

Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique-Eau Terre et Environnement  
(INRS-ETE)

**Développement d'une approche de Classification Orientée Objet pour une meilleure  
caractérisation de la glace d'une rivière de taille moyenne à l'aide des images du satellite  
RADARSAT-1 et d'un Système d'Information Géographique :  
cas de la rivière Saint-François, Québec**

Thèse présentée pour l'obtention du grade Philosophiae doctor en sciences de l'eau  
Spécialité : télédétection spatiale appliquée à l'hydrologie

Par

Ali El Battay

Membres du Jury

Examineur Externe et président du jury	François Cavayas, Université de Montréal (Montréal, Canada)
Examineur Externe	Robert Leconte, École de Technologie Supérieure (Montréal, Canada)
Examineur Interne	André Saint-Hilaire, INRS-ETE
Directrice de recherche	Monique Bernier, INRS-ETE
Co-directeur de recherche	Taha B.M.J Ouarda, INRS-ETE



## DÉDICACE

للوالدين، الإخوة و العائلة الكريمة  
لزوجتي الغالية  
للبنائي الأعزاء، فاروق و ساجد



*“...Most importantly, the subjective and objective aspects of this holistic science would have to stand in mutually respectful and constructive complementarity to one another if the composite discipline were to fulfill itself and its role in society”.* **Robert G. Jahn and Brenda J. Dunne<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Princeton Engineering Anomalies Research (PEAR) Laboratory  
School of Engineering and Applied Science, Princeton University*



## REMERCIEMENTS

À tous ceux et celles qui m'ont soutenu tout au long de ces longues années...Merci. Un simple mot, est-ce suffisant ? Tous les mots et toutes les paroles qui sauront décrire avec fidélité la pureté de vos actions et de votre soutien continu...restent, enfin de compte, rien d'autre que de simples mots. Mais je tiens à vous préciser que les mots qui vont suivre sortent directement du cœur, sont réfléchis et somme toute assumés.

Merci à Madame Monique Bernier, pour votre confiance, pour votre patience, et pour votre soutien scientifique, moral, et financier. Merci pour m'avoir accordé la chance de travailler sur cette thématique de recherche époustouflante. Merci de m'avoir accordé le statut de pionnier au sein de notre équipe de recherche dans l'axe de « glace de rivière ». Je savais au départ que le défi est énorme, je savais aussi que je pouvais compter sur une chercheuse dévouée, et une femme humainement exceptionnelle pour m'épauler et m'assister à relever le défi.

Merci à Monsieur Jean-Pierre Fortin, vous n'étiez pas seulement mon directeur de recherche durant ma maîtrise et les deux premières sessions de mon doctorat. Oh non!, vous êtes un modèle, un exemple, une monnaie rare, voilà ce que vous représentez pour moi et sûrement pour beaucoup de ceux qui vous connaissent. La rigueur de votre raisonnement scientifique et votre sens de logique impeccable sont mes précieux compagnons dans ce merveilleux monde de la recherche scientifique.

Monsieur Taha B.M.J Ouarda, que puis-je dire pour vous exprimer mon plaisir de vous avoir eu comme co-directeur et ma reconnaissance envers votre personne. Merci! Merci pour avoir été toujours présent, toujours à l'écoute et pour tous vos conseils. Merci pour l'attention que vous m'avez manifestée tout au long de mes études à l'INRS.

Un grand merci au pivot de notre équipe de recherche, à mon cher ami Yves Gauthier. Merci pour ton soutien, tes encouragements et tes conseils.

À Marc Philippin pour son amitié et son rôle crucial dans le montage du système d'information géographique. À Rebecca Fillion pour son écoute et son soutien. Guillaume Fortin, Shah Alamgir, Imane Gherboudj, Alain Royer, Karem Chokmani, Johanne Desrosiers, Lisa-Marie Pâquet, Stephane Mermose,...Bref, à toute l'équipe de Télédétection Spatiale de l'INRS-ETE, merci. Durant ces années j'ai appris beaucoup de choses en votre compagnie et j'ai beaucoup apprécié le climat d'entraide qui règne dans notre équipe, la notion de communication et les relations interpersonnelles exemplaires...Bravo et bonne continuation à vous tous.

Je tiens aussi à remercier spécialement Messieurs Abderrahmane Yagouti, Jalal Khaldoune, Bahaa Khalil et Stéphane Savary pour leur précieuse amitié et leur soutien moral et technique.

Finalement, merci aux membres du jury d'évaluation Messieurs François Cavayas (UM), Robert Leconte (ETS) et André Saint-Hilaire (INRS-ETE) qui ont accepté d'évaluer ce travail de recherche, et pour leur patience à lire ce long document.

Les images RADARSAT-1 disponibles pour ce projet ont été acquises grâce au programme ADRO-2 (#A227) de l'Agence Spatiale Canadienne, au Programme de Données RADARSAT-1 à des fins de recherche de l'Agence Spatiale Canadienne (DRU 12-01) et à une subvention FCAR-Équipe.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACE</b> .....	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>XXV</b>
<b>1. INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>1</b>
1.1 INTRODUCTION .....	1
1.2 PROBLÉMATIQUE .....	3
1.3 HYPOTHÈSES DE RECHERCHE .....	6
1.4 OBJECTIFS DE RECHERCHE .....	6
1.5 ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE .....	7
1.6 PLAN DU DOCUMENT .....	8
<b>2. THÉORIE ET CONCEPTS</b> .....	<b>9</b>
2.1 GLACE DE RIVIÈRE .....	9
2.1.1 <i>Structure et caractéristiques de la glace</i> .....	9
2.1.2 <i>Formation de la glace de rivière</i> .....	11
2.1.3 <i>Conclusion</i> .....	26
2.2 RADAR À SYNTHÈSE D'OUVERTURE ET GLACE DE RIVIÈRE .....	28
2.2.1 <i>Introduction</i> .....	28
2.2.2 <i>Caractéristiques des capteurs RSO :</i> .....	29
2.2.3 <i>Facteurs influençant la luminance d'un pixel d'une image RSO :</i> .....	34
2.2.4 <i>L'interaction du signal Radar avec la glace d'eau douce :</i> .....	35
2.2.5 <i>Conclusion</i> .....	40
2.3 TEXTURE ET POLARIMÉTRIE RADAR .....	41
2.3.1 <i>Texture</i> .....	41
2.3.2 <i>Polarimétrie Radar</i> .....	48
2.4 CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET : .....	55
2.4.1 <i>Extraction des objets d'une image :</i> .....	56
2.4.2 <i>Caractéristiques des objets extraits:</i> .....	58

2.4.3	<i>Méthodologie de classification O-O :</i>	61
2.4.4	<i>Conclusion</i>	65
<b>3.</b>	<b>MÉTHODOLOGIE</b>	<b>67</b>
3.1	SITE D'ÉTUDE	67
3.2	DONNÉES IMAGES	69
3.3	DONNÉES AUXILIAIRES	74
3.3.1	<i>Données cartographiques</i>	74
3.3.2	<i>Photos et vidéo</i>	75
3.3.3	<i>Données bathymétriques :</i>	75
3.3.4	<i>Données historiques</i>	76
3.3.5	<i>Relevés sur la glace</i>	77
3.4	MÉTHODOLOGIE PRÉVUE	77
3.4.1	<i>Extraction d'information des images RADAR</i>	77
3.4.2	<i>Extraction d'information à l'aide d'un SIG</i>	78
3.4.3	<i>Classification Orientée Objet</i>	80
3.4.4	<i>Classification non supervisée</i>	81
3.4.5	<i>Récapitulatif de la méthodologie</i>	81
3.5	SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE	82
3.5.1	<i>Sinuosité</i>	84
3.5.2	<i>Largeur</i>	88
3.5.3	<i>Profondeur et altitude du plan d'eau</i>	90
3.5.4	<i>Données historiques</i>	93
3.5.5	<i>Modèle numérique d'altitude</i>	94
3.6	ANALYSE QUALITATIVE	95
3.7	ANALYSE QUANTITATIVE :	96
3.8	CONCLUSION	99
<b>4.</b>	<b>RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUALITATIVE</b>	<b>101</b>
4.1	ANALYSE QUALITATIVE	101
4.1.1	<i>Zone de l'aéroport</i>	104
4.1.2	<i>Zone en forme de U</i>	107
4.1.3	<i>Zone de la tête du canard</i>	112
4.1.4	<i>Zone de l'île Therrien et de l'île Brown</i>	115
4.1.5	<i>Zone du point d'observation #23 :</i>	118

4.1.6	<i>Zone d'Ulverton</i> .....	120
4.1.7	<i>Zone des points #13 et #20</i> .....	124
4.1.8	<i>Zone de Richmond</i> .....	127
4.1.9	<i>Zone du point d'observation #15 et zone de Windsor</i> .....	130
4.2	ANALYSE POLARIMÉTRIQUE.....	135
4.3	CONCLUSIONS.....	139
<b>5.</b>	<b>RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE</b> .....	<b>141</b>
5.1	ÉTAPE DE L'ANALYSE QUANTITATIVE.....	141
5.2	IDENTIFICATION DES OBJETS À L'AIDE DES OBSERVATIONS TERRAIN ET COMPARAISON DES AMPLITUDES .....	142
5.3	RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE POUR L'IMAGE DU 6 JANVIER 2002 .....	147
5.3.1	<i>Séparabilité en utilisant l'amplitude</i> .....	147
5.3.2	<i>Séparabilité en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non- directionnelle</i> .....	147
5.3.3	<i>Amplitude et les 12 paramètres de texture directionnelles et non-directionnelles</i>	148
5.3.4	<i>Effet de l'introduction des paramètres de morphologie</i> .....	150
5.3.5	<i>Effet de l'introduction des paramètres dits de forme</i> .....	151
5.4	RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE POUR L'IMAGE DU 30 JANVIER 2002 .....	154
5.4.1	<i>Amplitude</i> .....	154
5.4.2	<i>Séparabilité en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non- directionnelle</i> .....	154
5.4.3	<i>Amplitude et les 12 paramètres de texture directionnelles et non-directionnelles</i>	155
5.4.4	<i>Effet de l'introduction des paramètres de morphologie</i> .....	157
5.4.5	<i>Effet de l'introduction des paramètres dits de forme</i> .....	158
5.5	RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE POUR L'IMAGE DU 4 MARS 2002.....	161
5.5.1	<i>Amplitude</i> .....	161
5.5.2	<i>Séparabilité en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non- directionnelle</i> .....	161
5.5.3	<i>Amplitude et les 12 paramètres de texture directionnelles et non-directionnelles</i>	162
5.5.4	<i>Effet de l'introduction des paramètres de morphologie</i> .....	163
5.5.5	<i>Effet de l'introduction des paramètres dits de forme</i> .....	165
5.6	CONCLUSIONS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE .....	168

<b>6. CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET.....</b>	<b>171</b>
6.1 SEGMENTATION DES IMAGES RADAR.....	171
6.1.1 <i>Segmentation multirésolution.....</i>	<i>173</i>
6.1.2 <i>Segmentation basée sur la classification .....</i>	<i>181</i>
6.1.3 <i>Conclusion à retenir pour la segmentation.....</i>	<i>186</i>
6.2 STRUCTURE HIÉRARCHIQUE ET CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET .....	186
6.2.1 <i>Eau libre.....</i>	<i>188</i>
6.2.2 <i>Glace thermique.....</i>	<i>192</i>
6.2.3 <i>Glace de rives.....</i>	<i>195</i>
6.2.4 <i>Neige humide.....</i>	<i>197</i>
6.2.5 <i>Glace agglomérée et zone d'embâcle.....</i>	<i>198</i>
6.2.6 <i>Glace secondaire vs glace superposée.....</i>	<i>200</i>
6.2.7 <i>Synthèse de la structure hiérarchique.....</i>	<i>203</i>
6.3 RÉSULTATS CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET .....	207
6.3.1 <i>Différents niveaux d'information, image du 30 janvier 2002 .....</i>	<i>207</i>
6.3.2 <i>Résultat de la classification pour l'image du 11 février 2003 .....</i>	<i>213</i>
6.4 AUTOMATISATION DU PROCESSUS DE LA CLASSIFICATION.....	222
6.5 CONCLUSIONS.....	224
<b>7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>225</b>
7.1 CONTRIBUTIONS À LA RECHERCHE.....	226
7.2 LIMITES DU SUJET DE RECHERCHE ET RECOMMANDATIONS .....	229
7PISTES DE RECHERCHES.....	230
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>233</b>
<b>ANNEXE-A .....</b>	<b>245</b>
<b>ANNEXE-B.....</b>	<b>257</b>
<b>ANNEXE-C .....</b>	<b>265</b>
<b>ANNEXE-D .....</b>	<b>291</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Structure de la glace hexagonale, ih .....	10
Figure 2.2 : Rôle de la densité de glace dans le maintien de la vie dans les écosystèmes aquatiques.....	11
Figure 2.3 : Différents modes de nucléation .....	14
Figure 2.4 : Photos illustratives de flocons de frasil et de glace de fond (CRREL, 2002).....	19
Figure 2.5 : Stade de développement du frasil (SCRHCENB, 1989) .....	19
Figure 2.6 : Stades de développement du frasil (D'après Michel, 1971).....	20
Figure 2.7 : Photo illustrative de radeaux de glace (SCRHCENB, 1989).....	21
Figure 2.8 : Processus de formation des barrages suspendus à partir de frasil.....	23
Figure 2.9 : Accumulation de frasil en-dessous de couvert de glace statique, Rivière Hallingdalselva, Norvège (E. Kanavin) (D'après Beltaos, 1995) .....	23
Figure 2.10 : Glace de rive et feuilles de glace .....	24
Figure 2.11 : Processus de la glace de rivière (Shen, 1996).....	27
Figure 2.12 : Géométrie d'une scène RSO spatiale (Henderosn et Lewis, 1998).....	29
Figure 2.13 : Profondeur de pénétration des fréquences des bandes C et X dans la neige en fonction de son degré d'humidité (d'après Gogineni, 1984).....	36
Figure 2.14 : Dépendance du coefficient de rétrodiffusion de la variabilité de la constance diélectrique dans le cas de diffusion de volume.....	37
Figure 2.15 : Diffusion du signal Radar dans un lac : a- glace avec bulle d'air ovales, b- glace sans bulle d'air et c- glace qui atteint le fond du lac (D'après Weeks <i>et</i> <i>al.</i> , 1981) .....	38
Figure 2.16 : Étapes du processus de génération de la GLCM .....	44
Figure 2.17 : Illustration du champ électrique et magnétique d'une onde électromagnétique plane. ....	48

Figure 2.18 : Exemples d'onde (A) Complètement polarisée, (B) Partiellement polarisée, et (C) non polarisée, (CCT, 2005).....	49
Figure 2.19 : Vecteur électrique E d'une onde complètement polarisée dans le plan x-y (CCT, 2005) .....	50
Figure 2.20 : Exemple de Signature polarimétrique d'une cible (CCT, 2005).....	52
Figure 2.21 : Division des classes modélisées sur plan H- $\alpha$ . Le texte contient une description des neuf classes Z (CCT, 2005) .....	53
Figure 2.22 : Types de diffusion de surface dans le plan entropie-anisotropie (CCT, 2005).....	54
Figure 2.23 : Création de seize classes à partir des huit classes originales du plan H- $\alpha$ de la figure (2.21), par la division de l'espace H A $\alpha$ à A = 0,5 (plan vert). .....	54
Figure 2.24 : Illustration artistique d'un dalmatien .....	56
Figure 2.25 : Exemple de fonction d'appartenance de la méthode du plus proche voisin .....	63
Figure 2.26 : Différentes formes de la fonction d'appartenance (eCognition user guide, 2003) .....	64
Figure 3.1 : Localisation du tronçon étudié de la rivière Saint-François et du champ de couverture spatiale des images RADARSAT-1 mode fin.....	67
Figure 3.2 : Localisation des localités, barrage, îles et affluents sur le tronçon étudié de la rivière Saint-François.....	69
Figure 3.3 : Modes de fonctionnement du RSO de RADARSAT-1 (d'après CCRS, 2002).....	70
Figure 3.4 : Mosaïque des Images CV-580 acquises le 18 février 2003 et leurs localisations sur la zone d'étude. ....	73
Figure 3.5 : Image Radarsat-1 mode F5 du 30 janvier 2002 en pseudo couleurs avec les vecteurs routes et cours d'eau principaux (tirés de la BDTQ). ....	74
Figure 3.6 : Profil longitudinal de la profondeur sur le tronçon étudié de la St-François.....	76
Figure 3.7 : Organigramme général de la méthodologie développée.....	79
Figure 3.8 : Schéma de principe pour la création du SIG .....	83
Figure 3.9 : Calcul de SV pour le sommet 5 et 6 en utilisant deux sommets en amont et en aval (d'après Dutton).....	85

Figure 3.10 : Calcul de $SV$ moyen pour le sommet 5 en utilisant un, deux et trois sommets en amont et en aval (d'après Dutton). .....	85
Figure 3.11 : Valeurs de sinuosité calculées et interpolées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François .....	87
Figure 3.12 : Création des centroïdes et de la ligne médiane à partir de polygones. ....	88
Figure 3.13 : Valeurs de largeur calculées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François... ..	89
Figure 3.14: Valeurs de profondeur calculées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François.....	91
Figure 3.15 : Valeurs de profondeur calculées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François.....	92
Figure 3.16 : Carte descriptive de la glace de la rivière Saint-François le 10 avril 1956.....	93
Figure 3.17 : Modèle numérique de terrain correspondant à l'étendue spatiale des images RADARSAT .....	94
Figure 3.18 : Organigramme descriptif des diverses étapes de l'analyse qualitative.....	96
Figure 3.19 : Organigramme descriptif des diverses étapes de l'analyse quantitative.....	98
Figure 4.1 : Localisation spatiale des 11 sous zones du site d'étude de la rivière Saint-François.....	103
Figure 4.2 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de l'aéroport .....	105
Figure 4.3 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de l'aéroport.....	106
Figure 4.4 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone en U .....	110
Figure 4.5 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone en U .....	111
Figure 4.6 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de la tête du canard.....	113
Figure 4.7 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de la tête du canard .....	114
Figure 4.8 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de l'île Therrien.....	116

Figure 4.9 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de l'île Therrien .....	116
Figure 4.10 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de l'île Brown.....	117
Figure 4.11 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de l'île Brown .....	117
Figure 4.12 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone du point #23.....	119
Figure 4.13 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone du point #23 .....	120
Figure 4.14 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone d'Ulverton .....	122
Figure 4.15 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone d'Ulverton .....	123
Figure 4.16 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone des points 13 et 20.....	125
Figure 4.17 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone des points 13 et 20.....	126
Figure 4.18 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de Richmond. ....	129
Figure 4.19 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de Richmond.....	129
Figure 4.20 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone du point #15.....	131
Figure 4.21 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone du point #15 .....	132
Figure 4.22 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de Windsor .....	133
Figure 4.23 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de Windsor.....	134
Figure 4.24 : Les emplacements et les noms des polygones utilisés dans l'analyse polarimétrique sur l'image CV-580 .....	135
Figure 4.25 : Signature polarimétrique obtenue pour le polygone « Eau libre ». ....	136
Figure 4.26 : Décomposition de Cloude et Pottier obtenue pour le polygone « Eau libre ». ....	136
Figure 4.27 : Hauteur du socle des signatures polarimétriques Co-Pol.....	138

Figure 5.1 :	Objets identifiés sur le site d'étude pour les images RADARSAT étudiées .....	144
Figure 5.2 :	Seuils des valeurs d'amplitudes pour les principales classes de glace .....	145
Figure 5.3 :	Différenciation entre la glace rugueuse et la glace agglomérée à l'aide du paramètre de texture GLCM Moyenne ( $0^\circ$ ).....	146
Figure 5.4 :	Amplitudes des classes de glace principales et secondaires. ....	146
Figure 5.5 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle.....	148
Figure 5.6 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle et directionnelle.....	150
Figure 5.7 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 6 janvier 2002 .....	151
Figure 5.8 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, de morphologie et de forme pour le 6 janvier 2002 .....	152
Figure 5.9 :	Comparaison des diverses matrices de séparabilité pour l'image du 6 janvier 2002.....	153
Figure 5.10 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle.....	155
Figure 5.11 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle et directionnelle.....	156
Figure 5.12 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 30 janvier 2002 .....	158
Figure 5.13 :	Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, de morphologie et de forme pour le 30 janvier 2002 .....	159

Figure 5.14 : Comparaison des diverses matrices de séparabilité pour l'image du 30 janvier 2002.....	160
Figure 5.15 : Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle.....	162
Figure 5.16 : Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle et directionnelle.....	163
Figure 5.17 : Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 4 mars 2002.....	164
Figure 5.18 : Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, de morphologie et de forme pour le 4 mars 2002.....	166
Figure 5.19 : Comparaison des diverses matrice de séparabilité pour l'image du 4 mars 2002	167
Figure 5.20 : Distance optimale de séparabilité en fonction du type de paramètre utilisé pour les images du 6 et 30 janvier et du 4 mars 2002 .....	168
Figure 6.1 : Schéma de l'approche de segmentation adoptée .....	172
Figure 6.2 : Exemple de paramètres de segmentation pour l'image RADARSAT du 6 janvier 2002.....	174
Figure 6.3 : Résultat de segmentation de l'image du 6 janvier 2002, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond .....	175
Figure 6.4 : Résultat de segmentation de l'image du 30 janvier 2002, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond.....	176
Figure 6.5 : Résultat de segmentation de l'image du 4 mars 2002, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond .....	177
Figure 6.6 : Résultat de segmentation de l'image du 11 février 2003, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond .....	178
Figure 6.7 : Segmentation multi-résolution de la zone en U de l'image RADARSAT .....	180
Figure 6.8 : Schéma général de la segmentation basée sur la classification .....	182

Figure 6.9 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 6 janvier 2002.....	183
Figure 6.10 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 30 janvier 2002.....	183
Figure 6.11 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 4 mars 2002.....	184
Figure 6.12 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 11 février 2003.....	184
Figure 6.13 : Segmentation basée sur la classification de la partie amont des images du 6-01-2002, 30-01-2002, 4-03-2002 et du 11-02-2003. ....	185
Figure 6.14 : Schéma d'utilisation des images RADARSAT-1 pour le développement de la structure hiérarchique et la classification Orientée Objet .....	188
Figure 6.15 : Photos de glace thermique de la zone de l'aéroport le 11 février 2003. ....	189
Figure 6.16 : Organigramme décisionnel pour l'eau libre et ses sous-classes .....	191
Figure 6.17 : Feuille de glace thermique bloquant un chenal d'eau libre. ....	192
Figure 6.18 : Blocs de glace thermique consolidés. ....	192
Figure 6.19 : Organigramme décisionnel pour la glace thermique et ses sous-classes. ....	195
Figure 6.20 : Accumulation de frasil le 4 mars 2002 en face du point d'observation #6A.....	196
Figure 6.21 : Image RADARSAT du 24 mars 2001, neige humide.....	197
Figure 6.22 : A : Image RADARSAT du 17 avril 2001, eau libre et glace de rive.....	198
Figure 6.23 : Glace agglomérée en amont d'un couvert de glace thermique .....	199
Figure 6.24 : Organigramme décisionnel pour la glace agglomérée et zones d'embâcle .....	200
Figure 6.25 : Couvert de glace en phase de formation à partir de radeaux de glace.....	201
Figure 6.26 : Schéma de classification du couvert de glace secondaire.....	202
Figure 6.27 : Structure hiérarchique de la classification Orientée Objet développé. ....	203
Figure 6.28 : Organigramme général de la Structure Hiérarchique de la Classification Orientée Objet.....	205

Figure 6.29 : Classification de l'image du 30 janvier 2002 avec différents niveaux d'information .....	206
Figure 6.30 : Exemple de classification de la glace de rivière vs l'eau libre (30 janvier 2002).	207
Figure 6.31 : Exemple de classification des zones partiellement ouvertes (30 janvier 2002)....	208
Figure 6.32 : Exemple de classification du couvert de glace selon sa nature (30 janvier 2002)	209
Figure 6.33 : Exemple des classes couvert complet de glace thermique et glace de rive thermique (30 janvier 2002).....	210
Figure 6.34 : Exemple de la classe : glace faiblement agglomérée (30 janvier 2002) .....	211
Figure 6.35 : a- classification du couvert de glace selon sa nature, b- classification du couvert de glace selon ce qu'il représente; zone de l'île Therrien et de l'île Brown (30 janvier 2002).....	212
Figure 6.36 : Exemple de la classe « rapides », zone de Richmond (30 janvier 2002).....	212
Figure 6.37 : Classification « eau libre vs couvert de glace » de la partie aval de l'image RADARSAT du 11 février 2003.....	213
Figure 6.38 : Classification « eau libre vs couvert de glace » de la partie amont de l'image RADARSAT du 11 février 2003.....	214
Figure 6.39 : Classification « eau libre vs couvert de glace » de la zone de la ville de Windsor l'image RADARSAT du 11 février 2003.....	215
Figure 6.40 : Classification de l'image RADARSAT du 11 février 2003 selon la nature du couvert de glace; en haut la partie aval de la rivière et en bas la la zone de la ville de Windsor.....	216
Figure 6.41 : Classification de la partie amont de l'image RADARSAT du 11 février 2003 selon la nature du couvert de glace .....	217
Figure 6.42 : Classification des zones à risque d'embâcle dans la partie aval de la rivière le 11 février 2003 .....	218
Figure 6.43 : Classification des zones à risque d'embâcle dans la partie amont de la rivière le 11 février 2003 .....	219
Figure 6.44 : Classification des zones à risque d'embâcle dans la zone de Windsor le 11 février 2003 .....	220

Figure 6.45 : Classification des zones couverte completement de glace thermique de la partie aval de la riviere le 11 fevrier 2003.....	221
Figure 6.46 : Schéma des étapes automatisées du processus de classification des images RADARSAT.....	222
Figure 6.47 : Automatisation de la correction radiométrique.....	223
Figure 6.48 : Automatisation de l'application d'un masque sur les zones hors riviere.....	223
Figure 6.49 : Automatisation de la segmentation, classification et export des résultats .....	223



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les bandes Radar (d'après Ulaby <i>et al.</i> , 1981) .....	28
Tableau 2.2 : Les facteurs influençant la puissance reçue par l'antenne Radar .....	34
Tableau 2.3 : Constantes diélectriques (D'après Weibert <i>et al.</i> , 2001) .....	36
Tableau 2.4 : Effets des paramètres du système Radar sur la rétrodiffusion des ondes (D'après H-Q 1996) .....	38
Tableau 2.5 : Effets des caractéristiques de la glace sur la rétrodiffusion des ondes (D'après H-Q 1996) .....	39
Tableau 3.1 : Satellite RSO en orbite durant la période 2000-2001 .....	70
Tableau 3.2 : Modes d'opération à haute résolution du RSO de RADARSAT-1 .....	71
Tableau 3.3 : Images RADARSAT-1 acquises .....	72
Tableau 3.4 : Exemple de paramètres objet pour l'analyse quantitative .....	97
Tableau 4.1 : Synthèse des résultats de la décomposition de Cloude et Pottier .....	137
Tableau 5.1 : Objets identifiés des images RADARSAT et leur classe de glace correspondante .....	143
Tableau 5.2 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude pour l'image du 6 janvier 2002..	147
Tableau 5.3 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle optimisée pour le 6 janvier 2002 .....	148
Tableau 5.4 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle et directionnelle optimisée pour le 6 janvier 2002 .....	149
Tableau 5.5: Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 6 janvier 2002 .....	150
Tableau 5.6 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, morphologie et de forme pour le 6 janvier 2002 .....	152

Tableau 5.7 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude pour l'image.....	154
Tableau 5.8 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle optimisée pour le 30 janvier 2002.....	155
Tableau 5.9 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle et directionnelle optimisée pour le 30 janvier 2002.....	156
Tableau 5.10 :Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 30 janvier 2002 .....	157
Tableau 5.11 :Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, morphologie et de forme pour le 30 janvier 2002 .....	159
Tableau 5.12 :Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude pour l'image .....	161
Tableau 5.13 :Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle optimisée pour le 4 mars 2002 .....	162
Tableau 5.14 :Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle et directionnelle optimisée pour le 4 mars 2002 .....	163
Tableau 5.15 :Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 4 mars 2002 .....	164
Tableau 5.16 :Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, morphologie et de forme pour le 4 mars 2002.....	165
Tableau 6.1 : Caractéristique de l'objet #21 de l'image RADARSAT du 6-01-2002 .....	179
Tableau 6.2 : Résultat de la classification de l'image RADARSAT du 11 février 2003.....	221

## RÉSUMÉ

La glace de rivière est un phénomène récurrent et caractéristique de la majorité des rivières du Canada. Sa présence affecte le régime d'écoulement et peut influencer ainsi le niveau d'eau, la structure des berges et le transport des sédiments. Sans aucun doute, ces changements perturbent l'équilibre de l'écosystème en place. En plus, la glace de rivière est aussi réputée comme cause principale d'inondations hivernales dues aux embâcles, de perturbations à la navigation et à la production d'hydroélectricité. Dans cette perspective, une bonne caractérisation du couvert de glace de rivière est un atout considérable.

Nous avons été les premiers à adopter l'approche dite, *orientée objet*, pour la caractérisation de la glace de rivière. Cette approche repose sur l'objet comme unité de base de classification, elle se distingue des méthodes de classification conventionnelles par sa prise en considération de la topologie et les relations sémantiques des objets. Une méthode de segmentation en objets des images RADARSAT-1 a alors été développée. L'objectif était d'avoir des objets représentatifs des différents phénomènes de glace observés à diverses échelles spatiales, tout en préservant la représentativité des relations géométriques et sémantiques des objets.

La zone d'étude est le tronçon de la rivière Saint-François reliant la ville de Windsor à celle de Drummondville (Qc). Ce site est connu par la présence de problèmes dus à la glace de rivière, une morphologie variable. De plus, une banque de données historiques sur la glace est disponible. Un total de 19 images RADARSAT-1 *mode fin* ont été acquises au cours de trois hivers et plusieurs campagnes d'observations de terrain ont été menées.

Un système d'information géographique (SIG) a été monté pour fournir les couches d'information contextuelles des images RADARSAT. Largeur, sinuosité et profondeur du chenal sont des exemples de couches matricielles calculées et présentées par le SIG. Des couches thématiques telles que rives, grandes et petites îles et zones de rapides ont aussi été intégrées dans le SIG.

Afin de comprendre les liens qui existent entre l'information contenue dans les images RADARSAT-1 et celle présente dans le SIG, nous avons réalisé une analyse qualitative et une quantitative. L'analyse qualitative a mis en évidence les liens entre (1) la théorie de la glace de rivière et du signal radar, (2) le contexte morphologique établi dans le SIG et (3) les observations terrain et historiques disponibles pour le site d'étude. Aussi, par rapport à l'utilisation unique des caractéristiques de l'image RADARSAT-1, l'analyse quantitative a confirmé l'apport des

caractéristiques morphologiques de la rivière et ceux liées à la forme des l'objet dans l'amélioration de la classification. L'information extraite à partir de ces deux analyses a été exprimée sous forme de règles logiques de décision dans l'approche de classification. Ces règles sont synthétisées dans une structure appelée Structure Hiérarchique de la Classification orientée objet. Élément essentiel de la classification orientée objet, la structure hiérarchique que nous avons définie est flexible quant à son montage et facilement transférable d'une image à une autre.

En somme, nous avons démontré que la classification orientée objet est appropriée pour la caractérisation de la glace de rivière. L'approche développée a permis (1) de bâtir une connaissance sur les processus de glace de rivière (2) de ressortir des informations sur ce que le couvert de glace représente, en plus de celles relatives à sa nature et (3) de transférer cette expertise directement à la machine, et ainsi augmenter l'intelligence, la capacité et l'autonomie du système.

Les résultats obtenus lors de cette recherche sont très prometteurs. Désormais, en utilisant les images RADARSAT-1 mode fin nous sommes capables d'aller chercher automatiquement les caractéristiques des phénomènes que le couvert de glace représente (ex. localiser une zone d'embâcle et évaluer son risque). L'objectif principal et les objectifs spécifiques fixés pour cette étude ont donc été atteints. Nous avons ainsi ouvert la voie à d'autres études sur la glace de rivière (modélisation du signal rétrodiffusé par la glace, perfectionnement du SIG, évaluation de la précision des classifications, apport de la polarimétrie RSO) et à des applications dans des cas d'urgence.

# 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## 1.1 Introduction

L'étude des mécanismes liés à la glace de rivière est une discipline récente et c'est seulement durant les trente dernières années que leur compréhension a commencé à intéresser plusieurs chercheurs (Beltaos, 1995). La compréhension de ce phénomène revêt d'une grande importance, car ses répercussions sont directement liées à la vie courante de la population. En effet, des inondations causées par la glace de rivière constituent un risque pour toutes les régions nordiques du globe. À l'échelle du Canada, la menace est générale et le problème se fait sentir de l'Est à l'Ouest et du Nord au Sud (Beltaos, 1995). Ainsi, durant la période entre 1983 et 1987, 35 % des inondations recensées sur le territoire canadien ont été causées par la glace de rivière (Environnement Canada, 1988). À l'opposé des crues estivales, les inondations hivernales causées par la glace de rivière sont difficilement prévisibles et atteignent des niveaux d'eau inégalables. Il ne faut surtout pas oublier que les opérations de sauvetage et d'évacuation de la population sont très difficiles et délicates durant la saison froide. Une autre caractéristique qui augmente l'indice de risque de ce genre d'inondations est leur rapidité. Ainsi, le risque de dommages humains et matériels est alors plus élevé. À titre d'exemple, en 1986 dans la petite ville de Winisk (Ontario), deux personnes ont péri et 53 des 60 bâtiments (80 %) ont été détruits en moins de 15 minutes! (Beltaos, 1995). La province du Québec avec un million de lacs et de cours d'eau n'est nullement à l'abri de telles inondations. Déjà en 1865, cinquante personnes ont péri à la suite de trois inondations liées à la glace de rivière. Plus récemment, en 1989, 1000 personnes ont été évacuées dans la région de Drummondville à cause des risques associés à un embâcle sur la rivière Saint-François. La ville de Beauceville sur les rives de la Chaudière a aussi été dévastée en 1991 (Beltaos, 1995).

Dans un autre volet, la glace de rivière influence directement l'économie canadienne et plus spécifiquement l'énergie hydroélectrique. En moyenne, 60 % de la production d'électricité nationale est d'origine hydroélectrique (ONÉ, 2001). Au Québec, l'électricité provient dans une proportion de 93,6 % des centrales hydroélectriques, principalement des 80 centrales d'Hydro-Québec réparties sur l'ensemble du territoire québécois (MRN, 2002). En fait, le Québec a axé une partie importante de sa croissance économique et du développement de ses activités sur le secteur de l'énergie en mettant en valeur et en exploitant les ressources hydrauliques disponibles sur son territoire (MRN, 2002). En plus, au chapitre des emplois, en 1999, l'industrie de l'électricité

soutenait **20 328** emplois dans les secteurs de la production, du transport et de la distribution (MRN 2002). À titre indicatif, en 1999, la valeur ajoutée du secteur de l'électricité s'est élevée à **6 625** millions de dollars courants. Ainsi, pour la même année, la part du secteur électrique dans le produit intérieur brut total du Québec s'est élevée à 3,8 %. Cependant, en l'an 2000 et à cause de la baisse des niveaux des milieux hydriques, une diminution de 27 % de l'exportation québécoise d'électricité a été observée (ONÉ, 2001). Évidemment, la glace de rivière, outre les inondations, provoque des baisses des niveaux d'eau et en l'occurrence des pertes en énergie hydroélectrique, par exemple, 30 % au Canada durant l'année 1973 (Beltaos, 1995).

Les pertes économiques liées à la glace de rivière se résument essentiellement dans les quatre points suivants (Ice Engineering, 1999) :

- destruction des structures extra riveraines dues aux inondations : routes, bâtiments industriels et commerciaux, résidences, véhicules...etc.,
- pertes causées par les forces exercées par la glace de rivière sur les structures intra riveraines : ponts, barrages, quais, prises d'eau... etc.,
- perturbation de la navigation, et
- perturbation de la production d'énergie hydroélectrique.

En plus des risques sur la sécurité publique et les pertes économiques, attribuables aux différentes actions de la glace de rivière, d'autres répercussions sont enregistrées. En effet, les rivières sont des écosystèmes complexes et la glace de rivière y induit des perturbations sur plusieurs plans. Les plus importantes perturbations sont celles qui affectent le régime d'écoulement, la structure des berges et le transport des sédiments (Beltaos, 1995).

La glace de rivière peut aussi être utilisée comme indicateur environnemental de changement climatique à l'échelle globale (Prowse et Beltaos, 2002). En effet, le suivi dans le temps des dates de formation et de disparition du couvert de glace permet de suivre le phénomène de réchauffement planétaire. Par exemple, le suivi entre 1693 et 1999 de ces dates pour la rivière Tornio (Finlande) a permis de constater que la débâcle printanière en 1999 survient à un mois plus tôt qu'en 1693 (UNEP, 2002).

Une liste exhaustive des interactions entre la glace de rivière et les mécanismes de la dynamique fluviale (Morse et Hicks, 2005; Beltaos, 2000) s'étale sur beaucoup plus que les quelques lignes précédentes. Nous nous y limiterons, en guise d'introduction.

## 1.2 Problématique

Afin de cerner la problématique de ce travail de recherche, citons d'abord quelques constats extraits de la littérature :

- En dépit de l'importance socio-économique et environnementale des processus de formation de la glace de rivière dans plusieurs régions du globe, leur étude est dans ses **premières** phases de développement et plusieurs processus de glace de rivière ne sont que **vaguement** compris (CRIPE, 2001).
- Actuellement il n'y a **aucune** méthode théorique fiable pour prévoir les endroits des ponts de glace (Beltaos, 1995).
- **Très peu** de choses sont connues sur les mécanismes de rupture des fronts de glace, il n'est pas possible de prévoir sous quelles conditions ils se forment, ni comment ils se déplacent, moins encore où ils s'arrêtent. La solution de ce problème donnera une réponse à plusieurs questions pertinentes sur la débâcle (Beltaos, 1995).
- La fréquence de la débâcle est étroitement liée aux problèmes de prévisions du début de la débâcle et l'embâcle. Plusieurs travaux sont basés, seulement, sur des méthodes **semi-empiriques** pour effectuer des prévisions à court terme (Shulyakovskii, 1966, Ashton, 1986b, Beltaos, 1990a).
- Certains mécanismes qui déclenchent la débâcle ont été élucidés ces dernières années, plusieurs restent encore **inconnus** (Beltaos, 1995).
- Une indication claire de la connaissance **incertaine** de la glace de rivière est le grand nombre de paramètres qui doivent être ajustés pendant le calibrage d'un modèle de glace (Ice Engineering, 1999).
- De façon générale, il est recommandé d'employer des valeurs suggérées des paramètres physiques d'un modèle de glace. Une valeur définie pour chaque paramètre **ne peut pas** encore être calculée à partir de notre compréhension de la physique de glace. Malheureusement, ce n'est pas un état très satisfaisant (Ice Engineering, 1999).
- Les problèmes de la glace de rivière sont **spécifiques au site étudié**, et ainsi leur analyse dépend fortement d'informations précises sur la géométrie de la rivière en question et sa dynamique de glace (Prime, 1996).

- Le « *Cold Regions Research and Engineering Laboratory* » (CRREL) recommande de **bâtir une base de données sur les embâcles**, et ce, dans le but (1) d'établir les impacts socio-économiques des inondations avec glace (2) d'évaluer les risques d'embâcles (3) de mettre sur pied une fondation pour avancer les recherches et (4) de réaliser des interventions efficaces (White, 1999).

De plus, les principales difficultés liées à la caractérisation de la glace de rivière reposent sur les faits suivants :

- i. Il y a **un besoin** croissant de prévoir et d'évaluer quantitativement la formation du couvert de glace, son évolution et sa dissolution, aussi bien que pour identifier les processus fondamentaux qui affectent le développement du couvert de glace (Davar *et al.*, 1996).
- ii. Les mesures des épaisseurs de glace lors de l'embâcle sont **rare**s, surtout pour les embâcles survenus en fin d'hiver. Cela est dû essentiellement à l'accès dangereux et à la difficulté de prendre des mesures (Beltaos, 1995).
- iii. Pourquoi et quand un embâcle se dégage n'est compris que **partiellement**, mais il est soupçonné que les conditions du front de glace et ceux de la glace elle-même, le débit et l'effet thermique y jouent un rôle (Beltaos, 1995).

Les termes mentionnés ci-dessus tels que « vaguement », « besoin », « incertaine », « inconnu », « aucune méthode », « rares » indiquent clairement que les processus de glace de rivière ne sont pas tous bien connus et que le besoin de conjuguer les efforts pour mieux les comprendre devient une nécessité. En effet, les trois derniers points démontrent un besoin important pour la caractérisation de la glace de rivière. Notre travail de recherche s'inscrit donc dans l'ensemble des efforts menés pour mieux comprendre et caractériser la glace de rivière.

Mieux la glace de rivière est caractérisée, meilleur sera son suivi et meilleure sera la compréhension de ses processus et mécanismes. Le recours à la télédétection spatiale est souvent conditionné par la résolution spatiale et temporelle, ainsi que la qualité radiométrique des images acquises (Bonn et Rochon, 1996). Lors du suivi de la glace de rivière, il est indispensable d'avoir une idée sur son évolution dans l'espace et dans le temps. Par exemple, la débâcle dépend des indices de force de la glace et de leur variation spatiale et temporelle (Demuth et Prowse, 1991).

Durant la dernière décennie, plusieurs travaux ont été menés sur le lien entre le Radar et la glace de rivière. Avant le lancement des satellites Radar à synthèse d'ouverture (RSO), ce potentiel Radar a été exploré via des capteurs aéroportés. Les études effectuées (Leconte et Klassen, 1991;

Leconte et Pultz, 1991; Pultz *et al.*, 1991; Melloh et Gatto, 1990) concluent toutes à une affirmation positive concernant le suivi de la glace de rivière par Radar. Le RSO a été explicitement identifié comme étant le capteur de télédétection le plus adéquat pour ce genre d'études (Petryk *et al.*, 1996). Le premier satellite à offrir une fréquence de passage, une résolution spatiale (8m) et une indépendance des conditions météorologiques (nuages) appropriées au suivi de la glace de rivière est RADARSAT-1. Doté d'un RSO performant, les images en mode fin acquises à travers ce capteur permettent de déterminer la distribution spatiale et la variation temporelle des caractéristiques générales du couvert de glace (Thibault *et al.*, 1997; Leconte *et al.*, 1998; Murphy *et al.*, 2001; Weber *et al.*, 2001). En plus, le *National Remote Sensing Working Group- (NRSWG)* (Roger A. Stacey Consultants Ltd, 1997) a recommandé la mise sur pied d'un projet vérifiant explicitement et amplement le potentiel de RADARSAT-1 pour le suivi de la glace de rivière et la détection d'embâcles. Les études précitées, bien que confirmant le potentiel de RADARSAT-1 (mode fin), ne réalisent pas les objectifs du projet proposé par le *NRSWG*. En effet, le potentiel des images RADARSAT-1 pour la caractérisation de la glace de rivière dépend de la technique de classification utilisée. En fait, les méthodes de classification conventionnelles considérant le pixel comme unique source d'information, telle que la classification supervisée ou celle dite non supervisée (Tso et Mather, 2001), limitent énormément le potentiel de ces images pour une telle application. Ces méthodes permettent, au meilleur des cas, d'arriver à une caractérisation de la glace de rivière au niveau de sa nature (Gauthier *et al.*, 2006; Weber *et al.*, 2003; Tracy et Daily, 2003; et Pelletier et Hicks, 2003). Considérant, à titre d'exemple, un ensemble de pixels adjacents classés avec ces méthodes comme étant de la glace fortement agglomérée. Toutefois, l'ensemble de ces pixels situés dans une zone d'obstruction de la rivière constitue un risque considérable de formation d'embâcle. Évidemment, l'évaluation du risque d'embâcle est beaucoup plus importante que la classification individuelle des pixels.

Les études réalisées jusqu'à présent ne permettent pas (1) de développer une technique automatique ou semi-automatique d'identification des caractéristiques de la glace, et (2) d'établir une méthode opérationnelle pour le suivi du couvert de glace et si possible de prévision d'embâcles. Ainsi, dans ce contexte, notre sujet de recherche intitulé « Développement d'une approche de classification orientée objet pour une meilleure caractérisation de la glace d'une rivière de taille moyenne à l'aide des images du satellite RADARSAT-1 et d'un système d'information géographique : cas de la rivière Saint-François, Québec. » est amplement justifié. La rivière Saint-François est réputée par la présence de problèmes dus à la glace de rivière.

### **1.3 Hypothèses de recherche**

Dès le début des années 90, Leconte et Klassen (1991) avaient été les premiers à souligner le potentiel de l'utilisation du « Radar à synthèse d'ouverture » pour l'étude de la glace de lac et de rivière. Dans la même lignée, Hydro-Québec a réalisé des travaux en utilisant des images RADARSAT-1 sur différents réservoirs et rivières au Québec (Hydro-Québec, 1996). Récemment, Weber *et al.*, 2001 ont identifié les différents types de glaces de rivière en utilisant les images RADARSAT-1 (mode fin). De l'analyse des résultats de ces travaux nous concluons que la classification des images Radarsat-1 par les méthodes conventionnelles permet une distinction de la nature de la glace de rivière.

**Cependant, nous pensons qu'une meilleure caractérisation de la glace de rivière et des risques d'embâcles est possible en utilisant une classification orientée objet des images Radarsat-1 (mode fin) et en introduisant dans le processus des données contextuelles provenant d'un système d'information géographique (données morphologiques et/ou météorologiques, historiques et les mesures *in situ*). En plus de cette hypothèse de base, nous formulons l'hypothèse suivante :**

- ◆ **La structure et le type de glace influencent le signal Radar rétrodiffusé. Ainsi, des méthodes telles que l'analyse de texture et l'analyse polarimétrique devraient permettre d'extraire des informations jusqu'à ce jour inexploitées.**

### **1.4 Objectifs de recherche**

Nous visons à améliorer la compréhension du phénomène de la glace de rivière et à fournir, dans une perspective opérationnelle, un outil de classification capable d'améliorer le processus du suivi et de la caractérisation de la glace de rivière. Ainsi, nous nous sommes fixé les objectifs principaux suivants :

- Caractériser la glace d'une rivière de taille moyenne en utilisant une approche de classification orientée objet combinant :
  - Image(s) RADARSAT-1 en mode fin,
  - Système d'information géographique intégrant données morphologiques et historiques, et

- Observations et mesures de terrain.
- Augmenter le nombre de caractéristiques détectables de la glace par rapport aux méthodes de classification conventionnelles généralement appliquées dans la littérature.

Pour la réalisation de ces objectifs, nous nous sommes fixé les objectifs secondaires suivants :

- Monter un système d'information géographique pour mieux caractériser contextuellement les images RADARSAT-1;
- Développer une segmentation des images RADARSAT-1 pour passer des pixels aux objets tout en reflétant les divers phénomènes de glace de rivière observés à diverses échelles spatiales;
- Développer une méthodologie d'extraction des connaissances sur la glace de rivière pour les synthétiser sous forme d'une structure hiérarchique de la classification Orientée Objet;
- Développer une méthode semi-automatique pour extraire les informations sur la glace de rivière.

## 1.5 Originalité de la recherche

Si les objectifs ci-dessus sont atteints, ce travail de caractère multidisciplinaire débouchera sur des contributions scientifiques originales. En effet, nous aurons été les premiers à développer une technique automatique d'identification des caractéristiques de la glace et à proposer une méthode opérationnelle pour le suivi du couvert de glace et de prévision d'embâcles par télédétection. Plus spécifiquement, sur le plan du traitement des images Radar, nous aurons développé (1) une méthodologie de construction de la structure hiérarchique de la classification orientée objet (2) un processus de segmentation en objets des images RADARSAT spécifique à la glace de rivière (3) une procédure originale pour caractériser la glace de rivière à plusieurs niveaux d'information y compris l'évaluation du degré de risque lié à la présence des embâcles. Plus spécifiquement, sur le plan de la surveillance de glace de rivière, nous aurons (1) développé l'automatisation des processus de segmentation et de classification (2) proposé un outil s'intégrant dans le schéma opérationnel d'information des différentes entités décisionnelles intéressées par le suivi et la caractérisation de la glace de rivière et (3) évalué le temps de traitement optimal en cas d'urgence (embâcle et/ou inondation) dès l'acquisition d'une image RADARSAT-1 (ou RADARSAT-2\*) jusqu'à la fin de la classification. \* Lancement prévu pour fin 2006.

## **1.6 Plan du document**

Ce document est présenté en sept chapitres dont le premier chapitre est constitué de la présente introduction, qui expose la problématique traitée dans ce travail de recherche et identifie ses objectifs et ses points d'originalité. Dans le deuxième chapitre, nous présentons la théorie et les concepts fondamentaux reliés à cette étude. Vu l'aspect multidisciplinaire de cette étude, ce second chapitre est subdivisé en quatre sous chapitres qui présentent respectivement (a) la formation de la glace de rivière (b) la théorie du signal Radar et de son interaction avec la glace de rivière (c) l'analyse de texture et l'analyse polarimétrique et enfin (d) la classification orientée objet. Le troisième chapitre de ce document est consacré à la méthodologie développée pour atteindre les objectifs fixés pour cette recherche. Les chapitres 4, 5 et 6 présentent les différents résultats obtenus. Ces chapitres sont respectivement : (4) Résultats de l'analyse qualitative; (5) Résultats de l'analyse quantitative; (6) Classification orientée objet. Dans ce sixième chapitre, nous décrivons les résultats de la segmentation des images RADARSAT-1, la structure hiérarchique développée, les résultats de la classification orientée objet, ainsi que les aspects de l'application opérationnelle de l'approche développée. Le septième et dernier chapitre est consacré aux conclusions et aux contributions scientifiques originales de notre approche. Nous y suggérons également une liste de recommandations et perspectives de recherche. Finalement, la liste des références bibliographiques et les diverses annexes sont présentées à la fin de ce document.

## **2. THÉORIE ET CONCEPTS**

---

Le présent chapitre est consacré à la présentation des concepts théoriques abordés dans le cadre de cette étude. Il est subdivisé en quatre sous chapitres :

1. Glace de rivière;
2. Radar à Synthèse d'Ouverture et glace de rivière;
3. Texture et Polarimétrie Radar;
4. Classification orientée objet.

Dans le premier sous chapitre « Glace de rivière » nous présentons quelques définitions et caractéristiques de la glace ainsi que la théorie de base de la glace de rivière. Le deuxième sous chapitre « Radar à Synthèse d'Ouverture et glace de rivière » est consacré à la présentation (i) de la théorie des systèmes Radar à Synthèse d'Ouverture et (ii) les aspects théoriques de l'interaction du signal Radar avec la glace de rivière. Du moment que nous avons touché dans cette étude à la texture et la polarimétrie Radar, il est pertinent de présenter un bref aperçu sur la théorie de ces deux concepts. Ainsi, le troisième sous chapitre « Texture et Polarimétrie Radar » est consacré à leur description. À noter que ces deux concepts sont regroupés dans le même sous-chapitre, mais chacun est traité indépendamment. Finalement, le quatrième sous-chapitre intitulé « Classification orientée objet » est consacré à la présentation de la théorie de ce type de classification et de ces divers aspects.

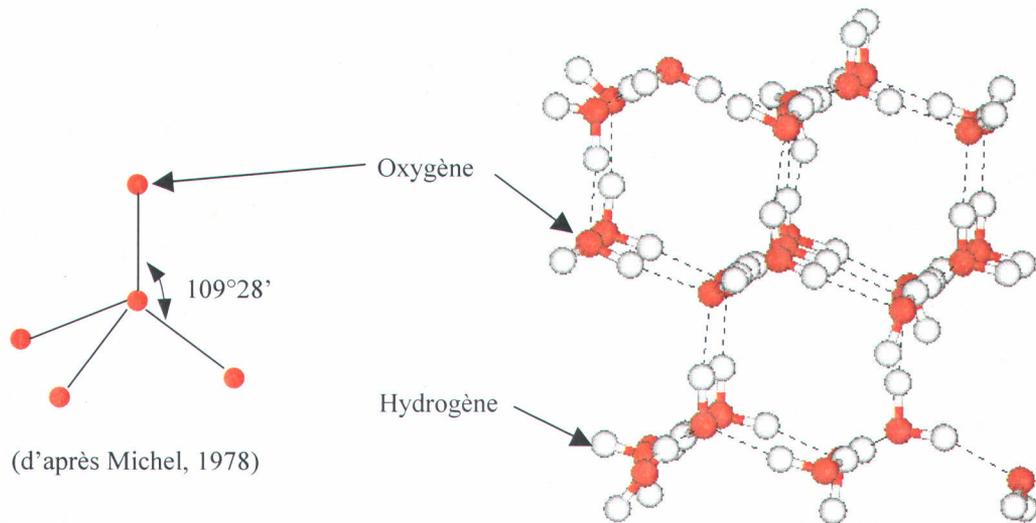
### **2.1 Glace de rivière**

Ce chapitre est consacré à la description de la glace de rivière, sa formation, ses processus, son dynamisme, et ses caractéristiques spécifiques. La compréhension de ces éléments nous permet de mieux comprendre l'interaction entre le signal radar et la glace de rivière. Nous élaborons ici les éléments les plus cruciaux pour notre étude.

#### **2.1.1 Structure et caractéristiques de la glace**

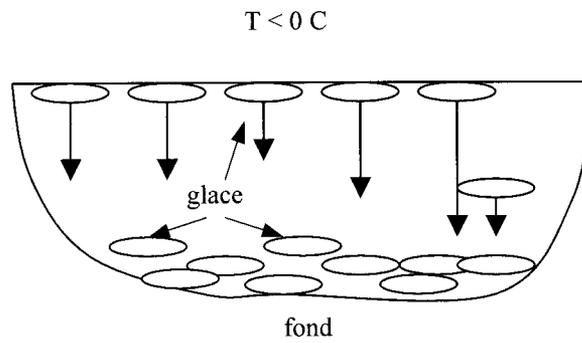
La glace possède 12 différentes structures cristallines plus deux états amorphes (Schulson, 1999). Dans les conditions terrestres la glace se trouve le plus souvent sous la forme hexagonale, dite glace Ih. Dans la structure hexagonale, les atomes d'oxygène de la molécule d'eau ont un

emplacement régulier alors que les atomes d'hydrogène eux sont placés de façon aléatoire (Hobbs, 1974). Les atomes d'oxygène ont un arrangement tétraédrique dans les cristaux de glace et l'angle entre leurs directions est de  $109^{\circ}28'$  (voir figure 2.1)

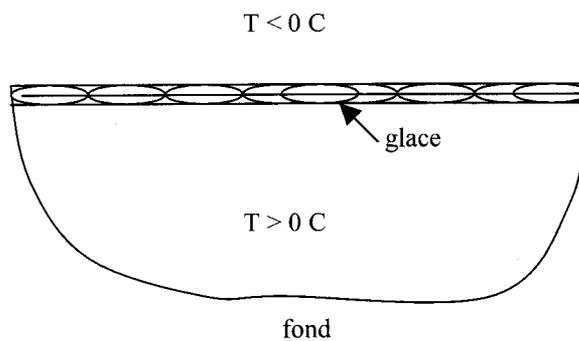


**Figure 2.1 : Structure de la glace hexagonale, ih.**

Une des plus importantes propriétés physiques de la glace est qu'elle est moins dense que l'eau liquide. La densité de la glace est de l'ordre de  $0.9166 \text{ g cm}^{-3}$  ce qui lui permet de flotter à la surface de l'eau liquide. Cette propriété est exceptionnelle et l'une des caractéristiques fondamentales de l'eau. En effet, mis à part l'eau, pour tous les autres éléments naturels, la densité augmente lors du passage de la phase liquide à la phase solide. En parallèle, comparativement à celle de l'eau liquide, la conductivité thermique de la glace est faible. Ces deux caractéristiques permettent la continuation de la vie dans les océans, les lacs et les cours d'eau durant les périodes de froid (voir figure 2.2).



a- Cas imaginaire : densité de glace supérieure à la densité de l'eau liquide



b- Cas réel : densité de glace inférieure à celle de l'eau liquide

**Figure 2.2 : Rôle de la densité de glace dans le maintien de la vie dans les écosystèmes aquatiques.**

Nous remarquons dans la figure 2.2 que si la densité de la glace était supérieure à celle de l'eau liquide alors la glace s'accumulerait au fond jusqu'à ce qu'il n'y a plus d'eau liquide. Par contre, ce qui arrive dans la nature c'est que la glace a une densité plus faible que celle de l'eau liquide, et de ce fait forme une couche à la surface de cette dernière, ainsi la vie est maintenue.

### 2.1.2 Formation de la glace de rivière

La formation et la progression de la glace de rivière sont contrôlées principalement par les deux facteurs suivants :

- les conditions météorologiques, et
- les conditions et régime d'écoulement (débit et vitesse d'écoulement).

Naturellement, la glace de rivière passe par deux étapes essentielles qui sont la phase de formation et celle de détérioration-disparition. Ces deux phases sont observées respectivement durant la période de gel et celle de dégel. Nous pouvons ainsi classer les processus de la glace de rivière en trois processus principaux : gel, débâcles et embâcles (SCRHCENB, 1989).

### **2.1.2.1 Gel**

Le gel dans une rivière est la phase durant laquelle l'eau passe de la phase liquide à la phase solide (glace). Cette formation de glace est contrôlée par le taux de transfert de chaleur entre l'eau et l'air. Selon la vitesse de transfert de chaleur et la vitesse du courant, plusieurs types de glace de rivière peuvent apparaître. Dans les quelques lignes qui suivent, nous essayons de présenter une vue d'ensemble sur la formation de la glace fluviale durant la période de gel.

#### ***2.1.2.1.1 Refroidissement de la surface de l'eau***

L'échange thermique à la surface de l'eau est exprimé sous forme de flux de chaleur entre l'eau, l'air et le lit de la rivière. L'échange le plus important est généralement celui entre l'air et la surface de l'eau libre (Ashton, 1986). Le bilan thermique des différents flux de chaleur (énergie) transférée par unité de surface et par unité de temps est le suivant :

$$Q_* = Q_S + Q_L + Q_H + Q_E + Q_P + Q_G \quad \text{Équation 1}$$

Où :

$Q_*$  : flux net de chaleur entre l'eau et l'air,

$Q_S$  : flux net solaire ou des radiations à courtes longueurs d'ondes,

$Q_L$  : flux net des radiations à longues longueurs d'ondes,

$Q_H$  : flux de chaleur dû à la convection,

$Q_E$  : flux de la chaleur latente dû à l'évaporation ou la condensation,

$Q_P$  : flux net de chaleur dû aux précipitations, et

$Q_G$  : flux net de chaleur de friction ( $Q_F$ ), eau souterraine et du lit de la rivière ( $Q_B$ )

Dans des conditions d'eau libre, le terme  $Q_G$  de l'équation 1 est négligeable par rapport aux autres termes (Beltaos, 1995). Toutefois, le même terme est d'une très grande importance dans des conditions de couvert de glace. Le facteur qui cause une très grande perte de chaleur à la surface de l'eau est la précipitation en neige. Non seulement cette précipitation solide a une température égale ou inférieure au point de congélation, mais aussi la chaleur latente consommée pour faire fondre la neige est grande (Beltaos, 1995). Les termes  $Q_H$  et  $Q_E$  sont influencés par la vitesse du vent. Le transfert de la chaleur par convection de l'eau vers l'air augmente rapidement avec la vitesse du vent. Ceci affecte manifestement le flux net de chaleur entre l'eau et l'air  $Q_*$ .

