

**IceMAP-R:**  
**Ice Mapping Automated Procedure from Radar data**

Version V310316\_NRCan

**Réingénierie logicielle**

**Document remis à:**

Jean-Samuel Proulx

Ressources Naturelles Canada  
Centre Canadien de Cartographie et d'Observation de la Terre  
50, Place de la Cité, Bureau 212, C.P. 162  
Sherbrooke (Québec) J1H 4G9

**Rédigé par:**

Yves Gauthier, Jimmy Poulin and Monique Bernier

Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau Terre Environnement  
490, rue de la Couronne  
Québec (Québec) G1K 9A9

**Rapport No. R1664**

31 mars 2016

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2015  
Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec  
Dépôt légal, Bibliothèque et archives Canada  
ISBN : 978-2-89146-861-9

## Table des matières

Liste des figures .....	4
Liste des tableaux .....	4
1. Mandat .....	5
2. Introduction.....	6
3. Sensibilité des images radar (SAR) à la glace.....	7
4. Cartographie des glaces avec IceMAP-R <sup>®</sup> .....	8
4.1 Intrants à la procédure IceMAP-R <sup>®</sup> .....	9
4.2 Production de la carte .....	10
4.3 Interprétation de la carte .....	12
4.4 Analyse des composantes de la procédure IceMAP-R <sup>®</sup> .....	15
4.5 Validation des résultats de la procédure IceMAP-R <sup>®</sup> .....	18
4.6 Sommaire des forces et faiblesses de l’algorithme IceMAP-R <sup>®</sup> .....	21
5. Jeu de données de validation .....	23
Références.....	27
Annexe 1.....	28

## Liste des figures

Figure 1: Illustration de l'interaction du signal radar d'un capteur micro-ondes actif (RADARSAT) sur un couvert de glace de rivière. ....	7
Figure 2: Schéma général de l'algorithme IceMAP-R <sup>®</sup> . Tiré de Gauthier et al (2010). ....	11
Figure 3 : Extrait de la carte de glace sur la rivière des Prairies, le 4 février 2011.....	12
Figure 4: Illustration de différentes couches dans une carotte de glace de rivière. ....	14
Figure 5: Exemples d'histogrammes de la texture GLCM Mean sur les images des rivières Athabasca et Koksoak.....	15
Figure 6: Histogramme de la texture GLCM Mean sur la rivière Koksoak durant la fonte (Gauche) et sur la rivière Peace durant l'hiver (droite). ....	18
Figure 7 : Exemple de sites de validation sur la rivière des Prairies.....	25

## Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques générales de l'algorithme IceMAP-R <sup>®</sup> .....	9
Tableau 2: Légende de la carte de glace (période de gel).....	12
Tableau 3: Légende de la carte de glace (période de fonte).....	13
Tableau 4: Analyse de séparabilité.....	16
Tableau 5: Valeur moyenne de texture pour chaque classe après l'étape 2. ....	17
Tableau 6: Performance de la procédure IceMAP-R <sup>®</sup> (selon Drouin et al, 2007). ....	18
Tableau 7: Matrice de confusion – Erreurs d'omission (selon Duguay et al, 2012).....	19
Tableau 8: Matrice de confusion - Erreurs de commission (selon Duguay et al, 2012). ....	19
Tableau 9 : Précision globale pour des images Radarsat-2 de la rivière Peace de l'englacement 2012.....	20
Tableau 10 : Description des rivières du jeu de données de validation.....	23
Tableau 11 : Liste des images du jeu de données. ....	24
Tableau 12 : Caractéristiques des images du jeu de données et état du couvert de glace. ....	24
Tableau 13 : Nombre de sites de validation par classe de couvert de glace.....	26
Tableau 14 : Structure des fichiers livrés .....	28

## 1. Mandat

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une entente entre l'INRS et le Centre Canadien de Cartographie et d'Observation de la Terre (RNCan). L'objectif était de produire une version fonctionnelle en Python de la procédure IceMAP-R<sup>®</sup> (Ice Mapping Automated Procedure from Radar data) facilement assimilable par la communauté des urgences. IceMAP-R<sup>®</sup> est une procédure de traitement d'images radar satellitaires permettant de produire de façon automatisée, une carte des différents types de glace présents sur la rivière au moment de l'acquisition de l'image. La libération de cette procédure à la communauté permettra d'en démocratiser l'utilisation et de favoriser son évolution à travers la communauté d'utilisateurs qui se développera.

Les livrables incluaient :

- Conversion des scripts EASI vers Python 2.7 64 bits;
- Nettoyage et documentation du code;
- Mise à jour et préparation du guide d'utilisation;
- Mise à jour et préparation du document d'analyse et d'évaluation de l'algorithme;
- Préparation du jeu de données de validation.

La procédure IceMAP-R<sup>®</sup> produite dans le cadre de ce contrat sera associée à la licence Mozilla Public Licence Version 2.0 (<https://www.mozilla.org/en-US/MPL/2.0/>). INRS conserve toutefois la propriété intellectuelle. La procédure nécessite également une licence du logiciel Geomatica version 2015 ([www.pcigeomatics.com](http://www.pcigeomatics.com)).

La liste des fichiers livrés est présentée à l'annexe 1.

## 2. Introduction

IceMAP-R<sup>®</sup> (Ice Mapping Automated Procedure from Radar data) est une procédure de traitement d'images radar satellitaires permettant de produire de façon automatisée, une carte des différents types de glace présents sur la rivière au moment de l'acquisition de l'image. L'approche a été développée dans le cadre des travaux de recherche du Laboratoire de Télédétection Environnementale et NORdique (TENOR) de l'INRS, Centre Eau Terre Environnement (INRS), sous la direction de Mme Monique Bernier. Ces travaux ont été financés initialement par le réseau d'excellence GEOIDE (CRSNG), avec la contribution de l'Agence Spatiale Canadienne et la collaboration directe et indirecte de nombreux partenaires tels que BC Hydro (Vancouver), le Ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSPQ), l'Université de l'Alberta (Edmonton), le Cold Region Research and Engineering Laboratory (USA), IREQ-Hydro-Québec (Montréal), l'École de Technologie Supérieure (Montréal) et l'Université de Rennes (France). IceMAP-R<sup>®</sup> est utilisé de manière opérationnelle par le MSPQ depuis 2009, sous l'appellation *IceMap3.0 V280409\_SC*. Il a été développé à partir des travaux de Gauthier et al (2003; 2006; 2008; 2010) et de l'expérimentation de la méthode sur différentes rivières et s'inspire de la compréhension des mécanismes de diffusion de l'onde radar dans un couvert de glace d'eau douce de Gherboudj et al (2007;2010) et de Mermoz et al (2008; 2009a; 2009b). Bien que l'approche employée ait atteint un bon niveau de maturité, des travaux sont toujours en cours pour améliorer les connaissances et réduire l'incertitude associée au produit.

Le produit final est une représentation du type de couvert de glace, déterminé généralement par sa composition interne (taille et densité des inclusions d'air) et fortement par sa rugosité (lisse, rugueux, amoncellements, etc.). La méthodologie actuelle ne permet pas de déterminer l'épaisseur du couvert de glace. De plus, le signal radar ne pénétrant pas l'eau, il est impossible de détecter le frasil en suspension ou la glace de fond. Également, dû à cette sensibilité du radar à l'eau, la présence de neige humide ou de slush en surface du couvert de glace peut limiter l'efficacité de la méthode et masquer l'information sur le type de glace sous-jacent. Finalement, il faut toujours prendre en considération que tout élément plus petit que la résolution spatiale de l'image (ex : veine d'eau libre) peut ne pas être détecté.

