

Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

PROJET ICEPAC
ATLAS INTERACTIF SUR LA PROBABILITÉ DE L'ALÉA GLACE À L'ÉCHELLE
DES INFRASTRUCTURES MARITIMES ET CÔTIÈRES DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport d'étape 2014-2015

Présenté à OURANOS et Ressources Naturelles Canada

par

Monique Bernier, Charles Gignac et Karem Chokmani

1^{er} mars 2015

Rapport de recherche INRS R-1576

Équipe de travail

Responsable de projet

Monique Bernier, Ph.D., INRS-ETE

Étudiant au Ph.D.

Charles Gignac, M.Sc., INRS-ETE

Professionnels

Yves Gauthier, M.Sc., INRS-ETE

Jimmy Poulin, M.Sc., INRS-ETE

Comité scientifique

Karem Chokmani, Ph.D., INRS-ETE

Anick Guimond, M.Sc., MTQ

Jean-Pierre Savard, M.Sc., OURANOS

Christian Poirier, M.Sc. Ing., MTQ

ISBN : 978-2-89146-845-9

TABLE DES MATIÈRES

Glossaire	vi
1. Introduction	- 1 -
Problématique	- 1 -
Objectifs du projet	- 3 -
Contenu du rapport	- 5 -
Territoire à l'étude	- 6 -
2. Méthodologie	- 7 -
Objectif 1 : Étude régionale de la variabilité spatiotemporelles des glaces	- 7 -
Objectif 2 : Cartographie des concentrations locale automatisée au 250m	- 7 -
Objectif 4 : Mise en place de l'outil d'aide à la décision	- 9 -
Objectif 5 : Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces	- 10 -
3. Résultats et discussions	- 11 -
Étude régionale de la variabilité spatiotemporelles des glaces	- 11 -
Cartographie des concentrations locale automatisée au 250m	- 12 -
Mise en place de l'outil d'aide à la décision	- 14 -
Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces	- 16 -
4. Conclusion et échéancier	- 19 -
5. Références	- 21 -
Annexe 1 : Réunion du comité scientifique	- 23 -
Buts de la rencontre du 21 novembre 2014	- 23 -
Ordre du jour	- 23 -
Principales recommandations	- 23 -
Annexe 2 : Publications scientifiques et communications	- 25 -
Affiches	- 25 -
Exposés oraux	- 25 -
Articles	- 25 -

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Région étudiée dans le projet IcePAC (© Google, 2015).....	- 6 -
Figure 2 : Données OSI409 du 01/10/2009	- 8 -
Figure 3 : Composé couleurs réelles MODIS-Terra de la côte ouest du Nunavik du 5/6/2012 .	- 9 -
Figure 4 : Comparaison entre un jeu de données MERRA et un jeu de données OSI409	- 11 -
Figure 5 : Évaluation de l'efficacité à discerner les glaces de l'eau pour 3 ratios spectraux différents	- 12 -
Figure 6 : Comparaison des masques de nuages pour le MOD32_L5 et le CM_IceMap250 ...	- 13 -
Figure 7 : Approche de régression KNN entre le NDSI1km et l'IST1km pour l'obtention de l'IST250m.....	- 14 -
Figure 8 : Carte IceMap250 de présence de glace en transparence sur l'image couleurs réelles. (Vert : Glace, Bleu : Eau, Rouge : Nuage)	- 15 -
Figure 9 : Schéma de l'architecture « web mapping » permettant de différencier les capacités du WMS et du WFS	- 16 -
Figure 10 : Courbes de progression du CO ₂ pour chaque RCP	- 17 -
Figure 11 : Comparaison des états de concentration de glace pour le 30 décembre 2025, 2050, 2075 et 2100 pour CanRCM4 RCP85	- 18 -
Figure 12 : Échéancier original du projet IcePAC	- 20 -

Glossaire

CC	Changements Climatiques
Eumetsat	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GeoTIFF	Geographically positioned Tag Image File Format
IST	Ice Surface Temperature
KNN	K Nearest Neighbors
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDSI	Normalized Difference Snow Index
NDSII-2	Normalized Difference Snow and Ice Index - 2
NORDREG	Northern Canada Vessel Traffic Services Zone Register
OGC	Open Geospatial Consortium
OSI	Ocean and Sea Ice Facility de l'EUMETSAT
RCP	Representative Concentration Pathways

1. Introduction

Problématique

La présence de la glace de mer dans les eaux nordiques est d'importance capitale pour la protection des côtes, pour les communautés, le climat et les activités économiques.

En ce qui a trait à la protection des côtes et des infrastructures maritimes, la glace de rive diminue la vulnérabilité aux pressions externes de la glace et du vent [Ogorodov, 2003]. Le déclin de la couverture de glace et de sa durée à un impact direct sur la surface disponible au vent, le fetch, ce qui peut laisser présager des vagues plus fortes ayant des effets directs sur l'érosion côtière. Les sarrasins ou floes de glace en dérive représentent également un risque pour les côtes lorsque ces dernières ne sont plus protégées par la glace de rive. Pour les communautés côtières, particulièrement les communautés autochtones, le couvert de glace de mer est utilisé de manière quasi-journalière dans le cadre des déplacements entre les communautés ou pour les activités de chasse ou de pêche. Le peuple inuit, nomade, avec ses activités traditionnelles reposant énormément sur le mouvement et la connaissance du territoire, identifie l'océan arctique comme une « autoroute » et ce, qu'elle soit ou non glacée [Krupnik et al., 2010]. La situation précaire des glaces et le danger en découlant devient complexe à gérer pour ce peuple qui, depuis des centaines, voire des milliers d'années, fait appel à un savoir traditionnel transmis de génération en génération.

Au niveau du climat, la diminution de la superficie du couvert de glace marine [Stroeve et al., 2012] a un impact sur la rétroaction glace/albédo [Curry et al., 1995] qui explique en partie le phénomène d'amplification Arctique [Pithan and Mauritsen, 2014]. Le déclin de l'étendue couverte par la glace de mer implique également une exposition accrue des côtes aux phénomènes océaniques et atmosphériques comme les tempêtes et surcotes. Depuis 1978, on observe grâce aux satellites micro-ondes passives un déclin de la glace pluriannuelle au profit de la glace de première année qui ne survit pas à la fonte [Comiso, 2012]. La moyenne de la superficie couverte par les glaces lors du minimum de septembre présente un déclin d'un peu plus de 11% par décennie [Kwok and Untersteiner, 2011].

Enfin, l'activité économique de la région arctique est de facto liée à la dynamique des glaces et à son impact sur les transports maritimes. Une multitude de modélisations [L C Smith and Stephenson, 2013] démontrent que les grandes routes de transport du bassin arctique pourraient être libres de glace, lors du minimum de septembre, d'ici 2050. Des navires de classes OW (*Open water*), PC7 (*Polar Class 7*) et PC6 (*Polar Class 6*) pourraient alors emprunter le passage du Nord-Ouest librement (Table 1). Également, depuis 1974, année d'implantation du NORDREG, le nombre d'escales enregistrées dans la région arctique (au-delà du cercle polaire, 60°N) est en augmentation [Lasserre and Têtu, 2015].

