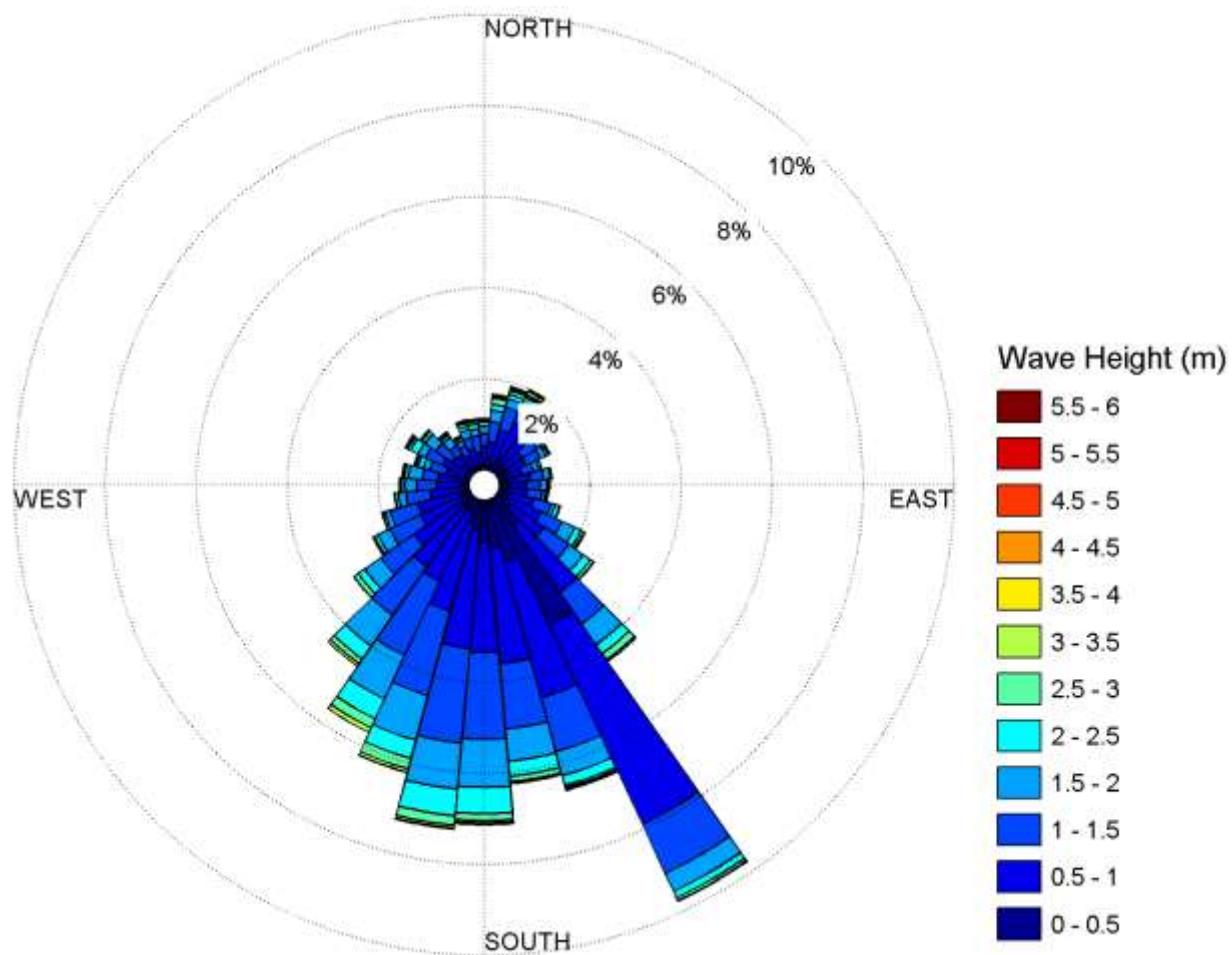
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for April



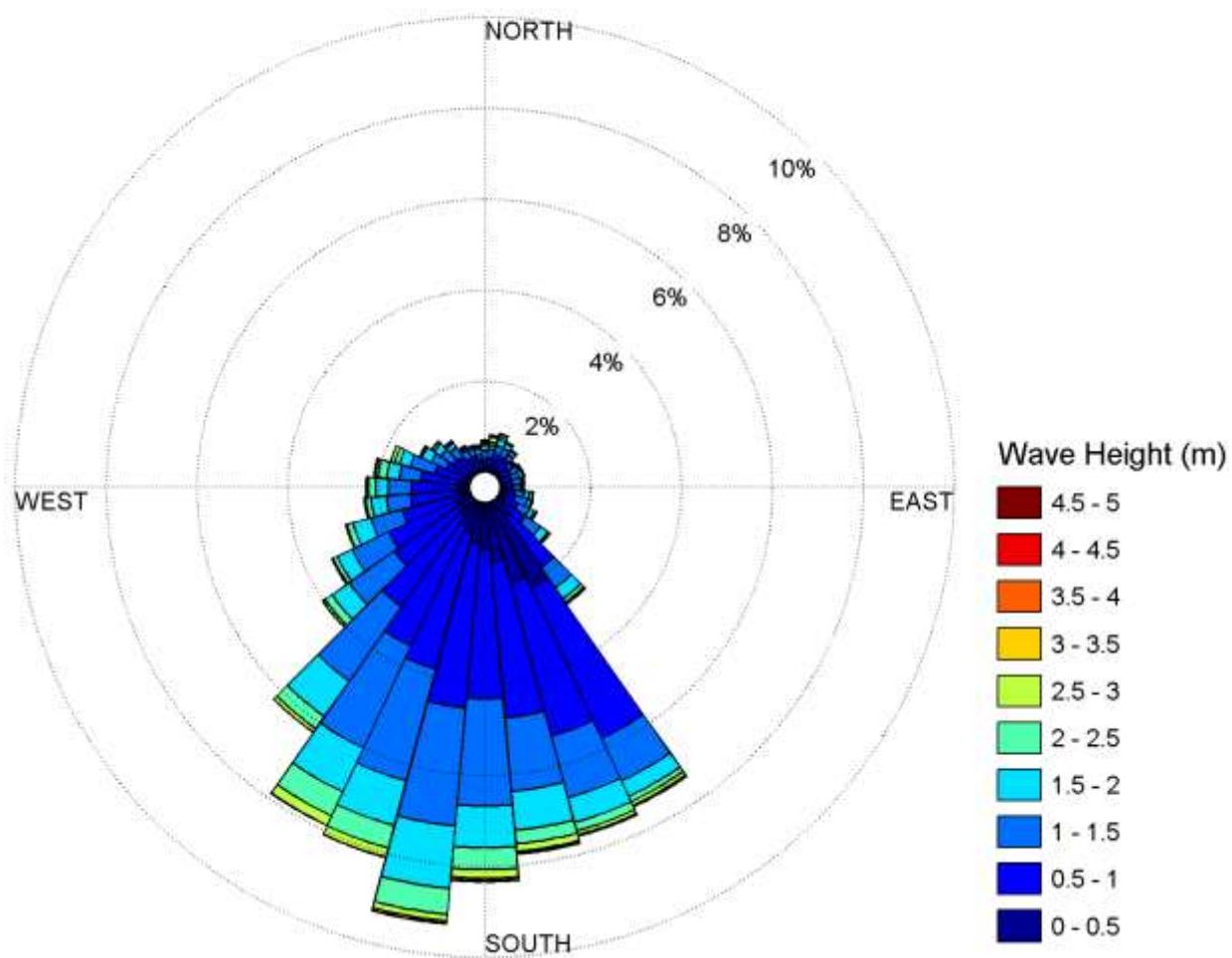
## M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for May



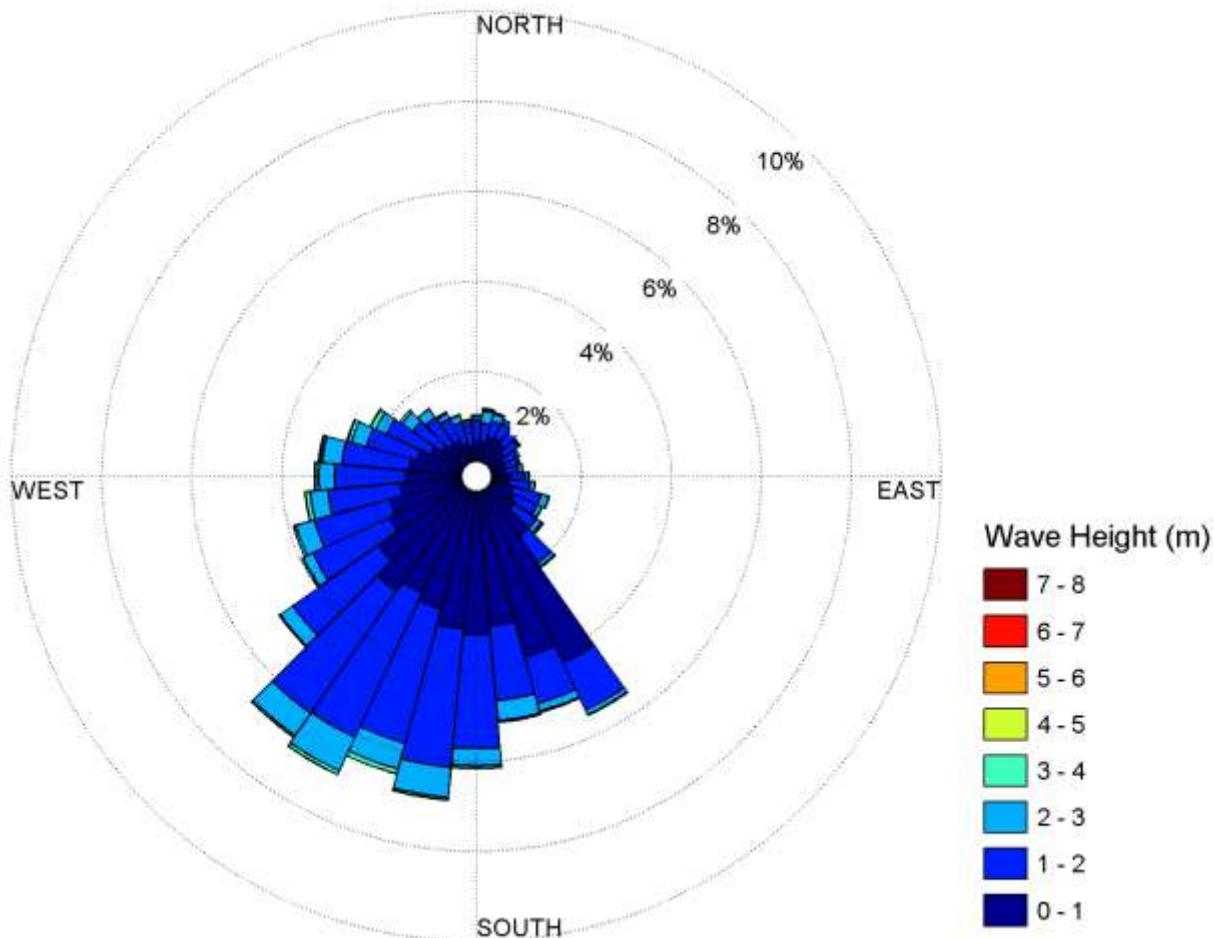
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for June



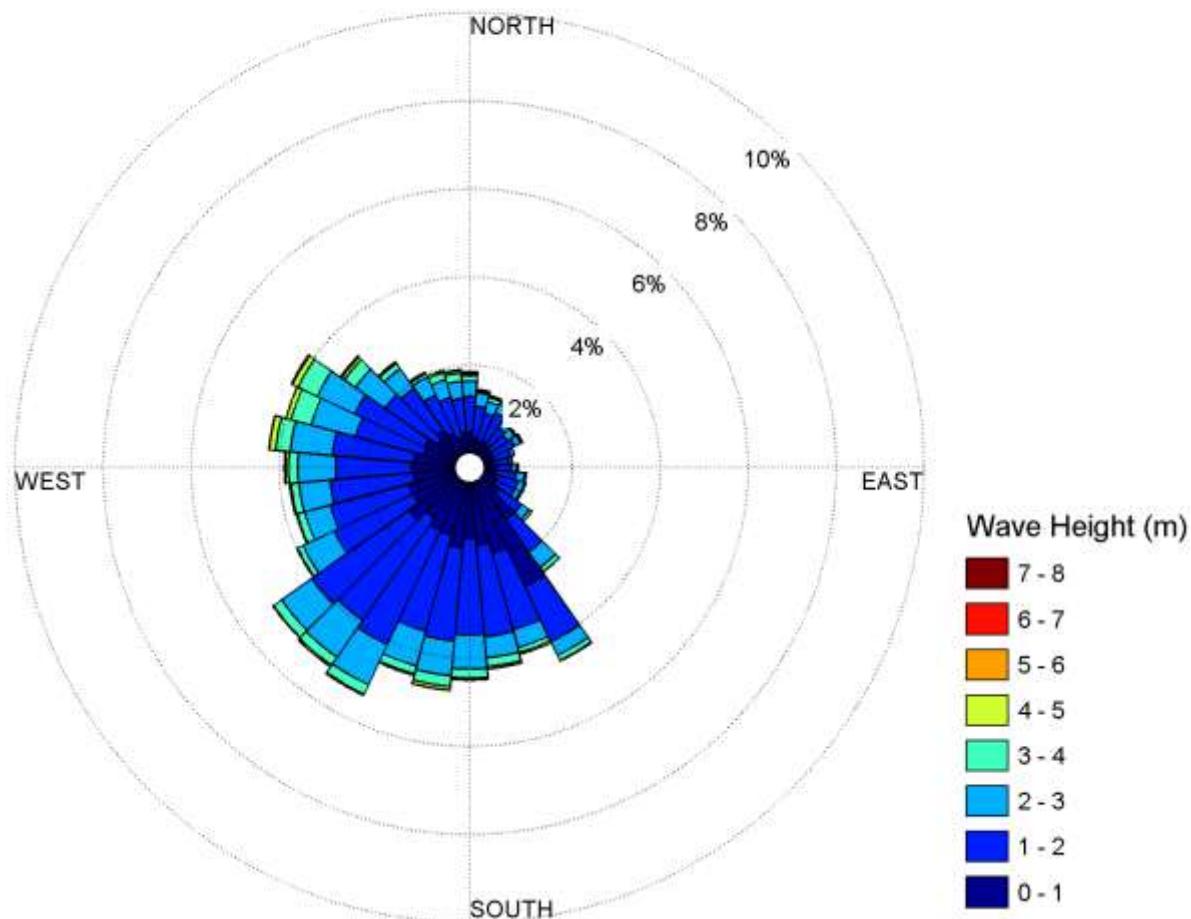
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for July



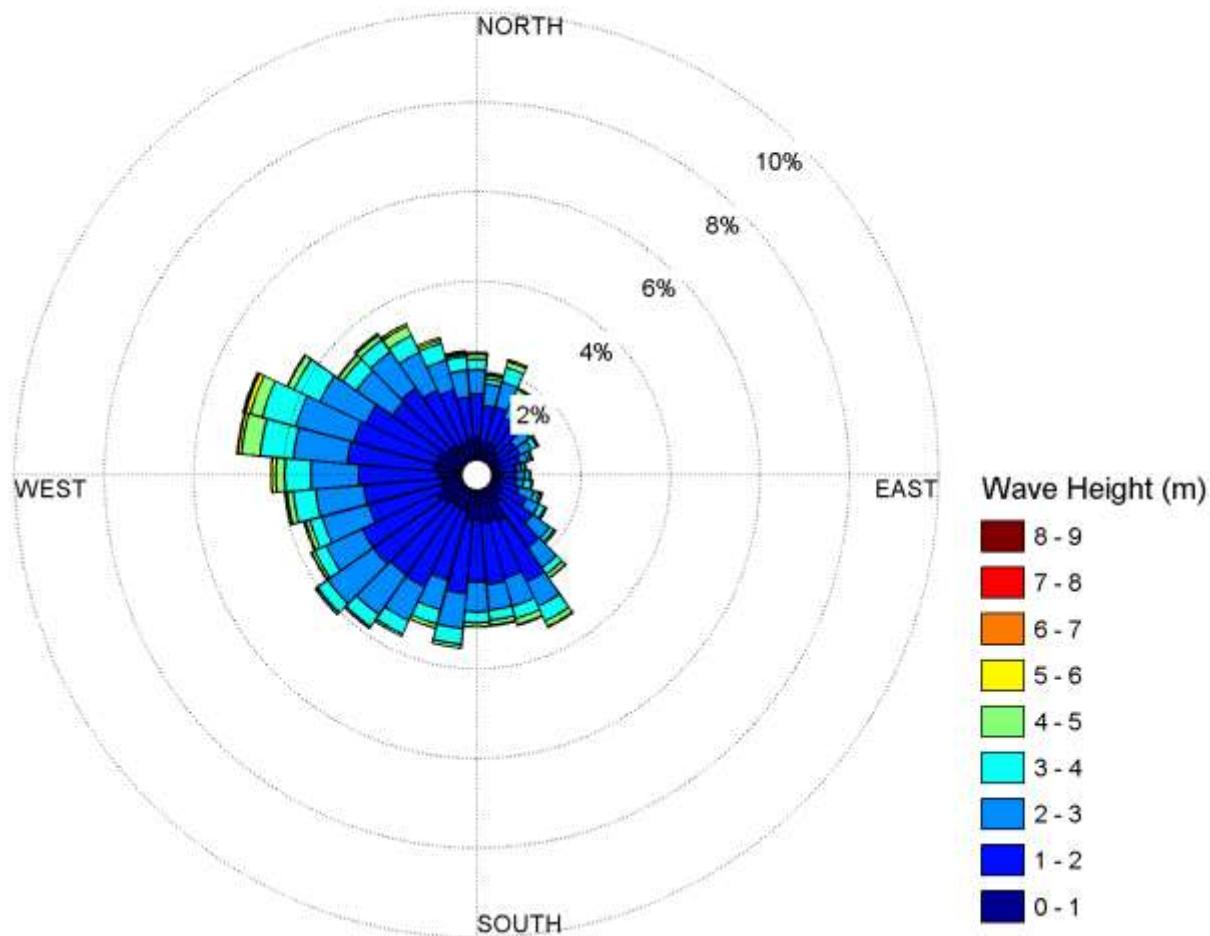
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for August