### 3. Sensibilité des images radar (SAR) à la glace

Les micro-ondes pouvant traverser les nuages, les capteurs radar permettent d'obtenir des images de jour comme de nuit, quelles que soient les conditions météorologiques. Les micro-ondes peuvent aussi traverser la neige sèche et atteindre la glace de rivière, où se produisent les premières interactions avec la cible. IceMAP-R<sup>®</sup> tire ainsi profit de la sensibilité du signal radar aux caractéristiques d'un couvert de glace. La rugosité de la surface, la taille et la densité des inclusions d'air contenues dans la glace, et la présence de neige ou de glace humide (absorption du signal), sont les principaux facteurs contrôlant l'intensité du signal radar rétrodiffusé et mesuré par le capteur (Figure 1).

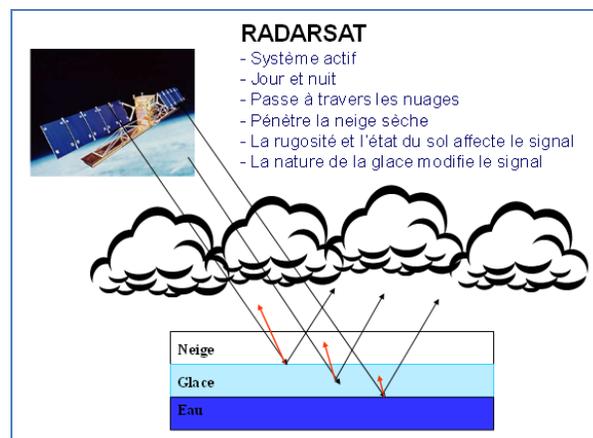


Figure 1: Illustration de l'interaction du signal radar d'un capteur micro-ondes actif (RADARSAT) sur un couvert de glace de rivière.

De façon plus détaillée, Gherboudj et al (2010) affirment que la réponse d'un signal radar dans un couvert de glace dépend à la fois de la rugosité de l'interface air/glace et de l'interface glace/eau. De plus, la forme, la quantité et la distribution des inclusions d'air à l'intérieur des différents types de glace peuvent générer une augmentation de l'intensité du signal rétrodiffusé, particulièrement: 1) la présence d'inclusions d'air tubulaires dans la glace thermique, 2) les petites inclusions sphériques et rapprochées d'une glace de frasil et 3) l'épaississement d'un couvert de glace contenant des inclusions d'air. Également, la superposition de plusieurs couches de glace aux caractéristiques différentes (Figure 4), ou l'empilement hétérogène de morceaux de glace, entrainera une augmentation de l'intensité du signal rétrodiffusé par le phénomène de diffusion multiple.

Conséquemment, le radar en bande C (fréquence de 5Ghz) nous permet de distinguer avec un certain succès : 1) la glace thermique (noire) intacte (avec bulles d'air tubulaires et surface lisse); 2) la glace de frasil agglomérée (blanche) intacte (avec bulles d'air sphériques et une surface légèrement rugueuse) et 3) la glace consolidée (morceaux de glace brisés et empilés).

#### **4. Cartographie des glaces avec IceMAP-R<sup>©</sup>**

La classification automatique d'une image radar consiste à associer chaque pixel à une classe particulière; un type de couvert de glace, dans le cas qui nous préoccupe. Cette association est basée sur des regroupements statistiques. Les pixels ayant les mêmes caractéristiques statistiques seront regroupés dans la même classe. Il existe différents algorithmes pour effectuer cette tâche. L'approche la plus fréquente utilise une méthode supervisée, où un spécialiste sélectionne préalablement sur l'image, des sites représentatifs de chaque classe désirée. L'algorithme calcule ainsi les statistiques propres à chaque classe. Il compare ensuite chaque pixel de l'image à ces statistiques afin de trouver à quelle classe il appartient. Toutefois, dans le cadre de la classification automatisée de la glace de rivière, cette approche n'est pas applicable. D'abord, parce qu'elle nécessite une intervention humaine mais aussi, parce que l'on ne connaît pas a priori, les types de glace en présence.

Par conséquent, la procédure de cartographie automatisée IceMAP-R<sup>©</sup> est basée sur une approche non-supervisée. Dans ce cas, c'est l'algorithme de classification qui détecte automatiquement des groupes de pixels aux statistiques semblables pour ainsi former des grappes (clusters), sans connaissance a priori de l'environnement. L'algorithme attribue ensuite chaque pixel de l'image à l'une ou l'autre de ces grappes (classes). Ces classes sont ensuite identifiées et nommées.

Dans le cas d'une image radar, la classification de l'image et son interprétation automatique demeure un défi de taille. En effet, de par sa nature, le signal d'une image radar inclus du bruit (effet poivre et sel), ce qui rend les regroupements plus difficiles. Également, en raison des mécanismes de rétrodiffusion contrôlés principalement par la constante diélectrique, l'humidité et la rugosité, les objets présentent rarement une signature spectrale constante. Il est alors nécessaire de faire appel à d'autres caractéristiques de l'image, telles la texture ou la polarisation, pour mieux départager les objets. La procédure de cartographie automatisée IceMAP-R<sup>©</sup> se base principalement sur les caractéristiques de texture de l'image mais n'utilise

que la polarisation HH. Une glace thermique, généralement lisse, présente une texture faible. Par contre, un couvert de frasil aggloméré contient plus de bulles d'air (diffuseurs) et une légère rugosité due aux collisions entre les radeaux de frasil. Sa texture est alors plus hétérogène. Enfin, un amoncellement de glace présente des faces dans toutes les directions et une texture très forte. À cette information, on ajoute l'image originale de rétrodiffusion radar (filtrée) afin d'obtenir l'information la plus complète possible.

Les caractéristiques générales de la procédure IceMAP-R<sup>®</sup> sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques générales de l'algorithme IceMAP-R<sup>®</sup>

Utilisation de la polarisation simple (HH)
Développé avec des données RADARSAT-1 et 2
Basé sur la texture et l'intensité de l'image
Utilisation de l'algorithme de classification Fuzzy K-Mean
Classification par étapes
Entièrement automatisé
Programmation en langage Python utilisant les fonctionnalités du logiciel Geomatica (PCI Geomatics)

#### 4.1 Intrants à la procédure IceMAP-R<sup>®</sup>

L'algorithme requiert 3 intrants :

- Une image radar orthorectifiée en bande C et en polarisation horizontale (HH);
- Un vecteur géoréférencé du chenal de la rivière;
- Une légende à utiliser lors de la production de la carte de glace.

L'image radar doit être en format PCIDSK (.pix) du logiciel Geomatica alors que le vecteur peut être en format .pix ou shapefile. Les valeurs de rétrodiffusion de l'image radar devraient être en puissances. L'algorithme peut travailler à partir d'images en 8, 16 ou 32 bits. La projection du vecteur et celle de l'image doivent être identiques. Les légendes pour les périodes de gel et de fonte sont codées dans la procédure et peuvent être utilisées en spécifiant *freeze* ou *thaw* au paramètre en question. Une légende personnalisée en format texte peut également être utilisée en fournissant le chemin d'accès. La légende doit avoir la forme suivante :

```

! pseudo-colour table (attribute format)
!
! min: max ; red green blue
!
    0; 0 0 0
    1; 0 0 153
    2; 51 102 255
3: 4; 204 204 255
5: 7; 207 109 215
8: 9; 142 0 142
10: 255; 255 255 255

```

Les lignes débutant par un point d’exclamation (!) sont des lignes de commentaires et ne sont pas considérées lors de la lecture du fichier. Ensuite, chaque ligne du fichier doit fournir pour une, ou une gamme de valeurs, les valeurs d’intensité entre 0 et 255 dans les canaux rouge, vert et bleu.

