RAPPORT FINAL

AMÉLIORATIONS POTENTIELLES ET VALIDATION DES PRODUITS DE CARTOGRAPHIE RADAR DE LA GLACE DE RIVIÈRE ET DES ZONES INONDÉES

Présenté à :

Direction de la sécurité civile
Ministère de la Sécurité publique du Québec

Préparé par :

Monique Bernier, Yves Gauthier et Jimmy Poulin

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

Rapport de recherche R-1425

31 mars 2013

Pour de plus amples renseignements contacter :

Yves Gauthier (Yves.Gauthier@ete.inrs.ca) au 418-654-3753

© INRS-ETE

ISBN : 978-2-89146-810-7

Table des matières

1 Introduction 1

2 Validation de l'algorithme ICEMAP-R 3

2.1 Conditions climatiques et état de la glace 3

2.1.1 15 décembre 2012 3

2.1.2 13 mars 2013 4

2.2 Méthodologie de validation 5

2.3 Résultats de validation 12

2.3.1 En conditions d'englacement 12

2.3.2 En conditions de fonte 16

3 Validation de l'algorithme-R (4.0 Version Bêta) 24

3.1 En conditions d'englacement 24

3.2 En conditions de fonte 25

4 Essai pilote des indicateurs de changement 26

4.1 Présentation des outils 26

4.1.1 Le profileur 26

4.1.2 Le détecteur 27

4.2 Application sur les rivières Chaudière et Mistassini 29

4.2.1 Profil en long de la concentration 29

4.2.2 Détecteurs de changements 35

4.2.3 Sommaire 36

5 Projet de procédure automatique de réajustement de la carte de glace 40

5.1 Méthodologie proposée 40

6 Conclusion 43

7 Références 44

ANNEXE 1 46

Table des figures

Figure 1 : Températures du 1er au 15 décembre 2012 mesurées à la station de Beauceville. 4

Figure 2 : Températures du 1er au 13 mars 2013 mesurées à la station de Beauceville. 5

Figure 3: Exemple de sites de validation (polygones vert) et de localisations du photographe (points jaunes) sur une image RADARSAT-2. 7

Figure 4 : Eau libre (classes 1 et 2) et glace thermique le long des rives (classes 3 et 4). 7

Figure 5 : Couvert de glace thermique (classes 3 et 4). 8

Figure 6 : Couvert d'apparence plus rugueuse. Présence probable de glace agglomérée (classes 5 et 6). Ici la neige masque en partie l'information. Aucun exemple clair de glace agglomérée n'a été rencontré lors de cette visite. 8

Figure 7 : Glace légèrement à moyennement consolidée (classes 7 et 8). 9

Figure 8 : Eau libre avec rugosité de surface due au vent. 9

Figure 9 : Glace intacte (lisse) avec couvert de neige humide et mares de fonte. 10

Figure 10 : Couvert hétérogène en forte détérioration. Mélange de plaques de glace lisse, de blocs de glace, de neige humide, de mares de fonte et d'eau libre. 10

Figure 11 : Glace fortement consolidée avec neige humide. 11

Figure 12 : Carte de glace ICEMAP-R du 15 décembre 2012 vs identification sur photo des conditions de glace (3 classes de glace + eau libre). 15

Figure 13 : Validation de la carte de glace ICEMAP-R du 13 mars 2013 à l'aide de l'identification des conditions de glace (3 classes) sur des photographies prises au sol. 19

Figure 14 : Concentration de glace le long de la rivière Chaudière le 8 mars 2012. 30

Figure 15 : Variation de la concentration de glace en aval de Sainte-Marie au printemps 2012. 31

Figure 16 : Différence de concentration entre le 18 et le 8 mars 2012. 31

Figure 17 : Profil de la concentration pour le 16 janvier et le 23 février 2012. 32

Figure 18 Profil de la concentration pour le 23 février et le 19 mars 2012..... 33

Figure 19 : Profil de la concentration pour le 19 mars et le 29 mars 2012. 33

Figure 20 : Profil de la concentration pour le 29 mars et le 5 avril 2012. 34

Figure 21 : Profil de la concentration pour le 5 avril et 12 avril 2012. 34

Figure 22 : Représentation cartographique du détecteur de changement CDI1 35

Figure 23 : Représentation cartographique du détecteur de changement CDI2 37

Figure 24 : Représentation graphique du détecteur de changement CDI1 et des profils de concentration dans le secteur de Beauceville. 37

Figure 25 : Représentation cartographique dudétecteur de changement CDI2 38

Figure 26 : Représentation graphique du détecteur de changement CDI2 et 38

Figure 27 : Représentation graphique du détecteur de changement CDI2 et 39

1 INTRODUCTION

Au début de l'année 2009, le laboratoire de télédétection de l'INRS, Centre Eau Terre Environnement, a effectué le transfert technologique de son algorithme ICEMAP au Ministère de la Sécurité Civile du Québec (Gauthier et Bernier, 2009, Gauthier et al, 2010). Cet algorithme permet la cartographie du couvert de glace à partir d'images du satellite RADARSAT-2. Cette technologie étant en constante évolution, des activités de validation doivent être effectuées sous plusieurs conditions de couvert de glace afin d'établir la fiabilité du produit. Une évaluation de la version ICEMAP-R 3.0 (celle dont dispose le MSP) a été réalisée en 2012 (Gauthier et al, 2012). De plus, dans le cadre du présent contrat, deux activités de validation-terrain ont été réalisées lors de l'acquisition des images RADARSAT-2 du 15 décembre 2012 et du 13 mars 2013. Lors de la journée du 15 décembre, un représentant de l'INRS (Yves Gauthier) et du MSP (Serge Légaré) ont effectué une tournée d'observation de la rivière Chaudière dans le secteur Sainte-Marie – Saint-Joseph. Pour la journée du 13 mars, la tournée a été réalisée par divers représentant du MSP et s'est étirée de Lévis, secteur de Breakeyville, jusqu'à Beauceville. La seconde section de ce rapport établi le niveau d'adéquation entre les cartes RADARSAT-2 (polarisation HH) produites par ICEMAP-R et l'information recueillie sur le terrain ainsi que les limites de l'algorithme ICEMAP dans ces conditions spécifiques.

Dans le cadre de ses activités de développement, l'INRS travaille aussi à une version modifiée de l'algorithme ICEMAP afin d'inclure l'information des polarisations HV et VV pour une meilleure cartographie du couvert de glace. Le présent contrat prévoyait aussi l'essai de la version bêta (ICEMAP-R 4.0 bêta) sur les images de la rivière Chaudière. Toutefois, il s'agit d'une version bêta modifiée pour n'utiliser que HH et HV, qui sont les deux seules polarisations disponibles sur les images fournies par la Sécurité Publique. Par contre, comme les images RADARSAT-2 en mode fin ont un niveau de bruit assez élevé et que le signal dépolarisé (HV) est lui-même assez faible, l'apport de cette polarisation pourrait ne pas être significatif. Les résultats de l'application de l'algorithme ICEMAP-R (4.0 bêta) modifié sont présentés la troisième section de ce rapport.

Trois nouveaux outils de représentation et d'analyse des cartes de glace RADARSAT ont été récemment développés par l'INRS dans le cadre d'un projet de recherche avec l'Agence Spatiale Européenne. L'objectif de ces outils est de fournir à l'opérateur, une information permettant de mieux comprendre la dynamique du couvert de glace sur la rivière et principalement, de

détecter les changements entre deux dates. Tel que prévu au contrat, deux de ces outils ont été appliqués sur des séries d'images de la rivière Chaudière et de la rivière Mistassini. La quatrième section de ce rapport présente les indicateurs et les résultats obtenus.

Un dernier objectif était de concevoir et proposer une une méthodologie afin de mettre à jour automatiquement une carte de glace suite à une validation terrain effectuée par des intervenants en sécurité civile. Elle est présentée à la section 5.

Ce rapport se termine par les principales conclusions des activités de recherche faites en 2012-2013 et les recommandations pour de futures activités liées à ICEMAP-R .

En parallèle, la problématique de cartographie des inondations en zones urbanisées, en présence de forte végétation ou sous couvert de neige a été abordée en 2012-2013. Un rapport offrant quelques pistes de solution a été soumis en 2012 (Tanguy, 2012). L'étude est effectuée par une étudiante au doctorat et se poursuivra en 2013-2014 dans le cadre du projet « Développement et application d'un outil de gestion et d'analyse du risque d'inondation (GARI) sur le système transfrontalier du Lac Champlain – Rivière Richelieu » financé principalement dans le cadre du Programme canadien de sûreté et de sécurité (PCSS) administré par le Centre des sciences pour la sécurité (CSS) de Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC). Les principaux partenaires sont le Ministère de la Sécurité Publique, la Commission Géologique du Canada et la Ville de St-Jean-sur-le-Richelieu.

2 VALIDATION DE L'ALGORITHME ICEMAP-R

2.1 Conditions climatiques et état de la glace

Deux images RADARSAT-2 ont été utilisées pour évaluer l'algorithme ICEMAP-R (Tableau 1). La présente section décrit les conditions climatiques et l'état de la glace lors de l'acquisition des images.

Tableau 1 : Images utilisées pour les fins de validation de l'algorithme ICEMAP-R

Date	Heure	Mode	Résolution	Polarisations
15 décembre 2012	5h49	Fin (F3)	8m	HH-HV
13 mars 2013	17h43	Fin (F3F)	8m	HH-HV

2.1.1 15 décembre 2012

À la station météo de Beauceville, laquelle est la plus près du secteur observé, entre le 1er décembre et le 15 décembre 2012, la température a oscillé entre -23°C et 9°C (Figure 1). Après une période de froid à la fin de novembre où les températures moyennes journalières sont descendues à -15°C, un réchauffement a eu lieu à la première semaine de décembre avec des températures moyennes autour de 3-4°C. Par la suite, pour la semaine précédant l'acquisition de l'image, le temps s'est refroidi avec des températures moyennes entre -2°C et -7°C. Durant ces deux premières semaines de décembre, 15 mm de précipitations sont tombés le 10 décembre et 1 mm le 13 décembre, dans les deux cas vraisemblablement sous forme de neige. La température au moment de l'acquisition de l'image était de près de -15°C. Au moment de l'activité de validation, la température variait de -11°C à -9°C. Les probabilités de la présence de neige humide lors de l'acquisition sont donc pratiquement nulles, ce qui est confirmé par la visite sur le terrain.

Le couvert de glace est donc en progression. Plusieurs chenaux ou tronçons d'eau libre sont encore présents, entrecoupés de glace thermique (lisse) ou de frasil aggloméré (légèrement rugueux). Plus on se déplace vers l'amont (St-Joseph), plus la glace est de type consolidée (amas de morceaux hétérogènes).

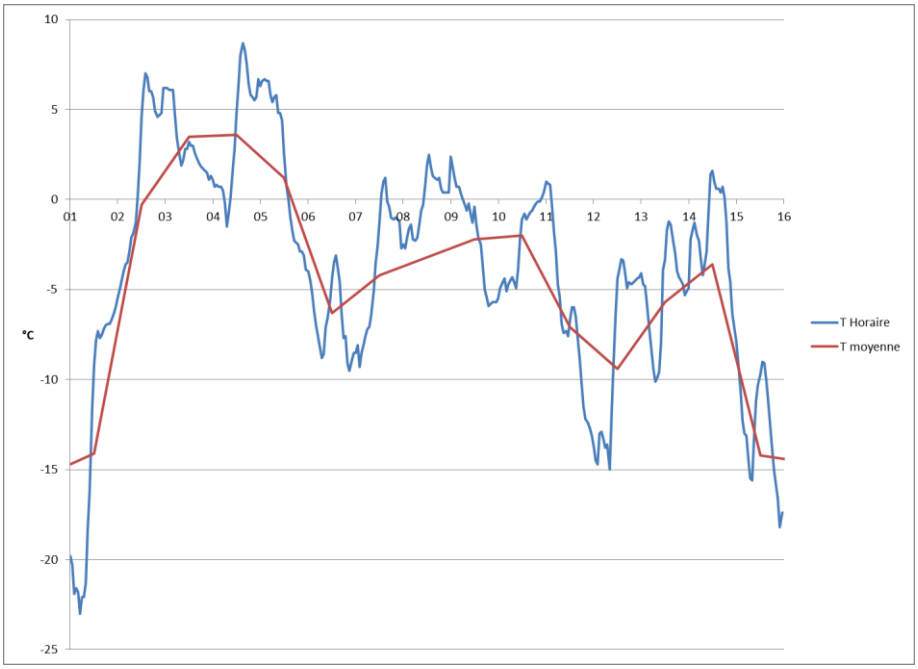

Figure 1 : Températures du 1er au 15 décembre 2012 mesurées à la station de Beauceville.

2.1.2 13 mars 2013

Pour les deux premières semaines de mars, la température a oscillée entre -9,4°C et 13,4 °C à la station de Beauceville (Figure 2). L'accroissement de la température s'est davantage manifesté à la deuxième semaine avec des températures moyennes de 6.5°C, 4.6°C et 1.4°C pour les trois journées précédant l'acquisition de l'image. L'élément marquant de cette période est la précipitation de l'ordre de 30 à 40mm de pluie pour la journée du 12 mars (valeur inconnue pour Beauceville, estimation à partir des stations de Thetford Mines et Québec). La température n'est pas redescendue sous zéro suite à ces précipitations de sorte que les probabilités de présence de neige humide et d'eau sur la glace sont très fortes au moment de l'acquisition de l'image RADARSAT-2.