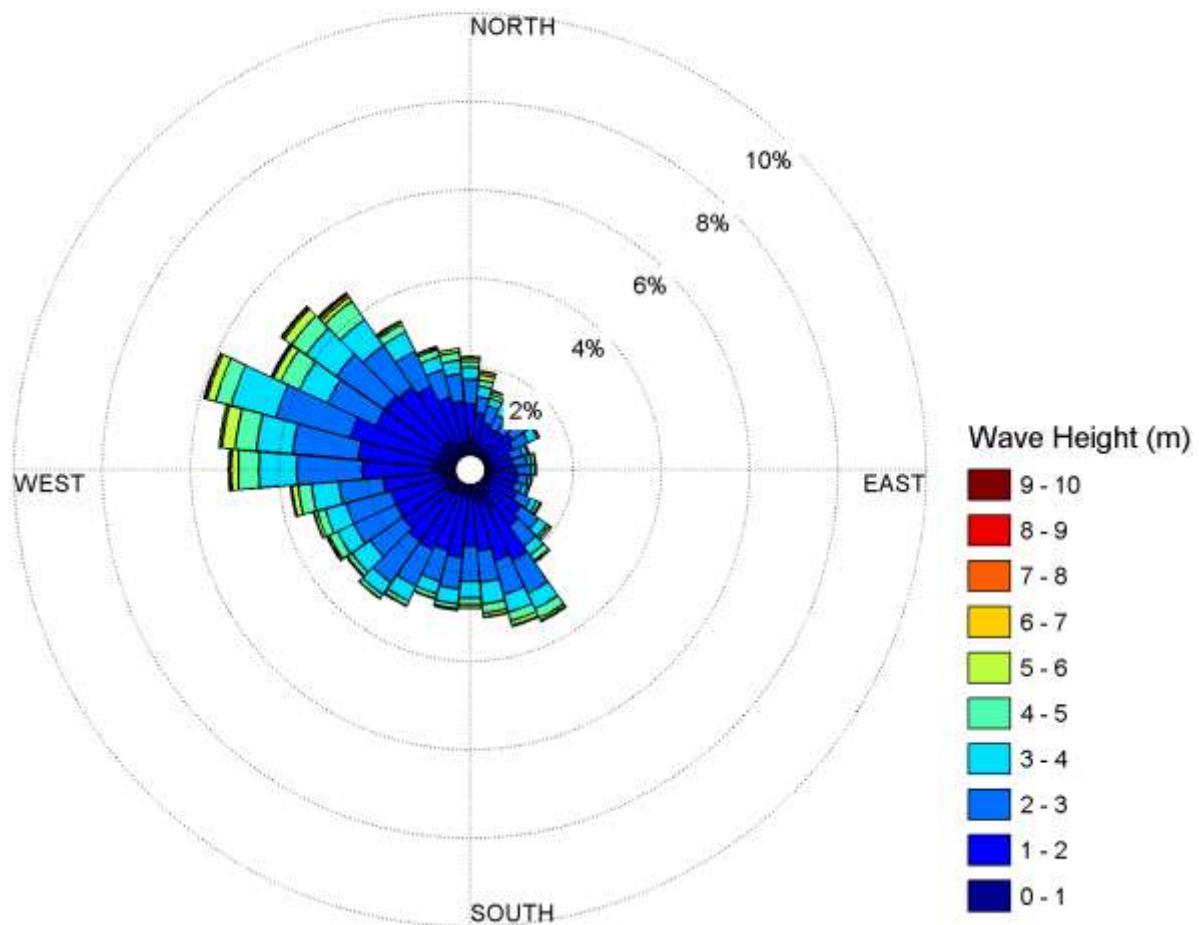
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for September



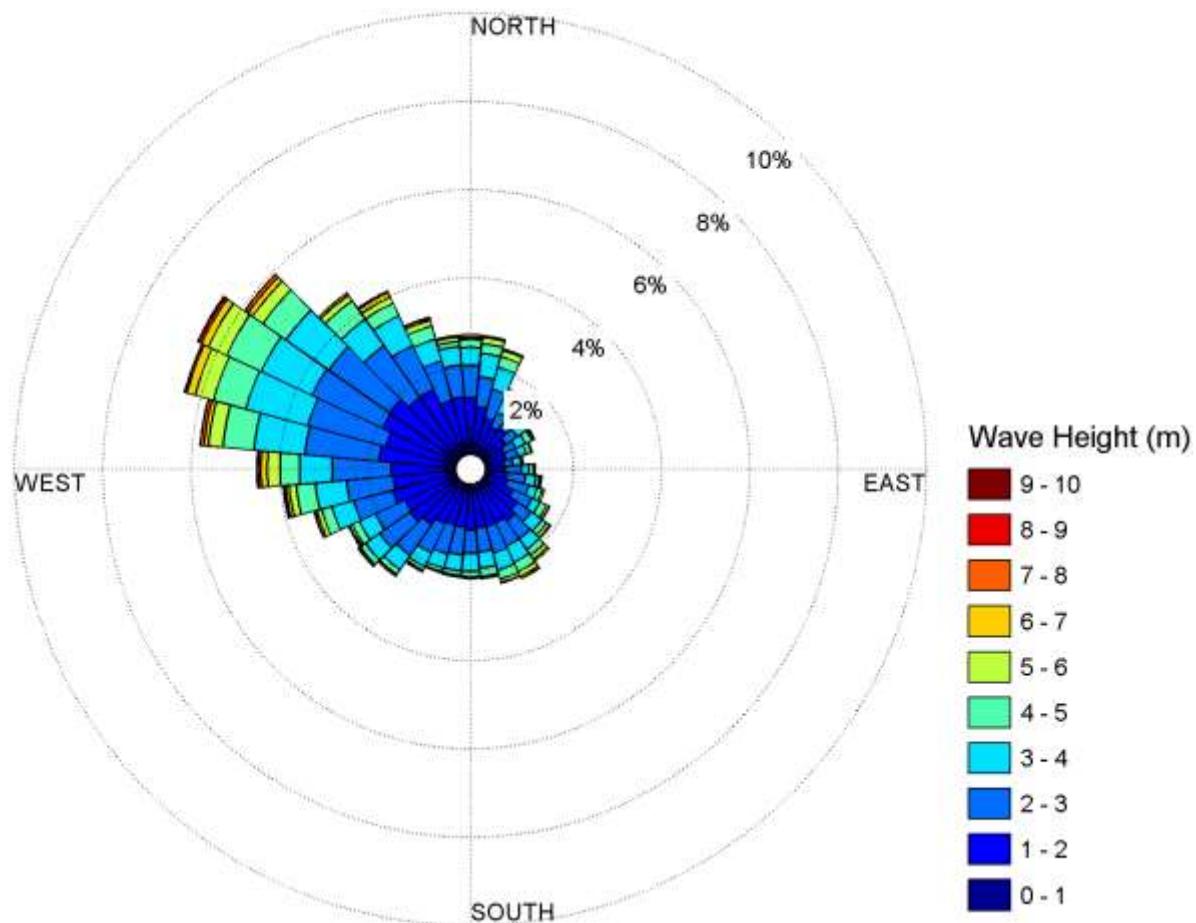
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for October

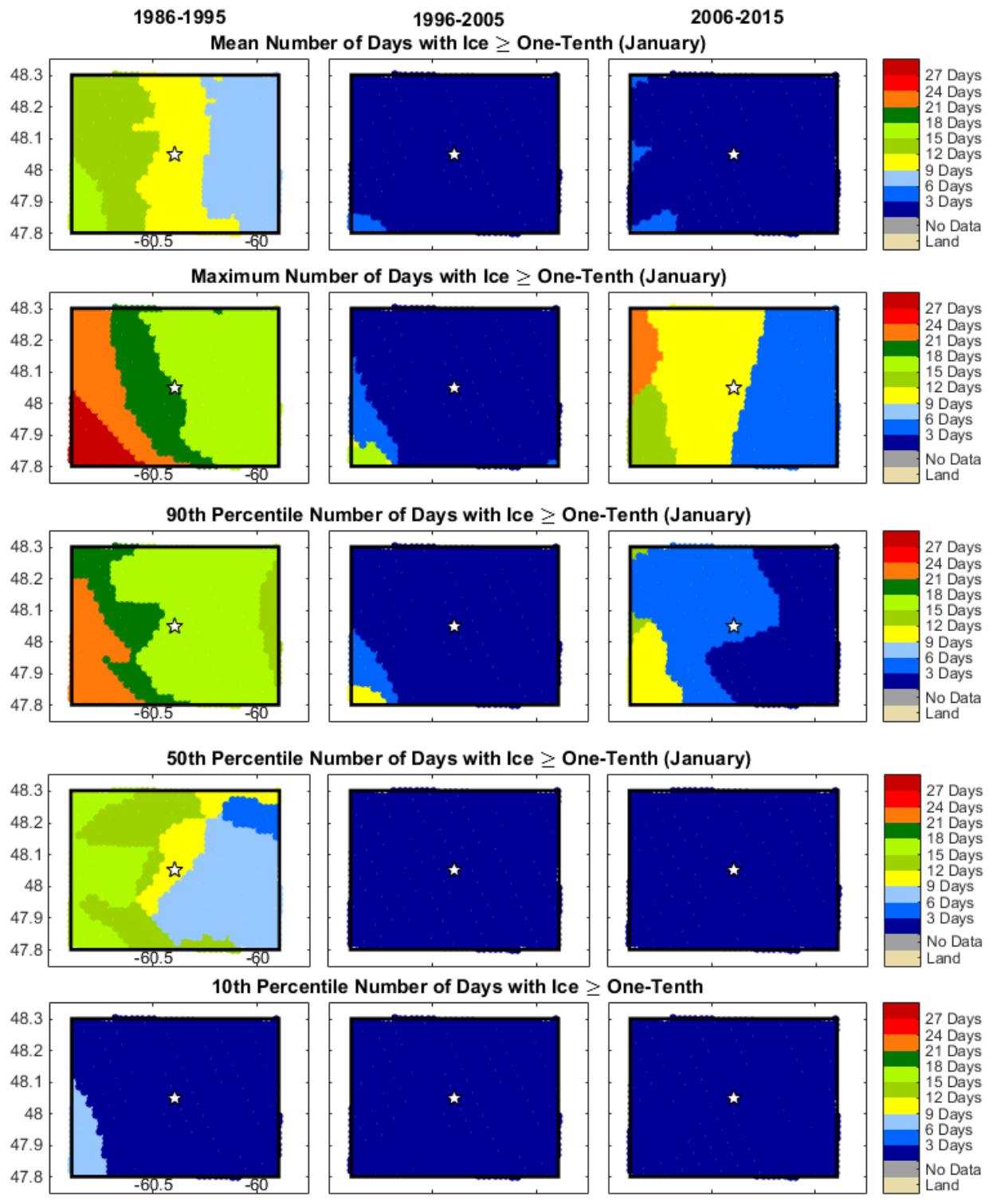


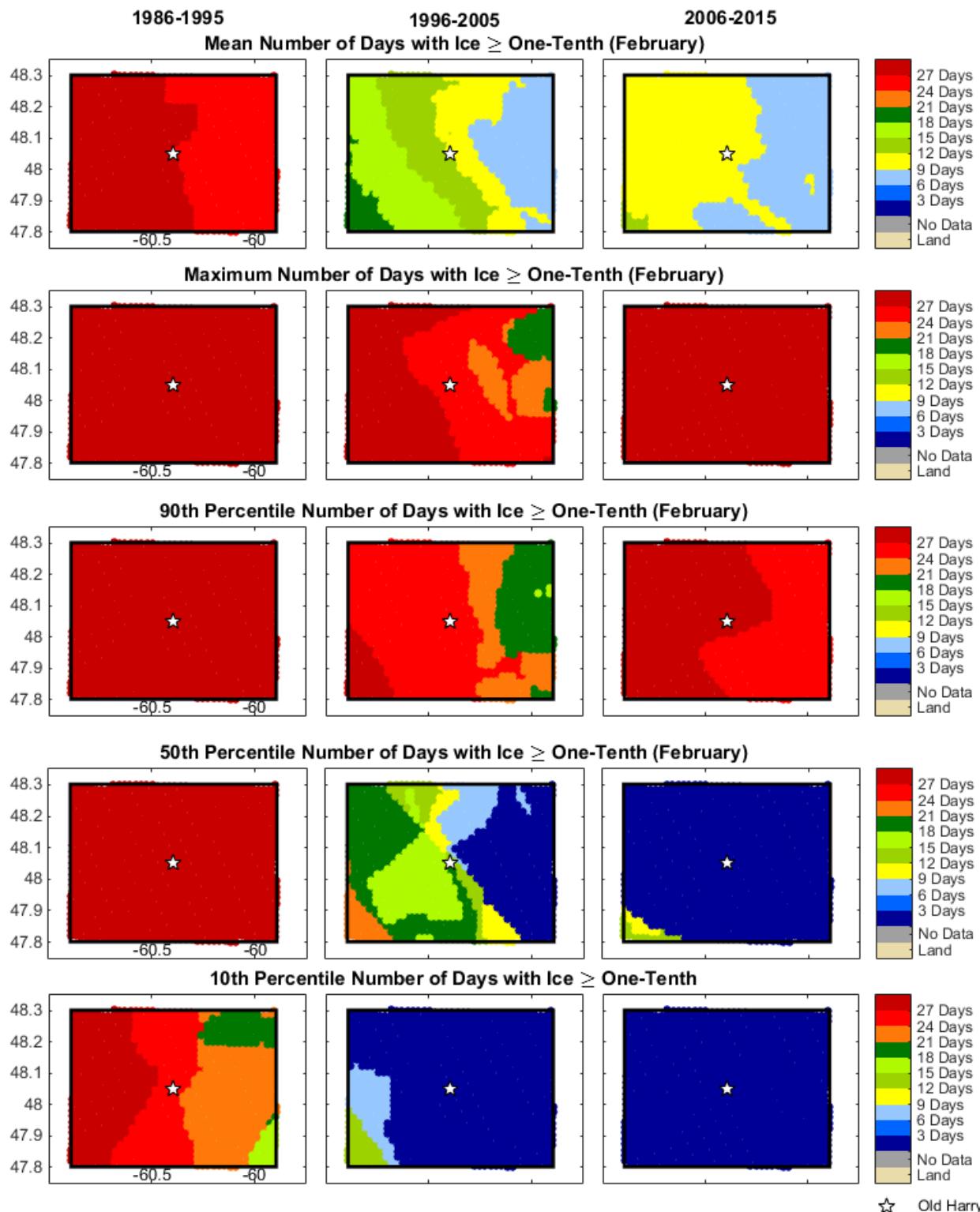
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for November

