

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 2013-2014

Présenté à OURANOS et Ressources Naturelles Canada

par
Monique Bernier & Charles Gignac

1^{er} mars 2014

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 Jean-Pierre Savard, M.Sc. Consortium OURANOS Christian Poirier, M.Sc. Ing. Transports Québec Anick Guimond, M.Sc. Transports Québec

ISBN : 978-2-89146-848-0

© INRS, 2014

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	PROBLEMATIQUE	1
1.2	OBJECTIFS DU PROJET ICEPAC	5
1.3	CONTENU DE CE RAPPORT.....	7
1.4	TERRITOIRE ETUDIE	7
2	METHODOLOGIE	9
2.1	OBJECTIF 1A – ACQUISITION ET PREPARATION DES DONNEES	9
2.1.1	<i>Données utilisées</i>	9
2.1.2	<i>Approche proposée</i>	10
2.2	OBJECTIF 1B – STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNEES.....	10
2.2.1	<i>Données utilisées</i>	10
2.2.2	<i>Approche proposée</i>	10
2.3	OBJECTIF 1C – ANALYSE FREQUENTIELLE A L’ECHELLE REGIONALE	11
2.3.1	<i>Données utilisées</i>	11
2.3.2	<i>Approche proposée</i>	11
2.4	OBJECTIF 1D – DETECTION DE LA NON-STATIONNARITE	12
2.4.1	<i>Données utilisées</i>	12
2.4.2	<i>Approche proposée</i>	12
2.5	OBJECTIF 2A – CARTOGRAPHIE RADARSAT 10M	12
2.5.1	<i>Données utilisées</i>	12
2.5.2	<i>Approche proposée</i>	13
2.6	OBJECTIF 2B – CARTOGRAPHIE RADARSAT A 100M DE RESOLUTION.....	14
2.6.1	<i>Données utilisées</i>	14
2.6.2	<i>Approche proposée</i>	14
2.7	OBJECTIF 2C – CARTOGRAPHIE MODIS 250M.....	15
2.7.1	<i>Données utilisées</i>	15
2.7.2	<i>Approche proposée</i>	16
2.8	OBJECTIF 4A – SELECTION DES DESCRIPTEURS DE L’ALEA	17
2.8.1	<i>Données utilisées</i>	17
2.8.2	<i>Approche proposée</i>	17
2.9	OBJECTIF 4B – PROGRAMMATION DE SCRIPTS	18
2.9.1	<i>Données utilisées</i>	18

2.9.2	<i>Approche proposée</i>	18
3	RESULTATS ET DISCUSSION	19
3.1	ACQUISITION ET PREPARATION DES DONNEES A L'ECHELLE REGIONALE	19
3.2	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNEES.....	20
3.3	ANALYSE FREQUENTIELLE A L'ECHELLE REGIONALE.....	20
3.4	DETECTION DE LA NON-STATIONNARITE.....	23
3.5	CARTOGRAPHIE RADARSAT A 10M ET 100M.....	24
3.6	CARTOGRAPHIE MODIS 250M.....	25
3.7	CONSULTATION DES UTILISATEURS POTENTIELS.....	26
3.8	PROGRAMMATION DES SCRIPTS POUR LES INDICATEURS.....	27
4	REUNION DU COMITE SCIENTIFIQUE	29
4.1	ORDRE DU JOUR.....	29
4.2	RECOMMANDATIONS	29
5	CONCLUSION	31
6	REFERENCES	33
7	ANNEXE 1 : RAPPORTS TRIMESTRIELS	37

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CLASSES POLAIRES DES NAVIRES ET CONDITIONS DE NAVIGATION COMPATIBLES [10]	4
TABLEAU 2 : FONCTIONS UTILISEES POUR LES REQUETES DES UTILISATEURS DU MODELE REGIONAL	11
TABLEAU 3 : PERSONNES RESSOURCES POTENTIELLES POUR L'IDENTIFICATION DES INDICATEURS DE LALEA	18
TABLEAU 4 : PERFORMANCES DE L'ALGORITHME ICEMAP250 AU POINT DE VUE DU TEMPS D'EXECUTION.....	26
TABLEAU 5 : ÉCHEANCIER A JOUR DU PROJET ICEMAP EN DATE DU 1 ^{ER} MARS 2014	31

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : IMAGE DE LA RIVE PROTEGEE PAR UN CORDON DE GLACE DE RIVE – KUUIJUAQ.....	2
FIGURE 2 : CHASSEUR EN MOTONEIGE SUR DE LA GLACE EN FONTE, POND INLET, CANADA	2
FIGURE 3 : DIMINUTION DE (A) L’ETENDUE ET (B) AIRE COUVERTE EN MILLION DE KM ² PAR LA GLACE PLURIANNUELLE DANS L’ARCTIQUE POUR LA PERIODE 1980-2010 [6].....	3
FIGURE 4 : TERRITOIRE A L’ETUDE DANS LE PROJET ICEPAC.....	7
FIGURE 5 : DONNEES DE CONCENTRATIONS DE GLACE OSI409 DU 01/10/2009.....	9
FIGURE 6 : IMAGE RADARSAT-2 EN MODE FIN DU DETROIT D’HUDSON PRES DE QUAQTAQ LE 17 DEC 2009 © MDA	13
FIGURE 7: COURBE GAUSSIENNE ET ECART-TYPE	14
FIGURE 8 : IMAGE RADARSAT-1 SCANSAR WIDE DE LA BAIE JAMES LE 15 NOV 2006 © MDA.....	15
FIGURE 9 : IMAGE MODIS EN COULEURS REELLES DU 5 JUN 2012 SUR LA COTE OUEST DU NUNAVIK.....	16
FIGURE 10 : DONNEES DE CONCENTRATIONS DISPONIBLES POUR LE 24 JUN SUR LA PERIODE 1978-2009.....	19
FIGURE 11 : MOYENNE DES CONCENTRATIONS DE GLACE LE 24 JUN SUR LA PERIODE 1978-2009.....	20
FIGURE 12 : AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION BETA ($\alpha= 2.01, \beta=3.84$) SUR LES DONNEES DE CONCENTRATION DE GLACES	21
FIGURE 13 : PARAMETRE B POUR LES DONNEES DU 24 JUN POUR LA PERIODE 1978-2009.....	21
FIGURE 14 : FONCTION DE REPARTITION DU PIXEL (120,120) POUR LE 24 JUN SUR LA PERIODE 1978-2009	22
FIGURE 15 : RESULTATS DU TEST DE KENDALL SUR LE 24 JUN [ROUGE = STATIONNAIRE BLEU = NON- STATIONNAIRE]	23
FIGURE 16 : P-VALUE DU TEST DE KENDALL POUR LES SERIES HISTORIQUES DE CONCENTRATIONS DE GLACE LE 24 JUN.....	24
FIGURE 17: RESULTAT DE L’ALGORITHME DE DISCRIMINATION EAU/GLACE SUR UNE TUILE D’IMAGE RADARSAT-1 .25	25
FIGURE 18 : CARTE ICEMAP250 DU 22 JUN 2009 [BLANC = GLACE BLEU = EAU NOIR = NUAGES]	26

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CC : Changements climatiques

CCIN : Canadian Cryospheric Information Network

EUMETSAT : European Organization for the Exploitation of METeorological SATellites

IcePAC : *ICE Probability Along the Coast*

LAADS : Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System

MODIS : MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

RSO : Radar à synthèse d'ouverture

SCG : Service Canadien des Glaces

1 INTRODUCTION

1.1 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 (Fig 1) diminue la vulnérabilité aux pressions externes de la glace et du vent [1]. 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 (Fig 2). 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 [2]. 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 [3] a un impact sur la rétroaction glace/albédo [4] qui explique en partie le phénomène d'amplification Arctique [5]. Le déclin de l'étendue couverte par la glace de mer implique également une exposition accrue des côtes aux phénomènes océaniques et atmosphérique comme les tempêtes et surcôtes. 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 (Fig 3) [6]. 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 [7].



Figure 1 : Image de la rive protégée par un cordon de glace de rive – Kuujjuaq



Figure 2 : Chasseur en motoneige sur de la glace en fonte, Pond Inlet, Canada

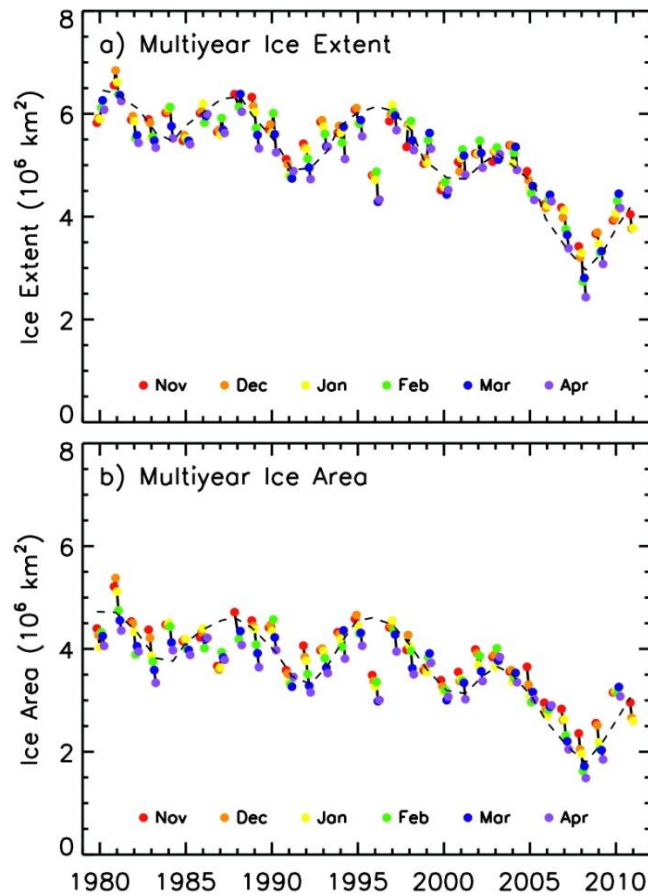


Figure 3 : Diminution de (a) l'étendue et (b) aire couverte en million de km² par la glace pluriannuelle dans l'arctique pour la période 1980-2010 [6]

Finalement, 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 modélisation [8] 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 (Tab 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 [9].