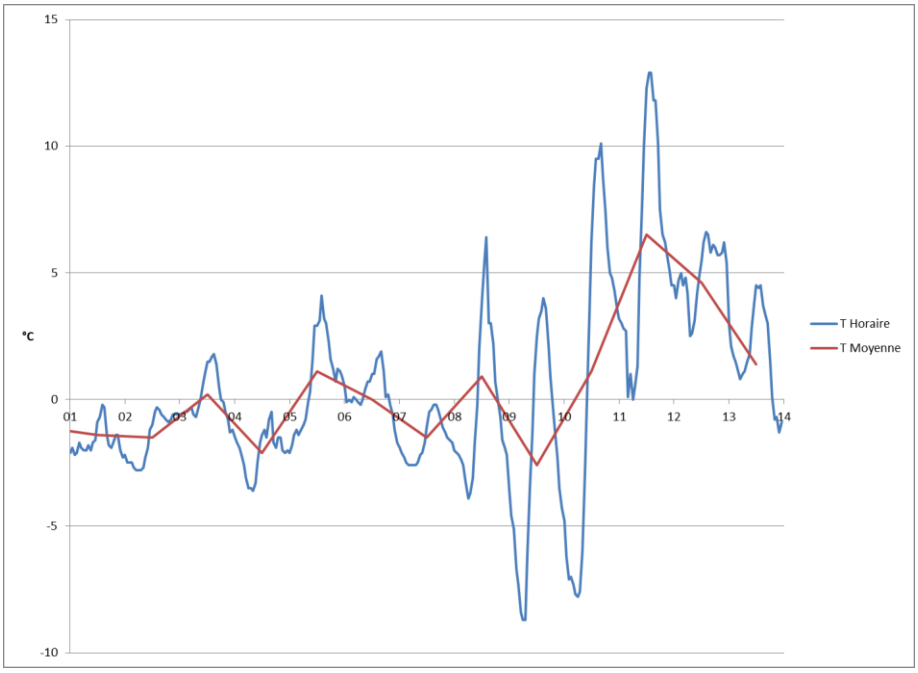

Figure 2 : Températures du 1er au 13 mars 2013 mesurées à la station de Beauceville.

Les conditions attendues et confirmées sont donc un couvert de glace en détérioration composé de glace pourrie (en place, en déplacement ou consolidée) accompagnée de mares de fonte. De la neige humide peut recouvrir en partie le tout.

2.2 Méthodologie de validation

Elle se résume en cinq principales étapes :

a) Chaque site d'observation a été photographié afin de capturer les éléments d'intérêts visibles à partir du site en question (vue amont, perpendiculaire et aval).

b) Les photos géolocalisées (position du photographe) ont été ajoutées à un logiciel SIG, avec l'image RADARSAT-2 et la carte de glace.

c) Chaque photographie a été visualisée et les conditions de glace y ont été identifiées selon les catégories suivantes, illustrées par les figures 4 à 11 :

<u>Période d'englacement</u>

- Eau libre (Figure 4)
- Glace lisse et probablement d'origine thermique (habituellement noire et contenant peu de bulles d'air) (Figure 4 et 5).

- Glace de frasil aggloméré (glace blanche) résultant de l'immobilisation et du gel de radeaux de frasil ou de slush. Apparence légèrement rugueuse et contenu élevé en bulles d'air (Figure 6)
- Glace consolidée. Elle résulte de l'entassement de morceaux de glace de diverses natures formes et grosseurs (Figure 7).

Période de fonte

- Eau libre (Figure 8)
- Couvert de glace intact avec neige humide et mares de fonte (Figure 9)
- Couvert de glace hétérogène en forte détérioration. Mélange de plaques de glace lisse, de glace consolidée, de neige humide, de mares de fonte et d'eau libre (Figure 10).
- Couvert de glace consolidé avec neige humide et mares de fonte (Figure 11).

L'interprétation des photos est qualitative et basée sur l'expérience des observateurs. Un couvert de neige peut masquer l'information relative à la glace.

d) Les zones identifiées sur les photos sont tracées manuellement sur la carte de glace, en s'aidant aussi de l'image RS-2. Ce sont les sites de validation. La localisation de ces sites demeure approximative (Figure 3).

e) Finalement, chaque site de validation est comparé avec la carte de glace à l'aide d'une matrice de confusion afin d'évaluer la qualité du résultat de l'algorithme, en quantifiant les pixels assignés à la bonne ou mauvaise classe.

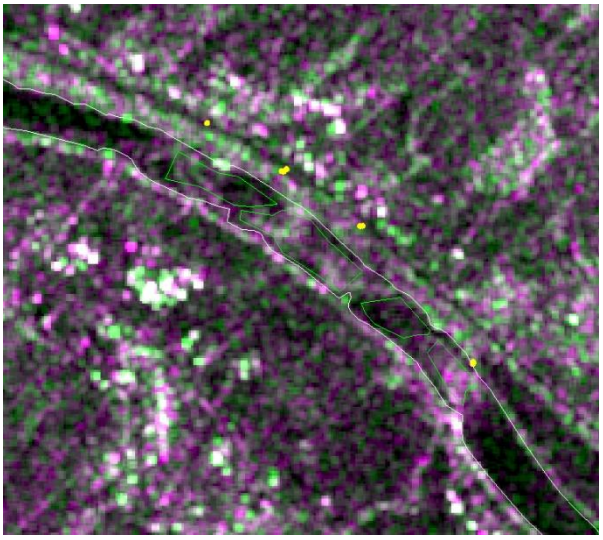

Figure 3: Exemple de sites de validation (polygones vert) et de localisations du photographe (points jaunes) sur une image RADARSAT-2.

Figure 4 : Eau libre (classes 1 et 2) et glace thermique le long des rives (classes 3 et 4).

Figure 5 : Couvert de glace thermique (classes 3 et 4).

Figure 6 : Couvert d'apparence plus rugueuse. Présence probable de glace agglomérée (classes 5 et 6). Ici la neige masque en partie l'information. Aucun exemple clair de glace agglomérée n'a été rencontré lors de cette visite.

Figure 7 : Glace légèrement à moyennement consolidée (classes 7 et 8).

Figure 8 : Eau libre avec rugosité de surface due au vent.

Figure 9 : Glace intacte (lisse) avec couvert de neige humide et mares de fonte.

Figure 10 : Couvert hétérogène en forte détérioration. Mélange de plaques de glace lisse, de blocs de glace, de neige humide, de mares de fonte et d'eau libre.

Figure 11 : Glace fortement consolidée avec neige humide.

2.3 Résultats de validation

2.3.1 En conditions d'englacement

Le Tableau 2 donne la nomenclature des 9 classes de glace de ICEMAP-R en période hivernale.

Tableau 2: Classes de glace ICEMAP-R en période hivernale.

Regroupement des classes selon la légende d'hiver	Types de glace
1-2	Eau libre
3	Eau et radeaux de frasil
4-5	Glace thermique
6-7	Glace de frasil aggloméré
8-9	Glace consolidée

Le Tableau 3 présente la matrice de confusion (erreurs d'omission) obtenue avec l'algorithme ICEMAP-R et les sites de validation de l'image du 15 décembre 2012. Elle se lit verticalement (par colonne).

Tableau 3: Matrice de confusion du 15 décembre 2012 pour ICEMAP-R (erreurs d'omission).

Classe avec ICEMAP-R	**Eau libre**	**Glace thermique**	**Glace de frasil aggloméré**	**Glace consolidée**
1	**47%**	0%	0%	0%
2	**47%**	**22%**	0%	0%
3	6%	**54%**	1%	0%
4	0%	**20%**	**27%**	0%
5	0%	4%	**56%**	2%
6	0%	0%	**16%**	**26%**
7	0%	0%	0%	**55%**
8	0%	0%	0%	**16%**
9	0%	0%	0%	1%
Total	100%	100%	100%	100%

On constate donc que :

- 94% des pixels des sites de validation « eau libre » ont été bien identifiés par les classes #1 et #2
- 74% des pixels des sites de validation « glace thermique » ont été bien identifiés par les classes #3 et #4
- 56% des pixels des sites de validation « glace agglomérée » ont été bien identifiés dans la classe #5

- 98% des pixels des sites de validation « glace consolidée » ont été bien identifiés dans les classes #6 à #9.

Pour les classes centrales, 26% et 44% de pixels ont été classés incorrectement. On parle d'erreurs d'omission car ce sont des pixels manquants. Par exemple, selon les sites de validation, on aurait dû avoir 4696 pixels classés « glace de thermique ». Il en manque 1205 (26%), qui ont été classés comme de l'eau ou de la glace de frasil aggloméré. Toutefois, les pixels « incorrectement classés » ne sont pas nécessairement des erreurs. Un site de validation est rarement homogène et il est normal d'y retrouver une part de pixels qui appartiennent effectivement aux classes voisines.

Regardons maintenant la matrice des erreurs de commission (Tableau 4). Elle se lit horizontalement (par ligne).

Tableau 4: Matrice de confusion du 15 décembre 2012 pour ICEMAP-R (erreurs de commission).

Classe avec ICEMAP-R	Eau libre	Glace thermique	Glace de frasil aggloméré	Glace consolidée	Total
1	100%	0%	0%	0%	100%
2	56%	44%	0%	0%	100%
3	7%	93%	1%	0%	100%
4	0%	73%	26%	1%	100%
5	0%	18%	74%	8%	100%
6	0%	0%	17%	83%	100%
7	0%	0%	0%	100%	100%
8	0%	0%	0%	100%	100%
9	0%	0%	0%	100%	100%

On y constate que :

- La classe #1 de la carte de glace contient 100% de pixels « eau », selon les sites de validation.

- La classe #2 de la carte de glace contient 56% de pixels « eau », selon les sites de validation. Donc, si on considère que la classe #2 est de l'eau, on y « commet » ou ajoute des pixels de trop (qui sont en réalité de la glace thermique).

- La classe #3 de la carte de glace contient 93% de pixels « glace thermique », selon les sites de validation.

- La classe #4 de la carte de glace contient 73% de pixels « glace thermique », selon les sites de validation.

- La classe #5 de la carte de glace contient 74% de pixels « glace de frasil aggloméré », selon les sites de validation.

- La classe #6 de la carte de glace contient 83% de pixels « glace consolidée », selon les sites de validation.

- Les classes #7 à #9 contiennent 100% de pixels « glace consolidée », selon les sites de validation.

On obtient au final une précision globale (omission et commission) de **84%** de la classification avec l'algorithme ICEMAP-R, pour les conditions d'englacement du 15 décembre 2012.

On notera toutefois que les regroupements déterminés par la matrice de confusion sont légèrement différents de la légende d'hiver utilisée habituellement (Tableau 5).

Tableau 5: Validation de la légende hivernale.

	Regroupement des classes selon la légende d'hiver	Regroupement des classes selon la matrice de confusion
Eau libre	1-2	1-2
Eau et radeaux de frasil	3	Absent
Glace thermique	4-5	3-4
Glace de frasil aggloméré	6-7	5
Glace consolidée	8-9	6-7-8-9

Pour aller au-delà des chiffres, la Figure 12 permettra d'évaluer visuellement la performance de l'algorithme. On a attribué à la carte de glace, le regroupement issu des matrices de confusion.