Calculer cette dernière valeur ( $Q_*$ ) à partir de l'équation 1 n'est pas une tâche facile. Des détails sur le flux net de chaleur entre l'eau et l'air se trouvent, entre autres, dans Ashton (1986); Dingam *et al.* (1968); Michel (1971); Raphael (1962) et Shen et Chiang (1984). À cause de la difficulté de calculer le bilan  $Q_*$ , une approche semi-empirique est utilisée (Beltaos, 1995). Celle-ci se résume dans l'équation 2 :

$$Q_* = C_0(T_w - T_a) \quad \text{Équation 2}$$

Où :

$C_0$  : coefficient de transfert de chaleur ( $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}$ ),

$T_w$  : température de l'eau en  $^{\circ}\text{C}$ , et

$T_a$  : température de l'air en  $^{\circ}\text{C}$ .

Le coefficient  $C_0$  est calculé à partir des informations météorologiques (Dingman et Assur, 1969).

Il est très important de déterminer dans une rivière la position de l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$ . En effet, la glace dans une rivière ne se forme que lorsque la température de l'eau descend sensiblement au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . L'équation 3 présente une méthode pour calculer la position de l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$  dans une rivière qui tout en coulant vers l'aval se refroidit:

$$l_{T_w=0} = \frac{-\rho_w C_p V H}{C_o} \ln \left[ \frac{(-T_a)}{(T_{w,0} - T_a)} \right] + l_{T_w,0} \quad \text{Équation 3}$$

Où :

$l_{T_w=0}$  : la position vers l'aval en mètres dans laquelle l'eau atteint la température 0 °C,

$l_{T_w,0}$  : la position initiale en amont dans laquelle l'eau est de température  $T_{w,0}$  (°C),

$\rho_w$  : densité de l'eau en  $\text{Kg m}^{-3}$ ,

$C_p$  : chaleur massique de l'eau ( $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ),

$V$  : la vitesse de l'écoulement ( $\text{m s}^{-1}$ ),

$H$  : la profondeur de l'écoulement (m), et

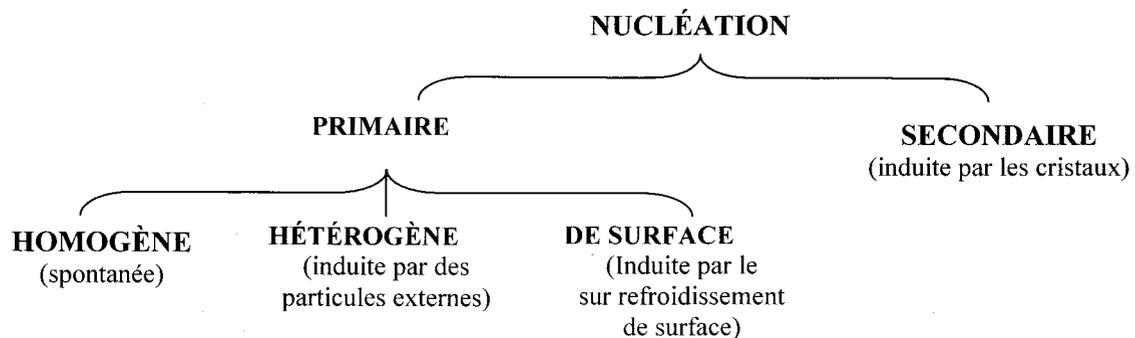
$T_a$  : la température de l'air (°C).

La position de l'isotherme 0 °C est contrôlée par le rapport entre la surface de l'eau qui refroidit et le volume d'eau qui s'écoule en dessous. Plus ce ratio est grand, plus l'échange de température (dans ce cas la perte) entre l'eau et l'air est grand.

Ainsi, pour les mêmes conditions météorologiques un tronçon de rivière peu profond et large se refroidit beaucoup plus rapidement qu'un tronçon profond et étroit.

#### **2.1.2.1.2 La nucléation**

La nucléation est le processus physique par lequel un liquide se cristallise. La température de cristallisation spontanée d'un liquide est souvent plus petite que sa température de fonte (Michel, 1978). Ainsi, la température de fonte de l'eau pure est égale à 0°C alors que pour y voir apparaître le premier cristal de glace il faut une température de  $-40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  (Ashton, 1986). Michel (1978) a identifié plusieurs types de nucléation possibles (figure 2.3).



**Figure 2.3 : Différents modes de nucléation.**

Cependant, l'eau dans la nature ne se trouve jamais dans l'état pur et elle contient d'innombrables petites particules. Ces petites particules sont nommées noyaux embryonnaires de cristallisation ou *nuclei*. Ces derniers sont responsables du mode de nucléation le plus observé dans la nature, la nucléation hétérogène (Michel, 1978). Ce mécanisme, appelé aussi nucléation autour de particule externe, est responsable de la formation des cristaux dans les rivières comme dans les nuages (Ashton, 1986). La nucléation hétérogène se démarque de celle dite homogène par le fait qu'elle se déclenche à des températures beaucoup moins basses (fractions de degré en dessous de 0°C).

La nucléation secondaire est aussi observée dans la nature. Le plus acceptable concept proposé pour décrire ce phénomène est le concept d'échange de masse proposé par Osterkamp (1974). Selon ce concept, des fines gouttelettes d'eau provenant de la rivière sont introduites dans l'air suite à l'évaporation et/ou à cause du vent. Les fines gouttelettes éclatent dans l'air froid et retombent à la surface de l'eau sous forme de cristaux de glace. Ainsi, des *nucleis* sont introduits à la surface de la rivière et la nucléation secondaire est déclenchée. À noter que la neige qui tombe sur une surface d'eau surrefroidie peut avoir le même effet (Michel, 1978).

#### **2.1.2.1.3 Formation des différents types de glace de rivière**

Nous venons de présenter les mécanismes de refroidissement de la surface de l'eau et ceux de la nucléation. En ajoutant à ces facteurs le régime et les vitesses d'écoulement, plusieurs types de glace de rivière se forment. En se basant sur la taille, la forme, l'orientation de l'axe optique et les facteurs environnementaux, Michel et Ramseier (1971) proposent la classification suivante de la glace d'eau douce :

##### **Glace primaire :**

La glace primaire est le premier type de glace de structure et de texture uniforme formée dans une masse d'eau. À la surface d'eau calme ou si l'écoulement est laminaire, la glace primaire est sous forme de *skim ice*. Ce dernier évolue horizontalement dans la couche surrefroidie pour atteindre une dizaine de millimètres d'épaisseur (Ashton, 1986). Dans un écoulement turbulent, la glace primaire peut être très épaisse sous forme de frasil/neige fondante (*slush*). Si la cause de la nucléation est la neige, le mélange gelé de neige et de *slush* fait aussi partie de la glace primaire (Ashton, 1986). Les quatre types de glace primaire sont définis comme suit :

- ◆ **P1 surface calme, faible gradient de température** : les grains sont larges à extra larges avec des limites irrégulières. L'orientation cristallographique préférentielle de l'axe optique est verticale. Ce type de glace (P1) est rencontré dans les lacs,

réservoirs et les surfaces calmes des rivières. Sous des conditions idéales, des grains d'une superficie de plus d'un mètre peuvent se former.

- ◆ **P2 Surface calme, grand gradient de température :** la taille des grains varie de moyenne à extra large. La cristallisation progresse rapidement. La forme des grains varie de tubulaire à une forme proche d'une aiguille. Cette dernière peut atteindre plusieurs centimètres de longueur. Les dendrites sont aussi fréquentes. L'orientation cristallographique de l'axe optique est souvent verticale superposée à une orientation aléatoire. Ce type de glace (P2) est rencontré dans les lacs, réservoirs et les surfaces calmes des rivières.
- ◆ **P3 Surface agitée, nucléation à partir du frasil :** La taille des grains varie de fine à moyenne, leur forme est tubulaire. L'orientation cristallographique de l'axe optique est aléatoire. Ce type de glace (P3) est rencontré dans les lacs, réservoirs et les rivières.
- ◆ **P4 nucléation à partir de la neige :** La taille des grains varie de fine à moyenne, et elle est equiaxée. Cette propriété est liée étroitement au type de neige. L'orientation cristallographique de l'axe optique est aléatoire. Ce type de glace (P4) est rencontré dans les lacs, réservoirs et les rivières.

#### **Glace secondaire :**

Toute glace qui se forme en dessous de la glace primaire est considérée comme glace secondaire. Elle est toujours parallèle aux flux de perte de la chaleur, et peut prendre l'une des formes suivantes : glace colonnaire (appelée aussi glace noire); *frasil-slush*; ou *neige-slush*. Il est à noter que la texture de la glace secondaire est directement liée à celle de la glace primaire.

- ◆ **S1 glace colonnaire ; orientation préférentielle verticale de l'axe optique :** les grains se forment parallèlement au flux de la chaleur. La taille des grains augmente avec la profondeur puisque les grains mal orientés sont consommés par ceux favorablement orientés. L'orientation cristallographique préférentielle de l'axe optique est verticale, et ce, pour toute la profondeur de la glace colonnaire. La taille des grains est souvent large à extra large. La forme des grains est irrégulière. Le long axe des grains dépend de l'orientation relative des grains adjacents. Il peut varier d'équiaxé à une longueur équivalente à celle de l'épaisseur de la couche de glace colonnaire. Ce type de glace se forme comme résultat des conditions de la glace P1 et P2, et occasionnellement P3 et P4 (si le couvert est sous pression). Ce type de glace (S1) est rencontré dans les lacs, réservoirs et les rivières à faible vitesse d'écoulement.
- ◆ **S2 Glace colonnaire, orientation préférentielle horizontale de l'axe optique :** Les conditions sont les mêmes que pour la glace S1. Toutefois, la glace primaire a une orientation aléatoire de l'axe optique. La taille des grains augmente plus rapidement en profondeur que la glace S1. L'orientation cristallographique change continuellement en fonction de la profondeur. Elle devient horizontale après 5 à 20 cm d'épaisseur (Shumskii 1964). La taille initiale des grains est pareille à celle des types de glace P2, P3 et P4. Elle augmente jusqu'à devenir large et même extra large dans la partie inférieure de la couche colonnaire. Ce type de glace (S2) se forme sous les mêmes conditions que les glaces primaires de types P2, P3 et P4.

- ◆ **S3 glace colonnaire, orientation préférentielle horizontale alignée de l'axe optique** : Ce type de glace se forme en dessous des feuilles et couvert de glace épaisse dans les lacs gelés de façon permanente, les îles de glace arctique, et possiblement dans les rivières à très grandes profondeurs. La glace S3 se développe d'une glace à orientation préférentielle horizontale ou presque parallèle des axes optiques.
- ◆ **S4 Frasil-neige fondante (slush) congelé** : les grains sont équiaxés et de forme tubulaire. Leur taille est fine à moyenne et dépend de l'âge du frasil d'origine. Les limites des cristaux sont irrégulières, et l'orientation cristallographique est aléatoire. Le frasil est formé dans l'eau turbulente et il est traîné sous le couvert de glace secondaire. Un couvert de glace entier peut se composer de frasil et neige fondante (slush) congelés. Dans un couvert de glace, S4 peut s'alterner avec la glace colonnaire. Ce type de glace (S4) est trouvé dans les rivières et aussi dans les réservoirs et lacs alimentés par un écoulement turbulent.

#### **Glace superposée :**

À l'opposé de la glace secondaire, la glace superposée est toujours formée en dessus de la glace primaire. Elle est causée suite à la submersion de la glace primaire par de l'eau venant de diverses sources.

- ◆ **T1 Neige-glace** : La taille des grains varie de fine à moyenne. Leur forme dépend de l'âge de la neige et varie de ronde à angulaire. Les grains sont équiaxés à orientation aléatoire. La densité varie de 830 à 900 kg m<sup>-3</sup>. La neige-glace est formée lorsque l'eau sature la neige déposée sur le couvert de glace et y gèle.
- ◆ **T2 Neige-glace drainée** : La taille des grains varie de fine à moyenne et leur forme est très bien arrondie. La couche est homogène et orientée aléatoirement. La densité est de 600 kg m<sup>-3</sup>. Ce type de glace (T2) est trouvé là où le niveau d'eau varie rapidement, en drainant le couvert de neige saturé qui regel.
- ◆ **T3 glace de surface** : ce type de glace consiste en des couches de glace colonnaires qui se sont formées par-dessus la glace primaire originale. L'orientation peut être verticale ou aléatoire.

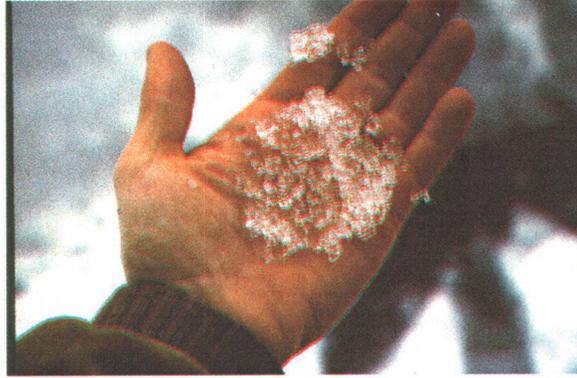
#### **Glace agglomérée :**

C'est une agglomération de divers types de glace de différentes formes. Quand l'épaississement naturel est influencé par un effet mécanique ou par autres types d'interférences, la distribution horizontale des couches de glace n'est plus distinguée. La taille des grains peut varier de fine à extra large, et la forme varie d'équiaxée à tubulaire et colonnaire, avec des limites de cristaux régulières à angulaire en forme. L'orientation peut varier d'aléatoire à préférentielle. Ce type de glace est essentiellement formé par le regel d'une agglomération de pièce de glace de divers types. Il est trouvé fréquemment dans les parties de rivières à écoulement turbulent et aussi dans les zones des rapides.

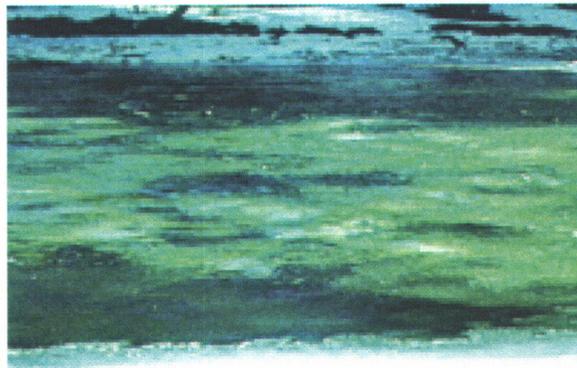
Dans les définitions précédentes, le terme frasil a été utilisé plus qu'une fois et son rôle est crucial dans le développement de la glace de rivière. Dans les lignes qui suivent, nous traitons des conditions d'apparition et d'évolution du frasil.

**Frasil :**

Un des éléments principaux pour la formation du frasil dans une rivière est le régime turbulent d'écoulement. En fait, dans ce cas la colonne d'eau est continuellement brassée et sa température est homogène sans aucune stratification. Comme nous l'avons déjà vu, la nucléation hétérogène amorce la formation des cristaux de glace même à 0.05°C en dessous de 0°C (SCRHCENB, 1989). Dans ces conditions, les cristaux de glace formés sont appelés frasil (figure 2.4). Le processus de nucléation des premiers cristaux de frasil ne fait pas le consensus. Il est largement accepté que ces particules « précurseurs » sont introduites à l'interface air-eau. Cependant, il existe plusieurs controverses quant à leurs origines et le mécanisme exact de nucléation (Michel, 1967; Osterkamp, 1977 et Tsang, 1982). Les cristaux des particules de frasil ont généralement une taille allant de 0,1 à 5 mm (Beltaos, 1995). Leur concentration peut atteindre jusqu'à un million par mètre cube d'eau (Gilfilian *et al.*, 1972). Toutefois, le rapport de leur poids par rapport à leur volume est trop faible et ne constitue, au plus, que 5 % (Tsang, 1982). Tant que le régime d'écoulement est turbulent et la température de l'eau est inférieure à 0 C, la production du frasil continue. Cette production est maintenue jusqu'à ce que la température de la colonne d'eau est ramenée à 0°C. Dans le cas où l'eau est surrefroidie, le frasil est sous forme « active » et possède un grand potentiel d'adhérence. C'est cette forme de frasil qui forme la glace de fond et qui adhère aux rochers et à tout corps solide (de taille significative) avec lequel elle entre en contact (figure 2.4 b). Ce pouvoir d'adhérence permet aux petits cristaux de frasil de se coller les uns aux autres pour former des « rochers » ou « flocons » de frasil qui flottent (figure 2.4 a). La forme « passive » du frasil est observée lorsque la température de l'eau est égale à 0°C, et le pouvoir d'adhérence est nettement abaissé (Beltaos, 1995). Les formes de glace de rivière qui découlent de l'évolution du frasil sont présentées dans les figures 2.5 et 2.6.



a- Flocons de frasil



b- Glace de fond

Figure 2.4 : Photos illustratives de flocons de frasil et de glace de fond (CRREL, 2002).

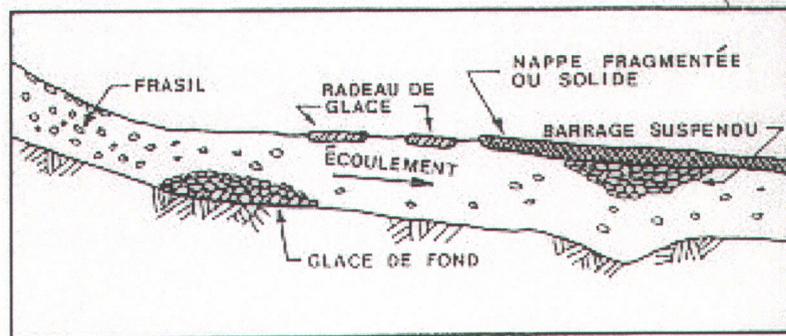


Figure 2.5 : Stade de développement du frasil (SCRHCENB, 1989).

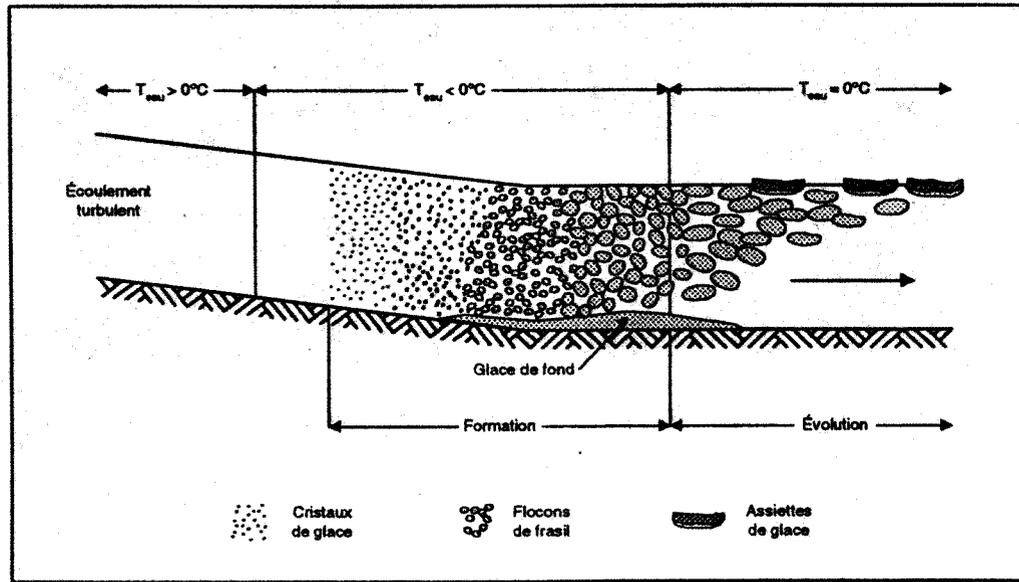


Figure 2.6 : Stades de développement du frasil (d'après Michel, 1971).

Des figures 2.5 et 2.6 nous observons que l'évolution du frasil se fait selon les formes suivantes :

- ◆ **Glace de fond** : Ce type de glace s'observe dans les tronçons de rivière larges et peu profonds. Ces conditions sont reliées à une grande vitesse d'écoulement et un régime très turbulent (figure 2.6). En général, la glace de fond se forme la nuit où le gradient de perte de chaleur de l'eau vers l'air est maximal. Dès que le frasil sous la forme « active » est formé, il adhère au fond de la rivière et à tous les objets solides. La caractéristique principale de ce type de glace est son aspect spongieux qui favorise l'adhérence de plus de frasil. Ce mécanisme de formation de la glace de fond est le plus fréquent dans la nature. Un autre mécanisme survient lorsque la turbulence de l'écoulement est assez forte pour que l'eau surrefroidie entre en contact direct avec les matériaux du fond qui servent alors comme précurseurs de nucléation. (Ashton, 1986). Il ne faut surtout pas oublier que la glace de fond ne se forme pas sur n'importe quelle nature de fond. Ainsi, sur les matériaux fins, par exemple, sablonneux ou argileux, ce type de glace se forme très rarement (Beltaos, 1995). Une fois l'eau n'est plus en état de surrefroidissement, la glace de fond perd son potentiel d'adhérence et flotte. Il arrive que le volume de la glace de fond accumulée autour d'un objet, par exemple ancre de bateau ou rocher, soit assez grand pour le soulever lors de la flottaison. Un des sites les plus connus pour la formation de glace de fond est le tronçon des rapides du lac St. Louis Lachine dans le fleuve Saint-

Laurent. Marcotte (1984) rapporte qu'une zone de 20 km<sup>2</sup> de ce tronçon était couverte par une couche de glace de fond d'un mètre et demi d'épaisseur. la glace de fond est considérée comme glace primaire si elle forme le couvert de glace après sa flottaison. Par contre si elle se dépose sur un couvert déjà formé elle est alors considérée comme secondaire.

- ◆ **Radeaux de glace :** Les flocons de frasil formés dans la turbulence ne cessent de croître. Au fur et à mesure qu'ils gagnent du volume, ils sont moins influencés par la turbulence et tendent à flotter (voir figure 2.6). Une fois à la surface, l'eau interstitielle retenue entre les flocons est gelée par le contact avec l'air. Cette nouvelle formation est appelée slush de frasil (Beltaos, 1995). Elle a un pouvoir de flottaison plus grand que celui des flocons, sa résistance à l'effet de la turbulence est alors plus forte. Dans des conditions favorables pour que la slush de glace reste plus longtemps à la surface, de petites feuilles de glace sont formées (*frazil pans*) (Ashton, 1986). Des flocons supplémentaires de frasil viennent s'attacher à la partie périphérique de ces feuilles de glace. Le plus souvent, ces feuilles de glace deviennent circulaires avec une bordure renflée que nous appelons radeaux de glace, *pancake ice* (figure 2.7). Si la vitesse du courant est faible ( $< 0.6 \text{ m s}^{-1}$ ) et le temps de contact des feuilles de glace et les radeaux de glace est suffisant, la glace flottante (*ice floe*) est formée (Ashton, 1986). Lorsque l'eau de surface continue de perdre de sa chaleur dans l'atmosphère, la glace flottante et/ou les radeaux de glace gèlent ensemble pour former une nappe de glace continue (SCRHCENB, 1989).



Figure 2.7 : Photo illustrative de radeaux de glace (SCRHCENB, 1989).

- ◆ Barrages suspendus : Ils sont formés par l'accumulation du frasil sous un couvert de glace (figure 2.5). De ce fait, ils entrent sous la définition de la glace secondaire. Ce dépôt de flocons de frasil est conditionné par la vitesse de courant. Cette dernière doit être au départ assez forte pour que les flocons de frasil restent en suspension dans le courant. Le cas échéant, ils montent en surface et le processus de formation des radeaux est déclenché. Une fois que les flocons de frasil sont entraînés sous le couvert de glace, il faut attendre que la vitesse du courant diminue suffisamment pour permettre leur dépôt. La vitesse critique de dépôt dépend de plusieurs paramètres. Elle est liée d'une part à la forme et la porosité de la glace entraînée et d'autre part à la rugosité du lit de la rivière et de l'interface eau - couvert de glace (Beltaos, 1995). La vitesse critique proposée pour le transport de la glace sous le couvert sans déposition est de 0,6 à 1,3 m s<sup>-1</sup> (Michel, 1984a). Si cette vitesse est maintenue, la glace en suspension sous le couvert de glace va rester ainsi jusqu'à ce qu'elle émerge en aval dans une zone d'eau libre. Cependant, la vitesse du courant à elle seule ne peut pas expliquer le dépôt ou non du frasil. Un autre critère important s'ajoute, la capacité de transport de frasil. En fait, cette capacité est la quantité de glace que le courant peut maintenir en suspension (Starosolszky, 1970; Atkinson et Waters, 1978; Shen et Wang, 1992). Une fois la capacité de transport dépassée, la glace en suspension va se déposer même si la vitesse du courant est au-delà du seuil critique (voir figure 2.8). Si la capacité de production de frasil en amont est importante, l'accumulation de glace sous la nappe s'accroît (figure 2.9), formant un « barrage suspendu ». Cela peut provoquer un vaste blocage extensif du débit dans la zone et ainsi causer une augmentation des niveaux d'eau en amont et d'éventuelles inondations (SCRHCENB, 1989). Dans une rivière, l'alternance d'eau libre et de zones couvertes de glace est un fort indice de possibilité de formation de « barrage suspendu de glace » (Ashton, 1986). La rivière La Grande au nord du Québec est une rivière connue pour la formation de grands barrages suspendus (Michel et Drouin, 1981). Durant l'hiver 1973, un barrage suspendu de 16 km de long s'y est formé avec un volume total de glace de 56 millions de mètres cubes!

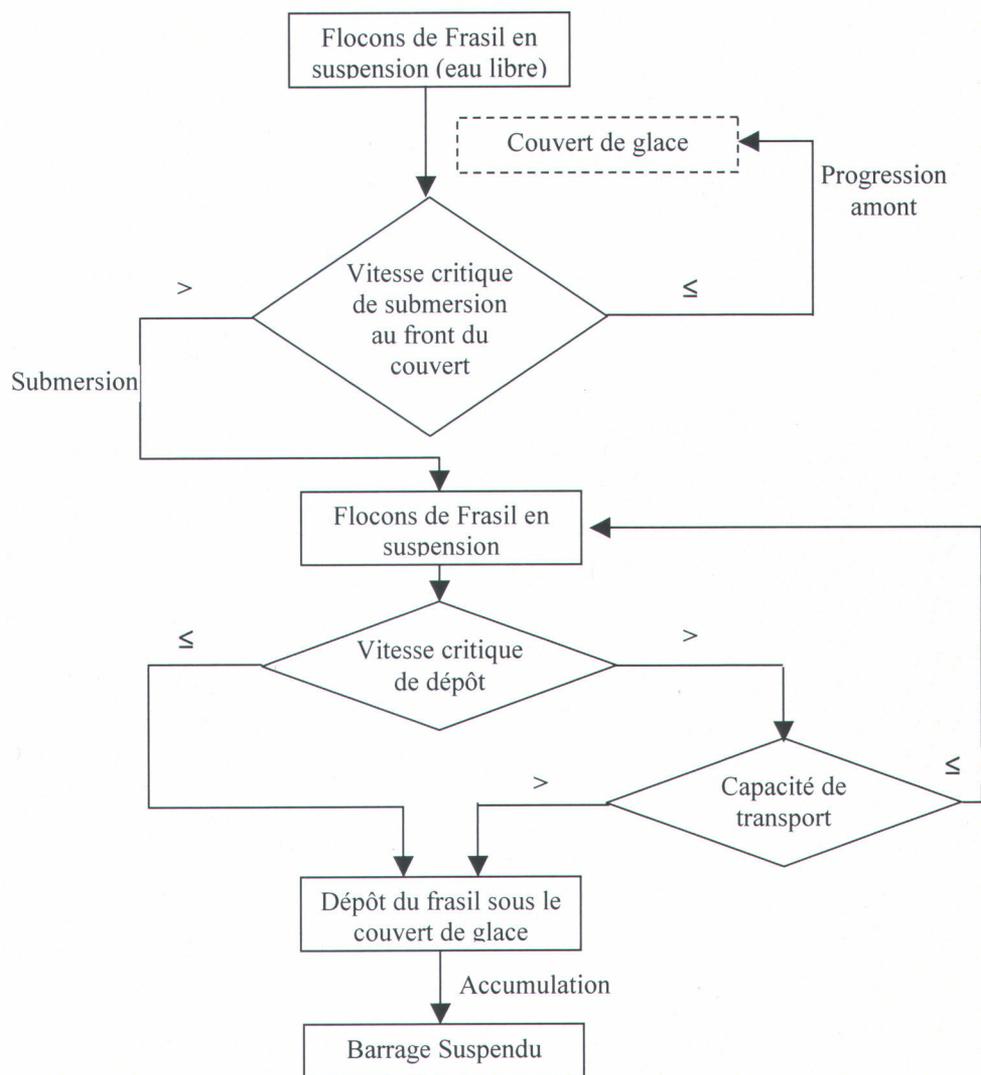


Figure 2.8 : Processus de formation des barrages suspendus à partir de frasil.

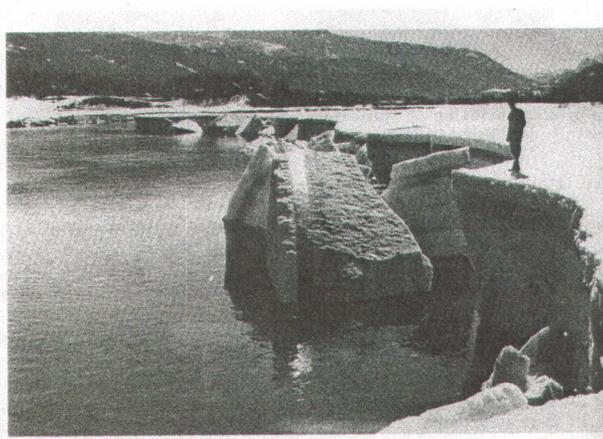


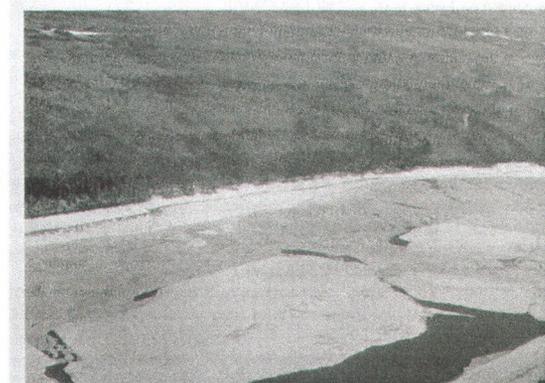
Figure 2.9 : Accumulation de frasil en dessous de couvert de glace statique, Rivière Hallingdalselva, Norvège (E. Kanavin) (d'après Beltaos, 1995).

### **Glace de rive et nappe de glace thermique :**

Ces deux types de glace de rivière sont formés dans des conditions statiques. En fait, dans un écoulement laminaire la couche d'eau en contact avec l'air se refroidit rapidement. Ceci est accentué, dans les cas de la glace de rive, par la perte de chaleur due au contact avec celles-ci. La glace de rive est caractérisée par sa solidité et clarté. Son développement se fait principalement horizontalement tout au long des rives, mais aussi vers le centre de la rivière. Plus l'on s'approche du centre de la rivière, plus l'écoulement tend à devenir turbulent ce qui freine cette croissance (voir figure 2.10 a).



a- Glace de rive (SCRHCENB, 1989)



b- Feuille de glace (Beltaos, 1995)

**Figure 2.10 : Glace de rive et feuilles de glace.**

La glace de rive est la première forme de glace à apparaître dans une rivière (SCRHCENB, 1989). La glace qui se forme de la même manière autour des obstacles dans la rivière, îlots de rochers ou piliers de pont, prend la même appellation (Beltaos, 1995). Outre la croissance statique, la glace de rive peut croître par un apport de glace de la rivière (Svenson *et al.*, 1989). Cela se fait par le frasil et/ou la neige à demi fondue (*slush*) ramenés par le courant d'eau et qui s'agrippe sur la glace de rive (Michel, 1978). Des couches nettes et successives apparaissent alors attachées à la glace de rive. Cette dernière peut aussi décroître en se fragmentant et se détachant de la rive sous l'effet d'un changement du niveau d'eau ou de vagues provoquées par le vent (Beltaos, 1995). La nappe de glace thermique (figure 2.10 b) se forme dans les mêmes conditions que la glace de rive, mais se fait loin de celle-ci. La taille de cette nappe ou feuille de glace (*Skim ice*) dépend des conditions d'écoulement et météorologiques.

### 2.1.2.2 Débâcle et embâcle

Dans la section précédente, nous avons fait le tour de quelques processus liés à la glace de rivière durant la période de gel. Ainsi, nous avons introduit explicitement les différents mécanismes de formation de glace de rivière. Aussi, nous avons décrit les différents types de glace de rivière. Implicitement, nous avons parcouru les divers modes de formation d'un couvert de glace dans une rivière, à savoir le mode statique et le mode dynamique. Dans cette section, nous traitons plutôt des mécanismes responsables du dégagement du couvert formé durant la période de gel. Deux phénomènes caractéristiques de la période du dégel : la débâcle et l'embâcle.

Une définition simple de la débâcle est l'évacuation d'une rivière du couvert de glace. Ce phénomène est intimement lié à l'état de solidité de la glace ainsi qu'aux fluctuations des débits de la rivière (Beltaos, 1984; Michel, 1971; Deslauriers, 1968).

Le groupe de travail sur l'hydraulique de la glace de rivière de l'Association Internationale de la Recherche Hydraulique (IAHR) définit l'embâcle comme suit (1986): « Un embâcle est une accumulation stationnaire de glace fragmentée ou de frasil qui obstrue l'écoulement ».

Selon les conditions hydrométéorologiques, nous faisons la distinction entre deux types de débâcle : « prémature » (*premature*), et « extramature » (*overmature*) (Beltaos, 1995).

Dans le premier cas, il y a une forte fonte de neige et/ou des précipitations abondantes et le débit de la rivière augmente rapidement. Cela dit, le couvert de glace est toujours solide et assez épais. Une soudaine et rapide augmentation du niveau d'eau arrache de force le couvert de glace des rives. En parallèle, plusieurs fissures apparaissent dans le couvert qui par la suite se fragmente en plusieurs morceaux de glace. Le couvert finit par éclater et les fragments de glace entament une descente vers l'aval où ils s'écrasent contre le couvert encore sur place. Le processus continue et le danger réside dans la force que ces blocs de glace exercent sur les structures riveraines. Aussi, la probabilité qu'un embâcle se forme est très élevée.

Dans les cas d'une débâcle dite extramature, les conditions hydrométéorologiques sont plutôt l'inverse du premier cas. La température est douce, la fonte de neige se fait graduellement et le débit augmente lentement. Aussi, il y a absence de précipitations liquides. Le couvert de glace se voit affaiblir à cause des échanges thermiques, d'une part avec l'air et à cause du rayonnement solaire, et d'autre part, à cause du contact avec le courant d'eau qui est plus chaud (Beltaos, 1995). L'affaiblissement du couvert continue jusqu'à sa fonte totale sur place, où des fois une

faible descente de glace est observée, mais qui se désintègre rapidement. Ce phénomène a été observé sur le site de notre étude, la rivière Saint-François, aux printemps 2000 et 2001.

### **2.1.3 Conclusion**

Comme conclusion à ce sous chapitre, nous présentons un résumé, sous forme de schéma, des principaux processus de formation et disparition de la glace de rivière (figure 2.11). Il est clair que le régime d'écoulement est un facteur déterminant dans les processus de formation. Par contre, la détérioration du couvert de glace est plutôt liée aux facteurs météorologiques. Il est aussi pertinent de mettre l'accent sur les caractéristiques de la glace susceptibles d'être utiles pour l'analyse des images Radar. À partir de la classification de la glace d'eaux douces nous remarquons que :

- ◆ Il y a une nette différence entre la rugosité de la surface d'un couvert de glace formé par une glace primaire et celle formée par une glace superposée (au-dessus de la glace primaire).
- ◆ La même remarque s'applique pour des couverts de glace formés par les deux types précédents et celui formé par une glace agglomérée.
- ◆ Un couvert de glace formé par trois couches de glace (primaire, secondaire et superposée) est différent de celui formé seulement par deux couches (primaire et secondaire ou primaire et superposée).
- ◆ L'orientation cristallographique des axes optiques (verticale, horizontale, ou aléatoire) des grains, leur taille (fine, moyenne, large ou extra large), leur forme (tubulaire, à limites irrégulières, dendrites, arrondies ou très bien arrondies) sont toutes des facteurs qui présentent la possibilité d'agir sur le signal Radar d'une façon ou d'une autre.

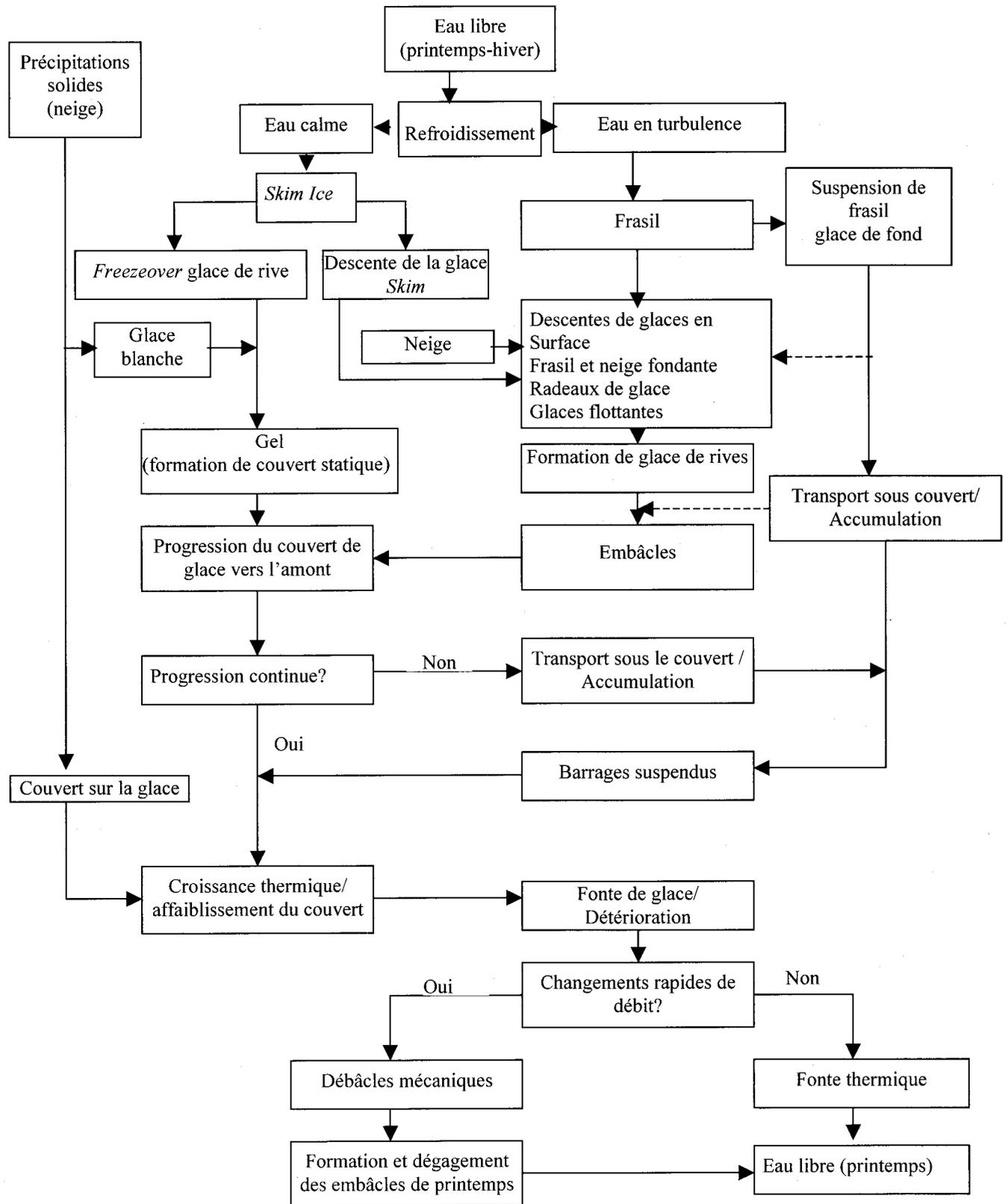


Figure 2.11 : Processus de la glace de rivière (Shen, 1996).

## 2.2 Radar à Synthèse d'Ouverture et glace de rivière

Notre recherche s'appuyant essentiellement sur des images du satellite RADARSAT-1, la compréhension de leurs caractéristiques est alors indispensable. Dans ce chapitre, nous présentons la théorie du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) et les définitions qui lui sont reliées. Aussi, l'interaction du signal RSO et la glace de rivière y est présentée. Pour compléter la littérature, relativement succincte, sur le sujet de la glace de rivière (de taille moyenne), une vision plus globale sur le RSO et la glace de mer ou de lac s'avère parfois utile.

### 2.2.1 Introduction

Le terme radar est un acronyme pour **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging. Ce système transmet des impulsions et en reçoit les échos provenant des divers objets. En fait, à l'opposé des capteurs passifs, les systèmes Radar sont des capteurs actifs qui éclairent artificiellement les objets au sol et enregistrent l'énergie que ceux-ci leur renvoient (Bonn et Rochon, 1996). Ces systèmes opèrent dans les parties du spectre électromagnétique au-delà du visible et de l'infrarouge thermique. La partie des hyperfréquences se caractérise par une excellente transmissibilité atmosphérique (Henderson et Lewis, 1998). Elle est approximativement comprise entre les longueurs d'onde du spectre électromagnétique allant de 1 mm à un mètre. Conventionnellement, la partie hyperfréquence, dite aussi micro-ondes, est divisée en plusieurs bandes de fréquences désignées par des lettres (tableau 2.1) (Polidori, 1997).

**Tableau 2.1 : Les bandes Radar (d'après Ulaby *et al.*, 1981)**

<b>Bandes</b>	<b>Fréquences (f) en GHz</b>	<b>Longueur d'onde (<math>\lambda</math>) en cm</b>
P	0,225-0,390	133,24-76,86
L	0,390-1,550	76,86-19,34
S	1,550-4,20	19,34-7,13
C	4,20-5,75	7,13-5,21
X	5,75-10,90	5,21-2,75
K	10,90-36,0	2,75-0,83
Q	36,0-46,0	0,83-0,65
V	46,0-56,0	0,65-0,53
W	56,0-100	0,53-0,29

Un des avantages de l'utilisation d'images radar est généralement leur indépendance des conditions météorologiques et de l'illumination (Ulaby *et al.*, 1986). Cela permet aux systèmes Radar d'acquérir des images même en présence de brume ou de nuages. En télédétection, nous distinguons deux catégories de Radar :

- ◆ Radar à antenne (ou ouverture) réelle, et
- ◆ Radar à synthèse d'ouverture RSO (Synthetic Aperture Radar, SAR).

La résolution en azimut du premier type de radar est proportionnelle à la distance antenne cible. Plus cette distance est grande, moins bonne est la résolution (en azimut,) et plus grande doit être la taille de l'antenne, d'où l'impossibilité d'avoir un tel dispositif sur une plate-forme spatiale (Polidori, 1997). Cela explique le fait que les radars à ouverture réelle sont, principalement, aéroportés. Étant donné que le satellite RADARSAT-1 et un RSO, dans les sections qui suivent nous nous intéressons qu'au cas du radar à synthèse d'ouverture.

## 2.2.2 Caractéristiques des capteurs RSO

### 2.2.2.1 Définitions de base

Il est pertinent de rappeler quelques définitions de base qui sont indispensables lorsqu'un sujet relié au radar est évoqué. Dans la figure 2.12 sont présentés des définitions de l'angle d'incidence et les autres paramètres liés à la géométrie d'une image radar:

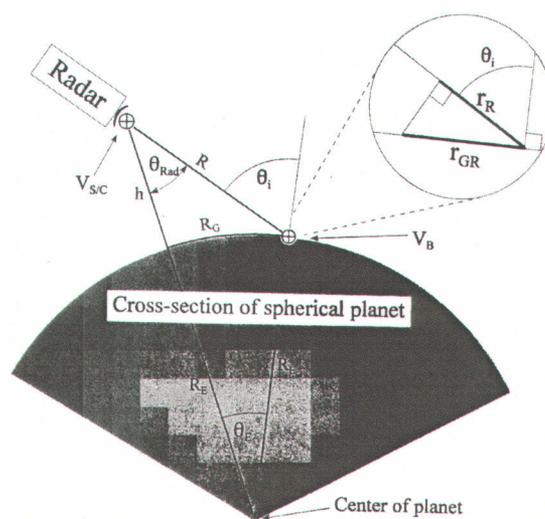


Figure 2.12 : Géométrie d'une scène RSO spatiale (Henderson et Lewis, 1998).

Où :

- $\theta_i$  : Angle d'incidence, il est formé entre le faisceau Radar incident et la verticale de la surface éclairée. En général, la réflectivité des diffuseurs distribués sur la surface d'interception diminue lorsque l'angle d'incidence augmente (CCRS, 2002).  $\theta_i$  varie entre deux valeurs qui sont :  $\theta_n$  angle d'incidence proximal et  $\theta_f$  angle d'incidence distal;
- $\theta_{Rad}$  : Angle d'élévation est le complément de l'angle de dépression formé entre le plan horizontal passant par le Radar et la ligne de visée allant du Radar à l'objet illuminé (CCRS, 2002);
- $\theta_E$  : Angle par rapport au centre de la Terre de l'objet illuminé et l'antenne;
- $r_R$  : Résolution en portée ou résolution radiale oblique (*range resolution*): l'espacement minimum pour lequel deux réponses du signal de force approximativement égale sont discernables dans l'image en tant que deux éléments distincts, dans la direction de l'azimut.  $r_R$  est remplacé par la résolution azimutale,  $r_A$  qui a la même définition (Henderson et Lewis, 1998);  $r_R = c\tau/\pi$  :  $c$  vitesse de la lumière, et  $\tau$  durée de l'impulsion (Ulaby *et al.*, 1982);
- $R_G$  : Distance au sol : distance entre la trajectoire de la trace au sol du RSO et un objet ou diffuseur illuminé;
- $R$  : Distance en portée, distance mesurée le long de la ligne de visée entre le Radar et chaque diffuseur illuminé. Aussi appelée direction de visée (CCRS, 2002);  $R = c\tau/2$  :  $\tau$  étant le temps de trajet aller-retour d'une pulsation;
- $V_B$  : Vitesse de déplacement de l'antenne;
- $r_{GR}$  : Résolution en portée au sol ou résolution radiale au sol ( $r_{GR} = r_R / \sin \theta_i$ )
- $h$  : Altitude de l'antenne;
- $R_A$  : La résolution en azimut, non exprimée dans la figure,  $R_A = \lambda h / d \cos \theta_i$  :  $\lambda$  la longueur d'onde et  $d$  la longueur de l'antenne;

### 2.2.2.2 Principe du RSO

Comme les autres systèmes radars actifs, le principe est de calculer la quantité d'énergie retournée à l'antenne. En effet, les images sont produites par l'enregistrement des impulsions hyperfréquences qui sont émises vers une cible et réfléchies par celle-ci, et ce, pendant une période donnée (CCRS, 2002).

Les capteurs RSO visent latéralement à leur vecteur de déplacement (azimut). À chaque impulsion correspond un écho, caractérisé par sa magnitude (amplitude) et sa phase, fonction de tous les réflecteurs présents dans la trace, ce qui forme une ligne de l'image. Différentes étapes interviennent pour permettre de passer du signal brut reçu par l'antenne à l'image radar (INRIA, 2001). Les entités mesurables à partir du signal Radar sont la magnitude  $r$  (souvent appelée amplitude) et la phase  $\varphi$ . Une image RSO est composée d'amplitude complexe  $a$  reliée à la magnitude et à la phase par la relation suivante (CCRS, 2002; Henderson et Lewis, 1998) :

$$a = re^{j\varphi} = I + jQ \quad \text{Équation 2.1}$$

où :

$I$  : la composante en phase avec  $I = r \cos \varphi$ ,

$Q$  : la composante en quadrature avec  $Q = r \sin \varphi$  et,

$$j = \sqrt{-1}.$$

Si le signal est exprimé en fonction de ses composantes en phase et en quadrature ( $I$  et  $Q$ ) la magnitude est exprimée alors par l'équation suivante  $m = \sqrt{I^2 + Q^2}$ .

En se basant sur l'équation  $R_A = \lambda h / d \cos \theta_i$ , pour obtenir une résolution azimutale de  $R_a = 20$  mètres pour un capteur dont  $h = 800$  km et  $\theta_i = 30$  degrés, l'antenne doit être d'une longueur  $D = 2309$  mètres. Évidemment, une telle antenne ne peut être physique ou transportée sur une plate-forme spatiale. La technique de la synthèse d'ouverture permet de simuler une longue antenne tout en ayant une vraie antenne physique relativement courte (quelques mètres). Elle se base sur l'utilisation du signal reçu de plusieurs impulsions successives (lors du déplacement de la plate-forme) pour simuler une plus grande ouverture (ou dimension) d'antenne (CCT, 2002).

La synthèse d'ouverture est rendue possible par la variation de fréquence, pour chaque diffuseur, en fonction de sa traversée par le faisceau radar. Cet effet est connu sous le nom de l'effet

Doppler (Polidori, 1997). La fréquence Doppler ( $f_D$ ) est liée à la variation de la phase ( $\varphi$ ) du signal en fonction du temps ( $t$ ), elle s'écrit comme suit :

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{Équation 2.2}$$

La phase étant proportionnelle à la distance aller-retour du signal R, ( $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R$ ), la fréquence

Doppler en fonction du temps s'écrit alors :

$$f_D = -\frac{2V^2}{\lambda R} (t - t_0) \quad \text{Équation 2.3}$$

où :

$V$  : vitesse de la plate-forme,

$t_0$  : temps où le diffuseur (réflecteur) est dans une direction perpendiculaire au vecteur de la vitesse, et

$t$  : temps quelconque où le diffuseur est éclairé par le faisceau radar.

La largeur du faisceau au sol (résolution azimutale)  $\delta_{az}$  est liée à la longueur d'onde, la longueur de l'antenne D, et la distance R par l'équation suivante :

$$\delta_{az} = \lambda R / D. \quad \text{Équation 2.4}$$

$\Delta t$  qui est le temps total où un diffuseur est éclairé est égale à la largeur du faisceau au sol divisée par la vitesse de la plate-forme, d'où :

$$\Delta t = \lambda R / DV \quad \text{Équation 2.5}$$

Aussi, la résolution spatiale azimutale  $\delta_{az}$  est égale à la résolution temporelle multipliée par la vitesse de la plate-forme. La résolution temporelle est l'inverse de la variation de la fréquence Doppler du début de l'éclairement d'un diffuseur jusqu'à sa fin,  $\Delta f_D$ .

$$\delta_{az} = \frac{1}{\Delta f_D} V \quad \text{Équation 2.6}$$

En fonction des équations 2.3 et 2.5,  $\Delta f_D$  comme suit :

$$\Delta f_D = \frac{2V^2}{\lambda R} \frac{\lambda R}{DV} = \frac{2V}{D} \quad \text{Équation 2.7}$$

en combinant les équations 2.6 et 2.7 nous obtenons :

$$\delta_{az} = D/2 \quad \text{Équation 2.8}$$

Nous remarquons donc qu'à l'aide de la fréquence de Doppler, la synthèse d'ouverture nous permet de simuler une antenne de grande taille à partir d'une de petite taille (Polidori, 1997).

### 2.2.2.3 Équation radar

L'équation radar exprime la relation entre les caractéristiques du système radar, du trajet parcouru par l'onde et du signal reçu du diffuseur au sol. Dans le cas d'un RSO, l'antenne émettrice du signal radar est la même qui sert comme antenne réceptrice. Cela signifie que les caractéristiques des deux antennes sont les mêmes, le gain par exemple. Pour un seul point diffuseur au sol cette équation s'écrit comme suit (d'après Ulaby *et al.*, 1982) :

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^3} \sigma \quad \text{Équation 2.9}$$

Où :

$P_r$  : puissance reçue par l'antenne,

$P_t$  : puissance transmise par l'antenne,

$G$  : gain de l'antenne,

$\lambda$  : longueur d'onde,

$R$  : la distance entre l'antenne et le centre de l'air visé, et

$\sigma$  : coefficient de diffusion.

Le coefficient de diffusion représente les caractéristiques du diffuseur. Il est présenté par l'équation suivante :

$$\sigma = G_c \cdot (1 - f) \cdot A_c \quad \text{Équation 2.10}$$

Où :

$G_c$  : gain de la cible (diffuseur),

$f$  : fraction du signal absorbé au niveau du diffuseur, et

$A_c$  : aire de la cible.

Le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^0$  est la valeur moyenne du coefficient de diffusion  $\sigma$  par unité de surface  $\Delta A_i$  (équation 2.11).

$$\sigma^0 = \left\langle \frac{\sigma_i}{\Delta A_i} \right\rangle \quad \text{Équation 2.11}$$

### 2.2.3 Facteurs influençant la luminance d'un pixel d'une image RSO

Souvent les pixels d'une image RSO présentent une très grande variabilité de la luminance. Cette dernière est liée directement à la quantité d'énergie que la cible au sol retourne vers le capteur. Les facteurs qui influencent la puissance reçue par l'antenne sont regroupés en deux (Henderson et Lewis, 1998) :

**Tableau 2.2 : Les facteurs influençant la puissance reçue par l'antenne radar**

Facteurs liés aux paramètres du système	Facteurs liés aux paramètres de la cible
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ La longueur d'onde du signal ou sa fréquence;</li> <li>◆ La polarisation du signal;</li> <li>◆ L'angle de visée du capteur;</li> <li>◆ La direction de visée du capteur;</li> <li>◆ La résolution.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Rugosité de la surface;</li> <li>◆ Propriétés diélectriques;</li> <li>◆ Pente et orientation.</li> </ul>

La combinaison entre les facteurs liés au système et ceux liés à la cible influence la luminance d'un pixel de la façon suivante :

Par exemple,

- ◆ La rugosité de surface est liée à la longueur d'onde du système :
  - ◆ Rugosité  $< \lambda/8$  : surface lisse, réflecteur spéculaire (aucun retour de signal);
  - ◆  $\lambda/8 < \text{Rugosité} < \lambda/2$  : surface de rugosité moyenne, réflecteur intermédiaire (retour d'une petite partie du signal);
  - ◆ Rugosité  $> \lambda/2$  : surface de rugosité importante, réflecteur diffus (retour d'une grande partie du signal);
- ◆ Aussi, la combinaison de l'angle de visée du capteur et la pente de la surface donne l'angle d'incidence;
- ◆ La combinaison de la direction de visée du capteur et l'orientation de la pente de la cible influencent l'aire et la géométrie de la cible présentée au radar ;

#### 2.2.4 L'interaction du signal radar avec la glace d'eau douce

Comme nous venons de le voir dans la section précédente, plusieurs facteurs influencent la force du signal rétrodiffusé. Les propriétés diélectriques, la rugosité et l'angle d'incidence du signal radar, sont les principaux facteurs qui influencent la rétrodiffusion (Raney, 1998). Ces paramètres sont liés, selon les résultats d'analyse de données RSO du satellite ERS-1, à l'épaisseur de la glace, la couche de glace-neige, conditions des bulles d'air et leur structure, et les conditions à l'interface glace-eau et glace-fond (Hall, 1998).

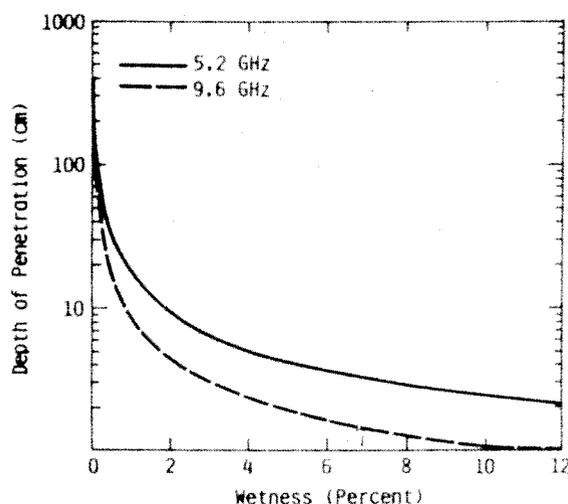
La constante diélectrique est l'entité physique liée aux propriétés électriques du milieu (CCRS, 2002). Le terme diélectrique se réfère aux milieux qui n'ont pas une conductivité « parfaite » à la radiation électromagnétique. En d'autres termes, les propriétés diélectriques d'un milieu reflètent sa capacité à « absorber ou transmettre » le signal électromagnétique incident. Le contraste diélectrique est le rapport des constantes diélectriques de deux milieux différents se juxtaposant. Plus ce contraste est grand, plus la rétrodiffusion est liée aux caractéristiques du plan de surface entre les deux milieux. Dans ce cas, nous parlons de la diffusion de surface. Plus le contraste diélectrique est fort, plus forte est la réflexion du signal radar (Elachi *et al.*, 1976). Par contre, plus le contraste diélectrique est faible, plus la rétrodiffusion est liée aux caractéristiques de volume du deuxième milieu, c'est la diffusion de volume. Dans ce cas, la radiation électromagnétique pénètre profondément dans le milieu. Par exemple, pour la bande C, le signal

radar pénètre jusqu'à 36 mètres dans une neige sèche (taux d'humidité de 0 %) voir figure 2.13. Selon Gogineni (1984), un signal de fréquence de 1 GHz pénètre jusqu'à 100 mètres dans une glace d'eau douce (dix mètres pour un signal de 10 GHz selon Weber *et al.*, 2001). Pour ce genre de milieu, le signal rétrodiffusé n'est pas juste limité à la réponse des couches supérieures du milieu.

Pour reprendre l'exemple de la neige, au-delà de 3 % d'humidité, le signal dans la bande C ne pénètre pas plus que 10 cm (voir figure 2.13). Dans ce cas et si cette neige couvre la glace de rivière, le signal rétrodiffusé est dû seulement à l'effet de la neige qui agit comme masque sur la glace. Le tableau 2.3 présente les valeurs (partie réelle) de la constante diélectrique de l'air, la neige et la glace. Il y a un faible contraste diélectrique entre l'air et la glace ( $1/\approx 3$ ), il y aura donc une pénétration du signal électromagnétique. Par contre, le contraste diélectrique à l'interface glace/eau liquide est fort ( $\approx 3/81$ ), le phénomène qui affecte alors le signal est celui de la diffusion de surface.

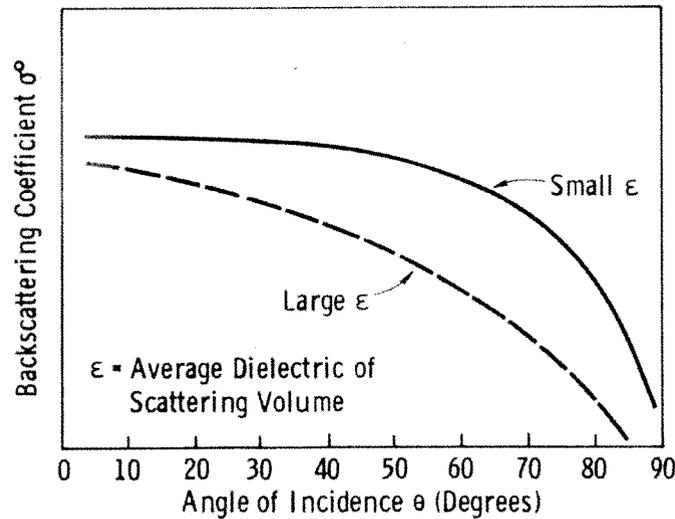
**Tableau 2.3 : Constantes diélectriques (D'après Webert et al., 2001)**

Milieu	Constante diélectrique	Source
Air	1	
Glace d'eau douce- glace noire avec bulles d'air > 0.6	2.99	Cooper <i>et al.</i> (1976)
Glace d'eau douce- glace blanche	3.08	Cooper <i>et al.</i> (1976)
Glace d'eau douce- glace noire	3.17	Evans (1965)
Neige sèche	1.2-2.0	Hallikainen and Ulaby (1986)
Neige humide	> 35	Hall (1998)
Eau	81	



**Figure 2.13 : Profondeur de pénétration des fréquences des bandes C et X dans la neige en fonction de son degré d'humidité (d'après Gogineni, 1984).**

La diffusion de volume est causée par une discontinuité des propriétés diélectriques d'un milieu. L'onde qui y pénètre est diffusée par ses diverses composantes (Bonne et Rochon, 1996). Cette définition paraît simple, mais le concept de la diffusion de volume est un phénomène physique assez complexe. La diffusion de volume dépend de la nature hétérogène des objets imagés (Raney, 1998). L'ampleur du phénomène s'accroît avec l'augmentation de l'hétérogénéité de la constante diélectrique dans le milieu (figure 2.14). Elle dépend aussi de la taille par rapport à la longueur d'onde des diffuseurs hétérogènes.