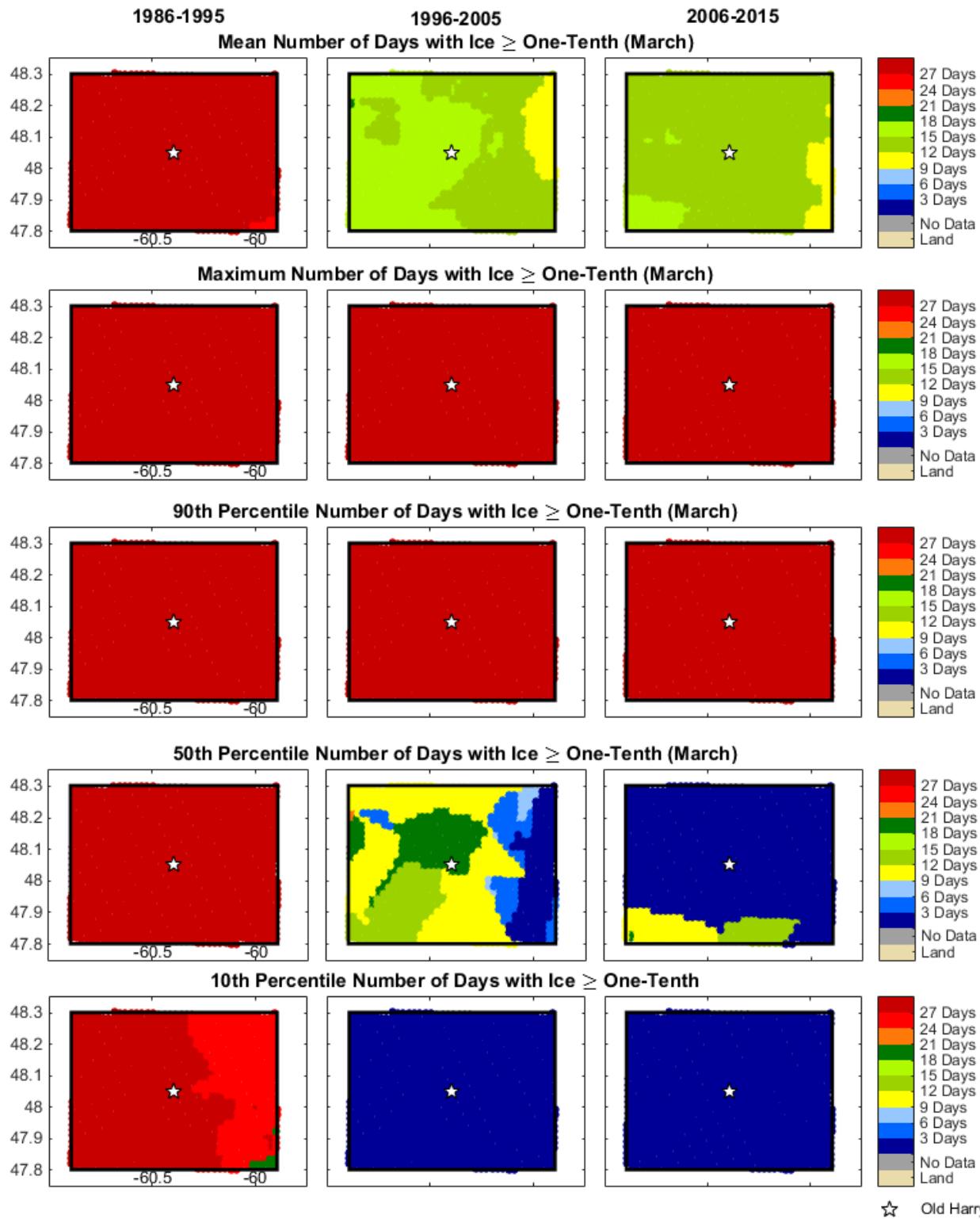


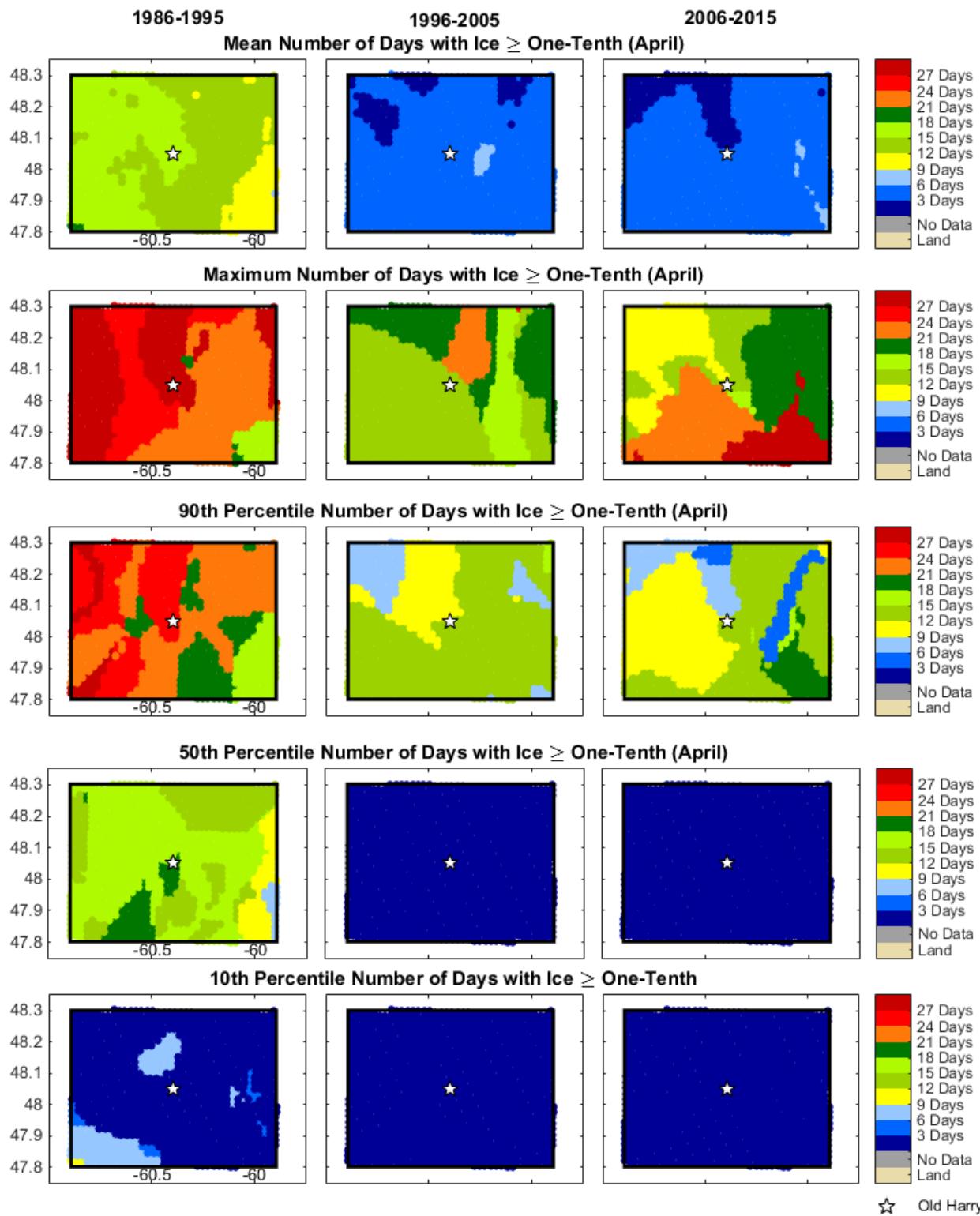
M6013509 (48.1° N, -60.4° W), Wave Height and Direction (from) for December

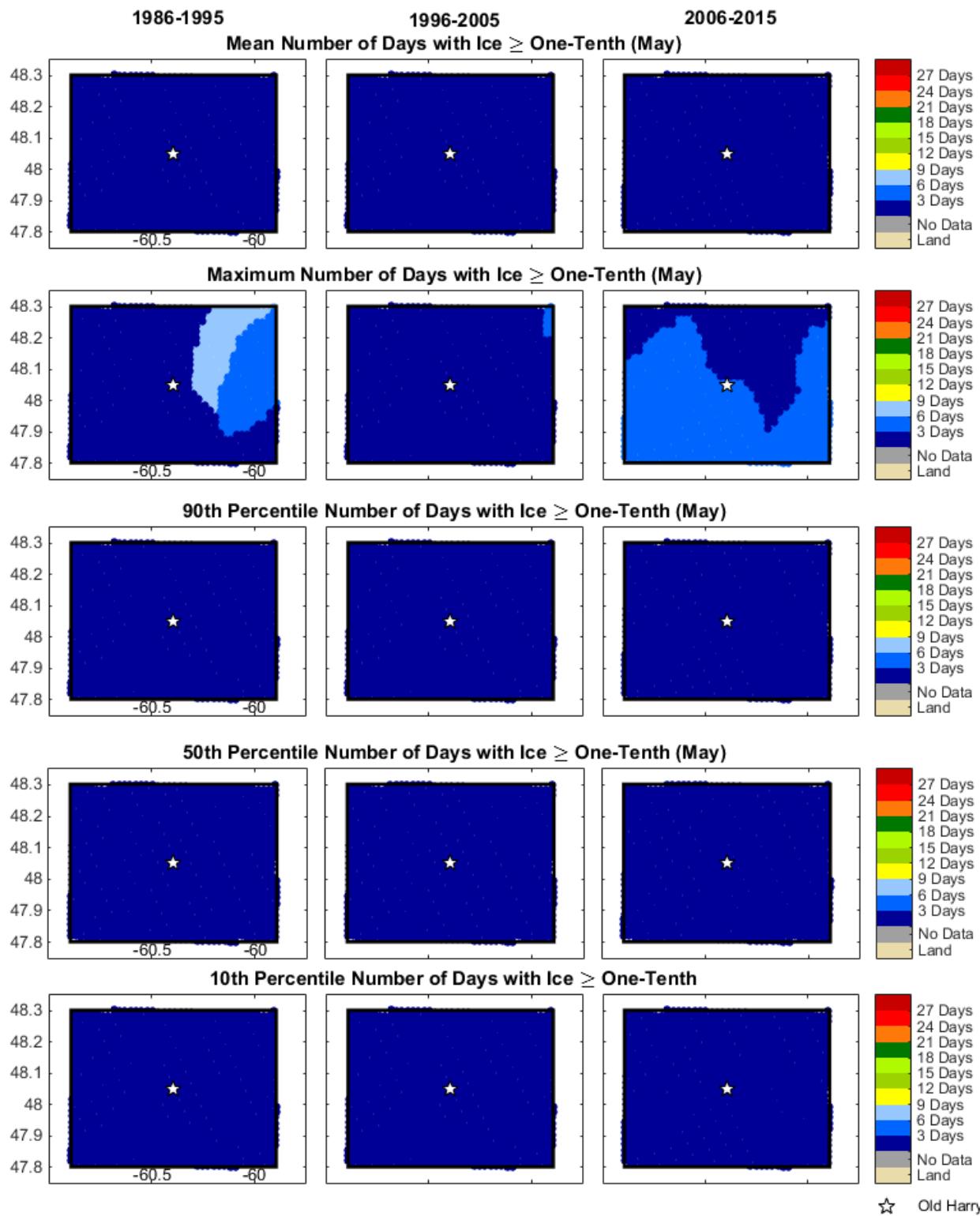


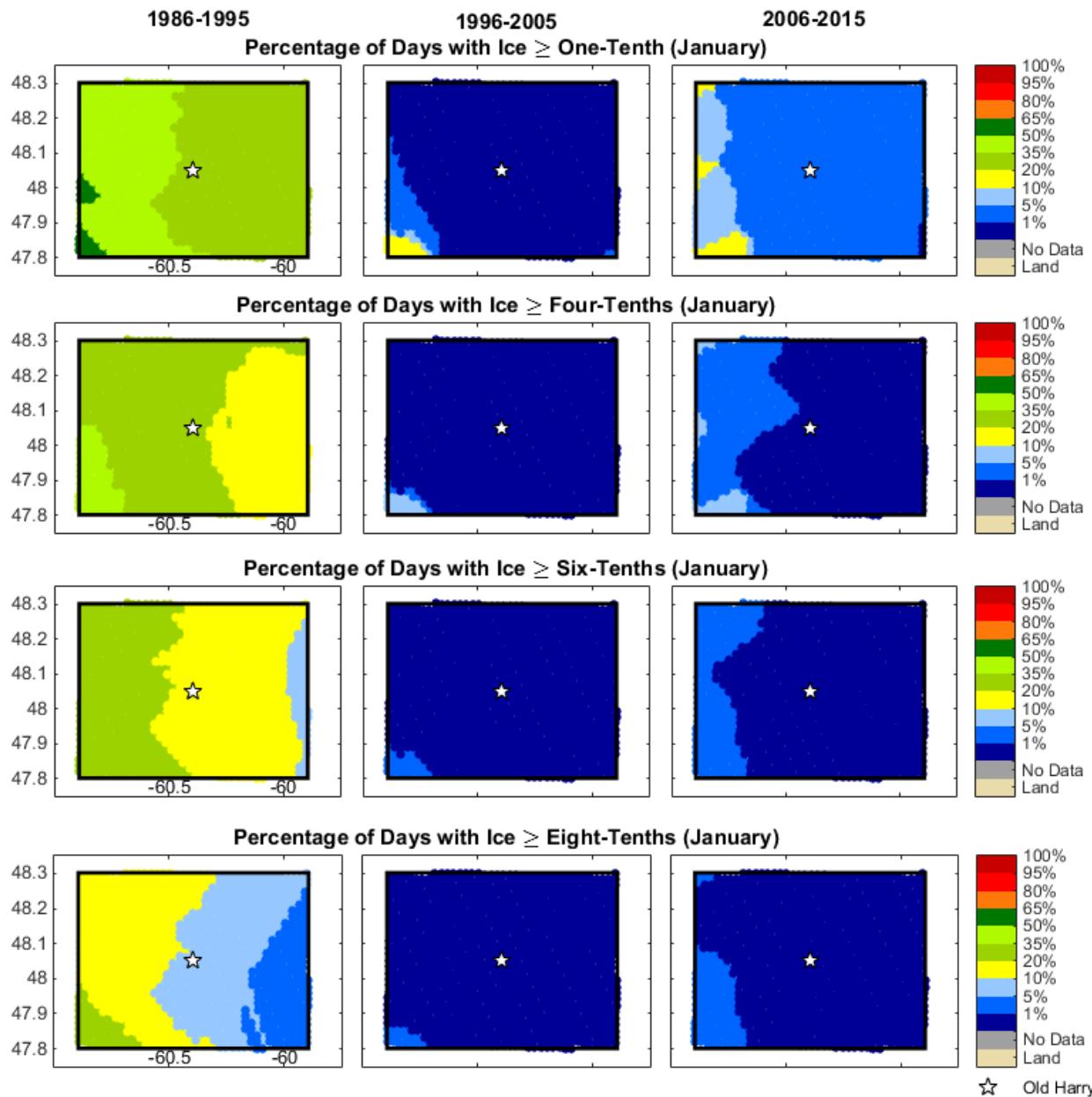
**ANNEXE C – NOMBRE DE JOURS PAR MOIS AVEC DE LA GLACE**