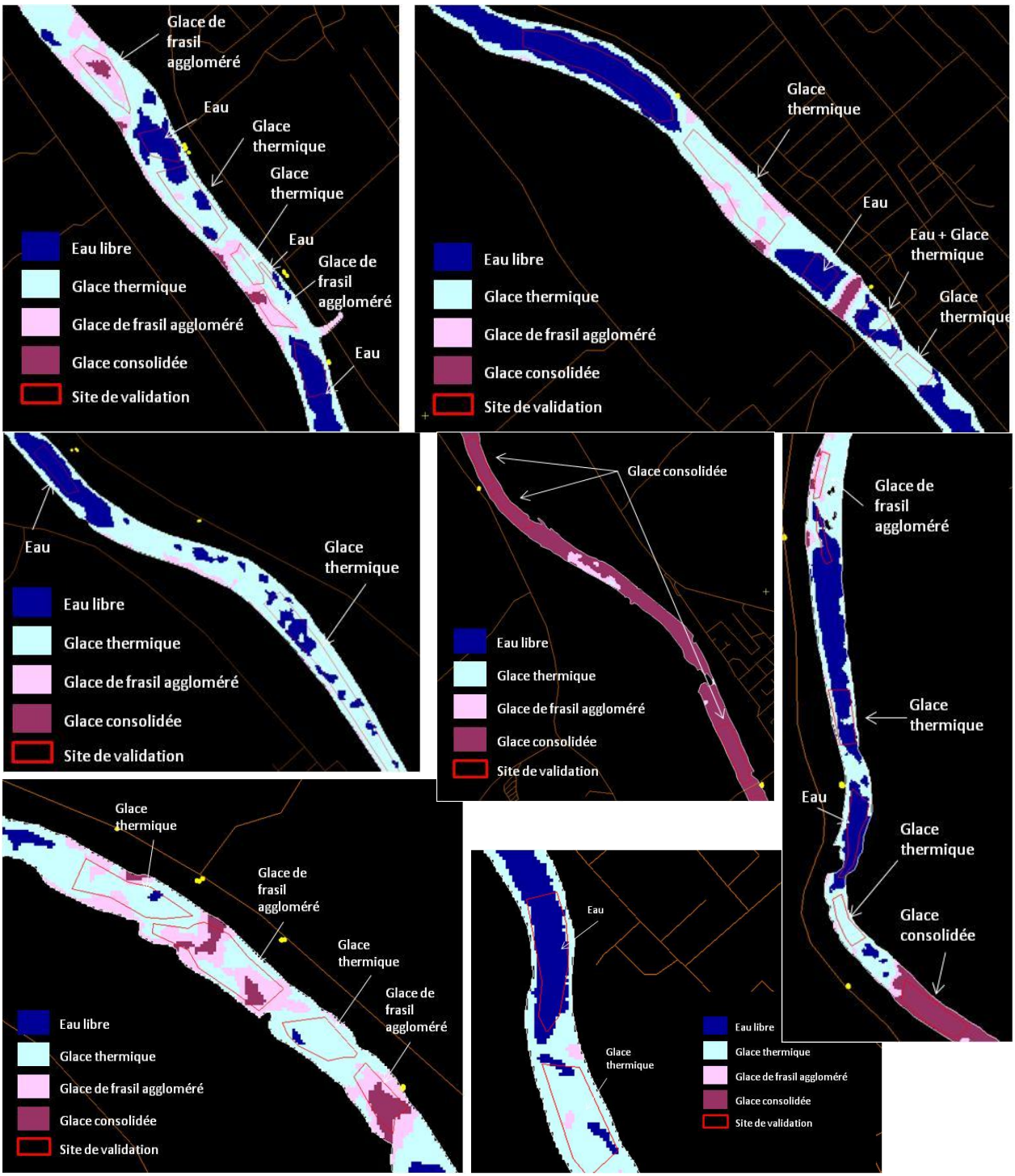

Figure 12 : Carte de glace ICEMAP-R du 15 décembre 2012 vs identification sur photo des conditions de glace (3 classes de glace + eau libre).

Comme on le résume dans le Tableau 6, sur 24 sites de validation, 18 ont été correctement identifiés, 5 partiellement identifiés et 1 mal identifié. Ce qui donne un taux de succès de 85% [(18+5*0.5)*100/24].

Tableau 6: Taux de bonne identification par analyse visuelle (15 décembre 2012).

	Nb de sites de validation	Identification
Eau libre	5	Correcte : 4; Partielle : 1
Glace thermique	10	Correcte : 7; Partielle : 2; Mauvaise : 1
Glace de frasil aggloméré	5	Correcte : 3; Partielle : 2
Glace consolidée	4	Correcte : 4

Tout comme avec les matrices de confusion, on confirme dans la Figure 12 que lors d'identification partielle ou incorrecte, la confusion se fait d'une part, entre l'eau et certaines zones de glace thermique et d'autre part, entre la glace de frasil agglomérée et les classes adjacentes. Par contre, on observe aussi sur la Figure 12, qu'une part significative des pixels jugés « incorrectement classifiés » dans les matrices de confusion peut être simplement liée à la délimitation des sites de validation. Il est en effet extrêmement difficile de tracer un site de validation précis et homogène étant donné la couverture de neige sur la glace.

2.3.2 En conditions de fonte

2.3.2.1 Image du 13 mars 2013

Les sites de validation du 13 mars 2013 montrent une assez grande hétérogénéité du couvert de glace, avec des zones intactes, de la neige humide, des mares de fonte et des blocs de glace. Il sera donc naturel de retrouver un plus grand chevauchement entre les classes. De plus, l'eau libre présente une rugosité de surface due au vent. Elle pourrait donc se confondre avec la glace.

Tableau 7: Classes de glace ICEMAP-R en période de fonte.

Types de glace	Regroupement des classes selon la légende de printemps
Eau libre avec rugosité de surface	1-2
Couvert intact, neige humide et mares de fonte	3-4
Couvert très hétérogène en forte dégradation	5-6-7
Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte	8-9

Le Tableau 8 présente la matrice de confusion (erreurs d'omission) obtenue avec l'algorithme ICEMAP-R et les sites de validation de l'image du 13 mars 2013. Elle se lit verticalement (par colonne).

Tableau 8: Matrice de confusion du 13 mars 2013 pour ICEMAP-R (erreurs d'omission).

Classe avec ICEMAP-R	**Eau libre avec rugosité de surface**	**Couvert intact, neige humide et mares de fonte**	**Couvert très hétérogène en forte dégradation**	**Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte**
1	**36%**	**35%**	0%	0%
2	**27%**	**13%**	**2%**	0%
3	**35%**	**26%**	**16%**	**1%**
4	**2%**	**13%**	**33%**	**22%**
5	0%	**8%**	**32%**	**35%**
6	0%	**5%**	**17%**	**27%**
7	0%	**1%**	0%	**14%**
8	0%	0%	0%	0%
9	0%	0%	0%	0%
Total	100%	100%	100%	100%

Comme anticipé, on constate que :

- Il est impossible de différencier correctement l'eau libre (avec vaguelettes) de la glace intacte recouverte de neige humide et de mares de fonte. Dans le premier cas, le signal rétrodiffusé par les vaguelettes est plus élevé que la normale (pour l'eau) alors que dans le second cas, le signal absorbé par la neige humide provoque une rétrodiffusion encore plus faible (quasi nulle) que normal (pour la glace lisse). D'où la très forte confusion.

- Il est aussi très difficile de discriminer le couvert hétérogène dégradé (qui contient des blocs) et le couvert consolidé plus rugueux. Les deux sont à la fois « rugueux » mais le signal est amorti par la neige humide et les mares d'eau.

- Ainsi, selon la matrice, on n'arriverait à identifier correctement que 25% à 60% environ des pixels des sites de validation.

La matrice des erreurs de commission (Tableau 9) vient donner plus de précision. Elle se lit horizontalement (par ligne).

Tableau 9: Matrice de confusion du 13 mars 2013 pour ICEMAP-R (erreurs de commission).

Classe avec ICEMAP-R	**Eau libre avec rugosité de surface**	**Couvert intact, neige humide et mares de fonte**	**Couvert très hétérogène en forte dégradation**	**Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte**	
1	**22%**	**78%**	0%	0%	100%
2	**35%**	**60%**	**5%**	0%	100%
3	**21%**	**56%**	**22%**	**1%**	100%
4	**1%**	**31%**	**49%**	**19%**	100%
5	0%	**19%**	**49%**	**32%**	100%
6	0%	**18%**	**42%**	**40%**	100%
7	0%	**13%**	0%	**87%**	100%
8	0%	0%	0%	**100%**	100%
9	0%	0%	0%	0%	0%

On y constate que :

- La classe #1 de la carte de glace contient 78% de pixels « Couvert intact », selon les sites de validation. Les classes #2 et #3 contiennent environ 60% de cette même classe. Aucune classe ne représente de l'eau libre de façon dominante.

- Les classes #4 et #5 sont dominées par le couvert hétérogène en dégradation. Mais cette dominance est autour de 50%.

- La classe #6 est ambigüe.

- Enfin, les classes #7 et #8 contiennent respectivement 87% et 100% de pixels de glace consolidée.

- Aucun pixel n'a été classé dans la classe #9. Signe d'une image où la rétrodiffusion est fortement absorbée par la neige/glace humide.

On obtient au final une précision globale (omission et commission) de **57%** ou moins, de la classification avec l'algorithme ICEMAP-R, pour les conditions de fonte du 13 mars 2013.

On notera ainsi que les regroupements déterminés par la matrice de confusion sont différents de la légende de printemps utilisée habituellement (Tableau 10).

Tableau 10: Validation de la légende de printemps.

	Regroupement des classes selon la légende de printemps	Regroupement des classes selon la matrice de confusion de l'image du 13 mars
Eau libre avec rugosité de surface	1-2	1-2-3
Couvert intact, neige humide et mares de fonte	3-4	1-2-3
Couvert très hétérogène en forte dégradation	5-6-7	4-5-6
Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte	8-9	7-8-9

La Figure 13 confirme visuellement la performance de l'algorithme.

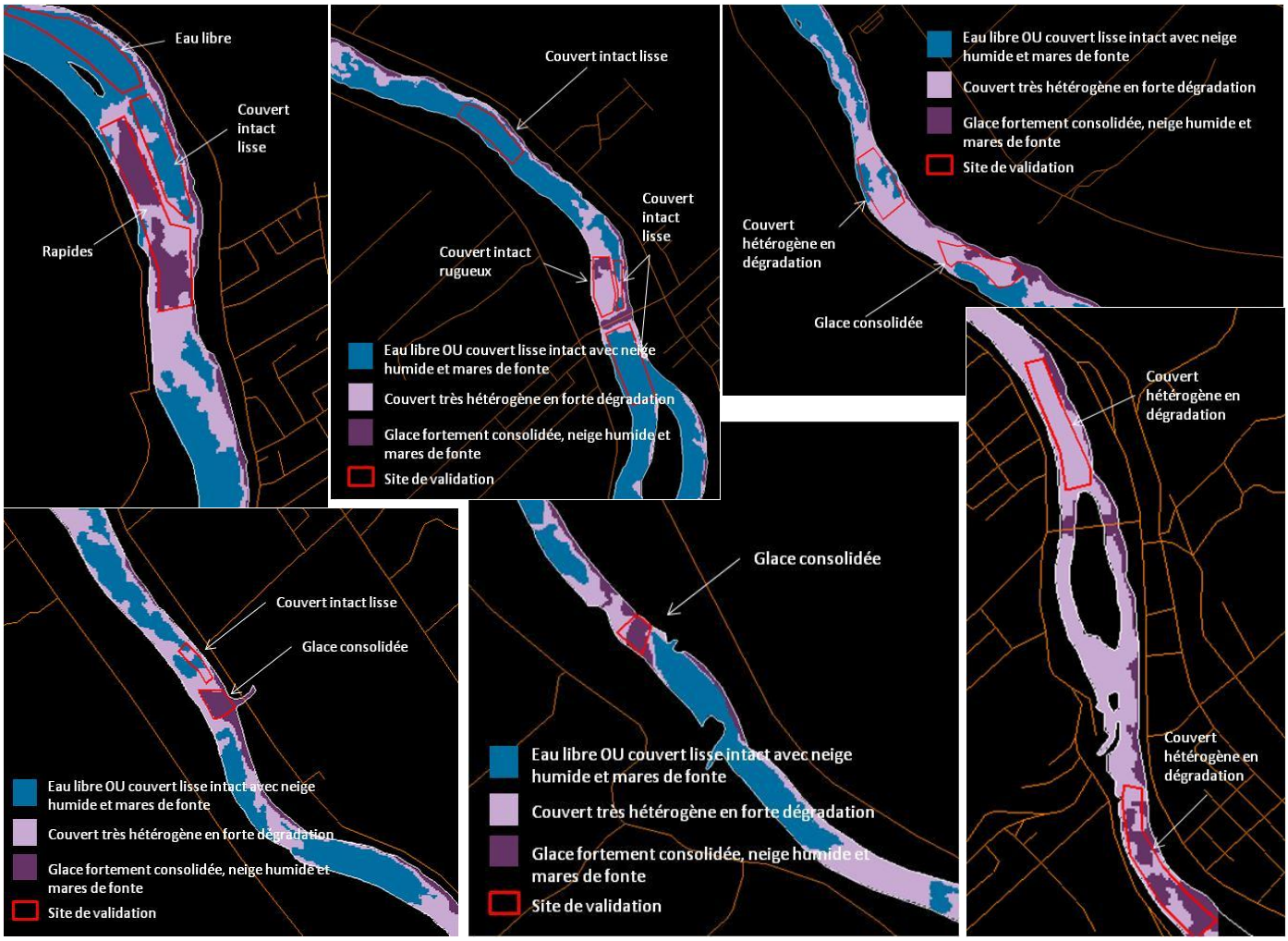

Figure 13 : Validation de la carte de glace ICEMAP-R du 13 mars 2013 à l'aide de l'identification des conditions de glace (3 classes) sur des photographies prises au sol.

Comme on le résume au Tableau 11, sur 14 sites de validation, 8 ont été correctement identifiés, 3 partiellement identifiés et 3 mal identifiés. Ce qui donne un taux de succès de 68% [(8+3*0.5)*100/14]. Tout comme avec les matrices de confusion, on confirme par la Figure 13 que l'eau n'est pas discriminable de la glace intacte et lisse recouverte de neige très humide, toujours en raison de la rugosité due au vent ou aux rapides. Par contre, la discrimination entre glace intacte et glace en détérioration est assez bonne.

Tableau 11: Taux de bonne identification par analyse visuelle (13 mars 2013).