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

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 glacial.

Tableau 1 : Classes polaires des navires et conditions de navigation compatibles [10]

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.

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 [11][12][13][14]. 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 [15]. 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) prends tout son sens.

1.2 Objectifs du projet IcePAC

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'Hudson.
 - 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
- II. développer des procédures de cartographie automatisée des concentrations de glace à l'échelle locale (250m) à partir d'imagerie satellitaire RSO, optique et thermique afin de constituer une base de données historique des conditions de glace.
- II A : Cartographie RADARSAT 10m
 - II B : Cartographie RADARSAT 100m
 - 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 Quaqtaq 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
- 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.

1.3 Contenu de ce rapport

L'échéancier contractuel indiquait que pour le 1^{er} mars 2014, l'objectif I (Variabilité spatiotemporelle du couvert de glace à l'échelle régionale) devait être complété et que les objectifs II (Cartographie automatisée à l'échelle locale) et IV (Mise en place de l'outil d'aide à la décision) devaient être réalisés aux deux-tiers. Ce rapport se veut une synthèse des progrès réalisés durant l'année 2013-2014 et présentera l'état d'avancement des étapes correspondants aux objectifs I, II et IV.

1.4 Territoire étudié

Le territoire couvert par l'étude statistique de la variabilité spatiotemporelle (I), par la mise en place de l'Atlas (IV) et par les processus de cartographie automatisée (II) couvre la baie et le détroit d'Hudson et est illustré à la Fig.4.

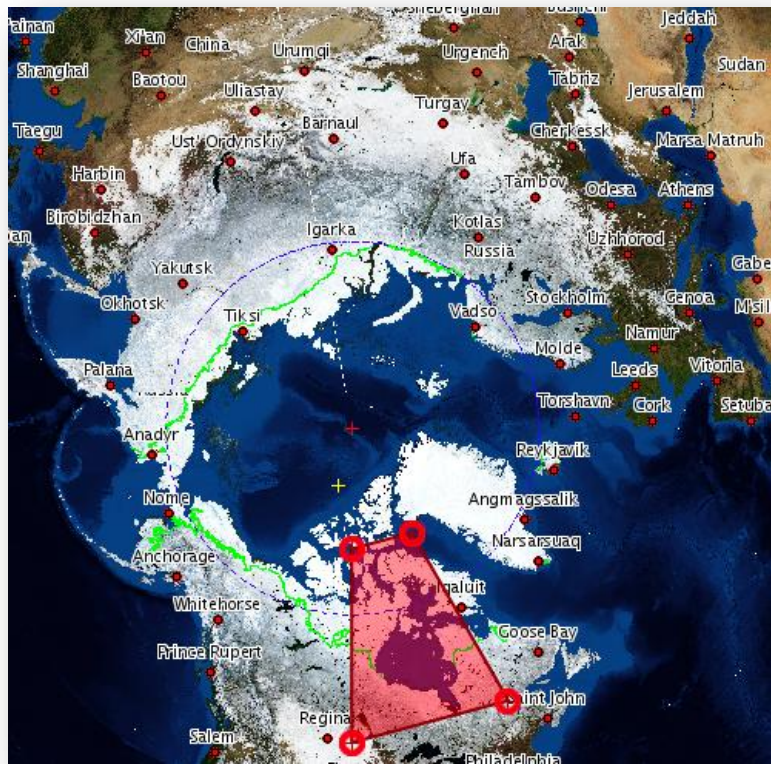


Figure 4 : Territoire à l'étude dans le projet IcePAC

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectif 1A – Acquisition et préparation des données

2.1.1 Données utilisées

Les données de concentration de glace historiques proviennent du jeu de données *OSI409 Global Sea Ice Concentration reprocessing dataset* (1978-2009) (Fig 5) [16] produites par la *EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Facility*. Les cartes de concentrations, produites à l'aide de données micro-ondes passives des capteurs SMMR et SSM/I, couvrent une période allant du 25 octobre 1978 au 24 octobre 2009. Un algorithme hybride, composition linéaire des algorithmes Bristol [17] et Bootstrap [18] est utilisé pour traiter les images. Pour assurer une performance optimale tant en milieu marginal qu'en couvert consolidé, l'algorithme Bristol, reconnu pour être moins sensible aux variations d'émissivité de la glace dans le signal reçu, voit son importance réduite en présence de faibles concentrations et, inversement, une importance accrue lui est accordée en présence de concentrations élevées de manière à exploiter les forces respectives de chaque algorithme.



Figure 5 : Données de concentrations de glace OSI409 du 01/10/2009

2.1.2 Approche proposée

L'approche proposée vise à produire des séries temporelles de concentrations de glace pour chaque jour de l'année, selon un calendrier de type « *365-days / no leap* », dans lequel le 29 février n'est pas considéré.

Des scripts Matlab sont utilisés afin d'obtenir des séries temporelles. Les séries sont obtenues sous forme tridimensionnelle (cartes), soit la concentration pour une année donnée, la position en X et la position en Y

2.2 Objectif 1B – Statistiques descriptives des données

2.2.1 Données utilisées

Les données utilisées à cette étape sont les séries historiques de concentrations de glace produites à l'étape 1A.

2.2.2 Approche proposée

L'approche proposée vise à calculer sur les séries historiques de concentrations de glace des statistiques descriptives et de produire des cartes synthèses pour chaque jour du calendrier considéré dans l'étape 1A.

Des scripts Matlab sont utilisés afin d'obtenir la cartographie synthèse des statistiques descriptives :

- Moyenne sur les séries
- Écart-type sur les séries
- Maximum sur les séries
- Minimum sur les séries
- Médiane sur les séries

2.3 Objectif 1C – Analyse fréquentielle à l'échelle régionale

2.3.1 Données utilisées

Les données utilisées à cette étape sont les séries historiques de concentrations de glace produites à l'étape 1A.

2.3.2 Approche proposée

L'approche proposée vise à ajuster la distribution Bêta, bornée entre 0 et 1, aux données de concentrations de glace afin de modéliser statistiquement la variabilité temporelle des concentrations de glace en un point donné. C'est une fonction à deux paramètres, α et β , tous deux paramètres de forme, également cartographiés. Le choix de la fonction repose sur le fait qu'elle présente une bonne efficacité avec les données de concentration et que c'est une fonction bornée sur les deux côtés, ce qui est peu commun. L'ajustement est réalisé grâce à des scripts Matlab et permettent de calculer, pour chaque point du domaine, des fonctions (Tab. 2) sur lesquelles des requêtes pourront être effectuées par les utilisateurs. L'ajustement utilise la méthode du maximum de vraisemblance afin de retrouver les estimateurs de paramètres de la distribution.

Tableau 2 : Fonctions utilisées pour les requêtes des utilisateurs du modèle régional

Nom de la fonction	Utilisation
Fonction de densité de probabilités (PDF)	Densité d'observations de concentrations X pour un site donné.
Fonction de répartition (CDF)	Probabilité pour une valeur de concentration de glace X ou inférieure.
Fonction de répartition inverse (invCDF)	Concentration pour une probabilité X

2.4 Objectif 1D – Détection de la non-stationnarité

2.4.1 Données utilisées

Les données utilisées à cette étape sont les séries historiques de concentrations de glace produites à l'étape 1A.

2.4.2 Approche proposée

L'approche proposée vise à vérifier que les séries historiques de concentrations de glace sont indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d) préalablement à la réalisation d'une analyse fréquentielle et de, par la suite, procéder à l'ajustement de la distribution Bêta sur les séries et d'en estimer les paramètres de distribution.

Un script Matlab est utilisé afin de réaliser le test statistique de Kendall pour vérifier la stationnarité des séries temporelles en chaque point du domaine. Une carte est produite afin de présenter les résultats du test. L'homogénéité et l'indépendance sont inhérentes au contexte car les données ont été obtenues à partir d'un seul algorithme et que les conditions de glace aux intervalles d'un an n'ont logiquement aucune influence l'une sur l'autre.

2.5 Objectif 2A – Cartographie RADARSAT 10m

2.5.1 Données utilisées

L'imagerie RADARSAT-2 haute-résolution en mode fin (Fig. 6) provient du projet « Changements climatiques et infrastructures maritimes du Nunavik : Impacts et Adaptations » [19]. Une banque d'environ 200 images, couvrant la période 2009-2011, est disponible pour les côtes aux voisinages des communautés d'Umiujaq, Quaqtuaq et Kuujjuaq.