Table 1 : Classes polaires pour les navires

Classe polaire	Description des conditions navigables
PC1	Navigation toute l'année dans la région arctique.
PC2	Navigation toute l'année dans des conditions de glace pluriannuelle modérée.
PC3	Navigation toute l'année dans des conditions de glace de deuxième année avec présence possible de glace pluriannuelle.
PC4	Navigation toute l'année dans des conditions de glace épaisse de première année avec présence possible de vieille glace.
PC5	Navigation toute l'année dans des conditions de glace moyenne de première année avec présence possible de vieille glace.
PC6	Navigation estivale et automnale dans des conditions de glace moyenne de première année avec présence possible de vieille glace.
PC7	Navigation estivale et automnale dans des conditions de glace mince de première année avec présence possible de vieille glace.

Dans l'ensemble de ces domaines, des données de haute-résolution spatiale et temporelle sont un outil vers une meilleure compréhension et préparation face aux CC. Le succès des activités et des projets mis de l'avant dans la région arctique dépend, comme ailleurs, du niveau de préparation et de connaissances des décideurs et acteurs. Or, actuellement, peu de données à haute-résolution sont produites par les services nationaux de cartographie afin de permettre aux intervenants et chercheurs à faire face et de bien comprendre les changements induits par les CC sur le couvert glaciaire.

Il est pertinent pour les gestionnaires, ingénieurs, géomorphologues et navigateurs d'être aptes à quantifier les aléas liés au couvert de glace de manière à évaluer et minimiser les risques liés à l'usage, la construction et l'exploitation d'infrastructures côtières. Le besoin d'information

précise deviendra de plus en plus d'actualité avec l'intensification escomptée des activités en Arctique et les besoins en infrastructures qui en découlera.

Dans la littérature, des études sur la variabilité temporelle de la glace de mer et sur les tendances liées aux changements climatiques ont été publiées [*Cavalieri et al.*, 2003; *Johannessen et al.*, 2004; *Parkinson*, 2000; *Parkinson and Cavalieri*, 2008]. Également, des analyses statistiques sur les valeurs centrales des distributions de concentrations de glace (moyenne, médiane), les valeurs extrêmes (étendue maximale et minimale) ainsi que les durées des saisons de glace sont fournies dans des produits comme l'Atlas des glaces du SCG [*CIS*, 2013]. Par contre, aucune information n'est fournie sur la nature de la distribution statistique des concentrations, leur probabilité d'occurrence et leur variabilité spatiale, particulièrement au niveau local.

Parmi les outils disponibles, les cartes du SCG sont probablement les plus utilisées, malgré qu'elles soient orientées principalement vers le milieu de la navigation. Les informations qui y sont données ne cadrent pas nécessairement avec les activités des ingénieurs et gestionnaires. Les autres outils, comme les modèles climatiques et physiques, quoique pertinents, proposent des résolutions spatiales ne permettant pas d'évaluer adéquatement les aléas et risques localement.

C'est dans ce contexte que le développement de méthodes et d'outils permettant l'étude des conditions de glace tant à l'échelle régionale (12.5km) qu'à l'échelle locale (250m) prend tout son sens.

Objectifs du projet

Pour répondre aux besoins présentés ci-dessous, l'objectif principal proposé dans le cadre du projet IcePAC est :

- de créer, grâce à de l'information historique sur le couvert de glace, un outil d'aide à la décision reposant sur des modélisations probabilistes régionales et locales de la variabilité spatiotemporelle des conditions de glace prenant en compte l'impact des CC.

Pour atteindre cet objectif principal, cinq objectifs spécifiques seront abordés :

- I. l'étude de la variabilité spatiotemporelle du couvert de glace à l'échelle régionale (12.5km) afin d'établir les caractéristiques des distributions statistiques des concentrations de glace pour chaque maille dans la Baie et le détroit d'Hudson¹.
 - I A : Acquisition et préparation des données
 - I B : Statistiques descriptives des données
 - I C : Analyse fréquentielle à l'échelle régionale
 - I D : Détection des cas non-stationnaires
 - I E : Comblent les vides dans les séries temporelles.

- II. développer des procédures de cartographie automatisée des concentrations de glace à l'échelle locale (250m) à partir d'imagerie optique et thermique afin de constituer une base de données historique des conditions de glace.
 - II A : Cartographie RADARSAT au 10m
 - II B : Cartographie RADARSAT au 50m
 - II C : Cartographie MODIS 250m
 - II D : Validation des approches
 - II E : Application des approches sur l'ensemble du jeu de données

- III. l'étude de la variabilité spatiotemporelle du couvert de glace à l'échelle locale (250m) à proximité des communautés de Quaqtac et d'Umiujaq afin d'établir les caractéristiques des distributions statistiques des concentrations de glace pour chaque maille.
 - III A : Préparation et normalisation des données historiques locales
 - III B : Transfert des caractéristiques des distributions régionales vers l'échelle locale à l'aide d'approches Bayésienne.
 - III C : Production des résultats en zone côtière

¹ Un objectif a été ajouté à cette section afin de combler les vides dans les séries temporelles. Cet ajout découle d'une recommandation donnée par MM. Savard et Poirier lors de la dernière réunion du comité scientifique en novembre 2014.

- IV. la mise en place d'un outil d'aide à la décision en ligne sous la forme d'un atlas interactif des conditions de glace.
 - IV A : Sélection des descripteurs de l'aléa
 - IV B : Programmation de scripts
 - IV C : Programmation de l'interface web.
 - IV D : Tests de fonctionnalité de l'outil
 - IV E : Mise en ligne.
 - IV F : Rédaction du guide de l'utilisateur.
 - IV G : Atelier de formation.

- V. l'étude de l'impact des CC sur les conditions de glaces de mer en lien avec la gestion des risques aux infrastructures maritimes.
 - V A : Obtention des projections climatiques 2050+.
 - V B : Mise à jour des caractéristiques des distributions pour le climat futur.
 - V C : Mettre à jour et analyser les descripteurs de l'aléa glace.

Contenu du rapport

Ce rapport se veut une synthèse des progrès réalisés durant l'année 2014-2015 et présentera l'état d'avancement des objectifs I, II, IV et V. Quant à l'objectif III, il n'est pas encore officiellement entamé, ce qui explique pourquoi il n'est pas abordé dans le cadre de ce rapport.

Territoire à l'étude

Le territoire couvert par l'étude statistique de la variabilité spatio-temporelle, par la mise en place de l'Atlas et par les processus de cartographie automatisée couvre le complexe de la Baie d'Hudson (Figure 2).



Figure 1 : Région étudiée dans le projet IcePAC (© Google, 2015)

2. Méthodologie

Les prochains paragraphes décrivent les approches retenues pour atteindre chacun des objectifs du projet. Au besoin, le lecteur pourra référer au rapport annuel 2013-2014 du projet IcePAC pour obtenir des détails méthodologiques sur des sous-objectifs déjà réalisées du projet.

Objectif 1 : Étude régionale de la variabilité spatiotemporelles des glaces

Les données utilisées pour constituer les séries temporelles proviennent du jeu de données «*OSI409 : Global Sea Ice Concentration Reprocessing Dataset 1978-2009*» de l'EUMETSAT (Figure 2) élaborées à partir des données micro-ondes passives d'AMSR-E. Les cartes ont été produites et normalisées grâce aux algorithmes Bootstrap [Spreen *et al.*, 2005] et Bristol [D Smith, 1996]. Ces données sont prétraitées, transformées sous format GeoTIFF et stockées pour la modélisation.