	Nb de sites de validation	Identification
Eau libre avec rugosité de surface	2	Mauvaise : 2
Couvert intact, neige humide et mares de fonte	6	Correcte : 4; Partielle : 1; Mauvaise : 1
Couvert très hétérogène en forte dégradation	3	Correcte : 2; Partielle : 1
Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte	3	Correcte : 2; Partielle : 1

2.3.2.2 Retour sur l'image du 2 mars 2010

Comme on a pu le constater, sous les conditions particulières du 13 mars 2013, l'algorithme ICEMAP-R ne performe pas au niveau requis. Toutefois, nous avons voulu refaire les calculs sur l'image de la Chaudière du 2 mars 2010 (rapport R1167), qui présentait des conditions de glace similaires au 13 mars 2013, mais avec des conditions de vent moins problématiques. Nous serons alors en mesure de mieux évaluer la performance réelle de l'algorithme en période de fonte.

Le Tableau 12 présente la matrice de confusion (erreurs d'omission) obtenue avec l'algorithme ICEMAP-R et les sites de validation de l'image du 2 mars 2010. Elle se lit verticalement (par colonne).

On constate que :

- 82% des pixels des sites de validation « eau libre » ont été bien identifiés par les classes #1 et #2
- 89% des pixels des sites de validation « Couvert intact » ont été bien identifiés par les classes #3 à #5

- 40% des pixels des sites de validation « Couvert hétérogène » ont été bien identifiés dans la classe #6. Ce chiffre est normal considérant qu'un couvert hétérogène est par définition, composé de différents types de glace et d'eau.
- 89% des pixels des sites de validation « glace consolidée » ont été bien identifiés dans les classes #7 à #9.

Tableau 12 : Matrice de confusion du 2 mars 2010 pour ICEMAP-R (erreurs d'omission).

Classe avec ICEMAP-R	**Eau libre avec rugosité de surface**	**Couvert intact, neige humide et mares de fonte**	**Couvert très hétérogène en forte dégradation**	**Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte**
1	**51%**	0%	0%	0%
2	**31%**	**1%**	0%	0%
3	**14%**	**14%**	0%	0%
4	0%	**45%**	**8%**	0%
5	0%	**30%**	**34%**	0%
6	0%	**9%**	**40%**	**12%**
7	0%	**1%**	**18%**	**60%**
8	0%	0%	0%	**29%**
9	0%	0%	0%	0%
Total	100%	100%	100%	100%

La matrice des erreurs de commission (

Tableau 13) vient donner plus de précision. Elle se lit horizontalement (par ligne).

Tableau 13: Matrice de confusion du 2 mars 2010 pour ICEMAP-R (erreurs de commission).

Classe avec ICEMAP-R	**Eau libre avec rugosité de surface**	**Couvert intact, neige humide et mares de fonte**	**Couvert très hétérogène en forte dégradation**	**Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte**	
1	**100%**	0%	0%	0%	100%
2	**95%**	**5%**	0%	0%	100%
3	**25%**	**75%**	0%	0%	100%
4	0%	**98%**	**2%**	0%	100%
5	0%	**88%**	**12%**	0%	100%
6	0%	**60%**	**33%**	**7%**	100%
7	0%	**11%**	**26%**	**63%**	100%
8	0%	0%	0%	**100%**	100%
9	0%	0%	0%	0%	0%

On y constate que :

- Les classes #1 et #2 contiennent respectivement 100% et 95% de pixels « Eau libre », selon les sites de validation.

- Les classes #3, #4 et #5 sont nettement dominées par le couvert intact avec neige humide et mares de fonte.

- Les classes #6 et #7 sont ambigües. Mais encore une fois, la catégorie « glace hétérogène en dégradation » contient à la fois des plaques de glace lisse, des morceaux de glace empilés, de la neige humide, des mares de fonte et des chenaux d'eau libre.

- La classe #8 contient uniquement des zones de glace consolidée.

- Aucun pixel n'a été classé dans la classe #9. Signe d'une image où la rétrodiffusion est fortement absorbée par la neige/glace humide.

On obtient au final une précision globale (omission et commission) de **83%** de la classification avec l'algorithme ICEMAP-R, pour les conditions de fonte du 2 mars 2010.

On notera ainsi que les regroupements déterminés par la matrice de confusion ne sont cette fois, que légèrement différents de la légende de printemps utilisée habituellement (Tableau 14).

Tableau 14: Validation de la légende de printemps et nouvelle nomenclature.

	Regroupement des classes selon la légende de printemps	Regroupement des classes selon la matrice de confusion du 2 mars 2010
Eau libre	1-2	1-2
Couvert intact, neige humide et mares de fonte	3-4	3-4-5
Couvert très hétérogène en forte dégradation	5-6-7	6-7
Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte	8-9	8-9

En complément d'information, sur 10 sites de validation, 6 sont correctement identifiés et 4 sont partiellement identifiés, pour un taux de succès de 80%.

En conclusion, l'application sur l'image du 2 mars 2010 confirme que l'algorithme ICEMAP-R atteint la même précision en conditions de fonte qu'en conditions hivernales, si le vent n'est pas assez fort et les étendues d'eau libre de la rivière assez grande pour former de petites vagues.

De plus, et pour des raisons de rugosité de la surface de l'eau également, les zones de rapides demeurent des cas problèmes lorsqu'elles sont en eau libre. L'algorithme les classe comme des zones de glace.

Notons aussi que cette analyse permet de raffiner la légende en période de fonte. Dans un premier temps, nous proposons une nouvelle nomenclature et de nouveaux codes de couleur (Tableau 14).

Tableau 15: Nouvelle légende de printemps proposée

Légende	Couleur	Code de couleur
Eau libre		RVB : 0, 0, 150
Couvert intact (avec mares de fonte et neige humide)		RVB : 0, 135, 200
Couvert hétérogène en dégradation		RVB : 200, 170, 210
Glace fortement consolidée (accumulations)		RVB : 100, 50, 100

Deuxièmement, le regroupement des classes peut être modifié. Selon l'information du

Tableau 13, il serait pertinent de déplacer la classe #5 sous « couvert intact » plutôt que sous « couvert hétérogène » et de regrouper ainsi les classes selon la matrice de confusion du 2 mars 2010.

3 VALIDATION DE L'ALGORITHME ICEMAP-R (4.0 VERSION BÊTA)

Dans le cadre de ses activités de développement, l'INRS travaille à une version modifiée de l'algorithme ICEMAP-R afin d'inclure l'information des polarisations HV et VV pour une meilleure cartographie du couvert de glace. Le présent contrat prévoyait l'essai de la version ICEMAP-R 4.0 bêta sur les images de la rivière Chaudière. Toutefois, dans ce cas, il s'agira d'une version bêta modifiée pour n'utiliser que HH et HV, qui sont les polarisations disponibles sur les images fournies par la Sécurité Publique. L'ajout de la polarisation HV pourrait permettre une meilleure discrimination entre les classes de glace. Par contre, comme les images RADARSAT-2 en mode fin ont un niveau de bruit assez élevé et que le signal dépolarisé (HV) est lui-même assez faible, l'apport de cette polarisation pourrait ne pas être significatif dans le cas présent.

Dans cette section, nous comparons les résultats de validation d'ICEMAP-R (4.0 version bêta) avec ceux obtenus précédemment avec ICEMAP-R (3.0).

3.1 En conditions d'englacement

Le Tableau 16 compare les taux d'omission, c'est-à-dire la proportion des sites de validation incorrectement classifiés par les algorithmes.

Tableau 16: Comparaison des taux d'omission entre ICEMAP-R 3.0 et ICEMAP-R 4.0 bêta pour l'image du 15 décembre 2012.

	Eau libre	Glace thermique	Glace de frasil aggloméré	Glace consolidée
ICEMAP-R 3.0	6%	26%	44%	2%
ICEMAP-R 4.0 bêta	16%	31%	2%	6%

On remarque immédiatement qu'avec ICEMAP-R 4.0 bêta, le taux d'omission pour la glace de frasil aggloméré est maintenant très faible. Par contre, il a augmenté pour toutes les autres classes. On suppose ici qu'ICEMAP-R 4.0 bêta produit plus de pixels de la classe « glace de frasil aggloméré », au détriment des autres classes.

Le Tableau 17 compare quant à lui, les taux de commission, c'est-à-dire la surestimation par classe.

Tableau 17: Comparaison des taux de commission entre ICEMAP-R 3.0 et ICEMAP-R 4.0 bêta pour l'image du 15 décembre 2012.

	Eau libre	Glace thermique	Glace de frasil aggloméré	Glace consolidée
ICEMAP-R 3.0	28%	14%	26%	5%
ICEMAP-R 4.0 bêta	26%	13%	40%	0%

On confirme ici la surestimation de la classe « glace de frasil aggloméré » par 40%. Comme les autres classes ont par conséquent moins de pixels, il y a donc moins de surestimation dans leur cas. Au final, la précision globale reste pratiquement identique, soit 83% (ICEMAP-R 4.0 bêta) contre 84% (ICEMAP-R 3.0).

En conclusion, la version bêta de l'algorithme ICEMAP-R 4.0, en n'utilisant que HH et HV, n'apporte pas d'amélioration à la qualité de la carte de glace originale.

3.2 En conditions de fonte

Le même exercice a été réalisé avec l'image du 13 mars 2013 (Tableau 18 et Tableau 19). Là non plus, aucune amélioration n'est notée. L'image du 2 mars 2010 avait quant à elle, été acquise en polarisation HH seulement.

Tableau 18: Comparaison des taux d'omission entre ICEMAP-R 3.0 et ICEMAP-R 4.0 bêta pour le 13 mars 2013.

	Eau libre avec rugosité de surface	**Couvert intact, neige humide et mares de fonte**	**Couvert très hétérogène en forte dégradation**	**Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte**
ICEMAP-R 3.0	100%	26%	35%	59%
ICEMAP-R 4.0 bêta	100%	28%	18%	65%

Tableau 19 : Comparaison des taux de commission entre ICEMAP-R 3.0 et ICEMAP-R 4.0 bêta pour le 13 mars 2013.

	Eau libre avec rugosité de surface	**Couvert intact, neige humide et mares de fonte**	**Couvert très hétérogène en forte dégradation**	**Glace fortement consolidée, neige humide et mares de fonte**
ICEMAP-R 3.0	0%	34%	53%	13%
ICEMAP-R 4,0 bêta	0%	27%	57%	3%

Il est donc clair, que dans sa forme actuelle modifiée, la nouvelle version de l'algorithme ICEMAP-R 4.0 bêta n'apporte aucune valeur ajoutée pour les images en double polarisation. Suite aux futurs développements de cet algorithme, nous reviendrons le valider sur ces 2 images de la rivière Chaudière et transmettrons les résultats au Ministère.

4 ESSAI PILOTE DES INDICATEURS DE CHANGEMENT

Dans le cadre d'un projet de recherche avec l'Agence Spatiale Européenne, trois outils de représentation et d'analyse de la carte de glace ont été développés. L'objectif éventuel de ces outils est de fournir à l'opérateur, une information permettant de mieux comprendre la dynamique du couvert de glace sur la rivière et principalement, de détecter les changements entre deux dates. Le présent contrat prévoyait l'essai de deux de ces outils sur certaines séries d'images de la rivière Chaudière et de la rivière Mistassini.

4.1 Présentation des outils

4.1.1 Le profileur

Un premier outil (Ice Profiler) permet de représenter le profil longitudinal de la concentration de glace sur la rivière. Cette concentration (%) est calculée sur la carte de glace, selon des sections de longueur spécifiée par l'opérateur. Celui-ci peut choisir de calculer la concentration totale de glace ou la concentration d'une classe en particulier. Par exemple, en regardant la glace consolidée on obtiendrait un certain profil de rugosité. La concentration totale de glace [IC] sur une section [s] est calculée selon l'équation 1:

$$IC_s = \frac{1}{N}\sum_{k=b}^{h} P_k \times 100 \qquad (1)$$

Où N est le nombre total de pixels P sur la section et k une classe de la carte de glace. B et h représente les limites des classes de glace. Pour calculer la concentration sur un seul type de glace [SC], on utilise l'équation 2:

$$SC_s = \frac{1}{N}\sum_{k=x} P_k \times 100 \qquad (2)$$

L'opérateur peut effectuer l'analyse sur toutes les sections de la rivière ou sur un sous-échantillon. Également, lorsque des îles sont présentes, l'opérateur peut choisir de calculer le profil sur le chenal complet ou seulement sur le chenal principal. La sortie de cet outil est un profil sous forme graphique ou sous forme de carte.

4.1.2 Le détecteur

Le détecteur de changements est utilisé pour comparer deux cartes de glace acquises à des moments différents et déterminer deux facteurs : 1) l'état de la fonte et 2) l'état de l'englacement. Encore une fois, le changement est estimé par section de rivière.

Pour l'état de la fonte, on regarde trois indicateurs :

- Les premiers signes de fonte, avec l'apparition de neige humide ou de mares de fonte (baisse généralisée des classes de la carte);
- Les signes de consolidation ou d'épaississement de la glace, signe précurseur d'embâcle (augmentation des classes à l'intérieur d'une section);
- Les premiers signes de débâcle avec l'apparition d'eau libre dans la section.

Pour l'état de l'englacement, on regarde les indicateurs suivants :

- L'apparition ou l'accroissement du couvert de glace;
- La consolidation ou l'épaississement de la glace (augmentation de la classe de glace).

Le premier indicateur [CDI1] compare les concentrations de glace et classifie les sections selon 4 scénarios possibles (Tableau 20). Une marge d'erreur de 5% est utilisée.

Tableau 20 : Valeurs de classification de l'indicateur de changement 1.