**Figure 2.14 : Dépendance du coefficient de rétrodiffusion de la variabilité de la constante diélectrique dans le cas de diffusion de volume.**

Selon Drinkwater (1989) les composantes hétérogènes dans la glace blanche, telle que cristaux de glace, eau liquide, air, fissures et impuretés peuvent causer une diffusion de volume. Si les diffuseurs hétérogènes n'ont pas une taille significative (plus petits que la longueur d'onde), la diffusion de volume est faible. Bien qu'il s'agisse de glace de lac, la figure 2.15 présente divers comportements du signal radar dans un couvert de glace d'eau douce. Le signal (a) présente une diffusion de volume causée par des bulles d'air ovales et explique le retour du signal. Le cas plus fréquent est représenté par le signal (b) qui illustre un cas de réflexion spéculaire.

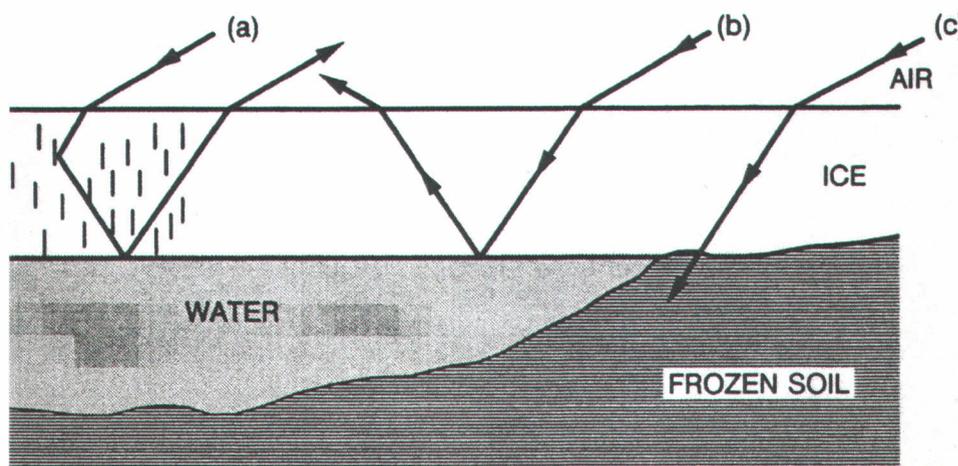


Figure 2.15 : Diffusion du signal Radar dans un lac : a- glace avec bulle d'air ovales, b- glace sans bulle d'air et c- glace qui atteint le fond du lac (d'après Weeks *et al.*, 1981).

Les tableaux 2.4 et 2.5, extraits d'une étude d'Hydro-Québec, résument très bien, respectivement, les effets produits par les paramètres du système radar et les caractéristiques de la glace sur la rétrodiffusion des ondes (Hydro-Québec, 1996).

Tableau 2.4 : Effets des paramètres du système radar sur la rétrodiffusion des ondes (d'après H-Q 1996)

Faible contribution au retour du signal		Forte contribution au retour du signal		Source
Paramètre	Effet produit	Paramètre	Effet produit	
grandes longueurs d'onde	apparence lisse de la surface : réflexion spéculaire	courtes longueurs d'onde	Apparence rugueuse de la surface : réflexion diffuse	Peake et Oliver, 1971 ; Hall et Martinec, 1985
courtes longueurs d'onde	absorption du signal	grandes longueurs d'onde	Pénétration du signal : possibilité de diffusion surfacique et volumique	Bonn et Rochon, 1996
polarisation croisée	Intensité relativement faible du signal rétrodiffusé	polarisation parallèle	Intensité relativement forte du signal rétrodiffusé	
angle d'incidence élevé	apparence lisse de la surface : réflexion spéculaire	angle d'incidence faible	apparence rugueuse de la surface : réflexion diffuse	Peake et Oliver, 1971

**Tableau 2.5 : Effets des caractéristiques de la glace sur la rétrodiffusion des ondes (d'après H-Q 1996)**

Faible contribution au retour du signal		Forte contribution au retour du signal		Source
Caractéristique de la glace	Effet produit	Caractéristique de la glace	Effet produit	
Glace lisse	Réflexion spéculaire	Glace rugueuse : neige glacée, glace agglomérée	Réflexion diffuse	Hall et al., 1994; Jeffries et al., 1994; Leconte et Klassen, 1991
Glace mince : surface généralement lisse	Réflexion spéculaire	Glace épaisse : surface généralement rugueuse	Réflexion diffuse	Hall et al., 1994
Interface glace/eau lisse (ex. : glace de lac)	Réflexion spéculaire	Interface glace/eau rugueuse (ex. : frasil glacé ou glace « agglomérée » de rivière)	Réflexion diffuse	Leconte et Klassen, 1991
Glace formée jusqu'au fond du lac : écart faible entre les constantes diélectriques de la glace et des sédiments gelés	Diffusion faible à l'interface glace/sédiments et absorption du signal par le lit du lac ou de la rivière	Glace flottante : Écart élevé entre les constantes diélectriques de la glace et de l'eau	Diffusion forte à l'interface eau/glace	Hall et al., 1994 ; Jeffries et al., 1994
Glace mouillée	Absorption du signal	Glace non mouillée	Pénétration du signal : possibilités de diffusion surfacique (interface eau/glace, glace/sédiments) et volumique	Hall et al., 1994
Couverture de neige humide sur la glace	Absorption du signal			Hallikainen et al., 1984
Constante diélectrique élevée de la glace	Absorption du signal	Constante diélectrique faible de la glace	Pénétration du signal : possibilités de diffusion surfacique (interface eau/glace, glace/sédiments) et volumique	Leconte et Klassen, 1991
		Couverture de neige glacée contenant des hétérogénéités	Diffusion volumique	Page et Ramseier, 1975
Glace claire seulement (absence de bulles tubulaires)	Aucune diffusion volumique	Glace contenant des bulles tubulaires	Diffusion volumique	Jeffries et al., 1994
Température élevée de la glace (sans atteindre la température de fonte)	Absorption du signal	Basse température de la glace	Pénétration du signal : possibilités de diffusion surfacique (interface eau/glace, glace/sédiments) et volumique	Leconte et Klassen, 1991

### **2.2.5 Conclusion**

Vu les informations que nous exposons dans ce sous chapitre, et en tenant compte des conclusions du sous chapitre précédent, nous concluons que :

- ◆ La glace de rivière possède des caractéristiques lui permettant d'influencer significativement le signal radar rétrodiffusé :
  - ◆ Le contraste diélectrique étant important, la diffusion de surface à l'interface glace/eau ou glace/lit de rivière a une forte probabilité d'occurrence. La rugosité au niveau de ces interfaces joue donc un grand rôle pour le signal rétrodiffusé. Les caractéristiques d'une classe de glace de rivière font que l'interface avec un autre milieu (eau liquide; lit de rivière) est unique. Cela signifie que les caractéristiques de cette interface changent selon la classe de la glace de rivière (primaire, secondaire superposée et agglomérée) qui le forme.
  - ◆ La neige sèche sur un couvert de glace ne constitue pas un masque pour les ondes radar. Toutefois, une glace de rivière couverte par de la neige humide ne peut être caractérisée par les images radar.
  - ◆ La diffusion de volume influence aussi le signal radar rétrodiffusé. Cela est dû à l'hétérogénéité des composantes du couvert de glace. En fait, ce couvert peut être formé de trois couches de glace différentes, primaire, secondaire et superposée. En plus de la possibilité de présence de formes hétérogènes (bulle d'air, impuretés, fissures, graines de diverses natures) au sein de chacune de ces classes, la présence de trois ou deux couches différentes est en soi un élément d'hétérogénéité.
- ◆ Polarisation parallèle, longueur d'onde de 5,6 cm et des angles d'incidence compris entre 35° et 49° donnent une bonne combinaison de paramètres pour caractériser la glace de rivière à l'aide du mode fin du satellite RADARSAT-1.
- ◆ Il est possible que deux couverts de glace de nature différente donnent lieu à un signal rétrodiffusé proche. Cependant, notre hypothèse de base stipule que dans ce cas la différenciation peut se faire en tenant compte du contexte et des données auxiliaires de l'image radar.

## 2.3 Texture et Polarimétrie Radar

### 2.3.1 Texture

L'utilisation des images Radar ne se limite pas au seul signal rétrodiffusé. Afin d'exploiter leur plein potentiel de plus en plus on a recours à la texture. Cette technique consiste à analyser les fréquences de changement et l'arrangement des tons d'une image. Dans de nombreux domaines d'application, la texture est connue comme étant un moyen efficace pour générer plus d'information dans une image (ex : Arzandeh et Wang, 2002). Pour les images Radar, l'analyse de texture peut être plus efficace pour l'interprétation que les tons (Ulaby *et al.*, 1986).

Dans les sections suivantes, nous introduisons la matrice de cooccurrence du niveau de gris (GLCM : Grey-Level Co-occurrence matrix), le vecteur de différences du niveau de gris (GLDV : grey-level difference vector) et la définition des paramètres de texture qui en découlent.

#### 2.3.1.1 La matrice de cooccurrence du niveau de gris (GLCM)

Plusieurs algorithmes de texture existent, mais ceux s'appuyant sur une approche statistique sont les plus efficaces (Arzandeh et Wang, 2002). Proposée par Haralick dans les années soixante-dix (Haralick *et al.*, 1973), l'utilisation de la matrice de cooccurrence du niveau de gris s'est vite répandue et est devenue l'algorithme statistique le plus connu pour des mesures de texture (Arzandeh et Wang, 2002).

La GLCM est un histogramme bidimensionnel d'occurrence de niveaux de gris pour une paire  $(i, j)$  de pixels mobile séparés par un rapport spatial fixe (Hall-Beyer, 2004). Le premier pixel  $(i)$  de la paire est pris comme référence tandis que l'autre  $(j)$  est considéré comme le voisin. Selon un ordre spatial et dans une fenêtre de calcul, la GLCM renferme l'information sur le nombre de fois où le pixel de référence aura un voisin avec un niveau de gris donné. Considérons une image avec  $N \times N$  pixels  $\{I(x, y), 0 \leq x \leq N-1, 0 \leq y \leq N-1\}$  et  $G$  niveau de gris. L'expression mathématique de la GLCM  $G \times G$  pour un vecteur de déplacement  $\mathbf{d} = (dx, dy)$  est  $P_{\mathbf{d}}$  (équation 2.12). L'entrée  $(i, j)$  de  $P_{\mathbf{d}}$  est le nombre d'occurrences de la paire de niveaux de gris  $i$  et  $j$  et qui sont séparés par une distance  $\mathbf{d}$  (Chen *et al.*, 1998).

$$P_{\mathbf{d}}(i, j) = |\{(r, s), (t, v) : I(r, s) = i, I(t, v) = j\}| \quad \text{Équation 2.12}$$

Où :  $(r, s), (t, v) \in N \times N$ ,  $(t, v) = (r + dx, s + dy)$  et  $|\cdot|$  est la cardinalité de l'ensemble.

L'exemple suivant clarifie cette idée. Considérons l'image de taille 4 x 4 suivante :

	2	1	2
2			1
1	2	2	1
2	1		2

Puisqu'il y a trois niveaux de gris présents dans cette image (0,1 et 2), donc  $G=3$ . La matrice de co-occurrence du niveau de gris de taille 3 x 3 et pour un vecteur de déplacement  $\mathbf{d} = (1, 0)$  est la suivante :

$$P_{\mathbf{d}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

Le tableau suivant donne un aperçu simplifié du contenu de cette GLCM :

		Niveau de gris du pixel voisin		
		0	1	2
Niveau de gris du pixel de référence	0	$P_{\mathbf{d}}(0, 0)=1$	$P_{\mathbf{d}}(0, 1)=1$	$P_{\mathbf{d}}(0, 2)=2$
	1	$P_{\mathbf{d}}(1, 0)=1$	$P_{\mathbf{d}}(1, 1)=0$	$P_{\mathbf{d}}(1, 2)=2$
	2	$P_{\mathbf{d}}(2, 0)=1$	$P_{\mathbf{d}}(2, 1)=3$	$P_{\mathbf{d}}(2, 2)=1$

Chaque case du tableau donne la valeur d'occurrence de la paire de niveaux de gris  $(i, j)$  selon la distribution spatiale  $\mathbf{d} (1,0)$ . Dans l'image de l'exemple en haut, il y a seulement deux fois où deux pixels du même niveau de gris se trouvent côte à côte :  $P_{\mathbf{d}}(0, 0)=1$  et  $P_{\mathbf{d}}(2, 2)=1$ .

Nous remarquons que la GLCM est asymétrique. En changeant le vecteur de déplacement  $\mathbf{d}$ , la GLCM change, par exemple pour  $\mathbf{d} = (-1, 0)$  :

$$P\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour rendre la GLCM symétrique il suffit de lui additionner sa transposée  $P=P\mathbf{d} + P-\mathbf{d}$ . Dans l'exemple ci-haut, la deuxième GLCM est la transposée de la première. En les additionnant on obtient une matrice symétrique :

$$P = P\mathbf{d} + P-\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 3 \\ 2 & 0 & 5 \\ 3 & 5 & 2 \end{bmatrix}$$

Afin de pouvoir calculer des paramètres statistiques à partir de la GLCM, il faut la transformer en probabilité d'occurrence. Pour ce faire, l'équation (2.13) est appliquée :

$$p_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}} \quad \text{Équation 2.13}$$

Où :

$P_{i,j}$  est la probabilité d'occurrence correspondant à la cellule (i,j) de la GLCM symétrique;

$V_{i,j}$  est la valeur de la cellule (i,j) de la GLCM symétrique;

dans le cas de notre exemple,

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j} = 2 + 2 + 3 + 2 + 0 + 5 + 3 + 5 + 2 = 24 \quad \text{et} \quad p_{1,2} = \frac{V_{1,2}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}} = \frac{5}{24} = 0,208$$

La GLCM de probabilité ainsi calculée devient :

$$\begin{bmatrix} 0,083 & 0,083 & 0,125 \\ 0,083 & 0 & 0,208 \\ 0,125 & 0,208 & 0,083 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de différences du niveau de gris (GLDV) est aussi utilisé dans le calcul de plusieurs paramètres de texture. Il est calculé directement de la *GLCM* et consiste en la sommation de ses diagonales.

Différence des niveaux de gris ( $i-j$ )	GLDV nombre de cas d'occurrence	GLDV probabilité d'occurrence
0	4	0,167
1	14	0,583
2	6	0,25

La deuxième colonne du tableau se lit comme suit : dans quatre cas la différence des niveaux de gris est de zéro, 14 fois, elle vaut un et 6 fois, elle est égale à deux. La troisième colonne donne une information similaire, mais cette fois-ci avec les probabilités : la probabilité que la différence du niveau de gris des deux pixels soit égale à zéro est de 0,167, elle est de 0,583 pour une différence de un et finalement 0,25 pour une différence de deux (dans cet exemple, la relation spatiale étudiée est horizontale : est-ouest).

Le schéma de la figure 2.16 résume les étapes énumérées en haut et qui permettent de passer de la matrice des niveaux de gris à celle de leurs probabilités d'occurrence.

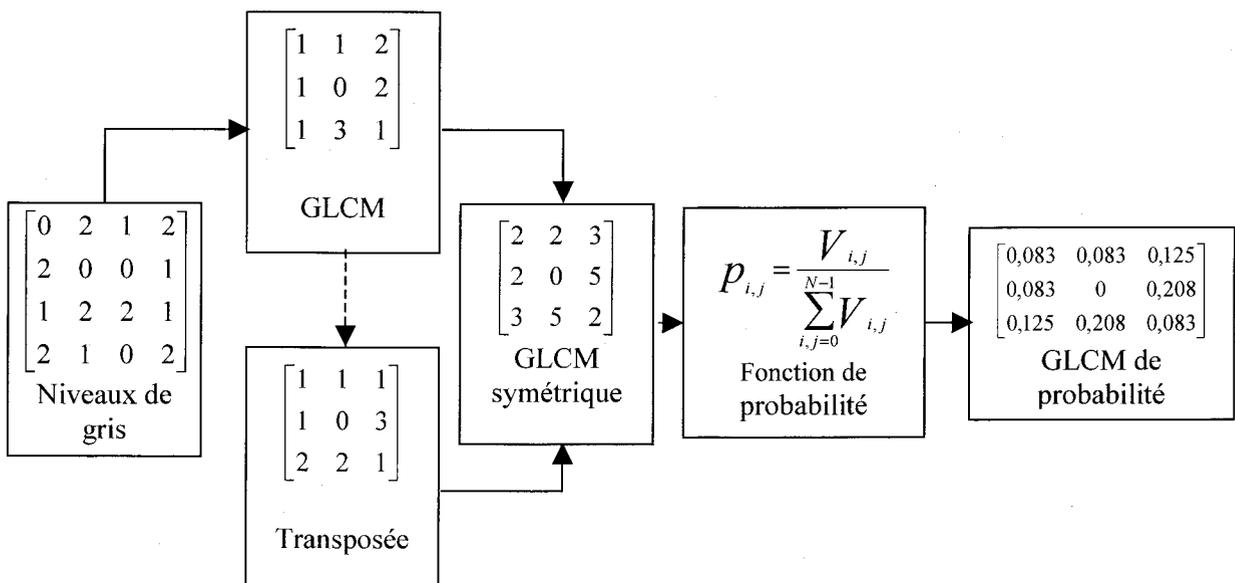


Figure 2.16 : Étapes du processus de génération de la GLCM.

### 2.3.1.2 Description des paramètres de texture

Treize paramètres de textures peuvent être extraits à partir de la *GLCM* et sont utilisés pour des fins de classification (Treitz et Howard, 2000; Soh et Tsatsoulis, 1999; Barber et LeDrew, 1991...etc). Plus particulièrement, les sept paramètres de texture suivants sont le plus utilisés, à savoir : (1) l'homogénéité (2) le contraste (3) la moyenne (4) l'écart-type (5) l'entropie (6) le second moment angulaire et (7) la corrélation. L'efficacité de ces paramètres de texture varie d'une application à une autre et plusieurs combinaisons de ces paramètres sont possibles. Dans ce qui suit, la définition mathématique ainsi qu'une discussion sur l'utilité et l'interprétation de chaque paramètre de texture sont présentées.

#### Homogénéité :

Plus une image est localement homogène plus grand va être ce paramètre de texture. Les valeurs  $P_{i,j}$  sont pondérées en les divisant par le carré de la différence  $(i-j)$ . Évidemment, le facteur de pondération est additionné à 1 pour éviter des divisions par zéro lorsque  $i = j$ .

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i-j)^2} \quad \text{Équation 2.14}$$

#### Contraste :

Ce paramètre de texture indique le degré de variation locale dans une image. Il est donc l'opposé de l'homogénéité. Plus  $i$  et  $j$  sont proche plus le contraste est faible, par contre la différence entre ces deux entités se traduit par un élément de pondération  $(i-j)^2$  qui croît exponentiellement.

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i-j)^2 \quad \text{Équation 2.15}$$

#### Dissimilarité :

Comme pour le paramètre contraste, la dissimilarité mesure la variation locale dans une image. Dans le cas du contraste les poids de pondération augmentent exponentiellement en mesure qu'on s'éloigne de la diagonale de la *GLCM*. Pour la dissimilarité cette augmentation est plutôt linéaire.

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} |i-j| \quad \text{Équation 2.16}$$

**Moyenne :**

La moyenne est un paramètre statistique de texture, elle peut être mesurée en fonction du pixel de référence (équation de gauche) ou du pixel voisin (équation de droite). Cependant, puisque la GLCM est devenue symétrique, ces deux équations sont égales.

$$\mu_i = \sum_{i,j=0}^{N-1} i(P_{i,j}) \text{ et } \mu_j = \sum_{i,j=0}^{N-1} j(P_{i,j}) \quad \text{Équation 2.17}$$

**Écart-Type et Variance :**

Dans ce cas aussi il s'agit de paramètre statistique de texture et puisque la GLCM est symétrique donc les termes sont égaux pour  $i$  et  $j$ . La variance est calculée en premier (équation 2.18) et l'écart type en est déduit (équation 2.19).

$$\sigma_i^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - \mu_i)^2 \text{ et } \sigma_j^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (j - \mu_j)^2 \quad \text{Équation 2.18}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_i^2} \text{ et } \sigma_j = \sqrt{\sigma_j^2} \quad \text{Équation 2.19}$$

**Second Moment Angulaire :**

Ce paramètre est relatif au degré d'ordre spatial des éléments d'une fenêtre d'image. Plus sa valeur est grande plus il y a d'ordre, et inversement, plus sa valeur est faible plus il y a du désordre. Dans le cas du second moment angulaire, l'entité  $P_{i,j}$  est elle-même utilisée comme facteur de pondération.

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2 \quad \text{Équation 2.20}$$

L'énergie est un autre paramètre de texture égale à la racine carrée du second moment angulaire. Cependant, son utilisation n'est pas fréquente.

**Entropie :**

L'entropie a un sens proche que celui utilisé en physique ou en thermodynamique. Elle prend sa valeur maximale dans le cas où tous les pixels analysés ont la même valeur de gris (ordre maximal). Pour le calcul de ce paramètre il est assumé que  $0 \cdot \ln(0) = 0$ .

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} p_{i,j} \cdot (-\ln(p_{i,j})) \quad \text{Équation 2.21}$$

**Corrélation :**

La corrélation mesure la dépendance linéaire aux niveaux de gris des pixels adjacents. Ce paramètre donne une information presque similaire de celle obtenue en appliquant des méthodes d'autocorrection utilisant l'indice I de Moran ou l'indice C de Geary (Van der Sanden et Hoekman, 2005).

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} p_{i,j}^2 \left[ \frac{(i - \mu_i) - (j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2)(\sigma_j^2)}} \right] \quad \text{Équation 2.22}$$

Les paramètres présentés en haut sont ceux reliés à la GLCM. Ils peuvent être subdivisés en trois ensembles :

1. Ceux liés au contraste : les poids de pondération sont calculés en fonction de la distance à la diagonale. Dans ce groupe se trouvent les paramètres de texture : Contraste, Homogénéité et Dissimilarité;
2. Paramètres de textures liés à l'ordre des niveaux des gris dans une fenêtre de l'image : Second moment angulaire, Entropie, et Énergie;
3. Paramètres de nature statistique : Moyenne, Variance, Écart-Type, et Corrélation.

Les quatre autres paramètres qui restent pour compléter les treize sont calculés à partir du vecteur de différences du niveau de gris (*GLDV*). Nous trouvons dans cette catégorie, *GLDV* Second moment angulaire, *GLDV* Entropie, *GLDV* Moyenne et finalement *GLDV* Contraste.

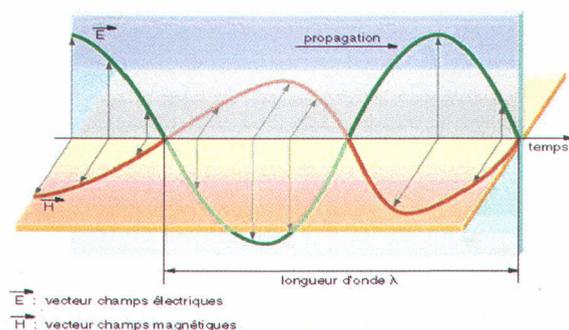
Finalement, il est important de signaler que les images radar sont connues par la présence de chatoiement (*speckle*) (Lee *et al.*, 1997), surtout pour le mode fin. Les paramètres de texture peuvent être extraits avant ou après l'application de filtres spéciaux pour la réduction du chatoiement (*speckle*) (Pultz et Brown, 1987; Pierce *et al.*, 1998; Treiz *et al.*, 2000). Le rééchantillonnage bilinéaire, lors de la correction géométrique, a un effet d'un filtre passe-bas (Arzandeh et Wang, 2002) et augmente la qualité de la classification basée sur la texture (Dikshit et Roy, 1996).

### 2.3.2 Polarimétrie radar

Nous présentons dans cette section des notions de base sur la polarimétrie radar. En fait, bien que notre recherche soit basée essentiellement sur les images RADARSAT-1, des images polarimétriques ont été utilisées comme support d'interprétation. Avant de définir le concept de polarimétrie, nous présentons les caractéristiques d'une onde électromagnétique et la notion de polarisation. Finalement, nous présentons les outils d'analyse et d'interprétation des données polarimétriques.

#### 2.3.2.1 Caractéristiques d'une onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est formée lors de la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique (GD, 2005). La figure 2.17 montre la relation de ces deux champs dans le cas d'une onde EM plane. Dans un plan perpendiculaire au sens de la propagation de l'onde les vecteurs des champs électrique, E, et magnétique, M, (H dans la figure) sont eux aussi perpendiculaires.

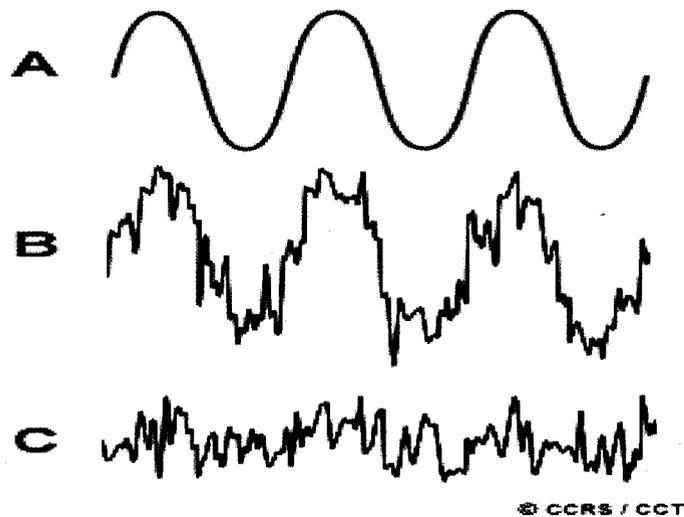


**Figure 2.17 : Illustration du champ électrique et magnétique d'une onde électromagnétique plane (CCT, 2005).**

Nous remarquons aussi qu'à l'origine temporelle de cette onde, la différence de **phase**  $\Delta\phi$  entre le champ électrique et magnétique est nulle. En fait, pour les deux champs la phase  $\phi$  au moment  $t=0$  est de  $\pi/2$ . À retenir aussi dans la figure 2.17 les divers axes, x, y et z qui caractérisent spatialement cette onde. L'axe z correspond à celui de la propagation dans le temps de l'onde. Les axes x et y sont des axes perpendiculaires entre eux et se trouvent dans le plan perpendiculaire à l'axe z. À rappeler que la **longueur d'onde**,  $\lambda$ , est la distance où l'onde effectue une oscillation complète (passage de  $\phi = 0$  à  $\phi = 2\pi$ ) et que la **fréquence** de l'onde est le nombre de fois par seconde qu'un point de l'axe z est traversé par le pic de l'onde.

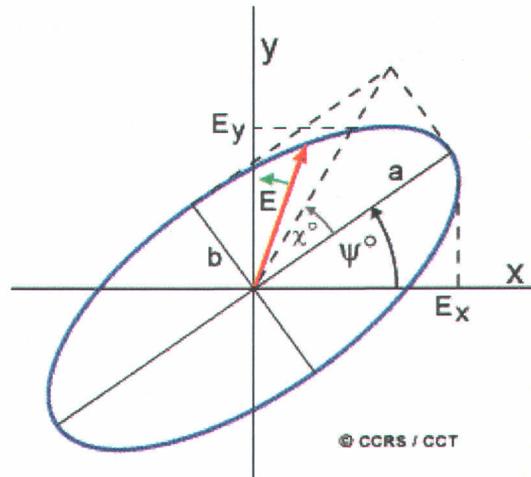
### 2.3.2.2 Polarisation d'une onde électromagnétique

Dans la figure 2.17 nous avons vu que le vecteur du champ électrique est en tout temps situé dans le plan  $(x, z)$ . Cependant, ceci n'est qu'une exception et ce vecteur peut avoir un mouvement tridimensionnel dans l'espace  $(x, y, z)$ . Ceci dit, la polarisation d'une onde électromagnétique dépend de la régularité du tracé formé par la tête du vecteur du champ électrique. Dans le cas d'une onde non polarisée (naturelle), le tracé de ce vecteur est aléatoire et imprévisible (figure 2.18-C). Par contre, une onde est dite entièrement polarisée si la trajectoire du champ électrique n'est pas aléatoire (figure 2.18-A). Évidemment, une onde peut avoir une polarisation qui est située entre les deux bornes précédemment définies (non polarisée vs entièrement polarisée), figure 2.18-B.



**Figure 2.18 : Exemples d'onde (A) Complètement polarisée, (B) Partiellement polarisée, et (C) non polarisée, (CCT, 2005).**

Les ondes polarisées peuvent être elliptiques, la figure 2.19 présente le tracé du vecteur électrique  $E$  d'une onde complètement polarisée dans le plan  $x$ - $y$ . La pointe du vecteur électrique trace une ellipse caractérisée par son axe semi-grand «  $a$  » et l'axe semi-petit «  $b$  ». La définition des angles d'ellipticité et d'orientation  $\chi$  et  $\Psi$  est illustrée sur la figure (CCT, 2005). Dans la même figure nous remarquons que le vecteur du champ électrique a deux composantes,  $E_x$  et  $E_y$ .



**Figure 2.19 : Vecteur électrique E d'une onde complètement polarisée dans le plan x-y (CCT, 2005).**

Les cas extrêmes de la polarisation elliptique sont la polarisation circulaire et la polarisation rectiligne. En fait quand  $\chi = 0$  le vecteur E décrit un segment de droite et la polarisation est dite rectiligne. Dans le cas où  $\chi = |\pi/2|$  l'ellipse prendrait la forme d'un cercle d'où la nomination de polarisation circulaire.

Pour décrire mathématiquement l'état de polarisation d'une onde, les paramètres de Stokes ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ ) sont utilisés :

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_y|^2 + |E_x|^2 \\ |E_y|^2 - |E_x|^2 \\ 2 \operatorname{Re} \left\{ E_y E_x^* \right\} \\ 2 \operatorname{Im} \left\{ E_y E_x^* \right\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_0 \cdot \cos(2\psi) \cdot \cos(2\chi) \\ S_0 \cdot \sin(2\psi) \cdot \cos(2\chi) \\ S_0 \cdot \sin(2\chi) \end{bmatrix} \quad \text{Équation 2.23}$$

Dans cette équation  $S_0$  présente la puissance totale de l'onde, tandis que la puissance de la partie polarisée de l'onde est exprimée par le paramètre :  $\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ . Ainsi, le ratio de ces deux entités nous donne une idée sur le degré de polarisation d'une onde, équation suivante :

$$D_{pol} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$$

### 2.3.2.3 Polarimétrie Radar

La polarimétrie est la science de l'analyse et de l'utilisation des mesures de l'ensemble de la matrice de diffusion de polarisation afin de déduire les propriétés physiques de la surface de la Terre (Atelier AQT, 2003). La matrice de diffusion (équation 2.24) (CCT, 2005) est un groupement de quatre nombres complexes qui décrivent la transformation de la polarisation d'une onde incidente frappant un diffuseur en polarisation de l'onde rétrodiffusée. En d'autres termes, cette matrice nous donne une idée sur les changements de polarisation que va subir une onde après un contact avec une cible quelconque.

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad \text{Équation 2.24}$$

Les éléments de la matrice de diffusion sont des nombres complexes qui sont calculés en utilisant les amplitudes et les phases mesurées par les quatre canaux d'un Radar polarimétrique. Le principe d'un tel type de système radar est le suivant :

- Transmission d'une première impulsion dans une polarisation donnée (p. ex. horizontale ou verticale);
- Transmission d'une seconde impulsion en polarisation orthogonale par rapport à celle de l'étape précédente;
- Réception simultanée de l'onde diffusée par la cible dans les deux polarisations de transmission.

À la fin de ce processus qui se répète tout au long de l'acquisition de l'image d'une scène, les quatre canaux nécessaires au calcul de la matrice de diffusion sont obtenus. Ces canaux sont en général HH, VV, VH et HV. Une fois que la matrice de diffusion est mesurée, l'amplitude et la polarisation de l'onde diffusée sont calculées, et ce, quelle que soit la polarisation de l'onde incidente (vecteur  $[E_h^i, E_v^i]$  de l'équation 2.25).

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad \text{Équation 2.25}$$

### 2.3.2.4 Interprétation des données

Nous avons vu précédemment qu'à partir de la matrice de diffusion, n'importe quelle polarisation (incidente et diffusée) peut désormais être calculée. Il est important de présenter ces valeurs synthétisées sous un format facilement interprétable. Il existe plusieurs manières de présenter les données polarimétriques, nous présentons dans ce qui suit les deux techniques suivantes :

- La signature polarimétrique;
- La décomposition de Cloude et Pottier.

#### 2.3.2.4.1 La signature polarimétrique

Cette signature est spécifique à chaque type de cible et dépend de l'angle de visée et de l'angle d'incidence du Radar. Elle schématise la diffusion d'une cible qui reçoit un signal radar dans toutes les polarisations elliptiques possibles. La signature polarimétrique se divise en deux parties (figure 2.20). La première présente la signature de copolarisation où la diffusion de la cible est acquise dans la même polarisation incidente (figure 2.20-a). À l'inverse, la signature d'orthopolarisation est celle qui présente la diffusion de la cible dans une polarisation orthogonale par rapport à celle incidente (figure 2.20-b).

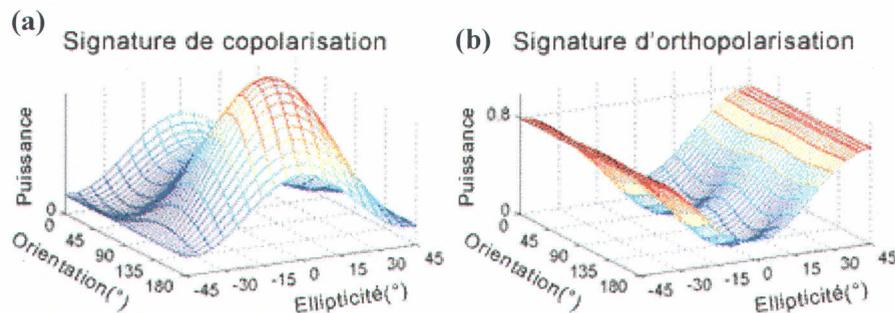


Figure 2.20 : Exemple de Signature polarimétrique d'une cible (CCT, 2005).

Dans la figure 2.20 nous remarquons que l'axe des orientations couvre des angles  $\Psi$  variants de 0 à 180 degrés, tandis que celui d'ellipticité,  $\chi$ , s'étale de -45 à +45 degrés. L'axe des puissances est normalisé de telle façon à ce que les puissances soient toujours comprises entre zéro et un.

### 2.3.2.4.2 La décomposition de Cloude et Pottier

La décomposition de Cloude et Pottier, aussi connue sous le nom de la décomposition  $H/A/\alpha$ , a pour objectif de déterminer les mécanismes de diffusion responsables du signal incident (Cloude et Pottier, 1997). Cette méthode utilise une présentation graphique de l'entropie ( $H$ ), l'anisotropie ( $A$ ) et l'angle  $\alpha$ . Tous ces éléments sont calculés à partir de la matrice de cohérence (Touzi *et al.*, 1999). Les trois représentations graphiques suivantes sont possibles :

1. Présentation bidimensionnelle de l'angle (en fonction de l'entropie  $H$  : La figure 2.21 présente la décomposition du plan bidimensionnel ( $H, \alpha$ ) en neuf zones distinctes. Ceci nous permet essentiellement de définir, si possible, le mécanisme principal de diffusion (surfactive, de volume ou multiple).

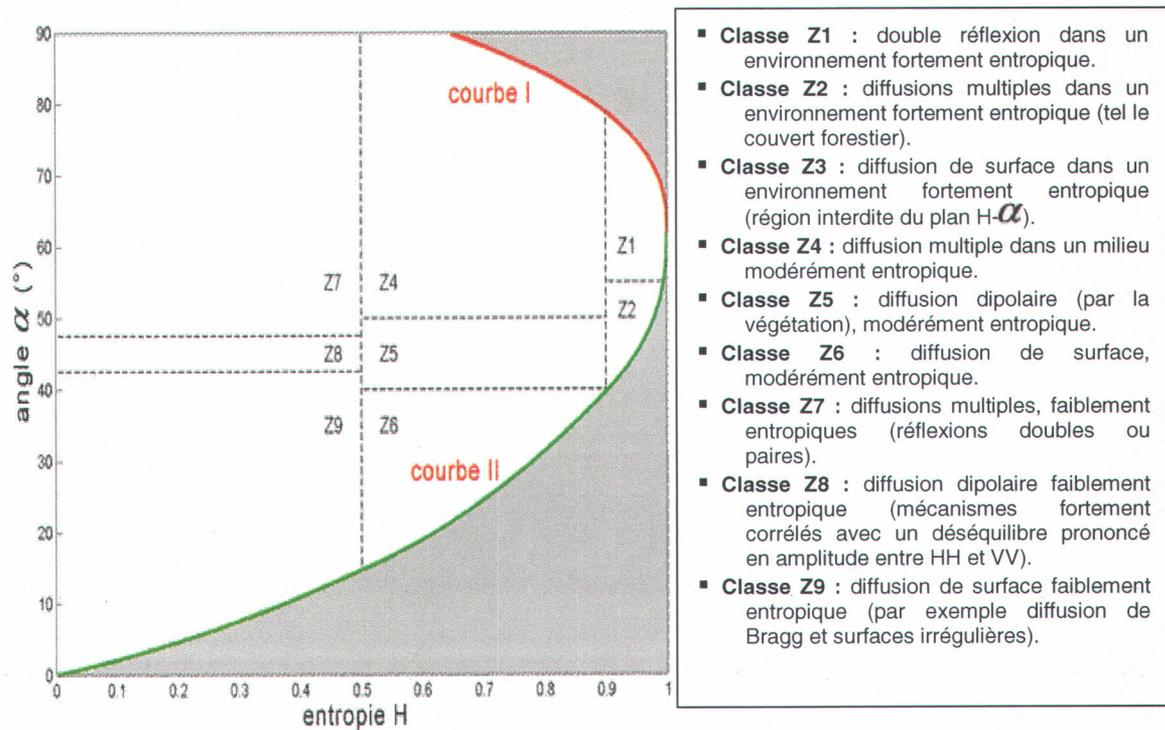


Figure 2.21 : Division des classes modélisées sur plan  $H-\alpha$ . Le texte contient une description des neuf classes Z (CCT, 2005).

- Présentation bidimensionnelle de l'anisotropie (A) en fonction de l'entropie (H) : L'objectif de cette présentation graphique est de déterminer, si possible, dans le cas de la diffusion de surface le degré de rugosité de la surface. La figure 2.22 présente les cas possibles, à noter que la zone grise présente la limite d'applicabilité de cette représentation graphique.

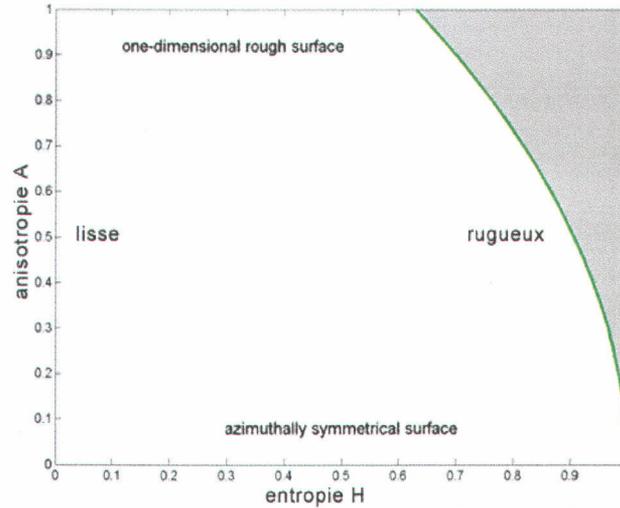


Figure 2.22 : Types de diffusion de surface dans le plan entropie-anisotropie (CCT, 2005).

- Présentation tridimensionnelle de l'angle  $\alpha$ , l'entropie (H) et l'anisotropie (A) : dans ce cas, les huit classes de la figure 3.6 sont multipliées par deux au seuil  $A=0.5$  (en vert dans la figure 2.23). À noter les changements des zones grises selon l'anisotropie.

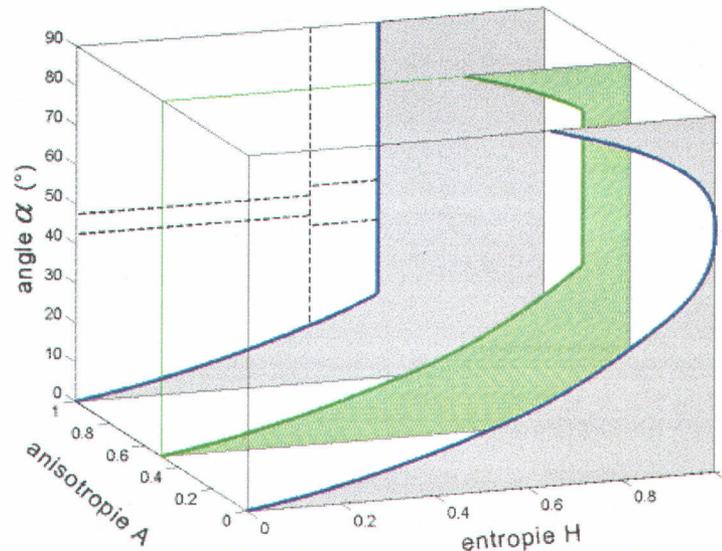


Figure 2.23 : Création de seize classes à partir des huit classes originales du plan H- $\alpha$  de la figure (2.21), par la division de l'espace H A  $\alpha$  à  $A = 0,5$  (plan vert).

## 2.4 Classification orientée objet

La classification orientée objet utilise des objets comme unité de base pour la classification. En fait, à la place de classer chaque pixel de l'image, le processus de classification prend plutôt en compte l'ensemble de pixels qui sont spatialement proches et qui ont des propriétés d'image similaires (rétrodiffusion, réflectance, température de brillance, etc.). C'est pour cette raison que la première étape dans ce type de classification est l'étape de la segmentation de l'image en objets. L'avantage d'utiliser une approche de classification orientée objet est très net, l'exemple conventionnel utilisé pour l'appuyer est celui de la figure 2.24 (Marr, 1982). Dans cet exemple, il est évident que la seule différenciation entre le noir et le blanc n'est pas suffisante pour extraire l'information.



**Figure 2.24 : Illustration artistique d'un dalmatien.**

Avec un peu d'attention, nous arrivons facilement à distinguer un dalmatien qui renifle le sol. Cependant, pour arriver à une telle conclusion nous n'avons pas utilisé seulement le contraste entre les éléments noirs et blancs de l'image. Une méthode de classification basée seulement sur l'information spectrale de chaque pixel se trouve limitée devant un tel cas (Lohmann, 1991). En fait, un processus très complexe a eu lieu dans notre cerveau pour essayer de trouver un agencement logique des éléments observés dans la figure 2.24 (Marr, 1982). Dans la classification orientée objet, sont utilisées non seulement les informations spectrales d'une image, mais aussi, entre autres, celles du contexte, de la logique et de la forme. Il est évident que pour utiliser ces informations, il faut raisonner en terme d'objet et non pas de pixel. Dans la figure 2.24, un objet sera l'ensemble de pixels de même couleur et qui sont voisins (exemple des taches noires).

#### **2.4.1 Extraction des objets d'une image**

De ce que nous venons de voir en haut, les objets sont la pierre angulaire de cette approche de classification. En règle générale, la phase de **segmentation** d'une image en objets se base sur le fait de minimiser un des deux éléments suivants (eCognition User Guide, 2001):

1. l'hétérogénéité moyenne des objets; ou
2. l'hétérogénéité moyenne des objets pondérée par leur taille.

Dans le deuxième point, la taille d'un objet fait référence au nombre des pixels qu'il contient. L'hétérogénéité spectrale, dite aussi de couleur, ( $h$ ) est la somme des écarts type des valeurs

spectrales de chaque canal ( $\sigma_c$ ), pondéré par un poids relatif à chacun d'eux ( $w_c$ ). Les poids sont définis par l'utilisateur (équation 2.26):

$$h = \sum_c w_c \cdot \sigma_c \quad \text{Équation 2.26}$$

L'hétérogénéité spatiale, dite aussi de forme, est le ratio entre la longueur de bordure ( $l$ ) de l'objet et (i) la racine carrée du nombre de pixels qui le forme ( $n$ ), équation 2.27, ou (ii) la longueur la plus courte de la bordure avec un objet adjacent ( $b$ ), équation 2.28.

$$h = \frac{l}{\sqrt{n}} \quad \text{Équation 2.27}$$

$$h = \frac{l}{b} \quad \text{Équation 2.28}$$

Un objet est formé d'un ensemble de petits objets qui ont été fusionnés. La fonction utilisée pour déterminer si deux objets peuvent être fusionnés est présentée par l'équation 2.29. À noter qu'au tout début du processus de segmentation, les objets ne sont rien d'autre que les pixels de l'image.

$$f = w \cdot h_{\text{couleur}} + (1 - w) \cdot h_{\text{forme}} \quad \text{Équation 2.29}$$

Où:  $w$  étant un facteur de pondération, entre zéro et un, déterminé par l'utilisateur.

Selon le cas étudié, un poids variable peut être attribué à l'hétérogénéité de couleur versus celle de forme. L'équation 2.30 montre la formulation mathématique de la nouvelle hétérogénéité de couleur pour les deux objets fusionnés. Cette équation est une sommation des différences pondérées entre l'hétérogénéité de couleur des objets fusionnés et celle des objets avant fusionnement. À la différence de l'équation 2.26, le nombre de pixels de chaque objet entre comme facteur de pondération.

$$h_{\text{couleur}} = \sum_c w_c \left( n_{\text{Merge}} \cdot \sigma_c^{\text{Merge}} - \left( n_{\text{Obj1}} \cdot \sigma_c^{\text{Obj1}} + n_{\text{Obj2}} \cdot \sigma_c^{\text{Obj2}} \right) \right) \quad \text{Équation 2.30}$$

$n_{Merge}$  : Nombre de pixels de l'objet1,  $n_{Obj1}$ , additionné du nombre total de pixels de l'objet2,  $n_{Obj2}$  ; et

$\sigma_c^{Merge}$  : écarts type des valeurs spectrales de chaque canal (indice  $c$  dans l'équation) de l'objet fusionné.

L'hétérogénéité de forme pour l'objet fusionné est donnée par l'équation 2.31. Nous remarquons qu'un nouveau paramètre de pondération est apparu,  $w_{cmpct}$ . En effet, l'utilisateur décide s'il veut des objets plus compacts (*cmpct*) que lisses (*smooth*) ou vice versa.

$$h_{forme} = w_{cmpct} \cdot h_{cmpct} + (1 - w_{cmpct}) \cdot h_{smooth} \quad \text{Équation 2.31}$$

Les équations 2.32 et 2.33 calculent les deux composantes de l'hétérogénéité de forme,  $h_{smooth}$  et  $h_{cmpct}$ . À l'image de l'équation 2.31, ces deux entités sont exprimées par la différence entre le résultat obtenu pour l'objet fusionné et le total de ceux des objets de base.

$$h_{smooth} = n_{Merge} \cdot \frac{l_{Merge}}{b_{Merge}} - \left( n_{Obj1} \cdot \frac{l_{Obj1}}{b_{Obj1}} + n_{Obj2} \cdot \frac{l_{Obj2}}{b_{Obj2}} \right) \quad \text{Équation 2.32}$$

$$h_{cmpct} = n_{Merge} \cdot \frac{l_{Merge}}{\sqrt{n_{Merge}}} - \left( n_{Obj1} \cdot \frac{l_{Obj1}}{\sqrt{n_{Obj1}}} + n_{Obj2} \cdot \frac{l_{Obj2}}{\sqrt{n_{Obj2}}} \right) \quad \text{Équation 2.33}$$

Une fois que les objets d'une image sont extraits, il est d'une importance cruciale de valider leur qualité. Cette étape se fait en comparant le degré d'exactitude de la segmentation avec ce que nous observons visuellement dans l'image. Généralement, le processus est itératif et il faut réajuster les facteurs de pondération,  $w$ ,  $w_c$  et  $w_{cmpct}$ .

## 2.4.2 Caractéristiques des objets extraits

Un pixel d'une image est caractérisé par sa taille, ses coordonnées et sa valeur spectrale dans différentes bandes. Un objet, lui, peut être caractérisé par une multitude, plusieurs dizaines, de

paramètres regroupés sous cinq catégories. Dans ce qui suit, des exemples de paramètres de chaque catégorie avec une brève description sont présentés:

#### 2.4.2.1 Caractéristiques de l'image

Dans cette catégorie nous trouvons les informations spectrales telles la réflectance, la rétrodiffusion, etc. Nous y trouvons aussi des paramètres qui permettent des comparaisons spectrales avec les objets voisins, les super objets et la scène entière. Les principaux paramètres spectraux sont :

**Moyenne** : c'est la moyenne arithmétique des valeurs spectrales de tous les pixels formant un objet, dans une bande spectrale donnée (équation 2.34) :

$$\bar{c}_L = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n c_{Li} \quad \text{Équation 2.34}$$

**Écart-type** : présente l'écart type des valeurs spectrales des  $n$  pixels d'un objet (équation 2.35)

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (c_{Li} - \bar{c}_L)^2} \quad \text{Équation 2.35}$$

**Différence moyenne aux voisins** : ce paramètre donne une information sur la différence spectrale d'un objet par rapport aux  $n$  objets l'entourant, (équation 3.36).

$$\Delta c_L = \frac{1}{l} \cdot \sum_{i=1}^n l_{Si} \cdot (\bar{c}_L - \bar{c}_{Li}) \quad \text{Équation 2.36}$$

Où :

- $l$  longueur de la bordure de l'objet
- $l_{Si}$  longueur de la bordure commune avec l'objet  $i$
- $\bar{c}_L$  moyenne spectrale de l'objet
- $\bar{c}_{Li}$  moyenne spectrale de l'objet voisin  $i$

### 2.4.2.2 Caractéristiques de forme de l'objet

Sous cette rubrique se trouvent les paramètres qui décrivent la forme de l'objet, son orientation, sa superficie, ses coordonnées, sa longueur, largeur, etc.

**Superficie (A) :** la superficie d'un objet est calculée en multipliant le nombre de pixels qui le constituent par leur superficie.

**Ratio longueur/largeur :** le calcul se base sur la matrice de covariance  $S$ :

$$S = \begin{pmatrix} Var(X) & Cov(XY) \\ Cov(XY) & Var(Y) \end{pmatrix} \quad \text{Équation 2.37}$$

Où :

X coordonnées x de tous les pixels de l'objet, et

Y coordonnées y de tous les pixels de l'objet.

Le ratio longueur/largeur est égal au ratio des valeurs propres de la matrice S. La plus grande des valeurs propres devient numérateur du ratio (équation 2.38).

$$\gamma = \frac{l}{w} = \frac{eig_1(S)}{eig_2(S)} \quad \text{et} \quad eig_1(S) > eig_2(S) \quad \text{Équation 3.38}$$

**Longueur (l) et largeur (w) :** une fois le ratio longueur/largeur est calculé, la longueur et la largeur sont approximées en utilisant la superficie, A, de l'objet :

$$l = \sqrt{A \cdot \gamma} \quad \text{et} \quad w = \sqrt{\frac{A}{\gamma}} \quad \text{Équation 2.39}$$

**Densité (d) :** ce paramètre donne une information du rapport entre la superficie de l'objet et son rayon. Plus l'objet est compact plus il ressemble à un carré et plus sa densité est grande.

$$d = \frac{\sqrt{n}}{1 + \sqrt{Var(X) + Var(Y)}} \quad \text{Équation 2.40}$$

**Texture :**

Les paramètres de texture sont calculés pour les pixels qui forment un objet et par la suite moyennés. Pour chacune des bandes spectrales, les paramètres de textures sont calculés selon quatre rapports spatiaux ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $135^\circ$ ) en plus de leur somme. Les détails concernant la texture ont déjà été présentés dans le troisième sous-chapitre du présent chapitre.

**Hierarchie :**

Les paramètres de cette rubrique donnent des informations quant au contexte de l'objet, les objets voisins, les sous objets et les super objets auxquels il est relié. Ces paramètres sont très utiles si une classification est appliquée sur des niveaux différents d'objets.

**Attributs thématiques :**

Cette catégorie regroupe les caractéristiques de l'objet vis-à-vis des données thématiques vectorielles. Distance à un vecteur, présence d'un point, etc.

**2.4.3 Méthodologie de classification orientée objet**

L'algorithme de classification orientée objet que nous utilisons se base sur la logique floue (*fuzzy logic*) et permet l'analyse des caractéristiques des objets ainsi que les relations interobjet. En fait, dans l'exemple du dalmatien (figure 2.24) nous avons vu qu'il faut chercher à formuler des perceptions de raisonnement humain. En logique floue, le résultat d'une opération s'exprime comme une probabilité plutôt qu'une certitude et peut, outre les valeurs « vrai » et « faux », être probablement vrai, peut-être vrai, peut-être faux ou probablement faux, ce qui s'approche de la façon dont les humains raisonnent et distinguent entre le possible, le probable et le vraisemblable (GD, 2005). En se basant sur cette logique deux possibilités de classification sont alors offertes (i) Analyse du plus proche voisin (*Nearest Neighbor*) en utilisant des sites d'entraînement et (ii) la fonction d'appartenance (*Membership Function*); À noter que la fonction d'appartenance peut être utilisée en complémentarité avec celle du plus proche voisin.

### 2.4.3.1 Analyse du plus proche voisin

Dans la première possibilité basée sur la technique du plus proche voisin, nous commençons par définir l'espace des attributs (*feature space*). Nous pouvons utiliser n'importe lesquelles des caractéristiques d'objet définies en haut pour bâtir cet espace à N dimensions. L'étape suivante consiste à choisir des objets qui serviront comme site d'entraînement pour la classification. En fait, chacun de ces objets est placé dans l'espace des attributs selon les valeurs de ses propres caractéristiques (attributs). Pour chaque objet à classer, une distance  $d$  est calculée par rapport aux objets connus (équation 2.41).

$$d = \sqrt{\sum_f^N \left( \frac{v_f^{(s)} - v_f^{(o)}}{\sigma_f} \right)^2} \quad \text{Équation 2.41}$$

Où :

$v_f^{(s)}$  Valeur de l'attribut  $f$  de l'objet d'entraînement;

$v_f^{(o)}$  Valeur de l'attribut  $f$  de l'objet à classer;

$\sigma_f$  Valeur de l'Écart type de l'attribut  $f$ .

Une fois cette distance calculée, une fonction d'appartenance exponentielle  $z(d)$  est appliquée pour connaître le degré d'appartenance de l'objet à une classe donnée (équation 2.42).

$$z(d) = e^{-k \cdot d^2} \text{ avec } k = \ln \left( \frac{1}{\text{Pente\_de\_la\_Fonction\_}z(d)} \right) \quad \text{Équation 2.42}$$

La pente de la fonction  $z(d)$  est la valeur que cette fonction prend quand la distance  $d$  égale à un (figure 2.25).

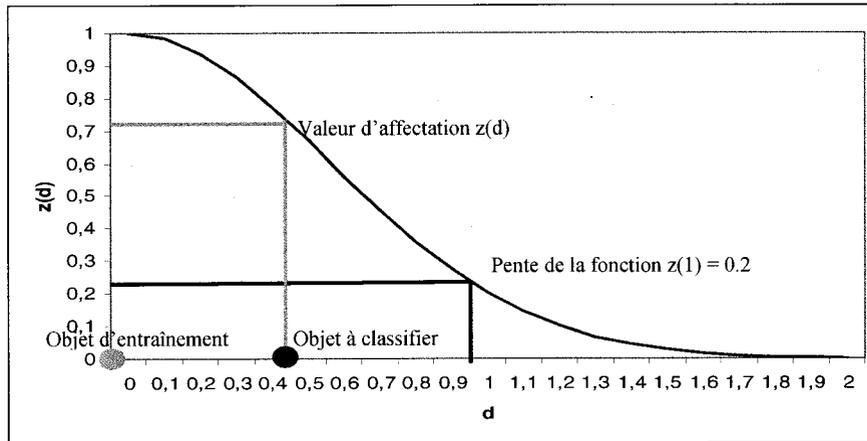


Figure 2.25 : Exemple de fonction d'appartenance de la méthode du plus proche voisin.

#### 2.4.3.2 Fonction d'appartenance

Dans le cas de cette classification, il n'y a pas d'utilisation d'objets d'entraînement ni de calcul de distance. En fait, en nous basant sur nos connaissances, nous définissons des attributs qui distinguent une classe donnée et nous leur appliquons une fonction d'appartenance. Cette dernière prend plusieurs formes possibles pour s'ajuster à des situations différentes (figure 2.26). L'axe des abscisses représente les valeurs du paramètre significatif choisi parmi les caractéristiques des objets de l'image. L'axe des ordonnées représente la valeur attribuée par la fonction d'appartenance.

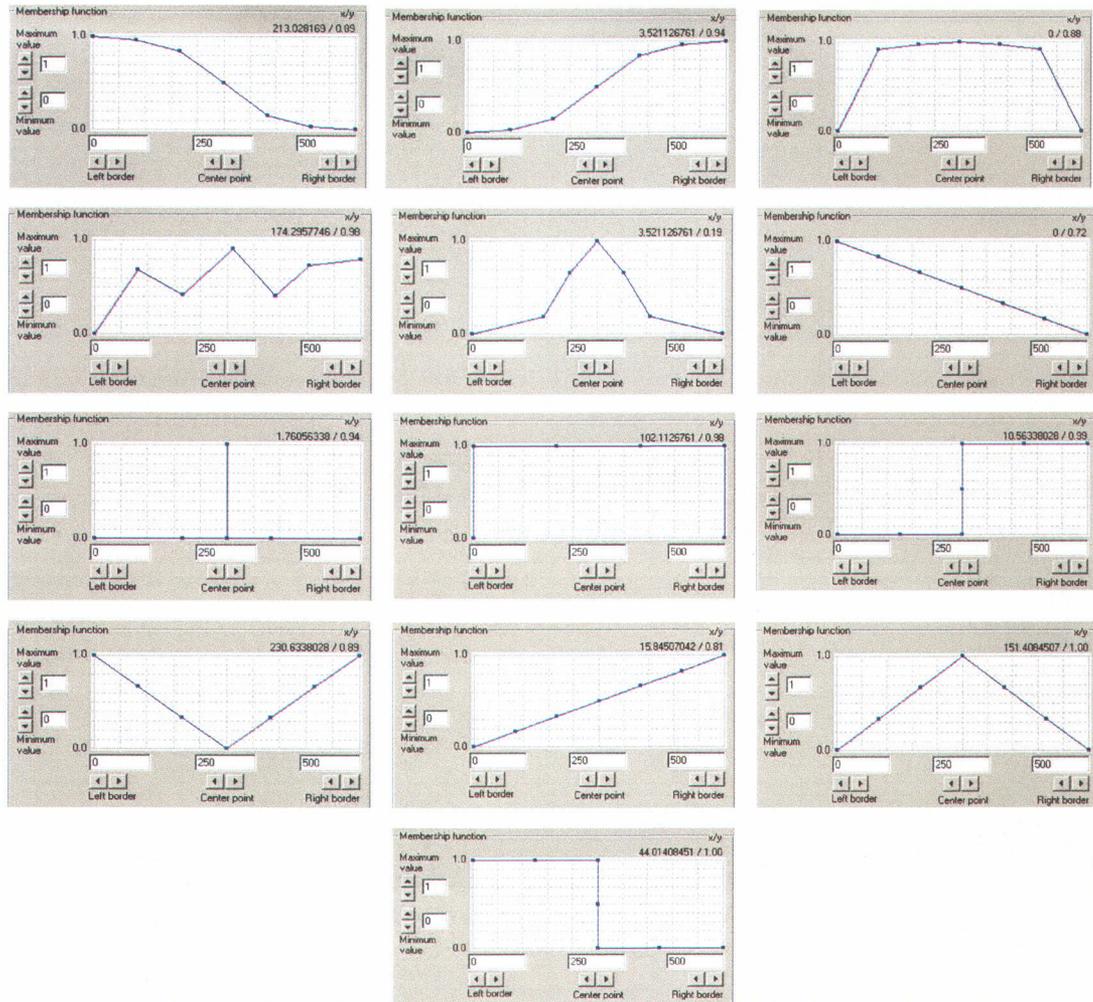


Figure 2.26 : Différentes formes de la fonction d'appartenance (eCognition user guide, 2003).