L’algorithme a été testé pour :

- les images RADARSAT-1, RADARSAT-2 et Envisat-ASAR, toujours en bande C et polarisation HH;
- les modes Standard, Fin, Ultra-Fin, Standard Quad et Fine Quad.

## 4.2 Production de la carte

L’algorithme livré ici fonctionne avec la version Python 2.7 64 bits et la version 2015 de Geomatica Prime Service Pack 1 ou version 2015 de Geomatica Prime avec version de numpy égale ou supérieure à 1.8.2. La fonction implémentant cet algorithme, nommée *icemapr*, peut être utilisée en important le module *icemapr.py*. Un exemple de carte de glace peut être réalisé en utilisant les données fournies et en exécutant la partie *main* du module. La correspondance entre l’ancienne version EASI de l’algorithme et la nouvelle version Python livrée ici a été vérifiée.

Lors de la procédure de cartographie automatisée (Figure 2), l’algorithme crée d’abord un ensemble de paramètres de texture (arrangement spatial des tons de gris) à partir de l’image d’intensité radar (étape 1). Ce calcul est effectué sur la matrice de cooccurrence des niveaux de gris (GLCM), qui représente la fréquence d’occurrence de certaines combinaisons de tons de gris

sur l'image, pour des pixels voisins (Haralick et al, 1973). Un type de glace peut par exemple, présenter une texture contrastée, homogène ou chaotique. IceMAP-R<sup>®</sup> utilise ensuite un algorithme de classification non-supervisé par pixel (Fuzzy K-Mean) pour identifier les groupements de pixels statistiquement similaires et les traduire en classe (type) de glace (étape 2). La couche d'intrant est l'image de texture moyenne (GLCM Mean). Le nombre initial de centroïdes pour la création des groupements est fixé à 7, parce que selon Weber et al (2003), il s'agit du nombre maximal de types de glace que l'on peut visuellement discriminer. Une fois la carte de sept classes obtenue, un deuxième niveau de classification est effectué sur la classe minimale (#1) et sur la classe maximale (#7), qui seront chacune scindées en deux, afin d'obtenir une meilleure identification des conditions limites de glace (étape 3). L'algorithme Fuzzy K-Mean est toujours utilisé pour cette opération mais en utilisant de nouveaux intrants. Pour la classe minimale, IceMAP-R<sup>®</sup> utilise les images de texture suivantes : Moyenne, Contraste et Second moment angulaire. Pour la classe maximale, l'intensité rétrodiffusée originale, préalablement filtrée afin de réduire le chatoiement, est utilisée (étape #4).

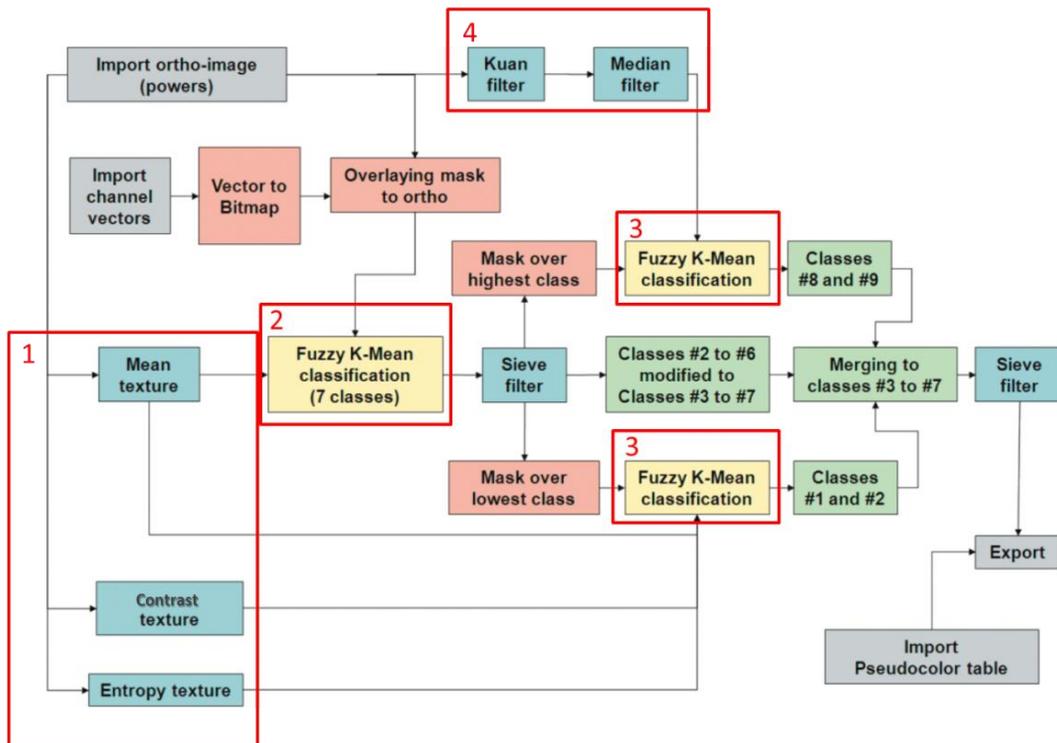


Figure 2: Schéma général de l'algorithme IceMAP-R<sup>®</sup>. Tiré de Gauthier et al (2010).

Le résultat final de la procédure de cartographie automatisée est une classification de l'image radar en 9 classes (regroupées en 5 classes), en format TIF géoréférencé (Figure 3).

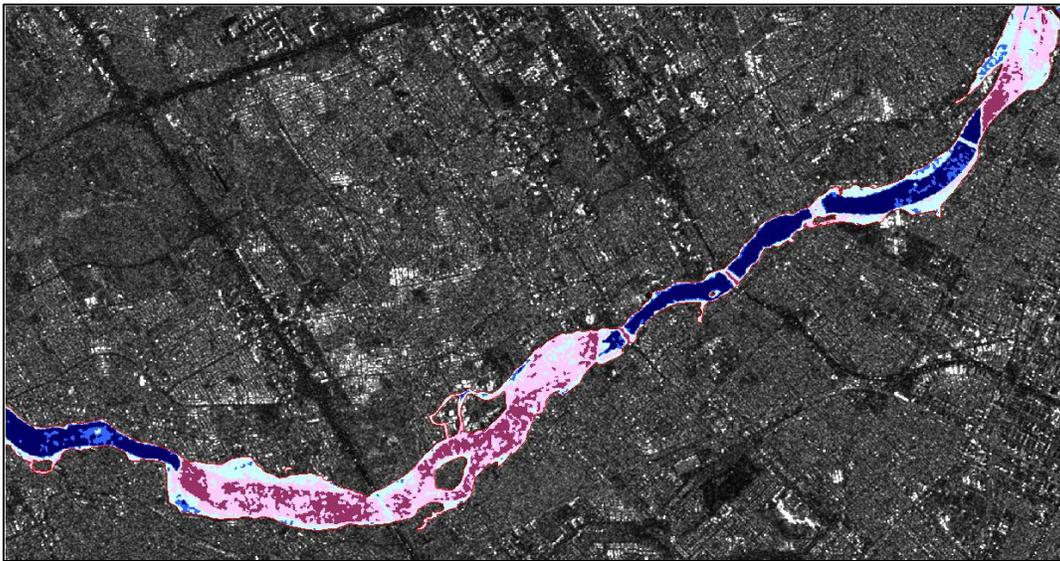


Figure 3 : Extrait de la carte de glace sur la rivière des Prairies, le 4 février 2011.