Concentration de glace sur la carte 1	Concentration de glace sur la carte 2	Classification
< 95%	< 95%	1
≥ 95%	< 95%	2
< 95%	≥ 95%	3
≥ 95%	≥ 95%	4

Ainsi, durant l'englacement, le scenario #2 indiquera qu'une section a atteint un couvert de glace complet depuis la dernière image. Une carte qui indiquerait ces sections montrerait les zones récemment englacées. Comme usage potentiel, on pourrait y démarrer un modèle de croissance de glace.

Durant la fonte, le scénario #3 indiquera que de l'eau est récemment apparue dans la section. Une carte qui indiquerait ces sections montrerait les zones où la débâcle est potentiellement commencée. Comme usage potentiel, un modèle de prédiction de la date de débâcle pourrait être ajusté sur ces sections.

Le deuxième indicateur de changement [CDI2] compare la somme normalisée des valeurs de classe dans une section :

$$CDI2_s = \frac{1}{N \cdot \max(k)} \left(\sum_{i,j=0}^{N-1} C_{ij2} - \sum_{i,j=0}^{N-1} C_{ij1} \right) \qquad (3)$$

Où Cij2 est la valeur de classe du pixel ij de l'image 2 et N est le nombre de pixels dans la section. Max(k) est la plus haute valeur de classe dans la carte. Les valeurs de cet indicateur seront comprises entre -1 et 1. Un indicateur positif correspondra à une augmentation du couvert de glace ou à un changement dans sa structure ou sa forme. Plus de glace ou de la glace plus rugueuse dans cette section se traduit par une plus forte rétrodiffusion et une texture plus élevée, donc, des classes plus élevées. Une carte indiquant ces sections montrerait les zones où la glace se consolide, de même que les nouveaux embâcles potentiels.

Un indicateur négatif correspondra à une détérioration du couvert. Comme le radar est sensible à l'humidité, la classification est affectée par la glace humide, la neige humide qui recouvre la glace ou la couche de slush entre les deux. Lorsque la fonte démarre, il y a plus d'absorption du signal radar. Cela entraine une baisse de rétrodiffusion et de la texture, même lorsque le couvert est rugueux. Donc, des classes plus basses. Une carte indiquant ces sections montrerait les zones où la fonte a débuté.

Il est à noter que la qualité de ces indicateurs est dépendante de la qualité des cartes de glace.

4.2 Application sur les rivières Chaudière et Mistassini

Pour le présent projet, nous avons testé ces outils sur les rivières Chaudière et Mistassini. Pour la rivière Chaudière, trois images ont été utilisées alors que six l'ont été pour la Mistassini (Tableau 21).

Tableau 21 : Images utilisées pour la présentation des outils.

Rivière	Date	Heure	Mode	Résolution	Polarisations
Chaudière	23 février 2012	17h42	Fin (F3F)	8m	HH-HV
	8 mars 2012	17h34	Fin (F22F)	8m	HH-HV
	18 mars 2012	17h42	Fin (F3F)	8m	HH-HV
Mistassini	16 janvier 2012	17h52	Fin (F6)	8m	HH-HV
	23 février 2012	17h43	Fin (F2)	8m	HH-HV
	19 mars 2012	5h52	Fin (F4F)	8m	HH-HV
	29 mars 2012	6h00	Fin (F1N)	8m	HH-HV
	5 avril 2012	5h56	Fin (F2F)	8m	HH-HV
	12 avril 2012	5h52	Fin (F4F)	8m	HH-HV

4.2.1 Profil en long de la concentration

La Figure 14 nous présente le profil en long de la concentration de glace sur la rivière Chaudière, le 8 mars 2012 (période de fonte). Nous avons utilisé ici des tronçons produits par Stéphane De Munk dans le cadre de sa maîtrise, soit des tronçons de 250m. Ce graphique présente une vue d'ensemble du niveau d'englacement de la rivière à ce moment. On distingue immédiatement deux régions avec des couverts de glace encore complets ou presque, soit à Beauceville et de Saint-Joseph à Vallée-Jonction. En aval de ces régions, les couverts partiels peuvent se détacher et s'entasser en amont des couverts complets pour former des embâcles.

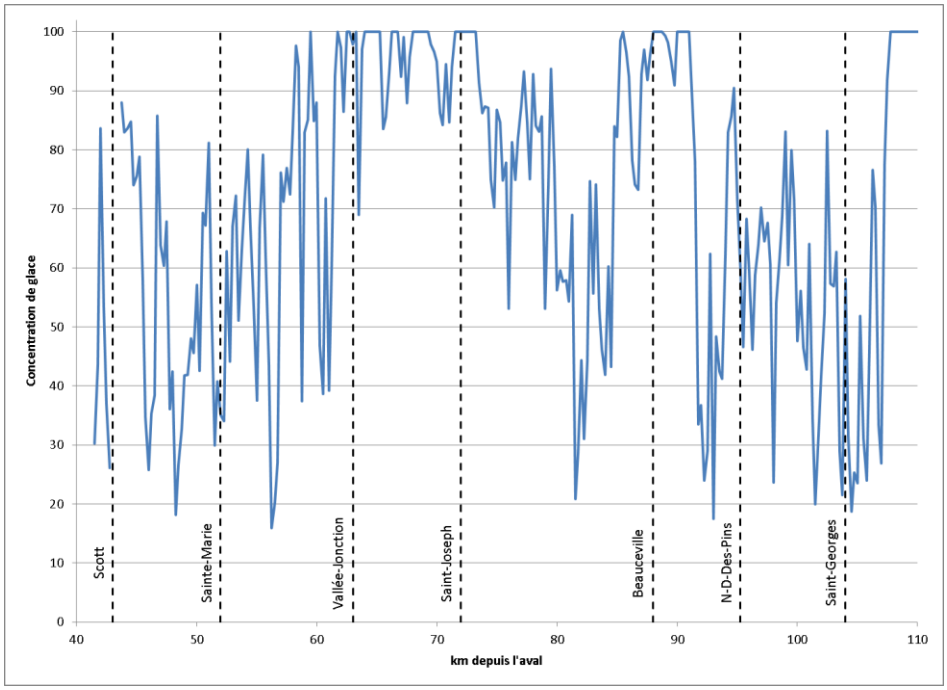

Figure 14 : Concentration de glace le long de la rivière Chaudière le 8 mars 2012.

Cet outil devient encore plus utile lorsqu'on compare plusieurs cartes de glace. On peut ainsi voir la dynamique des glaces dans le temps. Par exemple, sur la Figure 15 on compare les profils de concentration de glace de 3 dates, pour le secteur en aval de Sainte-Marie. On y voit qu'entre le 8 et le 18 mars, le couvert de glace du km 51 s'est détaché pour se reformer au km 49.5.

On peut également soustraire les profils en long de deux dates pour obtenir un portrait des zones où la glace s'est retirée et celles où la glace s'est accumulée. Par exemple, la Figure 16 montre qu'entre le 8 et le 18 mars, le couvert de glace de la rivière Chaudière (km 45-70) a définitivement migré de l'amont vers l'aval.

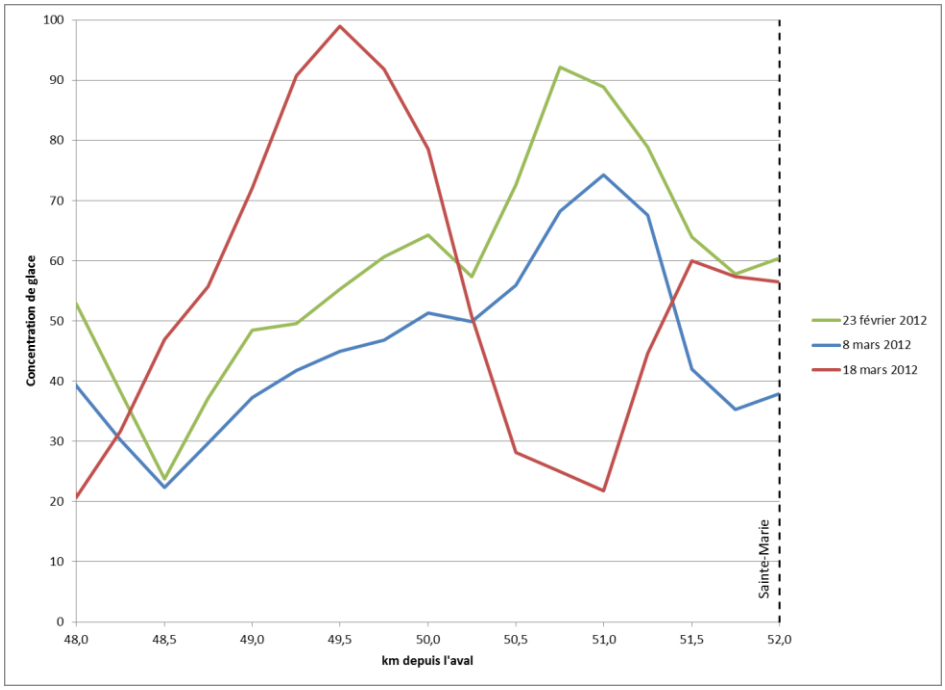

Figure 15 : Variation de la concentration de glace en aval de Sainte-Marie au printemps 2012.

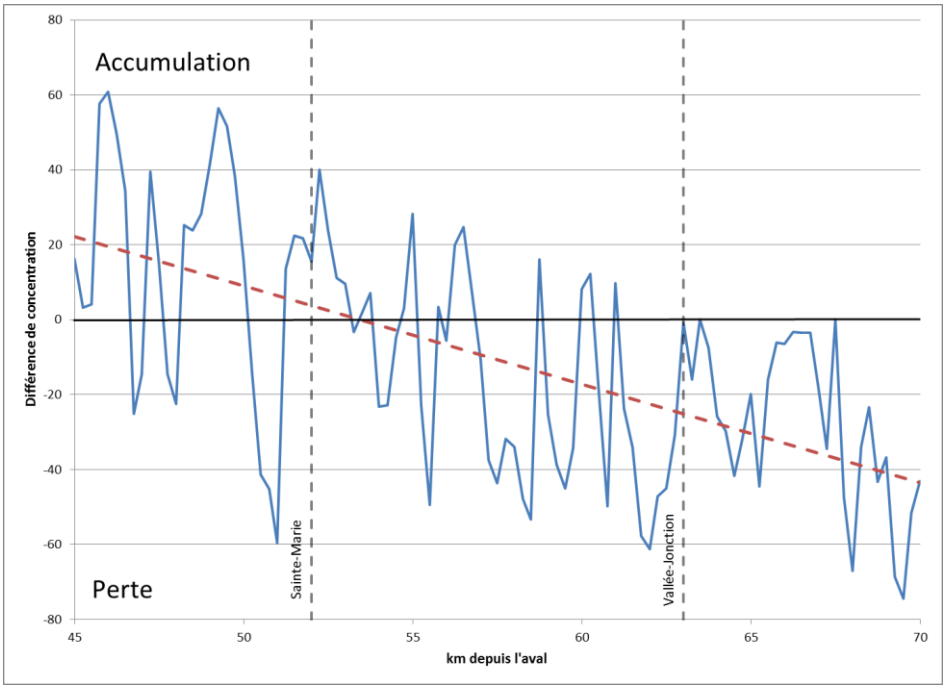

Figure 16 : Différence de concentration entre le 18 et le 8 mars 2012.

Le Profileur a aussi été utilisé sur les cartes de glace de la rivière Mistassini. Dans ce cas, nous avons généré les profils en utilisant des tronçons de 500m. Nous présentons ici la variation temporelle de la concentration de glace en comparant deux à deux les six dates à l'étude. Nous remarquons qu'un couvert complet sur presque toute la rivière est en place à la mi-janvier 2012 (Figure 17). À la fin février, de l'eau (ou de la fonte) apparait sur près de deux tiers du secteur à l'étude.

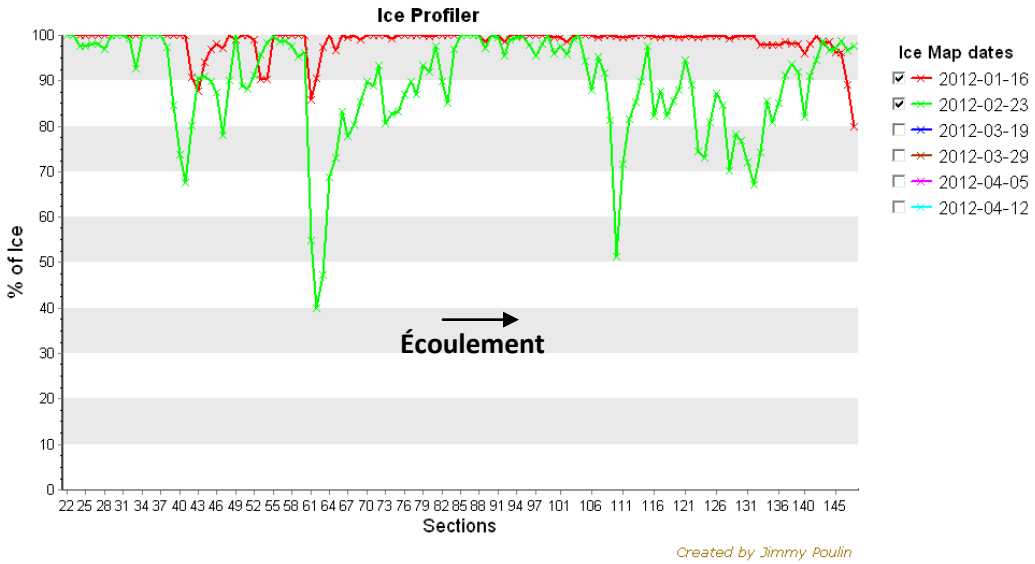

Figure 17 : Profil de la concentration pour le 16 janvier et le 23 février 2012.