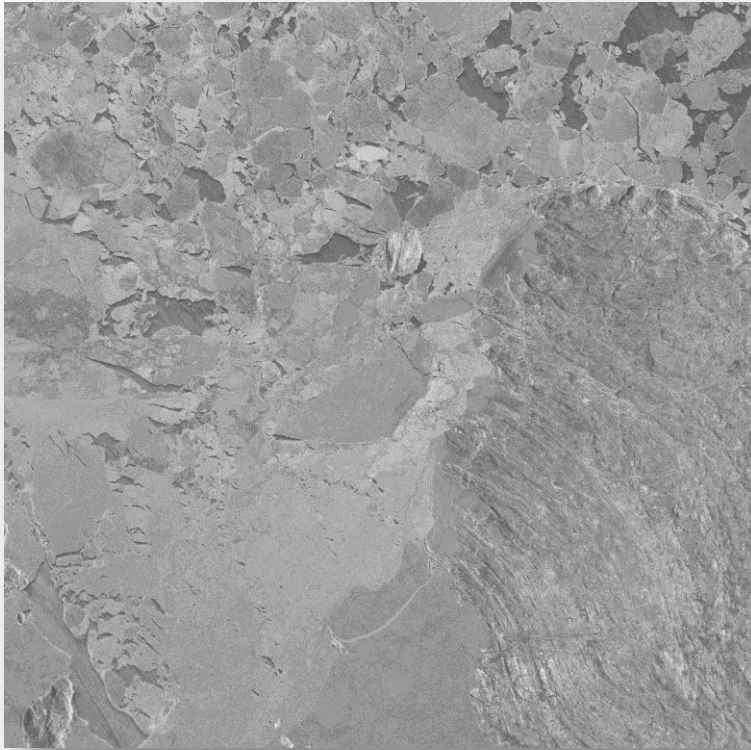


Figure 6 : Image RADARSAT-2 en mode fin du détroit d'Husdon près de Quaqtaq le 17 Dec 2009 © MDA

2.5.2 Approche proposée

L'approche proposée consiste à tronquer de manière itérative les distributions de niveaux de gris des images RADARSAT-2 converties en 8bits (256 niveaux de gris), pour lesquelles on masque le continent, en débutant par un histogramme de 1 à 1, ensuite 1 à 2, et ainsi de suite. Les paramètres d'ajustement de la distribution gaussienne, représentant l'eau au sein de l'image, pour les données tronquées qui optimisent l'ajustement sont utilisés pour retrouver le seuil à appliquer sur l'ensemble de l'image. Le seuil est considéré comme la moyenne de la distribution additionnée de 3 écart-types, couvrant ainsi 99% des données optimisant la gaussienne (Fig. 7).

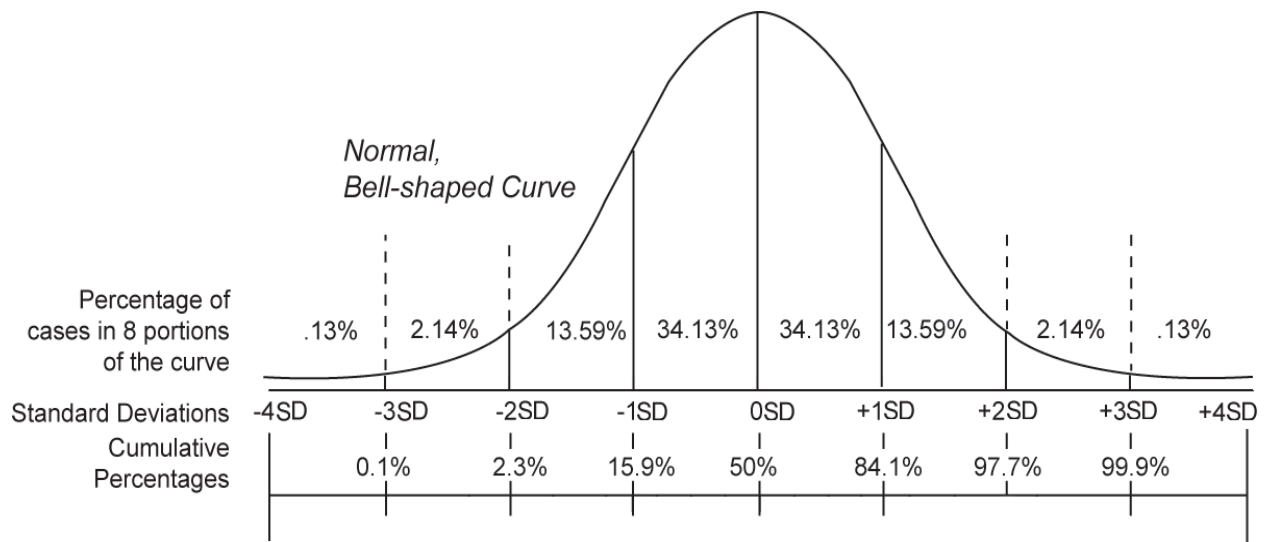


Figure 7: Courbe gaussienne et écart-type

Le choix de la gaussienne repose sur l'hypothèse que les pixels d'eau présentent, par rapport aux pixels de glace, un contraste important et qu'une majorité des pixels d'eau auront une apparence semblable, en cohérence avec le théorème central-limite. Les pixels d'eau affectés par le vent auront tendance à avoir un niveau de gris plus élevé, tandis que ceux situés dans des enclaves protégées du vent ou en zone plus calme présenteront un niveau de gris plus sombre.

2.6 Objectif 2B – Cartographie RADARSAT à 100m de résolution

2.6.1 Données utilisées

L'imagerie RSO de moyenne-résolution en mode ScanSAR Narrow (50m) (Fig. 8) provient de la base de données du CCIN qui rends gracieusement disponible les archives RADARSAT-1 du SCG. Une banque d'environ 6000 images sur le domaine d'étude, couvrant la période 1996-2007, seront utilisées.

2.6.2 Approche proposée

L'approche utilisée avec les images RADARSAT-1 de moyenne-résolution (100 m) est la même qu'avec les images RADARSAT-2 haute résolution (10 m).



Figure 8 : Image RADARSAT-1 ScanSAR Wide de la Baie James le 15 Nov 2006 © MDA

2.7 Objectif 2C – Cartographie MODIS 250m

2.7.1 Données utilisées

L'imagerie MODIS (optique et thermique) moyenne-résolution (Fig. 9) provient de la base de données LAADS du Goddard Space Flight Center (NASA). Les données au 250m, 500m et 1km, disponibles depuis 1999, ainsi qu'un masque de la couverture nuageuse sont acquises puisque ces dernières sont nécessaire au processus de cartographie.

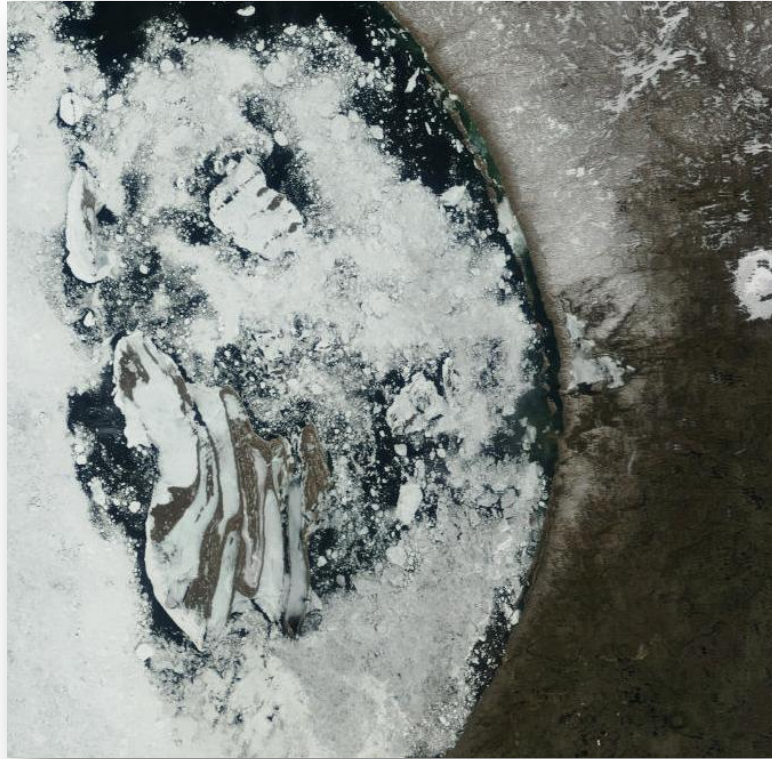


Figure 9 : Image MODIS en couleurs réelles du 5 juin 2012 sur la côte ouest du Nunavik

2.7.2 Approche proposée

L'approche proposée consiste à utiliser l'algorithme IceMAP [20], qui permet d'obtenir une cartographie de la présence/absence de glace à partir des images MODIS. Toutefois, dans le cadre du projet IcePAC, l'algorithme IceMAP sera modifié et adapté afin de fournir des résultats à une échelle spatiale de 250m, plutôt qu'à 1km comme l'algorithme original. L'algorithme IceMAP repose sur un arbre de décision faisant appel aux informations de températures de surface et sur la détection de neige à la surface grâce au Normalized Difference Snow Index.

L'adaptation de l'algorithme original repose sur l'utilisation de relations linéaires entre les températures de surface observées au 1km et les valeurs du NDSI au 1km. En établissant une relation entre ces deux variables, en d'autres termes entre la présence d'un volume de neige à la surface de la glace et la température de la surface, il devient possible de retrouver à l'échelle du 250m, pour lequel le NDSI est calculable grâce à un algorithme de désagrégation spatiale [21], les températures de surface correspondantes.