### 4.3 Interprétation de la carte

En se basant sur les mécanismes connus de l'interaction entre le signal radar et la glace de rivière ainsi que sur l'expérimentation faite par l'INRS et ses partenaires depuis 2000, nous proposons un regroupement des classes correspondant à la période de gel (Tableau 2) ou de fonte (Tableau 3).

Tableau 2: Légende de la carte de glace (période de gel)

Type de glace	Légende (couleur et regroupement de classes)	Rugosité de surface de la glace
Eau libre	1,2	Faible
Eau et radeaux de frasil	3	Légère à moyenne
Glace noire (thermique)	4,5	Faible
Glace blanche (frasil aggloméré)	6,7	Légère à moyenne
Glace consolidée (blocs et amoncellements)	8,9	Moyenne à forte

Tableau 3: Légende de la carte de glace (période de fonte)

Type de glace	Légende (couleur et regroupement de classes)	Rugosité de surface de la glace
Eau libre	1	Faible
Chenal ouvert et eau sur glace	2	Faible
Glace noire en dégradation	3,4	Faible à Légère
Glace blanche en dégradation	5,6,7	Légère à moyenne
Glace consolidée en dégradation (blocs et amoncellements)	8,9	Moyenne à forte

La légende de la période de gel s'applique du début de la formation du couvert de glace, jusqu'avant le début de la fonte. Il s'agit de la période où la température de l'air se maintient sous le point de congélation. On estime alors que dans la plupart des cas, la neige est sèche (transparente pour le radar) et que la surface du couvert de glace l'est également. Dans l'éventualité où une couche de neige humide existe entre le couvert de neige et la glace, le signal radar est masqué et l'algorithme pourrait alors fournir une classification erronée. Il peut en être de même lors d'épisodes de pluie en hiver, auquel cas la neige devient humide et absorbe grandement le signal radar. C'est pourquoi, lors de périodes de fonte (printemps inclus), nous proposons une légende ajustée, afin de tenir compte de ces facteurs et de produire une carte tout de même informative (Tableau 3). Dans le cas des deux légendes, le code de couleur proposé permet de bien visualiser l'état général du couvert de glace. Il a été approuvé par les utilisateurs. Il est très important de noter que les regroupements proposés sont représentatifs dans une majorité de cas, mais qu'ils peuvent être modifiés par l'utilisateur. En effet, la carte initiale de neuf classes permet cette flexibilité afin de s'ajuster aux conditions locales ou au glissement des centroïdes (discuté à la section 3.4). Les regroupements proposés ne tirent pas toujours profit du deuxième niveau de classification des classes limites.

La validation précise et régulière de ces légendes représente d'ailleurs un grand défi puisque le radar fournit une information qui intègre l'ensemble du profil vertical du couvert de glace (souvent multicouches) (Figure 4), alors que la vérité terrain est généralement une série d'observations (vue aérienne ou du sol) de la surface du couvert de glace, souvent elle-même recouverte de neige.

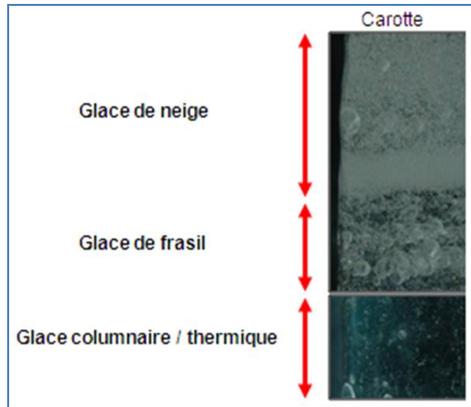


Figure 4: Illustration de différentes couches dans une carotte de glace de rivière.

La comparaison des deux est un exercice indispensable mais qui demeure très imparfait. C'est pourquoi on y ajoutera lorsque possible, l'information issue de l'extraction ponctuelle de carottes de glace. Les mesures de géoradar sont également intéressantes mais comme le signal radar n'est pas directement lié à l'épaisseur de la glace, elles ne sont pas concluantes dans ce cas. Un autre élément qui rend la validation difficile, est la question de la résolution spatiale. Celle de l'image peut varier d'un mode standard (30m) à un mode fin (8m) ou ultra-fin (3m). Dépendamment de la résolution, un pixel plus grand peut contenir un mélange d'éléments (glace et eau) au lieu d'un seul élément (eau), ce qui implique une interprétation différente de la légende de la carte finale. Également, la résolution des photos de validation prises en vol ou au sol peut varier. L'utilisation grandissante des applications sur téléphones cellulaires et tablettes permet maintenant aux intervenants terrain de fournir des observations de validation plus fréquentes. Une évaluation du produit en temps quasi-réel peut alors être faite et permet d'améliorer son interprétation. Ainsi, malgré les applications antérieures qui ont démontré la représentativité de la carte de glace et la logique des légendes proposées, il est recommandé de poursuivre les efforts de validation et d'ajuster la terminologie et le nombre de classes de la légende au fil de l'expérience de l'utilisateur.

#### 4.4 Analyse des composantes de la procédure IceMAP-R<sup>©</sup>

Les composantes de l'algorithme ont été analysées dans le cadre du projet STSE North Hydrology, financé par l'Agence Spatiale Européenne (Duguay et al, 2013). Le premier aspect analysé est l'étape 1 (Figure 2, cadre 1), où les paramètres de texture sont calculés sur l'image entière, par opposition au calcul qui se ferait sur les seuls pixels du chenal de la rivière. Il faut savoir ici que la texture est une mesure relative où la fonction de calcul répartit les textures observées sur l'image traitée, entre 0 et 255. Ainsi, notre hypothèse est qu'une image radar entière contiendra l'ensemble des textures possibles et qu'elles seront bien réparties entre 0 et 255. Ainsi, les valeurs de texture retrouvées sur la rivière (eau ou glace) seront constantes et comparables d'une image à l'autre.

Cette hypothèse a été vérifiée à partir d'un jeu de données de validation composé de 10 images Radarsat-1 et Radarsat-2 et Envisat-ASAR. La valeur moyenne du paramètre de texture « GLCM Mean » est centrée sur l'histogramme (entre 124 et 133 selon l'image) et que la distribution couvre la gamme complète des valeurs (Figure 5).

Également, l'analyse nous indique que, sur l'ensemble des images, les valeurs de la texture GLCM Mean pour l'eau libre sont de 50 et moins, alors que celles de la glace consolidée sont de 220 et plus. Ceci confirme l'hypothèse de départ et assure la cohérence des valeurs de texture qui nous intéressent.