L'ensemble des connaissances que nous avons sur une classe donnée peut être résumé sous forme de règles. La forme la plus élémentaire de ces règles logiques de classification est :

$$\text{Si } \underline{\text{Caractéristique\_de\_l'objet}} (\text{objet}) \in \underline{\text{Intervalle}}, \text{ donc } \underline{\text{Classe}} (\text{objet}) = \text{classe}(x)$$

Dans cette formule, le fait que la caractéristique d'un objet appartient à un intervalle de valeurs, défini par la fonction d'appartenance (figure 2.25), permet de classer cet objet dans la classe (x). Pour utiliser le plein potentiel de la classification orientée objet, il faut trouver les règles qui cernent chacune des classes. À cette fin, des opérateurs logiques sont utilisés comme : ou, moyenne, min, max, non, etc. Ainsi, des règles plus complexes peuvent être exprimées comme :

**Si** ([Caractéristique\_1\_de\_l'objet (objet)  $\in$  Intervalle 1] OU [Caractéristique\_2\_de\_l'objet (objet)  $\in$  Intervalle 2]) **ET** [Caractéristique\_3\_de\_l'objet (objet)  $>$  Valeur 1] , donc

**Classe** (objet) = classe(x)

L'ensemble des règles qui représentent les diverses classes est groupé dans une structure de classification dite « la structure hiérarchique de la classification orientée objet ». Évidemment puisque nous parlons dans un contexte orienté objet, cette structure permet aussi de définir les relations d'hérédité entre une classe Parent et ses sous-classes.

#### **2.4.4 Conclusion**

L'atout majeur que la classification orientée objet nous amène est le fait de pouvoir utiliser des caractéristiques des objets autres que ceux relatifs à l'image. En fait, à la différence des méthodes de classification conventionnelles qui s'appuient seulement sur les éléments intrinsèques de l'image, la méthode orientée objet utilise aussi (i) la topologie : les relations géométriques entre les objets, (ii) le contexte : les relations sémantiques des objets. Il reste que pour monter la structure hiérarchique de la classification orientée objet, il faut disposer de suffisamment de connaissance sur le phénomène étudié qui dans cette recherche est la glace de rivière. Dans le chapitre suivant où nous présentons la méthodologie suivie lors de cette étude, nous exposons la manière dont nous avons développé cette structure hiérarchique.



### 3. MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous exposons les éléments de la méthodologie adoptée pour atteindre nos objectifs (énumérés dans l'introduction). Il est important de mentionner que les images utilisées dans cette étude sont celles du satellite canadien RADARSAT-1 en mode fin. Nous avons aussi utilisé les images d'un capteur polarimétrique aéroporté CONVAIR-580 pour des fins d'interprétation. Dans ce chapitre, nous présentons le site d'étude et la justification de son choix, les principales données que nous avons (images Radar et données auxiliaires), et l'organigramme de la méthodologie adoptée. Pour ce dernier, nous présentons aussi les détails du montage du système d'informations géographiques, des approches d'analyse qualitative et quantitative.

#### 3.1 Site d'étude

Le site de cette étude est un tronçon de la rivière Saint-François au sud du Québec (figure 3.1). Située sur la Rive-Sud du fleuve Saint-Laurent, la rivière Saint-François prend sa source dans les Appalaches, coule en direction nord et se déverse dans le Saint-Laurent, à la hauteur du lac Saint-Pierre. Son bassin versant, qui chevauche en partie le territoire américain (14 %), occupe une superficie totale de 10 230 km<sup>2</sup> (MEF, 1996).

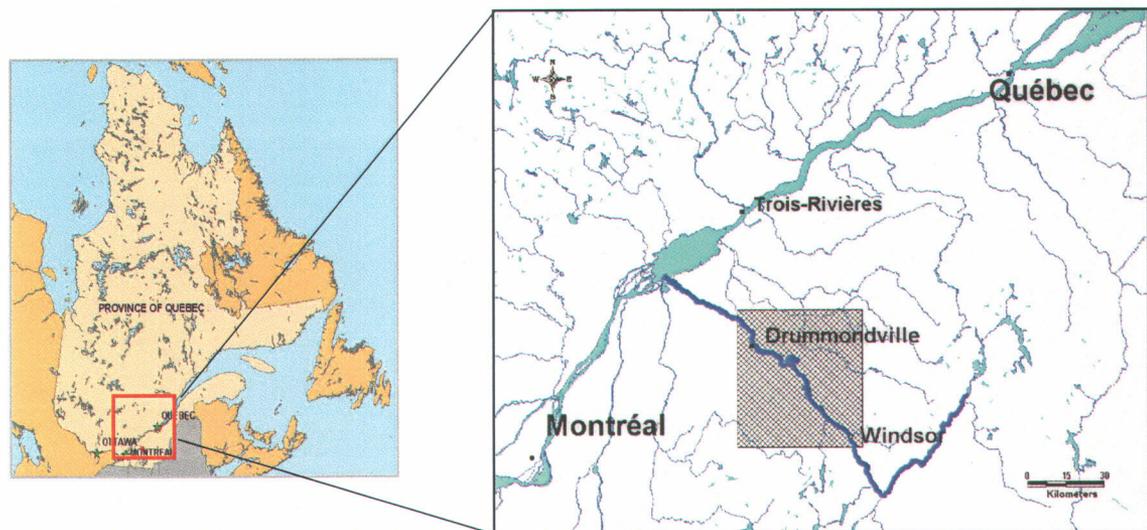


Figure 3.1 : Localisation du tronçon étudié de la rivière Saint-François et du champ de couverture spatiale des images RADARSAT-1 mode fin.

Le tronçon étudié s'étend de l'aval de la ville de Windsor jusqu'à la ville de Drummondville en passant par la ville de Richmond. Sur cette section d'environ 70 km de long, la largeur du chenal varie de 80 à plus de 800 m et l'écoulement se fait du sud vers le nord. Trois barrages contrôlent le débit sur ce tronçon. Deux sont situés près de Drummondville et l'autre à Windsor. Aussi, huit ponts existent tout au long de ce tronçon.

Le choix de la rivière Saint-François pour cette étude est dû principalement aux facteurs suivants :

- ❑ cette rivière est connue pour ses problèmes dus à la glace de rivière (Beltaos, 1995),
- ❑ la variabilité des phénomènes reliés au couvert de glace observés dans ce tronçon,
- ❑ la proximité du site d'étude et l'accessibilité de la rivière par le réseau routier,
- ❑ Une largeur moyenne très variable est comprise entre 80 et 850 mètres et qui demeure suffisante pour la résolution spatiale des images satellitaires,
- ❑ adéquation de l'orbite (ascendante et descendante) du satellite : le tronçon étudié de la rivière se trouve exactement centré au long de la diagonale des images RADARSAT acquises,
- ❑ la disponibilité d'une banque de données historiques formée de relevés qualitatifs de l'état de la glace observé durant les années 1950 jusqu'à 1966.
- ❑ Des éléments morphologiques très variables qui nous offrent l'opportunité de faire des comparaisons. En fait, dans ce même tronçon de rivière nous trouvons des zones extrêmement vs faiblement sinueuses; des zones très larges vs très étroites; présence vs absence des grandes îles sur le chenal principal d'écoulement; présence vs absence des agglomérats (archipels) formés de petites îles, etc.

La figure 3.2 présente la zone d'étude (ombragée dans la figure 3.1). Nous remarquons dans cette figure la densité du réseau routier qui donne à plusieurs endroits un accès direct à la rivière. Tous les endroits où nous pouvions voir clairement la rivière ont été désignés comme point d'observation, 28 au total. Dans cette même figure sont montrés les emplacements des :

- ❑ Barrages (Drummondville, Hemmings, et Windsor) (Points rouges dans la figure 3.2),
- ❑ villes et localités avoisinantes,
- ❑ zones de grandes et petites îles, et
- ❑ ponts et affluents majeurs.

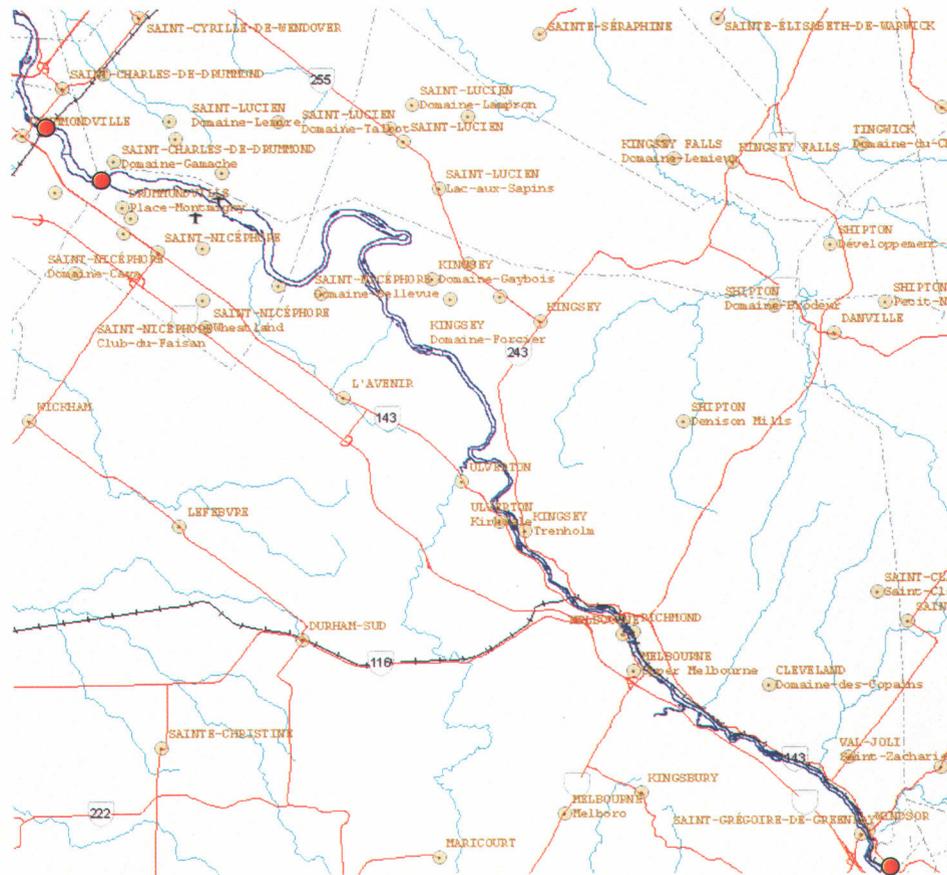


Figure 3.2 : Localisation des localités, barrages, îles et affluents sur le tronçon étudié de la rivière Saint-François.

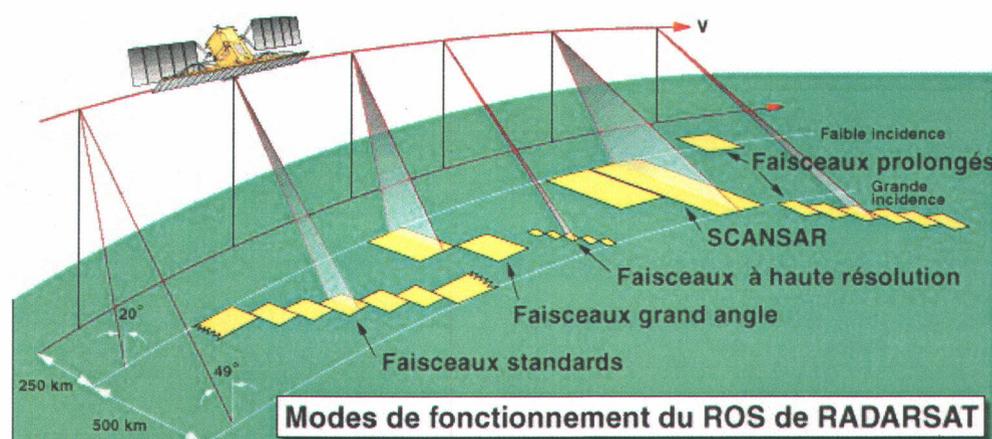
### 3.2 Données images

Des trois satellites RSO en orbite (tableau 3.1), seul RADARSAT-1 permet d'acquérir des images avec une résolution spatiale assez fine pour une rivière de taille moyenne comme la Saint-François. Sachant que la largeur du tronçon étudiée de la rivière atteint une valeur minimale avoisinant les 80 mètres, il est évident qu'avec ERS-2 ou ENVISAT nous n'aurions que trois pixels pour couvrir ces zones. Bien qu'avec les images du satellite ENVISAT nous ayons la possibilité de faire des comparaisons entre les diverses polarisations, cependant et vu (i) sa limite de résolution spatiale pour notre étude et (ii) des images CONVAIR-580 polarimétriques que nous avons acquises, nous avons opté pour RADARSAT-1.

**Tableau 3.1 : Satellite RSO en orbite durant la période 2000-2001**

Nom du satellite	Date de lancement	Longueur d'onde (cm)	Polarisation	Meilleure résolution spatiale (mètres)
ERS-2	1995	5,6	VV*	26
Envisat-1	2002	5,6	VV, HH, VH et HV	27
Radarsat-1	1995	5,6	HH**	<b>9</b>

Dirigé par l'Agence spatiale canadienne et développé par le Centre canadien de télédétection, le satellite RADARSAT est le premier satellite radar canadien. Muni d'une antenne rectangulaire de 15 mètres de longueur et 1,5 mètre de largeur, ce satellite est doté d'un capteur RSO opérant dans la bande C. En effet, la fréquence est de 5,3 GHz permettant d'émettre un signal de longueur d'onde de 5,66 cm. La polarisation est HH c'est-à-dire que le signal émis est en polarisation horizontale et de même pour celui reçu. L'unique polarisation est compensée par un large choix de modes et des angles d'incidence pour les faisceaux à haute résolution (figure 3.3). Le tableau 3.2 donne les caractéristiques des images en mode fin. Pour notre étude les modes F1, F3 et F5 ont été retenus. Le mode F1 donne l'angle d'incidence minimal pour le mode fin, F5 donne l'angle maximal, tandis que F3 donne un angle intermédiaire entre les deux.



**Figure 3.3 : Modes de fonctionnement du RSO de RADARSAT-1 (d'après CCRS, 2002).**

**Tableau 3.2 : Modes d'opération à haute résolution du RSO de RADARSAT-1  
(Luscombe *et al.*, 1993)**

Mode du RSO	Largeur de fauchée nominale (km)	Distance de fauchée nominale à partir du décalage au nadir (km)	Résolution nominale en portée (m)	Résolution azimutale (m)	Angle d'incidence en portée (deg)	
					proche	lointain
<b>Faisceaux à fauchée de haute résolution: 5 faisceaux, recouvrement 10%, ~500 km de décalage du nadir</b>	50	<b>F1 0-50</b>	9	9	36.9	40.1
		F2 45-95	9		39.3	42.3
		<b>F3 90-140</b>	9		41.6	44.2
		F4 135-185	8		43.6	46
		<b>F5 170-220</b>	8		45.3	47.8

Au total, 19 images RADARSAT-1 ont été acquises en faisceaux à fauchée de haute résolution, dit mode fin. Pour des fins de comparaison et selon les disponibilités du satellite, différents angles d'incidence ont été choisis (F1, F3, F5), sur des orbites ascendantes et descendantes. La période d'acquisition s'étalait entre novembre 2000 et février 2003 (tableau 3.3). Pour les images représentées en gras, des observations sur le terrain sont disponibles.

**Tableau 3.3 : Images RADARSAT-1 acquises**

Année	Jour et mois	Faisceau	Orbite	Observation terrain	Condition de glace
2000	<b>24 novembre</b>	F5	Descendante	Oui	Eau libre partielle
	<b>26 novembre</b>	F5	Ascendante	Oui	Eau libre partielle
	18 décembre	F5	Descendante	Non	Débâcle d'automne
2001	11 janvier	F5	Descendante	Non	Couvert de glace complet
	28 février	F5	Descendante	Non	Couvert de glace complet
	16 mars	F1	Ascendante	Non	Couvert de glace complet
	17 mars	F3	Descendante	Non	Couvert de glace complet
	24 mars	F5	Descendante	Non	Neige humide sur couvert de glace
	26 mars	F5	Ascendante	Non	Neige humide sur couvert de glace
	9 avril	F1	Ascendante	Non	Couvert de glace partiel
	10 avril	F3	Descendante	Non	Couvert de glace partiel
	17 avril	F5	Descendante	Oui	Eau libre
	19 avril	F5	Ascendante	Oui	Eau libre
	<b>15 décembre</b>	F5	Descendante	Oui	Eau libre
2002	<b>6 janvier</b>	F5	Descendante	Oui	Couvert de glace partiel
	<b>30 janvier</b>	F5	Descendante	Oui	Couvert de glace partiel
	<b>4 mars</b>	F3	Ascendante	Oui	Couvert de glace partiel
	<b>19 mars</b>	F5	Descendante	Oui	Eau libre
2003	<b>11 février</b>	F5	Descendante	Oui	Couvert de glace complet

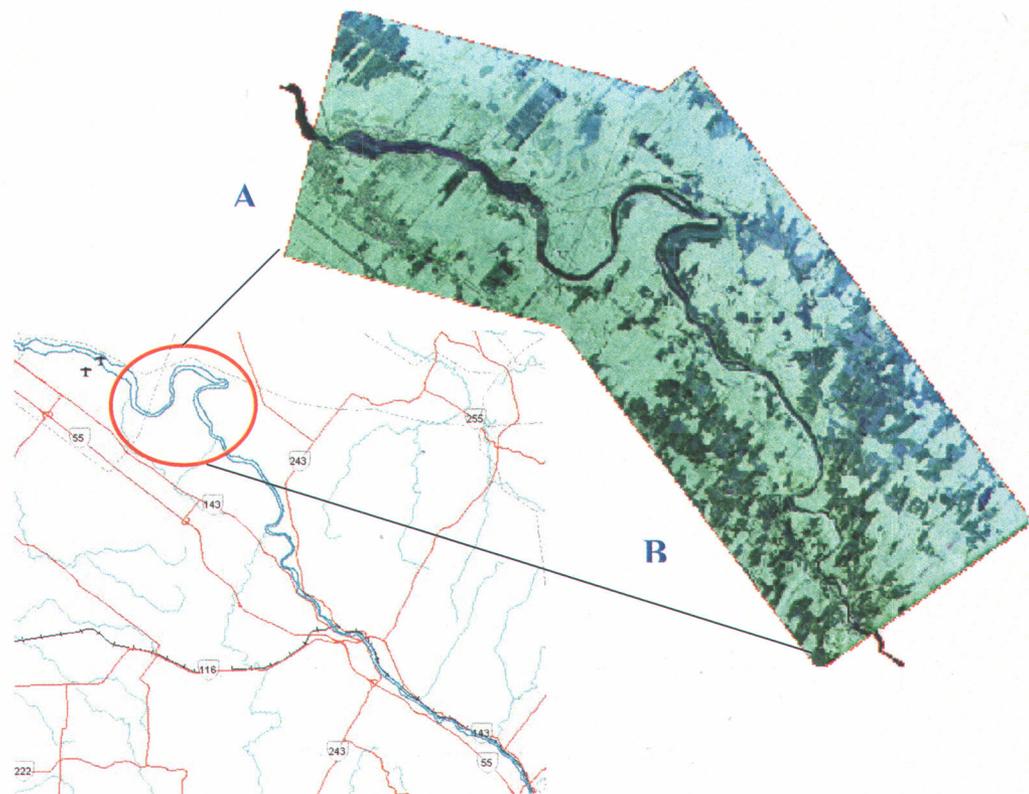
Nous remarquons du tableau 4.3 que :

- ◆ Les seules images en pleine période d'hiver pour lesquelles des observations sont disponibles, correspondent aux dates suivantes : 6 janvier 2002, 30 janvier 2002, 4 mars 2002 et 11 février 2003. Ce sont ces images qui vont donc être utilisées tout au long de cette recherche.
- ◆ Orbite descendante vs ascendante : les images des 24 et 26 novembre 2000 sont toutes les deux en mode F5, cependant, la première est acquise à partir d'une orbite descendante du satellite alors que la deuxième est acquise en orbite ascendante. Même spécificité pour le couple d'images des 24 et 26 mars 2001 et aussi du couple d'images des 17 et 19 avril 2001.

À noter que ces trois couples d'images ont été acquis respectivement durant l'automne, l'hiver et le printemps.

- ◆ Pour le mode F1 et F3, deux couples d'images sont acquis avec un décalage d'une journée et en orbites opposées. Le premier couple est celui des 16 et 17 mars 2001 et le second est celui des 9 et 10 avril de la même année.

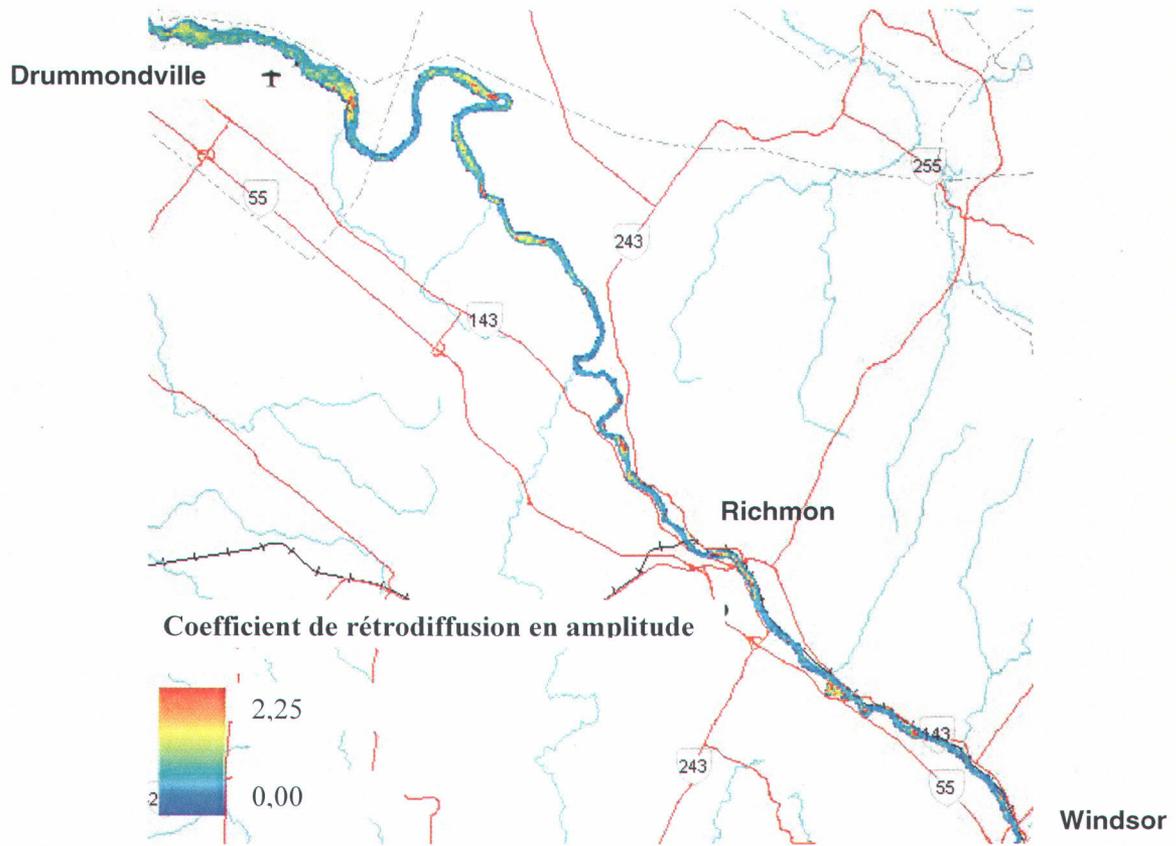
Les deux images polarimétriques acquises le 19 février 2003 à l'aide du capteur aéroporté CONVAIR-580 sont présentées dans la figure 3.4. Comme nous l'avons présenté dans la section sur la polarimétrie (chapitre 2), avec ce type d'images il est possible de mener une analyse polarimétrique pour déterminer le mode de diffusion dominant.



**Figure 3.4 : Mosaïque des Images CV-580 acquises le 18 février 2003 et leur localisation sur la zone d'étude.**

Toutes les images RADARSAT-1 ont été prétraitées pour passer du format brut aux valeurs en amplitudes. Aussi, toutes les images ont été corrigées géométriquement en fonction des données numériques de la BDTQ de la région (au 1 : 20 000). La figure 3.5 présente le tronçon étudié extrait d'une image RADARSAT-1 (en pseudocouleurs) géoréférencée et superposée aux vecteurs

routes et cours d'eau tirés de la BDTQ. Nous y retrouvons les villes de Drummondville (Nord-Ouest), Richmond (centre) et Windsor (Sud-Est).



**Figure 3.5 : Amplitudes du signal RADARSAT-1 du tronçon étudié de la rivière Saint-François le 30 janvier 2002.**

### **3.3 Données auxiliaires**

Les données décrites jusqu'à présent sont celles relatives aux images RADARSAT-1 et CV-580. Dans cette section nous présentons toutes les données auxiliaires que nous avons utilisées dans le cadre de cette étude.

#### **3.3.1 Données cartographiques**

Pour établir la base d'un système d'information géographique, les feuillets numériques au 1 :20 000 de la Base de Données Topographique du Québec (BDTQ) qui couvrent la zone d'étude ont été acquises. Il s'agit des feuillets 31H16-200-0201, 31H16-200-0101, et 31H09-200-0202. Ceux-ci contiennent entre autres :

- ❑ Le réseau hydrographique;
- ❑ Réseau routier et de structures;
- ❑ Courbes hypsométriques,
- ❑ Localités et limites du découpage administratif, etc.

Le détail de l'utilisation de ces données est présenté dans les sections ultérieures, en particulier dans la partie portant sur le système d'information géographique.

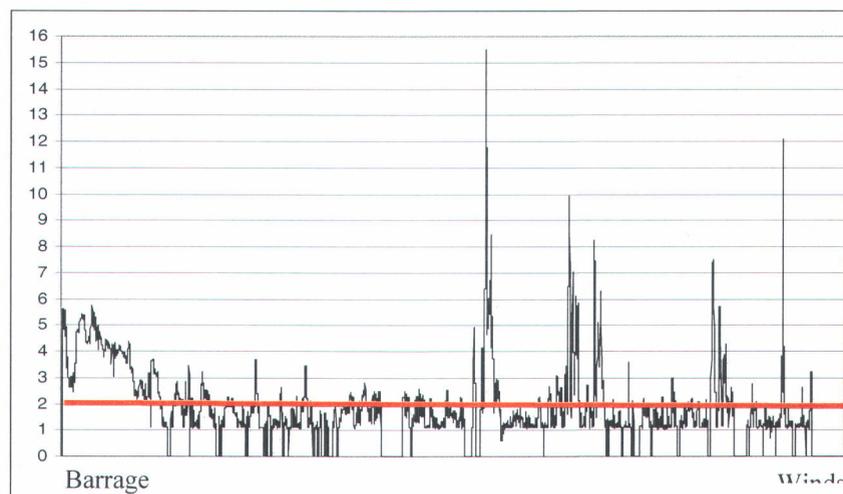
### **3.3.2 Photos et vidéo**

Ces données présentent notre principale source de vérité terrain sur les conditions du couvert de glace dans la zone d'étude. Elles sont utilisées pour la compréhension et la validation des processus de glace observés. En fait, pour deux dates en 2000/2001 et pour toutes les dates en 2001/2002, l'état de la rivière a été documenté par plus de 400 photographies numériques, acquises aux points d'observations et/ou d'accès à la rivière qui sont distribués de façon homogène le long du tronçon étudié. De plus, le 19 mars 2002 et le 12 février 2003, l'observation de la rivière a été faite par voie aérienne (survol hélicoptère) donnant lieu à la prise de photos et à un enregistrement vidéo numérique pour certaines sections. Cependant, il est important de signaler que seules les images de l'hiver 2002 ont fait l'objet d'intenses campagnes de terrain où plus de 30 points d'observations ont été visités systématiquement. Pour les dates antérieures seulement quelques-uns de ces points d'observation ont été visités. C'est principalement pour cette raison que seules les images de l'hiver 2002 et l'image du 11 février 2003 ont été utilisées durant cette recherche.

### **3.3.3 Données bathymétriques**

En septembre 2002, une campagne de terrain a été menée pour relever la pente générale de la surface d'eau et la profondeur de la rivière, entre les barrages de Windsor (amont) et Hemmings (aval). De plus, les mêmes mesures ont été effectuées sur 9 transects perpendiculaires (aux rives) dans des secteurs d'intérêt. Un échosondeur couplé à un récepteur GPS a été utilisé dans cette campagne. La figure 3.6 montre le profil de profondeur de la rivière durant la période de la campagne. À plusieurs reprises nous remarquons une profondeur nulle. En fait, ces zones correspondent à des zones de très faibles profondeurs où nous étions obligés de retirer l'échosondeur afin de ne pas l'endommager. Lors du traitement des données acquises durant cette campagne, nous nous sommes aperçus que le phénomène du double écho s'est répété à plusieurs

reprises. Après vérification avec la firme qui a loué le matériel à l'INRS-ETE, il s'est avéré que l'échosondeur utilisé n'est efficace que pour des profondeurs supérieures à deux mètres. Dans la figure 3.6, nous remarquons que la profondeur de la majorité de la zone étudiée se situe en dessous de cette limite (ligne rouge dans la figure 3.6). Nous nous sommes résignés donc à prendre cet élément en considération et de considérer que ces données ont plus une valeur qualitative que quantitative.



**Figure 3.6 : Profil longitudinal de la profondeur sur le tronçon étudié de la St-François.**

### **3.3.4 Données historiques**

Nous disposons d'une base de données sur l'état de la glace de rivière dans le tronçon étudié. Les données s'étalent sur les hivers des années 1950 jusqu'aux années 1966 et elles ont été acquises par des observateurs de terrain de la compagnie « Southern Canada Power Company ». Prises généralement de la deuxième semaine de mars à l'équivalente en avril, ces données qualitatives disposent d'un index de distance à partir du barrage Hemmings en montant vers l'amont de la rivière et sont codées comme suit :

- couvert solide stable,
- glace recouverte d'eau,
- légèrement ouvert,
- majoritairement ouvert,
- fracturé sans mouvement,
- mouvement de glace,
- embâcle,
- eau libre, et
- données non disponibles (N/A).

### 3.3.5 Relevés sur la glace

- Le 27 février 2002, des forages ont été effectués sur deux transects de la rivière, afin d'obtenir l'épaisseur du couvert de glace et la profondeur du chenal. Malheureusement, un conflit de programmation a annulé l'acquisition de l'image RADARSAT de ce jour. Cependant, ces données nous donnent une idée sur le couvert de glace, qui était stable cette année.
- Pour le 12 février 2003, une campagne exhaustive a été menée, en collaboration avec une équipe d'experts :
  - Survol en hélicoptère;
  - Observations et photos;
  - Mesure du profil du couvert nival sur glace;
  - Forages (épaisseur et profil de la glace);
  - Profil Géo Radar (GPR);
  - Mesure du débit sous glace.

## 3.4 Méthodologie envisagée

Comme il est mentionné plus haut, l'objectif principal de cette étude est de caractériser la glace d'une rivière de largeur moyenne en utilisant, images RADARSAT-1, système d'information géographique et mesures de terrain. Dans ce qui suit, nous présentons la contribution de chacun de ces éléments ainsi que l'interaction entre eux pour aboutir à notre objectif.

La figure 3.7 présente l'organigramme général des liens envisagés entre les données SIG et RADARSAT-1 ainsi que leur intégration dans la méthode de classification. Les sections suivantes élaborent les détails de l'organigramme de la figure 3.7.

### 3.4.1 Extraction d'information des images RADAR

Cette étape est présentée dans la figure 3.7 par les encadrés en bleu intitulés « Images RADARSAT » et « Images CONVAIR-580 ». Pour les images RADARSAT-1, l'extraction d'information consiste à une série de traitements réalisés dans le logiciel de traitement d'image PCI GEOMATICA. Ces traitements sont:

1. Correction radiométrique :
  - Extraction des images brutes du format CD dont elles ont été livrées;
  - Extraction des angles d'incidence des images;

- Transformation de l'image brute en valeur de rétrodiffusion en utilisant les angles d'incidence;
- 2. Correction géométrique ou orthorectification : dans cette phase du prétraitement, toutes les images sont corrigées géométriquement en utilisant les vecteurs de la BDTQ. L'objectif est de les projeter cartographiquement afin de pouvoir les superposer (i) entre elles et (ii) avec les diverses couches du système d'information géographique, la taille des pixels a été fixée à 10 mètres.
- 3. Extraction des paramètres de texture : Bien qu'il soit possible de mener cette étape de traitement dans PCI GEOMATICA, nous avons plutôt choisi de l'exécuter dans le logiciel eCognition. En fait, ce dernier nous permet d'avoir les paramètres de texture directement pour les objets d'une image tandis qu'avec PCI nous avons l'information seulement au niveau pixel.

Pour ce qui est des deux images CV-580, il est primordial d'effectuer une analyse de cohérence des quatre bandes polarimétriques HH, HV, VH et VV. En effet, aucune analyse polarimétrique ne peut être conduite sans que les données de ces quatre bandes soient cohérentes. Malheureusement, il s'est avéré que l'image de la figure 3.4-B présente des problèmes au niveau de son étalonnage. Cependant, l'image de la figure 3.4-A est parfaitement calibrée. Une fois que nous sommes sûrs que l'image est calibrée, nous pouvons extraire les signatures polarimétriques et/ou les décompositions de Cloude et Pottier pour n'importe quelle zone de l'image. Tous les traitements sur les images CV-580 ont été effectués grâce au logiciel PWS (Touzi et Charbonneau, 2004).

### **3.4.2 Extraction d'information à l'aide d'un SIG**

Présentée dans la figure 3.7 par l'encadré vert « Système d'Information Géographique », cette étape de la méthodologie consiste à transformer la majorité des données auxiliaires présentées dans la section 3.3 en couches d'information spatialement distribuées. En fait, pour pouvoir extraire une information maximale des données historiques, photos, relevés terrain, etc. il était indispensable de pouvoir faire le lien directement avec la rivière. Cependant, le rôle majeur du SIG est de pouvoir calculer et/ou extrapoler et aussi spatialiser les paramètres morphologiques de la rivière tels que largeur, sinuosité, profondeur. Tous les détails du SIG que nous avons monté sont présentés dans la section 3.5 du présent chapitre.

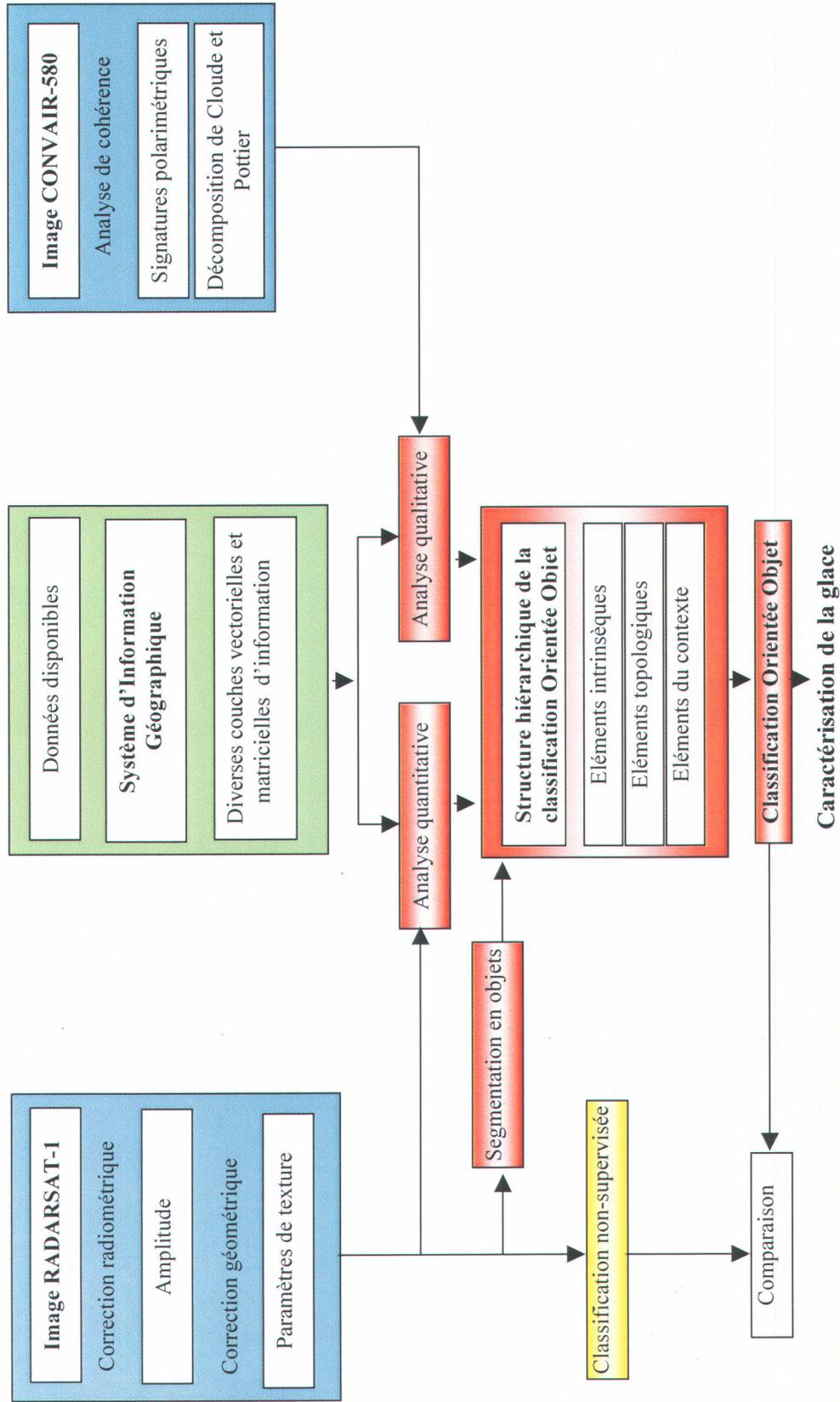


Figure 3.7 : Organigramme général de la méthodologie développée.

### **3.4.3 Classification orientée objet**

Dans cette section nous présentons les encadrés en rouge « Analyse quantitative », « Analyse qualitative », « Structure hiérarchique de la classification orientée objet » et « classification orientée objet » de la figure 3.7.

En guise de rappel, la méthode de classification orientée objet permet de classer un pixel en tenant compte de son contexte, **objet**, et les relations qui lient ce dernier avec les autres objets (eCognition user guide, 2001). Le passage des pixels aux objets se fait dans l'étape de la segmentation (figure 3.7). Les trois entités de base que nous pouvons utiliser dans l'approche orientée objet sont :

- ◆ **Éléments intrinsèques** : ce sont les éléments physiques de l'image RADARSAT-1, à savoir, les paramètres de texture précités et la rétrodiffusion ;
- ◆ **Éléments topologiques** : ce sont les éléments qui décrivent la relation géométrique entre les objets, ex. : une glace de rive se trouve près de la rive et non pas au milieu du tronçon ;
- ◆ **Éléments du contexte** : ils décrivent la relation sémantique entre les objets ; ex.: la glace statique se forme toujours là où le régime d'écoulement est laminaire, et ne se forme jamais si le régime est turbulent.

Si les éléments intrinsèques des images RADARSAT sont relativement simples à extraire (section 3.4.1), les éléments topologiques et ceux relatifs à la sémantique sont relativement difficiles à définir. En fait, ces deux derniers englobent toute notre connaissance sur la glace de rivière et les phénomènes qui lui sont reliés. Pour bâtir ces connaissances sur la glace, nous avons eu recours aux analyses suivantes :

1. **Analyse qualitative** : dans cette analyse nous avons essayé de compiler qualitativement les données que nous avons sur la rivière. Photos, données historiques, et paramètres morphologiques sont les principales sources d'information pour cette analyse. La section 3.6 de ce chapitre présente l'approche méthodologique de l'analyse qualitative.
2. **Analyse quantitative** : il s'agit d'une analyse statistique pour comprendre le rôle des diverses couches d'information dans l'explication des phénomènes de glace de rivière observés. La section 3.7 de ce chapitre présente l'approche méthodologique de l'analyse quantitative.

La structure hiérarchique de la classification orientée objet est la compilation de toute la connaissance que nous avons sur la glace de rivière. Chaque classe se voit attribuer une structure logique des règles qui lui sont spécifiques et qui la différencient des autres classes. Finalement, la classification en soi, est l'application de la structure hiérarchique aux objets d'une image RADARSAT donnée.

#### **3.4.4 Classification non supervisée**

Dans la figure 3.7, l'encadré jaune « classification non supervisée » est directement lié à celui des images RADARSAT. En fait, étant donné que l'objectif principal de cette étude est d'inclure les éléments de contexte dans la classification, il est pertinent de pouvoir comparer avec le résultat prévisible d'une méthode conventionnelle de classification. Cette dernière n'utilisant que les données directement extraites des images RADARSAT.

#### **3.4.5 Récapitulatif de la méthodologie**

La figure 3.7 et les sections qui l'expliquent donnent une idée claire sur la méthodologie que nous avons adoptée. Celle-ci se résume comme suit :

1. Extraction d'information des images RADARSAT : correction radiométrique, correction géométrique et calcul des paramètres de texture;
2. Extraction d'information des images CV-580 : analyse de cohérence, signatures polarimétriques et décomposition de Cloude;
3. Montage d'un système d'information géographique : compilation des éléments de contexte du tronçon étudié de la rivière Saint-François;
4. Analyse qualitative : utilisation des données des étapes 1, 2 et 3 pour comprendre les phénomènes de glace de rivière observés sur les images de l'hiver 2002;
5. Analyse quantitative : utilisation des données des étapes 1 et 3 pour évaluer statistiquement, en utilisant les mêmes images, la contribution des paramètres de l'image vs ceux de contexte dans l'explication des phénomènes de glace de rivière;
6. Structure hiérarchique de la classification orientée objet : compilation des résultats des analyses qualitative et quantitative sous forme de règle logique spécifiques à chacune des classes de glace de rivière (observée);

7. Classification orientée objet : application du résultat du point 6 à l'image RADARSAT du 11 février 2003.

### **3.5 Système d'information géographique**

Avant d'étaler l'utilisation que nous avons faite du système d'information géographique dans cette recherche, il est important d'y donner une définition. Plusieurs définitions existent (Aronoff, 1989; Burrough, 1986; Koshkarikov *et al.*, 1989), cependant celle qui décrit le mieux le rôle qu'a joué le SIG dans notre étude est celle qui stipule que le SIG est :

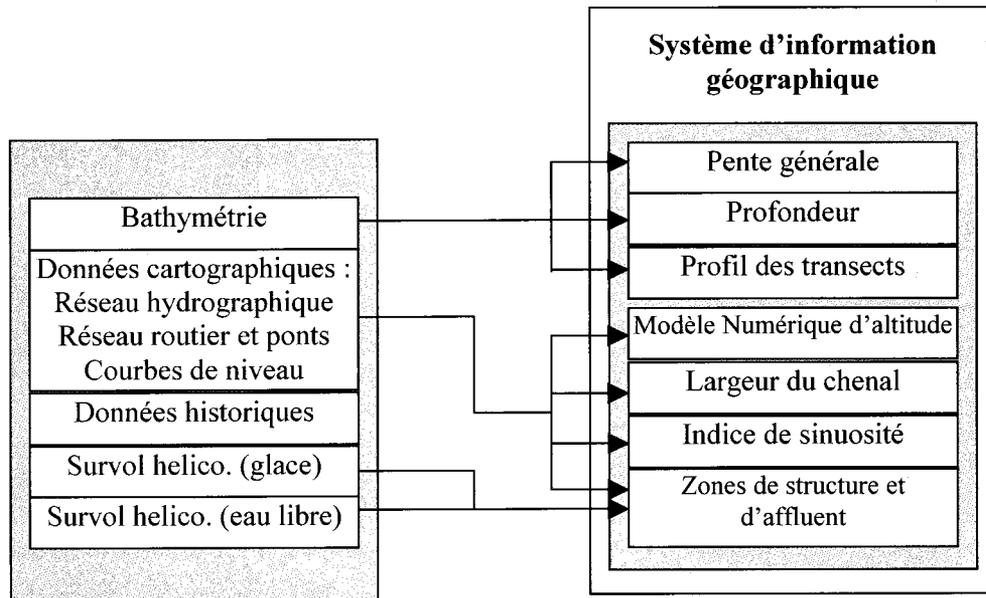
« Un type particulier de système d'information dont la base de données contient des données reliées à des entités physiques, des activités ou des événements localisés et assimilables aux formes géométriques de points, lignes et zones. Un SIG gère les informations spécifiques à ces points, lignes et zones pour extraire les données requises afin de réaliser des recherches et des analyses spécialisées » (Dueker, 1979).

En effet, nous avons essentiellement monté un SIG pour nous permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- Présenter spatialement les données cartographiques de format vectoriel de la rivière : localités les plus proches, zones d'îles ou de rapides, barrages, etc.;
- Rassembler les observations et les données terrain : photos, notes et relevés de bathymétrie, etc.;
- Générer de l'information matricielle telle que largeur de la rivière, sinuosité, pente et profondeur;
- Spatialiser les données historiques sur la glace et rendre leur interprétation plus conviviale; et
- Afficher toutes les données disponibles sur la zone d'étude, et permettre des comparaisons spatiales et temporelles.

Le rôle du SIG tel que nous l'avons défini au départ était de subdiviser le tronçon étudié de la rivière en des segments (biefs) homogènes. Cette subdivision est faite sur la base de l'homogénéité et la cohérence des paramètres morphologiques. En fait, dans le SIG les données de la bathymétrie et la cartographie sont transformées (voir figure 3.8) pour obtenir pour chacun des pixels de l'image RADARSAT-1 les caractéristiques contextuelles suivantes :

- ❑ pente générale (la surface de l'eau);
- ❑ profondeur approximative;
- ❑ largeur du tronçon;
- ❑ indice de sinuosité; et
- ❑ zones de structures et d'affluents.



**Figure 3.8 : Schéma de principe pour la création du SIG.**

Une fois cette transformation opérée, à chaque pixel de l'image est attribué un ensemble de paramètres qui sont liés à sa position dans la rivière. L'exemple suivant illustre cette idée : la caractérisation contextuelle par le SIG d'un pixel se trouvant dans la ligne  $x$  et la colonne  $y$  de l'image RADARSAT, est que ce pixel est situé dans une zone de la rivière où la profondeur approximative est de 2.5 mètres, la pente est de 0,1 %, le tronçon est large ( $> 250$  mètres), la sinuosité est nulle, et en absence de structures et d'affluent. Un bief est alors défini comme un espace de la rivière où les caractéristiques contextuelles de l'ensemble des pixels qui le forment demeurent similaires.

Dans les sections qui suivent, nous présentons les résultats obtenus ainsi que la méthodologie suivie pour les avoir.

### 3.5.1 Sinuosité

Ce paramètre nous permet d'attribuer une valeur de sinuosité à chaque pixel de la rivière. Il est calculé sur les sommets (vertex) d'une polyligne. Cette dernière est une entité géométrique constituée d'une succession de lignes parfaitement reliées les unes aux autres par leurs extrémités (GD2005). Le point de jointure entre deux lignes successives d'une polyligne constitue le sommet (*vertex*). Nous calculons d'abord le ratio SV selon l'équation suivante :

$$SV_k = \frac{\sum_{i=v-k}^{v+k-1} d_{i,i+1}}{d_{v-k,v+k}} \quad \text{Équation 3.1}$$

Où

*SV* sinuosité du sommet (vertex) *V*;

*k* le nombre de sommets en amont et en aval du sommet *V* qui sont inclus dans le calcul de la sinuosité;

*i* facteur d'incrémentation qui varie de  $i=v-k$  à  $v+k-1$ ; et

*d* distance

$d_{v-k,v+k}$  Distance sur la polyligne par rapport au vertex *V*.

Le sommet pour lequel la sinuosité est calculée se situe exactement au milieu des deux autres sommets. Le ratio est alors la simple division de la distance totale en suivant la polyligne qui relie les deux sommets sur la distance de la droite qui les rejoint directement. Au cas où ces deux distances seraient égales, cela signifie qu'il n'y a pas de sinuosité et le ratio est égal à un. Selon cette formule la sinuosité peut théoriquement tendre vers l'infini à mesure que  $d_{v-k,v+k}$  tend vers zéro. Mais d'habitude elle dépasse rarement 2 (Dutton 1999). La figure 3.9 montre un exemple de calcul de *SV* respectivement pour les sommets numéro cinq et six d'une polyligne qui en contient un total de neuf.

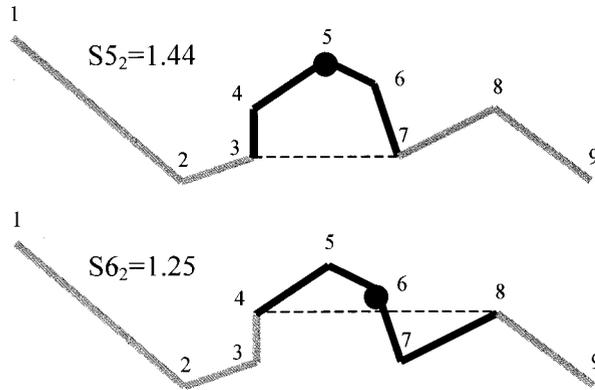


Figure 3.9 : Calcul de  $SV$  pour le sommet 5 et 6 en utilisant deux sommets en amont et en aval (d'après Dutton 1999).

Pour des valeurs de  $k$  plus grandes et afin de stabiliser la valeur de sinuosité, la moyenne de tous les  $SV_k$  possibles est calculée selon l'équation suivante :

$$SV_{m,n} = \frac{\sum_{k=m,n} SV_{k=m,n}}{n - m + 1} \quad \text{Équation 3.2}$$

Où  $k$  varie entre deux valeurs possibles, la plus grande étant  $n$  et la plus petite  $m$ . L'exemple de la figure 3.10 illustre cette moyenne pour le sommet cinq avec un  $k$  qui varie entre  $n=3$  et  $m = 1$ .

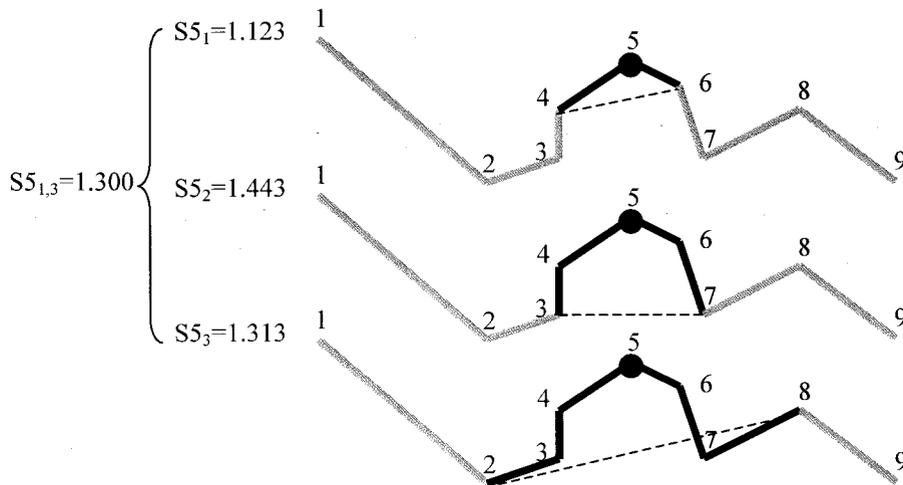


Figure 3.10 : Calcul de  $SV$  moyen pour le sommet 5 en utilisant un, deux et trois sommets en amont et en aval (d'après Dutton 1999).

Plusieurs formules peuvent être utilisées pour ramener les valeurs de  $SV$  à un intervalle standardisé compris entre zéro et un. Celle qui semble refléter le mieux le ratio  $SV$  et la formule suivante :

$$\sqrt{1-1/SV^2} \qquad \text{Équation 3.3}$$

Les trois catégories de sinuosité standardisée suivantes sont utilisées :

1. Sinuosité faible : quand l'équation donne des valeurs comprises entre zéro et 0.34;
2. Sinuosité moyenne entre 0.34 et 0.66, et finalement
3. Sinuosité forte : valeurs de 0.66 à 1.

Dans notre application, nous avons calculé la sinuosité sur les rives de la rivière sous format de polygones provenant de cartes topographiques au 1: 20 000 de la BDTQ. Après plusieurs tests il s'est avéré qu'en utilisant un  $k$  égal à 80, voir équation 3.1 nous obtenons des valeurs de sinuosité qui reflètent l'état de la rivière. Cependant, notre objectif est d'associer à chaque pixel de l'image une valeur de sinuosité. Pour arriver à cette fin, nous avons interpolé par krigeage les valeurs de sinuosité calculées sur les deux rives de la rivière Saint-François. La figure 3.11 présente le résultat obtenu. Nous remarquons que des valeurs de sinuosité maximale (entre 0.86 et 0.98) sont observées essentiellement dans la région de la « tête du canard » et des rapides Ulverton (flèches sur la figure 3.11).

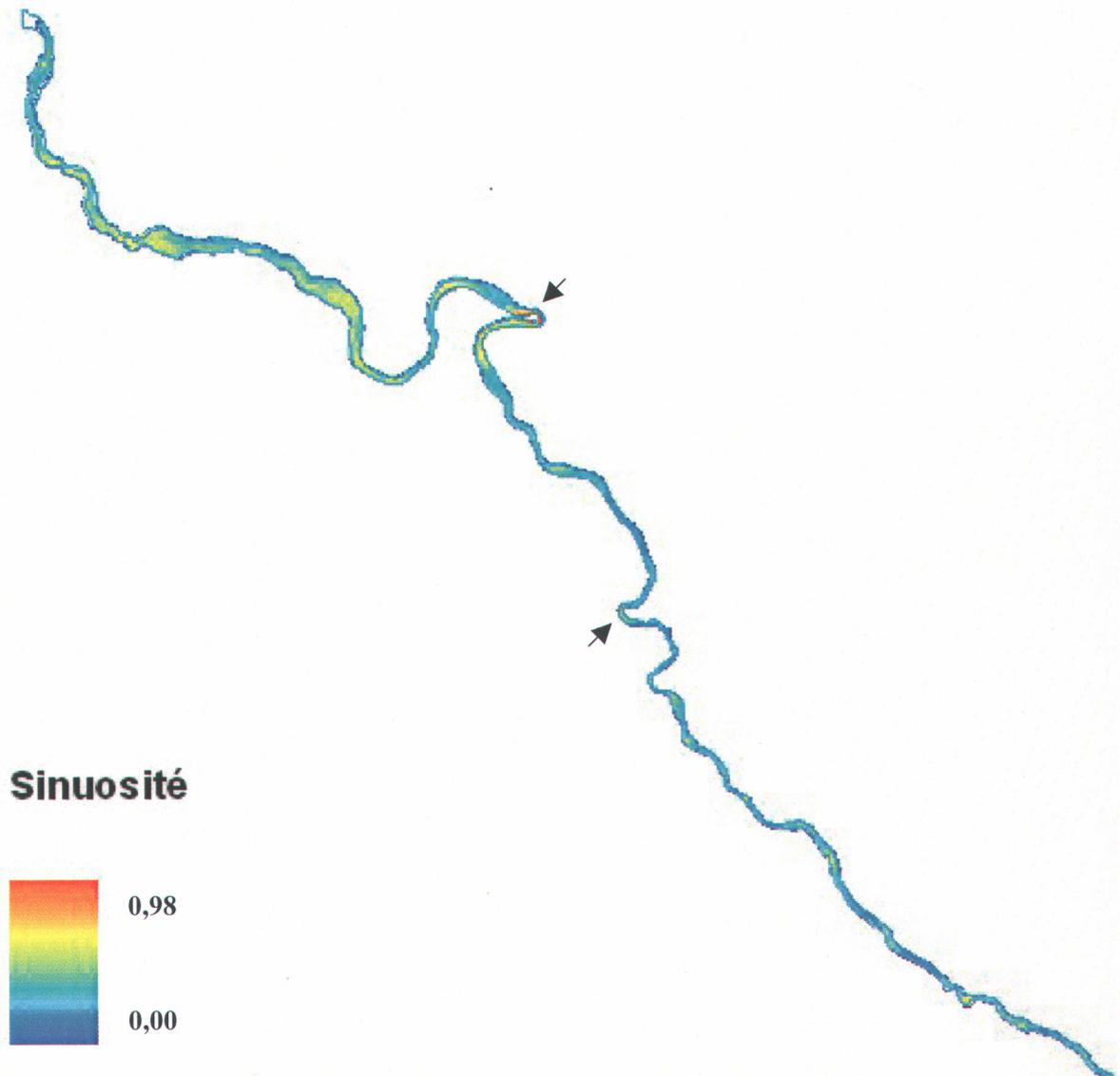
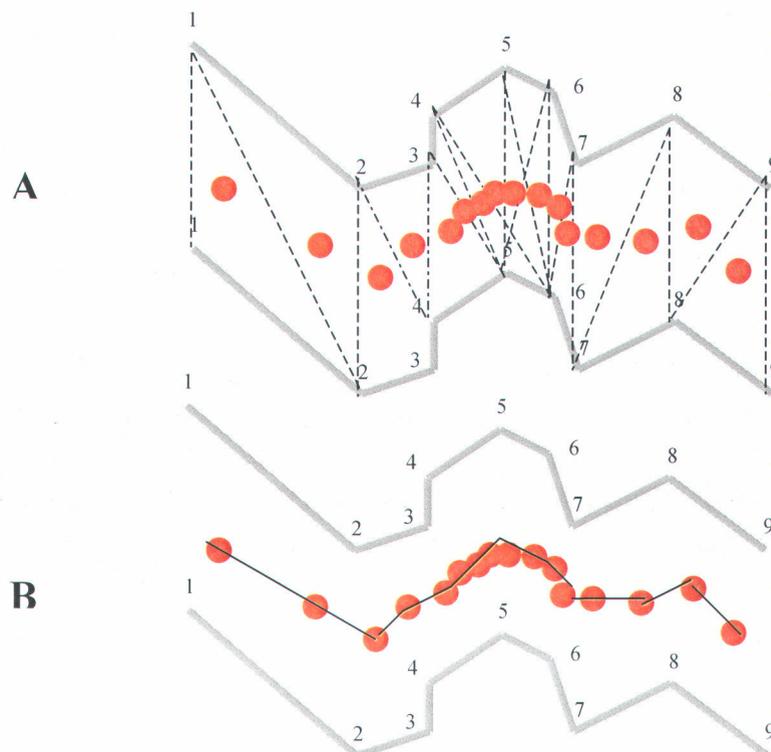


Figure 3.11 : Valeurs de sinuosité calculées et interpolées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François.