Les séries sont ensuite construites, corrigées pour la tendance, et stockées dans des fichiers individuels pour chacun des 365 jours de l'année.

La modélisation réalisée est obtenue par l'ajustement de la distribution Bêta aux séries, distribution présentant une grande flexibilité mais qui surtout répond au contexte de l'analyse en permettant la modélisation de données bornées [0,1].

Enfin, sur recommandation du comité scientifique, une approche modélisant le lien entre les données de réanalyses MERRA et les données OSI-409 permettra de combler les vides présents dans les séries temporelles de données OSI-409 en reconstituant à partir de données MERRA des jeux de données de concentrations à une résolution spatiale comparable aux données OSI.

Objectif 2 : Cartographie des concentrations locale automatisée au 250m

L'approche de cartographie locale fait appel aux images des capteurs MODIS-Terra et MODIS-Aqua, respectivement opérationnels depuis 1999 et 2002. Ces deux capteurs fournissent des images sur 32 bandes spectrales à des résolutions variant de 250m à 1km (Figure 3).



Figure 2 : Données OSI409 du 01/10/2009

L'algorithme proposé², nommé IceMap250, fait appel tant aux bandes du visible qu'aux bandes de l'infrarouge et est basée sur l'application de ratio et de seuils sur les données afin d'identifier si la glace est présente à la surface. Afin d'obtenir une résolution de 250m, une méthode de désagrégation spatiale³ des données MODIS est appliquée [Luo *et al.*, 2008] et une nouvelle méthode de désagrégation spatiale des données de température de surface est appliquée, permettant ainsi d'avoir l'ensemble des données nécessaires à la cartographie des glaces à l'échelle locale.

La dernière étape consiste à appliquer un algorithme existant, le « *Potential Open Water* » [Drièr and Heinemann, 2004], visant à déterminer des concentrations de glace à partir des cartes de glaces obtenues via notre algorithme.

² L'algorithme proposé dans le cadre du projet IcePAC est inspiré de l'algorithme IceMap de la NASA (Hall, D. K., G. A. Riggs, V. V. Salomonson, J. Barton, K. Casey, J. Chien, N. DiGirolamo, A. Klein, H. Powell, and A. Tait (2001), Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms, NASA GSFC, September.). Cet algorithme propose une cartographie des glaces journalières à une résolution spatiale de 1km.

³ La désagrégation spatiale, communément appelée "downscaling" vise à améliorer la résolution spatiale des pixels d'une image.

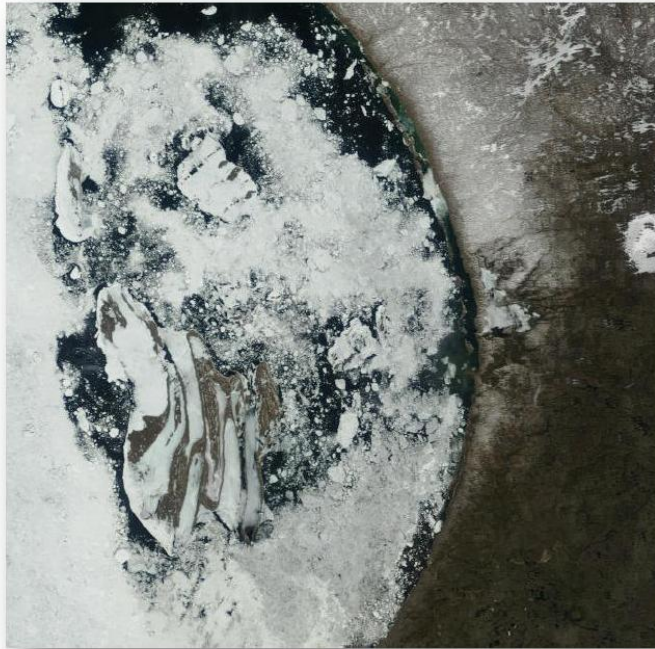


Figure 3 : Composé couleurs réelles MODIS-Terra de la côte ouest du Nunavik du 5/6/2012

Originellement, aux objectif II-A et II-B, les données de RADARSAT devaient être utilisées afin de réaliser une cartographie des zones pour lesquelles les données MODIS ne pouvaient pas fournir d'information étant donnée un couvert nuageux trop important. La réalisation de la cartographie avec les données radar s'avère difficile car le protocole d'accès à la base de données contenant les images est restreignant. En fait, il nous est impossible, avec la configuration actuelle du serveur de données, de télécharger l'ensemble de l'imagerie disponible, il nous faudrait procéder avec le téléchargement d'une image à la fois. Considérant cela, il a été stratégiquement décidé qu'afin d'éviter d'investir trop de temps, les objectifs II-A et II-B seraient mis en attente. Notez que l'équipe gérant la base de données sur laquelle se trouvent les images a été avisée et qu'une solution est envisageable à moyen terme.

Objectif 4 : Mise en place de l'outil d'aide à la décision

L'approche proposée consiste à procéder à une interview et/ou à un questionnaire courriel avec l'utilisateur afin de cerner ses besoins potentiels en information sur la dynamique du couvert de glace. Diverses personnes ressources ont été identifiées comme utilisateurs potentiels (Table 2)

Table 2 : Personnes ressources pouvant trouver intérêt dans le projet IcePAC

<p>Frédéric Sirois Policy/Economic Officer at Transport Canada, Ottawa frederic.sirois@tc.gc.ca</p>	<p>Matt Arkett Physical Scientist, Remote Sensing - Service Canadien des Glaces, Ottawa matt.arkett@ec.gc.ca</p>	<p>Claudio Aporta Professeur « Marine Affairs Program » à l'Université Dalhousie, Halifax Claudio.aporta@dal.ca</p>	<p>Tom Morrison Manager Arctic and Cold Regions (Infrastructure) Ausenco Sandwell, Calgary Tom.morrison@ausencosandwell.com</p>	<p>Leah Braithwaite Chief, Applied Science – Remote Sensing, Environment Canada, Ottawa leah.braithwaite@ec.gc.ca</p>
<p>Leah Beveridge Maritime Activity and Risk Investigation Network à Dalhousie University, Halifax leah.beveridge@dal.ca</p>	<p>Sylvain Lafrance Directeur d'Innovation Maritime, Centre de recherche de l'IMQ, Rimouski slafrance@imar.ca</p>	<p>Tim Keane Vice-president, ENFOTEC (FEDNAV), Montréal tkeane@fednav.com</p>	<p>Simon Bélanger Université du Québec à Rimouski Rue des Ursulines, Rimouski simon_belanger@uqar.ca</p>	<p>Ronald Pelot Professeur « Industrial Engineering » à l'Université Dalhousie, Halifax Ronald.Pelot@dal.ca</p>

Le questionnaire visera à obtenir les informations suivantes :

- Quelle est la pertinence du projet IcePAC par rapport à vos activités ?
- Observez-vous des changements notables du régime glaciaire lors de vos activités ?
- Quels impacts ont ces changements sur vos activités ?
- Quels indicateurs aideraient à être mieux préparés pour faire face aux CC ?

Objectif 5 : Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces

L'étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces passe par une étude approfondie des données de modèles climatiques et des simulations qui en découlent. Avec ces simulations, sur un horizon 2020-2100, il sera possible de modéliser, mais à une échelle plus grossière que journalière, le comportement probabiliste escompté des glaces et ce pour plusieurs des scénarios RCP et pour divers modèles. Les modèles acquis font partie du projet CMIP-5 [Taylor et al., 2012].