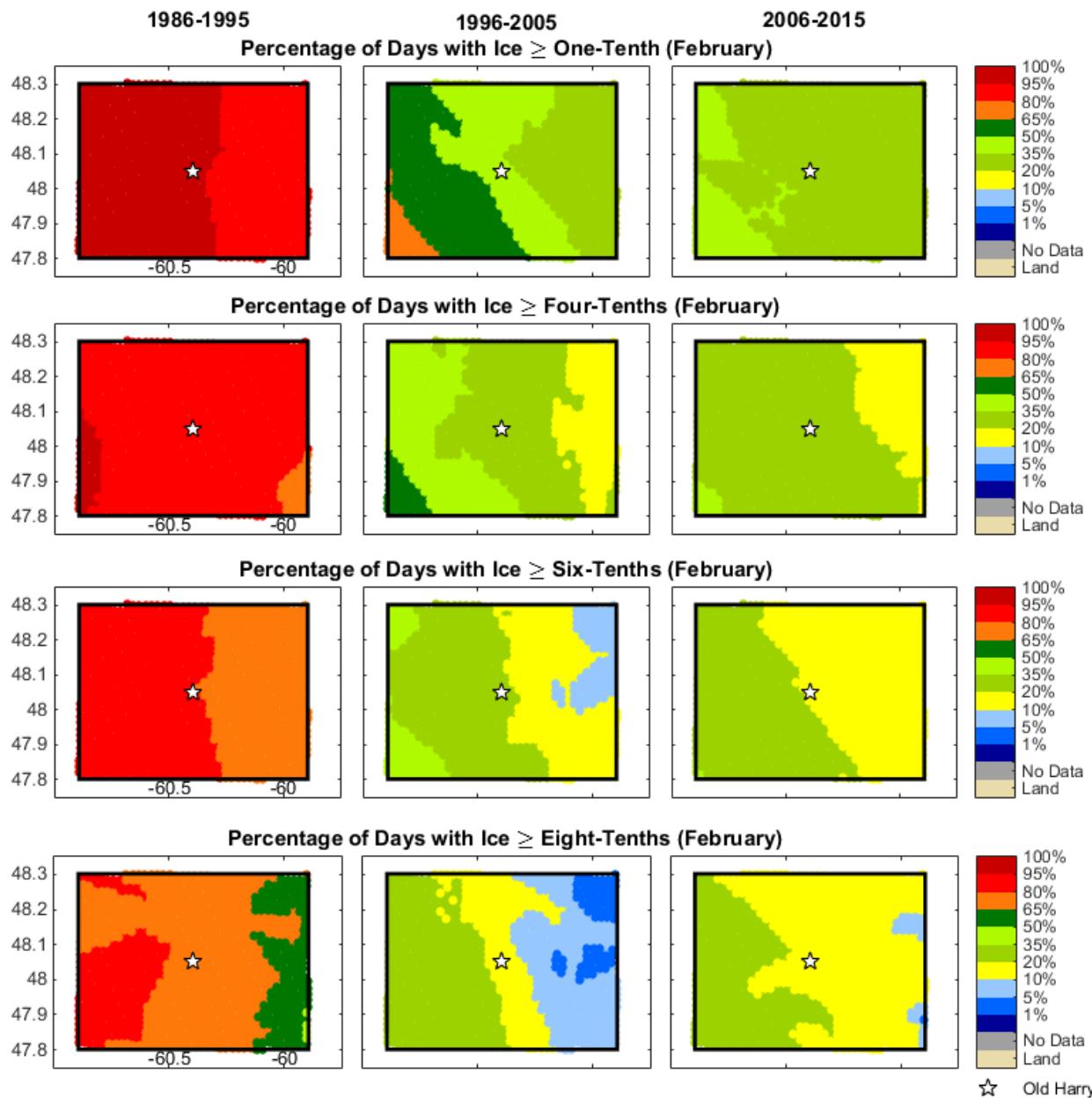


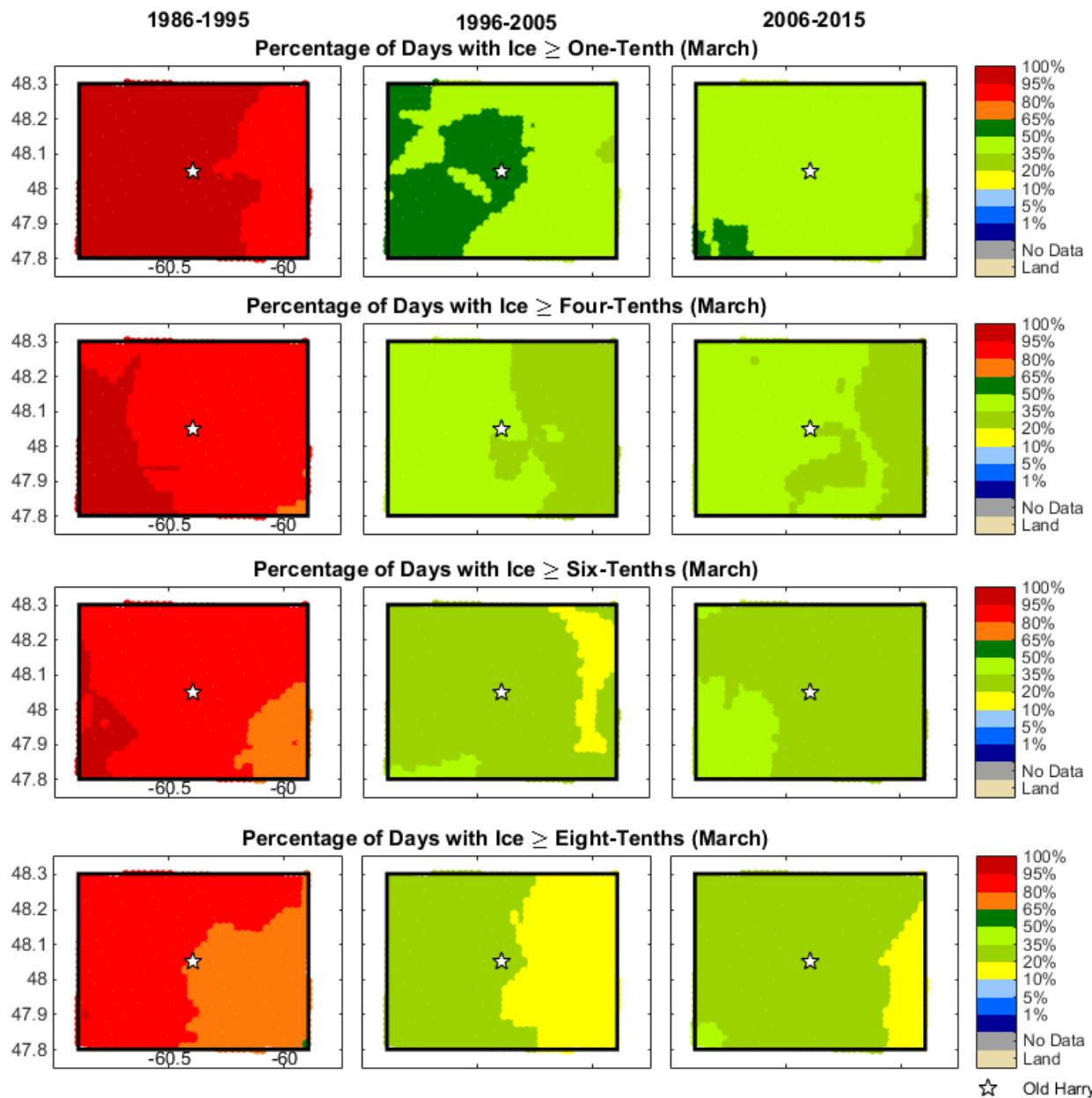


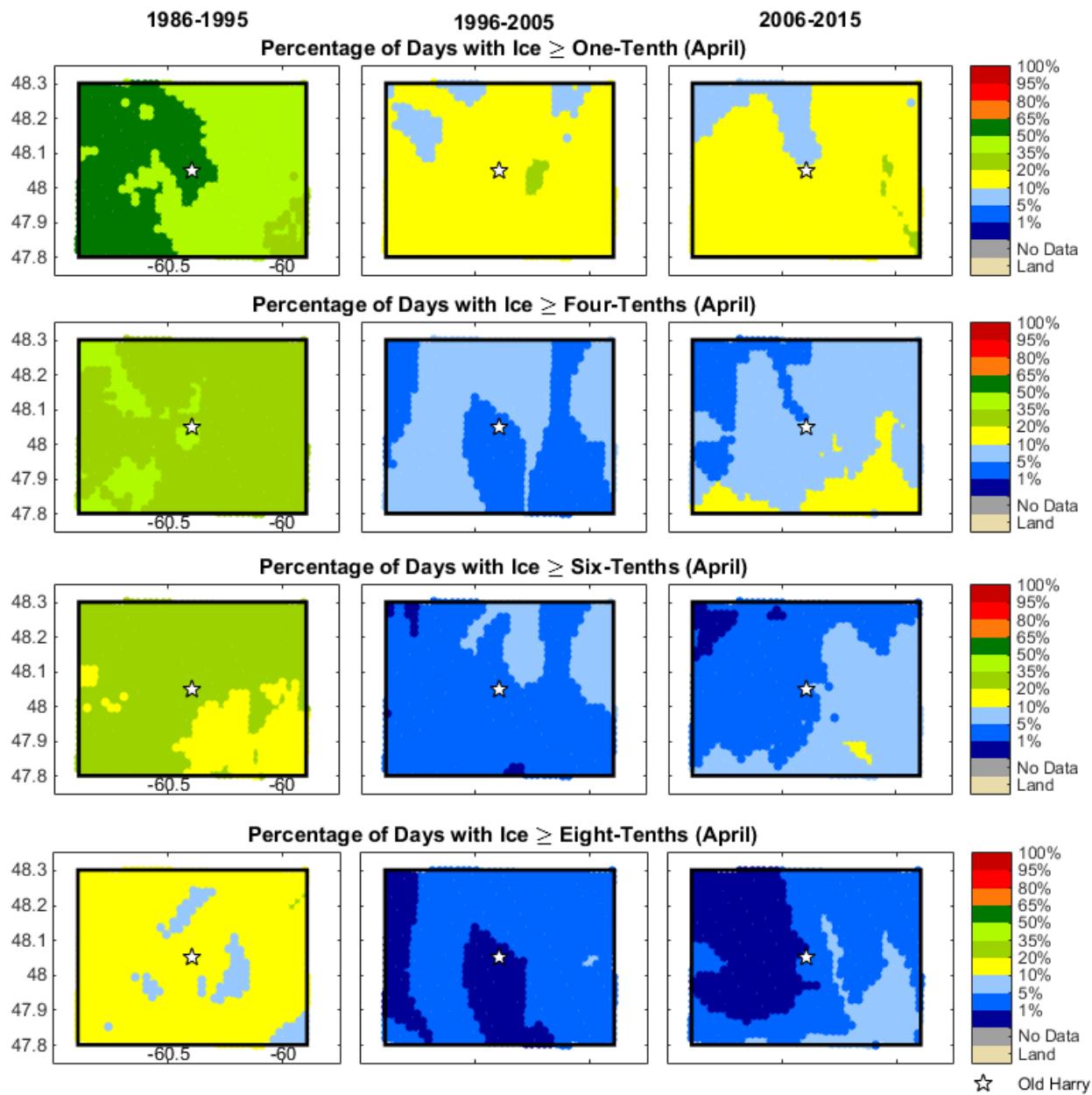


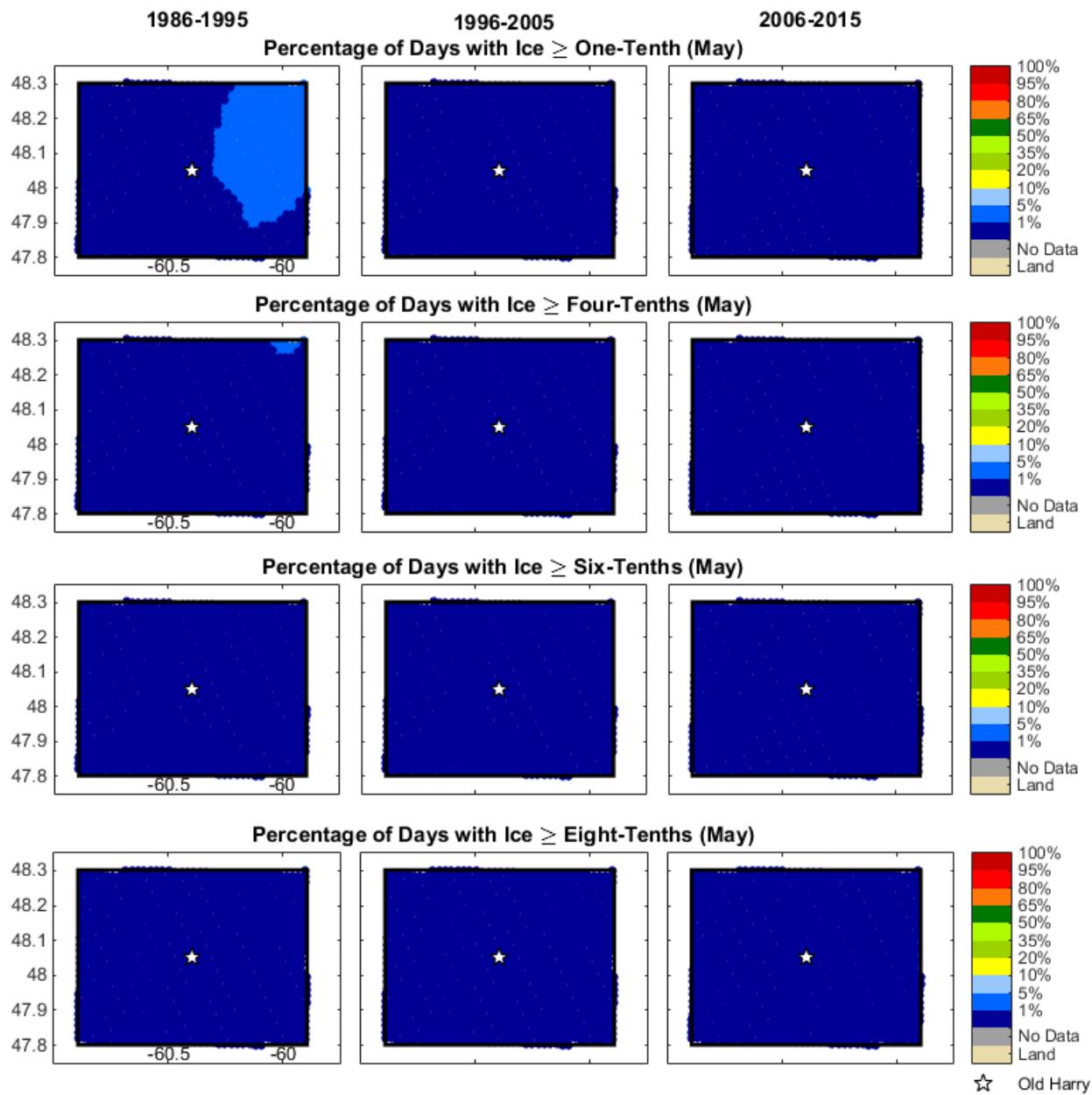


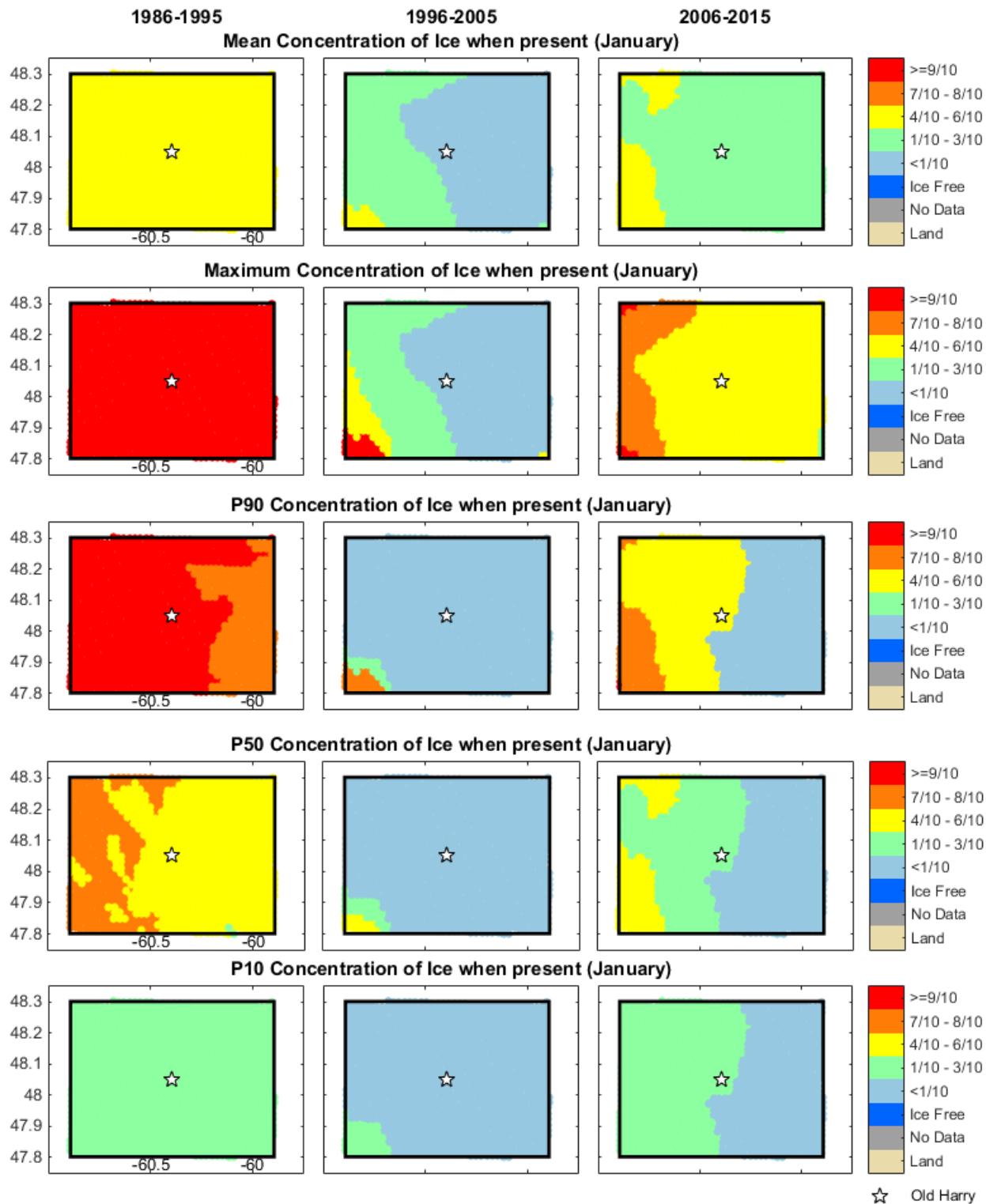
**ANNEXE D – POURCENTAGE DE JOURS PAR MOIS AVEC DE LA GLACE**