### 3.5.2 Largeur

La méthode utilisée pour calculer la largeur de la rivière s'appuie sur la mesure de traverses perpendiculaires au lit de la rivière (Philippin, 2004). Une fois encore, la matière brute pour ce calcul est constituée des polygones des rives extraites de la carte vectorielle au 1: 20 000 (BDTQ). L'algorithme appliqué utilise une méthode de triangulation qui mène à la détermination de centroïdes. En fait, pour chaque vertex de la polygone les distances vis-à-vis de ceux de l'autre rive sont calculées. Les deux distances interrives les plus courtes sont retenues pour former un triangle. Les coordonnées du centroïde sont déterminées et l'étape se répète pour chacun des vertex de la rive (figure 3.12-A). Une fois cette étape terminée, le même processus est refait, mais en utilisant comme référence la rive opposée. Tous les centroïdes calculés à la fin des étapes précédentes sont considérés comme des vertex pour former une nouvelle polygone, la médiane de la rivière (figure 3.12-B). À partir de cette dernière nous pouvons tracer des traverses qui lui sont perpendiculaires et qui relient les deux rives. La longueur de ces traverses est considérée comme la largeur de la rivière. Après rastérisation de ces traverses, nous obtenons une valeur de largeur pour tous les pixels de la rivière.



**Figure 3.12 : Création des centroïdes et de la ligne médiane à partir de polygones.**

La figure 3.13 présente les résultats matriciels obtenus pour la rivière Saint-françois. Nous remarquons que la largeur de la rivière varie énormément d'une partie à l'autre. Ainsi, elle passe de plus de 800 mètres dans le réservoir du barrage Hemmings à moins du 1/10<sup>ème</sup> de cette valeur, voir les zones indiquées par une flèche dans la figure 3.13.

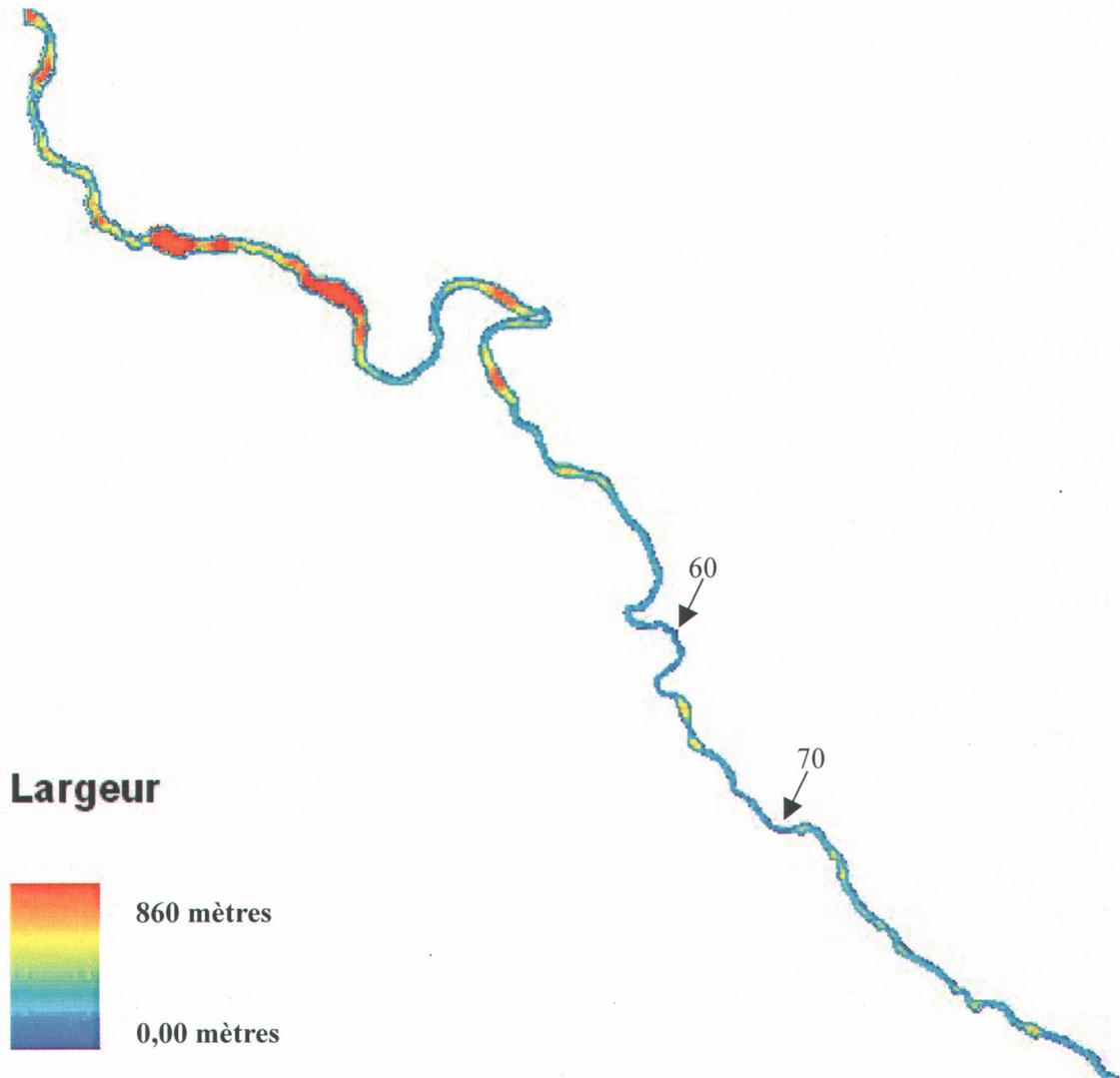


Figure 3.13 : Valeurs de largeur calculées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François.

### **3.5.3 Profondeur et altitude du plan d'eau**

Nous avons présenté dans la section 3.3 les détails de la campagne de terrain de bathymétrie. Les données ont été prises par échosondeur couplé à un récepteur GPS, les 24, 25 et 26 septembre 2002. L'objectif de cette étape de traitement est de pouvoir généraliser l'information contenue dans le format vectoriel. En fait, toute l'information recueillie est celle du vecteur représentant la ligne de navigation qui correspond au chenal principal de la rivière. Comme pour la sinuosité et la largeur, nous visons à ce que chaque pixel ait une information de profondeur et d'altitude de la surface de l'eau. Cette dernière est l'altitude orthométrique (par rapport au NMM\*). La même technique que nous avons utilisée pour la largeur a été utilisée lors de cette étape. La seule différence est que nous considérons la ligne de navigation comme ligne médiane. Ce qui nous évite de définir une ligne médiane par triangulation / centroïdes. La figure 3.14 présente le résultat obtenu pour la profondeur, nous y observons que la profondeur maximale est de 15.48 mètres alors qu'il y a des parties vraiment très peu profondes (<1 mètre).

\* Niveau Moyen de la Mer

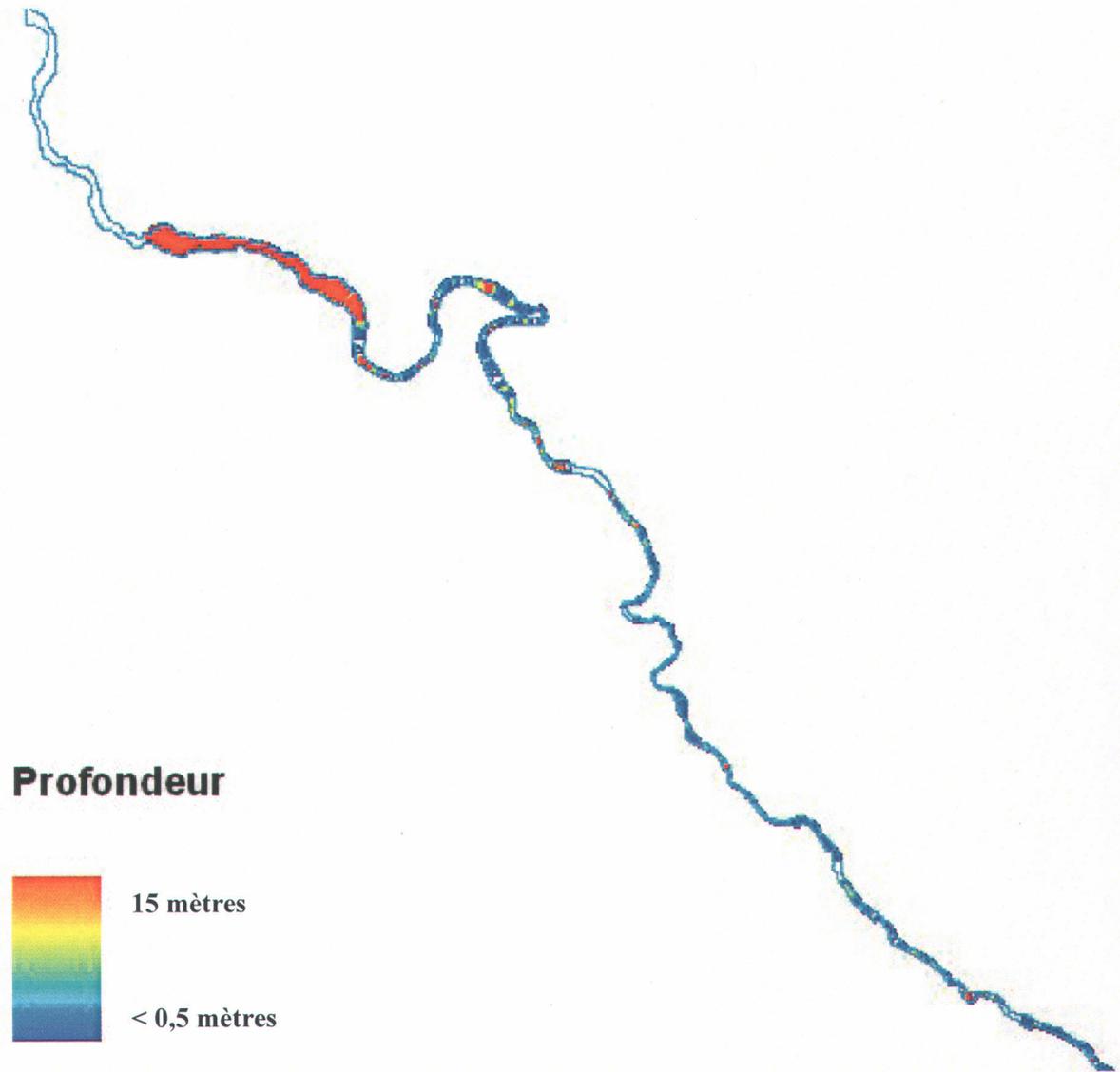
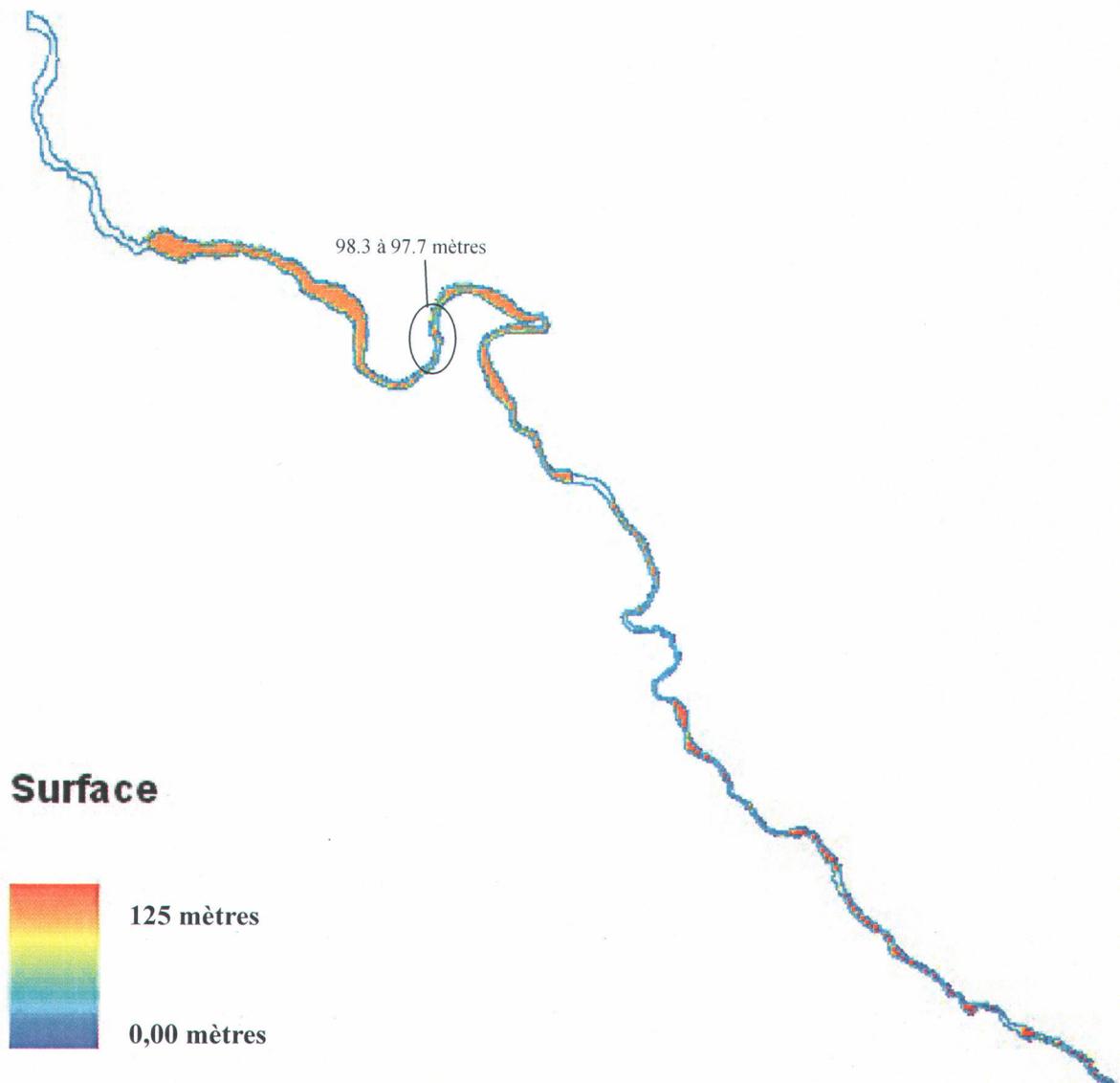


Figure 3.14 : Valeurs de profondeur calculées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François.

Dans la figure 3.15 nous remarquons que l'altitude du plan d'eau passe de 125 mètres en amont du tronçon à 95.5 au barrage Hemmings. Cependant, il est évident que dans les zones de rapides de forts changements d'altitude sont observés (p. ex., voir le cercle indiqué sur la figure 3.15).



**Figure 3.15 : Valeurs de profondeur calculées pour le tronçon étudié de la rivière Saint-François.**

### 3.5.4 Données historiques

Nous avons présenté dans la section 3.3 la description des données historiques dont nous avons possession. Il s'agit de bases de données où l'on trouve une description qualitative de l'état de glace. Sous leur format original, aucune correspondance spatiale directe avec la rivière n'était possible. Pour rendre ces bases de données plus utiles, nous avons spatialisé sous un format convivial les données historiques. Dans le SIG, une jointure spatiale a été opérée entre l'index de distance dans les BD historiques et le tronçon étudié de la rivière Saint-François. Par la suite un index de couleur a été relié à chaque description de la glace. Nous avons aussi calculé la probabilité historique de chacune des classes de glace. L'annexe C contient les 24 cartes de probabilité descriptives de l'état de la glace que nous avons produites à l'aide du SIG. La figure 3.16 présente la situation du couvert de glace le 10 avril 1956 où nous remarquons le passage de la BD sous format d'un tableau à la carte descriptive de l'état de glace.

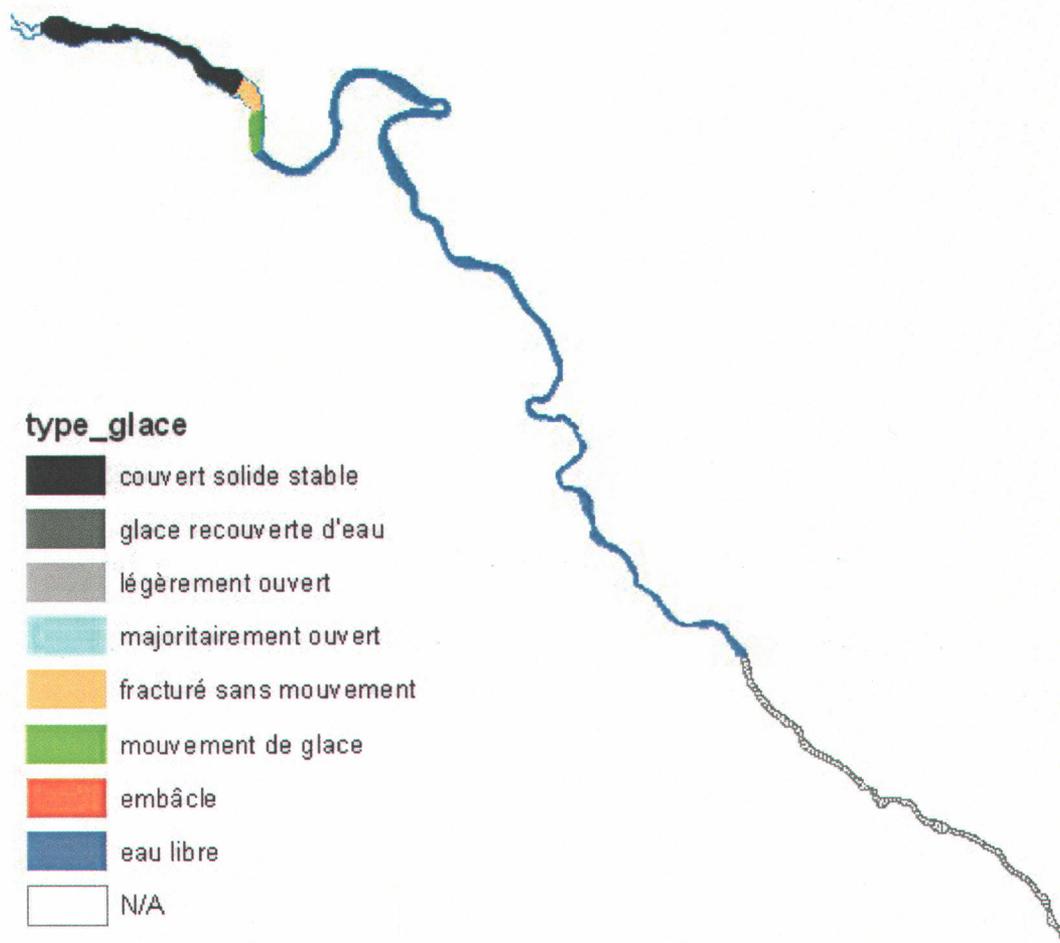
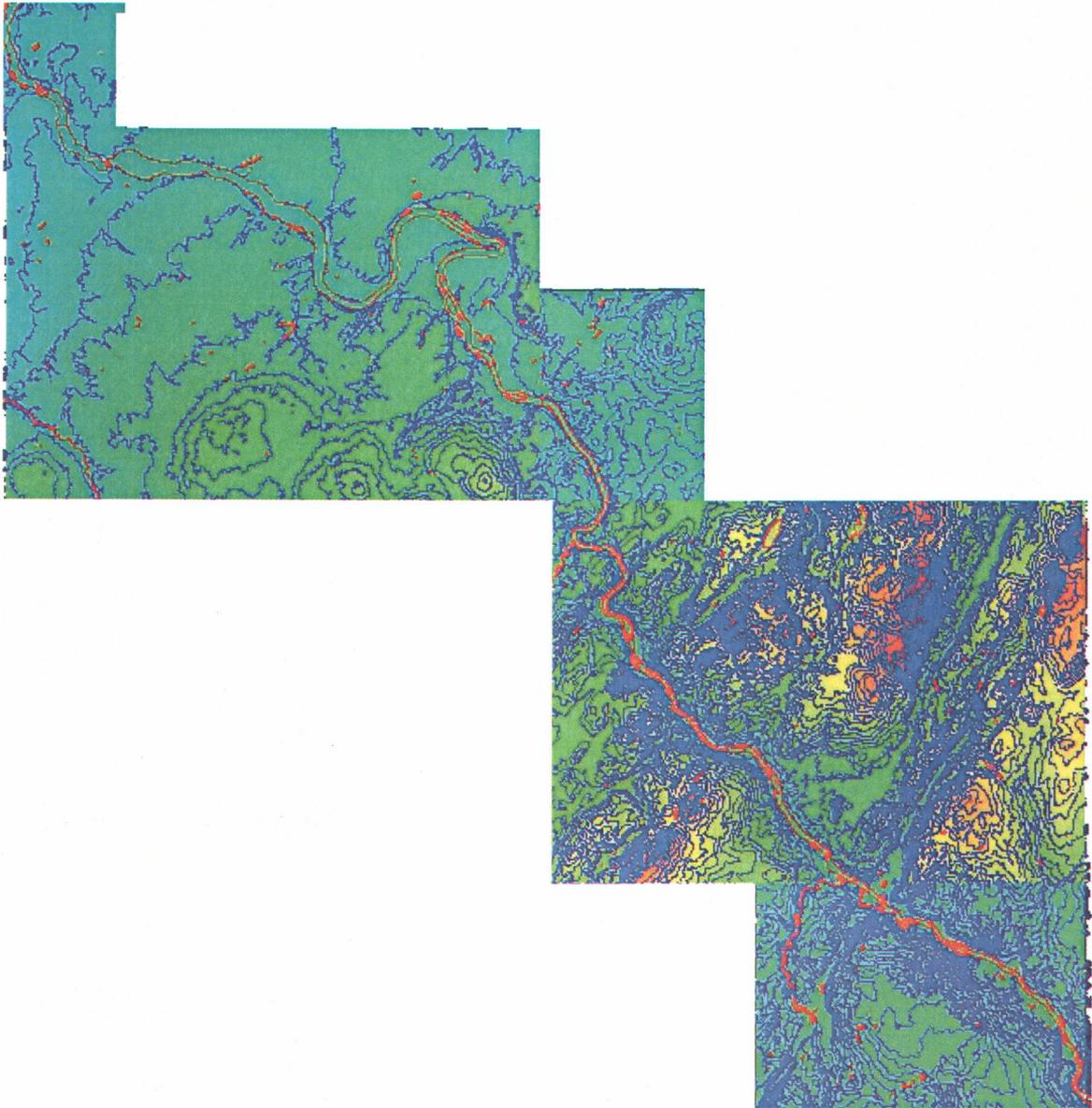


Figure 3.16 : Carte descriptive de la glace de la rivière Saint-François le 10 avril 1956.

### **3.5.5 Modèle numérique d'altitude**

Dans notre étude, le modèle numérique d'altitude n'est pas utilisé pour générer une caractéristique descriptive des pixels se trouvant dans la rivière. Cependant, il a un rôle primordial dans la méthode de correction géométrique des images RADARSAT. Nous l'avons généré à partir des courbes de niveau hypsométriques extraites de la carte vectorielle au 1: 20 000 (BDTQ). D'une résolution spatiale de 10x10 mètres, similaire aux images RADARSAT le MNA est présenté dans la figure 3.17.

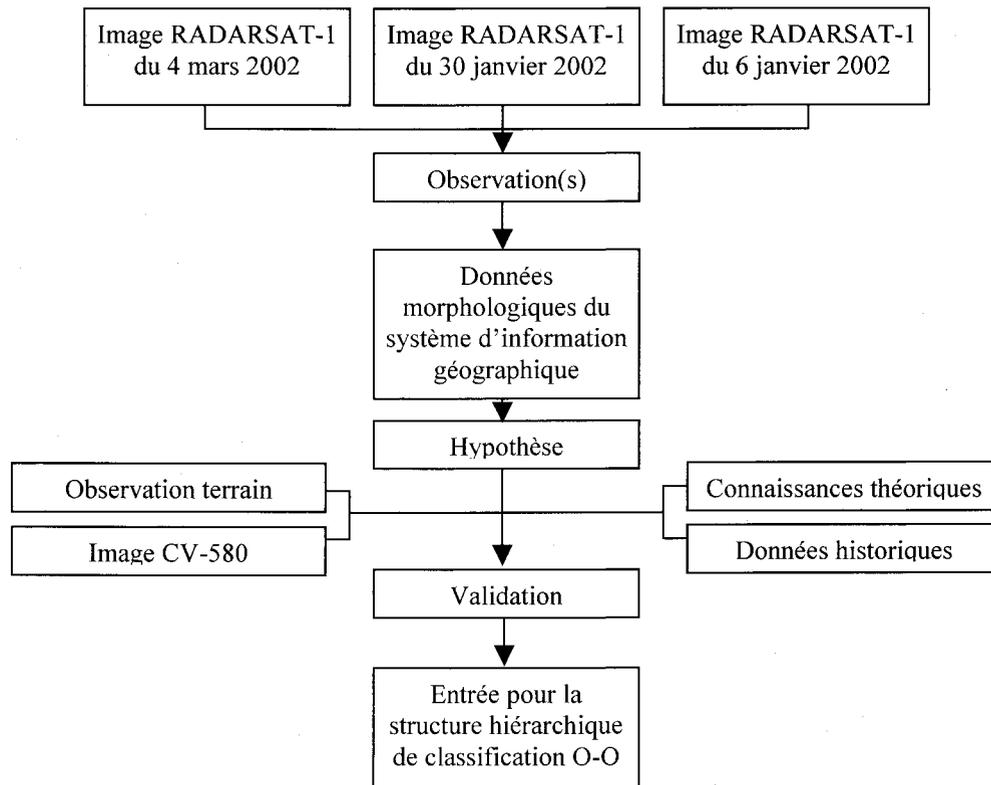


**Figure 3.17 : Modèle numérique de terrain correspondant à l'étendue spatiale des images RADARSAT.**

### 3.6 Analyse qualitative

L'analyse qualitative est l'un des deux piliers fondamentaux, à côté de l'analyse quantitative, sur lesquels nous nous sommes basés pour monter la structure hiérarchique de la classification orientée objet. Comme son nom l'indique, dans cette analyse nous essayons de trouver des liens, des rapprochements et/ou des explications de nature qualitative entre les observations terrain et les connaissances théoriques d'un côté, et les images étudiées d'un autre. Aucun processus statistique n'a été utilisé dans cette analyse.

La figure 3.18 schématise l'approche que nous avons suivie pour réaliser l'analyse qualitative. Les images utilisées dans cette étape sont celles de l'hiver 2002 (6 et 30 janvier, ainsi que celle du 4 mars). Le choix de ces images est motivé par le fait que nous disposons d'observations terrain détaillées pour elles, et aussi du fait que le couvert de glace était dans une phase d'équilibre. Cela dit, si nous remarquons qu'un phénomène particulier de glace s'observe dans le même endroit et dans les trois images, nous considérons ce fait comme une observation ou un constat. À l'aide du système d'information géographique, nous essayons de donner une explication au phénomène observé, une sorte d'interprétation. À ce stade la comparaison entre images et SIG ne donne que des hypothèses d'explication. Dans la deuxième étape de l'analyse qualitative, nous essayons de valider les hypothèses émises lors de la phase précédente. Les observations terrain, historiques et/ou nos connaissances théoriques sur les processus de glace servent à ce stade comme outils de validation. Nous essayons d'aller chercher le maximum d'observations possible. Le plus d'observations nous cherchons, le plus de compréhension nous avons sur les types de glace et le mieux notre structure hiérarchique est définie. À noter aussi l'utilisation de l'image CV-580 pour déterminer le mécanisme de diffusion principal qui entre en action. En fait, à n'importe quelle portion de cette image nous pouvons dessiner un polygone et obtenir sa signature polarimétrique et aussi sa décomposition Cloude et Pottier. Cependant, il ne faut pas oublier que l'image CV-580 est acquise durant l'hiver 2003 et ne couvre qu'une partie de la zone d'étude.



**Figure 3.18 : Organigramme descriptif des diverses étapes de l'analyse qualitative.**

### **3.7 Analyse quantitative**

À l'encontre de l'analyse qualitative, celle dite quantitative est orientée plus vers des processus statistiques. Nous nous intéressons toujours à enrichir la structuration hiérarchique de la classification orientée objet. Les images utilisées dans cette étape sont les mêmes que dans l'analyse qualitative, pour la simple raison que (i) désormais nous les connaissons bien et (ii) les observations terrain sont nécessaire pour valider. Dans cette étape nous allons aussi vérifier nos hypothèses de recherche. En fait, les paramètres que nous avons choisi d'attribuer à chaque objet d'une image sont de trois sortes :

- Paramètres tirés directement ou indirectement des images RADARSAT (rétrodiffusion et texture);

- Paramètres tirés directement ou indirectement du système d'information géographique ;  
et
- Paramètres propres à l'objet et à son voisinage.

Le tableau 3.4 donne quelques exemples de ces trois sortes de paramètres pour chaque objet d'une image RADARSAT :

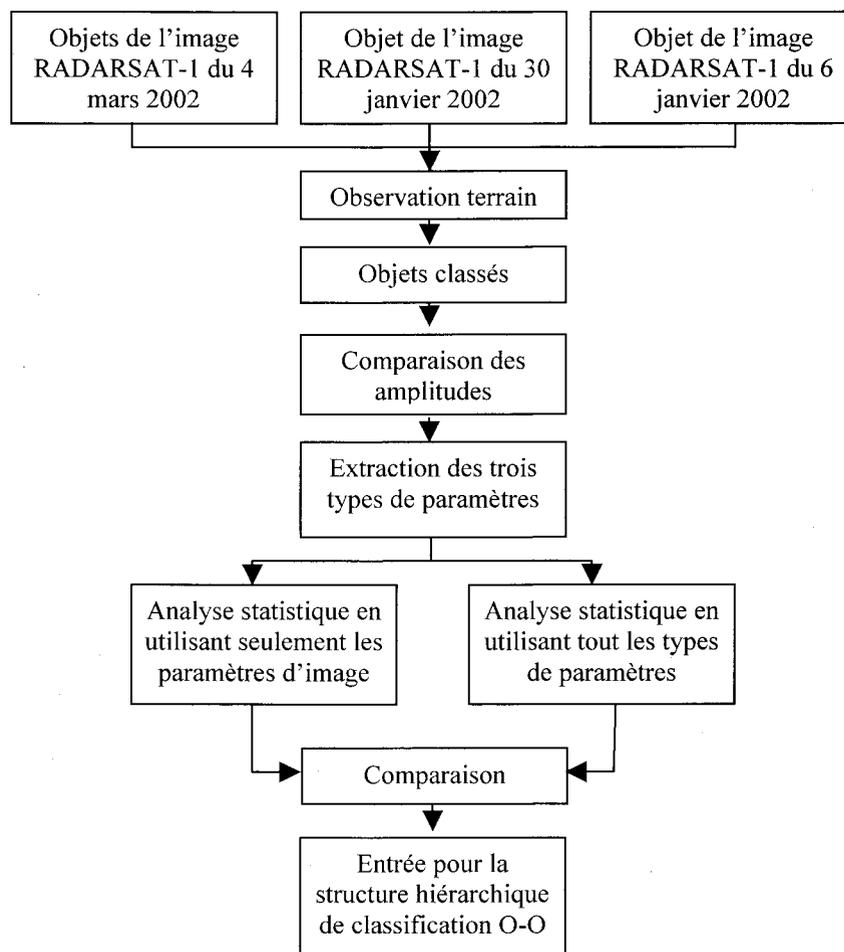
**Tableau 3.4 : Exemple de paramètres objet pour l'analyse quantitative**

Paramètres image	Paramètres SIG	Paramètres de l'objet
Amplitude	Largeur moyenne	Indice de forme
corrélation	Profondeur moyenne	Rapport longueur/largeur
moyenne	Sinuosité moyenne	Superficie
second moment angulaire	Pente	Périmètre
Entropie	Vitesse d'écoulement	Indice de correspondance à une ellipse
Écart-Type	Zones de rapide	Indice de correspondance à un rectangle
Contraste	Zone d'îles	Distance de la rive
Homogénéité	-	Objet voisin

Ainsi, l'analyse quantitative doit nous montrer, s'il y a lieu, la limite des paramètres d'image et l'utilité des autres types de paramètres. La figure 3.19 présente les diverses étapes de l'analyse quantitative. En premier lieu, après la segmentation en objets des images RADARSAT, les objets pour lesquels les observations terrain existent sont identifiés. Ainsi, nous connaissons quel objet appartient à quelle classe de glace de rivière. Une comparaison sommaire des amplitudes des diverses classes est opérée pour en extraire des valeurs clés. L'étape suivante consiste à extraire pour chaque objet les trois types de paramètres énumérés en haut. L'étape ultime est celle où l'analyse statistique est effectuée distinctement sur deux ensembles de types de paramètres :

- Premièrement, en utilisant seulement les paramètres d'image;
- Deuxièmement, en ajoutant les autres types de paramètres.

Une comparaison entre les résultats de l'analyse de séparation statistique nous permet de définir l'importance de chaque ensemble de paramètres pour distinguer le mieux les types de glace. Encore une fois, le résultat de l'analyse qualitative vient enrichir la structuration de la classification orientée objet.



**Figure 3.19 : Organigramme descriptif des diverses étapes de l'analyse quantitative.**

### 3.8 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre le site d'étude sur lequel cette recherche a été conduite ainsi que les images RADARSAT et toutes les données auxiliaires disponibles. Le tronçon de la rivière Saint-François situé entre les villes de Windsor et Drummondville a été choisi pour plusieurs raisons, entre autres, sa proximité, sa variabilité morphologique, son historique de problèmes reliés à la glace de rivière et sa concordance avec l'orbite de laquelle les images RADARSAT mode fin sont acquises. Ces dernières ont été choisies pour la caractérisation de la glace de rivière principalement à cause de la fine résolution spatiale et de la capacité pénétrante du signal radar.

Aussi dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie que nous avons élaborée pour atteindre nos objectifs. Cette méthodologie repose principalement sur les étapes suivantes :

- Préparation des données : dans cette phase il a été question (i) d'acquérir les données auxiliaires (données historiques, données terrain, survol hélico, etc.), (ii) de monter le système d'information géographique pour caractériser morphologiquement la rivière et (iii) prétraiter les images RADARSAT-1 en vue de leur classification.
- Analyse et compréhension des principaux facteurs qui influencent les phénomènes de la glace de rivière : pour aboutir à cette fin, nous avons effectué une analyse qualitative et une autre quantitative. La première analyse compare qualitativement les images RADARSAT avec les données terrain, les données historiques, et la théorie de la glace de rivière et du signal radar. La deuxième analyse essaye de montrer quantitativement l'apport des caractéristiques du contexte et de la topologie à la classification.
- Application de la classification orientée objet : (i) cette ultime étape consiste à trouver une manière adéquate de segmenter les images RADARSAT en objets, (ii) de synthétiser les résultats de l'étape précédente sous forme de structure hiérarchique et (iii) de procéder à la classification orientée objet.

Finalement, dans ce chapitre nous avons exposé les détails et résultats du montage du système d'information géographique, ainsi que les organigrammes et détails de l'analyse qualitative et celle quantitative. À retenir aussi, que les trois images de l'hiver 2002 sont utilisées dans la phase de développement de la méthodologie, tandis que l'image du 11 février 2003 est préservée pour tester la classification orientée objet. Dans les chapitres qui suivent, nous présentons les résultats obtenus pour l'analyse qualitative, l'analyse quantitative et la classification orientée objet.



## **4. RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUALITATIVE**

---

Le présent chapitre est consacré à la présentation de résultats obtenus lors de l'analyse qualitative. Dans cette dernière, nous avons procédé à l'analyse des données terrain, du SIG et des images RADARSAT-1. Afin de faciliter la tâche, la rivière a été subdivisée en onze sous zones distinctes. Aussi et en guise de supplément à l'analyse qualitative, l'analyse polarimétrique sur l'image CV-580 a été menée dans la perspective de distinguer les principaux mécanismes de rétrodiffusion.

### **4.1 Analyse qualitative**

Comme cité dans la description de l'approche méthodologique de l'analyse qualitative, nous avons utilisé essentiellement les trois images RADARSAT de l'hiver 2002. Afin de faciliter l'analyse, la zone d'étude a été subdivisée en onze sous-zones. Ces dernières présentent des conditions morphologiques variables, telle que :

- Présence ou absence d'une grande île;
- Largeur ou profondeur : maximale, moyenne ou minimale;
- Sinuosité uniforme ou variée;
- Présence ou absence d'agglomérat de petites îles;
- Toute combinaison possible de ces conditions.

Les sous-zones suivantes ont été définies pour cette analyse (voir figure 4.1 pour leur localisation spatiale) :

1. La zone de l'aéroport qui s'étend du barrage Hemmings à la partie avale des rapides Makowksen;
2. La zone en forme de U qui couvre la zone de rapides Makowksen jusqu'au point d'observation #26;
3. La zone de la tête du canard, qui a le même format, et qui couvre la partie amont du point #26 jusqu'en aval de l'île Therrien;
4. La zone de l'île Therrien jusqu'au point d'observation #25;
5. La zone qui couvre l'île Brown jusqu'en amont du point d'observation #12;

6. La zone du point #23 qui s'étend deux kilomètres en amont et en aval de ce point d'observation;
7. La zone d'Ulverton qui couvre du point #22, en passant par les rapides Ulverton, jusqu'à la région de Trenholm;
8. La zone #13-#20 qui couvre ces deux points d'observation et qui s'étend de la région de Trenholm jusqu'à pont du chemin de fer;
9. La zone Richmond qui couvre la ville du même nom;
10. La zone du point #15 et qui s'étend deux kilomètres en amont et en aval de ce point d'observation; et finalement;
11. La zone Windsor qui couvre la ville du même nom.

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons dans un premier lieu les données morphologiques tirées du SIG de chacune des sections précitées ainsi que les images RADARSAT. En parallèle, nous présentons l'interprétation de ces images en nous basant sur les observations de terrain et/ou les connaissances théoriques et/ou les données historiques disponibles pour cette zone. Finalement, nous émettons quelques hypothèses pour essayer d'expliquer le ou les phénomènes de glace observés. En fait, tout cet exercice a été mené dans la perspective de fournir des éléments relationnels et logiques pour alimenter la structure hiérarchique de la classification orientée objet.

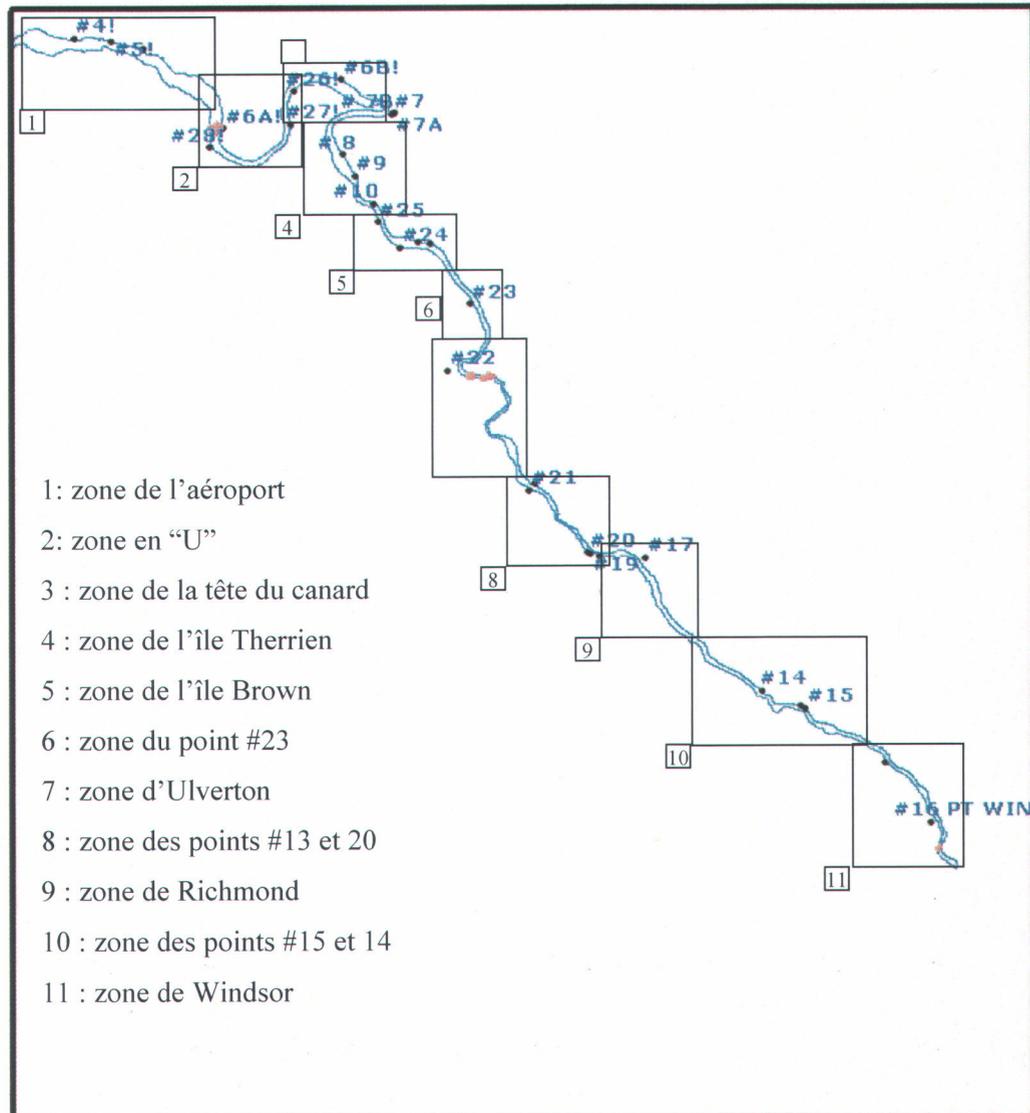


Figure 4.1 : Localisation spatiale des 11 sous zones du site d'étude de la rivière Saint-François.

#### **4.1.1 Zone de l'aéroport**

Cette zone forme le réservoir de retenue du barrage Hemmings. Du côté morphologique (figure 4.2), cette partie de la rivière est caractérisée comme suit :

- ❑ La zone la plus large du tronçon étudié de la rivière. En effet, les largeurs calculées se situent entre 400 et 850 mètres;
- ❑ Zone très profonde, entre 5 et 10 mètres. Bien que le pic de profondeur n'est pas situé dans cette partie, mais c'est la partie de la rivière où la profondeur reste importante sur une zone aussi grande;
- ❑ La sinuosité est très faible dont les valeurs restent en dessous du seuil de 0.34;
- ❑ Absence d'îles ou de zones d'obstacles.

Pour les trois images étudiées, la rétrodiffusion est moyenne (figure 4.3). À partir des photos prises sur le terrain, nous remarquons que dans cette zone le couvert de glace est complet et uniforme (annexe A-1). En fait, à partir des caractéristiques morphologiques et sachant que nous sommes sur le réservoir du barrage, il est évident qu'un écoulement laminaire et des faibles vitesses d'écoulement favorisent la formation de glace thermique. La rétrodiffusion du signal est due donc au fort contraste de la constante diélectrique à l'interface eau/glace thermique. Cependant, pour l'image RADARSAT du 5 mars 2002 nous observons au centre de cette zone un chenal de forte rétrodiffusion qui s'étale du barrage jusqu'au point d'observation #6. Les photos terrain (annexe A-1, figures G, H et I) confirment la présence de ce chenal qui correspond à la trace de la « grenouillère », une machine qui concasse le couvert de glace pour affaiblir sa force mécanique. En plus, nous avons remarqué sur les photos des traces de motoneige et même la présence d'un tout-terrain (annexe A-1, figure C), ce qui confirme que cette zone est bien connue pour son couvert stable et uniforme. En fait, à partir de la base de données des observations historiques nous avons constaté que lorsque le couvert de glace est stable sur la rivière, la probabilité que cette zone soit couverte complètement avec un seul type de glace est de plus de 75 % (annexe C).

Puisqu'il n'y a pas d'obstacles à l'écoulement dans cette zone et que les conditions morphologiques sont relativement uniformes, nous nous attendons à ce que la distinction des divers types de glace qui s'y trouvent soit assez facile. En fait, dans de pareilles conditions nous pouvons nous attendre à observer les classes suivantes :

- Glace thermique formée localement et qui forme un couvert complet durant la phase où le couvert de glace est stable;
- Eau libre dans le cas d'une débâcle thermique progressive, avec persistance de glace de rive;
- Glace agglomérée formée par les fragments de glace amenés par le courant à partir des zones amont de la rivière et qui se trouve freiner par le couvert de glace thermique en place.

La distinction entre ces différents types doit être assez nette. Aussi, la progression du front de glace ou de l'embâcle doit être relativement simple à déceler.

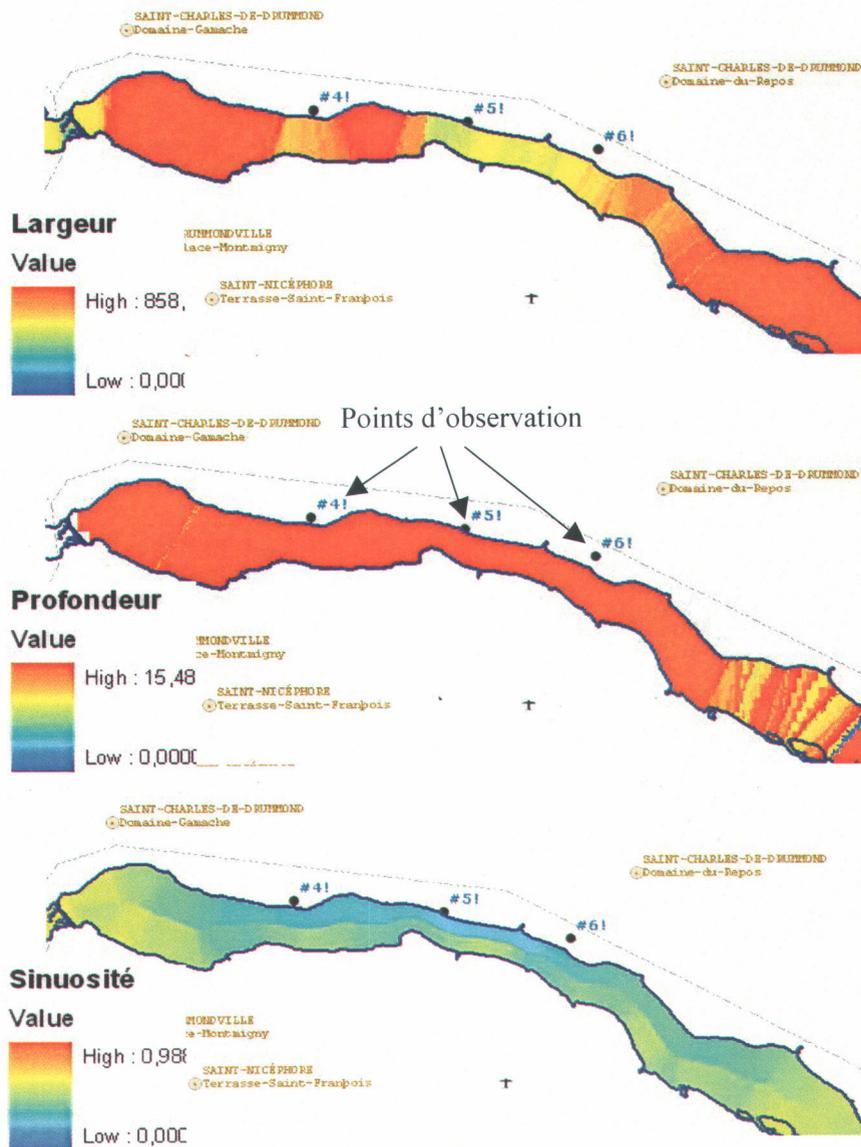


Figure 4.2 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de l'aéroport.

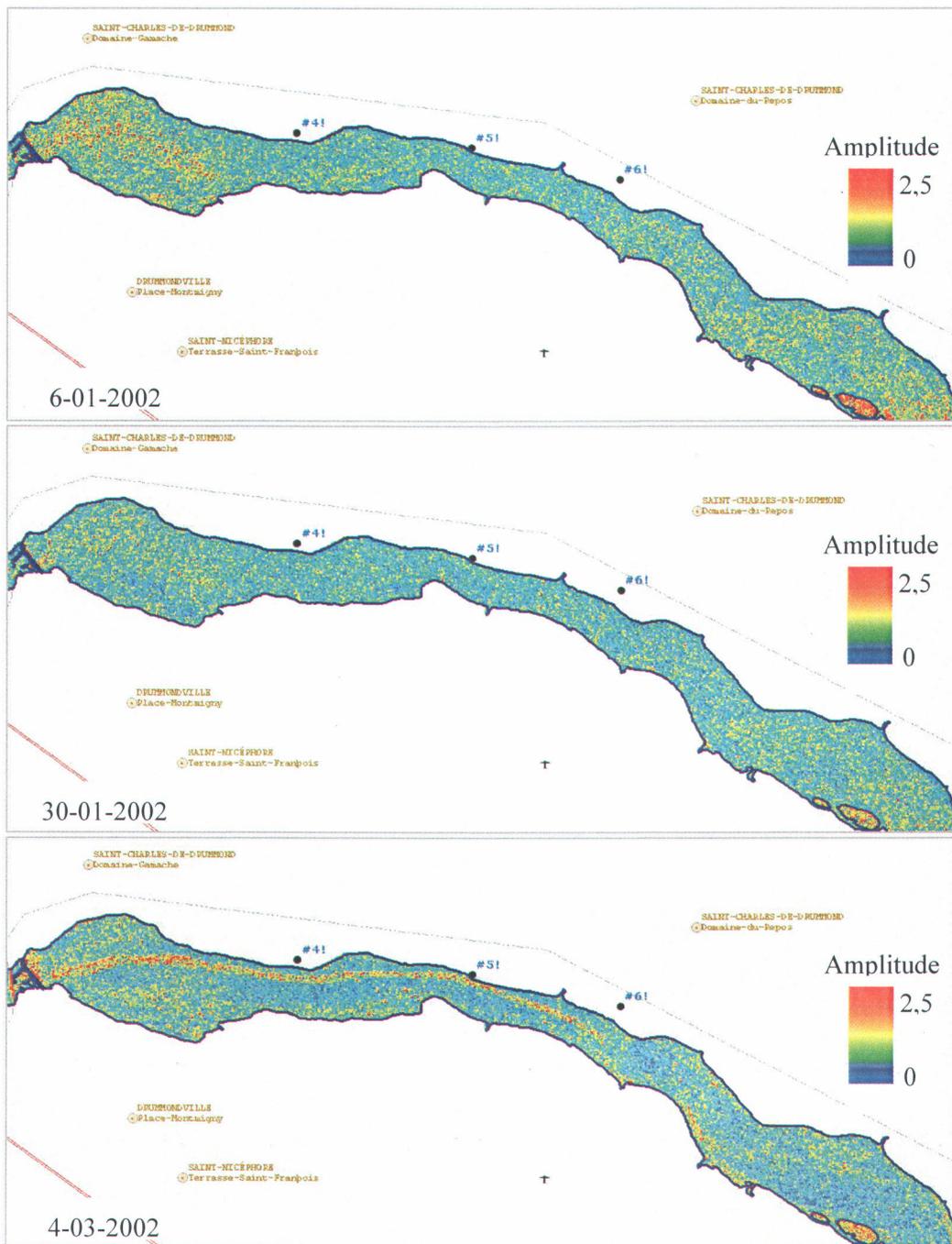


Figure 4.3 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de l'aéroport.

#### 4.1.2 Zone en forme de U

Cette zone est appelée ainsi vu sa forme qui correspond à un « U ». Du côté morphologique, cette partie de la rivière est caractérisée comme suit (voir figure 4.4) :

- La largeur est moyenne, mais uniforme sur toute la partie en amont du point d'observation 6A. Dans cette partie elle varie de 200 à 300 mètres. Dans la zone des rapides Mkowksen, la largeur prend de l'ampleur progressivement vers l'aval plus que l'on s'approche de la zone de l'aéroport, elle varie alors de 300 à 500 mètres.
- Zone dont la profondeur n'est nullement homogène. En effet, elle varie de 1 à 3,5 mètres et ce, de façon intermittente.
- Bien que la zone forme un U, la sinuosité varie de faible à moyenne.
- Absence de grandes îles ou de zones d'obstacles sur le chenal principal d'écoulement;
- Présence de zone de rapide vis-à-vis du point d'observation 6A.
- Présence d'une zone de rapide juste en aval du point d'observation 27.

Pour les trois images étudiées, nous remarquons le même phénomène: la rétrodiffusion est très faible dans la partie centrale du U, moyenne en amont du point #26 et très importante en aval des rapides Mkowksen (figure 4.5). Des photos terrain (annexe A-2) nous retenons les observations suivantes :

- Bien que la distance entre les points d'observation #26 et #27 ne dépasse pas les 500 mètres, pour les trois images RADARSAT, il y a présence d'un couvert complet au point #26 et d'eau libre vis-à-vis du point #27;
- Juste en aval du point #27, nous remarquons dans l'image du 6 janvier une rétrodiffusion moyenne qui est différente de celle de l'eau libre (bleu). Cependant, la photo prise à ce point ne montre aucune présence de glace, mais plutôt un écoulement à l'eau libre avec présence de vaguelettes (annexe A-2, figure 27B);
- Pour les trois images il y a présence d'une glace de rive sur la rive Est juste en aval du point #27. La rétrodiffusion de cette dernière est moyenne sur les images du 6 et 30 janvier, tandis qu'elle est forte le 4 mars 2002. La photo de la figure 27G de l'annexe A-2 montre en effet la présence d'une accumulation de glace agglomérée dans cette partie le 5 mars;
- Vis-à-vis du point #6A, il y a présence d'eau libre le 30 janvier et le 5 mars (pas d'observation le 6 janvier). Cependant le 5 mars nous observons une forte accumulation sur

la rive Est de radeaux de glace (annexe A-2, figure 6A-G) alors que la rétrodiffusion reste très faible;

- Le 5 mars 2002, nous avons observé en aval du point 6A une forte glace agglomérée qui correspond à une forte rétrodiffusion dans l'image RADARSAT. En plus de gros fragments de glace thermique ont été observés sur la rive Est (annexe A-2, figure 6A-G).

À partir des observations formulées ci-haut, nous constatons que dans cette zone de la rivière le couvert de glace n'est ni complet, ni uniforme. En fait, il semble que dans les zones où la profondeur est faible et la largeur est moyenne, une forte vitesse d'écoulement favorise un écoulement à l'eau libre. Cette remarque concerne plus le chenal d'écoulement principal puisque dans les parties latérales nous observons de la glace de rive. Il est aussi évident que juste dans la partie centrale du U un couvert presque complet est observé surtout le 30 janvier et le 5 mars. Probablement que se sont là des accumulations de fragments de glace flottante qui se détachent du couvert complet observé au point #26 et qui s'accumulent dans le creux du « U ». Ces mêmes fragments menés par l'écoulement se trouvent confronter au couvert de glace statique formé dans la zone de l'aéroport ce qui forme un couvert de glace agglomérée. L'analyse des données historiques réconfortent ces hypothèses puisque le « patron » observé dans l'hiver 2002 est le même observé plusieurs années auparavant (annexe C, figure MM7). La probabilité de présence d'eau libre dans le creux du « U » est beaucoup plus importante que celle observée dans la zone de l'aéroport et au point #26, 10 % à 30 % vs (<10 %) (annexe C, figure DM\_C7). Aussi les probabilités de présence de glace agglomérée et/ou d'embâcle en amont du point #6A sont élevées (annexe C, figures DM6, MM4, DA6 et DA4).

Nous retenons donc pour cette zone de la rivière ce qui suit :

- Couvert complet de glace dans la partie amont (#26);
- Présence d'eau libre entre le point #27 et le point #6A (rapides Mkowksen);
- Glace agglomérée après les rapides Mkowksen en amont du couvert thermique de la zone de l'aéroport;
- Présence de radeaux de frasil qui se forme en aval du point #26. En fait, le couvert est complet en amont de ce point donc le frasil qui forme ses radeaux vient (i) soit de la zone

de rapide en aval du point #27 ou (ii) du frasil qui est transporté par l'eau et qui flotte en aval du point #26;

- Présence de fragments de glace thermique dont nous avons réussi à prouver à deux reprises qu'il en résulte une forte rétrodiffusion. (i) glace de rive fragmentée en aval du point #27 de l'image du 5 mars, et (ii) glace agglomérée en aval du point #6A de la même date;
- Eau libre avec vaguelettes dont la rétrodiffusion ressemble à celle de la glace thermique (6 janvier en aval du point #27).

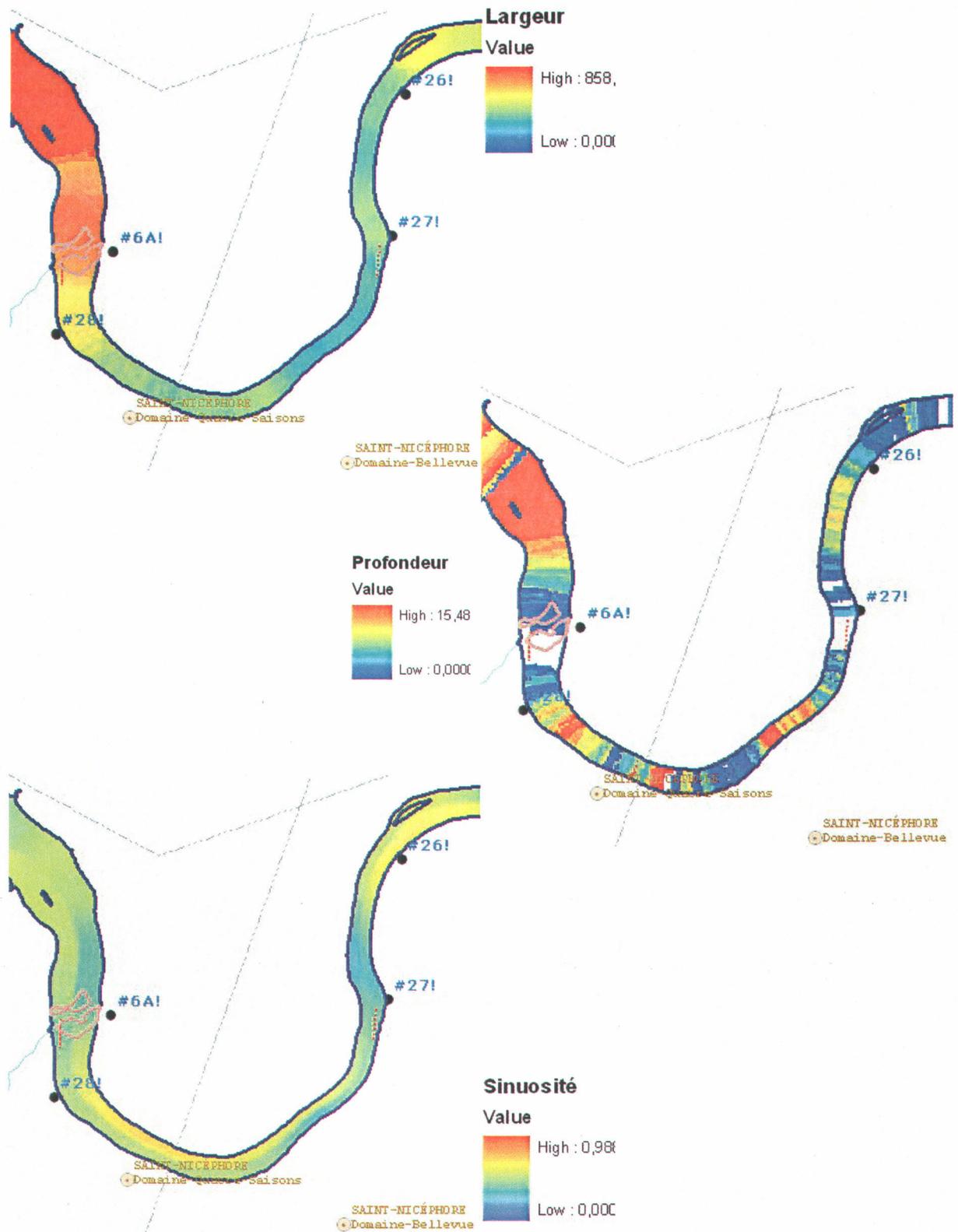


Figure 4.4 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone en U.