3. Résultats et discussions

Étude régionale de la variabilité spatiotemporelles des glaces

Au niveau de l'étude de la variabilité régionale, rappelons l'ajout d'un nouvel aspect intégré suite à la rencontre du comité scientifique en novembre 2014. Il a été proposé que les « *gaps* » dans les séries temporelles soient comblés grâce à une approche visant à modéliser une relation statistique unissant les données de réanalyses climatiques MERRA et les données de concentrations de glaces de l'OSI409. Cette nouvelle étape reste à être compléter mais l'ensemble des données de réanalyses MERRA nécessaires ont été acquises et transformées en format GeoTIFF pour plus de facilité d'utilisation et pour affichage futur dans l'outil d'aide à la décision (Figure 4). Comme le montre la figure 4, les sorties des deux sources sont très similaires.

Comparaison des données MERRA et OSI-409

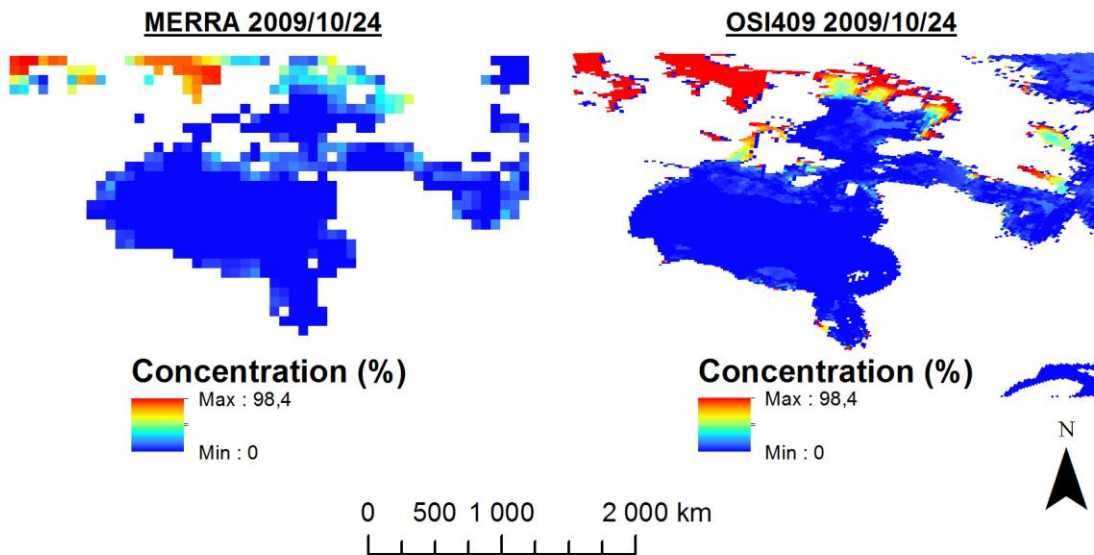


Figure 4 : Comparaison entre un jeu de données MERRA et un jeu de données OSI409

Cartographie des concentrations locale automatisée au 250m

L'algorithme de cartographie est complété. Ce dernier est actuellement en production et au final, une importante quantité de cartes de glaces sera disponibles pour chaque jour de l'année et ce entre 1999, année de lancement de la plateforme MODIS-Terra et aujourd'hui.

L'évolution de l'algorithme de cartographie s'est fait de par une multitude de tests et d'essais visant à pallier aux principales difficultés reliées à un tel exercice de cartographie soit d'éviter la surdétection de la glace, d'évaluer le couvert nuageux et la calibration des données.

Pour être en mesure de détecter adéquatement la glace, des modifications ont été apportées à l'approche originale de l'algorithme IceMap de la NASA [Hall *et al.*, 2001]. L'utilisation du ratio spectral NDSII-2 [Xiao *et al.*, 2001] plutôt que le NDSI [Dozier, 1989] permet de discerner de manière plus précise la glace de l'eau et des nuages (Figure 5).

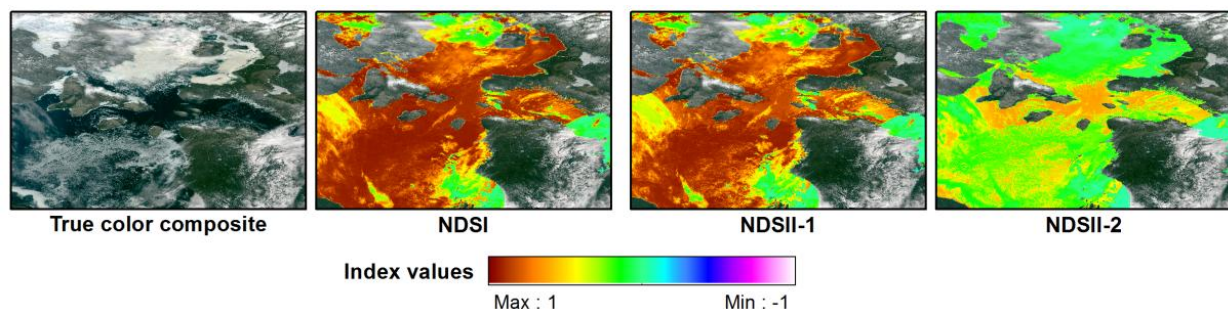


Figure 5 : Évaluation de l'efficacité à discerner les glaces de l'eau pour 3 ratios spectraux différents

Pour éviter les confusions entre les nuages et la glace, l'utilisation d'un masque de nuages est nécessaire. La NASA, de par son produit MOD35_L2, associé à MODIS-Terra et MODIS-Aqua, permet de masquer les nuages. Or, dans plusieurs cas, le masque de nuages de la NASA (MOD35_L2) surévalue la présence de nuages et génère ainsi une perte importante d'information sur les glaces sous-jacentes. Pour pallier à cette situation, nous proposons un masque de visibilité spécifique pour l'étude du couvert de glace (CM_ICEmap250) facile à obtenir via une approche par ratio spectral entre une bande reconnue pour représenter les températures de surface, soit la bande 20 de MODIS (3.7 μ m) et une autre bande, elle reconnue pour mieux représenter les températures en hautes altitudes (Couvert nuageux), soit la bande 32 de MODIS (12 μ m). Pour encourager un contraste encore plus marqué, la bande 6 (16.4 μ m) de MODIS, reconnue pour bien

discerner l'eau des nuages, est utilisée comme facteur multiplicatif. La valeur du ratio est donc calculable de la manière suivante (Éq. 1):

$$CM_{IceMap250} = (B6 * B20 - B32)/(B6 * B20 + B32) \quad (1)$$

A des fins d'illustration, les deux masques ont été appliqués sur deux images MODIS, l'une du 2 février 2005 et l'autre du 2 juillet 2007 (Figure 6). Il y a peu de différence à l'hiver entre les deux masques (en rouge), toutefois, en juillet, la région sans nuage ou sans brume et où l'océan est visible est plus importante (plus de pixels).