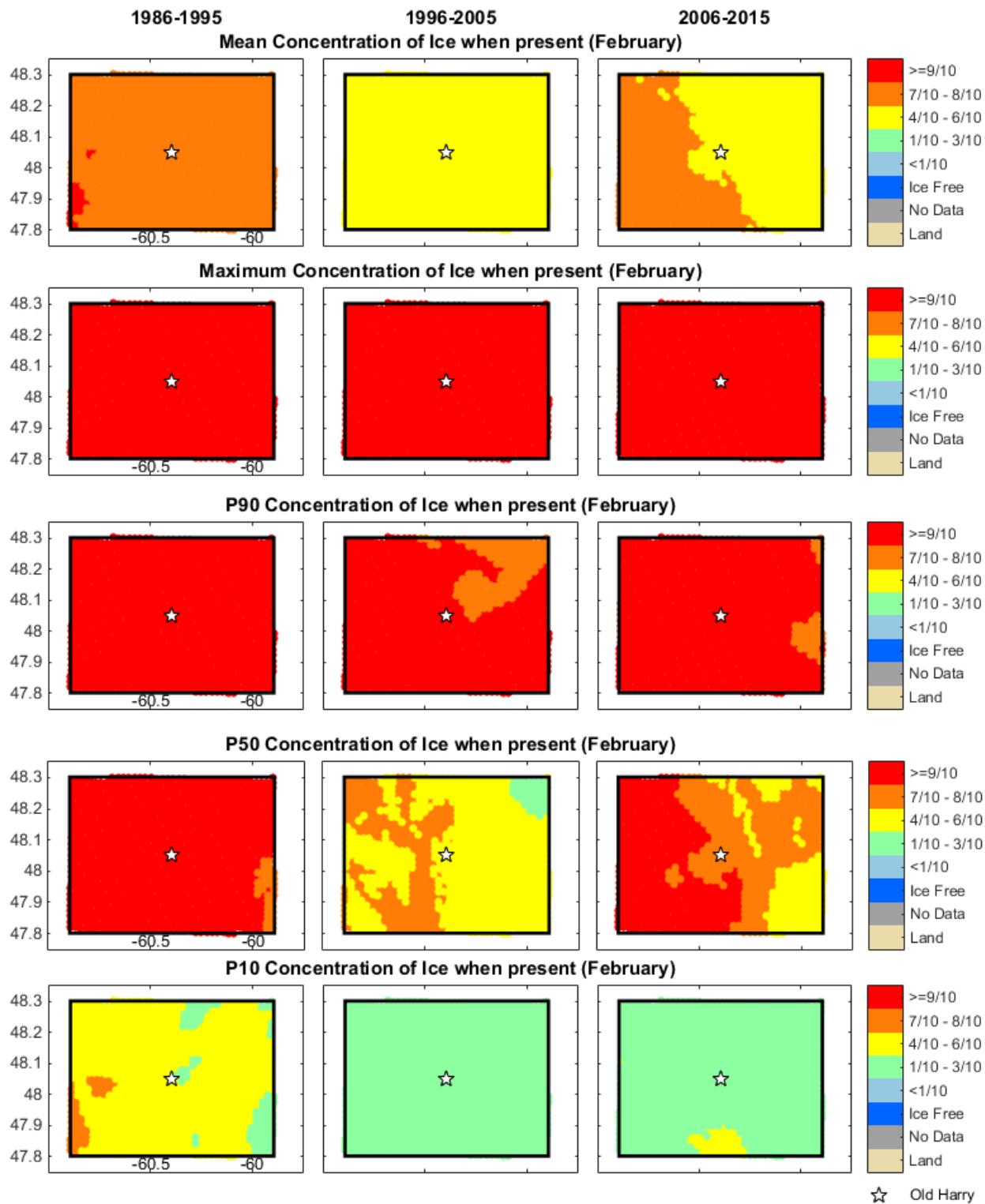


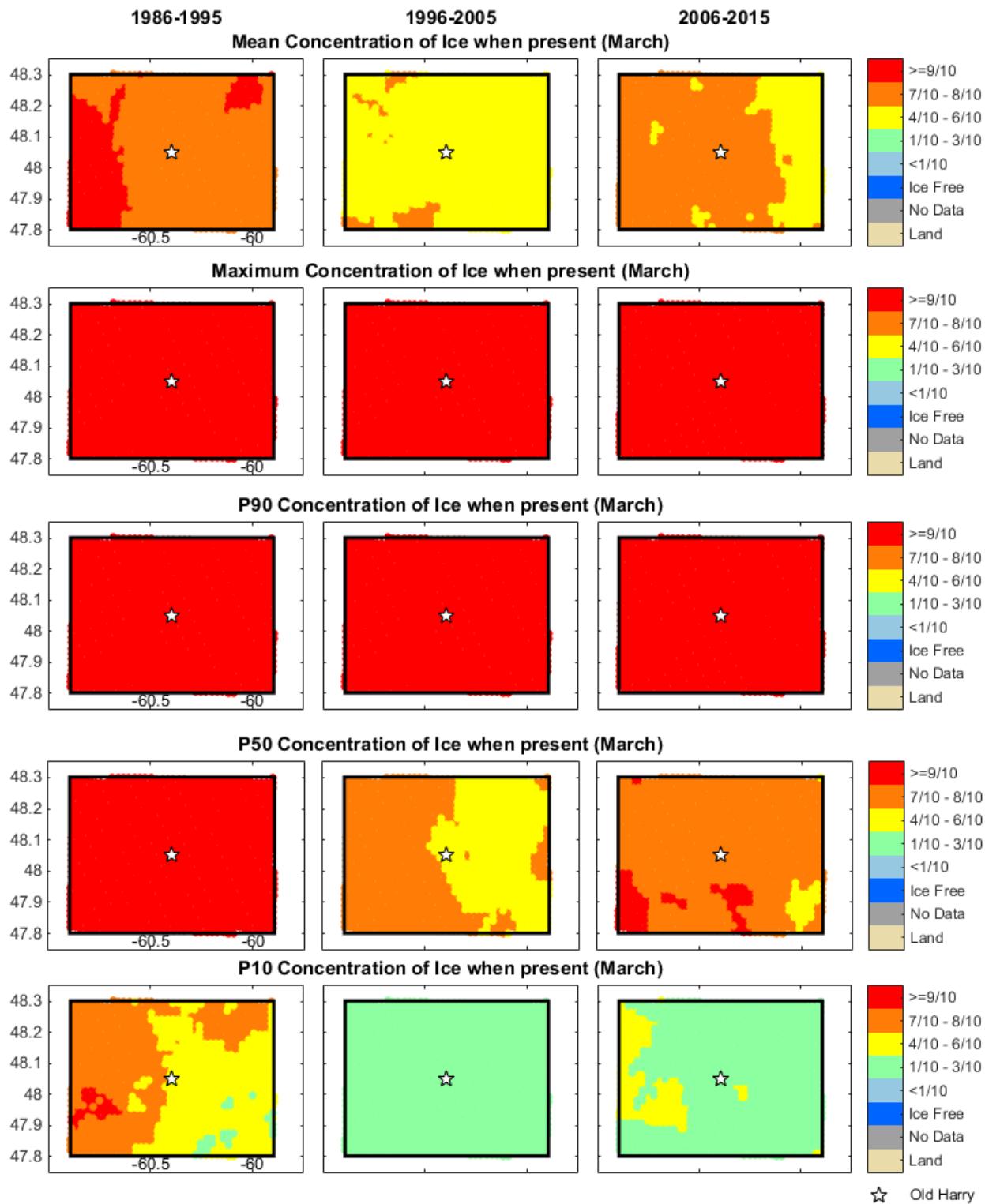


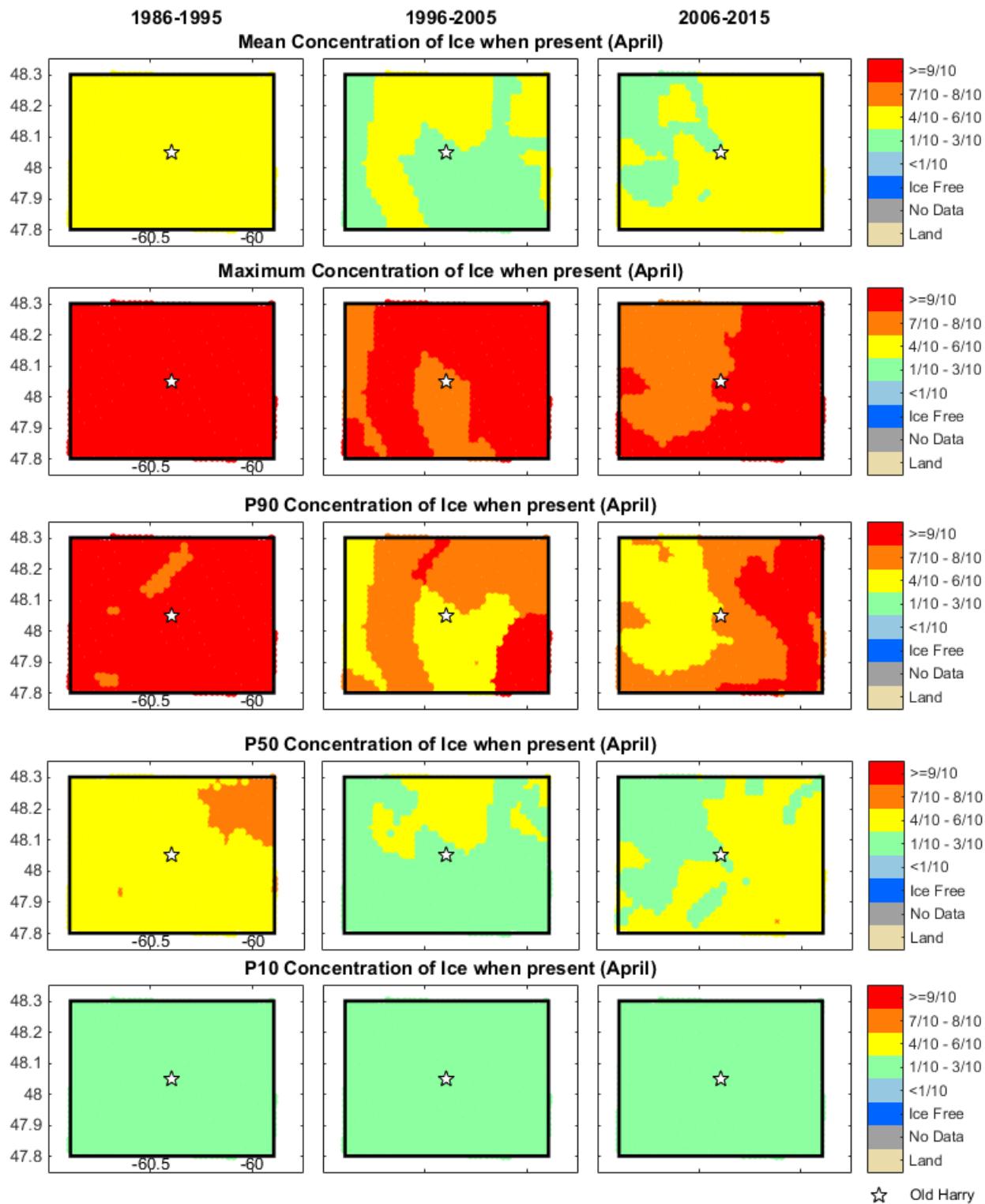


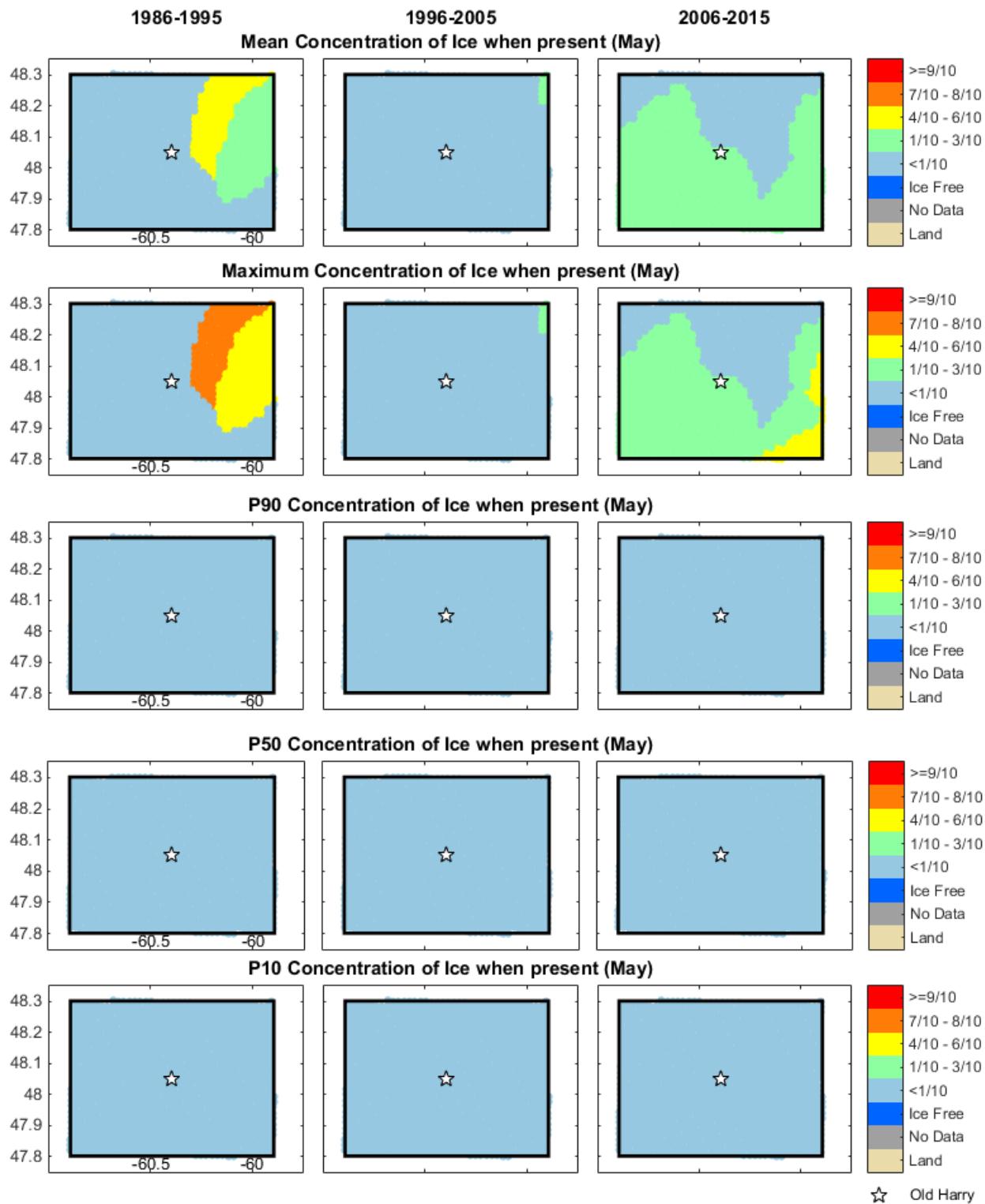


**ANNEXE E – CONCENTRATION MENSUELLE**










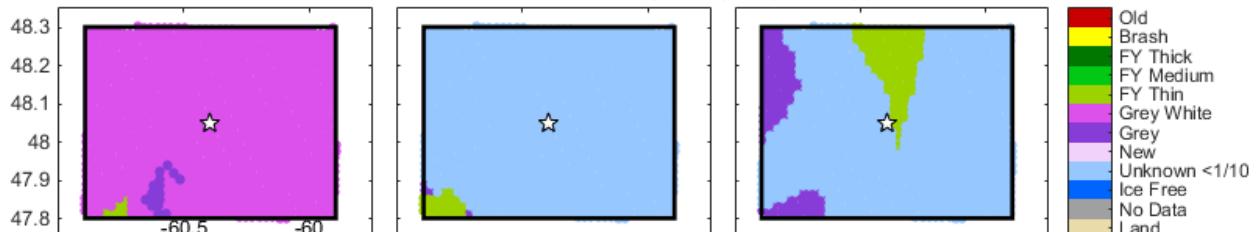
**ANNEXE F – TYPE DE GLACE PRÉDOMINANT SELON LE MOIS**

1986-1995

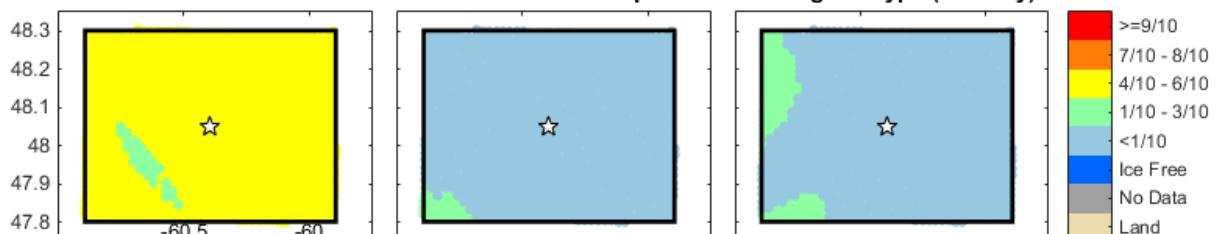
1996-2005

2006-2015

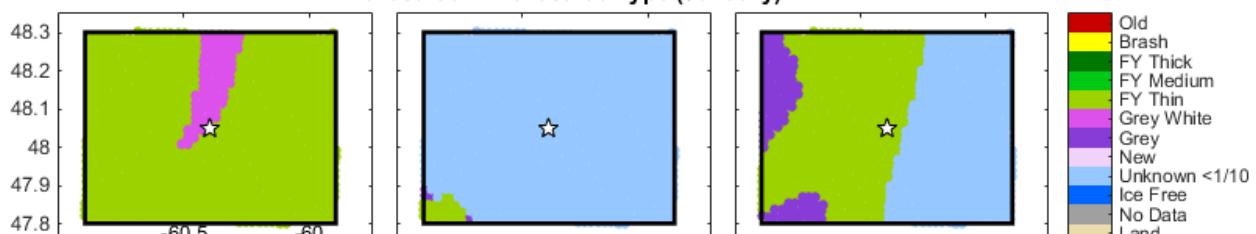
Thickest Ice: Most Frequent Recurring Ice Type (January)



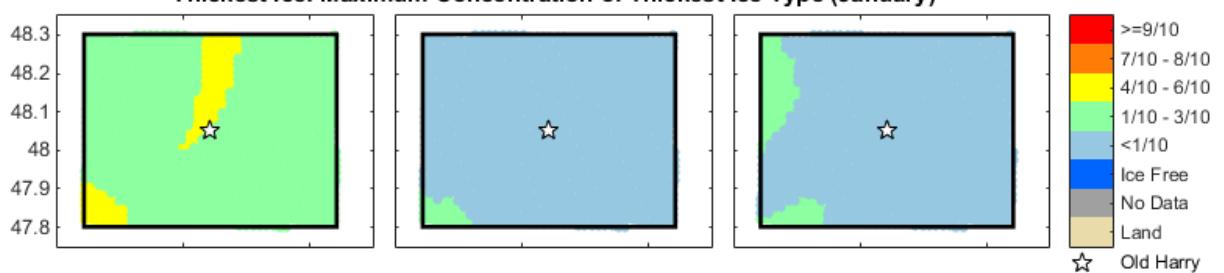
Thickest Ice: Maximum Concentration of Most Frequent Reoccurring Ice Type (January)