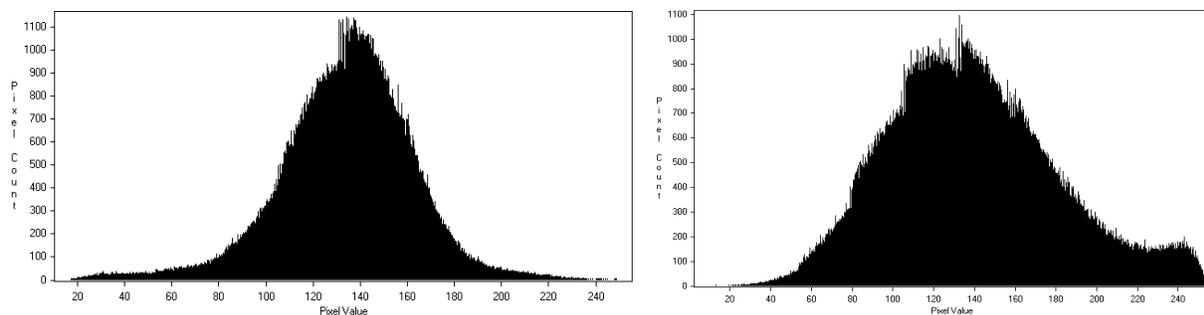


Figure 5: Exemples d'histogrammes de la texture GLCM Mean sur les images des rivières Athabasca et Koksoak

Le deuxième aspect de l'algorithme qui a été analysé est la pertinence d'utiliser, justement, la texture moyenne (GLCM Mean) comme paramètre de classification principal. En effet, dans l'étape 2 de l'algorithme (Figure 2, cadre 2), la première classification non-supervisée est appliquée sur le paramètre GLCM Mean, sous le masque de la rivière. GLCM Mean est calculé par :

$$\mu_i = \sum_{i,j=0}^{N-1} i(P_{i,j}) \quad \mu_j = \sum_{i,j=0}^{N-1} j(P_{i,j}) \quad \text{Équation 1}$$

Où P(i,j) est la matrice de cooccurrence normalisée de sorte que  $\sum_{i,j=0}^{N-1} P(i,j) = 1$ .

Une analyse de séparabilité qui détermine les intrants les plus efficaces pour discriminer deux types de glace, a été réalisée. Dans cette étude, les paramètres analysés sont : *GLCM Mean*, *GLCM Contrast*, *GLCM Angular 2<sup>nd</sup> moment*, *GLCM Correlation* et *rétrodiffusion HH*. Ces paramètres sont ceux mentionnés dans Gauthier et al (2003) et ils couvrent les trois grands groupes de texture, soient les mesures de contraste, les mesures d'entropie et les statistiques descriptives, en plus de la rétrodiffusion originale. À partir d'un test de Bhattacharya, il a été établi que le paramètre *GLCM Mean* revient constamment parmi les meilleurs choix pour discriminer les classes de glace principales (Tableau 4), bien que dans certains cas, les valeurs de séparabilité puissent être assez faibles.

Tableau 4: Analyse de séparabilité

Eau vs glace thermique		Eau vs glace agglomérée		Glace thermique vs Glace agglomérée		Glace agglomérée vs Glace consolidée	
HH Contrast	0.62	HH Mean	3.4	HH Mean	0.60	HH Correlation	0.62
HH Mean	0.59	HH Contrast	0.81	HH Correlation	0.37	HH Mean	0.23
HH Angular	0.18	HH Rétrodiffusion	0.60	HH Rétrodiffusion	0.11	HH Angular	0.13

Un autre avantage du paramètre *GLCM Mean* est qu'il produit une carte de glace plus lissée et visuellement plus naturelle. Toutefois, le Tableau 4 montre aussi que pour discriminer entre l'eau et la glace thermique ainsi qu'entre les types de types de glace plus rugueux, *GLCM Mean* n'est pas le meilleur. C'est pourquoi à l'étape 3 (Figure 2, cadres 3), l'algorithme reclassifie indépendamment les pixels ayant été initialement attribués aux classes #1 (faibles textures : eau, glace noire) et #7 (textures plus élevées : glaces agglomérée et consolidée). Dans le premier cas, l'algorithme utilise *GLCM Mean*, *GLCM Contrast* et *GLCM Angular Second Moment*. Ces choix étant basés sur les travaux de Gauthier et al (2003). Le Tableau 4 (colonne 1) confirme la pertinence de ces choix, bien que la contribution du paramètre d'entropie (*GLCM Angular Second Moment*) ne semble pas très élevée. Dans le deuxième cas, l'algorithme utilise l'intensité de rétrodiffusion. Ce choix semble valide pour différencier la glace thermique de la glace agglomérée (Tableau 4, colonne 3) mais n'est pas corroboré pour différencier la glace

agglomérée de la glace consolidée (colonne 4). Le paramètre GLCM Correlation semblerait un meilleur choix. Cette modification n'a pas été testée ni implantée dans la version de l'algorithme déposé en mars 2016.

Le troisième aspect analysé est lié à la manière dont la classification non-supervisée est appliquée. IceMAP-R effectue cette classification sur l'information contenue uniquement sur la rivière, en utilisant un masque du chenal (Figure 2, cadre 4). Ainsi, Fuzzy K-Mean choisira ses centroïdes de classes en fonction des valeurs prises sur la rivière. Comme ces valeurs varient en fonction des conditions de glace, nous déduisons que, d'une image à l'autre, les centres de classes peuvent varier, et ainsi affecter la justesse de la classification. Pour vérifier ce point, nous avons calculé la moyenne de la texture GLCM Mean pour chaque classe originale sur toutes les images du jeu de validation (Tableau 5).

Tableau 5: Valeur moyenne de texture pour chaque classe après l'étape 2.

Classe	Moyenne GLCM Mean	Écart-Type
1	34	20
2	68	25
3	97	25
4	126	25
5	154	27
6	180	28
7	214	26

Ce tableau nous confirme que la valeur moyenne de chaque classe, sur l'échelle 0-255, est dans l'ordre de grandeur attendu, mais que l'écart-type est assez élevé. Cela pourrait indiquer une certaine variabilité dans la valeur des centroïdes. Par exemple, en période de fonte, les valeurs de texture seront plus faibles en raison de l'absorption du signal radar. Ainsi, l'histogramme sous le masque de la rivière présentera une tendance vers la gauche (Figure 6). L'algorithme de classification Fuzzy K-Mean déterminera quand même 7 centres de classes, mais ils seront aussi décalés vers les plus faibles valeurs. L'inverse est aussi vrai, dans le cas où le couvert de glace est très rugueux (Figure 6), les centres de classes seront décalés vers la droite. Ces décalages vers la gauche ou la droite de l'histogramme peuvent induire des différences dans l'attribution, à chaque classe, d'un type de glace. Et c'est d'ailleurs pourquoi IceMAP-R utilise une légende différente au printemps.

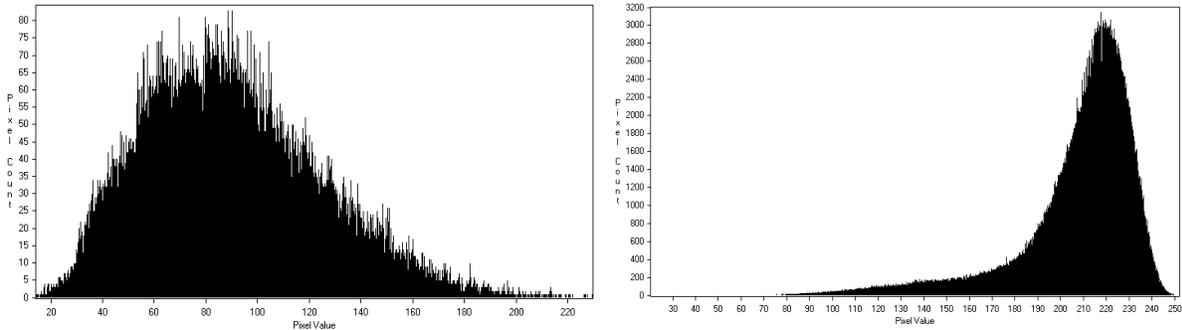


Figure 6: Histogramme de la texture GLCM Mean sur la rivière Koksoak durant la fonte (Gauche) et sur la rivière Peace durant l’hiver (droite).