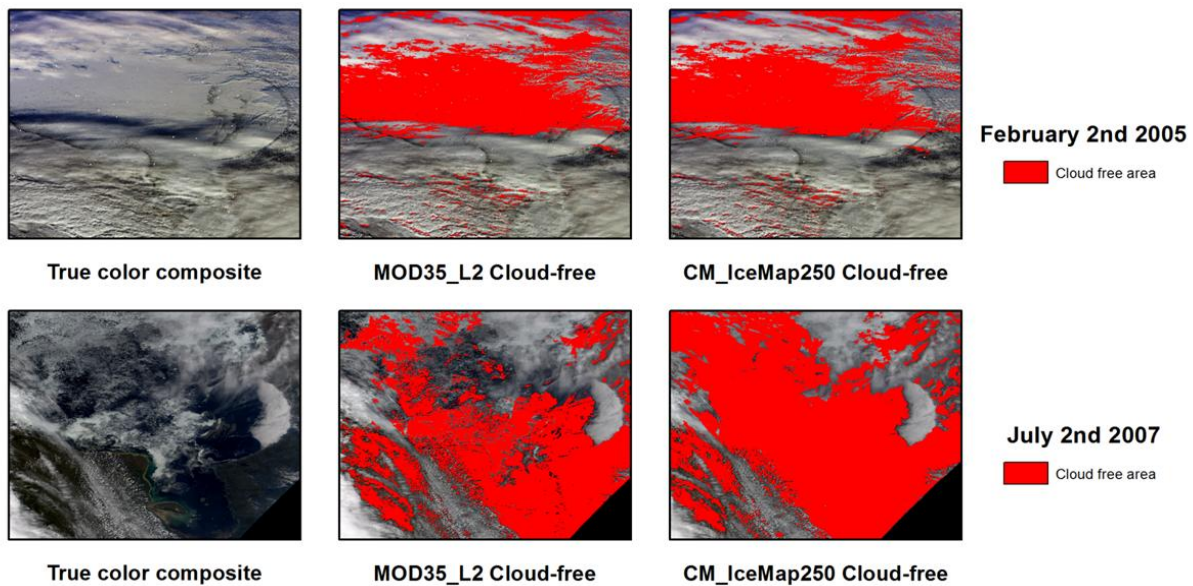


Figure 6 : Comparaison des masques de nuages pour le MOD32_L5 et le CM_IceMap250

Également, une autre information pouvant permettre de venir valider la présence possible de glace est la température de surface. Ce produit, disponible à une résolution spatiale de 1km via les données MOD29 de la NASA est, dans IceMap250, désagrégé spatialement jusqu'à une résolution de 250m. Cela est réalisable via une étude de régression KNN entre la température au 1km et le NDSI au 1km et ce pour chacun des pixels de l'image et ses 30 plus proches voisins (Figure 7).

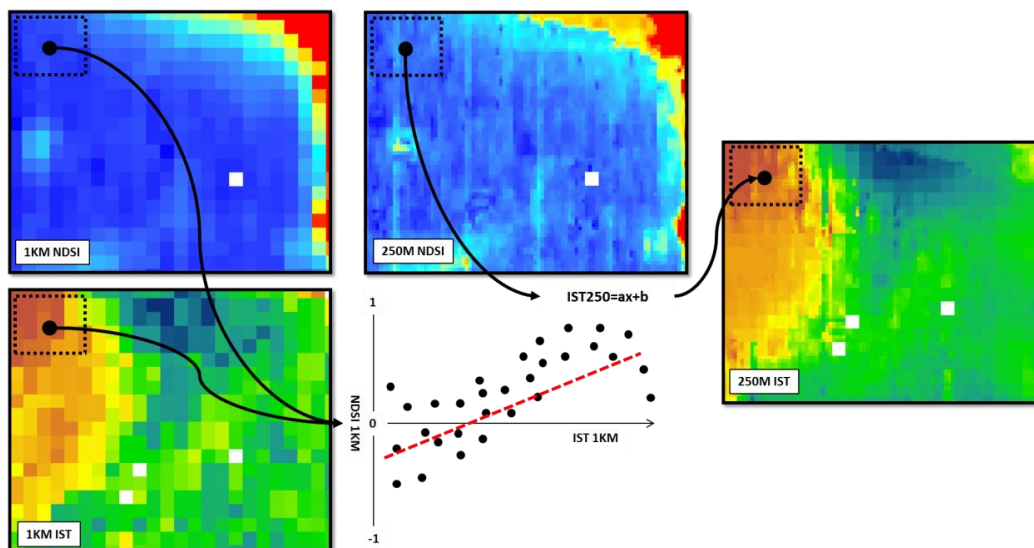


Figure 7 : Approche de régression KNN entre le NDSI1km et l'IST1km pour l'obtention de l'IST250m

L'algorithme donne actuellement trois produits (Figure 8) qui peuvent être d'intérêt pour les utilisateurs de données sur les glaces.

1. Carte de présence de glace.
2. Carte des températures de surface.
3. Carte de la couverture nuageuse.

La production d'une carte de glace à 250 m de résolution avec la version finale de l'algorithme prends environ 5-6 minutes par image, et ce pour 2-3 images par jour.

Mise en place de l'outil d'aide à la décision

Pour la mise en place de l'outil d'aide à la décision, la première étape consiste à choisir la plateforme web sur laquelle l'information sera diffusée et également la technologie derrière cette plateforme. Il faut aussi choisir à quelles fonctions devra avoir accès l'utilisateur. En fonction des besoins pressentis, il est envisagé d'aller de l'avant avec un outil GeoServer de type « *Web Feature Service* » (WFS) plutôt qu'avec un outil de type « *Web Mapping Service* » (WMS).