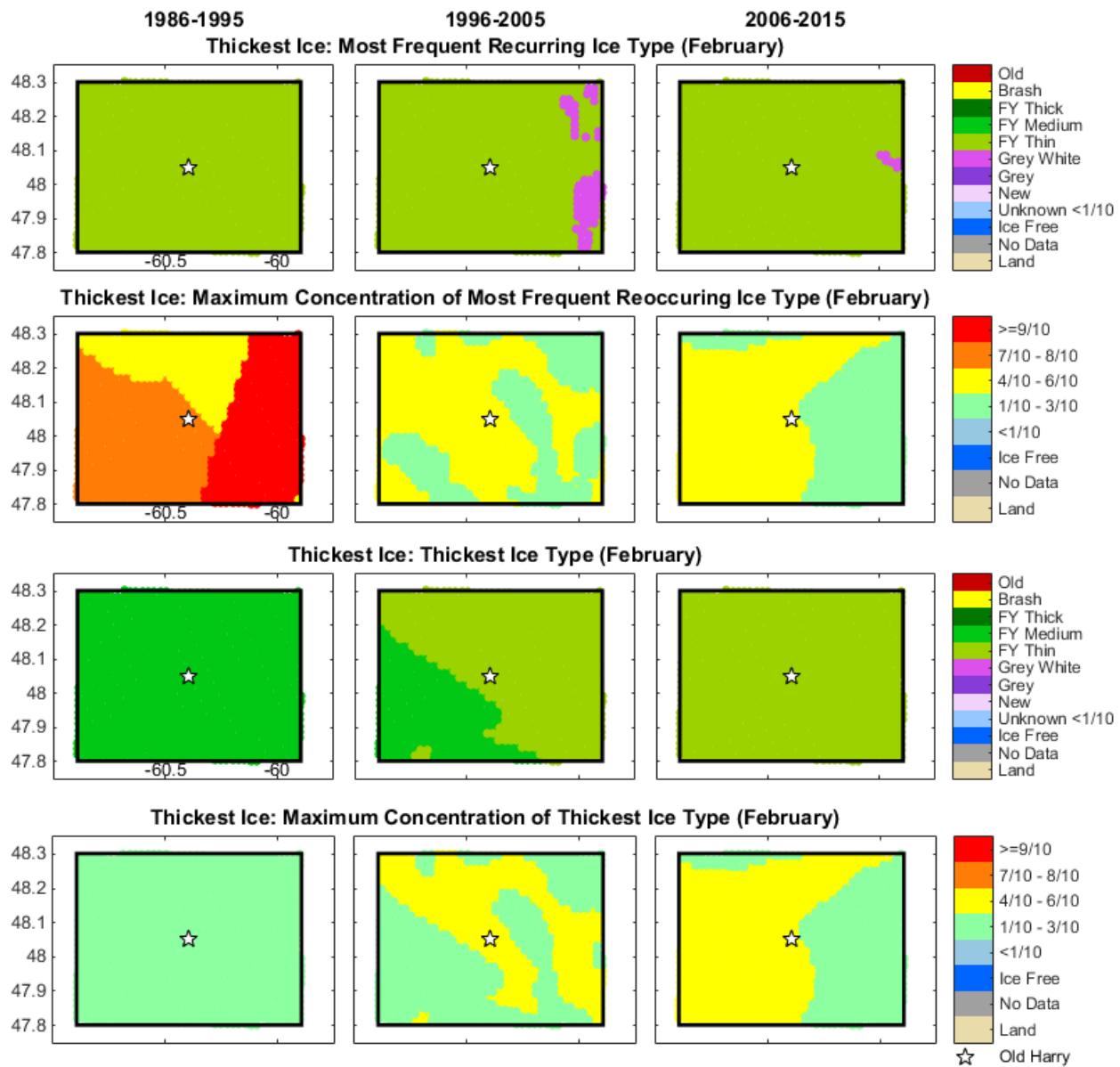
Thickest Ice: Thickest Ice Type (January)

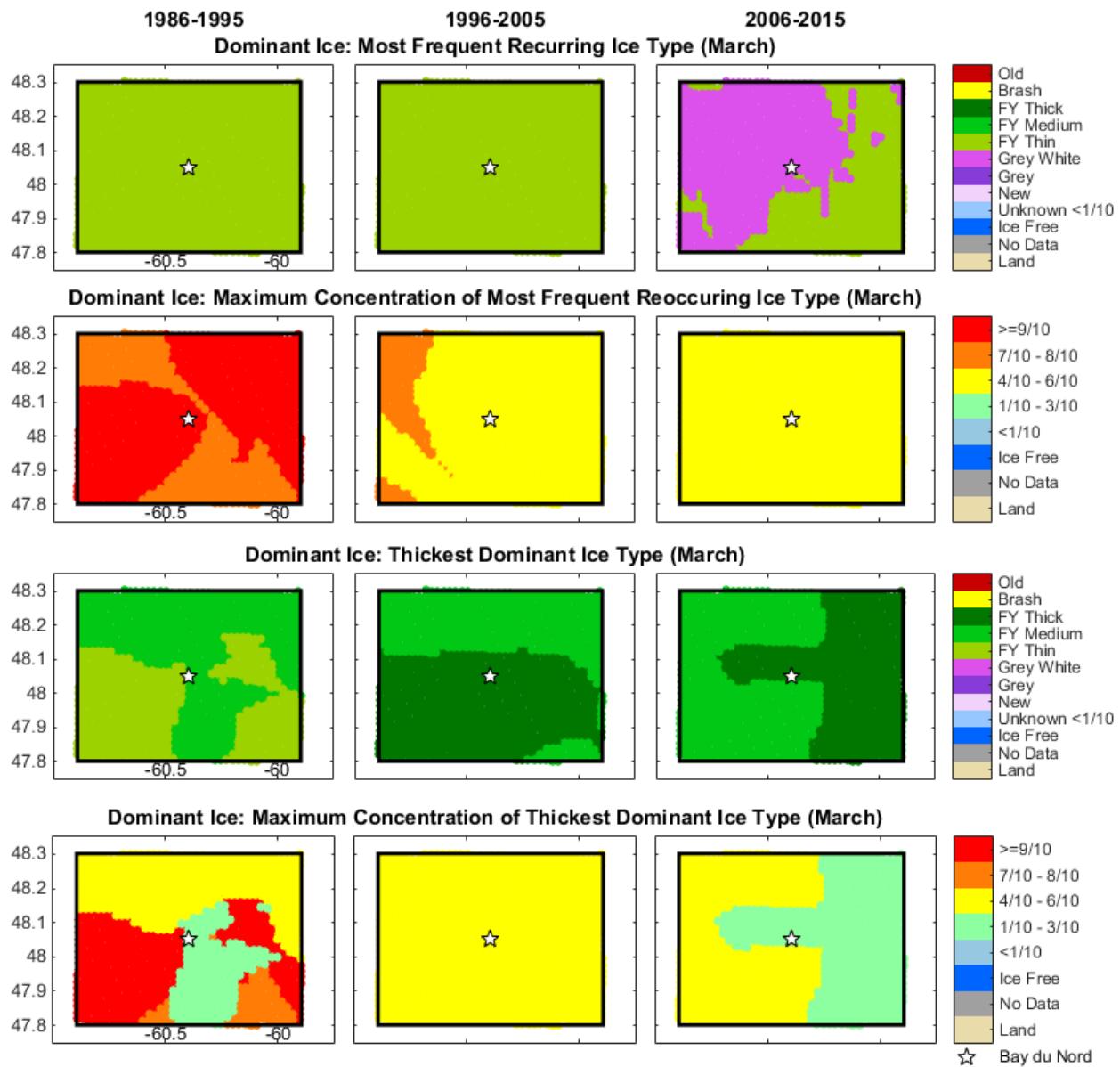


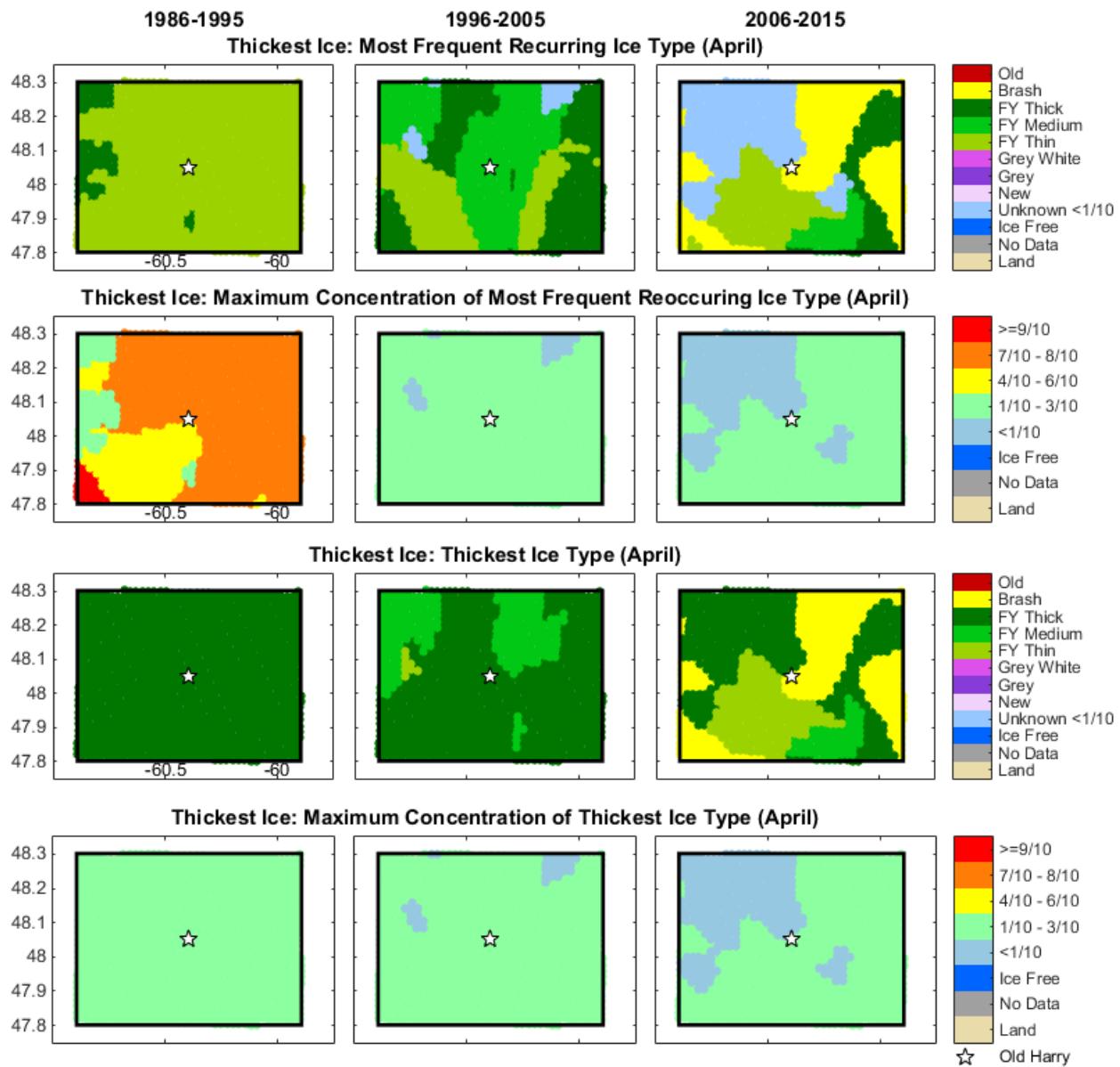
Thickest Ice: Maximum Concentration of Thickest Ice Type (January)

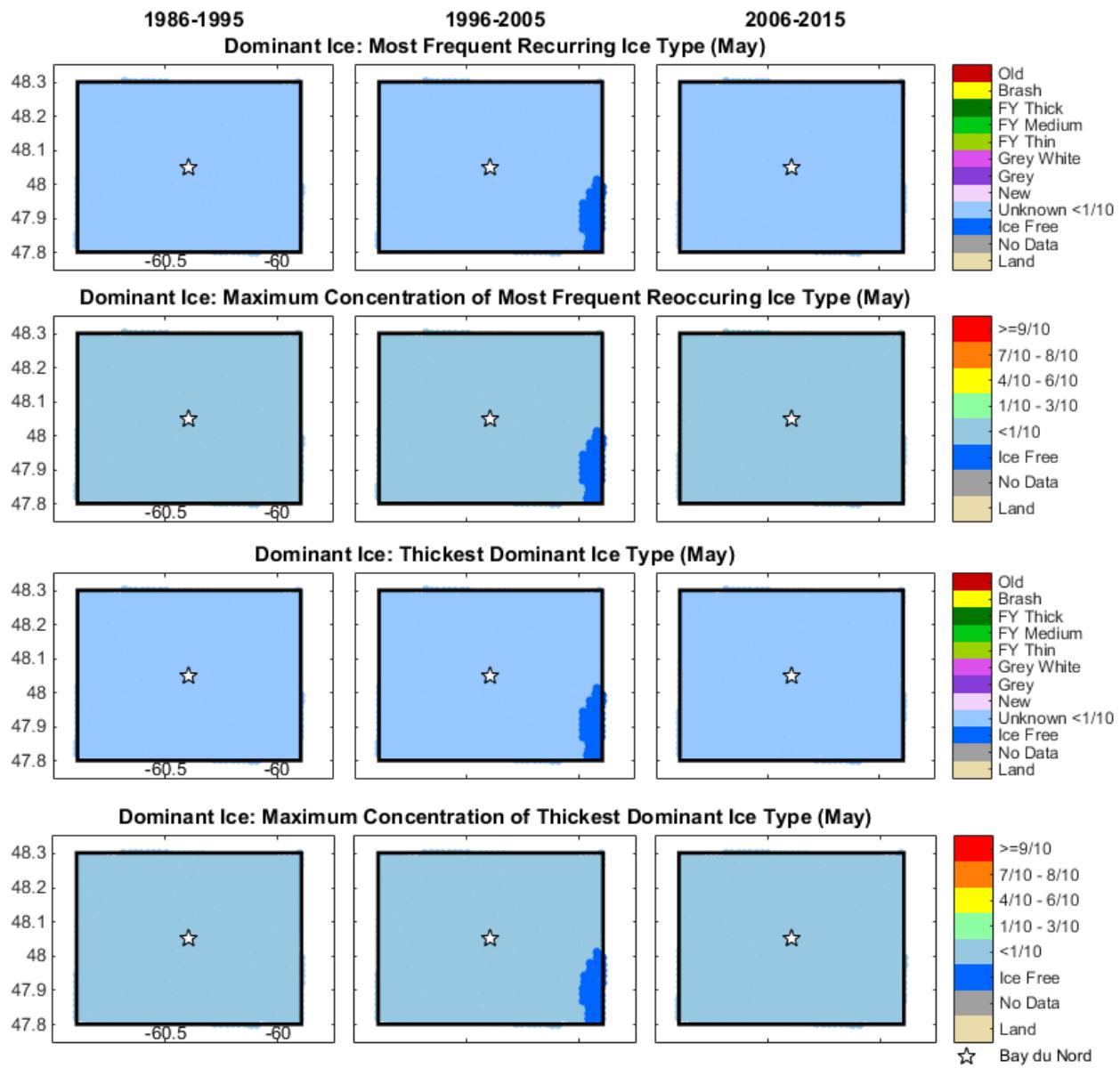


☆ Old Harry









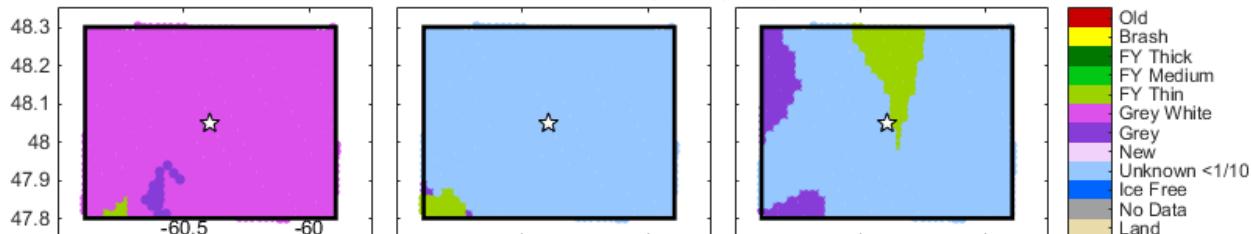
**ANNEXE G – TYPE DE GLACE LE PLUS ÉPAIS SELON LE MOIS**

1986-1995

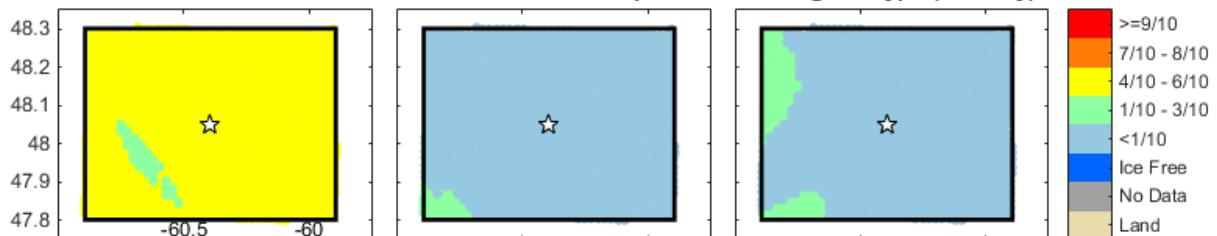
1996-2005

2006-2015

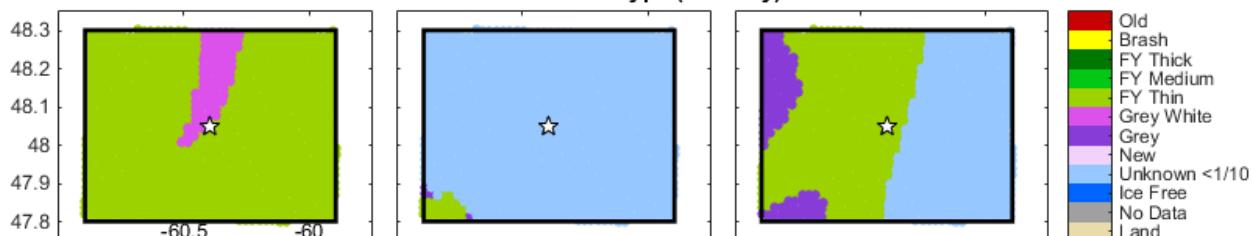
Thickest Ice: Most Frequent Recurring Ice Type (January)



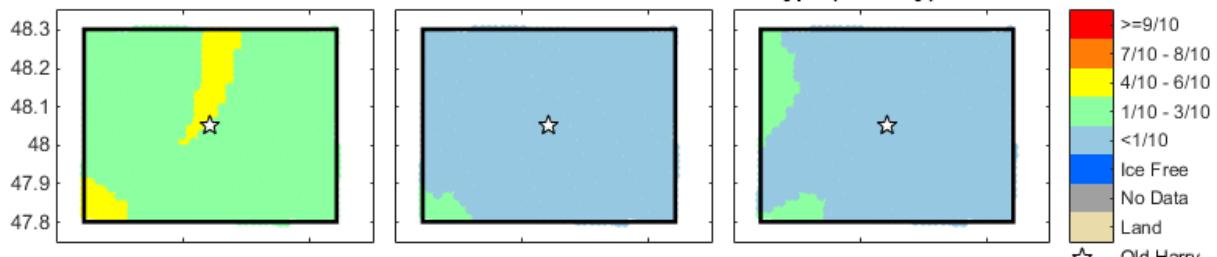
Thickest Ice: Maximum Concentration of Most Frequent Reoccurring Ice Type (January)