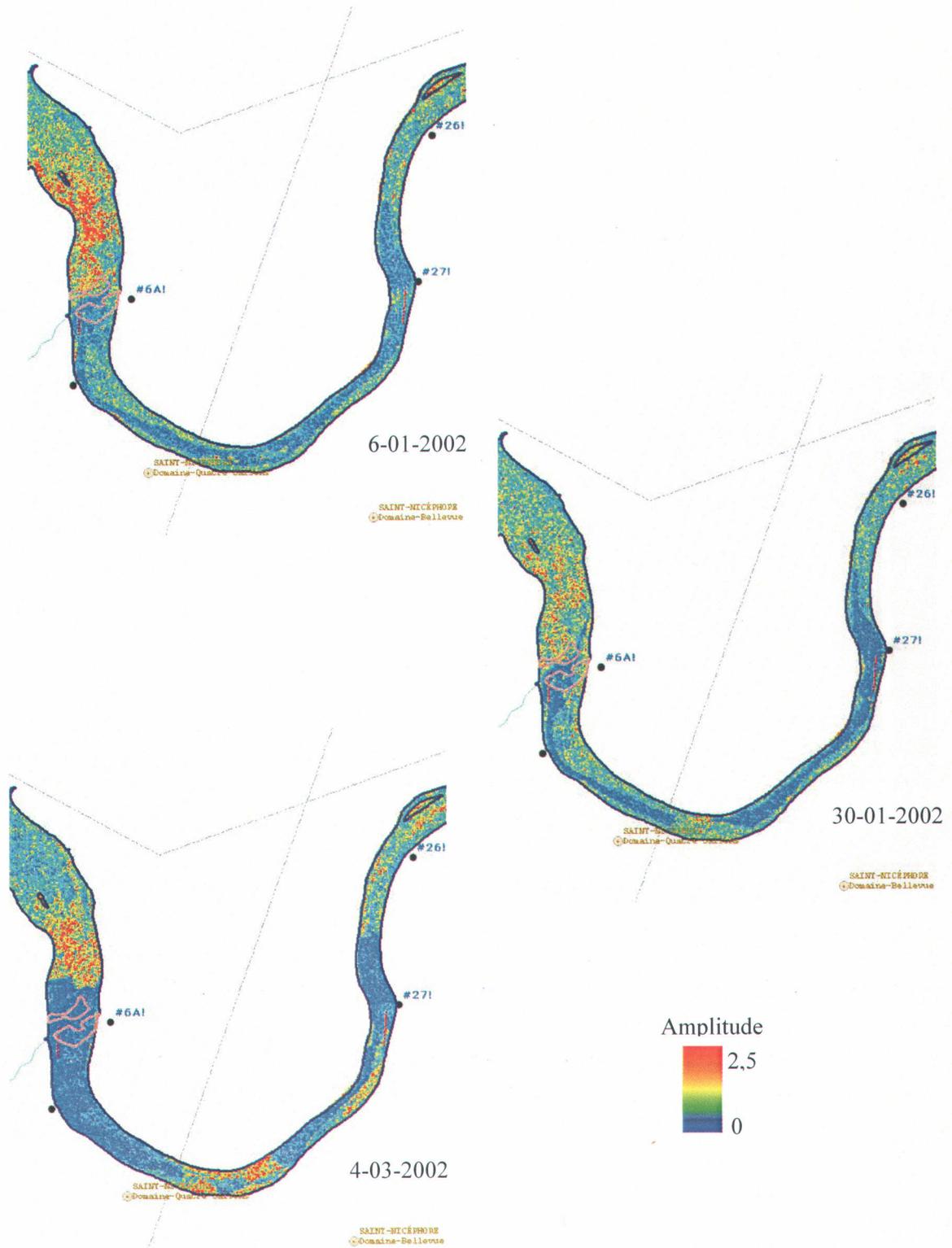


Figure 4.5 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone en U.

### **4.1.3 Zone de la tête du canard**

Cette zone a multiples méandres trace la forme d'une tête de canard. Morphologiquement, cette partie de la rivière est caractérisée comme suit (voir figure 4-6) :

- La largeur est moyenne est quasi uniforme sur toute la zone. Elle varie de 200 à 300 mètres;
- La profondeur est très faible sur la majorité de cette zone et varie de 1 à 2,5 mètres;
- La sinuosité la plus importante de tout le tronçon étudié de la rivière Saint-François est observée dans la partie du bec du canard (point #7). En effet, elle atteint 0,98 dans cette partie et demeure moyenne dans les autres;
- Une grande île est présente juste en aval du bec de canard et dévie le chenal principal d'écoulement.

Les observations terrain pour les trois images RADARSAT étudiées se limitent au point #7 et au point #6B (annexe A-3). Pour ce dernier point, il y avait un couvert complet de glace le 5 mars 2002. Pour le point #7, nous remarquons la présence d'eau libre sur les trois images dans la partie que nous avons nommée « bec du canard ».

Pour les trois images étudiées, nous remarquons encore une fois le même phénomène: la rétrodiffusion est très faible dans la partie du bec du canard, moyenne en amont du point #7 et très importante juste en aval du bec et en amont de la grande île (figure 4.7). Le couvert de glace est complet, mais il n'est pas uniforme. En fait, il semble que dans la zone où la sinuosité est maximale l'eau libre persiste. Il est aussi évident que juste en amont de l'île, de la glace agglomérée se heurte à un couvert de glace statique formé aux alentours de celle-ci. Le couvert est complet dans la partie aval de la grande île et le demeure jusqu'au point 26 (voir section précédente). Les données historiques montrent que ce même patron est présent dans plusieurs observations et que la probabilité de présence d'eau libre dans le « bec » est relativement importante dans cette zone (annexe C, figure DM7). Nous retenons donc pour cette zone de la rivière ce qui suit :

- Chenal d'eau libre dans la zone où la sinuosité est maximale;
- Couvert de glace thermique aux alentours de la grande île;
- Probabilité de présence de glace agglomérée juste en amont de la grande île (annexe C, figures DM4 et MM4) (aucune photo disponible);
- Couvert complet en amont de la Grande-Île jusqu'au point d'observation #26.

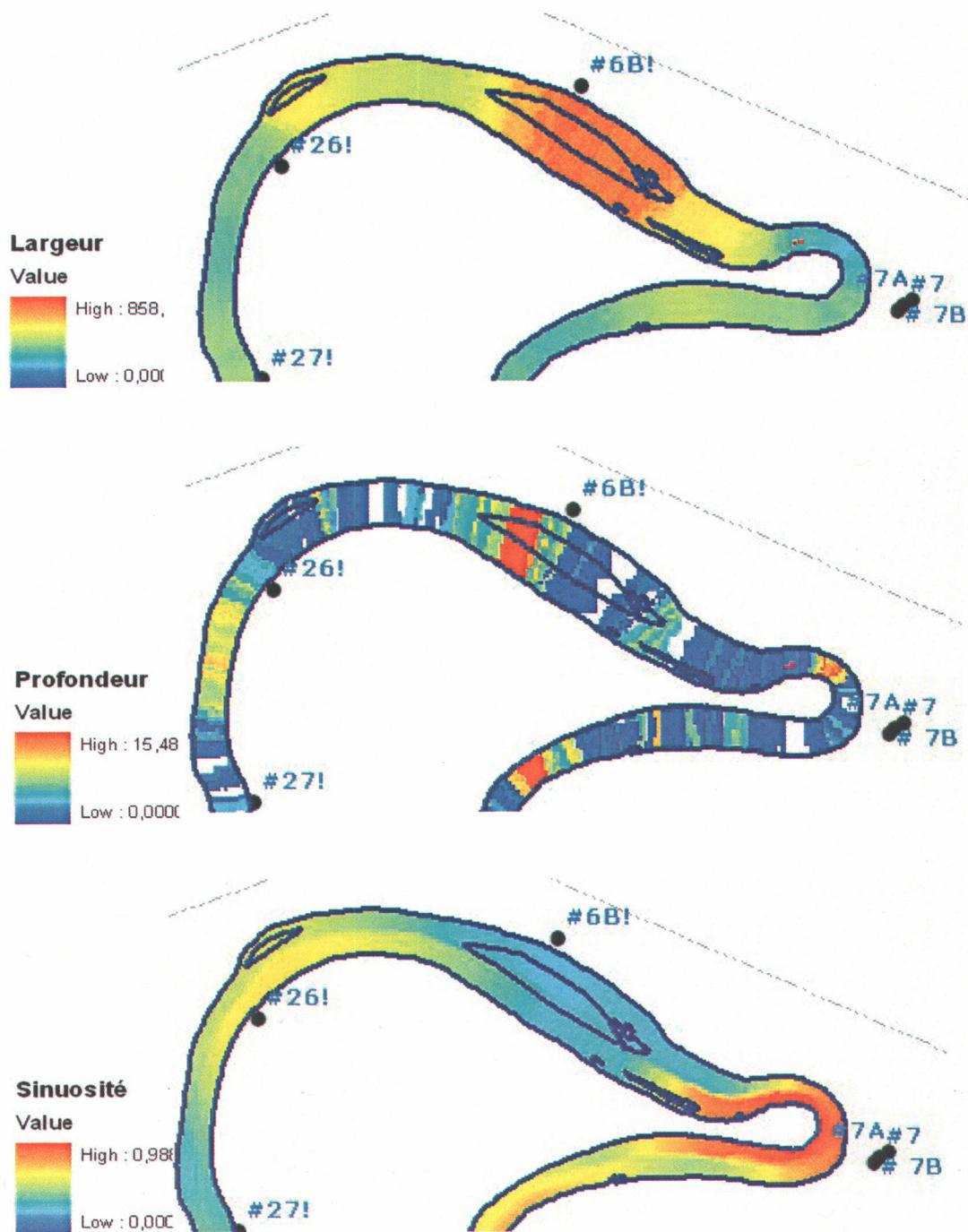


Figure 4.6 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de la tête du canard.

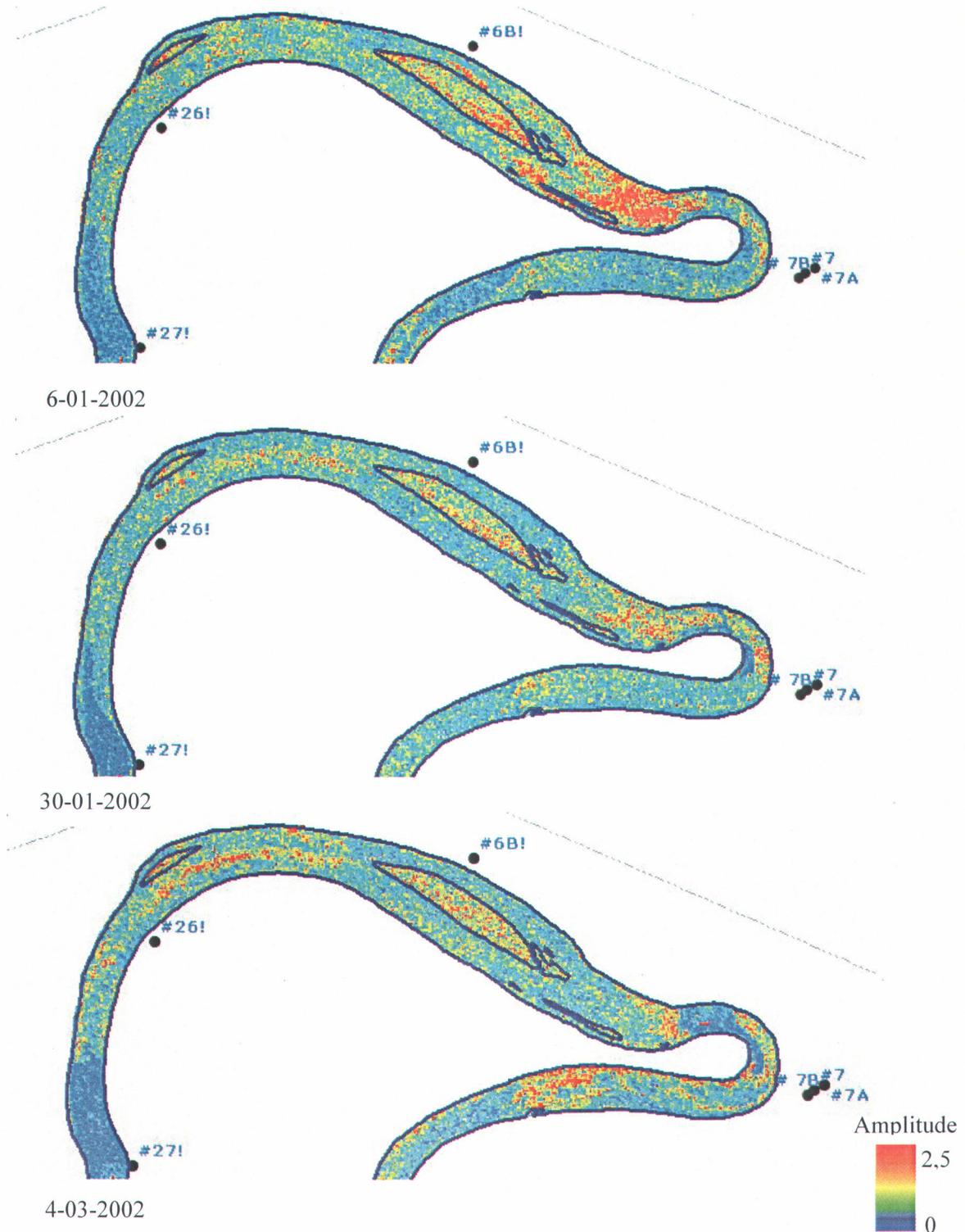


Figure 4.7 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de la tête du canard.

#### 4.1.4 Zone de l'île Therrien et de l'île Brown

Morphologiquement cette partie de la rivière est caractérisée comme suit (figures 4.8 et 4.10):

- ❑ La largeur est moyenne et quasi uniforme sur toute la zone. Elle varie de 200 à 300 mètres;
- ❑ La profondeur est très faible sur la majorité de cette zone et varie d'un à 2,5 mètres;
- ❑ deux grandes îles, l'île Therrien et l'île Brown, sont présentes et dévient légèrement le chenal principal d'écoulement;
- ❑ Un méandre est situé en amont de l'île Therrien.

Comme pour les zones précédentes, les trois images RADARSAT de cette région montrent de nombreuses similarités (figure 4.9 et 4.11). En fait, la rétrodiffusion est moyenne dans la majorité de cette zone sauf dans le méandre où nous observons une très forte rétrodiffusion. Les 6 et 30 janvier, nous avons observé la présence d'un chenal d'eau libre en amont du méandre. Ce chenal est entouré de glace agglomérée (annexe A-5) qui est présentée par une forte rétrodiffusion dans les images RADARSAT correspondantes (figure 4.9). La même observation s'applique pour le chenal d'eau libre en amont de l'île Brown. Il semble que la zone du méandre constitue une zone de stockage et de formation d'embâcle. Les alentours de l'île Therrien ainsi que la partie située à son aval favorisent la formation d'un couvert de glace statique. Les données historiques montrent que la probabilité de formation d'embâcle en amont de l'île Therrien, dans la zone du méandre et en amont de l'île Brown est maximale (annexe C, figures DM6, MM6 et DA6-). Nous retenons donc pour cette zone de la rivière ce qui suit :

- ❑ Couvert de glace thermique aux alentours de l'île Therrien et à son aval (annexe A-4);
- ❑ Présence d'embâcle dans le méandre (annexe A-4);
- ❑ Chenal d'eau libre qui est observé plus qu'une fois en amont du méandre et de l'île Brown;
- ❑ Chenaux d'eau libre qui correspondent à une faible rétrodiffusion dans les images RADARSAT (figure 4.11);
- ❑ Glace agglomérée qui donne une forte rétrodiffusion;
- ❑ Couvert complet de glace uniforme qui correspond à une rétrodiffusion moyenne.

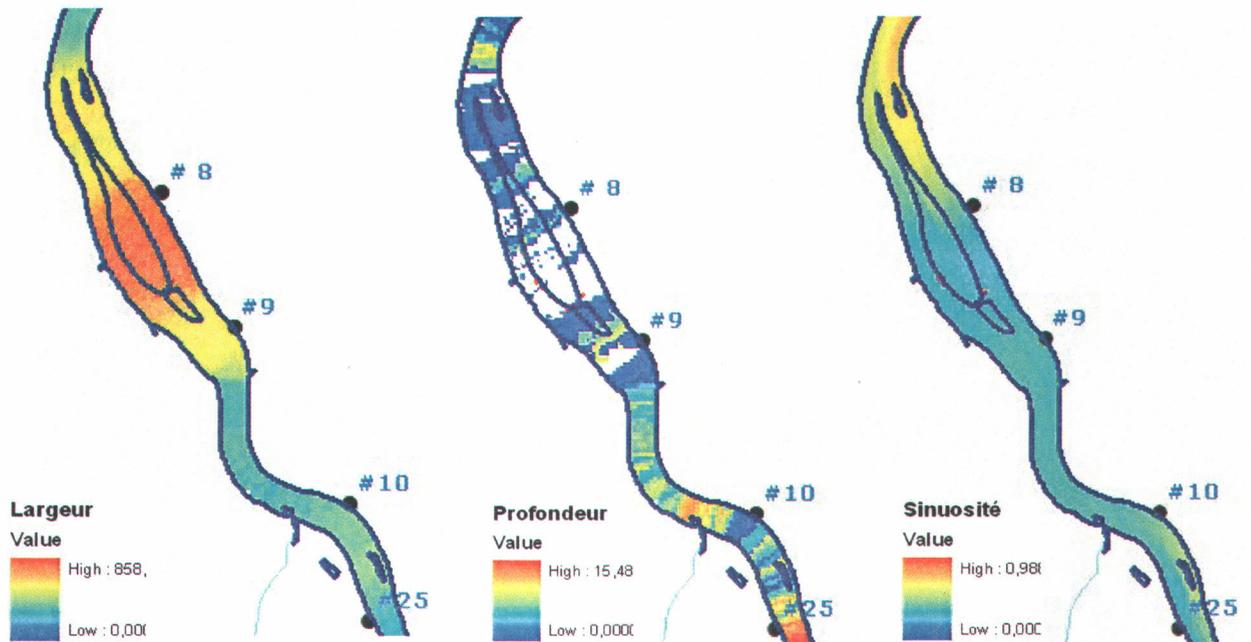


Figure 4.8 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de l'île Therrien.

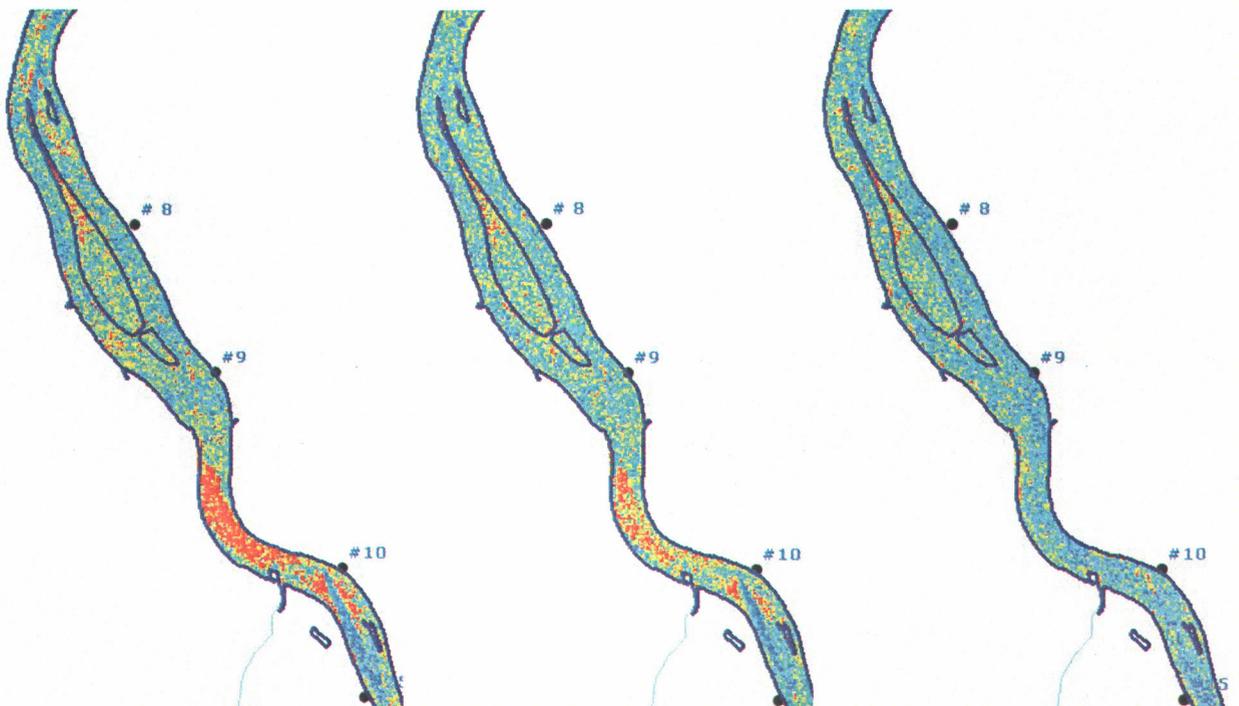


Figure 4.9 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de l'île Therrien.

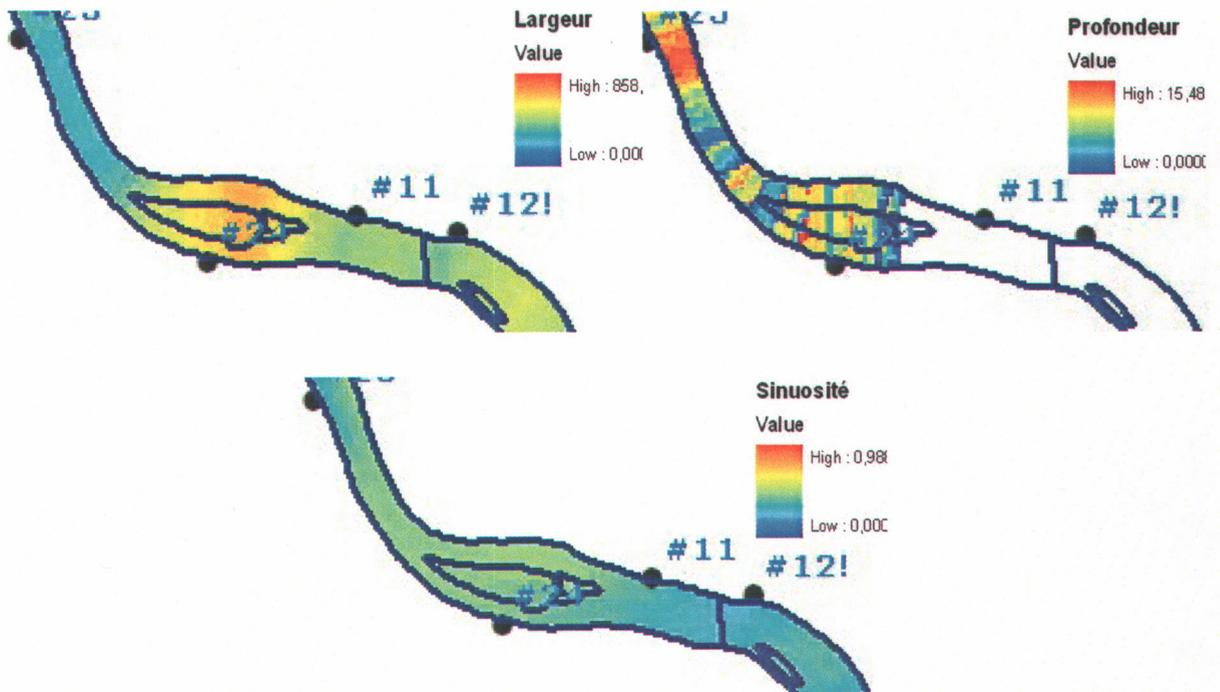


Figure 4.10 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de l'île Brown.

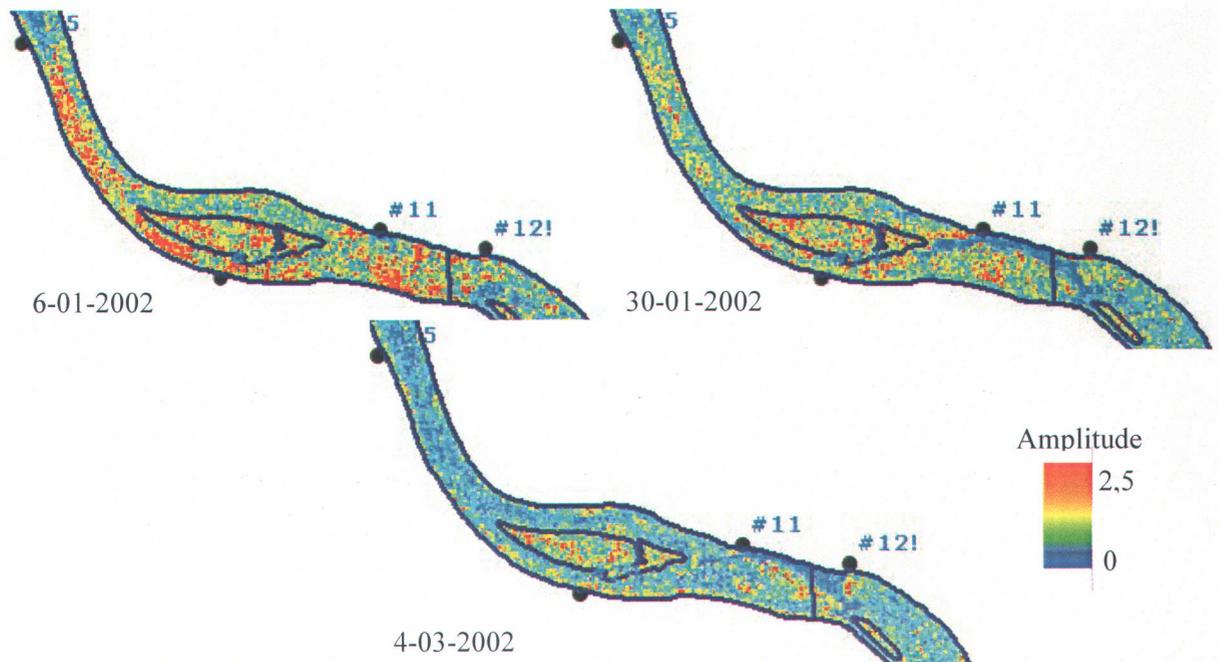


Figure 4.11 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone l'île Brown.

#### **4.1.5 Zone du point d'observation #23**

C'est le tronçon le plus rectiligne de toute la zone étudiée. Morphologiquement il est caractérisé comme suit (voir figure 4.12) :

- La largeur est moyenne est quasi uniforme sur toute la zone. Elle varie de 200 à 300 mètres;
- La profondeur est très faible sur la moitié amont du point d'observation#23 et moyenne dans la partie située à son aval;
- La sinuosité la plus faible de tout le tronçon étudié de la rivière Saint-François est observée dans cette zone. En effet, elle demeure inférieure à 0,34 sur la majorité de cette zone;
- Absence de grandes îles, petites îles et toutes sortes d'obstacles à l'écoulement.

Pour les trois images étudiées, nous remarquons encore une fois le même phénomène (figure 4.13):

- Partie amont avec une très faible rétrodiffusion, correspondant à l'eau libre;
- Partie avale avec une rétrodiffusion moyenne : couvert complet de glace thermique;
- Partie de transition entre les deux parties précitées caractérisée par une forte rétrodiffusion;
- Du 6 janvier au 5 mars, le front de glace se déplace progressivement vers l'amont.

Malheureusement, nous n'avons aucune photo du couvert de glace pour ce point d'observation. Cependant, puisque la largeur et la sinuosité sont uniformes, tout porte à croire que c'est la profondeur qui explique la distribution spatiale du couvert de glace. En effet, la zone amont au point d'observation #23 est de faible profondeur alors qu'à son aval la profondeur est moyenne. Puisque le débit d'eau est pareil donc forcément, la vitesse d'écoulement varie de forte dans la partie amont à moyenne dans la partie aval. L'eau libre est maintenue dans la zone de fortes vitesses alors que la glace se forme lorsque la vitesse est moins importante. En plus, les données historiques donnent une plus forte probabilité de présence de couvert complet (77 % à 100 %) en aval du point #23 qu'à son amont (55 % à 77 %) (annexe-C, figure DM0). Les hypothèses suivantes sont émises pour expliquer la forte rétrodiffusion dans la zone de transition :

- Des fragments de glace thermique sont amenés par le courant et forment un couvert de glace agglomérée une fois qu'ils se heurtent au couvert déjà formé;

- L'eau libre transporte du frasil qui se dépose en dessous du couvert de glace thermique;
- L'eau libre transporte des « pancakes » qui sont freinés par le couvert présent sur place et qui se consolident pour former une extension au couvert existant, mais de nature différente.

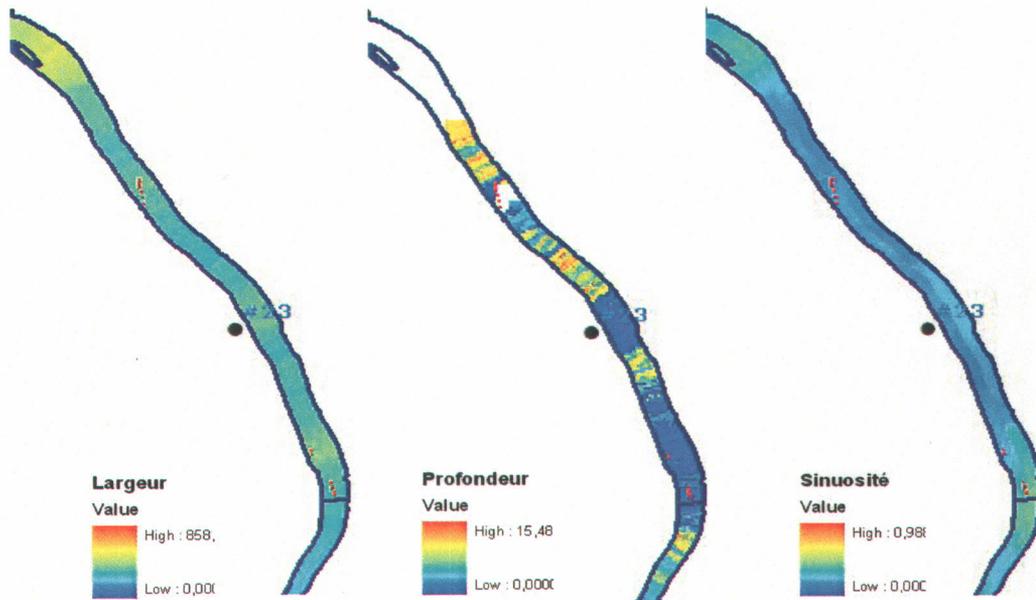
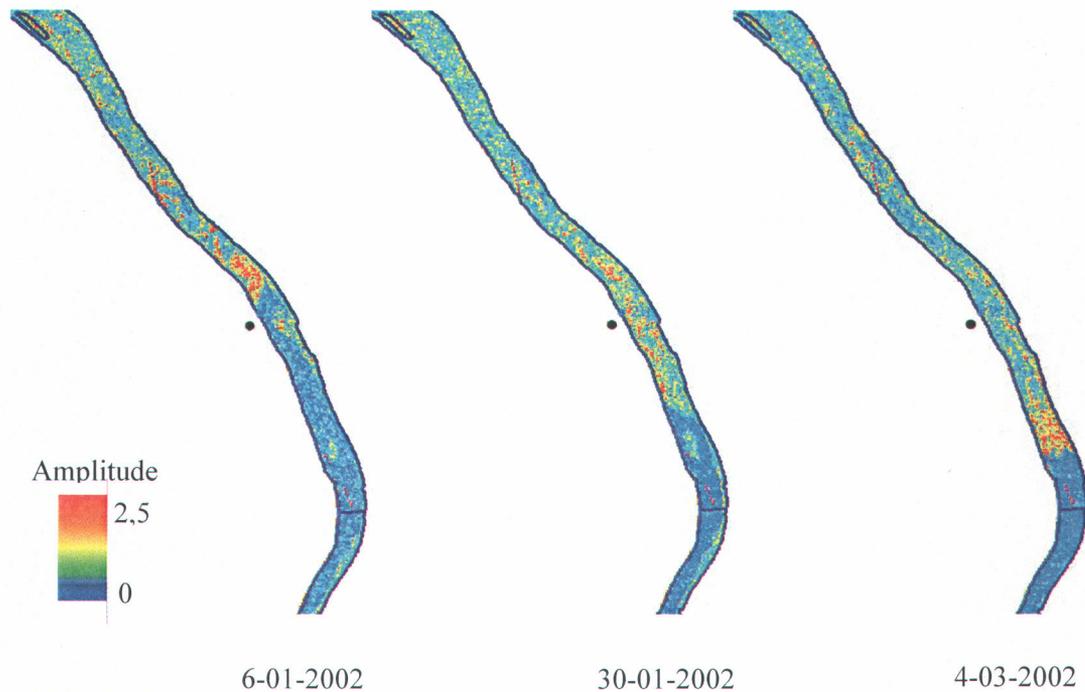


Figure 4.12 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone du point #23.



**Figure 4.13 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone du point #23.**

#### **4.1.6 Zone d'Ulverton**

Morphologiquement cette zone est caractérisée comme suit (figure 4.14) :

- ❑ La largeur est faible sur toute la zone. Elle varie de 100 à 200 mètres avec une valeur minimale de seulement 80 mètres;
- ❑ La profondeur est très faible (<2 mètres) sur la majorité de cette zone. Cependant dans la partie la moins large la profondeur est importante (entre 3 et 5 mètres);
- ❑ Zone sous forme de méandres, la sinuosité est surtout moyenne sauf dans le dernier méandre elle est plutôt forte;
- ❑ Présence de deux grandes îles, cependant elles ne sont pas situées directement au milieu de la rivière;
- ❑ Présence d'une zone de rapide assez longue, rapide d'Ulverton.

Pour les trois images étudiées (figure 4.15), nous remarquons encore une fois le même phénomène:

- ❑ Partie des rapides avec une très faible rétrodiffusion;
- ❑ Partie où la largeur est minimale et la partie juste à son amont avec une forte rétrodiffusion;
- ❑ Partie juxtaposant les îles avec une rétrodiffusion moyenne, (sauf pour l'image du 4 mars 2002 où il y avait de l'eau libre).

Nous avons déjà vu dans les autres zones étudiées que les rapides favorisent un écoulement à l'eau libre. Cette tendance se maintient puisque pour les trois images RADARSAT nous remarquons de l'eau libre dans cette zone. Nous remarquons toutefois un nouveau phénomène : dans la partie la plus étroite de cette zone et un peu en son aval, la rétrodiffusion est forte. Puisque la sinuosité dans cette partie est moyenne, il nous reste la profondeur et la largeur pour expliquer ce phénomène. En fait, dans cette partie la largeur est trop faible et la profondeur est assez grande pour permettre à l'écoulement de se poursuivre. Nous avançons comme hypothèse que lorsque le couvert de glace se trouve dans une zone d'obstruction naturelle, il est alors freiné et s'accumule, ce qui conduit à une rugosité importante entre la surface eau/glace d'où la forte rétrodiffusion. Pour les alentours des grandes îles, nous remarquons que la tendance se maintient pour la rétrodiffusion moyenne, une forte probabilité que le couvert soit complet. Les données terrain observées au point #22 montrent de l'eau libre pour les trois images (Annexe A-6), une présence de fragments flottants de glace thermique en amont du point #22 le 6 janvier (Annexe A-6, figure 22.A). La glace thermique a été aussi observée sur les rives.

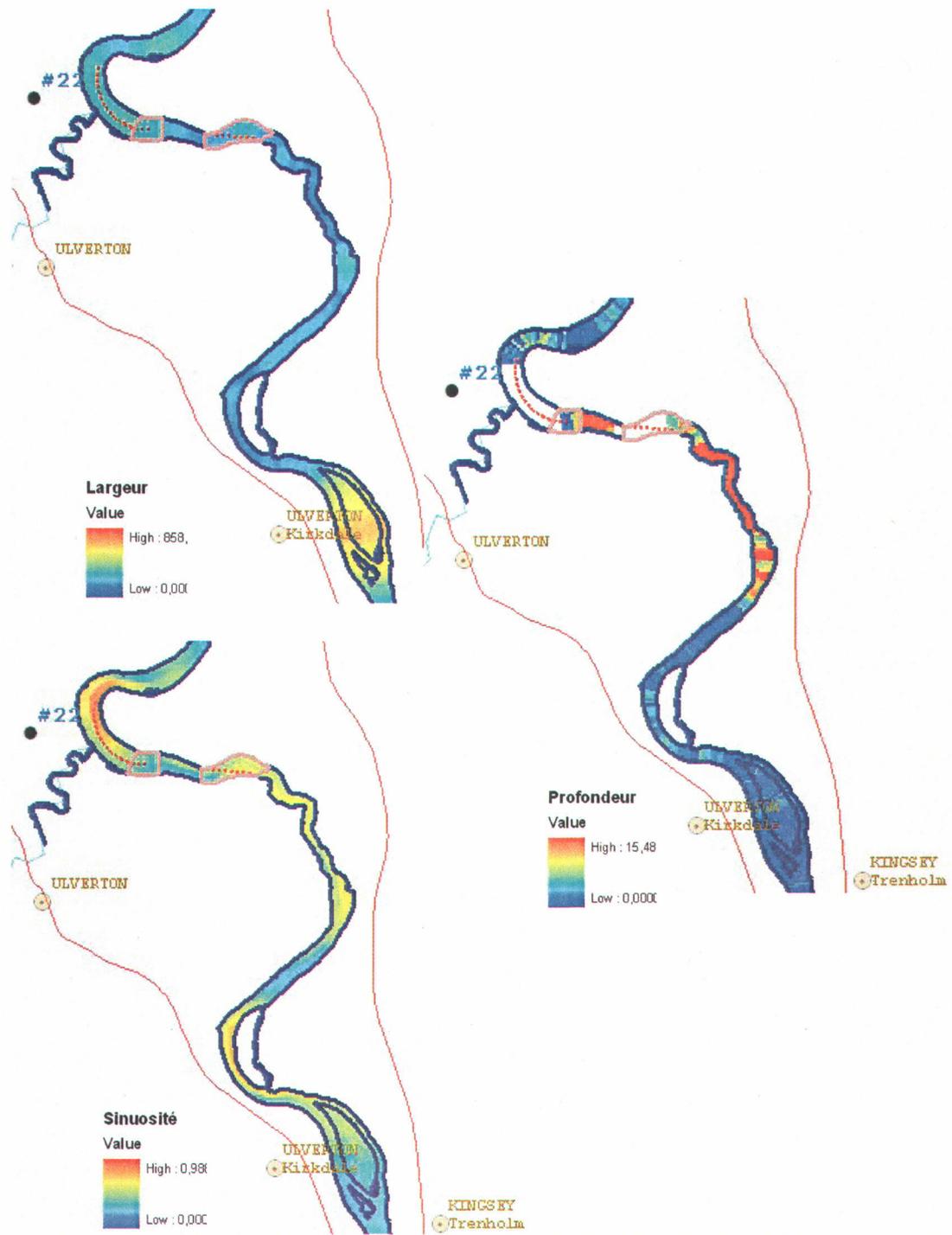


Figure 4.14 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone d'Ulverton.

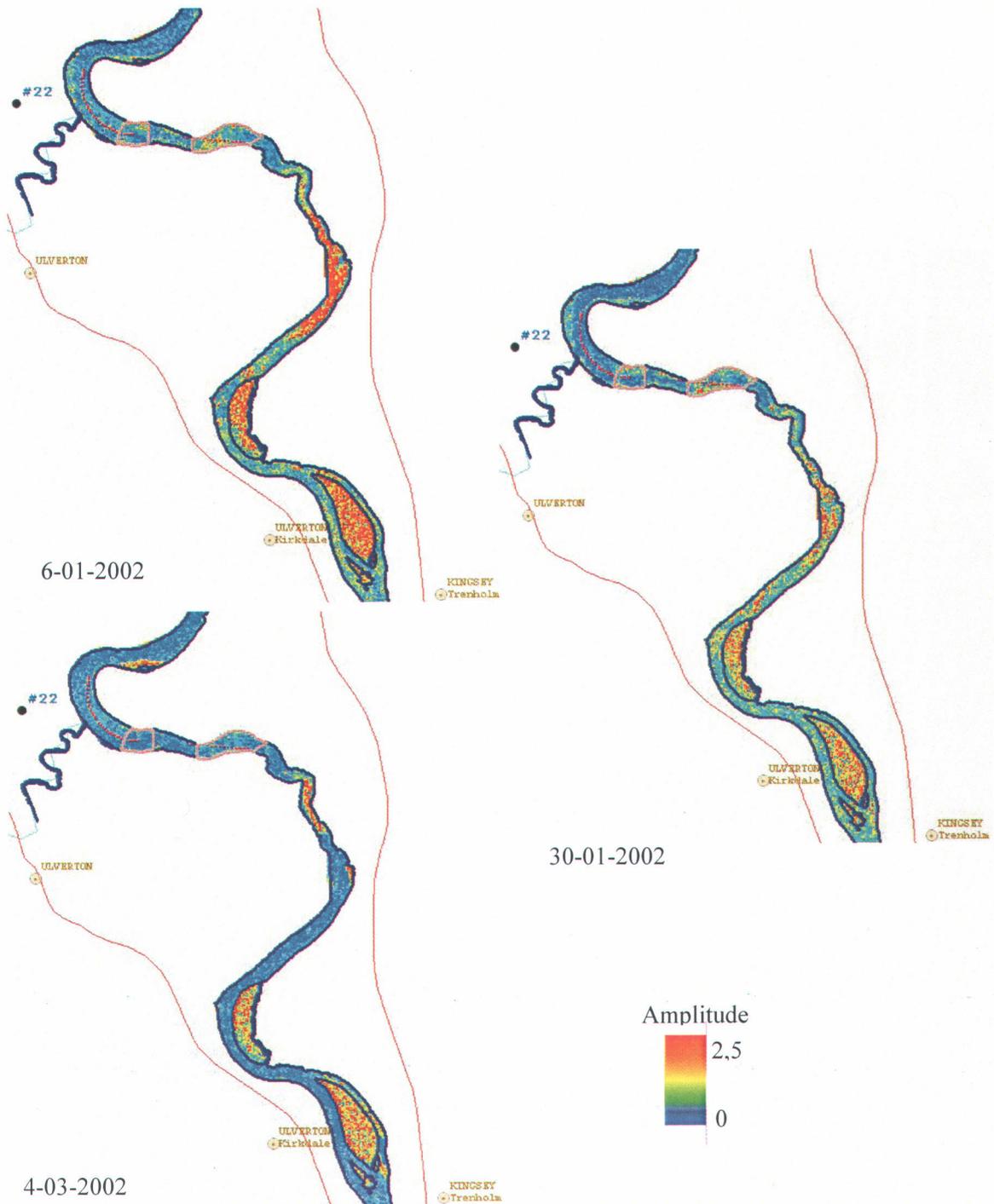


Figure 4.15 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone d'Ulverton.

#### **4.1.7 Zone des points #13 et #20**

Les caractéristiques morphologiques de cette zone sont les suivantes (figure 4.16) :

- ❑ La largeur varie de moyenne à faible sur toute la zone. Elle varie de 150 à 250 mètres avec une zone d'engorgement dont la largeur est de seulement 80 mètres;
- ❑ La profondeur est très faible (<2 mètres) sur la majorité de cette zone. Cependant dans la partie la moins large la profondeur est importante (entre 3 et 5 mètres);
- ❑ La sinuosité est faible sur toute la zone sauf dans la zone de très faible largeur elle est moyenne;
- ❑ Présence de nombreuses petites îles éparpillées sur toute la zone avec un agglomérat important de petites îles dans la partie aval au point #13;
- ❑ Présence d'un pont de chemin de fer en aval du point #20.

Pour les trois images étudiées (figure 4.17), nous remarquons ce qui suit:

- ❑ Pour l'image du 4 mars, l'eau libre est prédominante sur toute la zone;
- ❑ Pour les images du 6 et 30 janvier, la zone d'engorgement présente une forte rétrodiffusion, surtout le 6 janvier;
- ❑ Dans la partie correspondante à l'agglomérat des petites îles dans la partie avale, le couvert de glace est complet et la rétrodiffusion est moyenne;
- ❑ Pour les images du 6 et 30 janvier, un chenal d'eau libre est observé entre la zone d'engorgement et le point d'observation #13.

Nous avons déjà avancé dans le cas précédent l'hypothèse que lorsque la largeur est très faible, et que la profondeur est importante, une zone d'obstacle pour le couvert de glace se forme en surface. En plus de l'effet de la faible largeur, la forte sinuosité contribue aussi à ralentir le transport en surface de la glace. Cette tendance semble se confirmer dans cette zone. En fait, dans l'image du 6 janvier 2002 nous remarquons une très forte rétrodiffusion dans la zone d'engorgement. Dans la zone de l'agglomérat des petites îles, nous remarquons la présence d'un couvert complet de glace. Cependant, à la différence du couvert que nous avons constaté aux alentours des grandes îles, celui-ci présente une rétrodiffusion plus importante. Toutefois, celle-ci demeure moyenne ce qui nous amène à penser que les zones des petites îles constituent aussi une zone d'obstacle ou d'obstruction du couvert de glace. Les données historiques pour cette zone montrent que la zone d'engorgement présente une forte probabilité de présence de glace fracturée

et/ou d'embâcle (annexe C, figure DM4 et DM6). Les photos terrain prises aux points #13 et #20 confirment le patron observé d'eau libre et de couvert de glace à ces endroits (annexe A-7).

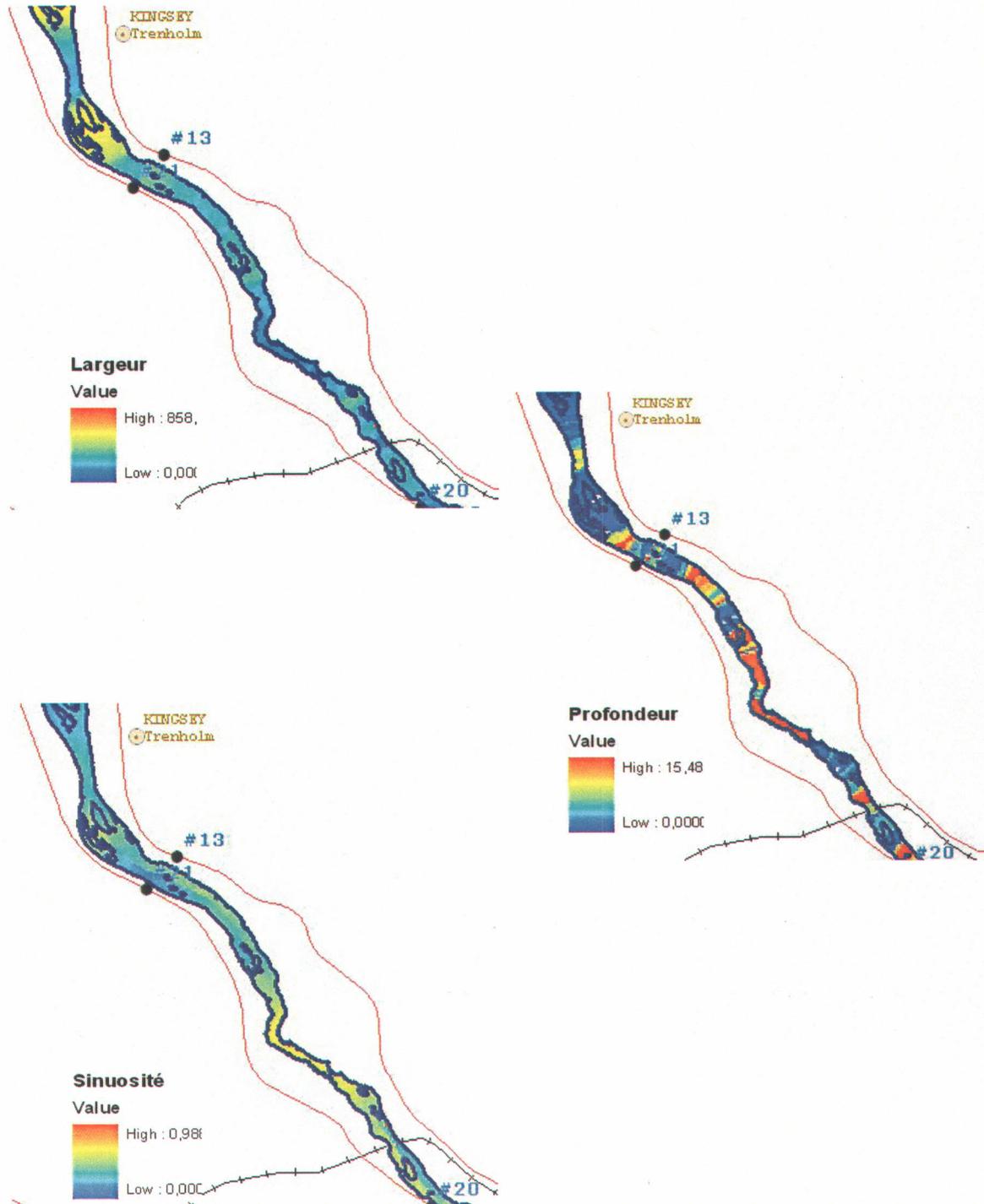


Figure 4.16 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone des points 13 et 20.

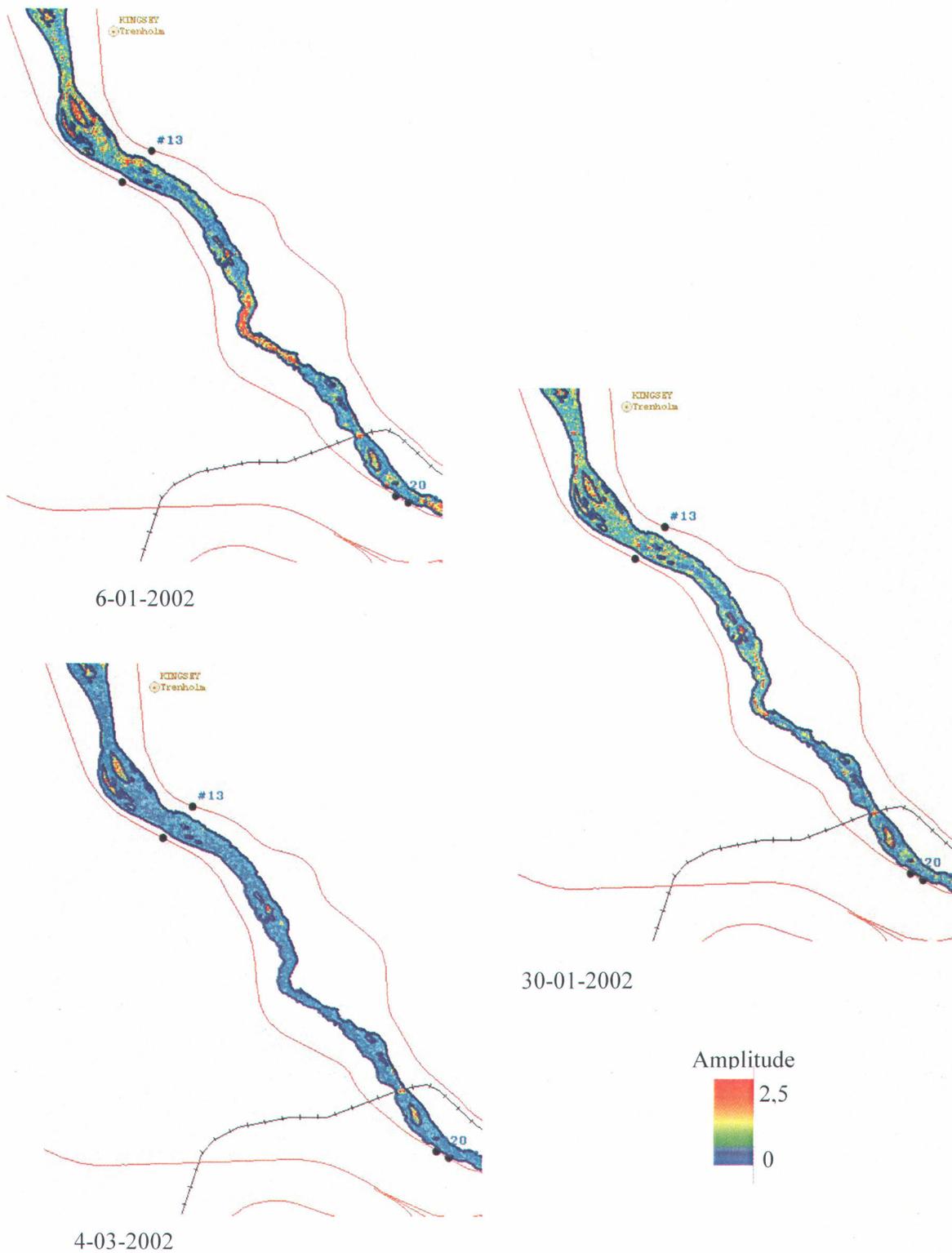


Figure 4.17 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone des points 13 et 20.

#### 4.1.8 Zone de Richmond

Les caractéristiques morphologiques de cette zone sont les suivantes (figure 4.18) :

- ❑ La largeur est moyenne sur toute la zone. Elle varie de 150 à 250 mètres avec une zone d'engorgement dont la largeur est de seulement 80 mètres;
- ❑ La profondeur est très faible (<2 mètres) sur la majorité de cette zone. Cependant dans la partie la moins large la profondeur est importante (entre 3 et 5 mètres);
- ❑ La sinuosité est faible sur toute la zone de la ville de Richmond et en amont;
- ❑ Présence de nombreuses petites îles éparpillées surtout dans la partie vis-à-vis de la ville de Richmond;
- ❑ Présence de deux ponts.

Pour les trois images étudiées (figure 4.19), nous avons remarqué ce qui suit (annexe A-8) :

- ❑ Sur les images du 30 janvier et du 4 mars, l'eau libre est prédominante sur toute la zone, avec présence de glace de rive thermique le 30 janvier au point #19;
- ❑ Pour l'image du 6 janvier, il y a de l'eau libre en amont de Richmond et à son aval après le point #20, cependant dans la zone des petites îles et aussi dans la partie la moins large il y a un couvert de glace avec une forte rétrodiffusion;
- ❑ Dans la partie correspondante à l'absence de données de profondeur, nous remarquons que la rétrodiffusion est plus grande que celle caractérisant l'eau libre pour les images du 30 janvier et du 4 mars, pourtant en amont et en aval de cette zone l'eau est libre;
- ❑ La glace observée en amont du pont de Richmond (point #17) le 6 janvier, ne correspond pas à une glace thermique parfaite, elle avait plutôt l'air soit de radeaux de glace ou de glace thermique avec de la glace secondaire sous forme de frasil-slush. Elle correspondait à une rétrodiffusion entre moyenne à forte sur l'image;
- ❑ Le 6 janvier nous avons observé une glace agglomérée vis-à-vis du point d'observation #18;
- ❑ Le 5 mars nous avons observé la présence de radeaux de glace vis-à-vis du même point, et le 30 janvier du frasil a été observé dans cette même région.

Nous avons déjà vu dans les deux cas précédents que lorsque la largeur est très faible, et que la profondeur est importante, une zone d'obstacle pour le couvert de glace se forme en surface. Cela se confirme encore une fois dans l'image du 6 janvier 2002 où nous remarquons une très forte

rétrodiffusion dans la zone étroite juste en aval de la ville de Richmond. En effet, durant cette même année et lors de la débâcle printanière, un embâcle s'est formé dans cette partie et a causé une inondation coupant du coup le chemin de fer et la route principale. Nous remarquons aussi dans la zone des petites îles que la rétrodiffusion est forte, bien qu'en amont et en aval de cette zone l'eau est libre. Le nouveau type de glace que nous avons observé le 6 janvier en amont et en aval du pont Richmond nous rend l'interprétation un peu plus difficile. En fait, ce couvert observé de glace secondaire est-il seul responsable de la forte rétrodiffusion observée en aval de Richmond et en amont du point #18? En d'autres termes, y a-t-il ou pas une accumulation de glace agglomérée donnant risque à la formation d'un embâcle? La réponse vient du type de glace que nous avons observée en aval de la zone d'engorgement. En fait, la figure 18amont-A (annexe A-8) nous montre qu'il y avait bel et bien de la glace agglomérée vis-à-vis du point #18. Le point #18 est plus proche à la zone d'engorgement que le pont de la ville de Richmond. Les données historiques viennent reconforter cette thèse puisqu'il y avait une forte probabilité de présence de glace fracturée sans mouvement à cet endroit (annexe C, figure DM4).

Nous retenons de cette analyse les observations suivantes :

- Pour les images du 30 janvier et du 4 mars, les zones de très faible profondeur en amont de la ville de Richmond, sont des zones de production de frasil. En fait, pour ces deux dates la rétrodiffusion de ces parties est supérieure à celle de l'eau libre qui est prédominante, et nous avons observé du frasil dans le point #18 situé en aval;
- Le frasil produit, aide à former un couvert de glace secondaire frasil-slush que nous avons observé le 6 janvier au pont de Richmond. Ce couvert correspond à une rétrodiffusion relativement élevée par rapport aux autres couverts de glace thermique observés jusqu'à présent;
- La présence des petites îles et des ponts favorise la formation d'une zone d'obstacles et favorise l'agglomération du couvert de glace ce qui se traduit sur les images par une forte rétrodiffusion;
- La zone d'engorgement favorise l'agglomération du couvert de glace.

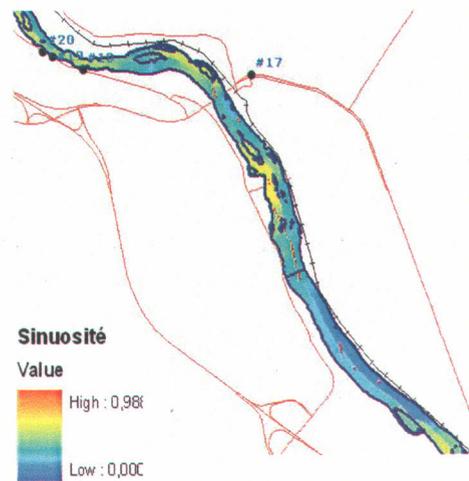
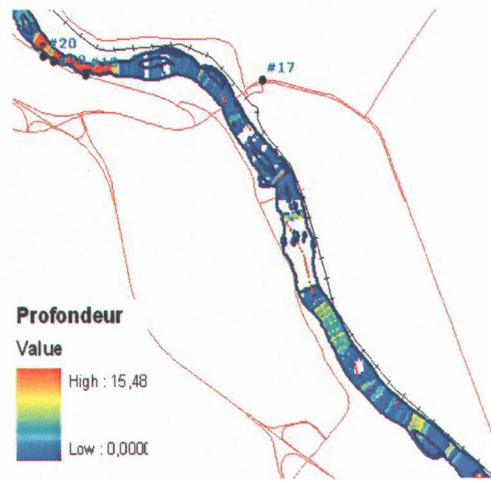
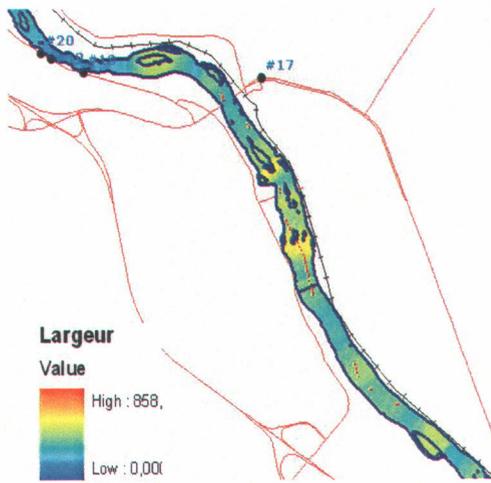


Figure 4.18 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de Richmond.