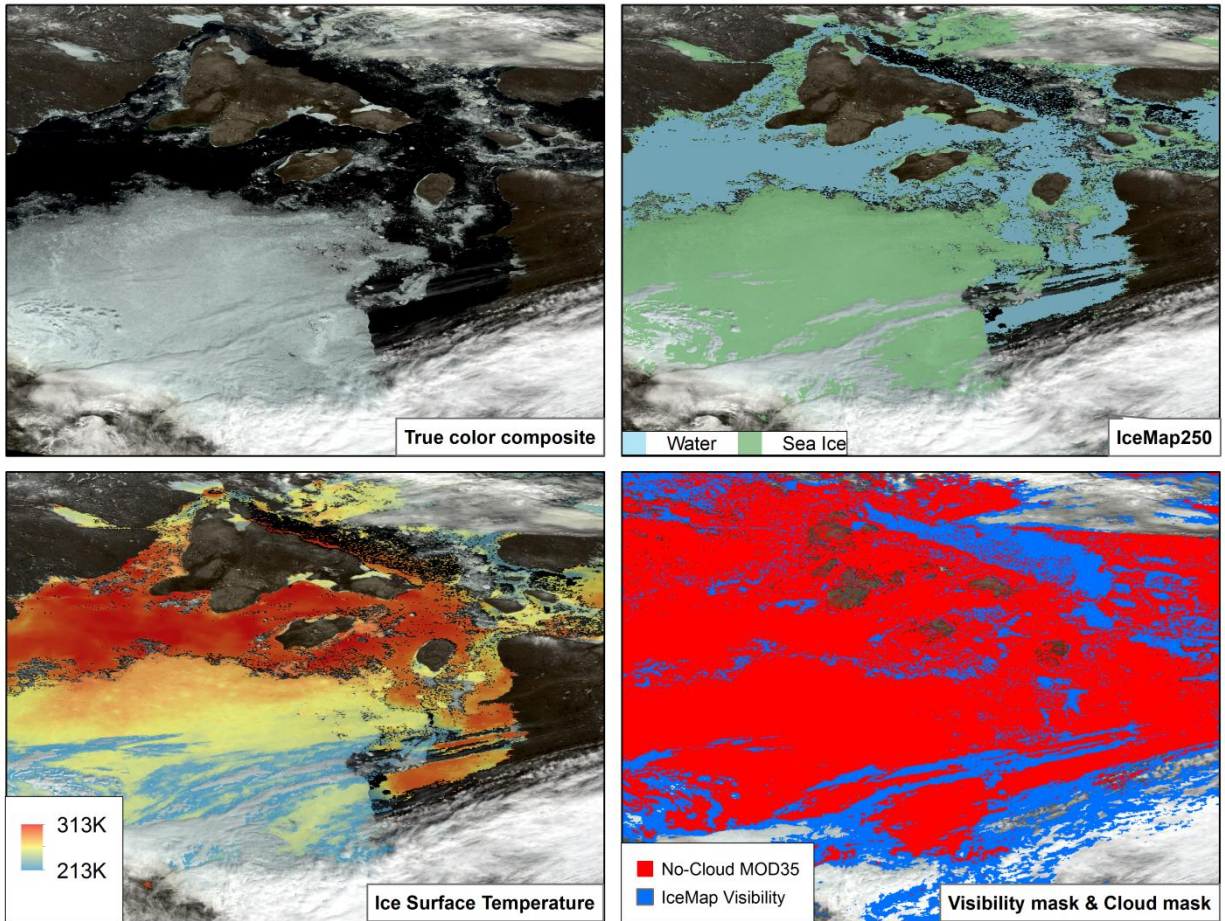


Figure 8 : Carte IceMap250 de présence de glace en transparence sur l'image couleurs réelles. (Vert : Glace, Bleu : Eau, Rouge : Nuage)

Le WFS permet à l'utilisateur d'effectuer directement des requêtes sur la donnée et ce localement, tandis que le WMS exige que la requête soit effectuée sur le serveur hébergeant la donnée pour que le résultat soit ensuite rediffusé sous forme d'image (Figure 9). L'avantage d'utiliser une telle approche est que non seulement un utilisateur pourra faire appel aux requêtes déjà programmées grâce aux réponses obtenues aux questionnaires et en interview, mais il pourra également, s'il a les connaissances nécessaires, programmer ses propres requêtes et ainsi développer ses propres indicateurs de l'état du couvert de glace. C'est cette option laissée à l'utilisateur qui nous fait préférer le WFS.

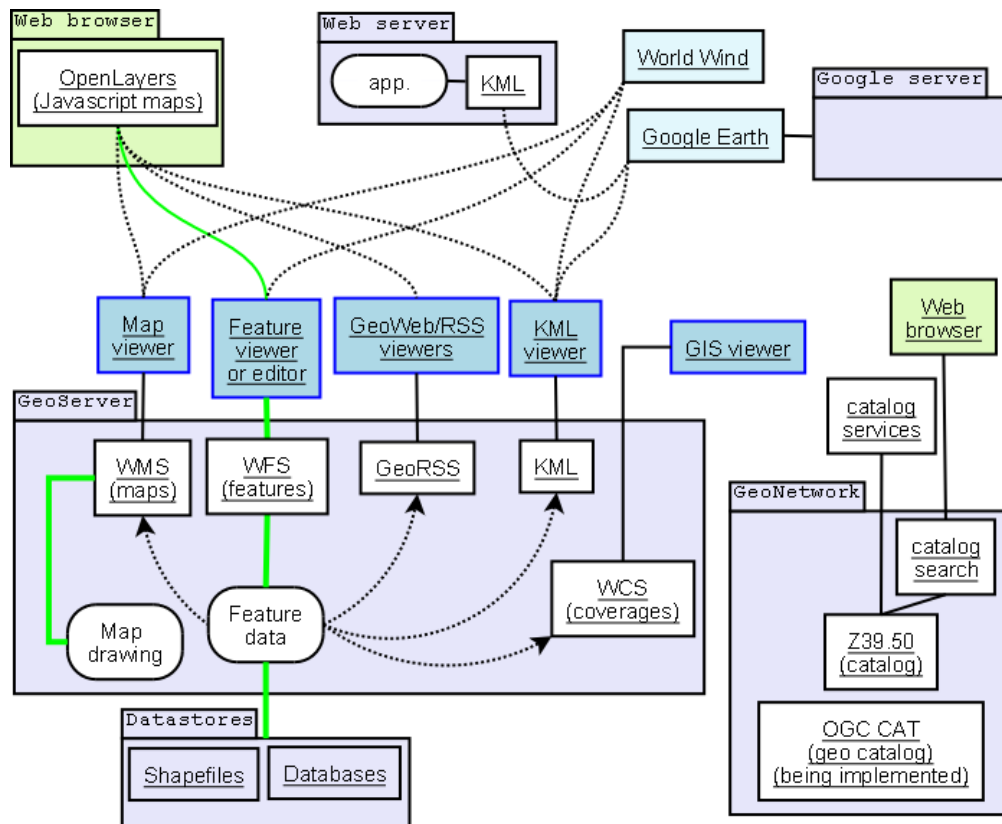


Figure 9 : Schéma de l'architecture « web mapping » permettant de différencier les capacités du WMS et du WFS

Les deux plateformes Open Source et conformes aux normes de l'OGC actuellement disponibles sont GeoServer et Deegree. Il est donc envisagé de mettre en ligne sur un site de démonstration l'un de ces serveurs de cartes. La demande d'hébergement auprès de l'INRS portera sur l'obtention du nom de domaine suivant : <http://icepac.ete.inrs.ca> (Non disponible présentement).

Étude de l'impact des changements climatiques sur les glaces

Pour réaliser l'étude de l'impact des CC sur les conditions de glace, une approche similaire à la modélisation probabiliste effectuée avec les données OSI409 est proposée mais cette fois-ci avec les données de divers modèles climatiques. Une sélection de modèles a été effectuée dans la collection CMIP-5 et cette sélection, représentant plusieurs RCP (Figure 10) différents, permettra d'obtenir un spectre de simulations permettant d'offrir une bonne fourchette de scénarios de conditions de glace possibles.

Les modèles sélectionnés sont les suivants, notez qu'aucune donnée provenant d'un scénario avec RCP26 n'a été sélectionné, ce scénario étant fort peu probable :

1) Canadian Regional Climate Model 4 (CanRCM4)

- a. RCP 8.5
- b. RCP 4.5

2) Community Climate System Model 4 (CCSM4)