Le fait d’introduire des valeurs initiales fixes lors de la création des centroïdes pourrait aider, mais comme les centroïdes sont ajustés à chaque itération, ils finiront par tendre vers les valeurs réelles.

#### 4.5 Validation des résultats de la procédure IceMAP-R<sup>®</sup>

Drouin et al (2007) ont produit la première validation quantitative de la procédure IceMAP-R. L’analyse a porté sur deux rivières et a utilisé des images Radarsat-1 de milieu d’hiver. Les données de validation provenaient d’observations aériennes ou au sol. Trois à cinq classes ont été considérées: Eau libre, glace thermique lisse, glace juxtaposée, glace consolidée, glace fortement consolidée. La précision calculée est présentée au Tableau 6.

Tableau 6: Performance de la procédure IceMAP-R<sup>®</sup> (selon Drouin et al, 2007).

Peace River [Mars 16, 2006] 4 classes	Rivière Saint-Francois [Janvier 26, 2006] 3 classes	Rivière Saint-Francois [Février 12,2006] 5 classes	Rivière Saint-Francois [Février 7, 2007] 5 classes
Précision et Kappa 66.5 % (k=0.44)	Précision et Kappa 98% (k=0.97)	Précision et Kappa 84% (k=0.71)	Précision et Kappa 72.5 % (k=0.65)

Dans Gauthier et al (2010), une validation des performances de la procédure IceMAP-R est réalisée sur trois images Radarsat-2 de la rivière Koksoak, au nord du Québec, dans des conditions d’englacement, de milieu d’hiver et de fonte. Les données de validation proviennent de mesures au sol et de survols aéroportés. La précision globale est de 76%. La classification est plus difficile en présence de radeaux de frazil.

En 2012, une validation détaillée a été faite dans le cadre du projet STSE North Hydrology (Duguay et al, 2012), à partir d'un jeu de données de 10 images (Radarsat-1, Radarsat-2 et ENVISAT-ASAR) acquises sur 5 rivières, dans des conditions de glace différentes. Le Tableau 7 présente la matrice de confusion pour les conditions d'englacement et d'hiver.

Tableau 7: Matrice de confusion – Erreurs d'omission (selon Duguay et al, 2012).

	Eau libre	Glace thermique	Glace agglomérée	Glace consolidée
	%	%	%	%
<b>1</b>	<b>93</b>	23	0	0
2 -3	7	<b>66</b>	9	0
4	0	11	<b>58</b>	16
5	0	0	33	<b>84</b>

Les classes de radeaux de frasil et de glace thermique ont été regroupées en raison de la nature mixte des pixels. En effet, lorsque les radeaux sont de petite taille ou peu denses, les pixels seront classés comme de l'eau et certains comme de la glace thermique. Lorsque les radeaux sont de plus grande taille, ils seront classés comme de la glace thermique. Et lorsque la densité de ces radeaux augmente, ils s'agglomèrent ensemble et les pixels seront souvent classifiés comme de la glace agglomérée (en mouvement ou non). D'ailleurs, les résultats obtenus pour la glace thermique montrent qu'il existe toujours une certaine confusion entre cette classe et l'eau libre. Les résultats obtenus pour la glace agglomérée montrent aussi qu'elle peut se confondre avec la glace plus consolidée. Le Tableau 8 montre quant à lui le contenu réel de chacune des 9 classes avant regroupement, sur l'ensemble du jeu de données.

Tableau 8: Matrice de confusion - Erreurs de commission (selon Duguay et al, 2012).

	Eau libre	Radeaux de frasil	Glace thermique	Neige/Glace humide	Glace agglomérée	Glace consolidée	Vent sur eau	
	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>1</b>	<b>84</b>	5	8	2	0	0	0	100
<b>2</b>	<b>39</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	7	0	0	<b>10</b>	100
<b>3</b>	7	21	<b>29</b>	<b>23</b>	0	0	<b>20</b>	100
4	0	17	<b>20</b>	<b>34</b>	1	0	<b>27</b>	100
5	0	17	<b>21</b>	<b>26</b>	10	0	<b>26</b>	100
6	0	<b>21</b>	13	14	<b>32</b>	2	<b>18</b>	100
7	0	<b>13</b>	2	7	<b>46</b>	20	<b>13</b>	100
8	0	1	0	1	29	<b>67</b>	1	100
9	0	0	0	0	22	<b>78</b>	0	100

À partir des sites de validation, ce tableau montre que 84% des pixels attribués à la classe #1 sont de l'eau. La classe #2 est composée majoritairement de pixels d'eau, comme prévu, mais aussi avec un mélange de radeaux de frasil et de glace thermique, ce qui confirme nos observations précédentes. Toutefois, ici, nous prenons aussi en considération les conditions de vent sur l'eau libre (colonne de droite). Dans ce cas, la rugosité des vaguelettes, lorsqu'elle est du même ordre que la longueur d'onde du radar (5 cm), peut être faussement interprétée comme de la glace. Cela s'applique également aux zones de rapides. C'est une limitation de l'algorithme.

Les classes #3, #4 et #5 sont généralement dominées par la glace thermique ou les radeaux de frasil. Toutefois, durant la période de fonte, elles sont dominées par la glace ou neige humide. Cela explique le besoin d'utiliser une légende différente au printemps.

Comme prévu, la classe #6 est dominée (53%) par la glace agglomérée (fixe ou radeaux denses), avec un peu de glace thermique. La classe #7 est aussi dominée (59%) par la glace agglomérée (fixe ou radeaux denses), mais avec cette fois, un peu de glace consolidée. Ces pourcentages grimpent à 80% si on élimine les pixels de validation en condition de fonte ou de vent. Les classes #8 et #9 sont bien dominées (67% et 78%) par la glace consolidée, mais toujours avec un peu de glace agglomérée.

Une étude de Jasek et al (2013), a produit une autre validation de la procédure IceMAP-R, sur des images Radarsat-2 de la rivière Peace durant la période d'englacement. Les quatre classes retenues sont : Eau libre, glace thermique, glace juxtaposée et glace consolidée. La précision globale pour les cinq images est présentée au Tableau 9.

Tableau 9 : Précision globale pour des images Radarsat-2 de la rivière Peace de l'englacement 2012.

	14 Nov 2012	15 Nov 2012	18 Nov 2012	28 Nov 2012	22 Dec 2012	Toutes
Précision globale	76%	86%	78%	72%	91%	81%

À partir de ces différents travaux d'évaluation de la précision de la procédure IceMAP-R, nous voyons que le niveau de précision global se maintient généralement entre 75% et 85%. Au niveau plus spécifique, les classes d'eau et de glace consolidée sont habituellement bien classées à 85% et plus, alors que les classes de glace thermique et de glace agglomérée ou juxtaposée présentent des taux de confusion plus élevés avec leurs voisines. La discrimination des classes devient aussi plus difficile en présence de radeaux de frasil, de neige humide ou de vent sur l'eau.