Le 19 mars, une resolidification du couvert s'est produite en amont alors que la dégradation s'est poursuivie en aval (Figure 18).

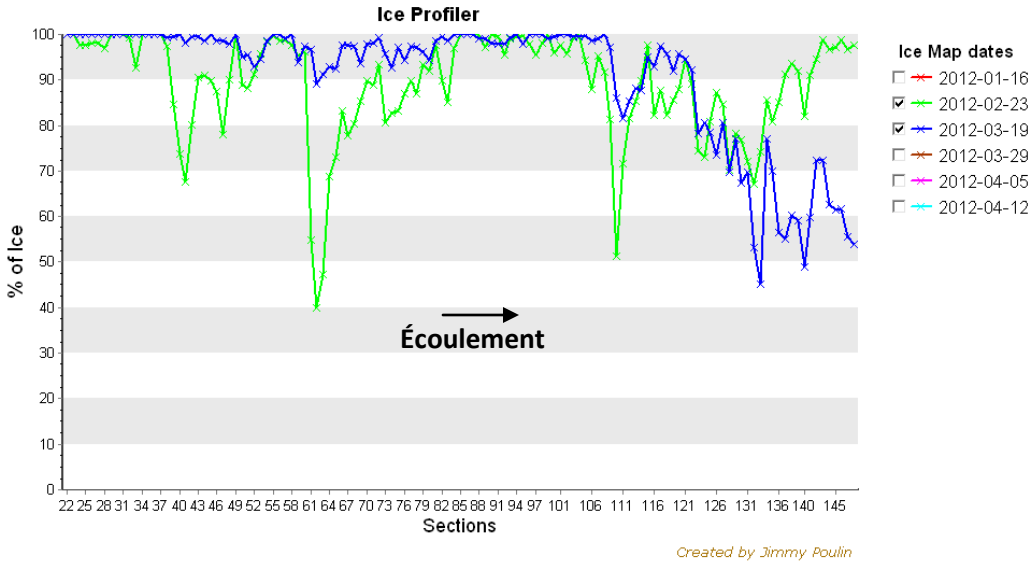

Figure 18 Profil de la concentration pour le 23 février et le 19 mars 2012.

Le 29 mars, l'aval s'est consolidé, possiblement suite au bris partiel du couvert plus en amont (Figure 19).

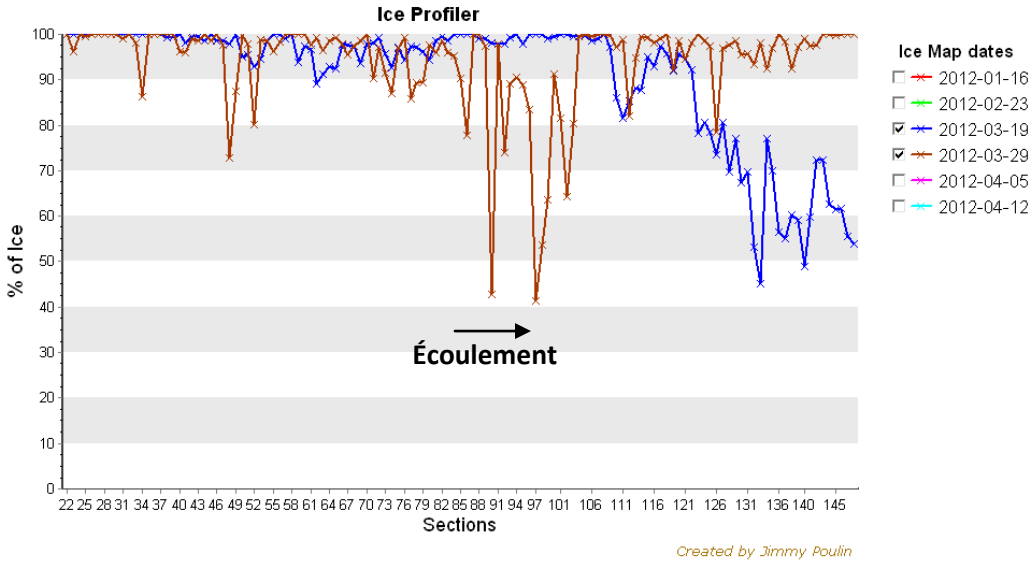

Figure 19 : Profil de la concentration pour le 19 mars et le 29 mars 2012.

Sur l'image du 5 avril, on constate des signes de fonte ou de dégradation du couvert de glace sur l'ensemble de la région sans toutefois de déplacement manifeste vers l'aval (Figure 20).

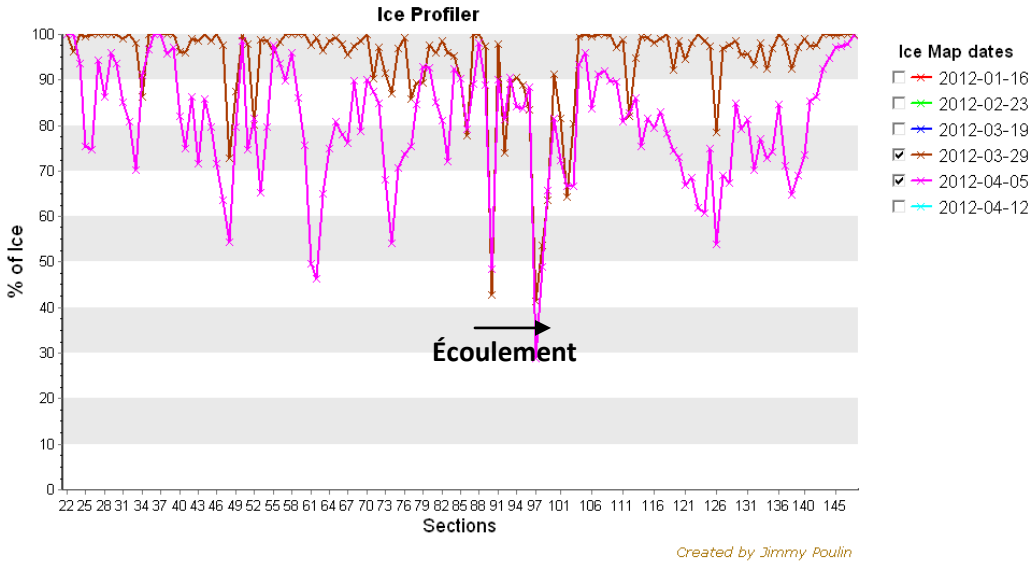

Figure 20 : Profil de la concentration pour le 29 mars et le 5 avril 2012.

Enfin, sur la dernière image de la série (Figure 21), celle du 4 avril, on remarque que la glace en aval a été évacuée. On voit aussi une consolidation vers les sections 80 et 95 (île du Pin Blanc et aval de Dolbeau). Une autre est visible dans les sections 22 à 55 (amont de La Belle Île et de la confluence avec la rivière Ouasiemsca).

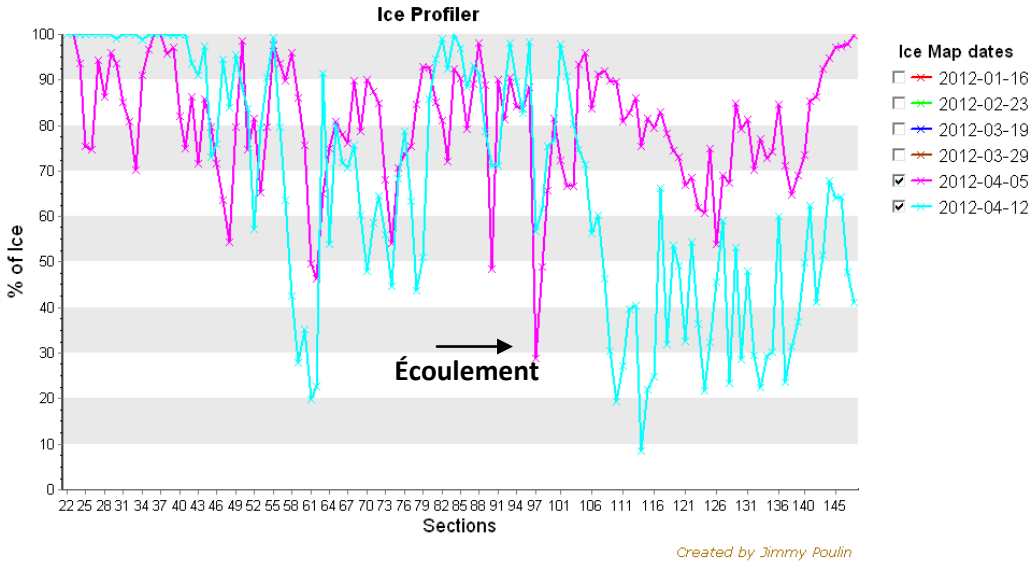

Figure 21 : Profil de la concentration pour le 5 avril et 12 avril 2012.

4.2.2 Détecteurs de changements

La Figure 22 présente sur un secteur de la rivière Chaudière (Beauceville), le premier détecteur de changements. Celui-ci détecte l'apparition ou la disparition d'eau sur chaque section de 250m. Sur le tracé A, on cartographie les changements survenus entre le 23 février et le 8 mars 2012. On voit la dominance du gris pâle, signe d'un regel. En effet, sur ces sections, on est passé de « présence d'eau » à « glace seulement ». Sur le tracé B, on cartographie les changements survenus entre le 8 et le 18 mars. Ici, on voit nettement l'apparition de sections bleu pâle, signe de fonte. Ces sections sont passées de « glace seulement » à « présence d'eau ».

Le deuxième détecteur de changement tient compte des changements de classe survenus sur chaque section. Ainsi, sur la Figure 23, on voit une augmentation significative de l'indicateur en deux endroits (encadrés A et B). Comme on le constate sur les cartes de glace, on y est passé d'un couvert intact à un couvert dégradé ou consolidé. Le même phénomène est représenté graphiquement à la Figure 24. Les profils de concentration y sont présentés en traits continus et se rapporte à l'axe vertical de gauche alors que l'indicateur de changement est présenté sous forme de graphique en aires permettant plus facilement de distinguer les zones de consolidation et celles de détérioration. L'indicateur de changement se rapporte à l'axe vertical de droite

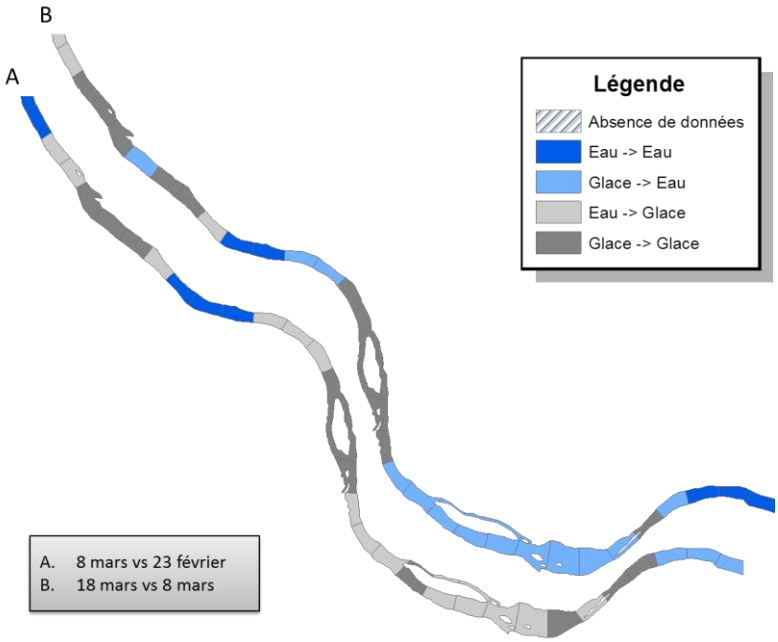

Figure 22 : Représentation cartographique du détecteur de changement CDI1 (Rivière Chaudière - Secteur de Beauceville).

Les Figure 25 et Figure 26 présentent un second exemple du deuxième indicateur. On y détecte une augmentation généralisée des classes sur le secteur aval en particulier dans l'encadré A, signe d'une forte consolidation entre les deux dates. Dans l'encadré B, une baisse des classes est détectée, signe de fonte (apparition ou augmentation de neige humide, mares de fonte, eau libre).

Finalement, un troisième exemple graphique est présenté à la Figure 27 montrant les changements dans l'état de la glace entre le 16 janvier et le 29 mars 2012 sur la rivière Mistassini. Bien que les dates soient éloignées l'une de l'autre, on remarque sur le graphique des zones où les profils de concentration sont similaires. Le deuxième indicateur de changement montre cependant des variations significatives permettant de mieux caractériser le changement.