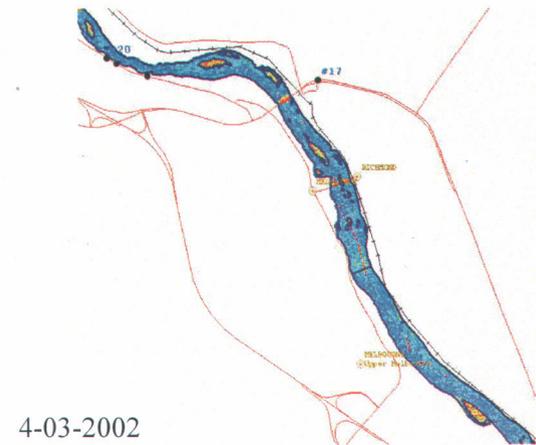
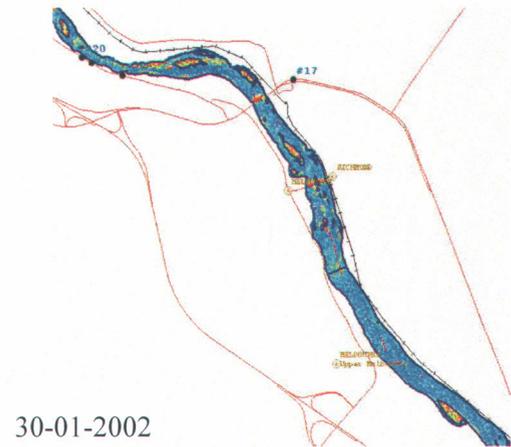
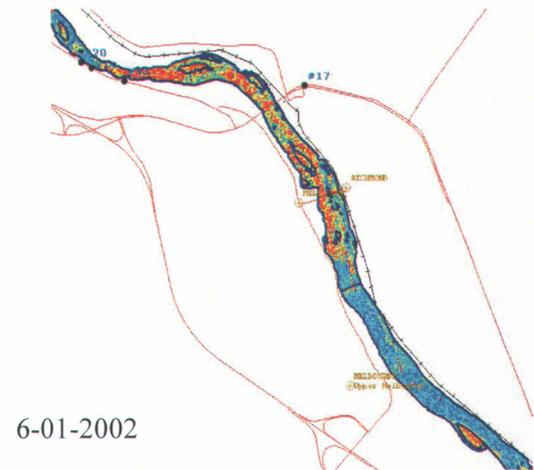


Figure 4.19 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de Richmond.

#### **4.1.9 Zone du point d'observation #15 et zone de Windsor**

Les traits morphologiques principaux de la zone du point d'observation #15 sont comme suit (figure 4.20) :

- ❑ La largeur est faible sur toute la zone, elle varie de 100 à 200 mètres;
- ❑ La sinuosité varie de faible à moyenne; sauf dans la partie entre les points d'observations #14 et #15 où elle est relativement forte;
- ❑ Présence entre les points d'observation #14 et #15 d'une sorte de coude avec une île principale à son centre et de nombreuses petites îles;
- ❑ Juste en amont du point d'observation #15, il y a un ensemble de petites îles.

Pour les trois images (figure 4.21) l'eau libre est prédominante (annexes A-9 et A-10). Cependant, pour l'image du 6 janvier un couvert de glace est observé dans la zone du « coude ». Les effets de la forte sinuosité et de la grande profondeur combinés à celui de la présence des petites îles font en sorte que cette zone obstrue le transport en surface du couvert de glace. Les données historiques montrent d'importantes probabilités de présence de glace agglomérée dans la partie en coude (annexe C, figure DM4).

La zone de la ville de Windsor est caractérisée par de faibles profondeurs, largeurs et sinuosités et par la présence de quelques îles moyennes (figure 4.22). Sur les trois images RADARSAT étudiées, l'eau est libre en aval de la ville de Windsor (figure 4.23). Cependant en amont de cette ville il y a une partie homogène de rétrodiffusion moyenne et qui correspond à la partie la plus profonde de cette zone. Bien que nous n'ayons aucune photo de cette zone, il s'agit vraisemblablement de glace thermique. À partir de photos que nous avons prises à partir du pont Windsor, nous avons observé la présence d'une feuille typique de glace thermique. Cette feuille est située juste en amont du pont sur la rive Sud (annexe A-10). À partir de la photo prise en absence de glace, nous remarquons la présence d'un amas de rochers qui fait en sorte que cette partie soit une zone morte pour l'écoulement.

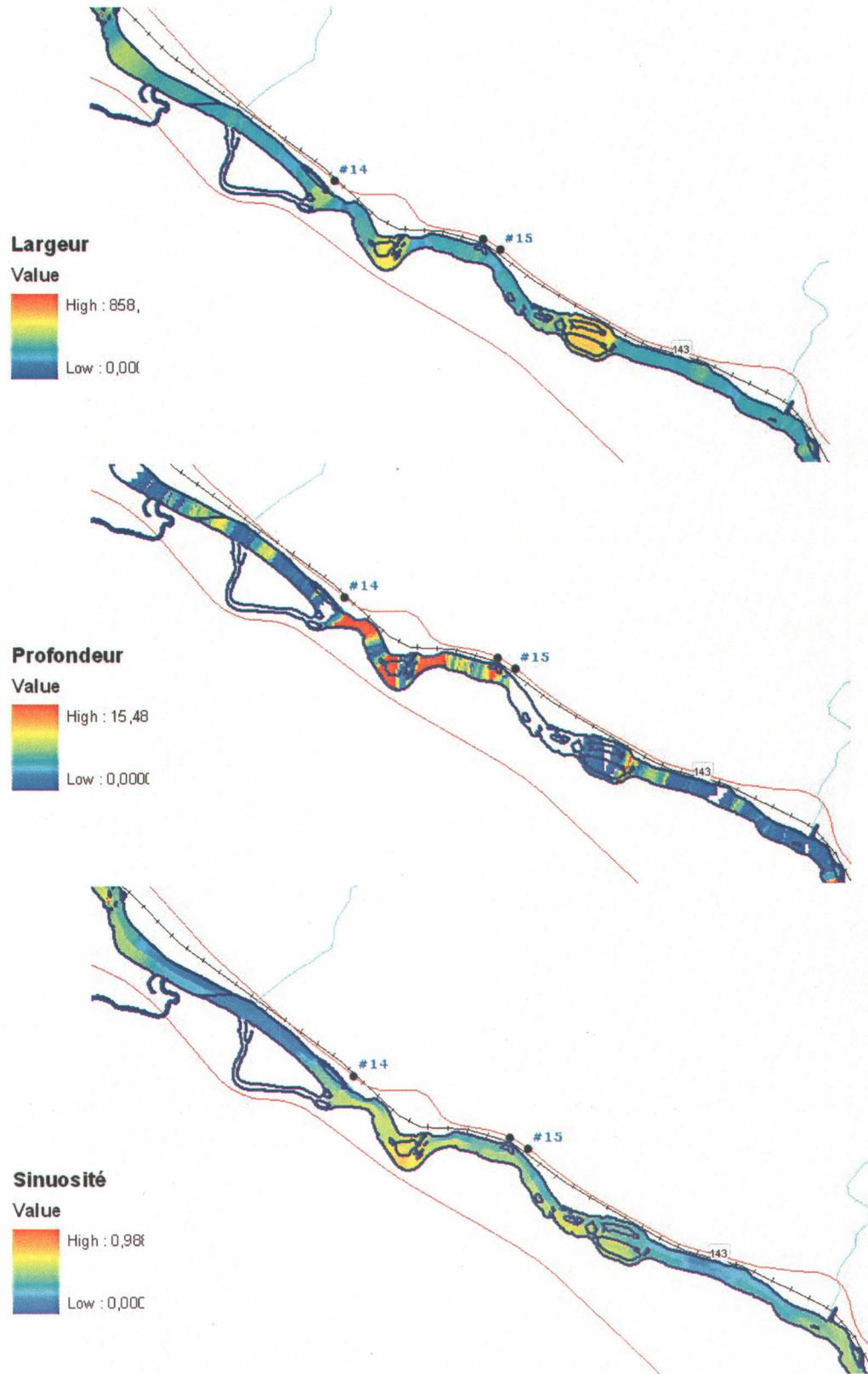


Figure 4.20 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone du point #15.

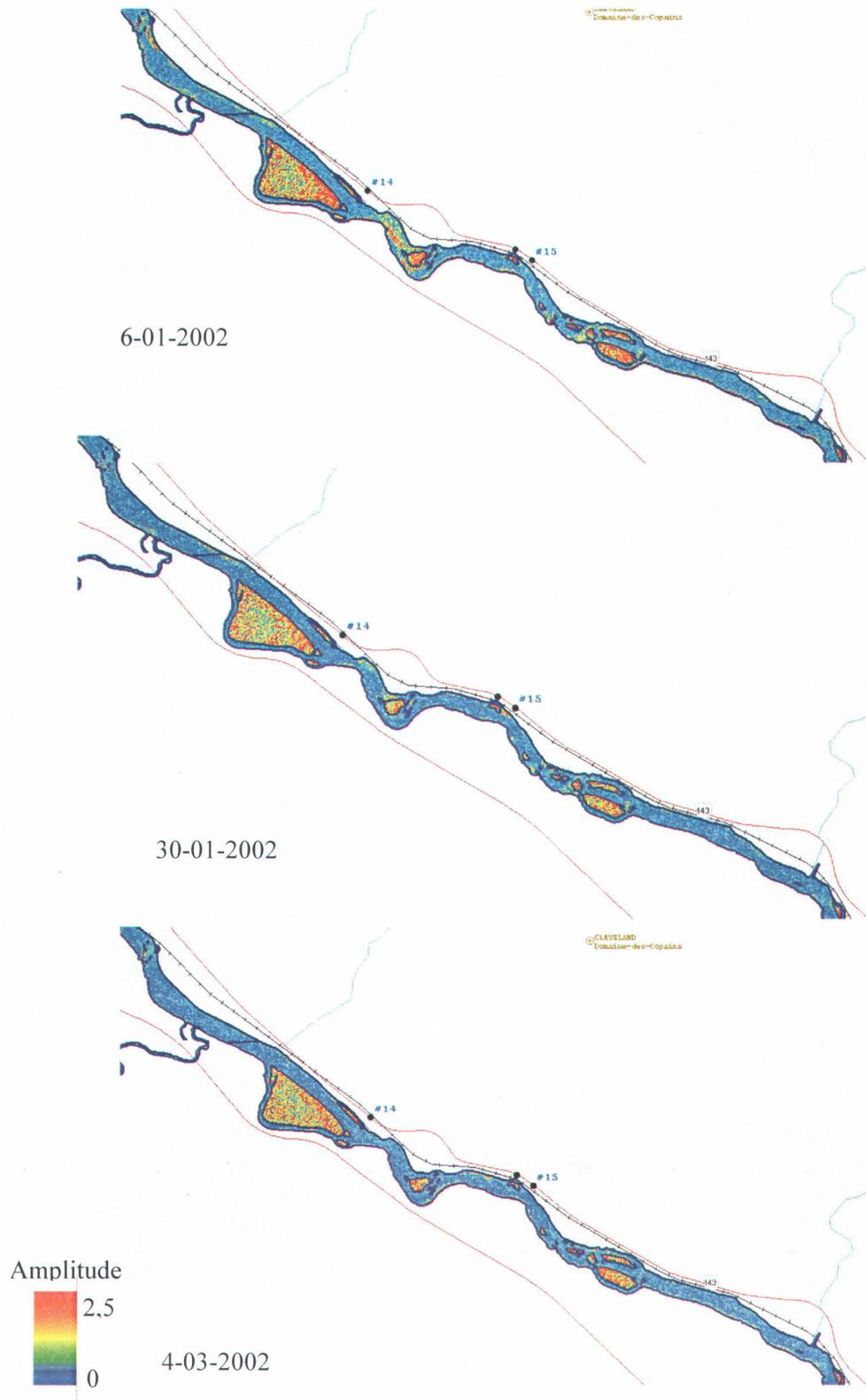


Figure 4.21 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone du point #15.

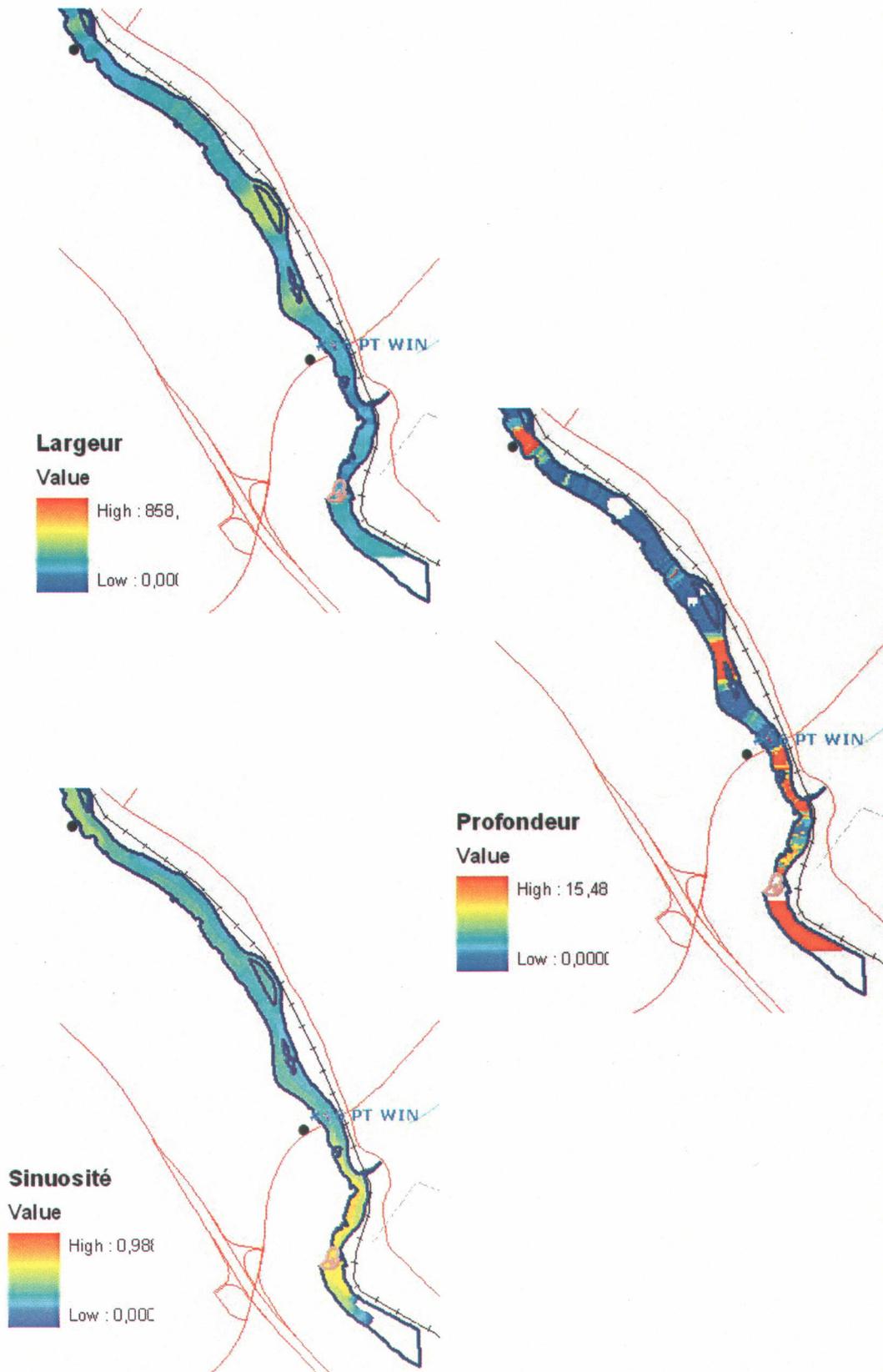


Figure 4.22 : Largeur, sinuosité et profondeur de la zone de Windsor.

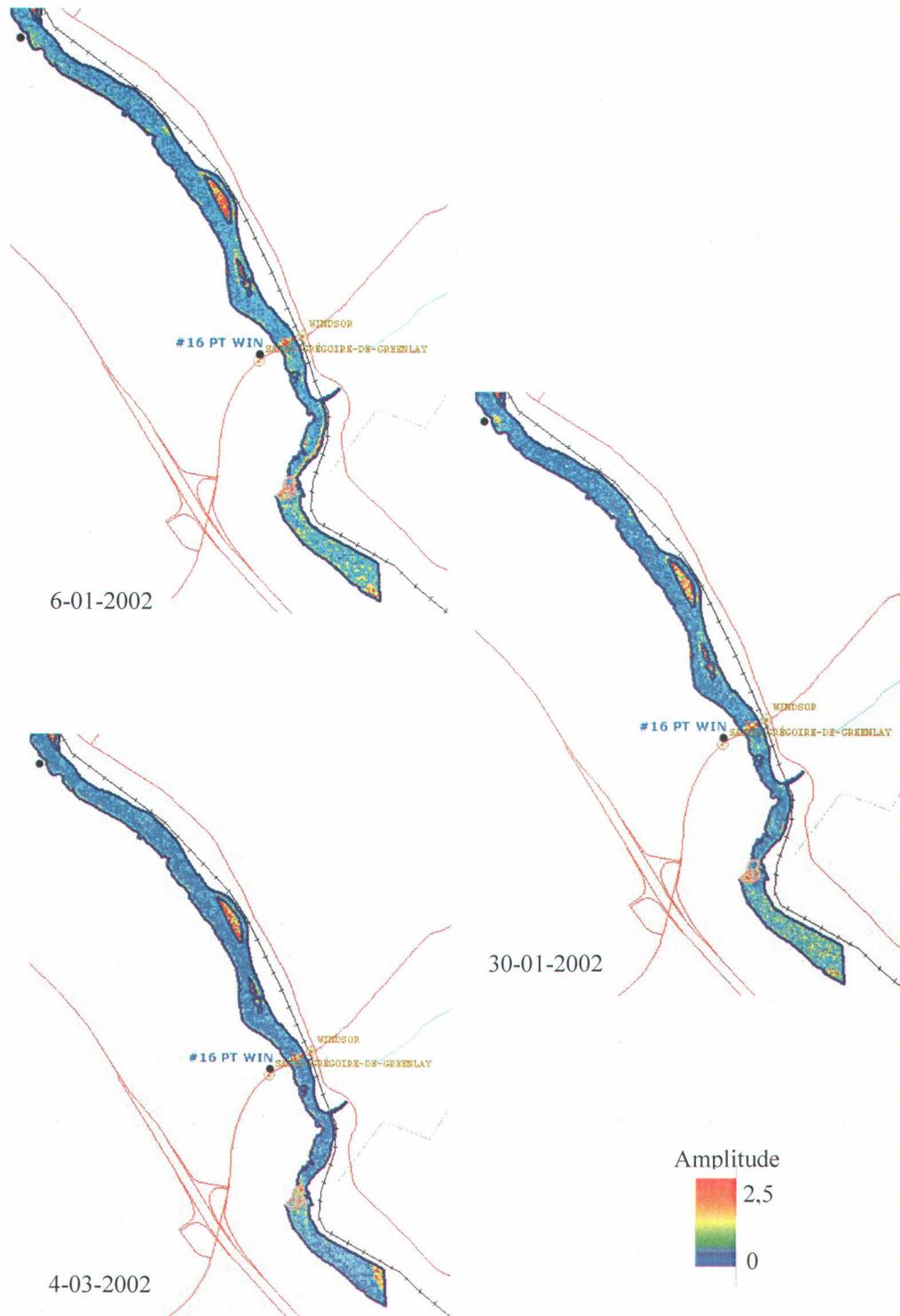


Figure 4.23 : Images RADARSAT du 6 et 30 janvier 2002 et du 4 mars 2002 sur la zone de Windsor.

## 4.2 Analyse polarimétrique

Nous avons mentionné dans la présentation de l'approche de l'analyse qualitative le fait que nous avons utilisé une image polarimétrique CV-580. L'objectif primordial de l'analyse de cette image est de pouvoir confirmer ou non le rôle de la diffusion de surface comme mécanisme principal de diffusion. En fait, dans la partie précédente de l'analyse qualitative, nous avons supposé que le fort contraste diélectrique à l'interface couvert de glace / eau est la source principale de signal rétrodiffusé. Bien que l'image CV-580 ne soit pas de la même année que les images utilisées en haut et qu'elle ne couvre que les sous-zones de l'aéroport et en « U », nous l'avons utilisé pour avoir une idée générale des phénomènes physiques en cause. La figure 4.24 présente l'image CV-580 du 19 février 2003 et les polygones sur lesquels nous avons extrait les signatures polarimétriques et effectué la décomposition de Cloude et Pottier (1998).

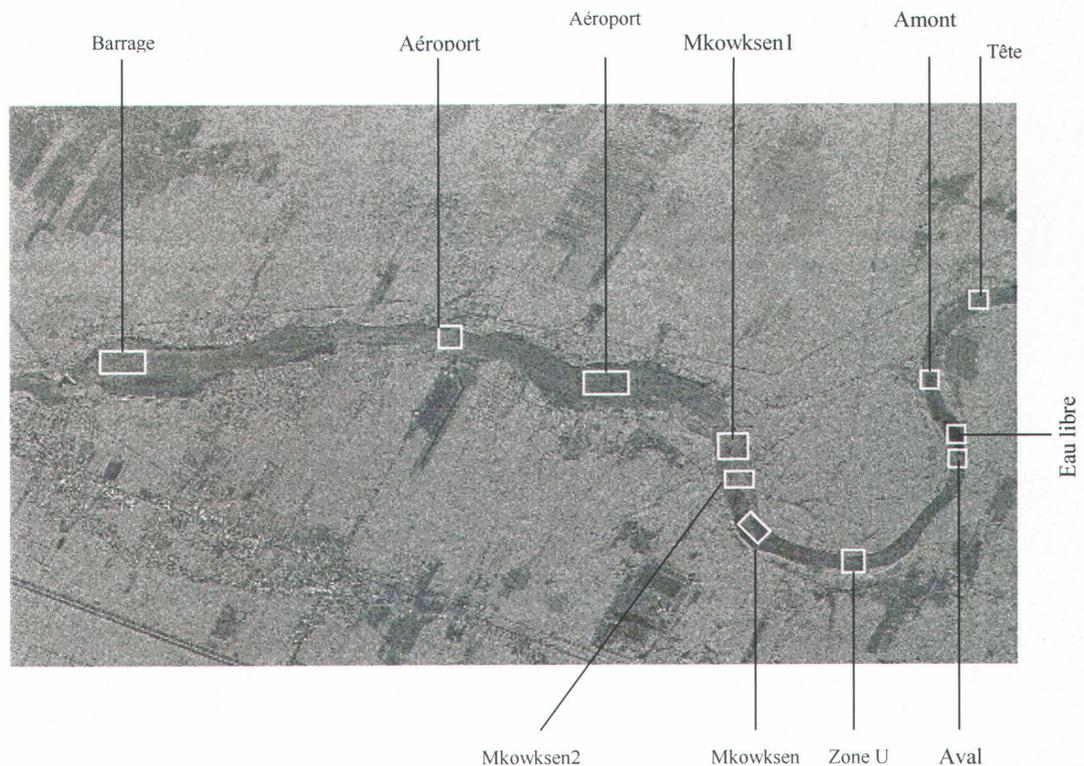
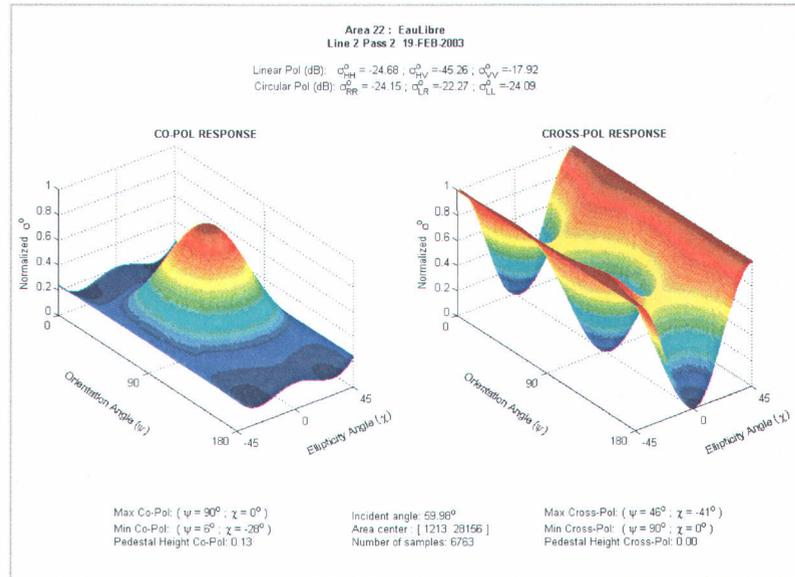
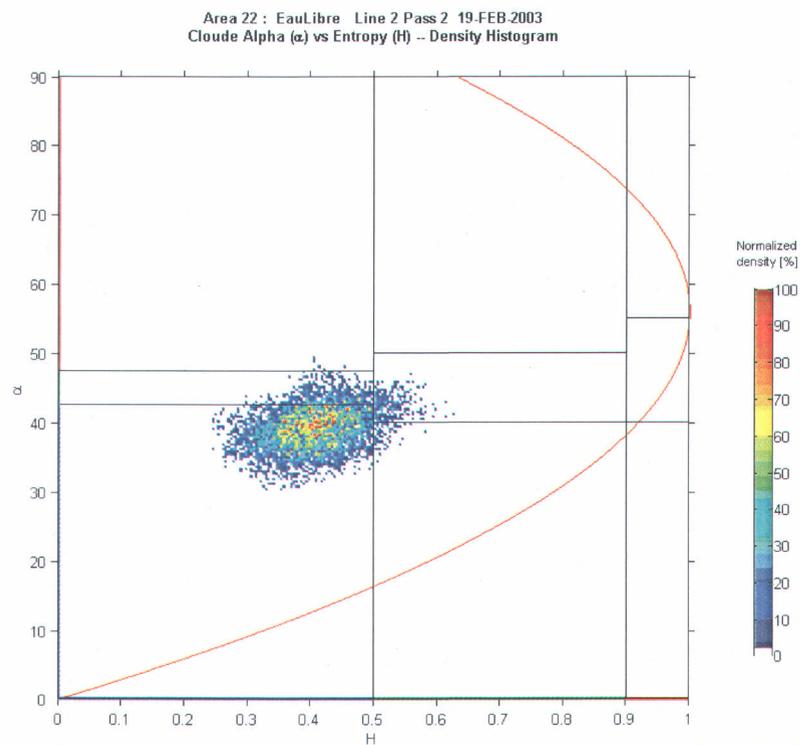


Figure 4.24 : Les emplacements et les noms des polygones utilisés dans l'analyse polarimétrique sur l'image CV-580.

Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus pour cette analyse, l'annexe B contient toutes les figures et tableaux obtenus de l'analyse polarimétrique. Nous avons gardé deux exemples de résultats qui sont présentés aux figures 4.25 et 4.26.



**Figure 4.25 : Signature polarimétrique obtenue pour le polygone « Eau libre ».**



**Figure 4.26 : Décomposition de Cloude et Pottier obtenue pour le polygone « Eau libre ».**

**Tableau 4.1 : Synthèse des résultats de la décomposition de Cloude et Pottier**

<b>Nom du polygone</b>	<b>Entropie</b>	<b>Anisotropie</b>	<b>Angle alpha</b>	<b>Angle beta</b>
Barrage	0.51	0.95	28.53	1
Aéroport1	0.54	0.97	33.11	0.64
Aéroport2	0.53	0.97	29.74	0.92
Mkowksen1	0.55	0.95	31.76	1.07
Mkowksen2	0.59	0.94	34.14	1.18
Mkowksen amont	0.61	0.97	35.91	0.71
Zone U	0.58	0.97	33.26	1.01
Aval eau libre	0.55	0.93	30.78	1.69
Eau libre	0.41	0.96	38.93	0.5
Amont eau libre	0.57	0.96	31.75	1.01
Tête	0.53	0.96	27.46	0.98

Nous observons à partir de la décomposition de Cloude et Pottier (tableau 5.1) que les pixels des polygones analysés se situent principalement dans les deux classes suivantes :

- **Classe Z6** : diffusion de surface, modérément entropique.
- **Classe Z9** : diffusion de surface faiblement entropique (par exemple diffusion de Bragg — eau et surfaces irrégulières).

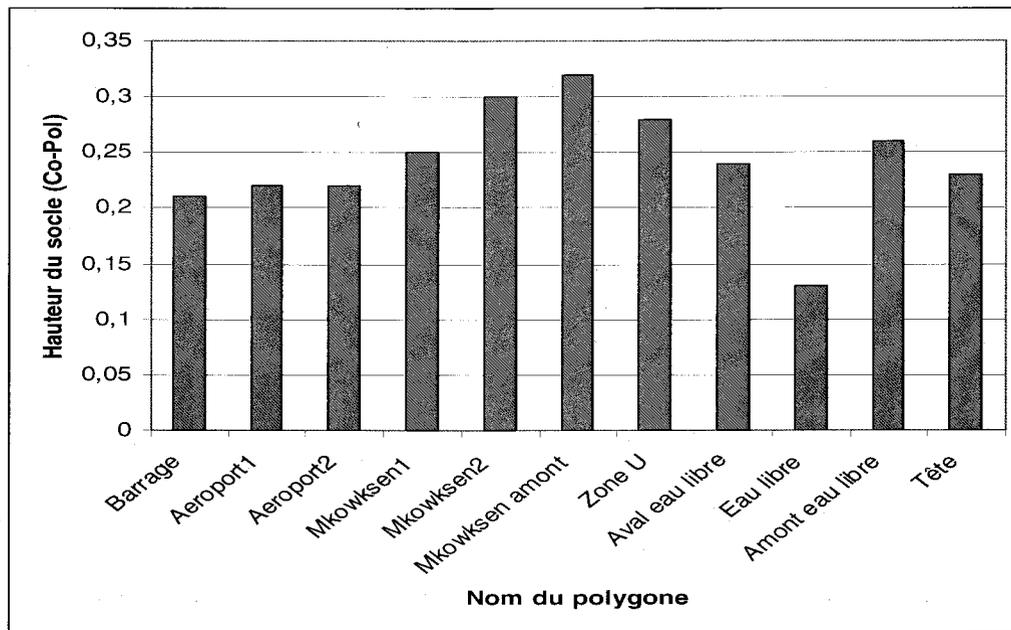
Nous remarquons aussi que quelques pixels se trouvent dans la classe **Z5** qui correspond à une diffusion de volume. En plus, mis à part le polygone « eau libre » dont l'entropie est de 0.41, tous les autres polygones ont une entropie supérieure au seuil 0.5 qui représente une entropie moyenne. Cette dernière nous fournit une information sur l'hétérogénéité du milieu analysé.

Il découle de l'analyse des signatures polarimétriques que la rétrodiffusion, dans les polygones étudiés, est causée par deux mécanismes de diffusion : de surface et de volume. La signature polarimétrique dans le cas de l'eau libre (figure 4.25), montre un maximum de polarisation dans la polarisation parallèle VV (signature de copolarisation) et un piédestal de 0,13. La faible hauteur du piédestal (socle) indique un milieu où la dépolarisation du signal radar diffusé est très faible, ce qui suggère un mécanisme de diffusion de surface dominant.

Nous avons aussi noté que la distribution des pixels dans la décomposition de Cloude et Pottier, montre que la diffusion de surface est prédominante par rapport à celle de volume. La figure 4.27 présente les hauteurs de socle de la signature polarimétrique Co-Pol des polygones analysés. Nous y observons encore une fois que l'eau libre a une faible hauteur du socle, ce qui signifie une faible dépolarisation du signal radar. Les polygones dont le signal est le plus dépolarisé sont ceux

de la zone du rapide Mkowksen ou effectivement le couvert de glace est plus susceptible de générer une diffusion de volume.

Nous concluons donc que les hypothèses que nous avons émises dans la première partie de l'analyse qualitative ne semblent pas contredire les conclusions de l'analyse polarimétrique. En fait, il est évident que le phénomène qui intervient le plus est celui de la diffusion de surface. Notre raisonnement d'interprétation des images étudiées et qui est basé sur la rugosité de l'interface « couvert de glace / eau libre » se trouve ainsi réconforté. La diffusion de volume est causée, à la hauteur des rapides Mkowksen, par la présence de glace agglomérée et du frasil. Évidemment, les résultats de l'analyse polarimétrique nous ne donnent qu'une idée sommaire de ce qui se passe, puisque seules les sous-zones de l'aéroport et en « U » ont été couvertes par l'image CV-580 du 19 février 2003.



**Figure 4.27 : Hauteur du socle des signatures polarimétriques Co-Pol.**

### 4.3 Conclusions

L'analyse qualitative a permis de confronter des images RADARSAT-1 de l'hiver 2002 avec les observations terrain, les données historiques et les données morphologiques. Les résultats obtenus ont montré que le tronçon étudié de la rivière Saint-François peut être divisé spatialement en deux parties distinctes. La première partie est localisée en aval du point d'observation #12, tandis que la deuxième partie est située à son amont (figure 4.1).

L'analyse « visuelle » de la première partie indique que ses caractéristiques morphologiques sont les suivantes :

- Absence des agglomérats formés de petites îles;
- Présence de grandes îles;
- Variabilité de la largeur de la rivière qui passe de la taille moyenne à grande et augmente progressivement de 200 à 850 mètres;
- Variabilité de la profondeur de la rivière, à l'exception de la zone de l'aéroport qui demeure homogène et relativement profonde;
- Présence de zones des rapides.

À partir des observations effectuées au niveau des sous zones de l'aéroport, en « U », Tête du canard, îles Therrien et îles Brown, formant la partie aval de la rivière, nous avons tiré les conclusions suivantes :

1. Dans le réservoir du barrage Hemmings, la glace thermique forme un couvert complet dont la rétrodiffusion est moyenne (amplitudes entre 0,1 à 0,15);
2. Aux alentours des grandes îles, un couvert complet de glace thermique est souvent présent;
3. La forte sinuosité dans le « bec du canard » est probablement la cause de la présence d'eau libre dans cette région;
4. La glace agglomérée se forme en amont d'un couvert de glace thermique bien consolidé;
5. La glace agglomérée se caractérise par un coefficient de rétrodiffusion radar élevé (amplitude >0.25);

6. La glace agglomérée a été aussi observée sur les rives;
7. Les zones des rapides peuvent générer une rétrodiffusion moyenne causée par les vaguelettes d'eau libre;
8. À partir de l'image polarimétrique CV-580 étudiée, la diffusion de surface est le mécanisme de diffusion qui domine.

La deuxième partie de la rivière dite « partie amont » se caractérise généralement par la:

- Variabilité de la largeur de la section passant de la taille moyenne à très faible (250 à 80 mètres);
- Présence de nombreuses zones d'engorgement en fonction de la largeur dont la largeur peut atteindre 80 mètres;
- Présence de plusieurs zones d'agglomérats de petites îles, comme celles observées vis-à-vis de la ville de Richmond;
- Variabilité de la profondeur avec une zone de faible profondeur (< 1 mètre) dans les sous-zones de Windsor et du point #15.

À partir des observations faites sur les sous zones du point #23, d'Ulverton, points #13-20, Richmond, point #15 et Windsor, nous avons observé que :

1. Les zones d'engorgement favorisent la formation de glaces agglomérées et d'embâcles;
2. Les zones des petites îles forment une zone d'obstacle et favorisent aussi la formation de glace agglomérée;
3. Les zones de rapides peuvent être caractérisées par une rétrodiffusion moyenne à cause des vaguelettes d'eau libre, et génèrent, également, du frasil en aval.

En conclusion, les données historiques et les observations de terrain ont été d'un grand support à l'interprétation des images RADARSAT-1. Les trois images étudiées présentent le même comportement de glace de rivière. En fait, les mêmes phénomènes de glace de rivière ont été observés dans les zones identiques. La concordance avec les données historiques prouve que la morphologie de la rivière joue un rôle important dans la détermination du type de glace. Les observations faites tout au long de ce chapitre sont prises en compte lors du développement de la structure hiérarchique de la classification orientée objet.

## **5. RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE**

---

L'approche générale que nous avons adoptée pour l'analyse quantitative a été présentée dans la section du chapitre 3. Les images RADARSAT utilisées dans cette analyse sont les mêmes que lors de l'analyse qualitative : 6 janvier 2002, 30 janvier 2002 et 4 mars 2002. Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats obtenus pour cette analyse.

### **5.1 Étapes de l'analyse quantitative**

Les points suivants résument les étapes du processus suivi durant cette analyse :

1. Segmentation des images RADARSAT en objets (les détails de la segmentation sont présentés dans le chapitre 6).
2. Détermination, à l'aide des observations terrain des objets, pour lesquels nous pouvions attribuer un type de glace de rivière.
3. Regroupement des objets similaires en une classe de glace et comparaison des amplitudes du signal radar.
4. Extraction de la matrice de séparabilité des diverses classes de glace en utilisant la caractéristique des objets liée seulement à l'amplitude de l'image RADARSAT.
5. Extraction de la matrice de séparabilité des diverses classes de glace en utilisant les caractéristiques des objets liées directement à l'image RADARSAT : amplitude et texture non-directionnelle.
6. Extraction de la matrice de séparabilité des diverses classes de glace en utilisant les caractéristiques des objets liées directement à l'image RADARSAT : amplitude et texture non-directionnelle et directionnelle.
7. Extraction de la matrice de séparabilité des diverses classes de glace en utilisant (i) les meilleures caractéristiques des objets liées directement à l'image RADARSAT définies dans l'étape 6 et (ii) les paramètres morphologiques de la rivière : largeur, sinuosité, profondeur et altitude de surface.
8. Extraction de la matrice de séparabilité des diverses classes de glace en utilisant (i) les meilleures caractéristiques des objets liées directement à l'image RADARSAT définies

dans l'étape 6, (ii) les caractéristiques des objets liés aux paramètres morphologiques de la rivière (largeur, sinuosité, profondeur et altitude de surface), et (iii) les caractéristiques des objets liées à la forme des objets : asymétrie, rapport longueur/largeur, périmètre, etc.

9. Comparaison des matrices de séparabilité des étapes 4, 5, 6, 7 et 8. L'objectif de cette comparaison est de nous permettre de voir l'amélioration ou non de la séparabilité des diverses classes de glace.

Les étapes énumérées ci-dessus ont été appliquées indépendamment sur chacune des trois images utilisées, à l'exception de l'étape numéro 3 où la comparaison des amplitudes a été faite pour tous les objets des trois images.

## **5.2 Identification des objets à l'aide des observations terrain et comparaison des amplitudes**

Après la segmentation en objets (chapitre 6), la deuxième étape de préparation pour l'analyse quantitative est l'identification des objets qui présentent les diverses classes de glace. En utilisant les observations terrain présentées dans l'analyse qualitative nous avons réussi à identifier pour les images étudiées les 96 objets du tableau 5.1. La figure 5.1 présente la localisation spatiale des objets identifiés dans les images RADARSAT. Vu le nombre restreint d'objets que nous avons pu identifier, l'analyse de séparabilité est la méthode que nous avons privilégiée pour cette analyse. Cette méthode se base essentiellement sur la mesure de la distance entre les objets appartenant à diverses classes dans un espace d'attribut multidimensionnel (équation 2.41). Les distances calculées sont optimisées afin de déterminer les attributs qui offrent la meilleure séparabilité entre les classes. Il existe d'autres méthodes d'analyse statistique plus performantes. Cependant, pour pouvoir effectuer, par exemple, une analyse factorielle ou en composantes principales, il faut disposer d'au moins 200 objets. Effectivement, pour ce type d'analyse, il est considéré en général qu'avoir 50 échantillons c'est très mauvais, 100 mauvais, 200 acceptable, 300 bien, 500 très bien et 1000 échantillons comme excellent (Comrey et Lee, 1992; Tabachnick et Fidell, 1996). Dans l'annexe D, nous présentons les 96 objets identifiés dans le tableau 5.1 ainsi que les valeurs de leurs caractéristiques reliées à l'amplitude, la texture, la morphologie et la forme.

**Tableau 5.1 : Objets identifiés des images RADARSAT et leur classe de glace correspondante**

6 janvier 2002		30 janvier 2002		4 mars 2002	
id	Class	Id	Class	id	Class
96	<b>E : eau libre</b>	72	E	136	E
134	E	74	E	274	E
161	E	85	E	280	E
192	E	100	E	314	E
201	E	104	E	316	E
245	E	189	E	123	E_Frazil
253	E	199	E	144	E_Frazil
264	E	220	E	174	E_Frazil
290	E	222	E	189	E_Frazil
102	E_GL	243	E	197	E_Frazil
126	E_GL	152	E_F	222	E_Frazil
125	E_GL_GR	213	E_Griv	223	E_Frazil
141	E_GR	241	E_Grive F	128	E_nape de glace
193	E_Griv	29	GL	125	Frazil
311	E_Griv_GRiveFlottante	34	GL	105	GA
129	Embâcle	37	GL	107	GA
204	Embâcle	64	GL	110	GA
130	<b>GA : glace agglomérée</b>	73	GL	121	GA
42	<b>GL : glace Lisse</b>	88	GL	122	GA
45	GL	75	Grive	124	GA
46	GL	76	Grive	40	GL
71	GL	77	Grive	49	GL
136	GL	124	Grive	50	GL
121	GL	193	Grive	52	GL
143	<b>GR : glace rugueuse</b>	229	Grive	61	GL
162	<b>GRiv : glace de rive</b>	159	Grive F	62	GL
191	GRiv	106	Grive GR	88	GL
266	GRiv	242	Grive_Sub	153	GL
268	Griv	105	GR	162	GL
203	GRive_sub	-	-	163	GL
304	Rapide	-	-	167	GL
-	-	-	-	173	GL
-	-	-	-	175	GL
-	-	-	-	43	GL (concassée)
-	-	-	-	48	GL (concassée)
-	-	-	-	59	GL (concassée)
-	-	-	-	166	GL (sombre)
-	-	-	-	164	GL Frazil

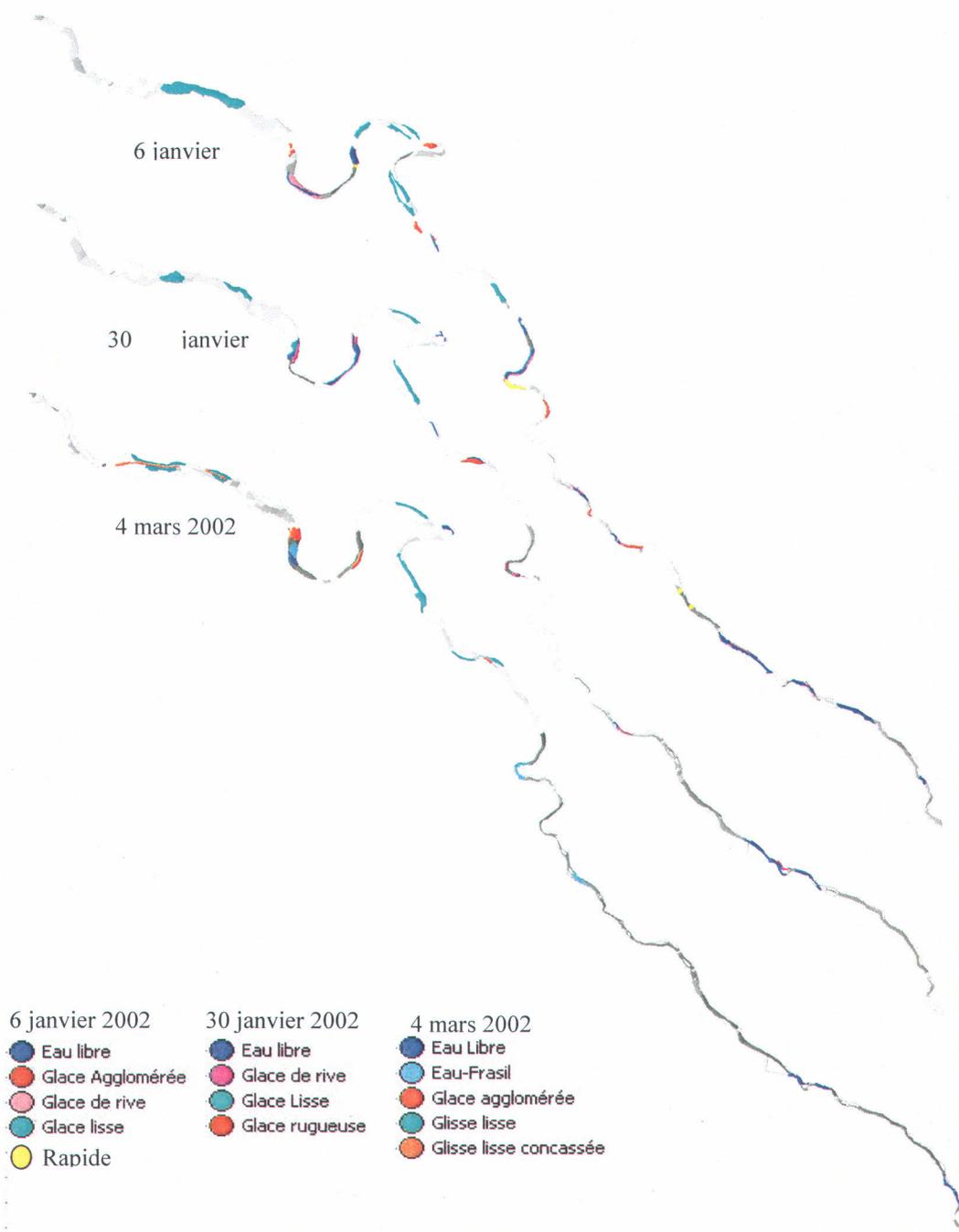


Figure 5.1 : Objets identifiés sur le site d'étude pour les images RADARSAT étudiées.

Dans le tableau 5.1, nous remarquons le nombre restreint d'objets d'une classe donnée par image. Nous avons donc regroupé tous les échantillons disponibles pour les trois dates afin d'en tirer quelques chiffres clés. En fait, la structure hiérarchique de la classification orientée objet devait

être enrichie par des seuils et des valeurs limites. Puisque la rétrodiffusion est l'information tirée directement des images RADARSAT-1, nous avons présenté à la figure 5.2 les principales classes de glace, observées sur les images étudiées, avec les seuils des valeurs d'amplitude. Nous remarquons que l'eau libre se différencie très bien par rapport aux autres classes. D'après les échantillons disponibles, la valeur d'amplitude maximale observée de l'eau libre est 0,109 avec une moyenne de 0,08. La glace lisse prend des valeurs de 0,115 jusqu'à 0,184 avec une moyenne de 0,144, encore une fois pas d'interférence avec les autres classes. Cependant, nous remarquons que pour les classes de glace agglomérée et glace rugueuse il y a un chevauchement entre 0,198 et 0,261. Il fallait donc trouver un autre paramètre pour différencier ces deux classes à l'intérieur de cette plage de valeurs.

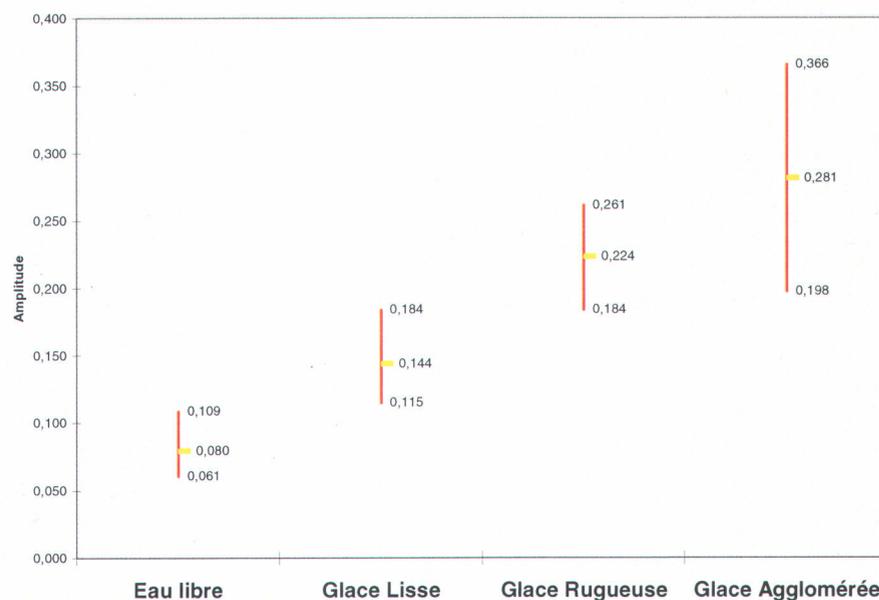
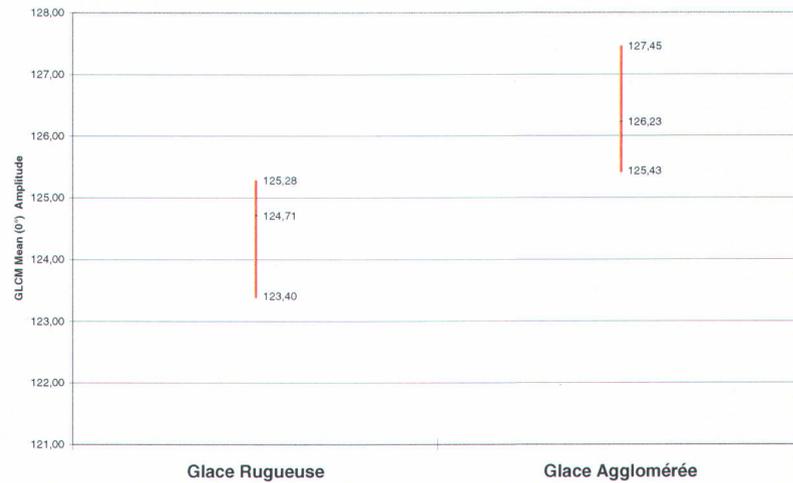


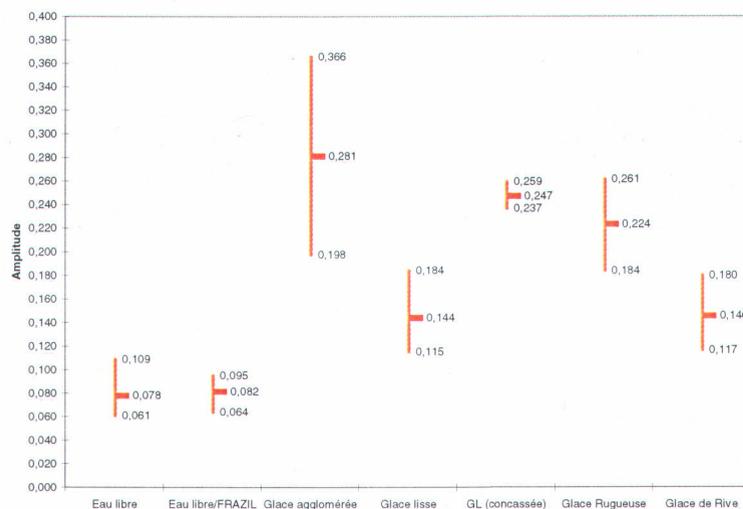
Figure 5.2 : Seuils des valeurs d'amplitudes pour les principales classes de glace.

La figure 5.3 montre qu'avec le paramètre de texture GLCM Moyenne ( $0^\circ$ ) il est possible de discriminer entre les classes GR et GA. Cependant, il faut prendre ce résultat avec beaucoup de réserve puisque dans toutes les images étudiées il n'y a que sept objets identifiés comme GA et seulement trois comme GR (tableau 5.1).



**Figure 5.3 : Différenciation entre la glace rugueuse et la glace agglomérée à l'aide du paramètre de texture GLCM Moyenne (0°).**

La figure 5.4 présente les amplitudes des classes de glace principales avec celles secondaires. En fait, nous y remarquons que la glace de rive thermique a les mêmes valeurs d'amplitude que la glace lisse, et que l'amplitude de l'eau libre avec des flocons de frasil est quasi similaire à celle de l'eau libre. La glace lisse concassée observée le 4 mars 2002 dans la zone de l'aéroport a des valeurs similaires à la glace rugueuse. Aucun paramètre de texture n'a permis de différencier la glace lisse avec la glace de rive thermique. En fait, ces deux classes sont formées du même type de glace et pour les différencier il faut absolument inclure des paramètres de morphologie comme la proximité de la rive ou la présence d'un chenal d'eau libre.



**Figure 5.4 : Amplitudes des classes de glace principales et secondaires.**

### 5.3 Résultats de l'analyse quantitative pour l'image du 6 janvier 2002

Pour cette image nous avons pu identifier les cinq classes suivantes : eau libre, glace lisse, glace de rive, glace agglomérée, zone de rapides. Cette dernière est retenue puisque nous voulions savoir s'il y a moyen de différencier la rétrodiffusion moyenne du signal dans les zones de rapides de celle caractérisant la glace thermique.

#### 5.3.1 Séparabilité en utilisant l'amplitude

Le tableau 5.2 présente le résultat de séparabilité des classes en fonction seulement de l'amplitude. Nous observons qu'à l'exception de la glace agglomérée, en général, la séparabilité entre les classes est très faible.

**Tableau 5.2 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude pour l'image du 6 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	G-lisse	G-rive	Rapide	G-Agg
Eau libre	0.000000	0.151201	0.154244	0.054565	3.549192
G-lisse	0.151201	0.000000	0.008393	0.013445	2.149745
G-rive	0.154244	0.008393	0.000000	0.053808	1.651203
Rapide	0.054565	0.013445	0.053808	0.000000	3.019810
G-Agg	3.549192	2.149745	1.651203	3.019810	0.000000

#### 5.3.2 Séparabilité en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle

Cette fois-ci en plus de l'amplitude des images RADARSAT, les douze paramètres de texture présentés dans le troisième sous chapitre du chapitre numéro 2 ont été utilisés. Toutefois, la relation spatiale entre deux pixels voisins est non-directionnelle. Le tableau 5.3 présente la matrice de séparabilité obtenue. La distance de séparation optimale (**0,25**) reste faible (figure 5.5).

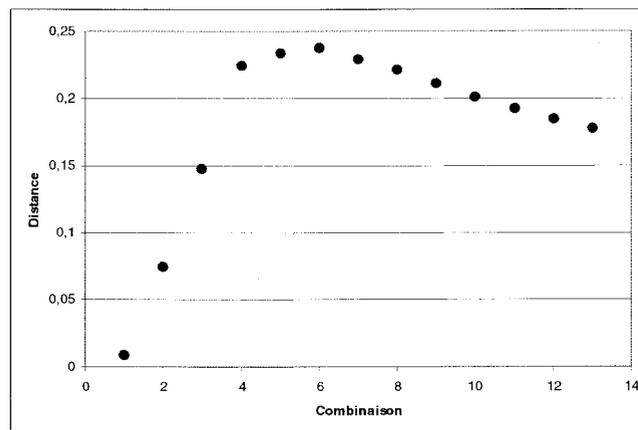
Les six paramètres qui donnent la meilleure combinaison de séparabilité sont les suivants:

- GLCM Entropy (all dir.), Amplitude
- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude

- GLCM StdDev (all dir.), Amplitude
- Mean Amplitude
- GLDV Mean (all dir.), Amplitude
- GLCM Dissimilarity (all dir.), Amplitude

**Tableau 5.3 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle optimisée pour le 6 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	G-lisse	G-rive	Rapide	G-Agg
Eau libre	0.000000	0.296445	0.287166	0.249502	2.037742
G-lisse	0.296445	0.000000	0.316830	0.237375	1.340239
G-rive	0.287166	0.316830	0.000000	0.238602	1.060720
Rapide	0.249502	0.237375	0.238602	0.000000	1.590451
G-Agg	2.037742	1.340239	1.060720	1.590451	0.000000



**Figure 5.5 : Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle.**

### 5.3.3 Amplitude et les 12 paramètres de texture directionnelle et non-directionnelle

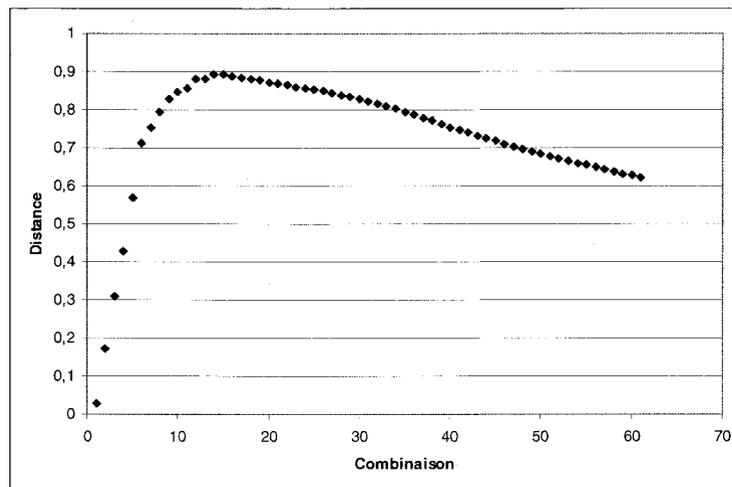
Dans cette analyse en plus des paramètres de texture non-directionnelle nous avons utilisé ceux de la texture directionnelle. Les directions utilisées sont celles à 0, 45, 90 et 135 degrés. Le tableau 5.4 présente la matrice de séparabilité obtenue. La distance de séparation optimale passe de **0,25** dans le cas précédent à **0,9**.

**Tableau 5.4 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle et directionnelle optimisée pour le 6 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	G-lisse	G-rive	Rapide	G-Agg
Eau libre	0.000000	0.893656	0.928605	0.894168	2.109741
G-lisse	0.893656	0.000000	1.377189	1.063058	1.776796
G-rive	0.928605	1.377189	0.000000	1.167170	1.589129
Rapide	0.894168	1.063058	1.167170	0.000000	1.522263
G-Agg	2.109741	1.776796	1.589129	1.522263	0.000000

La figure 5.6 montre dans un espace des attributs à 61 dimensions la meilleure combinaison des paramètres qui donne la distance optimale. La combinaison 14 est celle qui a donné la meilleure distance. Les paramètres de cette combinaison sont énumérés ci-dessous :

- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- GLCM Correlation (0°), Amplitude
- GLCM Entropy (45°), Amplitude
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- Mean Amplitude
- GLCM Correlation (45°), Amplitude
- GLCM Entropy (90°), Amplitude
- GLCM StdDev (45°), Amplitude
- GLCM Entropy (0°), Amplitude
- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- GLCM Entropy (135°), Amplitude
- GLCM StdDev (0°), Amplitude
- GLCM StdDev (135°), Amplitude
- GLCM Entropy (all dir.), Amplitude



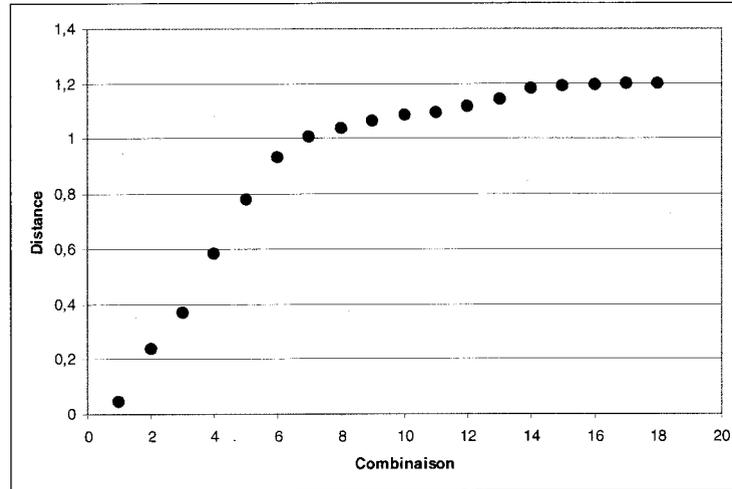
**Figure 5.6 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle et directionnelle.**

### 5.3.4 Effet de l'introduction des paramètres de morphologie

Dans l'étape précédente, les meilleurs paramètres de texture ont été déterminés. Pour savoir l'effet des paramètres de morphologie, il suffit donc de les ajouter aux meilleurs paramètres de texture et de constater l'effet sur la matrice de séparabilité (tableau 5.5). D'après la figure 5.7, la combinaison 18 donne la distance de séparabilité optimale (1.2). Les quatre paramètres de morphologie utilisés ont été retenus comme des éléments d'amélioration de la séparabilité. Ces paramètres sont : *Mean Profondeur*, *Mean Sinuosité*, *Mean Largeur* et *Mean Altitude*.