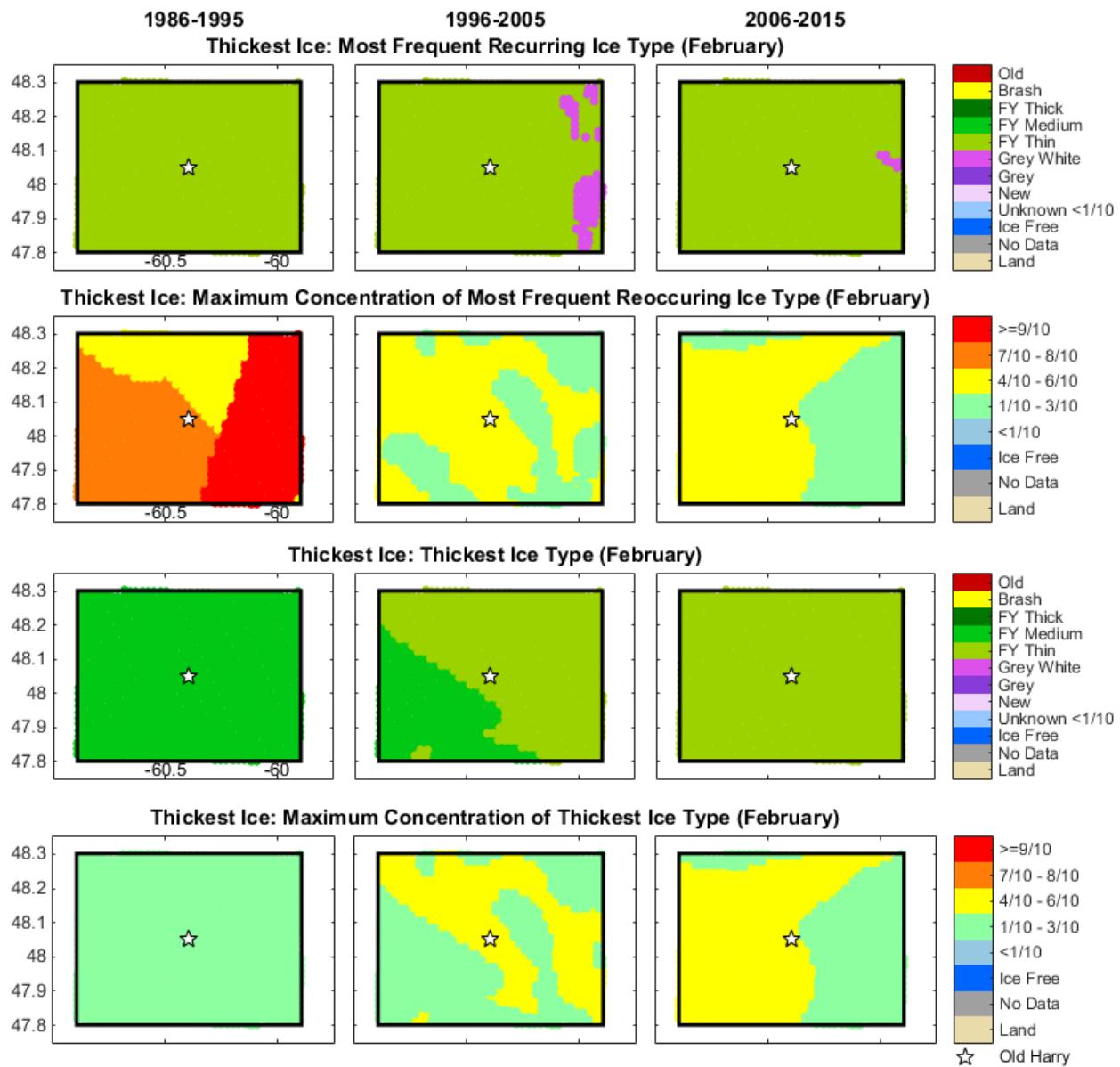


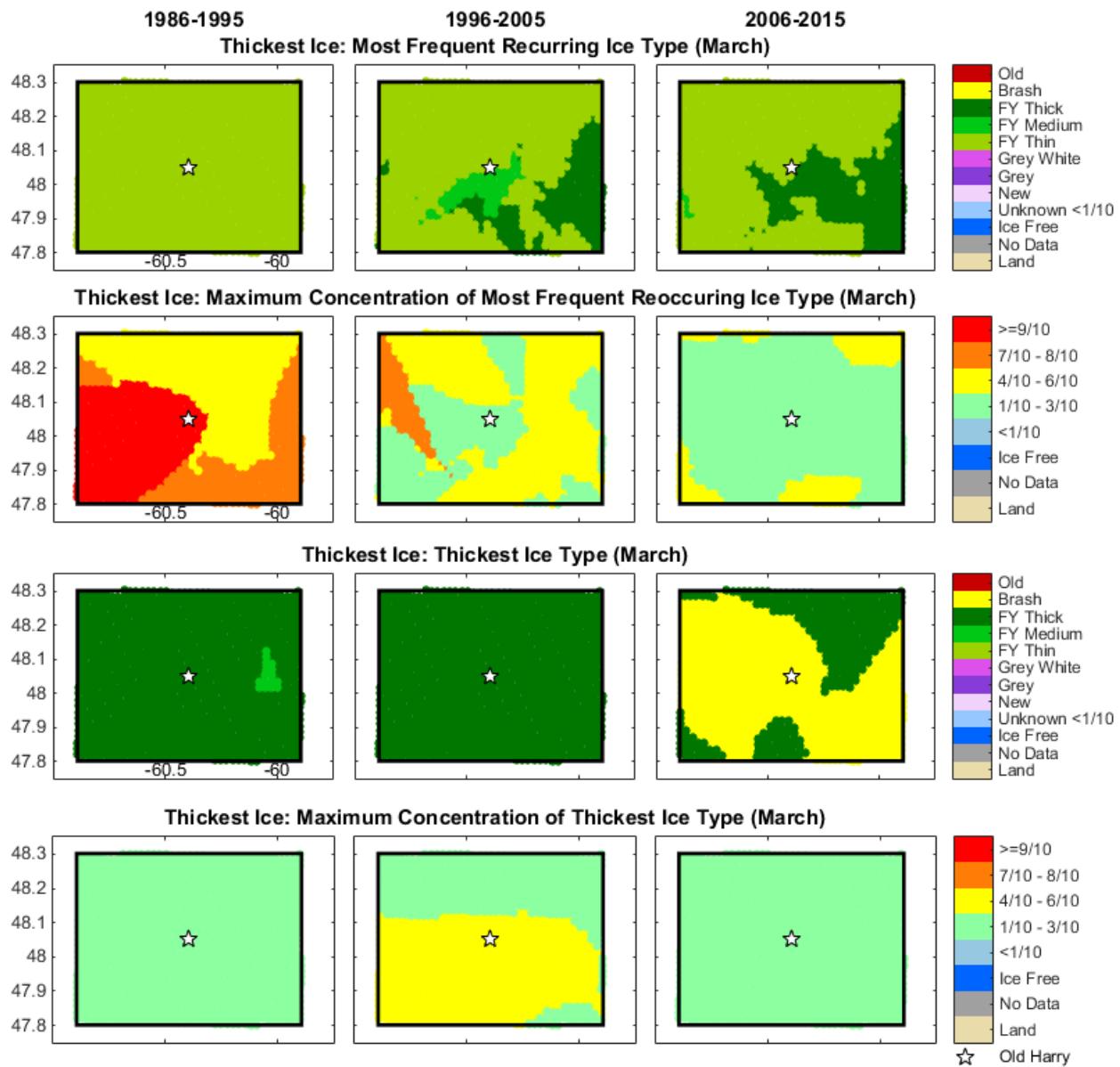
Thickest Ice: Thickest Ice Type (January)

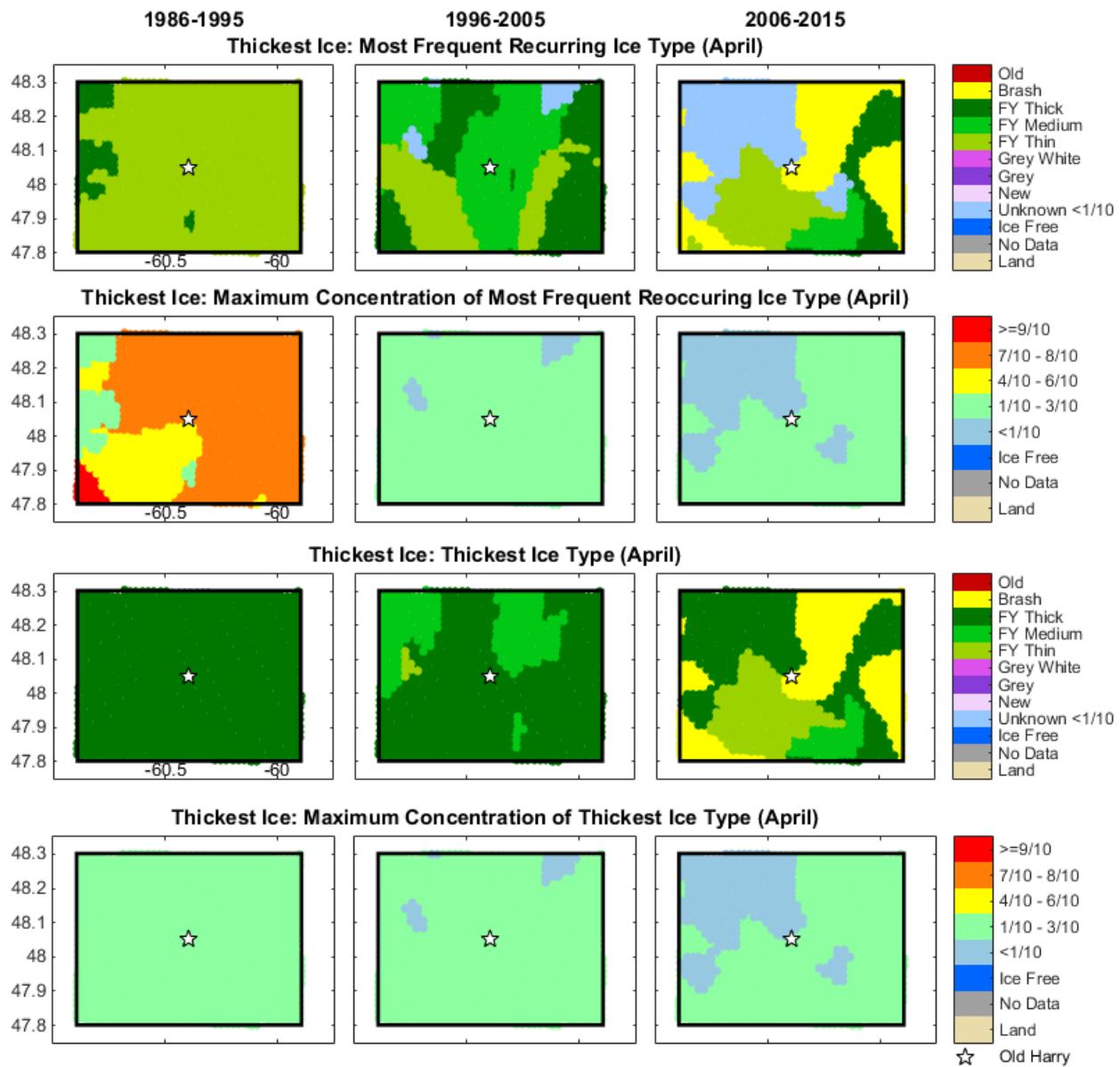


Thickest Ice: Maximum Concentration of Thickest Ice Type (January)







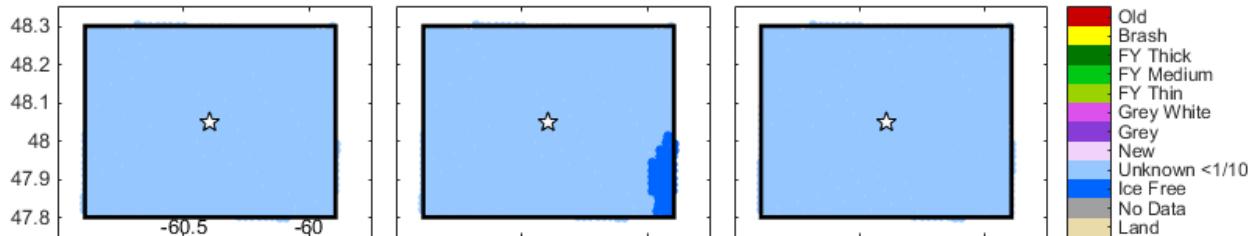


1986-1995

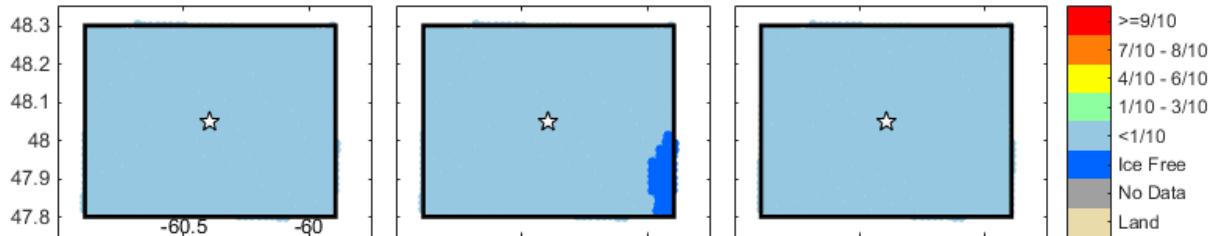
1996-2005

2006-2015

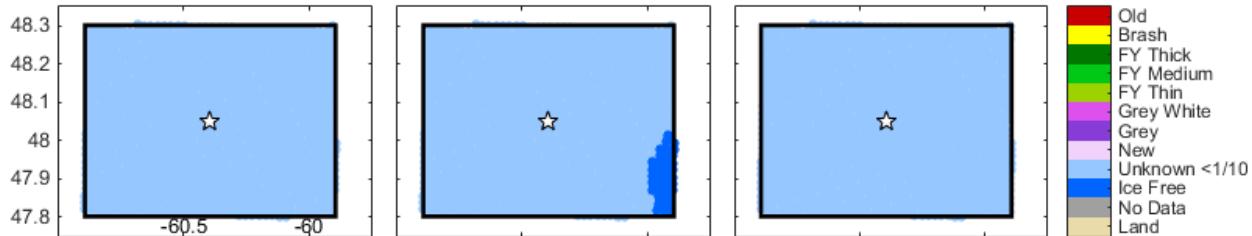
## Thickest Ice: Most Frequent Recurring Ice Type (May)



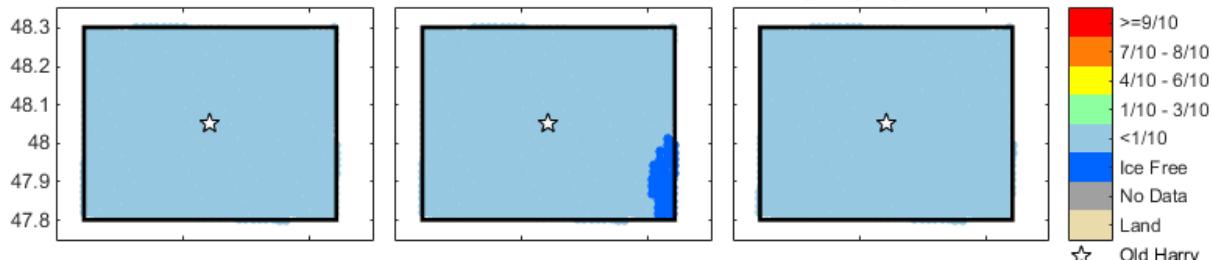
## Thickest Ice: Maximum Concentration of Most Frequent Reoccurring Ice Type (May)



## Thickest Ice: Thickest Ice Type (May)

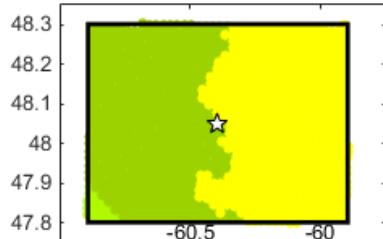
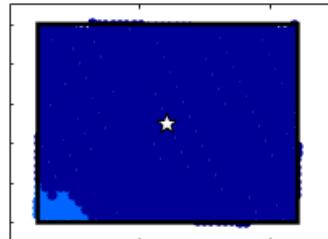


## Thickest Ice: Maximum Concentration of Thickest Ice Type (May)

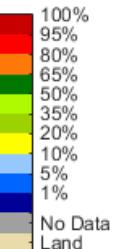
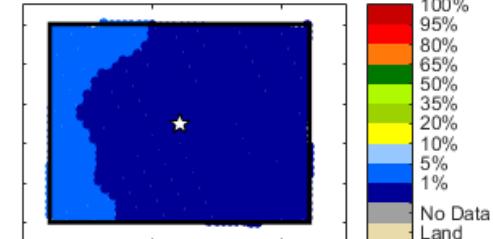

 Old Harry

## ANNEXE H – PROBABILITÉ D’ÉPAISSEUR DE GLACE SELON LE MOIS

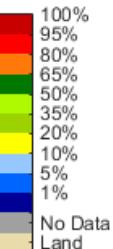
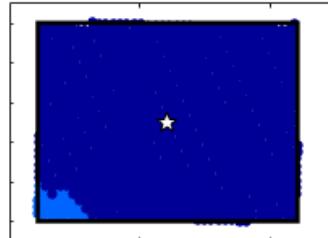
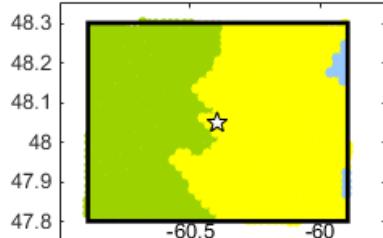
1986-1995