4.2.3 Sommaire

Trois outils d'analyse de la carte de glace RADARSAT ont été testés. Le premier, le profileur permet de déterminer un profil longitudinal de la concentration de glace sur une rivière donnée. Le profileur devient plus utile lorsqu'on compare plusieurs cartes de glace, on peut ainsi constater la dynamique des glaces dans le temps. On peut aussi soustraire les profils en long de deux dates pour obtenir un portrait des zones où la glace s'est retirée et celles où la glace s'est accumulée. Les deux autres outils détectent les changements temporels dans les caractéristiques du couvert de glace (les détecteurs). L'un, le CDI1, détecte l'apparition ou la disparition d'eau sur chaque section de la rivière. L'autre, le CDI2, tient compte des changements de classe survenus sur chaque section. Ce détecteur de changement peut être présenté sous forme de graphique en aires permettant de distinguer plus facilement les zones de consolidation et celles de détérioration. À notre avis, ces indicateurs peuvent s'avérer des outils d'analyse complémentaire pour rapidement cerner les différences temporelles et spatiales d'un couvert de glace.

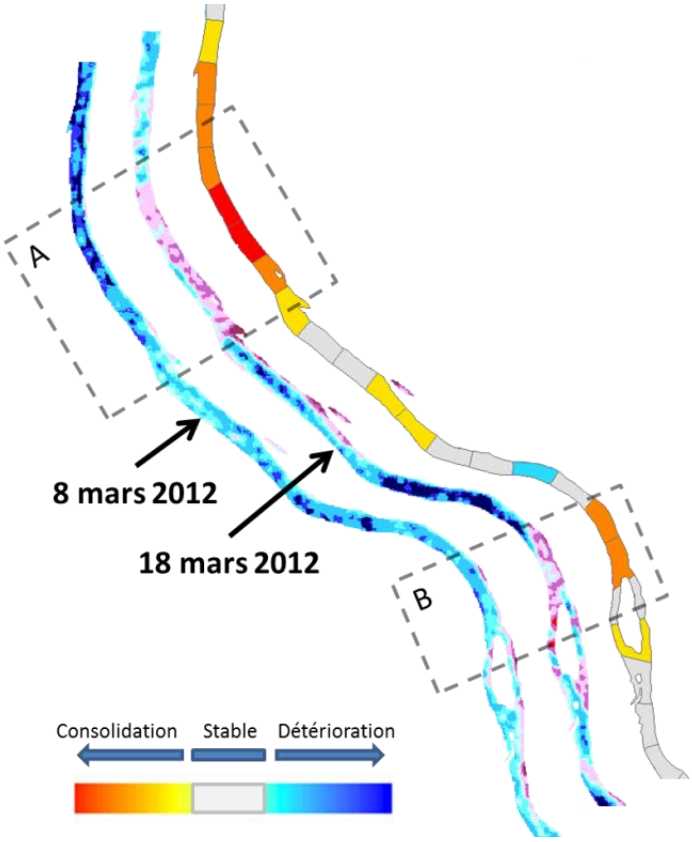

Figure 23 : Représentation cartographique du détecteur de changement CDI2 dans le secteur de Beauceville.

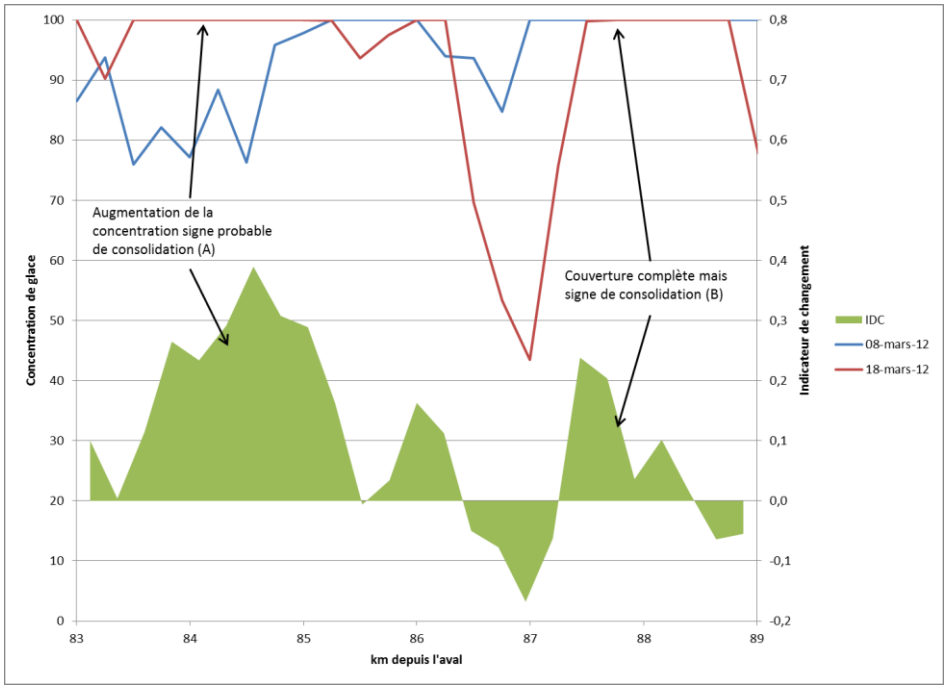

Figure 24 : Représentation graphique du détecteur de changement CDI1 et des profils de concentration dans le secteur de Beauceville.

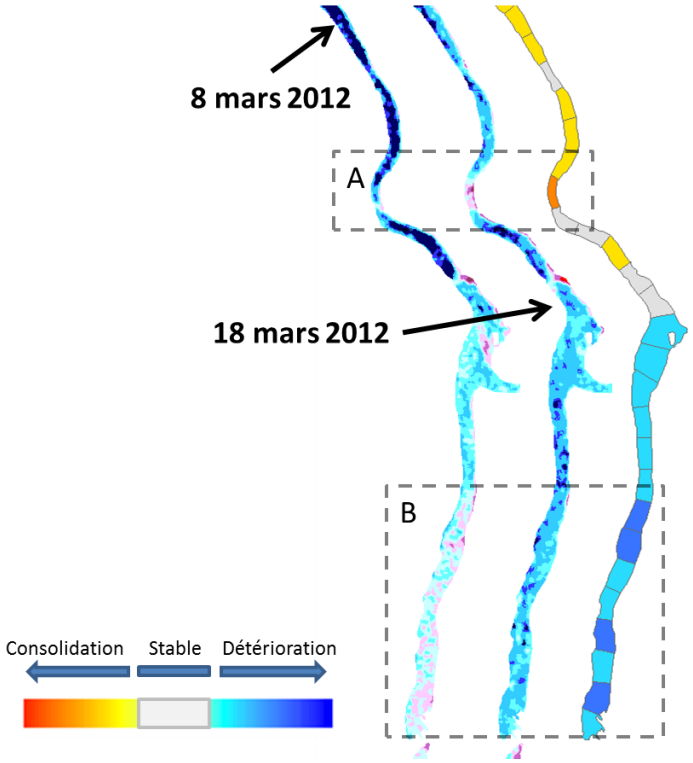

Figure 25 : Représentation cartographique dudétecteur de changement CDI2 dans le secteur de Saint-Georges.

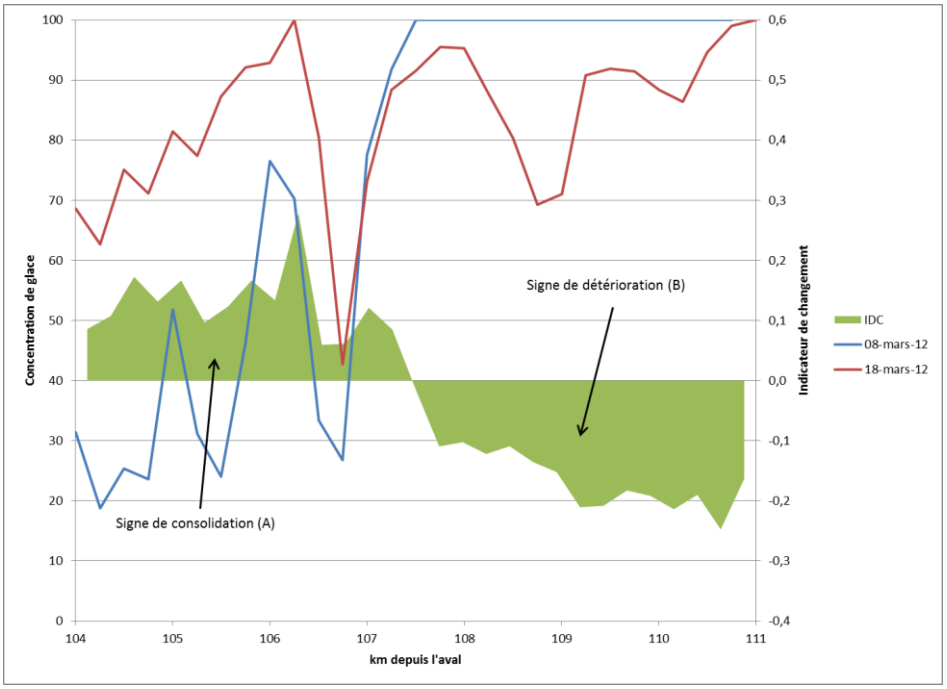

Figure 26 : Représentation graphique du détecteur de changement CDI2 et des profils de concentration dans le secteur de Saint-Georges.

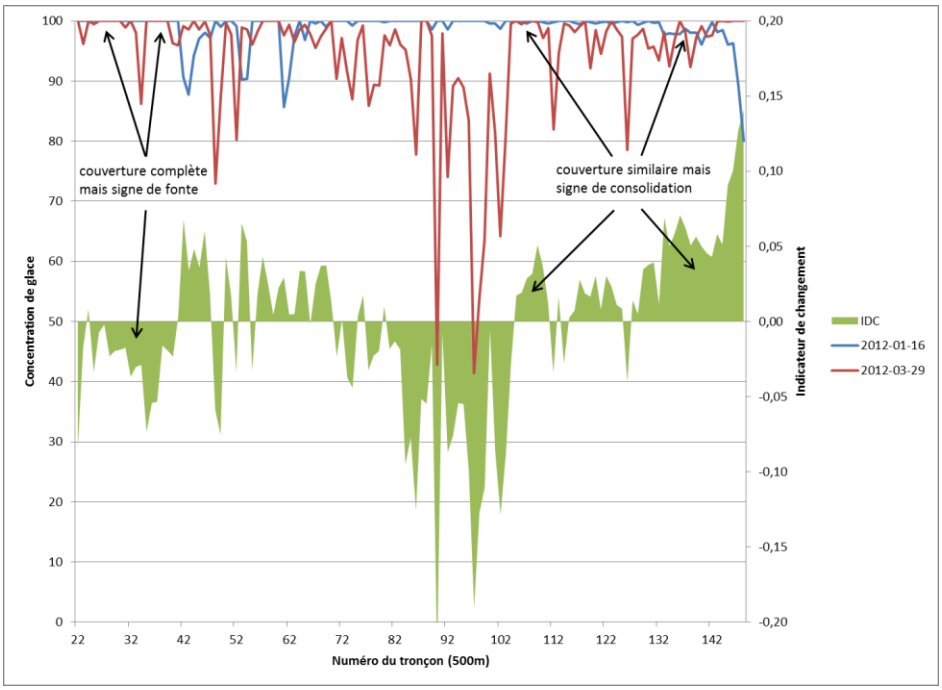

Figure 27 : Représentation graphique du détecteur de changement CDI2 et des profils de concentration pour la rivière Mistassini.

5 PROJET DE PROCÉDURE AUTOMATIQUE DE RÉAJUSTEMENT DE LA CARTE DE GLACE

La carte de glace étant le résultat d'un algorithme de classification automatique, il est possible que la carte ne représente pas totalement la réalité, ou qu'il y ait de la confusion dans l'assignation d'un polygone de glace à un type particulier de glace plutôt qu'à un autre. C'est pourquoi, dans les travaux menés jusqu'à présent, la carte de glace qui est originalement en 9 classes, est affichée selon différents codes de cinq couleurs, lesquels représentent des légendes pour différentes saisons ou stades de formation de la glace. Lorsque de l'information sur la nature exacte, ou du moins plausible, d'un type de glace à une position particulière est disponible, celle-ci peut servir à évaluer et à valider la carte de glace. Cette information pourrait également servir à mettre à jour la carte en assignant le bon type de glace au polygone se trouvant à la position spécifiée. Cependant, comme il n'est pas possible opérationnellement de valider l'ensemble des polygones de glace de la carte, une méthode doit être développée afin que les polygones mis à jour contribuent à mettre à jour l'ensemble de la carte.

5.1 Méthodologie proposée

Rôle de l'intervenant :

L'intervenant se rend sur le terrain. À partir de l'application sur « tablette numérique » du MSP, il enregistre sa position et prend une photo. Il indique alors, à partir d'une liste déroulante :

- Vue aval, amont ou face
- Type de glace dominant visible sur la photo (selon les 2 légendes).

L'application « tablette » enregistre alors les coordonnées, la vue, la photo et le type de glace dans une table. Idéalement, l'intervenant devrait pouvoir cliquer sur la carte pour pointer la zone qu'il désire caractériser et en extraire les coordonnées. Cette modification à l'application serait de la responsabilité du MSP.