La présence de glace est conditionnelle à :

- une température de surface inférieure à 271,4 K
- ou à une valeur de NDSI, indicatrice de présence de neige, supérieure à 0,4 combinée à un réflectance en bande 4 (rouge) supérieure à 0,11.

L'application de l'algorithme « *Potential Open Water* » [22] permettant d'obtenir l'information sur le contenu en eau libre dans un pixel permettra d'obtenir une valeur de concentration de glace au sein de chaque pixel.

2.8 Objectif 4A – Sélection des descripteurs de l'aléa

2.8.1 Données utilisées

Les résumés de consultations auprès des utilisateurs potentiels des modèles IcePAC servent de données pour l'atteinte de cet objectif.

2.8.2 Approche proposée

L'approche proposée consiste à procéder à un 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 identifiés et seront bientôt consultées (Tab. 3).

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 vous aideraient à être mieux préparés pour faire face aux CC ?

Tableau 3 : Personnes ressources potentielles pour l'identification des indicateurs de l'aléa

Nom	Domaine
M. Tom Morrison	Gestionnaire, Ausenco Sandwell - Calgary
Mme. Leah Braithwaite	Chef de politique SCG - Ottawa
M. Timothy Keane	Gestionnaire des opérations, FedNav - Montréal
Dr. Arno Keikonen	Président, AKAC inc. - Victoria
Dr. Georg Heygster	Professeur , U. Bremen - Allemagne
M. Christian Poirier	Ingénieur, MTQ - Québec
Mme. Anne Barker	Ingénieure de projet, CHC - Ottawa
M. Jean-Pierre Savard	Océanographe, Ouranos - Montréal
Dr./Cpt. James R. Parsons	Professeur – Université Mémorial

2.9 Objectif 4B – Programmation de scripts

2.9.1 Données utilisées

Les données utilisées pour cette étape du projet sont les paramètres de distributions obtenu via les étapes I A (Cas stationnaires) et I D (Cas non-stationnaires). Or, l'étape IV n'étant pas encore mises en branle, des données simulées seront utilisées pour procéder au développement de scripts.

2.9.2 Approche proposée

L'approche proposée vise à développer des scripts, en langage Matlab ou Python, selon leur complexité, qui permettront de répondre aux besoins exprimés par les utilisateurs potentiels identifiées dans la section « Sélection des descripteurs de l'aléa ».

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Acquisition et préparation des données à l'échelle régionale

L'ensemble des données historiques a été acquises auprès de l'EUMETSAT. En totalité, **9890** cartes de concentration de glace ont été téléchargées. La création des séries se fait rapidement, en environ 2 minutes par jour, soit environ 12 heures de travail machine pour l'obtention des séries complètes sur l'ensemble du domaine temporel. La Fig. 10 illustre les données de concentrations disponibles pour le 24 juin.

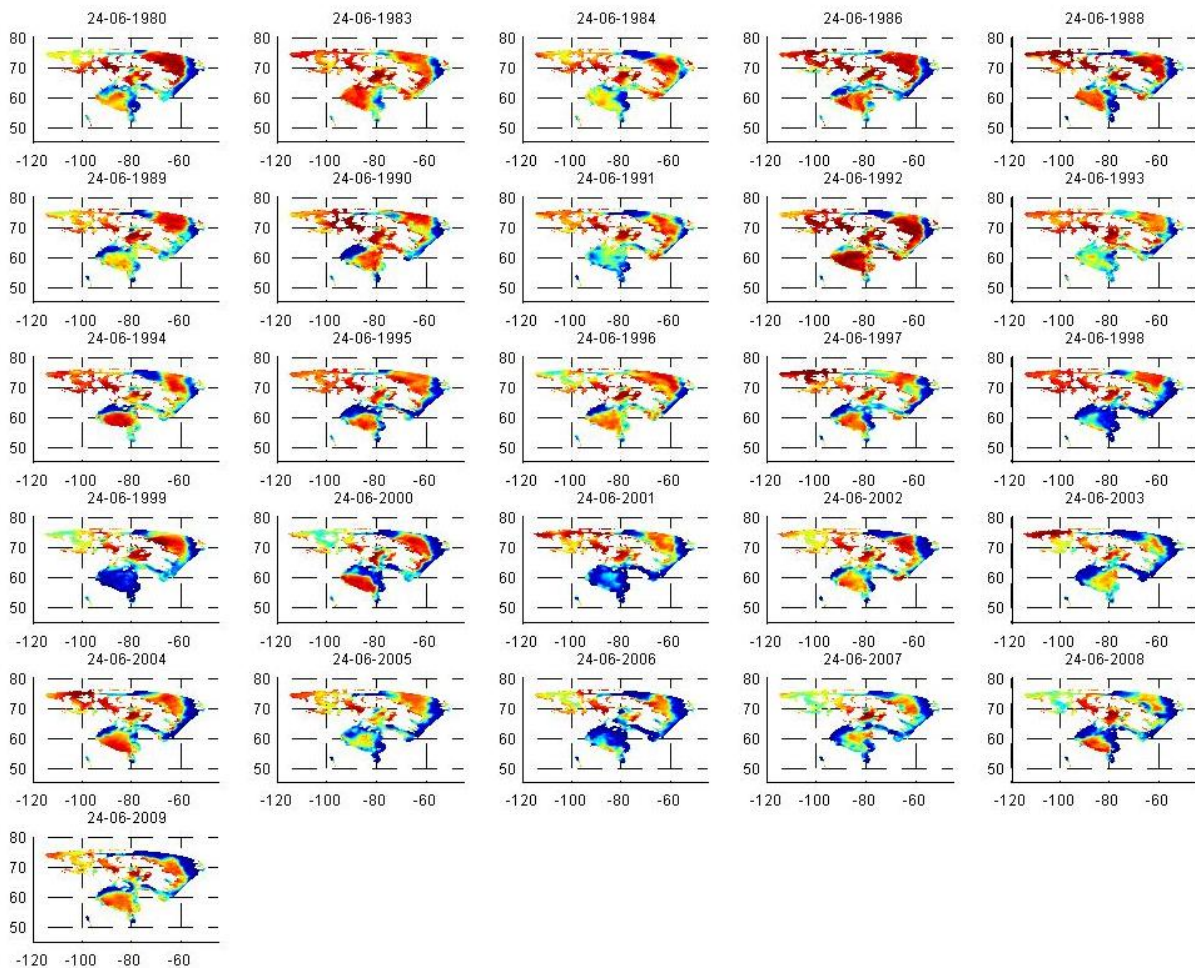


Figure 10 : Données de concentrations disponibles pour le 24 juin sur la période 1978-2009

3.2 Statistiques descriptives des données

Les statistiques descriptives obtenues permettent de représenter les conditions de concentrations de glace pour une journée donnée selon une statistique descriptive voulue. Les statistiques descriptives actuellement produites sont la moyenne (Fig. 11), l'écart-type, le maximum, le minimum et la médiane.

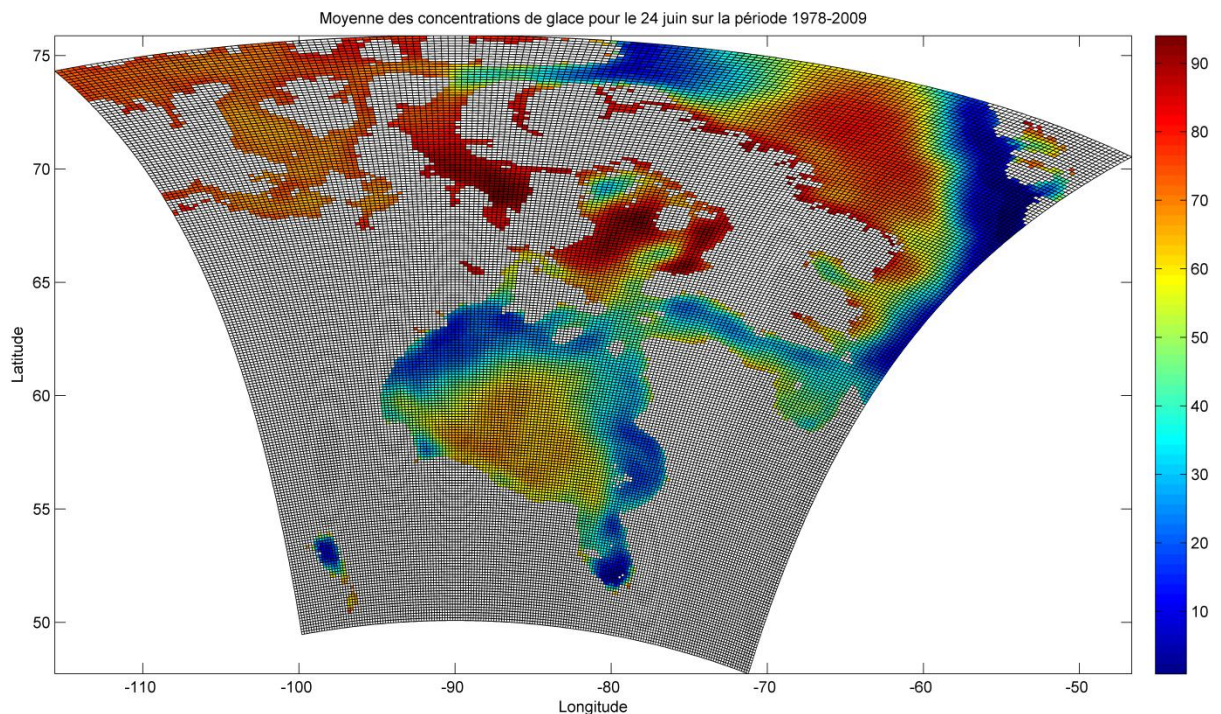


Figure 11 : Moyenne des concentrations de glace le 24 juin sur la période 1978-2009

3.3 Analyse fréquentielle à l'échelle régionale

L'ajustement de la distribution Bêta (Fig. 12) à chacun des pixels du domaine spatial (~40 000 pixels) prends environ 3 minutes par journée à traiter, cela dépendamment du nombre de données disponibles pour cette même journée. Deux paramètres (α et β) sont obtenus pour chaque pixel et ces derniers sont spatialisés, permettant d'observer leur répartition et leur comportement spatial (Fig. 13).