- a. RCP 4.5
- b. RCP 6.0
- c. RCP 8.5

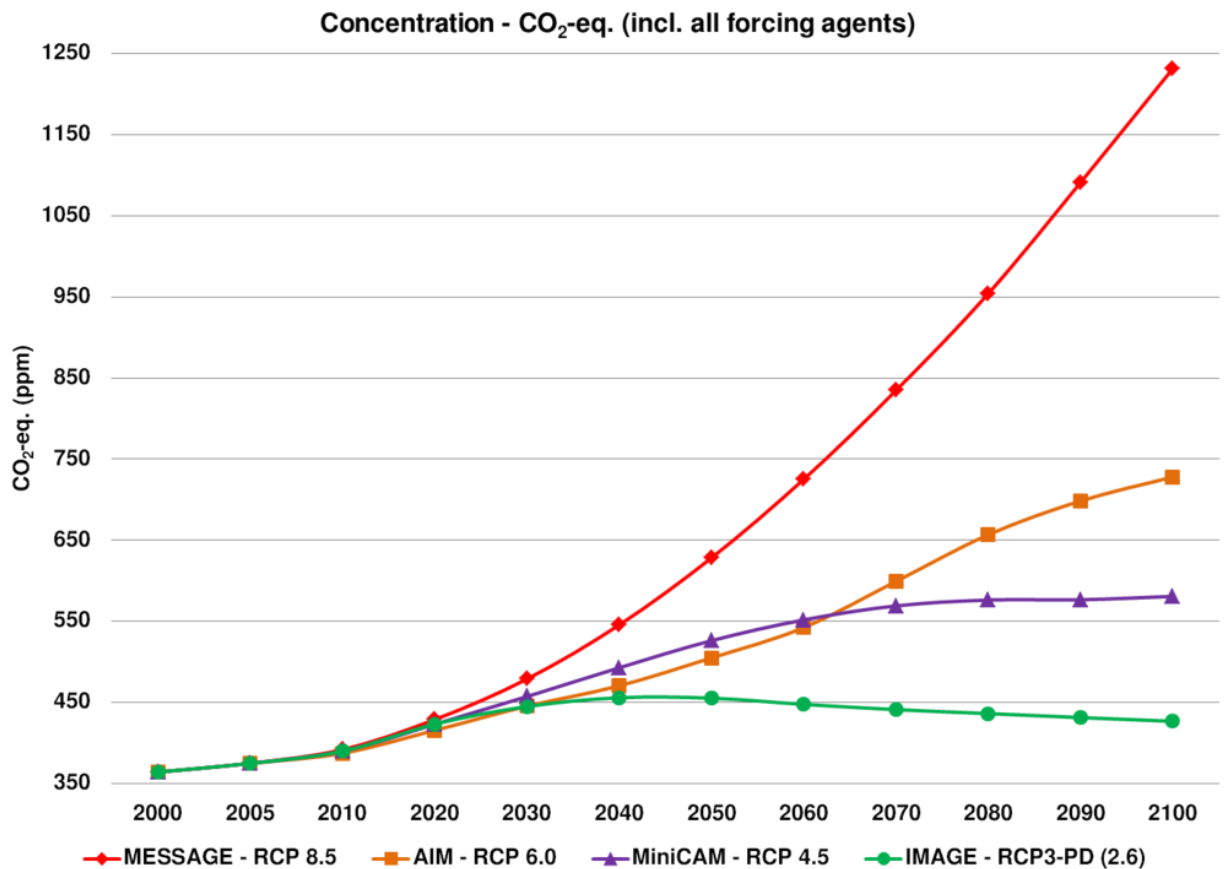


Figure 10 : Courbes de progression du CO₂ pour chaque RCP

L'ensemble des données de chacun des modèles ont été converties en format GeoTIFF, encore une fois pour faciliter leur affichage dans le serveur de cartes web qui sera mis sur pied. Ces

données de modèles climatiques (Figure 11) seront analysées, compilées sous forme de séries temporelles et traitées statistiquement comme celles de l'objectif 1.

Évolution des concentrations le 30/12 - CanRCM4 avec RCP85

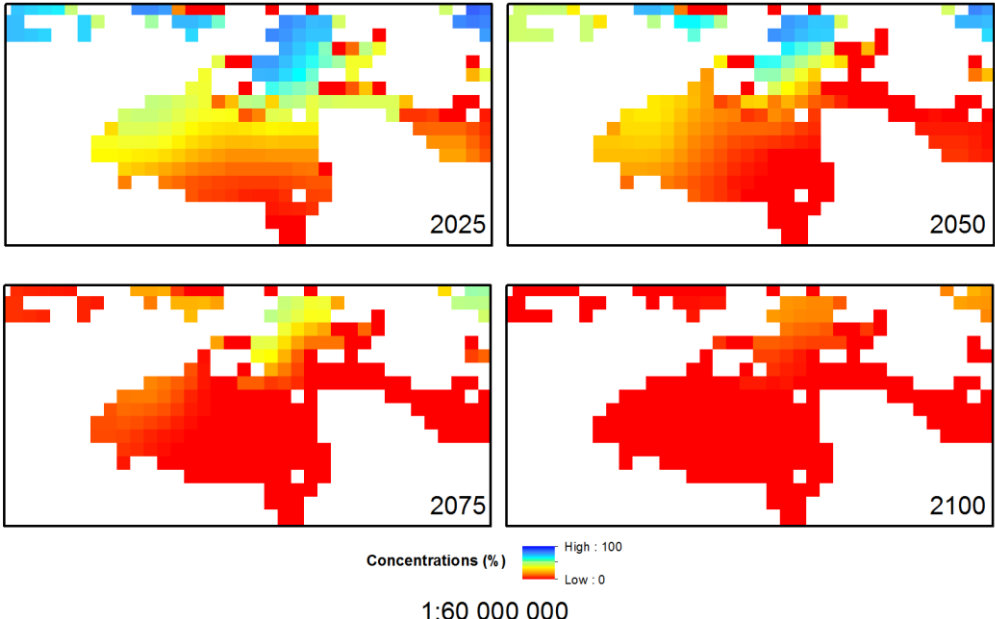


Figure 11 : Comparaison des états de concentration de glace pour le 30 décembre 2025, 2050, 2075 et 2100 pour CanRCM4 RCP85

4. Conclusion et échéancier

L'échéancier contractuel (Figure 12) indiquait que pour le 31 mars 2015, les objectifs I et II devaient être terminés. C'est pratiquement le cas. Au 1^{er} mars, pour le 1^{er} objectif, soit l'analyse régionale, il ne reste qu'à combler que certains vides dans les séries temporelles. Pour les cartes de glaces à l'échelle locale (données MODIS, objectif 2) celles-ci sont en cours de production. La production a été retardée parce que la faible performance du masque de nuages standard nous a demandé de développer un masque adapté à l'océan arctique afin de ne pas masquer de la glace de mer. L'objectif 3 sera entrepris dès que les cartes MODIS seront complétées au début d'avril.

Concernant l'analyse des images RADARSAT-1 (objectifs II-A et II-B), nous attendons de pouvoir télécharger l'ensemble de l'imagerie en archive sur le secteur afin de réaliser une cartographie des zones pour lesquelles les données MODIS ne peuvent pas fournir d'information étant donnée un couvert nuageux trop important. La réalisation de la cartographie RADARSAT est donc en attente. L'équipe gérant la base de données a été avisée et qu'une solution est envisageable avant la fin du projet (mars 2016).

Dans notre planification initiale, les objectifs IV-A, IV-B et IV-C (Sélection des indicateurs de l'état des glaces et des outils) devaient être réalisés mais ces objectifs se réalisent en parallèle avec les autres activités et demandent plus de réflexion qu'anticiper.

Finalement, l'obtention des projections climatiques 2050+ (objectif V-A) a été complétée.

Malgré des retards dans l'atteinte de quelques sous-objectifs par rapport à l'échéancier soumis dans la proposition, ce projet de recherche progresse normalement, les résultats obtenus sont intéressants et nous nous attendons à atteindre tous les objectifs du projet et compléter une 1^{er} version de l'outil (interface usager) d'ici un an.