Procédure de mise à jour de la carte de glace:

Notons que dans la procédure de réajustement, le traitement s'effectuera sur la carte originale à neuf classes, lesquelles représentent l'eau et différents types de glace.

1. La première étape est de localiser sur la carte de glace, le lieu de la photo et de déterminer quel polygone de glace (ou d'eau) est visé. Dans le cas où l'intervenant a pu pointer la zone lui-même, la coordonnée exacte est reçue et associée automatiquement au polygone qu'elle touche.
2. À cette étape (Tableau 22), nous disposons du polygone, de sa classe originale (1 à 9), de la légende utilisée lors de la création de la carte, du type de glace identifié par l'intervenant et de l'adéquation entre ces deux derniers.

Tableau 22 : Exemple de table pour le réajustement automatique

Polygone pointé	Classe originale	Légende	Intervenant	Adéquation
ID123	2	Eau	Glace thermique	0
ID289	4	Glace thermique	Glace thermique	1
ID401	5	Glace thermique	Glace frasil	0
ID867	6	Glace frasil	Glace frasil	1
ID1298	1	Eau	Eau	1
ID1299	4	Glace thermique	Glace thermique	1
ID1612	3	Glace thermique	Glace thermique	1
ID1735	8	Glace consolidée	Glace consolidée	1
ID2081	5	Glace thermique	Glace frasil	0

Un premier indicateur de qualité sera le pourcentage d'adéquations. Le barème suivant est proposé : >85% : Excellente; 75-85% : Bonne; <75% : Problème potentiel. Dans notre exemple, nous avons 6 adéquations sur 9 sites (66%). Donc, problème potentiel.

Comme chaque type de glace de la légende est généralement composé de plusieurs des 9 classes originales, il est commun qu'une classe à la limite entre deux types de glace puisse appartenir à un autre type de glace que celui défini originalement. C'est pourquoi, nous proposons d'utiliser les sites de validation afin de modifier le cas échéant, le regroupement de la légende. Par exemple, la légende utilisée actuellement assigne les classes 3, 4 et 5 à la glace thermique, 6 et 7 à la glace agglomérée et les classes 8 et 9 à la glace consolidée. Les conditions météorologiques et les conditions de glace spécifiques au moment de l'acquisition de l'image SAR font peut-être en sorte de modifier ces regroupements. Donc, en prenant l'ensemble des sites de validation et en regardant les classes originales (1 à 9) associées aux types de glace

identifiés par l'intervenant, il sera peut-être possible d'identifier le problème potentiel (Tableau 23).

Tableau 23 : Analyse des regroupements

Type	Regroupement utilisée pour la carte	Classes originales dans les polygones de l'intervenant
Eau	1, 2	1
Glace thermique	3, 4, 5	**2**, 4, 3, 4
Glace de frasil aggloméré	6, 7	**5**, **5**, 6
Glace consolidée	8, 9	8

Dans cet exemple, il y aurait deux confusions possibles. La classe #2 pourrait être de la glace thermique plutôt que de l'eau. Mais, il n'y a pas suffisamment de sites pour le confirmer. Par contre, dans le cas de la classe #5, le biais semble plus clair. Dans deux cas, la glace a été identifiée comme du frasil aggloméré plutôt que de la glace thermique. Les règles d'assignation de cette classe seraient alors redéfinies pour représenter la glace de frasil aggloméré avec les classes 5, 6, 7. Les critères exacts pour identifier un biais et procéder à une redéfinition de la légende restent à préciser.

3. Peu importe les résultats de l'analyse précédente, la dernière étape sera de changer directement la valeur de tous les polygones de validation erronés, par la classe identifiée par l'intervenant. Ainsi, on s'assure qu'au moins, ces sites seront bien cartographiés.

La méthodologie proposée pourra être testée suite à l'approbation des représentants du MSP quant à sa forme.

6 CONCLUSION

Les différentes actions prévues dans le cadre de ce contrat ont été réalisées (détails à l'annexe 1). L'algorithme ICEMAP-R 3.0 a été transféré sur plateforme EASI et des tests d'évaluation et de validation ont été effectués. Ces tests confirment que l'algorithme ICEMAP-R 3.0, dont dispose le MSP, performe avec une précision de 75 à 85%, en conditions normales hivernales et printanières. Ces tests ont aussi identifié les limites actuelles de l'algorithme et les conditions problématiques : 1) vitesse du vent assez forte et étendues d'eau libre assez grande pour que se forment de petites vagues; 2) zones de rapides en eau libre; 3) glace thermique sans bulle d'air. Les deux premiers cas augmentent la rugosité de la surface de l'eau et par conséquent, l'intensité du signal radar. D'où la confusion avec la glace. Inversement, le troisième cas diminue l'intensité du signal radar, d'où la confusion avec l'eau.

Une nouvelle légende de printemps est proposée avec une nouvelle nomenclature et de nouveaux codes de couleur.

L'essai de la version 4.0 bêta de l'algorithme ICEMAP-R (HH-HV) n'a pas apporté d'amélioration à la précision des cartes de glace de la rivière Chaudière. Elle n'a pas non plus permis de diminuer les contraintes reliées à la présence de rapides en eau libre ou de rugosité à la surface de l'eau due au vent. L'INRS prend note de cette contre performance et tentera d'y apporter les correctifs nécessaires dans la prochaine année. Lorsqu'une version améliorée de l'algorithme sera disponible, des tests seront refaits et les résultats seront communiqués au Ministère.

Trois outils d'analyse de la carte de glace développés par l'INRS ont été testés sur des images de la rivière Chaudière et de la rivière Mistassini. Le premier, le profileur permet de déterminer un profil longitudinal de la concentration de glace. Il devient très utile lorsqu'on compare plusieurs cartes de glace d'une même rivière, on peut ainsi constater la dynamique des glaces dans le temps. On peut aussi soustraire les profils en long de deux dates pour obtenir un portrait des zones où la glace s'est retirée et celles où la glace s'est accumulée. Les deux autres détectent les changements temporels dans les caractéristiques du couvert de glace (les détecteurs). L'un, le CDI1, détecte l'apparition ou la disparition d'eau sur chaque section. L'autre, le CDI2, tient compte des changements de classe survenus sur chaque section. Ce détecteur de changement peut être présenté sous forme de graphique en aires permettant de distinguer plus facilement les zones de consolidation et celles de détérioration. À notre avis, ces outils peuvent apporter

une information à valeur ajoutée pour la surveillance du couvert de glace. En effet, ces indicateurs peuvent s'avérer des outils d'analyse complémentaire pour rapidement cerner les différences temporelles et spatiales d'un couvert de glace, tant lors de l'englacement que lors de la fonte, lorsque plusieurs cartes de glace d'une même rivière sont produites. La prochaine étape de développement serait la programmation d'un tableau de bord qui rendrait interactive et facile l'utilisation des outils.

Une procédure de réajustement automatique de la carte de glace a aussi été proposée. Cette procédure prend l'information fournie à partir d'une application « tablette numérique » utilisée par un intervenant sur le terrain. Elle corrige alors certaines erreurs sur la carte de glace et propose le cas échéant, un regroupement de classes plus optimal. Elle pourra être testée suite à l'approbation des représentants du MSP quant à sa forme.

L'analyse préliminaire pour le développement d'une approche améliorée de cartographie des zones inondées en milieu urbain par image radar a été complétée (Tanguy, 2012). L'étude se poursuivra en 2013-2014 dans le cadre du projet « Développement et application d'un outil de gestion et d'analyse du risque d'inondation (GARI) sur le système transfrontalier du Lac Champlain – Rivière Richelieu » financé principalement dans le cadre du Programme canadien de sûreté et de sécurité (PCSS) administré par le Centre des sciences pour la sécurité (CSS) de Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC) et dont les principaux partenaires sont le Ministère de la Sécurité Publique, la Commission Géologique du Canada et la Ville de St-Jean-sur-le-Richelieu.

7 RÉFÉRENCES

Gauthier, Y., Poulin, J. et M. Bernier, 2012. Rapport d'évaluation de l'algorithme ICEMAP-R (v3.0) pour la cartographie radar de la glace de rivière. Rapport présenté à la Direction de la sécurité civile du Ministère de la Sécurité publique du Québec. Rapport R-1380, INRS Centre Eau Terre Environnement, 37 pages.

Tanguy, M., 2012. Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise- Analyse préliminaire. Rapport présenté à la Direction de la sécurité civile du Ministère de

la Sécurité publique du Québec. Rapport R-1395, INRS Centre Eau Terre Environnement, 103 pages.

Gauthier, Y. et M. Bernier, 2010. Rapport de validation de l'algorithme ICEMAP pour la cartographie radar de la glace de rivière dans des conditions printanières - Annexe au rapport de recherche no R-1079. Rapport présenté à la Direction de la sécurité civile du Ministère de la Sécurité publique du Québec. INRS Centre Eau Terre Environnement, 34 pages.

Gauthier, Y., Dribault, Y. et M. Bernier, 2009. Transfert de la procédure automatisée de cartographie de la glace de rivière à partir d'images satellites radar. Rapport présenté à la Direction de la sécurité civile du Ministère de la Sécurité publique du Québec. Rapport R-1079, INRS Centre Eau Terre Environnement, 26 pages.

ANNEXE 1

Suivi des livrables

1. Mise à jour de la procédure automatisée de cartographie radar de la glace (Procédure ICEMAP-R 3.0)

Ajustement de la fonction d'attribution de la légende selon les choix du MSP (légende mixte : hiver-automne / printemps) et ajustement de la fonction d'exportation de la carte de glace (format, projection, nombre de classes, légende) pour l'utilisation opérationnelle par la Direction.

À Faire :

- *Vérifier la légende utilisée au printemps (LIVRÉ)*
- *Exportation en format KML vector (Annulé)*
- *Transfert du modèle dans EASI (LIVRÉ)*

2. A) Support technique aux opérations dans la phase de validation des deux légendes durant la saison de glace 2011-2012.

   B) Expertise et interprétation de la carte lors des conférences téléphoniques (fortement relié aux observateurs terrains et à Vigilance).

(LIVRÉ)

3. Rapport de validation de la saison 2011-2012 suite aux observations terrain des partenaires.

À faire :

- *Produire un rapport 1ère partie, sur la validation de l'algo telle que réalisée avec ESA (LIVRÉ)*

Référence : Gauthier, Y., Poulin, J. et M. Bernier, 2012. Rapport d'évaluation de l'algorithme ICEMAP-R (v3.0) pour la cartographie radar de la glace de rivière. Rapport présenté à la Direction de la sécurité civile du Ministère de la Sécurité publique du Québec. Rapport R-1380, INRS Centre Eau Terre Environnement, 37 pages.

- *La 2ème partie sera faite à l'hiver suite à des visites sur le terrain en compagnie des intervenants (englacement-hiver, fonte) (LIVRÉ)*

4. A) Essai pilote d'une procédure intégrant le signal HV (polarisation croisée HH-HV) des images Radarsat-2 dans la procédure automatisée.

Une nouvelle procédure utilisant la polarisation croisée HH-HV est actuellement en développement à l'INRS (ICEMAP-R 4.0). Elle sera testée sur certaines images (mode fin) 2011-2012 du MSP et son efficacité sera évaluée dans ces conditions.

(LIVRÉ).

B) Essai pilote des indicateurs de changements

De nouveaux outils indicateurs (suivi du front de glace, détection des signes de fonte, détection de changements) basés sur les cartes de glace sont aussi en développement à l'INRS. Ils seront testés sur certaines images 2011-2012 du MSP et leur utilité sera évaluée.

(LIVRÉ)

C) Rapport d'évaluation

(LIVRÉ)

5. Développer une première procédure de réajustement de la carte de glace après validation terrain par des intervenants en sécurité civile.

À faire :

- *Concevoir une procédure liée aux Ipads*

La description de la procédure envisagée, avec intrants et extrants, sera livrée le 31 mars. Le MSP donnera du feedback. Puis la programmation du prototype sera faite. La procédure agira en 2 temps : 1) sur le site de l'observation et 2) sur l'image globale. Sur le site de l'observation, le polygone sera corrigé si la classe attribuée est mauvaise. L'ensemble des observations terrain permettront de déterminer s'il y a un biais dans l'assignation des classes. Une nouvelle assignation sera faite en conséquence.

(LIVRÉ)

6. Développement d'une approche intégrée de cartographie des zones inondées à partir de l'imagerie satellite

Développer/tester un algorithme fiable pour identifier les zones inondées par télédétection. Explorer plus spécifiquement la problématique des inondations en zones urbanisées, de forte végétation ou sous couvert de neige. Les principales données utilisées seront celles des inondations 2011 de la rivière Richelieu. L'approche sera en synergie avec les travaux du Centre Canadien de Télédétection. Le travail est effectué par une étudiante au doctorat 2011-2014. Le livrable final est pour 2014.

Référence : Tanguy Marion, 2012. Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise- Analyse préliminaire. Rapport présenté à la Direction de la sécurité civile du Ministère de la Sécurité publique du Québec. Rapport R-1395, INRS Centre Eau Terre Environnement, 103 pages.

7. Gestion de projet

Possible extension pour le livrable 5.

Calendrier des livrables	2012												2013		
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
Livrable 1															
Livrable 2															
Livrable 3															
Livrable 4															
Livrable 5															
Livrable 6															