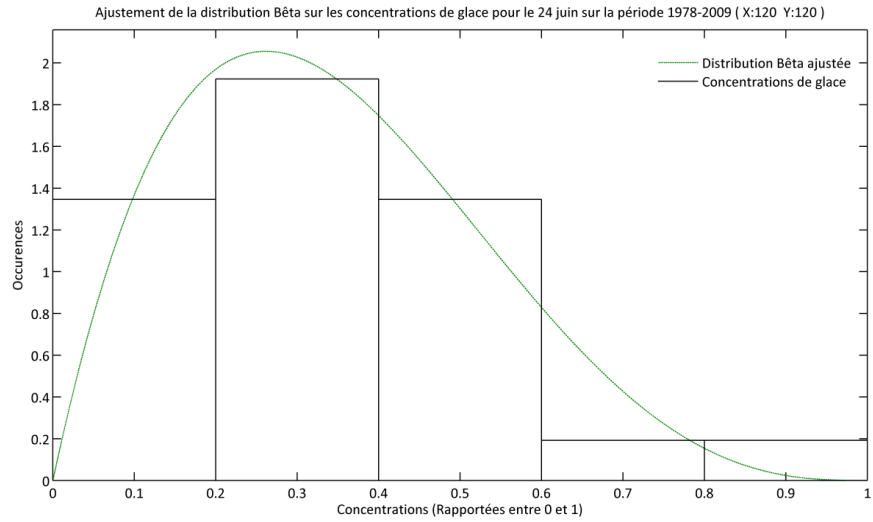


Figure 12 : Ajustement de la distribution Bêta ($\alpha= 2.01, \beta=3.84$) sur les données de concentration de glaces du 24 juin au pixel X :120, Y :120

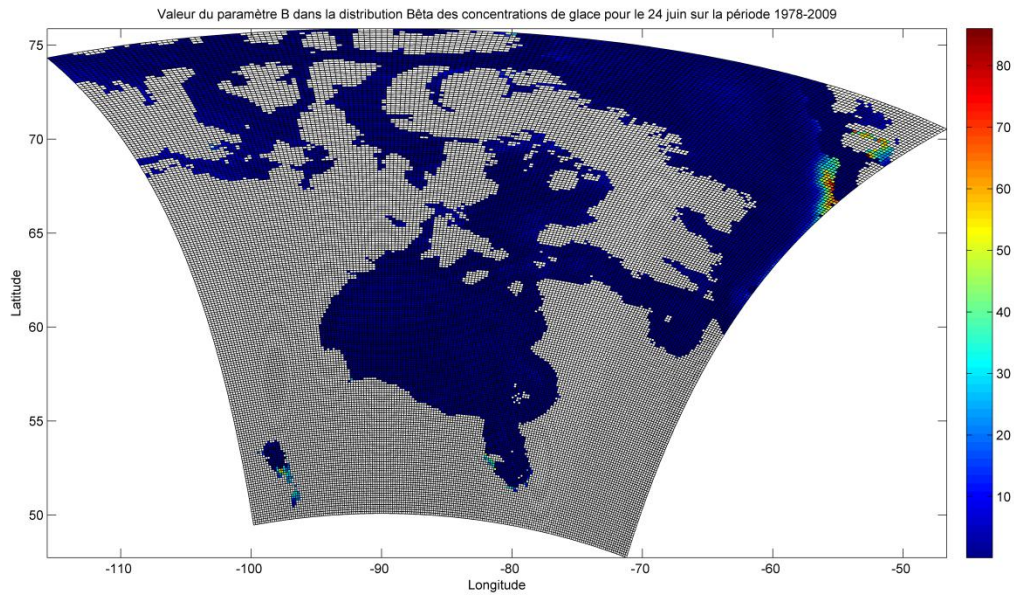


Figure 13 : Paramètre B pour les données du 24 juin pour la période 1978-2009

À partir des valeurs des paramètres (α et β), un utilisateur aura accès à l'information de la fonction de densité de probabilité, de la fonction de répartition (Fig. 14) et de la fonction de répartition inverse qui permettront de produire des cartographies d'indicateurs de l'état du couvert de glace en fonction des besoins des intervenants du milieu nordique. Par exemple, la figure ci-dessous présente la fonction de répartition, à partir de laquelle il est possible de tirer une information de probabilité d'occurrence d'une certaine valeur de concentration de glace.

Dans la Fig. 14, on peut observer que, selon le modèle fréquentiel bêta du pixel (120,120) du 24 juin, il y a une probabilité de 50% que la concentration de glace soit d'approximativement 38% ou moins.

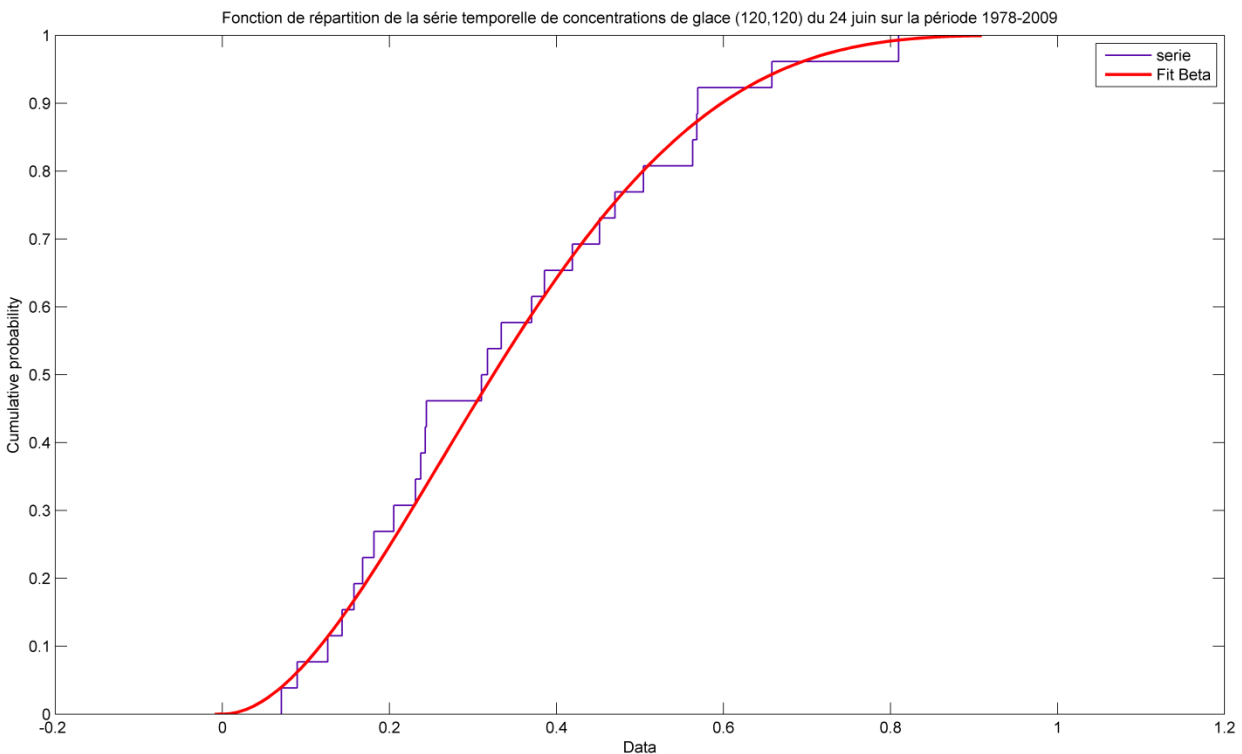


Figure 14 : Fonction de répartition du pixel (120,120) pour le 24 juin sur la période 1978-2009

3.4 Détection de la non-stationnarité

Afin d'identifier les pixels pour lesquels les séries temporelles entre 1978-2009 présentent une tendance, une non-stationnarité (augmentation ou diminution à moyen terme), le test de Kendall a été choisi et appliqué. La Fig. 15 illustre les secteurs non-stationnaires (en rouge) pour la journée du 24 juin. Une carte des valeurs de P-Values du test de Kendall pour chaque pixel a également été créée pour chaque jour (Fig. 16).

Pour les pixels identifiés comme étant non-stationnaires, les paramètres ajustés à la fonction Bêta ne sont pas immédiatement considérés dans la création du modèle régional et sont extraits (« *Flagged* ») pour être transférés vers l'objectif V qui vise à étudier l'impact des CC sur les conditions de glace.