#### **4.6 Sommaire des forces et faiblesses de l'algorithme IceMAP-R<sup>©</sup>**

Les forces de l'algorithme sont :

- Résultats stables pour différents capteurs radar (bande C-HH);
- Résultats stables pour différentes résolutions spatiales (30m, 8m et 3m); seulement limité par la taille des éléments observés (radeau de glace, chenal ouvert, etc.);
- Par l'usage de la texture, la procédure utilisée est estimée peu sensible aux paramètres d'angle d'incidence et d'orientation de l'image, ce qui permet une plus grande disponibilité d'images sur un site;
- Résultats stables pour différents types et différentes tailles de rivières;
- Légende logique et intuitive;
- Algorithme rapide et automatisé.

Limitations ou améliorations à apporter :

- IceMAP-R n'utilise que la polarisation simple HH. En mode fin ou standard, il est possible d'acquérir une image radar en polarisation double (ex : HH-HV). Il faut toutefois établir la façon optimale d'utiliser cette double polarisation dans l'algorithme. L'INRS travaille sur ce point.
- L'algorithme est dépendant du placement initial du centroïde dans l'étape de classification non-supervisée. Cela peut entraîner un glissement des classes, qui peut toutefois être corrigé par l'utilisateur. Il est possible de mieux encadrer le placement initial des centroïdes, mais il faut évaluer l'efficacité de telles actions.
- La précision globale recherchée est de 90% pour les classes principales. La précision globale varie de 75% à 85%. Différentes modifications, dont certaines ont déjà été discutées, peuvent être apportées pour améliorer la précision actuelle.

Particulièrement, des moyens doivent être étudiés pour résoudre les problématiques suivantes :

- Problème de discrimination entre l'eau et la glace thermique (noire) lisse. On surestime alors la présence d'eau.
- Une certaine confusion entre la glace de frasil agglomérée et la glace consolidée.
- Fausse classification de glace en présence de vent ou de rapides.
- Effet de la taille et de la concentration des radeaux de frasil flottants encore mal pris en compte.
- Effet de la neige/glace humide encore mal pris en compte.

Les moyens utilisés pourraient inclure de nouveaux intrants (ex : polarisations multiples, paramètres polarimétriques, bande X, autres paramètres de texture), ou de nouveaux traitements (ex : autre algorithme de classification).

- Dépendance de l'algorithme à un logiciel commercial.

## 5. Jeu de données de validation

Un jeu de données de validation est fourni ici afin de permettre d'évaluer l'efficacité des modifications qui pourraient être faites à la procédure originale. Selon le mandat, les données de référence devaient être concurrentes à des acquisitions Radarsat-2 utilisées pour générer la classification. Ces données doivent permettre d'identifier les types de glace et leur position dans l'espace. Le jeu de données doit inclure quatre sites distincts avec des conditions de glaces de l'englacement jusqu'à la fonte. L'imagerie utilisée doit inclure une variété d'angles d'incidence et plusieurs modes d'acquisition. Le Tableau 10 identifie d'abord les quatre rivières considérées.

Les images correspondantes à ce jeu de données sont présentées au Tableau 11. Les caractéristiques des images et les conditions du couvert de glace au moment de l'acquisition sont présentées au Tableau 12. Il est à noter que contrairement aux autres rivières du jeu de données, la validation de l'image de la rivière Peace est basée non pas sur des photos, mais sur l'interprétation de spécialistes locaux (voir Jasek et al, 2013).

Tableau 10 : Description des rivières du jeu de données de validation.

Rivière	Rivière Koksoak, Nunavik, Québec	Rivière Des Prairies, Québec	Rivière Chaudière, Québec
Localisation	58°00N, 68°45W	45°35N, 73°40W	46°30N, 71°10W
Écoulement	Du sud au nord vers la baie d'Ungava	Du sud-ouest au nord-est vers le fleuve St-Laurent	Du sud au nord, vers le fleuve St-Laurent
Longueur	130km	45km	185km
Largeur du chenal	300m – 3 km	300m – 700 m	100-300m
Saison de glace	Novembre-Juin	Décembre-Mars	Décembre-Avril
Type de glace prédominant	Agglomérée et consolidée	Thermique et agglomérée	Thermique et agglomérée
Marées	Oui	Non	Non
Rivière	Rivière Peace, Alberta		
Localisation	58°22N, 115°07W		
Écoulement	Du sud-ouest au nord-est vers le Grand lac des esclaves		
Longueur	1923km		
Largeur du chenal	300-500m		
Saison de glace	Décembre-Avril		
Type de glace prédominant	« Skim ice », Agglomérée et consolidée		
Marées	Non		

Tableau 11 : Liste des images du jeu de données.

<b>Rivière Chaudière</b>
Images Radarsat-2 correspondantes :
RS2_OK36149_PK350134_DK310226_F3_20121215_104858_HH_HV
RS2_OK10627_PK121420_DK117749_F23_20100302_223009_HH
<b>Rivière des Prairies</b>
Image Radarsat-2 correspondante :
RS2_OK17951_PK188926_DK178781_F23_20110204_224246_HH_HV
<b>Rivière Koksoak</b>
Images Radarsat-2 correspondantes :
RS2_OK8102_PK96526_DK95049_U18_20091113_104518_HH
RS2_OK5658_PK73361_DK71104_U1_20090525_110150_HH
<b>Rivière Peace</b>
Image Radarsat-2 correspondante :
RS2_OK46952_PK449879_DK401349_FQ17W_20131208_012151_HH_VV_HV_VH

Tableau 12 : Caractéristiques des images du jeu de données et état du couvert de glace.

<b>Rivière</b>	<b>Date image</b>	<b>Date observations</b>	<b>Conditions</b>	<b>Mode</b>	<b>Angles</b>
Chaudière	15 décembre 2012	15 décembre 2012 Photos au sol	Englacement/Gel	Fin	42-44°
Chaudière	2 mars 2010	3 mars 2010 Photos au sol	Fonte	Fin	30-33°
Des Prairies	4 février 2011	3 février 2011 Survol aérien	Englacement/Gel	Fin	30-33°
Koksoak	13 novembre 2009	13 novembre 2009 Survol aérien	Début englacement	Ultra-Fin	43-44°
Koksoak	25 mai 2009	24 mai 2009 Survol aérien	Début fonte	Ultra-Fin	30-31°
Peace	8 décembre 2013	Connaissances locales	Englacement/Gel	Quad Fine Wide	36-38°

Dans ce jeu de données, chaque répertoire comprend :

- Le vecteur de la rivière;
- Un shapefile des sites de validation (la définition des sites se trouve dans la table d'attributs);
- Les photos ayant servies à la définition des sites de validation;
- La localisation GPS de la caméra au moment de la prise de chaque photo;
- La carte de glace produite à partir de la procédure IceMAP-R<sup>®</sup> livrée;
- La matrice de confusion associée.

La Figure 7 montre un exemple de sites de validation (polygones bleus) déterminés à partir d'un survol aérien (points verts).