Tâche	AMJ13	JAS13	OND13	JFM14	AMJ14	JAS14	OND14	JFM15	AMJ15	JAS15	OND15	JFM16
1A	Vert											
1B	Vert											
1C		Vert										
1D		Vert	Vert	Vert								
1E							Jaune	Jaune	Jaune			
2A	En attente											
2B	En attente											
2C					Vert	Vert						
2D					Vert	Vert						
2E						Jaune						
3A							Jaune	Jaune				
3B							Rouge	Rouge	Rouge			
3C									Rouge	Rouge		
4A	Jaune	Jaune										
4B			Jaune	Jaune								
4C					Jaune	Jaune						
4D											Rouge	
4E												Rouge
5A					Vert	Vert	Vert					
5B									Rouge	Rouge		
5C											Rouge	

Figure 12 : Échéancier original du projet IcePAC
 (Vert : Complété, Jaune : En progression, Rouge : Non débuté)

5. Références

Cavalieri, D., C. Parkinson, and K. Y. Vinnikov (2003), 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability, *Geophysical Research Letters*, 30(18).

CIS (2013), Sea Ice Climatic Atlas for the Northern Canadian Waters 1981-2010, edited, Ottawa.

Comiso, J. C. (2012), Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover, *Journal of Climate*, 25(4), 1176-1193.

Curry, J. A., J. L. Schramm, and E. E. Ebert (1995), Sea ice-albedo climate feedback mechanism, *Journal of Climate*, 8(2), 240-247.

Dozier, J. (1989), Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper, *Remote sensing of environment*, 28, 9-22.

Drüe, C., and G. Heinemann (2004), High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data, *Geophysical research letters*, 31(20).

Hall, D. K., G. A. Riggs, V. V. Salomonson, J. Barton, K. Casey, J. Chien, N. DiGirolamo, A. Klein, H. Powell, and A. Tait (2001), Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms, *NASA GSFC, September*.

Johannessen, O. M., L. Bengtsson, M. W. Miles, S. I. Kuzmina, V. A. Semenov, G. V. Alekseev, A. P. Nagurnyi, V. F. Zakharov, L. P. Bobylev, and L. H. Pettersson (2004), Arctic climate change: Observed and modelled temperature and sea-ice variability, *Tellus A*, 56(4), 328-341.

Krupnik, I., C. Aporta, S. Gearheard, G. J. Laidler, and L. K. Holm (2010), *SIKU: knowing our ice: documenting Inuit sea ice knowledge and use*, Springer Science & Business Media.

Kwok, R., and N. Untersteiner (2011), The thinning of Arctic sea ice, *Phys. Today*, 64(4), 36-41.

Lasserre, F., and P.-L. Têtu (2015), The cruise tourism industry in the Canadian Arctic: analysis of activities and perceptions of cruise ship operators, *Polar Record*, 51(01), 24-38.

Luo, Y., A. P. Trishchenko, and K. V. Khlopenkov (2008), Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America, *Remote Sensing of Environment*, 112(12), 4167-4185.

Ogorodov, S. (2003), The role of sea ice in the coastal zone dynamics of the Arctic Seas, *Water Resources*, 30(5), 509-518.

Parkinson, C. L. (2000), Variability of Arctic sea ice: The view from space, an 18-year record, *Arctic*, 341-358.

Parkinson, C. L., and D. J. Cavalieri (2008), Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 113(C7).

Pithan, F., and T. Mauritsen (2014), Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models, *Nature Geoscience*.

Smith, D. (1996), Extraction of winter total sea-ice concentration in the Greenland and Barents Seas from SSM/I data, *Remote Sensing*, 17(13), 2625-2646.

Smith, L. C., and S. R. Stephenson (2013), New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), E1191-E1195.

Spreen, G., L. Kaleschke, and G. Heygster (2005), Operational sea ice remote sensing with AMSR-E 89 GHz channels, paper presented at Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International, IEEE.

Stroeve, J. C., M. C. Serreze, M. M. Holland, J. E. Kay, J. Malanik, and A. P. Barrett (2012), The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climatic Change*, 110(3-4), 1005-1027.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl (2012), An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Xiao, X., Z. Shen, and X. Qin (2001), Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: a Normalized Difference Snow and Ice Index, *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2479-2487.

Annexe 1 : Réunion du comité scientifique

Buts de la rencontre du 21 novembre 2014

La rencontre du comité scientifique avec comme but d'ouvrir les portes à une discussion :

- des objectifs
- des moyens pour les atteindre
- de l'information que l'on peut tirer des données obtenues
- des médiums privilégiés pour diffuser l'information.
- des liens possibles avec d'autres recherches et projets.

Ordre du jour

- 1) Rappel des objectifs
- 2) État d'avancement
 - a. Objectif I - Cartographie
 - b. Objectif II - Modélisation régionale
 - c. Objectif III – Modélisation locale
 - d. Objectif IV - Climat
 - e. Objectif V – Interface (Indicateurs)
- 3) Liens avec d'autres projets
- 4) Informations à tirer du projet
- 5) Bâtir un réseau de contacts
- 6) Réalisations 2014
- 7) Échéancier
- 8) Prochaines étapes

Principales recommandations

- Une proposition a été faite par les membres du comité. Il s'agit d'utiliser les données des réanalyses climatiques MERRA ou NARR pour établir un modèle linéaire de régression liant les observations des réanalyses aux observations AMSR/E (Satellites).

- Il a été proposé d'organiser, en commun avec OURANOS, une rencontre avec des utilisateurs potentiels afin de cerner leurs besoins et de leur faire connaître le projet. OURANOS ayant également un projet qui concerne la région de la Baie d'Hudson, l'idée d'un effort concerté pour l'organisation d'une telle rencontre a été lancée et bien acceptée par l'ensemble des membres du comité.
- MM. Savard et Poirier ont indiqué qu'il serait fort pertinent d'utiliser les simulations de conditions de glaces de mer réalisées par Simon Senneville de l'ISMER dans le cadre de l'objectif V puisqu'elles sont de qualité et préalablement débiaisées.

Annexe 2 : Publications scientifiques et communications

Affiches

Gignac, C., Nadeau, É., Bernier, M., Chokmani, K., Poulin, J., Gauthier, Y., 2014. ICEMAP-250: cartographie automatisée à haute-résolution de la présence de glace. Colloque du CEN 2014, Québec, Québec, Canada.

Gignac, C., Bernier, M., Chokmani, K., Poulin, J., 2014. ICEMAP250: HIGH-RESOLUTION SEA ICE MAPS USING MODIS. Arctic Change 2014, Ottawa, Ontario, Canada.

Gignac, C., Bernier, M., Chokmani, K., 2014. The ICEPAC project: A sea ice spatiotemporal variability atlas, IGARSS2014, Québec, Québec, Canada

Exposés oraux

Gignac, C., Bernier, M., Chokmani, K., 2014. ICEPAC: ICE Probability Along the Coast - Understanding Sea Ice Spatiotemporal Variability. Coastal Zone Conference 2014, Halifax, Nouvelle-Écosse, Canada.

Articles

Gignac, C., Bernier, M., Chokmani, K., 2014. The IcePAC project: A sea-ice spatiotemporal variability atlas, paper presented at Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International, 13-18 July 2014.

Gignac, C., Bernier, M., Chokmani, K., Poulin, J., 2015. ICEMAP250: Sea Ice Mapping At 250m Resolution Using Downscaled Modis Data, accepted for presentation at European Geophysical Union Meeting 2015, 12-17 April 2015