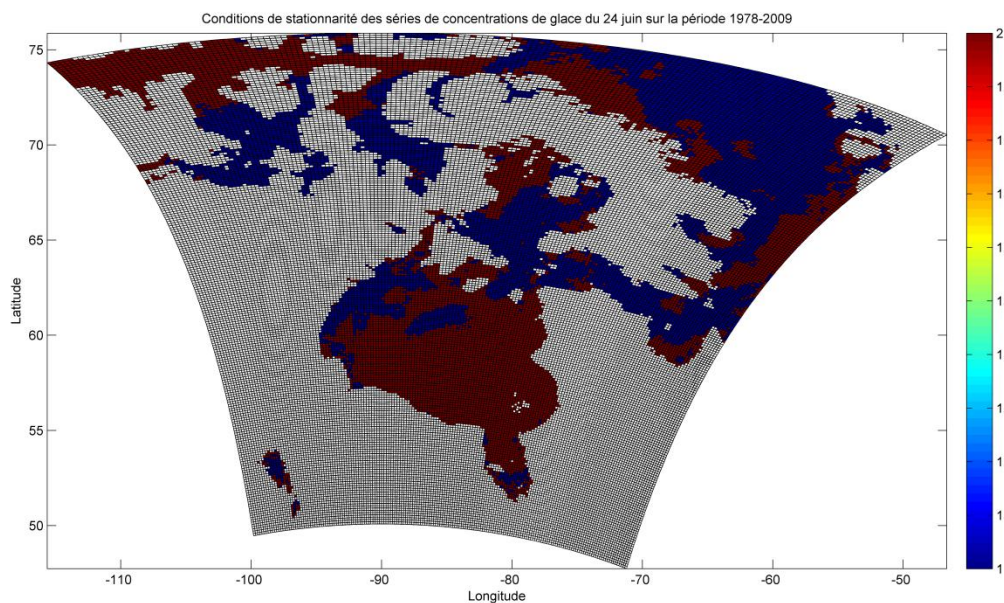


Figure 15 : Résultats du test de Kendall sur le 24 juin [Rouge = Stationnaire Bleu = Non-Stationnaire]

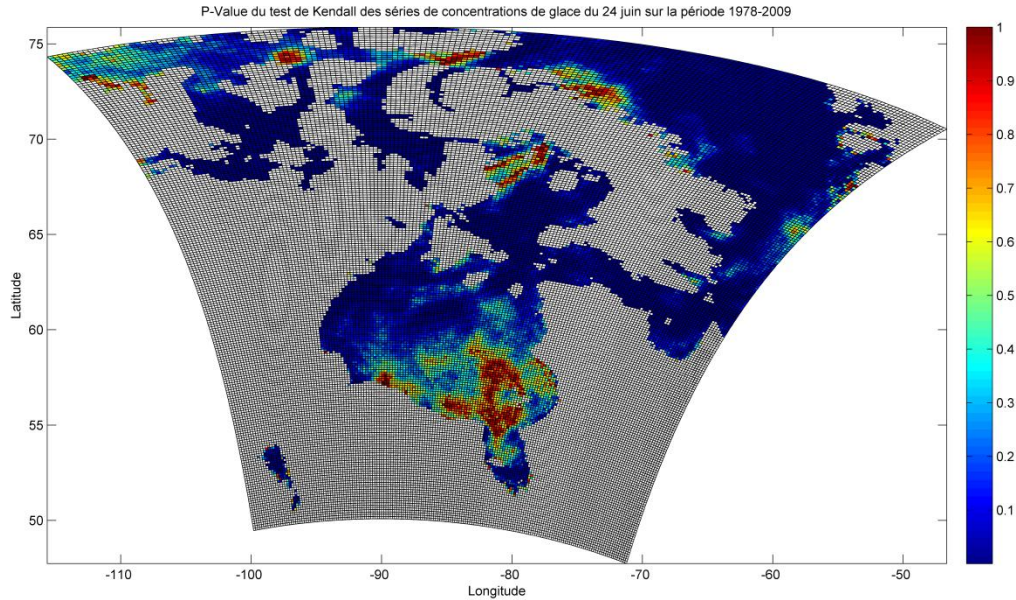


Figure 16 : P-Value du test de Kendall pour les séries historiques de concentrations de glace le 24 juin

3.5 Cartographie RADARSAT à 10m et 100m

La cartographie à partir de l'imagerie radar est exécutée suite à un processus de tuilage simple (Fig. 17) visant à réduire la taille des images à traiter afin d'éviter les problèmes de mémoire lors de l'exécution des scripts. Au total, 32 tuiles couvrent le domaine spatial. Le traitement de chaque tuile prends environ 2 minutes. Tel que stipulé dans la section 2.5.2, l'image ci-dessous est traitée de manière à identifier le seuil de niveau de gris qui permettra d'isoler la glace de l'eau libre dans l'image. Dans l'image suivante, le seuil identifié, soit la valeur numérique 68, est obtenue grâce à l'ajustement de la distribution gaussienne aux données tronquées. Pour obtenir le seuil, on additionne à la moyenne de la distribution 3 fois la valeur de l'écart-type et on utilise cette valeur comme seuil. De cette manière, 99% des données se trouvant sous la distribution optimisée sont classées comme étant de l'eau libre. Le reste des pixels de l'image sont classés comme étant de la glace. Un masque est appliqué préalablement à l'application (Tel que visible dans le coin inférieur droit de l'image originale (Voir figure 17) évitant ainsi de prendre en compte les valeurs numériques des pixels sur le continent dans l'ajustement de la distribution.

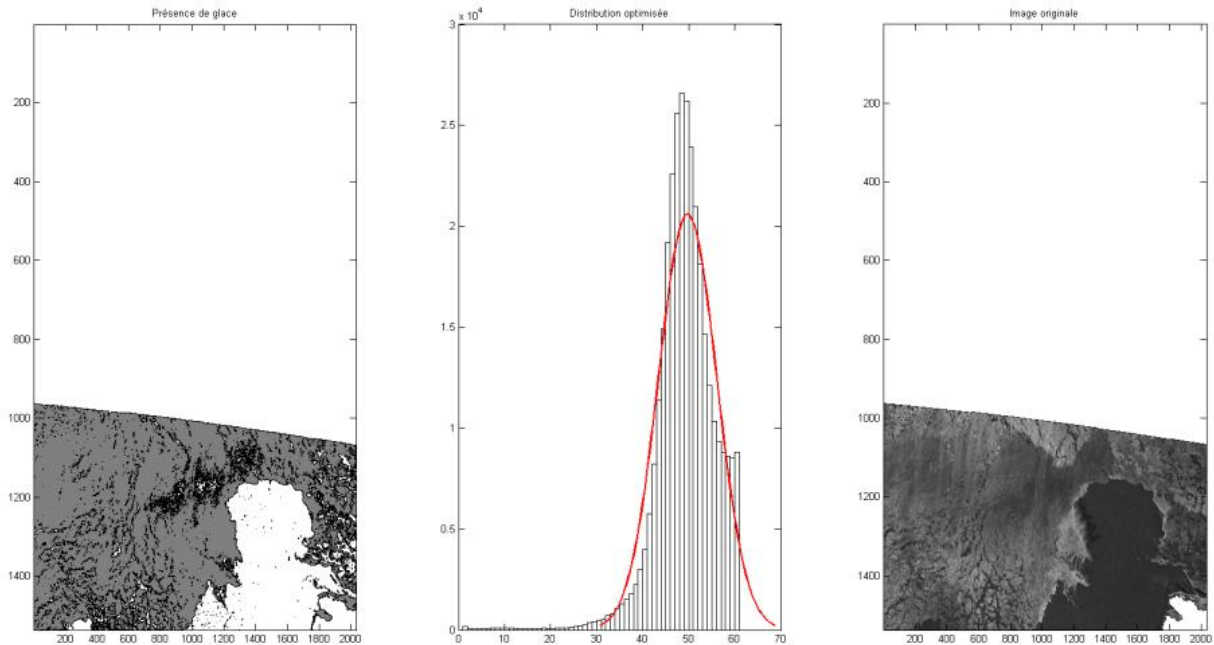


Figure 17: Résultat de l'algorithme de discrimination eau/glace sur une tuile d'image RADARSAT-1

La mise en place du calcul permettant l'obtention de la concentration à partir de la carte de présence/absence de glace, basé sur un rééchantillonnage sur une grille de 250m, sera mis en place d'ici la fin mars 2014.

3.6 Cartographie MODIS 250m

À l'heure actuelle, l'adaptation de l'algorithme IceMAP original est terminée et la version IceMAP250 donne de bons résultats. Les résultats obtenus (Fig. 18). permettent de localiser à l'échelle du 250m, la présence (en blanc) et l'absence de glace (en bleu). Afin de s'assurer des bonnes performances dans l'ensemble, d'autres tests sont envisagés afin de valider la version adaptée de l'algorithme.