 1996-2005  
 Probability of Ice (January)


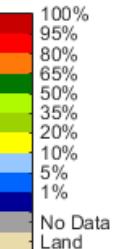
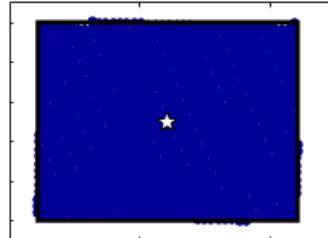
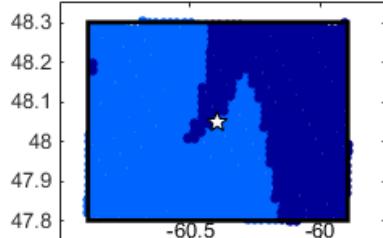
2006-2015



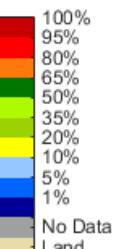
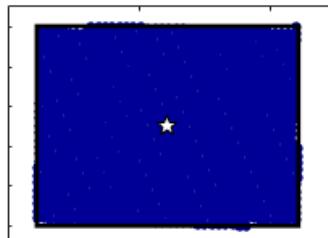
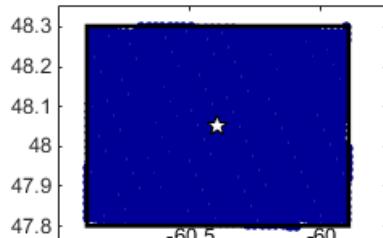
Probability of Ice Less Than 30cm (January)



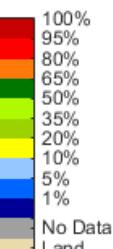
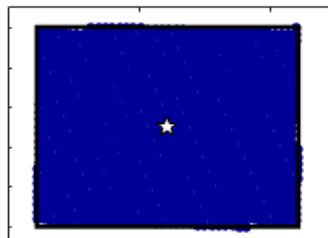
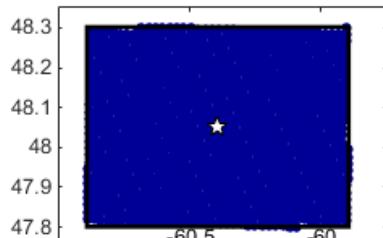
Probability of Ice Greater than 30cm (January)



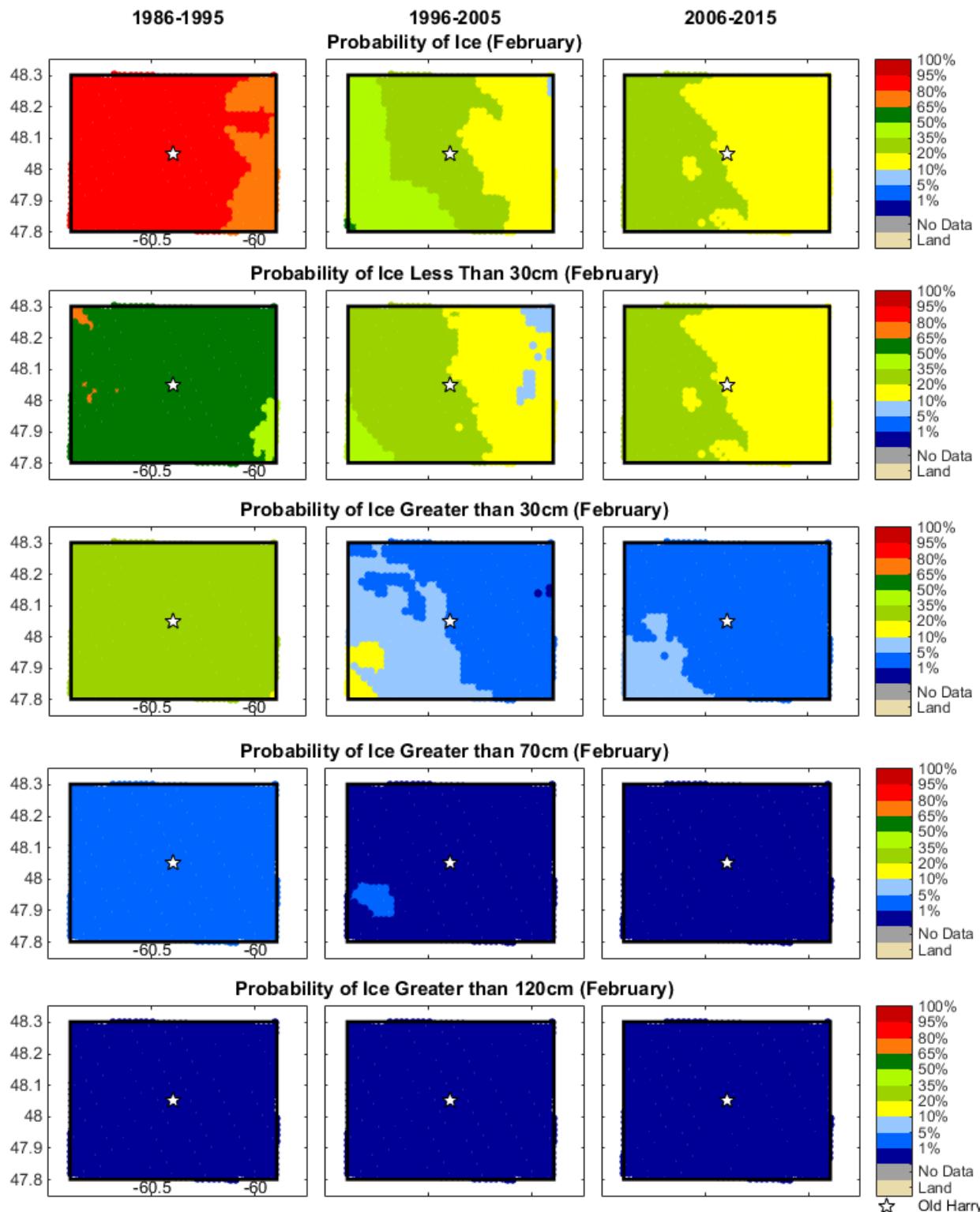
Probability of Ice Greater than 70cm (January)

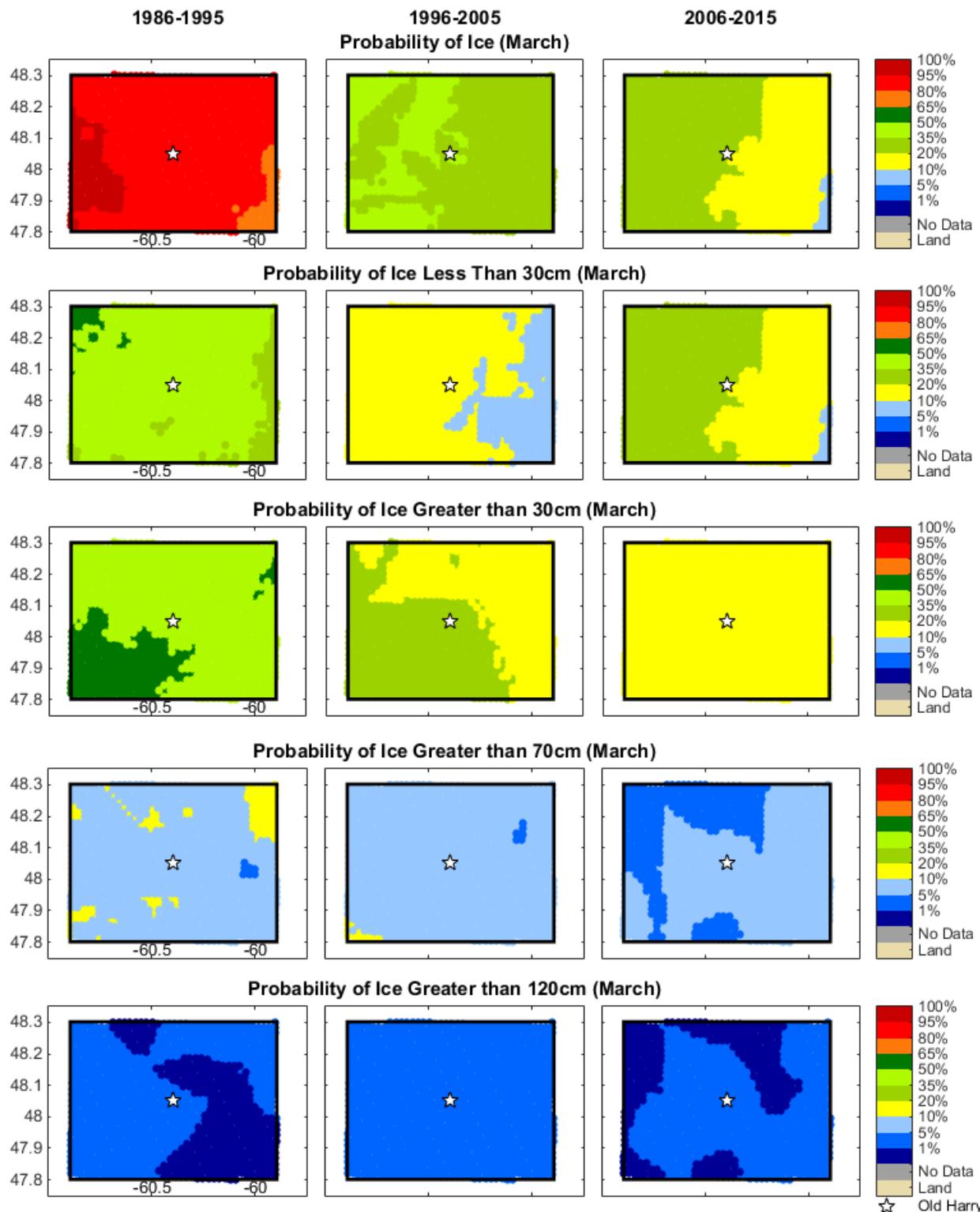


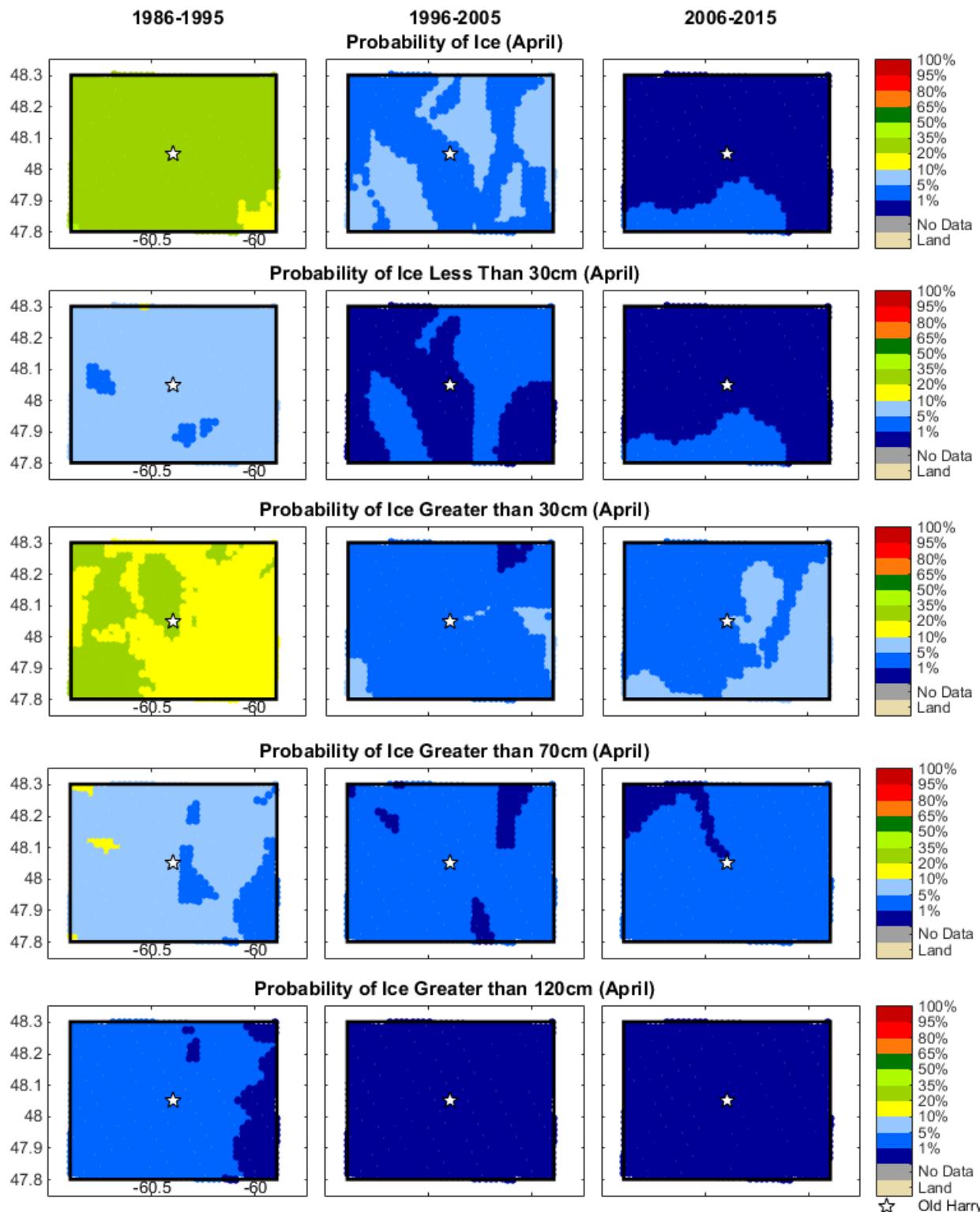
Probability of Ice Greater than 120cm (January)

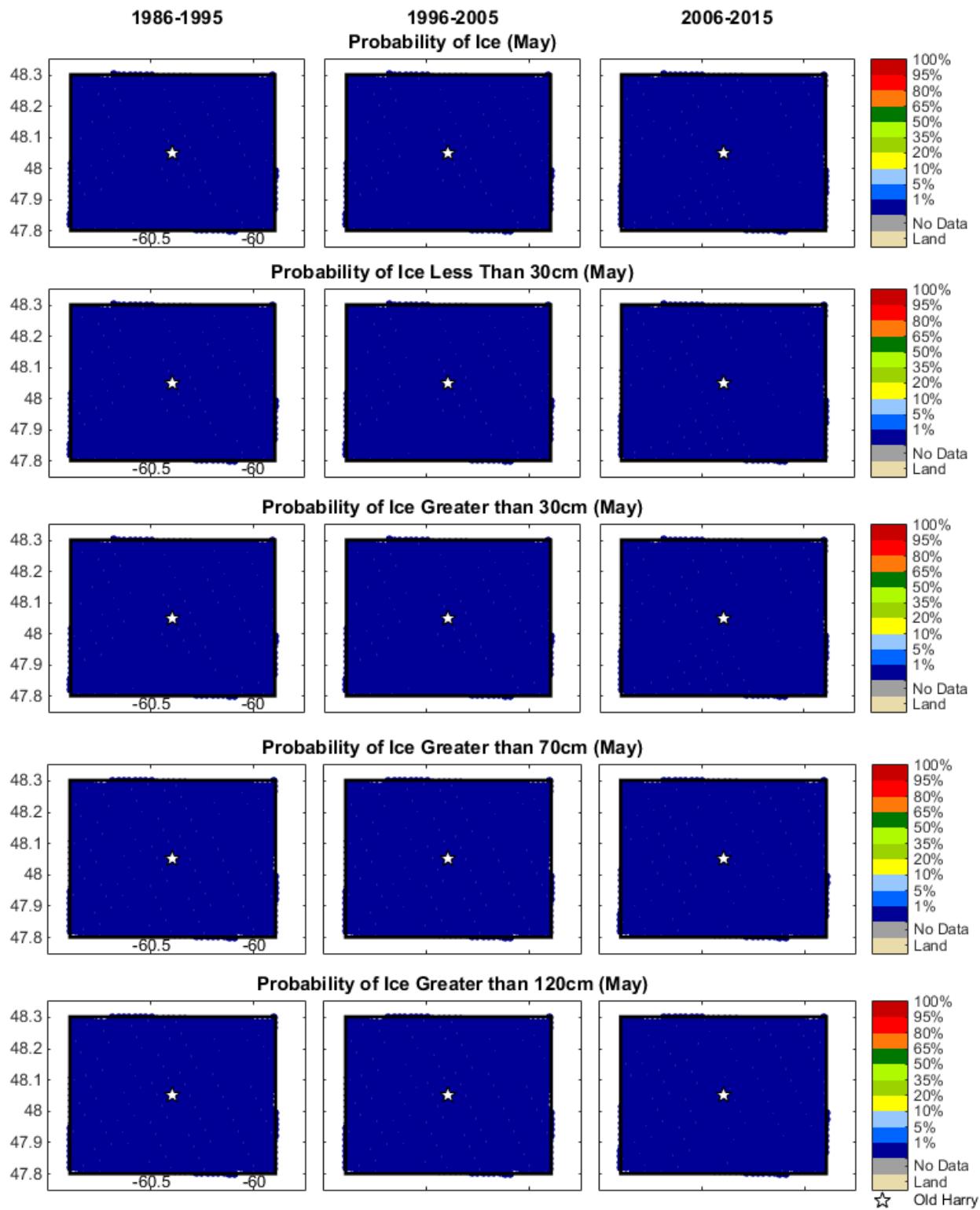


 Old Harry









**LAST PAGE OF DOCUMENT**