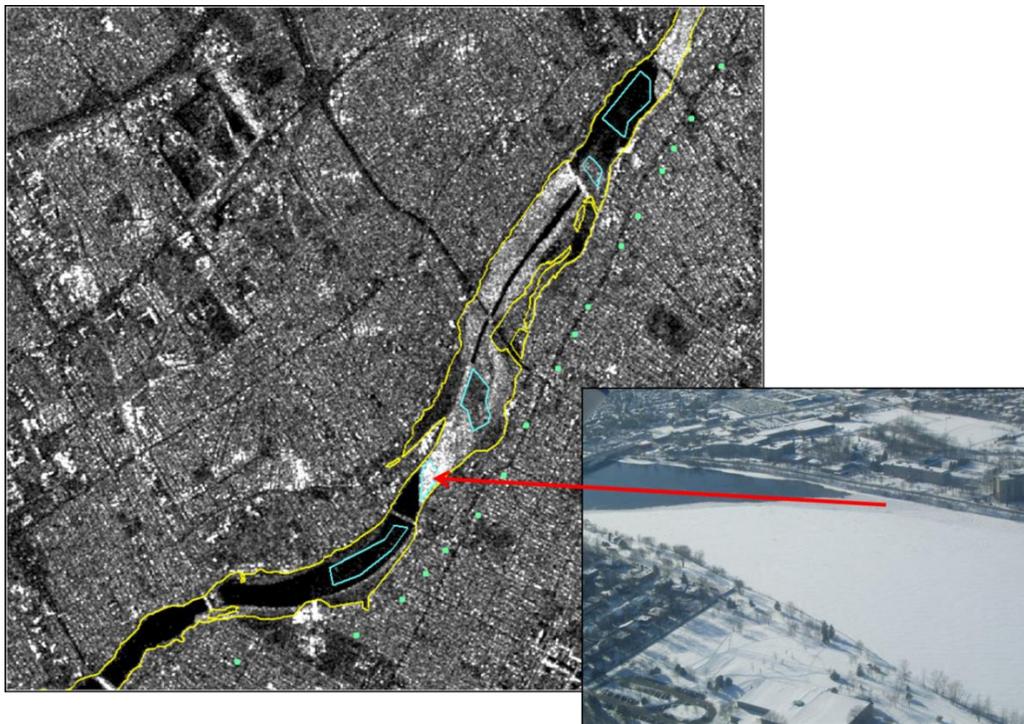


Figure 7 : Exemple de sites de validation sur la rivière des Prairies.

Le Tableau 13 montre le nombre de sites de validation par classe de couvert de glace, pour chaque image du jeu de données.

Tableau 13 : Nombre de sites de validation par classe de couvert de glace

		Légende pour période de gel					Légende pour période de fonte					Somme
		Eau libre	Eaux et radeaux de frazil	Glace noire (thermique)	Glace blanche (frazil aggloméré)	Glace consolidée (blocs et amoncellements)	Eau libre	Chenal ouvert et eau sur glace	Glace noire en dégradation	Glace blanche en dégradation	Glace consolidée en dégradation (blocs et amoncellements)	
Rivière	Date											
Chaudière	2012-12-15	9	1	10	4	6	0	0	0	0	30	
Chaudière	2010-03-02	0	0	0	0	0	1	0	1	0	5	
Koksoak	2009-11-13	4	1	0	7	0	0	0	0	0	12	
Koksoak	2009-05-25	0	0	0	0	0	1	0	4	3	8	
Peace	2013-12-08	4	0	15	14	2	0	0	0	0	35	
Des-prairies	2011-02-03	4	4	2	5	2	0	0	1	0	18	
	<b>Somme</b>	21	6	27	30	10	2	0	6	3	108	

## Références

- Drouin, H., Gauthier, Y., Bernier, M., Jasek, M., Penner, O. and F. Weber (2007). Quantitative validation of RADARSAT-1 river ice maps: Proceedings of the 14th Workshop of the Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE), Quebec City, June 19-22, 2007, CD-ROM.
- Duguay, C. and collaborators (2013). STSE North Hydrology: Final Report. ESA ESRIN, Contract No. 4000101296/10/I---LG. ISSUE/REVISION:2.0/01.  
<http://www.futureearth.org/projects/news/science-feature-esa-clic-north-hydrology-final-report>
- Duguay et al, 2012b. STSE North Hydrology: Algorithm Theoretical Basis Document V1. North Hydrology Team, 2012.
- Gauthier, Y, Tremblay, M., Bernier, M. and C. Furgal (2010). Adaptation of a Radar-Based River ice Mapping Technology to the Nunavik Context. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol 36, supl.1.
- Gauthier Y, Paquet L-M, Gonzalez, A. and M Bernier (2008). Using Radar Images and GIS to Support Ice-Related Flood Forecasting. GEOMATICA, 62(2): 139-150.
- Gauthier Y, Weber, F., Savary, S., Jasek, M., Paquet, L.-M. & M Bernier, 2006. A combined classification scheme to characterise river ice from SAR data. EARSeL eProceedings, 5(1): 77-88
- Gauthier, Y., A.L., Battay, M. Bernier, T. .M. J. Ouarda, 2003. An Approach Using Contextual Analysis to Monitor River ice from RADARSAT data. In: Proceedings of the 60th Eastern Snow Conference, Sherbrooke, Canada, pp. 151-158.
- Gherboudj, I., M. Bernier, and R. Leconte (2010). A backscatter modelling for river ice cover: Analysis and numerical results, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, N. 4, 1788-1798.
- Gherboudj, I., Bernier, M., Hicks, F., Leconte, R. (2007). Physical characterization of air inclusions in river ice. Cold Regions Science and Technology, 49(3) : 179-194.
- Haralick, Robert M., Shanmugam, K., Dinstein, Its'Hak. 1973. Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.3, no.6, pp.610-621.
- Mermoz, S., Allain, S. Bernier, M. Pottier, E. Gherboudj, I., (2009a). Classification of river ice using polarimetric SAR data. Canadian Journal of Remote Sensing. Volume 35, Number 5, October 2009, pages 460-473
- Mermoz, S., Dribault, Y., Bernier, M. Allain, S. Pottier, E. Gauthier, Y (2009B). Investigation of RADARSAT-2 and TERRASAR-X data for river ice characterization from remote sensing. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE) 15th workshop on river ice, June 15 – 17, St. John's, Newfoundland and Labrador, 12 pages.
- Mermoz, S. Allain, S, Bernier, M. Pottier, E. 2008. River ice mapping with PolSAR images, IGARS08, Boston, 6-11 July. CD-ROM.

## Annexe 1

Tableau 14 : Structure des fichiers livrés

icemapr.py	Module contenant la fonction <i>icemapr</i>
LICENSE	Fichier de licence
/docs	Répertoire de documentation
/doc/ICEMAPR.htm	Fichier d'aide de la fonction
/sample	Répertoire d'exemple de données
/sample/radar_HH.pix	Extrait d'une image radar en polarisation HH (pour tester le fonctionnement de l'algorithme seulement) <i>RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. (2012) – All Rights Reserved. RADARSAT is an official trademark of the Canadian Space Agency.</i>
/sample/legend.pix	Fichier contenant la légende pour la carte de glace
/sample/river_mask.shp	Masque de la rivière pour l'extrait d'image ci-inclus
/Validation_Dataset	Répertoire du jeu de données de référence
/Nomdelarivière	Répertoire des données propres à chaque rivière
/Sites de validation	Contient le shapefile des polygones des sites de validation
/Photos au sol ou /Survol photo	Contient les photos de validation et leur positionnement
/Vecteur rivière	Contient le vecteur de la rivière
/Carte de glace	Contient la carte de glace en format .tif et la matrice de confusion