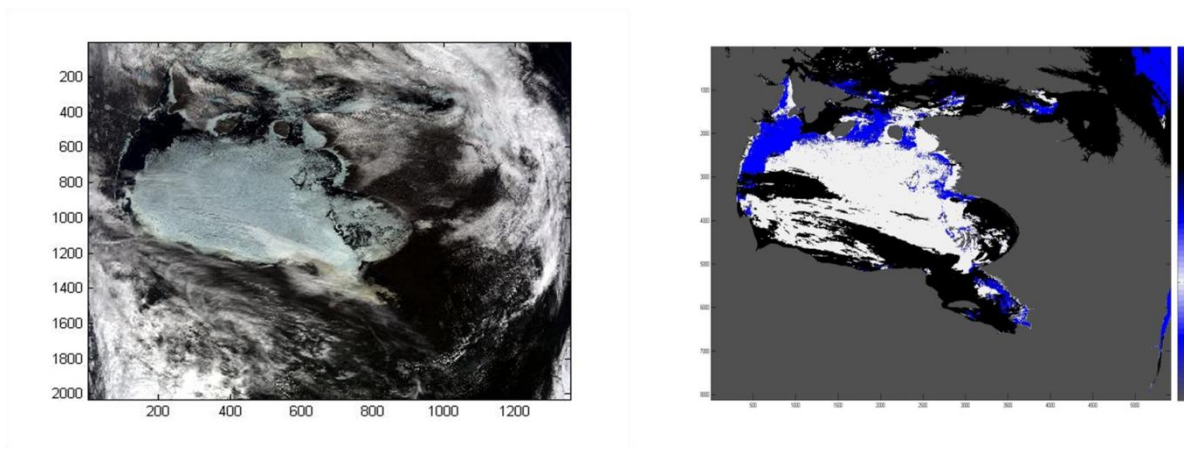


Figure 18 : Carte IceMAP250 du 22 juin 2009 [Blanc = Glace Bleu = Eau Noir = Nuages]

La performance de l’algorithme au point de vue du temps d’exécution pour la classification d’une image, couvrant généralement le site d’étude au complet, est présentée au tableau 4 selon deux configurations informatiques différentes. La mise en place du calcul permettant l’obtention de la concentration à partir de la carte de présence/absence de glace sera mis en place d’ici la fin mars 2014.

Tableau 4 : Performances de l’algorithme IceMAP250 au point de vue du temps d’exécution

Configuration système	Temps d’exécution par image
Dual Core 2.39GHz 2GB RAM Windows XP 32 bits	<i>~2 h 30 min</i>
I7 3.5GHz 32GB RAM Windows 7 64 bits	<i>~45 min</i>

3.7 Consultation des utilisateurs potentiels

Les consultations ont débutées auprès des intervenants membres du comité scientifique du projet IcePAC (C. Poirier et J-P Savard). La consultation des autres personnes listées au tableau 3 sera effectuée d’ici le mois de juin 2014. Cette étape (4A) n’ayant pas d’impact direct pour

l'avancement des autres étapes du projet, des consultations pourront être menées auprès d'autres intervenants dans la prochaine année. La participation prévue à la « *Coastal Zone Conference* » en juin 2014 permettra de créer de nouveaux contacts et de présenter le projet à un groupe distinct de personnes avec des intérêts de recherche commun à ceux du projet IcePAC (Présentation orale acceptée le 25 février 2014).

Un intérêt a été soulevé au sujet de la détection de zone libres de glace le long des côtes (fetch) pouvant ainsi permettre la formation de vagues (Proposition de C. Poirier). D'autres « indicateurs » seront recherchés, tout au long du projet, afin d'offrir des informations avec une valeur accrue pour les utilisateurs.

3.8 Programmation des scripts pour les indicateurs

L'implémentation de scripts en langage Matlab, ou Python (objectif 4B) , débutera sous peu. Des jeux de paramètres de la distribution bêta simulés, afin de couvrir l'ensemble du domaine, seront créés permettant ainsi de procéder à la programmation des premiers outils de requête de l'Atlas.

4 RÉUNION DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

La première réunion du comité scientifique du projet IcePAC a été tenue le mercredi 18 décembre 2013 dans les locaux de l'Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement.

Étaient présents : Monique Bernier (INRS), Karem Chokmani (INRS), Charles Gignac (INRS), Étienne Nadeau (INRS-Stagiaire), Yves Gauthier (INRS), Jimmy Poulin (INRS), Jean-Pierre Savard (Ouranos), Anick Guimond (MTQ) et Christian Poirier (MTQ)

4.1 Ordre du jour

- Présentation de l'état d'avancement de la modélisation fréquentielle à l'échelle régionale et les processus de cartographie automatisés. (C. Gignac)
- Présentation sur le processus de cartographie à partir des images MODIS (E. Nadeau)
- Discussion sur les moyens à prendre afin de s'assurer que les livrables du projet répondent bien aux besoins des utilisateurs (Indicateurs, Cartes, etc...)
- Discussion sur l'accès et l'utilisation des images du projet « Changements climatiques et vulnérabilité des infrastructures maritimes au Nunavik »
- Discussion sur l'utilisation des données de modèles climatiques et de l'importance d'avoir des données « futures » sur les conditions de glace.
- Conclusion de la réunion

4.2 Recommandations

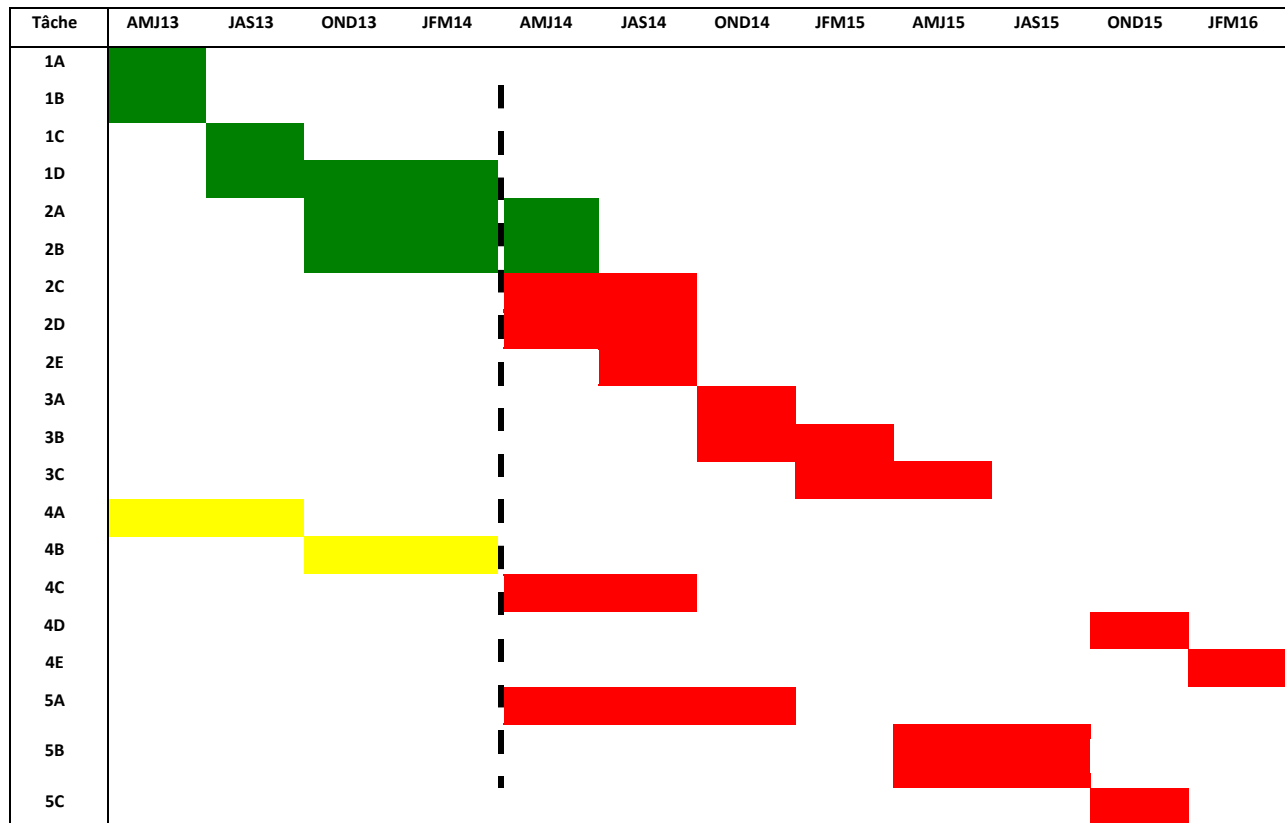
Ce projet est d'abord et avant tout un projet en Changement Climatique et pas seulement une méthode d'analyse statistique de données satellitaires sur les glaces, si intéressante soit-elle. Comme les images satellitaires en climat futur n'existent pas, il est fondamental de bien développer dès que possible la méthodologie pour projeter les statistiques de glaces du futur et de définir les bons proxys climatiques. Pour se faire Jean-Pierre Savard a invité Charles Gignac à se rendre chez Ouranos (Montréal) et a organisé des rencontres auprès de

ses collègues du groupe Science du climat, du 27 au 31 janvier. Charles a ainsi rencontré des spécialistes en scénarios climatiques, en simulation du climat et en statistiques climatiques. Il a exploré avec les spécialistes les jeux de données disponibles et a discuté des applications possibles à partir de ces dernières. Une analyse critique, visant à identifier les forces et faiblesses des divers modèles ainsi que leur potentiel dans le cadre d'une approche de projection des conditions de glace a été abordée.

5 CONCLUSION

L'échéancier de réalisation des différentes étapes est présenté au Tableau 5. Vous noterez que le 1^{er} objectif (Analyse fréquentielle à l'échelle régionale) comprenant 4 étapes et qui devait se terminer au 31 mars 2014 est complété depuis janvier. Les objectifs 2A et 2B (cartographie RADARSAT) qui devaient être complétés à la fin juin seront complétés au 31 mars 2014. L'étape 2C (MODIS) a même débutée. Ces avancements ont été possibles car l'étudiant gradué avait débuté sa recherche doctorale avant la signature du projet en juillet. Seule la consultation a été retardée et s'explique parce que la réunion de démarrage n'a pu avoir lieu avant le 18 décembre. Toutefois, cela n'a pas d'impact direct pour l'avancement des autres étapes du projet, les consultations pourront être menées tout au long de la réalisation du projet. En somme, il n'y a pas de retard dans la réalisation du projet et les choses vont bon train.

Tableau 5 : Échéancier à jour du projet IceMAP en date du 1^{er} Mars 2014



Étape complétée



Étape en voie de complétion



Étape non entamée

6 RÉFÉRENCES

- [1] S. A. Ogorodov, “The Role of Sea Ice in the Coastal Zone Dynamics of the Arctic Seas,” *Water Resour.*, vol. 30, no. 5, pp. 509–518, Sep. 2003.
- [2] Inuit Circumpolar Council, *Sea Ice is Our Highway: An Inuit Perspective on Transportation in the Arctic: a Contribution to the Arctic Marine Shipping Assessment*. Inuit Circumpolar Council--Canada, 2008.
- [3] J. Stroeve, M. Serreze, M. Holland, J. Kay, J. Malanik, and A. Barrett, “The Arctic’s rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis,” *Clim. Change*, vol. 110, no. 3–4, pp. 1005–1027, Feb. 2012.
- [4] J. A. Curry, J. L. Schramm, and E. E. Ebert, “Sea Ice-Albedo Climate Feedback Mechanism,” *J. Clim.*, vol. 8, no. 2, pp. 240–247, Feb. 1995.
- [5] F. Pithan and T. Mauritsen, “Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models,” *Nat. Geosci.*, vol. advance online publication, Feb. 2014.
- [6] J. C. Comiso, “Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover,” *J. Clim.*, vol. 25, no. 4, pp. 1176–1193, Aug. 2011.
- [7] R. Kwok and N. Untersteiner, “The thinning of Arctic sea ice,” *Phys Today*, vol. 64, no. 4, pp. 36–41, 2011.
- [8] L. C. Smith and S. R. Stephenson, “New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 110, no. 13, pp. E1191–E1195, Mar. 2013.
- [9] F. Lasserre and P.-L. Têtu, “The cruise tourism industry in the Canadian Arctic: analysis of activities and perceptions of cruise ship operators,” *Polar Rec.*, pp. 1–15.
- [10] H. Deggim, “International requirements for ships operating in polar waters,” *Int. Marit. Organ. Lond.*, 2009.
- [11] D. J. Cavalieri, C. L. Parkinson, and K. Y. Vinnikov, “30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 18, p. 1970, Sep. 2003.

- [12] O. M. JOHANNESSEN, L. BENGTSSON, M. W. MILES, S. I. KUZMINA, V. A. SEMENOV, G. V. ALEKSEEV, A. P. NAGURNYI, V. F. ZAKHAROV, L. P. BOBYLEV, L. H. PETTERSSON, K. HASSELMANN, and H. P. CATTLE, “Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability,” *Tellus A*, vol. 56, no. 4, pp. 328–341, Aug. 2004.
- [13] C. L. Parkinson, “Variability of Arctic Sea Ice: The View from Space, An 18-year Record,” *Arct. Vol 53 No 4 2000 Dec. 341–480*, 2000.
- [14] C. L. Parkinson and D. J. Cavalieri, “Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006,” *J. Geophys. Res. Oceans 1978–2012*, vol. 113, no. C7, 2008.
- [15] Service Canadien des Glaces, “Atlas climatique des glaces de mer pour les eaux du grand nord canadien 1980-2010,” 2012.
- [16] EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. *Global sea ice concentration reprocessing dataset 1978-2009* (v1.1, 2011), [Online]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. Available from <http://osisaf.met.no>.
- [17] Smith D. M., and E. C. Barrett, Satellite mapping and monitoring of sea ice, CB/RAE/9/2/4/2034/113/ARE, RSU, University of Bristol, 1994.
- [18] Comiso J. C. Characteristics of Arctic Winter Sea Ice From Satellite Multispectral Microwave Observations. *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. C1, pp. 975-994, 1986
- [19] Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.-S., Duhamel-Beaudry, É., 2012. Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik: Quaqtq, Umiujaq et Kuujjuaq: changements climatiques et infrastructures marines au Nunavik: impacts et adaptations. Rapport de recherche no. R1389 remis au Ministère des transports du Québec, Consortium Ouranos du Québec et Ministère des Affaires Autochtones et Développement du Nord Canada.
- [20] Hall, Dorothy K., et al. "Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms." *NASA GSFC, September* (2001).
- [21] Luo, Y., Trischenko, P. & Khlopenkov, K.V (2008) Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250m spatial resolution for the

seven MODIS land bands over Canada and North America. Remote Sensing of the Environment, Vol. 112. No.12

- [22] Drue, C & Heinemann, G. (2004) High resolution maps of the sea ice concentration from MODIS Satellite data. GRL, Vol. 31 No. L20403

7 ANNEXE 1 : RAPPORTS TRIMESTRIELS

T1 – 1er avril au 30 juin 2013

- *Les principales réalisations*
 - Début de l'acquisition des données satellitaires nécessaires au projet (objectifs 1, 2). Ces données sont transférées des serveurs de distribution à l'INRS.
 - Début de la revue de littérature pour les choix méthodologiques et rédaction de l'examen doctoral de Charles Gignac.
 - Début de la programmation des algorithmes de cartographie. (Objectif 2)

- *Les difficultés qui doivent être surmontées*
 - Les activités de recherche débutent même si l'entente entre OURANOS et l'INRS n'a pas encore été approuvée. La bourse de Charles Gignac, étudiant au doctorat à l'INRS, est payée entièrement par l'INRS.

T2 – 1er juillet au 30 septembre 2013

- *Les principales réalisations*
 - Signature de l'entente de contribution entre OURANOS et l'INRS en juillet.
 - Ouverture du compte à l'INRS et disponibilité des fonds de NRCan en août.
 - Engagement d'un stagiaire en géomatique de l'université de Sherbrooke pour la session d'automne (sept-déc.)
 - Poursuite de l'acquisition des données satellitaires nécessaires au projet et des développements d'algorithmes pour l'atteinte des objectifs 1 et 2.
 - Poursuite de la revue de littérature pour les choix méthodologiques (approches statistiques).

- *Les déplacements et séminaires*
 - Présentation orale du projet par Charles Gignac lors au Colloque de l'Association Québécoise de Télédétection (25-27 sept 2013) à Rimouski.

T3 – 1er octobre au 31 décembre 2013

- *Les principales réalisations*
 - Début des traitements sur les images satellitaires et développement des algorithmes pour l'atteinte de l'objectif 2. Supervision du stagiaire de premier cycle de l'Université de Sherbrooke.
 - Développement de la base de la modélisation à l'échelle régionale de la variabilité spatiotemporelle des glaces (Objectif 1).

- Examen doctoral de Charles Gignac le 3 décembre ce qui permet d'orienter les choix méthodologiques pour la réalisation des objectifs 1 et 2.
- Début de la consultation des futurs usagers de l'outil à développer (objectif 4A)
- *Les réunions*
 - Réunion de démarrage le 18 décembre 2013
- *Les déplacements*
 - Jean-Pierre Savard (Ouranos) est membre du jury de l'examen doctoral de Charles Gignac et se déplace à Québec le 3 décembre.

T4 – 1er janvier au 31 mars 2014

- *Les principales réalisations*
 - La structure pour l'analyse des données à l'échelle régionale est complétée et l'analyse elle-même est entamée (Objectif 1).
 - Application des algorithmes de cartographie automatisée à des jeux de données test afin de vérifier l'applicabilité et la performance des algorithmes (Objectif 2).
 - Discussions et réflexions sur l'approche d'utilisation des données de modèles climatiques permettant la réalisation de l'objectif 5, soit la prise en compte des changements climatiques dans les modèles de variabilité spatiotemporelle des glaces aux échelles régionale et locale.
 - Acquisition d'outils et de connaissances sur les modèles climatiques et leurs propriétés lors d'un stage de familiarisation chez Ouranos (27-31 janvier).
 - Début de la rédaction d'un premier article sur les approches de cartographie des conditions de glace grâce aux données optiques du satellite MODIS.
 - Rédaction du 1^{er} rapport d'étape.
- *Les déplacements*
 - Stage de 5 jours de Charles Gignac (étudiant à l'INRS) chez Ouranos du 27 au 31 janvier sous la supervision de M. Jean-Pierre Savard.
- *Les conférences et séminaires*
 - Soumission en janvier d'un résumé pour une participation à IGARSS 2014 & 35^e Symposium canadien de télédétection à Québec en juillet 2014.

- Présentation d'une affiche au colloque annuel du centre d'études Nordiques tenu à l'INRS-ETE à Québec (13 février 2014).
- Soumission d'un résumé pour une présentation orale à la « *International Coastal Zone Conference* » à Halifax en juin 2014 (Résumé accepté le 25 février).
- Présentation orale à la Journée des sciences de la terre et de l'environnement à l'INRS-ETE le 20 mars 2014.