**Tableau 5.5 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 6 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	G-lisse	G-rive	Rapide	G-Agg
Eau libre	0.000000	1.401979	1.199236	1.590105	2.586453
G-lisse	1.401979	0.000000	2.028395	2.269050	2.566760
G-rive	1.199236	2.028395	0.000000	1.821435	2.202259
Rapide	1.590105	2.269050	1.821435	0.000000	3.257539
G-Agg	2.586453	2.566760	2.202259	3.257539	0.000000



**Figure 5.7 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 6 janvier 2002.**

### 5.3.5 Effet de l'introduction des paramètres dits de forme

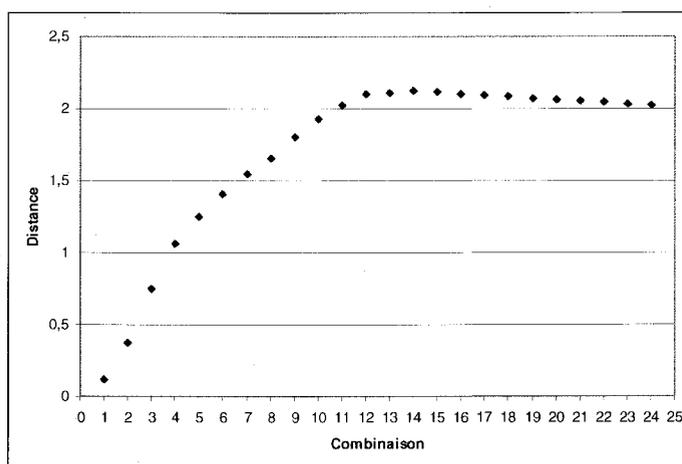
Les derniers paramètres dont nous avons prévu de vérifier la contribution à la séparabilité sont ceux dits de forme. Donc, nous les avons ajoutés aux 18 paramètres de l'étape précédente. La matrice de séparabilité obtenue est présentée au tableau 5.6. La distance de séparabilité optimale est de 2.12 (figure 5.8) et elle a été obtenue en utilisant les 14 paramètres suivants.

- Border length
- Length/width
- Mean Profondeur
- Rectangular Fit
- Mean Sinuosité
- GLCM Correlation (45°), Amplitude
- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- Mean Largeur
- GLCM Correlation (0°), Amplitude
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- Compactness
- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- Elliptic Fit
- GLCM Entropy (90°), Amplitude

Nous remarquons que plusieurs paramètres de forme sont présents dans cette combinaison optimale. Le paramètre amplitude est absent de cette combinaison, toutefois il est présent dans la combinaison de 15 paramètres (figure 5.8). Celle-là donne une distance de séparation aussi bonne qu'avec les 14 paramètres précités.

**Tableau 5.6 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, morphologie et de forme pour le 6 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	G-lisse	G-rive	Rapide	G-Agg
Eau libre	0	2,124953	2,121369	2,363643	2,209384
G-lisse	2,124953	0	3,871121	3,230959	2,648197
G-rive	2,121369	3,871121	0	4,856365	3,594224
Rapide	2,363643	3,230959	4,856365	0	2,428336
G-Agg	2,209384	2,648197	3,594224	2,428336	0



**Figure 5.8 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, de morphologie et de forme pour le 6 janvier 2002.**

La figure 5.9 présente une comparaison des matrices de séparabilité présentées en haut. Nous y remarquons une nette amélioration au fur et à mesure que nous passons d'une étape à une autre. En fait, l'ajout des paramètres de morphologie et de forme rehausse la séparabilité des diverses classes.

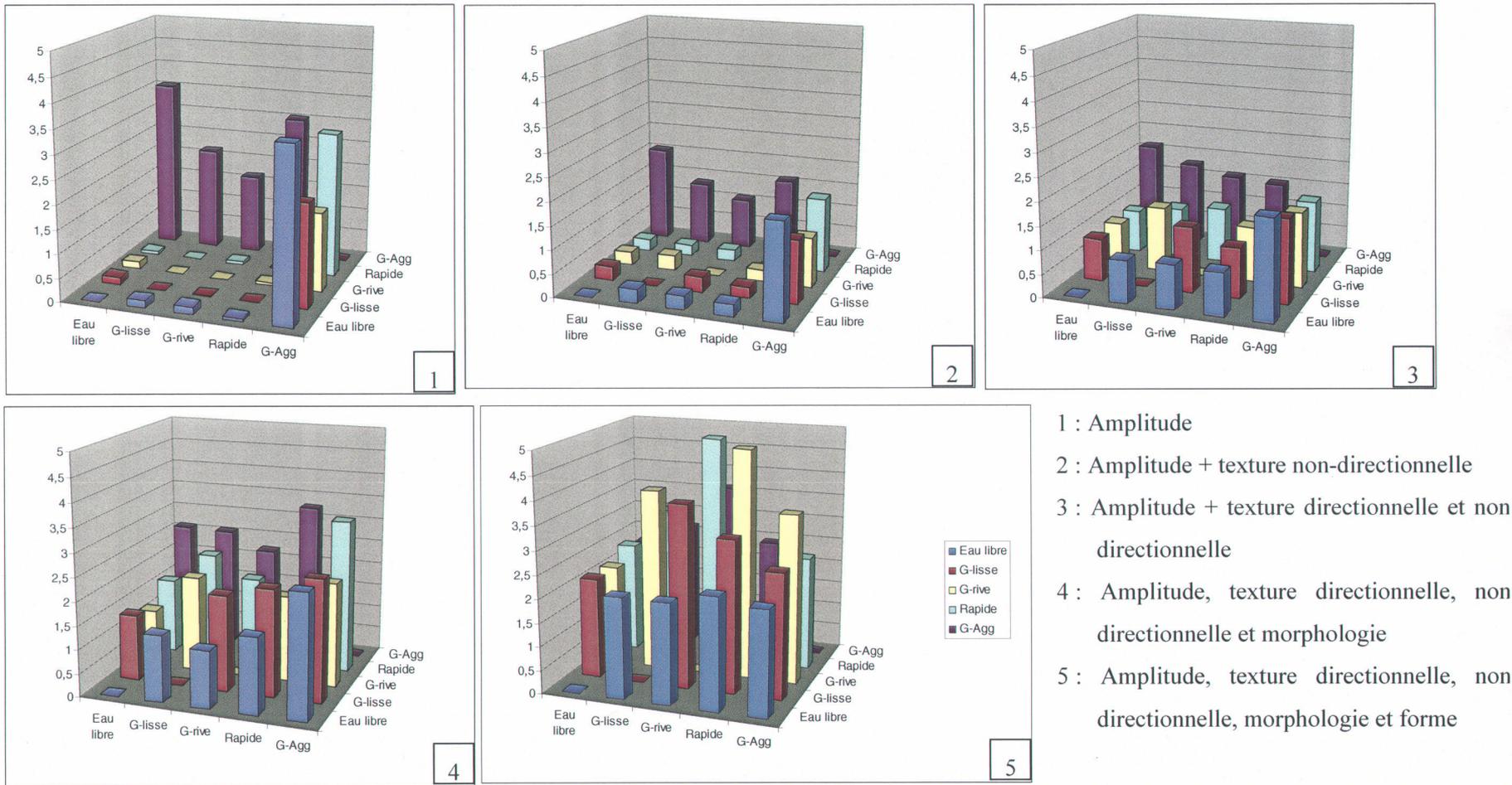


Figure 5.9 : Comparaison des diverses matrices de séparabilité pour l'image du 6 janvier 2002.

## **5.4 Résultats de l'analyse quantitative pour l'image du 30 janvier 2002**

Pour l'image du 30 janvier, les classes que nous avons utilisées pour l'analyse de séparabilité sont : eau libre, glace de rive, glace lisse et glace rugueuse. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux et figures des sections suivantes. Nous avons suivi exactement le même processus que pour l'image du 6 janvier.

### **5.4.1 Amplitude**

Le tableau 5.7 présente la matrice de séparabilité obtenue en utilisant le paramètre d'amplitude seulement. Nous y remarquons que les valeurs sont très faibles et que l'eau libre et la glace lisse ne se séparent pas beaucoup. La séparation maximale est observée entre les classes eau libre et glace rugueuse.

**Tableau 5.7 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude pour l'image du 30 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	Grive	GLisse	Grug
Eau libre	0.000000	0.207879	0.177883	1.564285
Grive	0.207879	0.000000	0.006005	0.288572
GLisse	0.177883	0.006005	0.000000	0.453063
Grug	1.564285	0.288572	0.453063	0.000000

### **5.4.2 Séparabilité en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle**

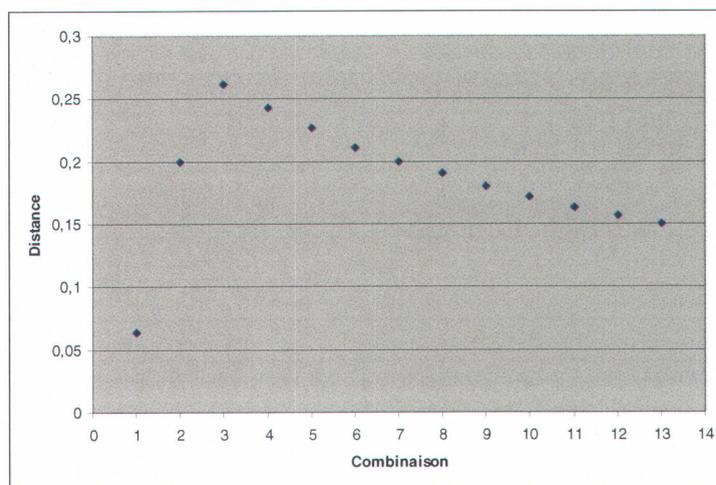
La combinaison de paramètres (figure 5.10) qui donne la distance optimale de 0.26 est constituée des trois paramètres suivants.

- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- GLCM Entropy (all dir.), Amplitude
- Mean Amplitude

Nous remarquons que la séparabilité s'est améliorée par rapport à l'étape précédente, cependant elle demeure faible. La matrice de séparabilité est présentée au tableau 5.8.

**Tableau 5.8 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle optimisée pour le 30 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	Grive	GLisse	Grug
Eau libre	0.000000	0.464070	0.721511	1.235625
Grive	0.464070	0.000000	0.261922	0.714809
GLisse	0.721511	0.261922	0.000000	0.691379
Grug	1.235625	0.714809	0.691379	0.000000



**Figure 5.10 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle.**

### 5.4.3 Amplitude et les 12 paramètres de texture directionnelles et non-directionnelles

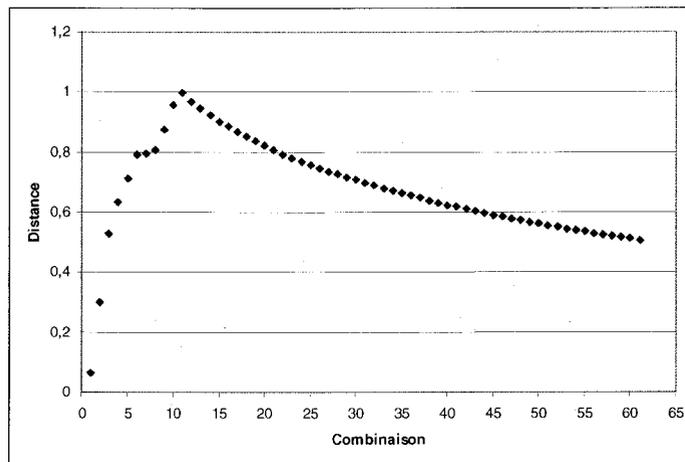
En ajoutons la texture directionnelle aux trois paramètres optimaux de la phase précédente, nous avons obtenu une distance optimale de séparabilité de 0.99 (figure 5.11). La nouvelle matrice de séparabilité est présentée au tableau 5.9, nous y notons l'amélioration de la séparabilité entre toutes les classes. La meilleure combinaison de paramètres est constituée des 11 paramètres suivants :

- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- GLCM Entropy (45°), Amplitude
- GLCM Correlation (45°), Amplitude

- GLCM Correlation (0°), Amplitude
- GLCM Entropy (0°), Amplitude
- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- GLCM Entropy (135°), Amplitude
- Mean Amplitude
- GLCM Entropy (90°), Amplitude
- GLCM Entropy (all dir.), Amplitude

**Tableau 5.9 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle et directionnelle optimisée pour le 30 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	Grive	GLisse	Grug
Eau libre	0.000000	1.376441	1.498265	1.761091
Grive	1.376441	0.000000	0.998334	1.031518
GLisse	1.498265	0.998334	0.000000	1.184422
Grug	1.761091	1.031518	1.184422	0.000000



**Figure 5.11 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle et directionnelle.**

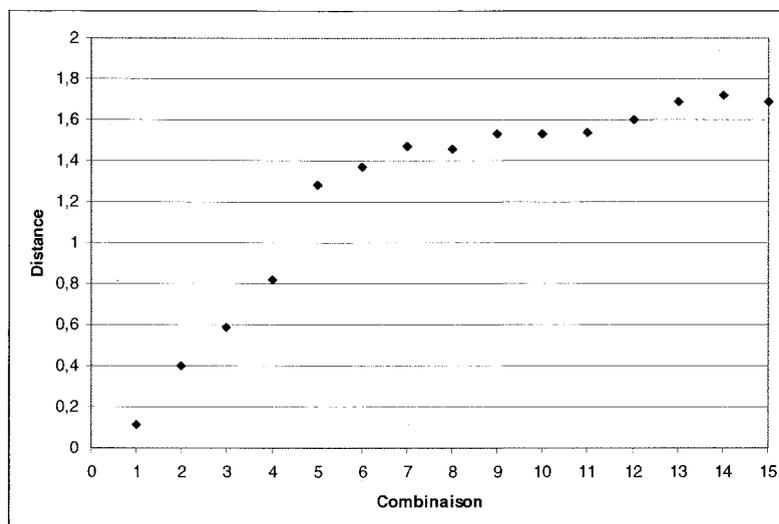
#### 5.4.4 Effet de l'introduction des paramètres de morphologie

En ajoutant les quatre paramètres de morphologie aux 11 paramètres de l'étape précédente, la distance optimale passe de 0.99 à 1.68 (figure 5.12). Aussi, la séparabilité des classes s'améliore (tableau 5.10). En plus des quatre paramètres de morphologie, la meilleure combinaison est obtenue avec les 11 paramètres suivants :

- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- GLCM Correlation (0°), Amplitude
- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- GLCM Entropy (45°), Amplitude
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- GLCM Entropy (90°), Amplitude
- GLCM Correlation (45°), Amplitude
- GLCM Entropy (0°), Amplitude
- GLCM Entropy (135°), Amplitude
- GLCM Entropy (all dir.), Amplitude
- Mean Amplitude

**Tableau 5.10 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 30 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	Grive	GLisse	Grug
Eau libre	0.000000	1.928702	2.744912	2.742744
Grive	1.928702	0.000000	1.720878	1.922881
Glisse	2.744912	1.720878	0.000000	3.161184
Grug	2.742744	1.922881	3.161184	0.000000



**Figure 5.12 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 30 janvier 2002.**

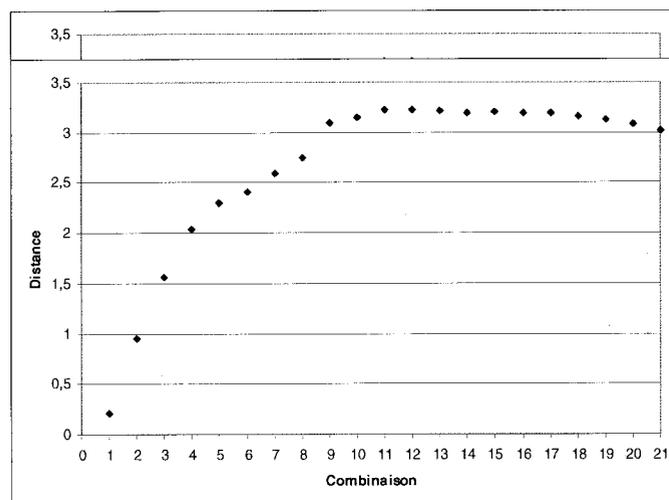
#### **5.4.5 Effet de l'introduction des paramètres dits de forme**

Le tableau 5.11 montre la matrice de séparabilité obtenue lors de l'ajout aux 15 paramètres de l'étape précédente ceux de la forme des objets. Cette fois, la distance optimale (figure 5.13) passe de 1.68 à 3.22, ce qui présente une très nette amélioration. La combinaison de paramètres qui permet une telle séparabilité est formée des 12 paramètres suivants (en gras ceux de la forme) :

- **Rectangular Fit**
- Mean Profondeur
- **Border length**
- **Length/width**
- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- **Compactness**
- Mean Altitude
- Mean Largeur
- Mean Sinuosité
- **Elliptic Fit**
- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- GLCM Correlation (45°), Amplitude

**Tableau 5.11 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, morphologie et de forme pour le 30 janvier 2002**

Class/Class	Eau libre	Grive	GLisse	Grug
Eau libre	0.000000	3.540603	4.594302	4.497305
Grive	3.540603	0.000000	3.263704	3.223847
GLisse	4.594302	3.263704	0.000000	5.200470
Grug	4.497305	3.223847	5.200470	0.000000



**Figure 5.13 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, de morphologie et de forme pour le 30 janvier 2002.**

Tout comme pour l'image du 6 janvier, nous avons constaté qu'en passant d'une étape à la suivante une amélioration continue de la séparabilité des classes est observée. La figure 5.14 présente une comparaison visuelle des diverses matrices de séparabilité obtenues pour l'image du 30 janvier 2002.

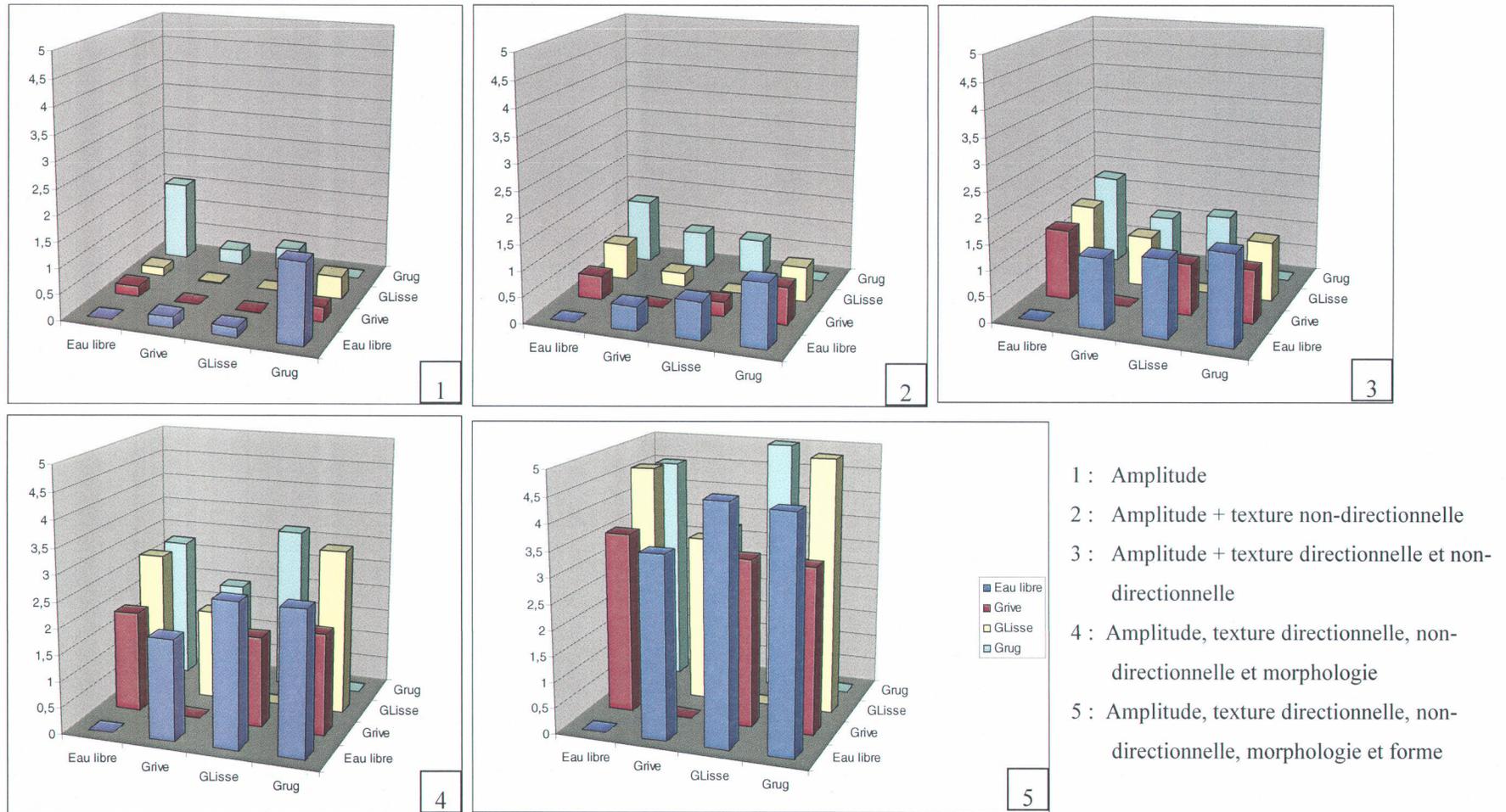


Figure 5.14 : Comparaison des diverses matrices de séparabilité pour l'image du 30 janvier 2002.

## 5.5 Résultats de l'analyse quantitative pour l'image du 4 mars 2002

Pour l'image du 4 mars nous avons étudié la séparabilité de l'eau libre, glace lisse concassée, glace lisse, eau-libre-frasil et glace agglomérée. Les résultats obtenus pour les diverses phases de cette analyse sont présentés dans les tableaux et figures des sections suivantes.

### 5.5.1 Amplitude

Le tableau 5.12 montre la très faible séparabilité obtenue en utilisant l'amplitude seulement.

**Tableau 5.12 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude pour l'image du 4 mars 2002**

Class/Class	Eau Libre	GlisseConcassée	Glisse	Eau-Frasil	GAgl
Eau Libre	0.000000	0.840181	0.111336	0.000306	0.842148
GlisseConcassée	0.840181	0.000000	0.207630	0.781893	0.017577
Glisse	0.111336	0.207630	0.000000	0.093233	0.178158
Eau-Frasil	0.000306	0.781893	0.093233	0.000000	0.788822
GAgl	0.842148	0.017577	0.178158	0.788822	0.000000

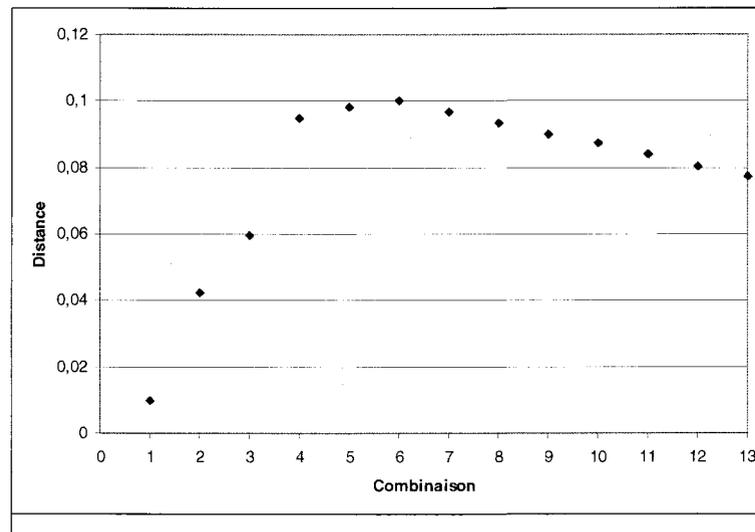
### 5.5.2 Séparabilité en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle

Six paramètres donnent la distance optimale en utilisant la texture non-directionnelle (figure 5.15). Cependant, cette distance reste faible (0.1) bien que la matrice de séparabilité (tableau 5.13) s'est améliorée par rapport à celle obtenue en utilisant seulement l'amplitude. La combinaison des six paramètres qui donne la distance optimale est la suivante :

- GLCM Correlation (all dir.), Amplitude
- GLCM StdDev (all dir.), Amplitude
- GLCM Entropy (all dir.), Amplitude
- Mean Amplitude
- GLDV Mean (all dir.), Amplitude
- GLCM Dissimilarity (all dir.), Amplitude

**Tableau 5.13 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle optimisée pour le 4 mars 2002**

Class/Class	Eau Libre	GlisseConcassée	Glisse	Eau-Frasil	GAgl
Eau Libre	0.000000	0.489817	0.139029	0.100002	0.607626
GlisseConcassée	0.489817	0.000000	0.242966	0.601692	0.115329
Glisse	0.139029	0.242966	0.000000	0.194236	0.342943
Eau-Frasil	0.100002	0.601692	0.194236	0.000000	0.673511
GAgl	0.607626	0.115329	0.342943	0.673511	0.000000



**Figure 5.15 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle.**

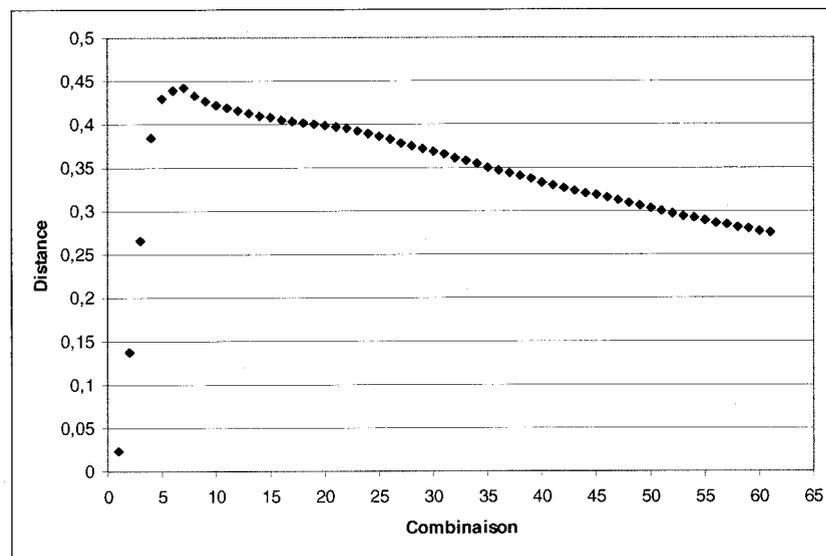
### 5.5.3 Amplitude et les 12 paramètres de texture directionnelles et non-directionnelles

En utilisant la texture directionnelle la distance optimale passe de 0.1 à 0.44 (figure 5.16). Évidemment, la séparabilité des classes s'améliore (Tableau 5.14 ). Les sept paramètres qui constituent la meilleure combinaison sont les suivants :

- GLCM Correlation (0°), Amplitude
- Mean Amplitude
- GLCM Correlation (45°), Amplitude
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- GLCM StdDev (45°), Amplitude
- GLCM Entropy (90°), Amplitude

**Tableau 5.14 : Matrice de séparabilité en utilisant l'amplitude et la texture non-directionnelle et directionnelle optimisée pour le 4 mars 2002**

Class/Class	Eau Libre	GlisseConcassée	Glisse	Eau-Frasil	GAgl
Eau Libre	0.000000	0.647376	0.442123	0.594794	1.004412
GlisseConcassée	0.647376	0.000000	0.572610	1.092745	0.455948
Glisse	0.442123	0.572610	0.000000	0.642733	0.772563
Eau-Frasil	0.594794	1.092745	0.642733	0.000000	1.366565
GAgl	1.004412	0.455948	0.772563	1.366565	0.000000



**Figure 5.16 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant l'amplitude et les 12 paramètres de texture non-directionnelle et directionnelle.**

#### 5.5.4 Effet de l'introduction des paramètres de morphologie

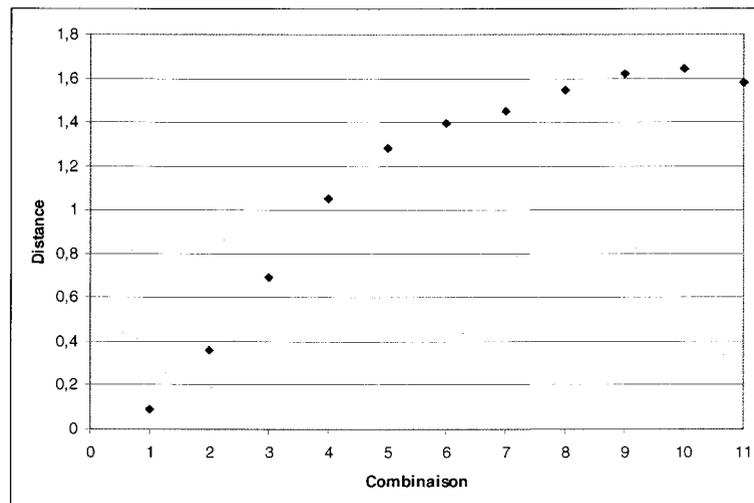
En ajoutant les quatre paramètres de morphologie, la matrice de séparabilité s'améliore encore (tableau 5.15) et la distance optimale de séparabilité passe de 0.44 à 1.58 (figure 5.17). Ces quatre paramètres sont retenus parmi la combinaison des 11 paramètres qui donne la meilleure séparabilité (en gras les paramètres de morphologie) :

- **Mean Profondeur**
- **Mean Largeur**
- GLCM Correlation (0°), Amplitude

- GLCM Correlation (45°), Amplitude
- **Mean Sinuosité**
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- **Mean Altitude**
- Mean Amplitude
- GLCM Entropy (90°), Amplitude
- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- GLCM StdDev (45°), Amplitude

**Tableau 5.15 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 4 mars 2002**

Class/Class	Eau Libre	GlisseConcassée	Glisse	Eau-Frasil	GAgl
Eau Libre	0.000000	3.073186	1.682566	1.717988	1.891194
GlisseConcassée	3.073186	0.000000	1.648586	4.196206	2.313245
Glisse	1.682566	1.648586	0.000000	2.001330	1.644686
Eau-Frasil	1.717988	4.196206	2.001330	0.000000	2.189752
GAgl	1.891194	2.313245	1.644686	2.189752	0.000000



**Figure 5.17 : Nombre de combinaisons pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle et de morphologie pour le 4 mars 2002.**

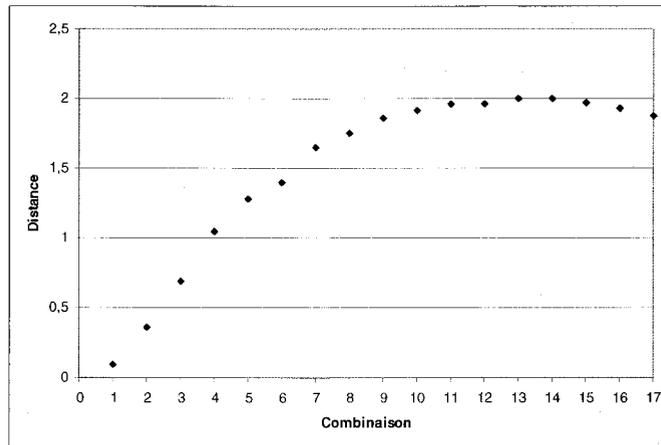
### 5.5.5 Effet de l'introduction des paramètres dits de forme

Le tableau 5.16 montre qu'en ajoutant les paramètres de forme la matrice de séparabilité s'améliore encore une fois. En fait, la distance optimale (figure 5.18) est rendue à 2 (1.58 précédemment). Les quatorze meilleurs paramètres sont les suivants (ceux de forme sont présentés en gras) :

- Mean Profondeur
- Mean Largeur
- GLCM Correlation (0°), Amplitude
- GLCM Correlation (45°), Amplitude
- Mean Sinuosité
- **Border length**
- Mean Altitude
- **Elliptic Fit**
- GLCM Correlation (135°), Amplitude
- GLCM Correlation (90°), Amplitude
- **Length/width**
- **Compactness**
- GLCM StdDev (45°), Amplitude
- **Rectangular Fit**

**Tableau 5.16 : Matrice de séparabilité en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, morphologie et de forme pour le 4 mars 2002**

Class/Class	Eau Libre	G-lisse Concassée	G-lisse	Eau-Frasil	GAgl
Eau Libre	0.000000	3.126152	2.132433	1.997600	2.001396
GlisseConcassée	3.126152	0.000000	2.068947	4.152377	3.251225
Glisse	2.132433	2.068947	0.000000	2.409902	2.404609
Eau-Frasil	1.997600	4.152377	2.409902	0.000000	2.327936
GAgl	2.001396	3.251225	2.404609	2.327936	0.000000



**Figure 5.18 : Nombre de combinaison pour avoir une distance de séparabilité optimale en utilisant les meilleurs paramètres d'amplitude, texture non-directionnelle, directionnelle, de morphologie et de forme pour le 4 mars 2002.**

La figure 5.19 présente une comparaison visuelle des diverses matrices de séparabilité obtenue pour l'image du 4 mars 2002. Nous y remarquons que la même tendance est obtenue pour les images du 6 et 30 janvier 2002. En fait, au fur et à mesure que des paramètres de texture, de morphologie et de forme sont introduits la séparabilité entre les classes s'améliore.

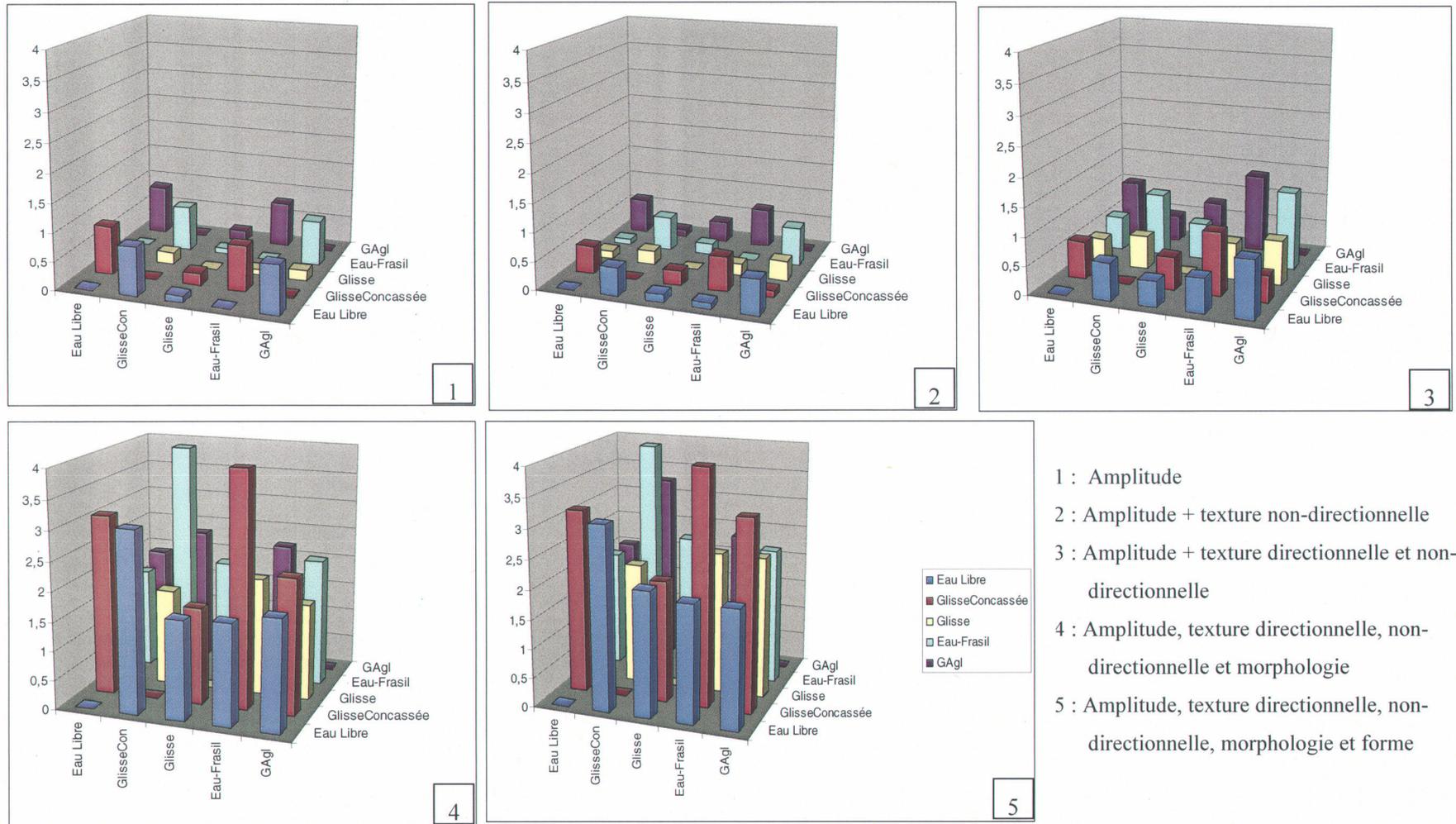
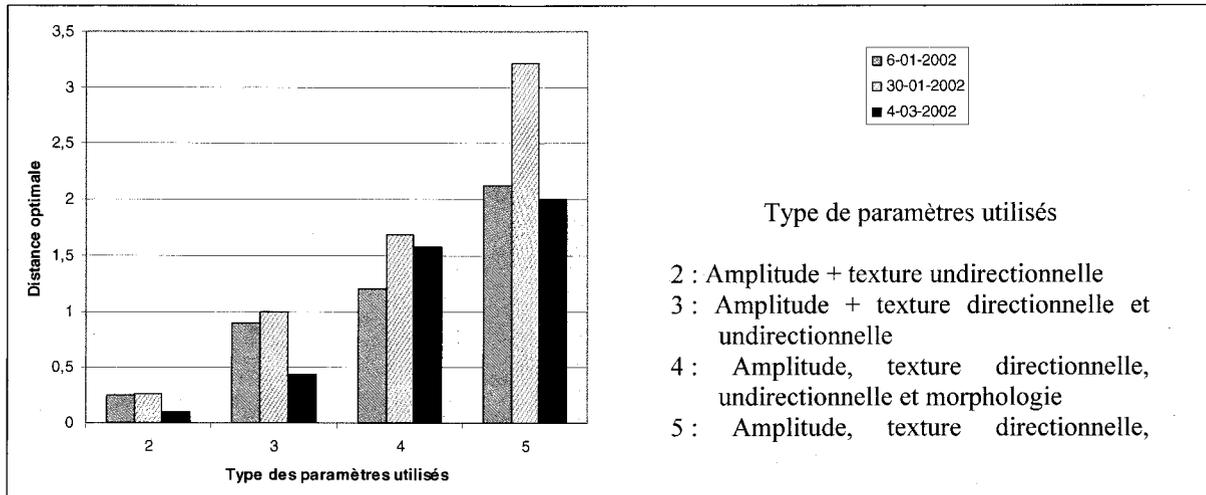


Figure 5.19 : Comparaison des diverses matrice de séparabilité pour l'image du 4 mars 2002.

## 5.6 Conclusions de l'analyse quantitative

L'analyse quantitative consistait à étudier l'effet des différents types de caractéristiques des objets sur la séparabilité des classes de glace de rivière. Ces classes sont formées des objets identifiés à partir des observations terrain. Malgré le faible nombre d'objets identifiés pour chacune des images de l'hiver 2002, nous avons réussi à isoler quelques classes de glace de rivière et d'appliquer notre approche pour l'analyse quantitative. Les résultats obtenus permettent de valider notre hypothèse qui stipulait que : « **introduire les caractéristiques de la rivière dans le processus d'analyse des images RADARSAT (mode fin) peut permettre une meilleure valorisation des informations qu'elles contiennent** ». La figure 5.20 montre explicitement l'amélioration de la séparabilité des classes en fonction du type de paramètre utilisé. Cette tendance est d'autant crédible puisqu'elle a été observée séparément pour les trois images. En plus, pour les trois images, nous avons remarqué que les paramètres de texture « corrélation » et « entropie » sont toujours parmi les meilleurs paramètres de séparation. Ce qui consolide notre hypothèse sur l'apport de la texture (voir introduction).



**Figure 5.20 : Distance optimale de séparabilité en fonction du type de paramètre utilisé pour les images du 6 et 30 janvier et du 4 mars 2002.**

Toutefois, l'objectif ultime de l'analyse quantitative est de pouvoir différencier entre les diverses classes de glace. Autrement dit, il faut identifier les facteurs qui distinguent une classe d'une autre en termes de texture, de morphologie et de forme des objets. Cependant, cet objectif est quasi

impossible à atteindre, vu le peu d'informations disponibles sur le couvert de glace des images utilisées. En fait, il faut avoir suffisamment d'objets pour chacune des classes afin de pouvoir effectuer des analyses statistiques poussées. En plus, il faut avoir plus d'information lors de l'identification des classes à partir des observations de terrain. Dans notre cas, nous disposions principalement des photos de terrain. Ces dernières, bien qu'elles soient fortement utiles, ne donnent qu'une information superficielle, à cause de la présence de neige sur le couvert de glace laquelle empêche d'avoir des informations plus précises sur le type de glace sous le couvert nival.

Dans ce chapitre, nous avons analysé, quantitativement, l'information contenue dans les objets représentant chacune des classes. Notons que nous ne disposons pas d'assez de données sur les caractéristiques *in situ* du couvert de glace. Les conclusions tirées de l'analyse qualitative se trouvent désormais plus consolidées. Nous avons réussi à démontrer quantitativement que les données relatives à la forme des objets et aux données contextuelles extraites du SIG augmentent la séparabilité entre les diverses classes de glace. Rappelons que ce dernier point constitue une des hypothèses de base de ce travail de recherche. Désormais, tout ce que nous avons bâti comme connaissance sur la glace de rivière, que ça soit à travers la théorie, l'observation, ou encore l'analyse, peut être compilé et intégré à la structure hiérarchique de la classification orientée objet. En fait, l'essence de cette structure décisionnelle de classification est puisée dans la connaissance des phénomènes de glace de rivière développée dans le cadre de travail de recherche. Le chapitre suivant présente cette structure ainsi que les résultats de classification orientée objet.



## **6. CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET**

---

Dans ce chapitre nous présentons la façon dont nous avons développé l'approche de segmentation en objets des images et aussi les résultats de la segmentation. Nous présentons aussi l'approche suivie pour développer la structure hiérarchique de la classification orientée objet et les résultats obtenus de cette classification. À noter que les images RADARSAT qui ont été utilisées dans le développement de la structure hiérarchique sont celles du 6 janvier, 30 janvier et 4 mars de l'année 2002. Pour l'application de la classification orientée objet, l'image du 11 février 2003 a été utilisée.

### **6.1 Segmentation des images Radar**

Au chapitre 2, nous avons vu que l'extraction des objets ou la segmentation des images était la première phase à entamer lors de classification orientée objet. Dans les équations 2.26, 2.29, 2.30 et 2.31, nous avons vu le rôle des paramètres de pondération  $W$  que l'utilisateur définit. En fait, ces paramètres précisent le poids attribué aux éléments de l'image, vs de forme, et pour cette dernière la compacité vs le lissage. Dans cette section nous présentons les principaux résultats que nous avons obtenus pour une segmentation adaptée à notre étude.

La figure 6.1 résume l'approche globale suivie lors du processus de segmentation des images RADARSAT.

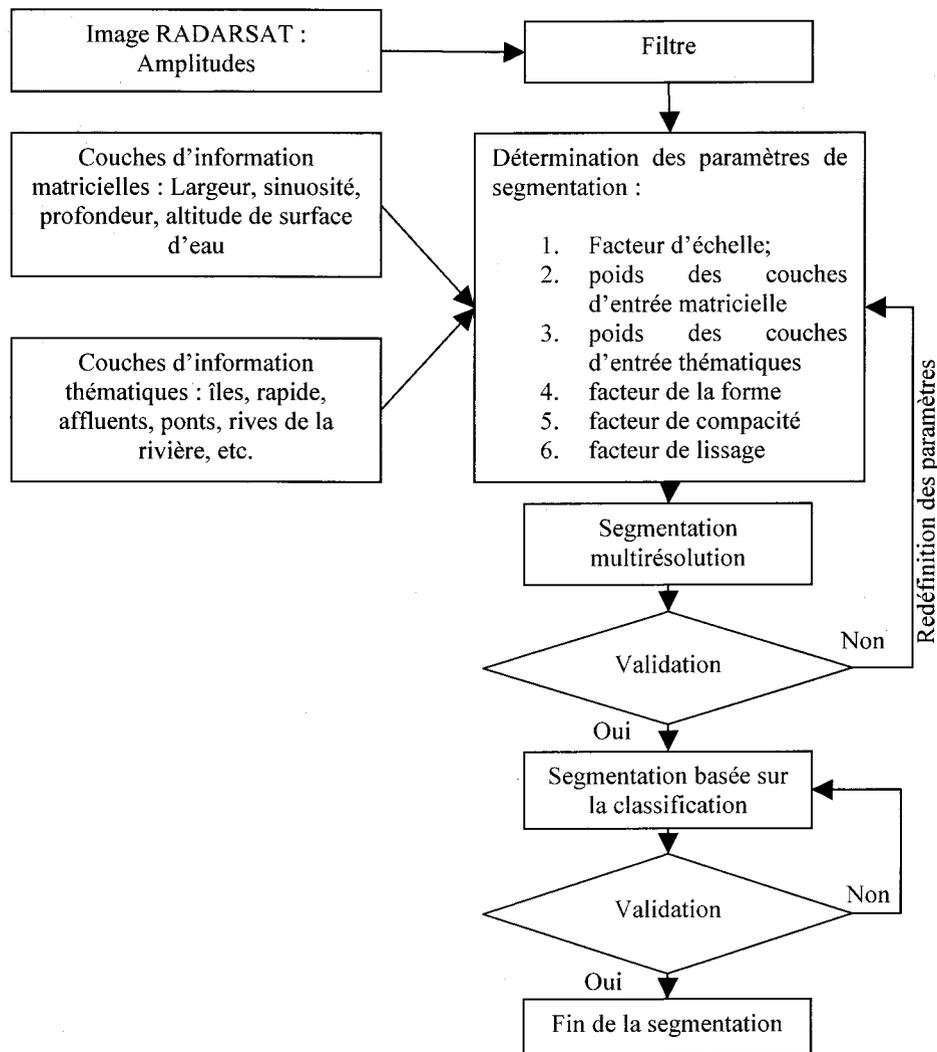


Figure 6.1 : Schéma de l'approche de segmentation adoptée.

Nous remarquons que dans cette figure la première phase est l'intégration des couches d'information pour lesquelles nous voulons extraire des objets. En fait, nous voulions avoir des objets pour lesquels des informations du SIG sont extraites en plus de toutes celles relatives à l'image RADARSAT. Les couches suivantes d'information ont été incorporées à chaque projet de segmentation :

- Image RADARSAT en amplitude;
- Image RADARSAT filtrée;

- Couches matricielles d'information morphologique extraite du SIG;
- Couches vectorielles extraites du SIG.

Après la création d'un projet de segmentation qui regroupait toutes les couches précitées, la segmentation se faisait en appliquant deux techniques complémentaires :

1. segmentation multirésolution;
2. segmentation basée sur la classification.

### 6.1.1 Segmentation multirésolution

Dans cette étape les poids relatifs à chaque couche d'information sont déterminés. Ainsi, nous pouvions attribuer un poids de *zéro* aux couches dont nous ne voulions pas qu'elles interviennent dans la formation des objets, et *un* aux autres couches. En fait, dans cette étude nous avons fait la segmentation en fonction des images RADARSAT. Le poids attribué à une image RADARSAT est de un tandis que pour les autres couches matricielles nous avons attribué un poids de zéro. L'objectif étant bien sûr de définir des objets qui découlent des images RADARSAT et qui reflètent leur variation. Pour réaliser une segmentation multirésolution satisfaisante, il fallait réaliser plusieurs tests et décider de la meilleure combinaison de paramètres en suivant des critères de validation. En fait, la figure 6.2 présente la boîte de dialogue du logiciel eCognition dans laquelle nous avons défini les paramètres de segmentation multirésolution. Nous y remarquons que plusieurs paramètres sont ajustables, dont, notamment, les paramètres d'échelle, de forme, compacité, etc. Le critère de validation principal était le degré de conformité des objets créés avec les patrons observés dans les images. En plus, les critères de validation suivants ont été appliqués :

- Forme des objets : ce critère vise à avoir des objets homogènes en terme de forme;
- Taille des objets : pour pouvoir appliquer des relations spatiales sur les objets voisins, ceux-ci ne doivent être ni trop grands ni trop petits;
- Il faut que les objets générés reflètent adéquatement les phénomènes observés dans les images RADARSAT (ex. : glace de rive, chenal d'eau libre...).

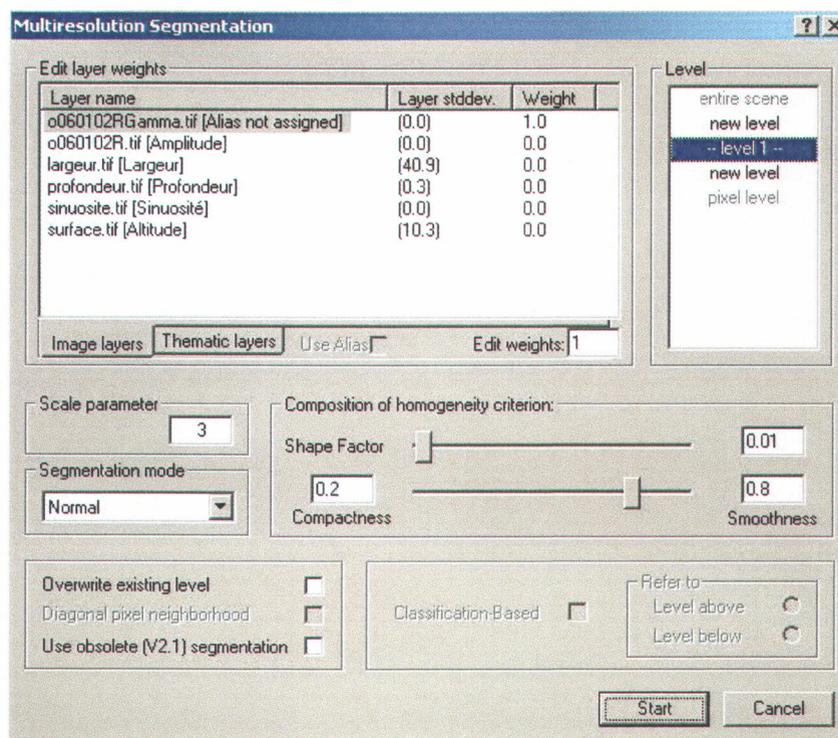


Figure 6.2 : Exemple de paramètres de segmentation pour l'image RADARSAT du 6 janvier 2002.

Après plusieurs essais nous avons abouti aux constats suivants :

- les images filtrées donnaient un meilleur résultat (filtre Gamma);
- le paramètre d'échelle fixé à une valeur de *trois* donne les meilleurs objets en termes de forme et de taille des objets;
- le paramètre d'échelle fixé à une valeur de *un* donne les meilleurs objets qui représentent les faibles valeurs de rétrodiffusion;
- le paramètre d'échelle fixé à une valeur de *deux* donne les meilleurs objets qui représentent les valeurs de rétrodiffusion moyennes.

Les figures 6.3 à 6.6 présentent un exemple des objets créés pour les images segmentées. Nous remarquons le degré de conformité de ces objets avec les patrons de formes observés dans les images. À noter que les mêmes paramètres de la figure 6.2 ont été utilisés pour toutes les images. Les objets générés sont caractérisés par les informations contenues dans les diverses couches qui constituent le projet de segmentation. Le tableau 6.1 présente un exemple de la richesse d'information relative à chacun des objets. À noter qu'il ne présente que quelques caractéristiques d'un seul objet.

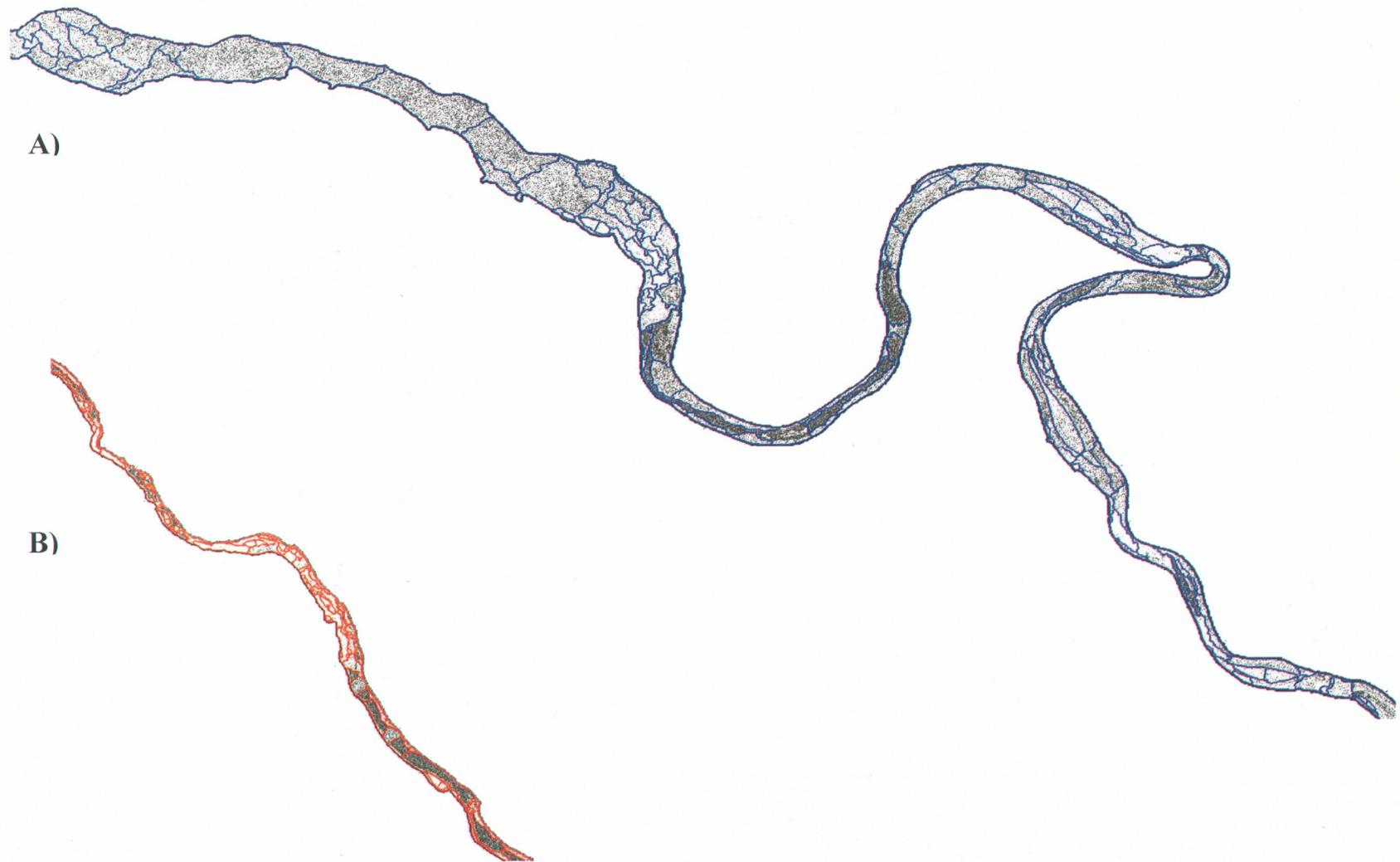
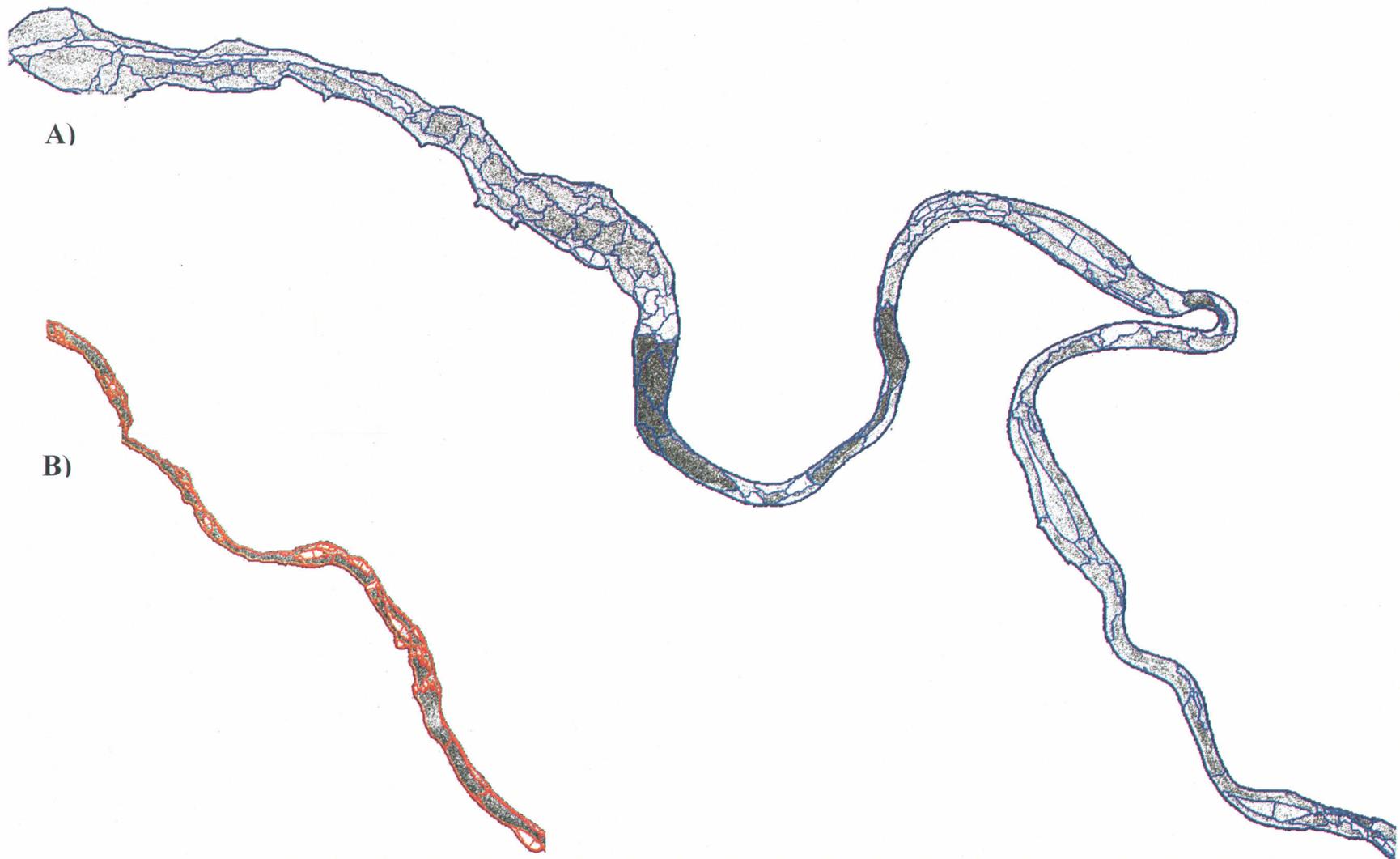


Figure 6.3 : Résultat de segmentation de l'image du 6 janvier 2002, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond.



**Figure 6.4 : Résultat de segmentation de l'image du 30 janvier 2002, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond.**

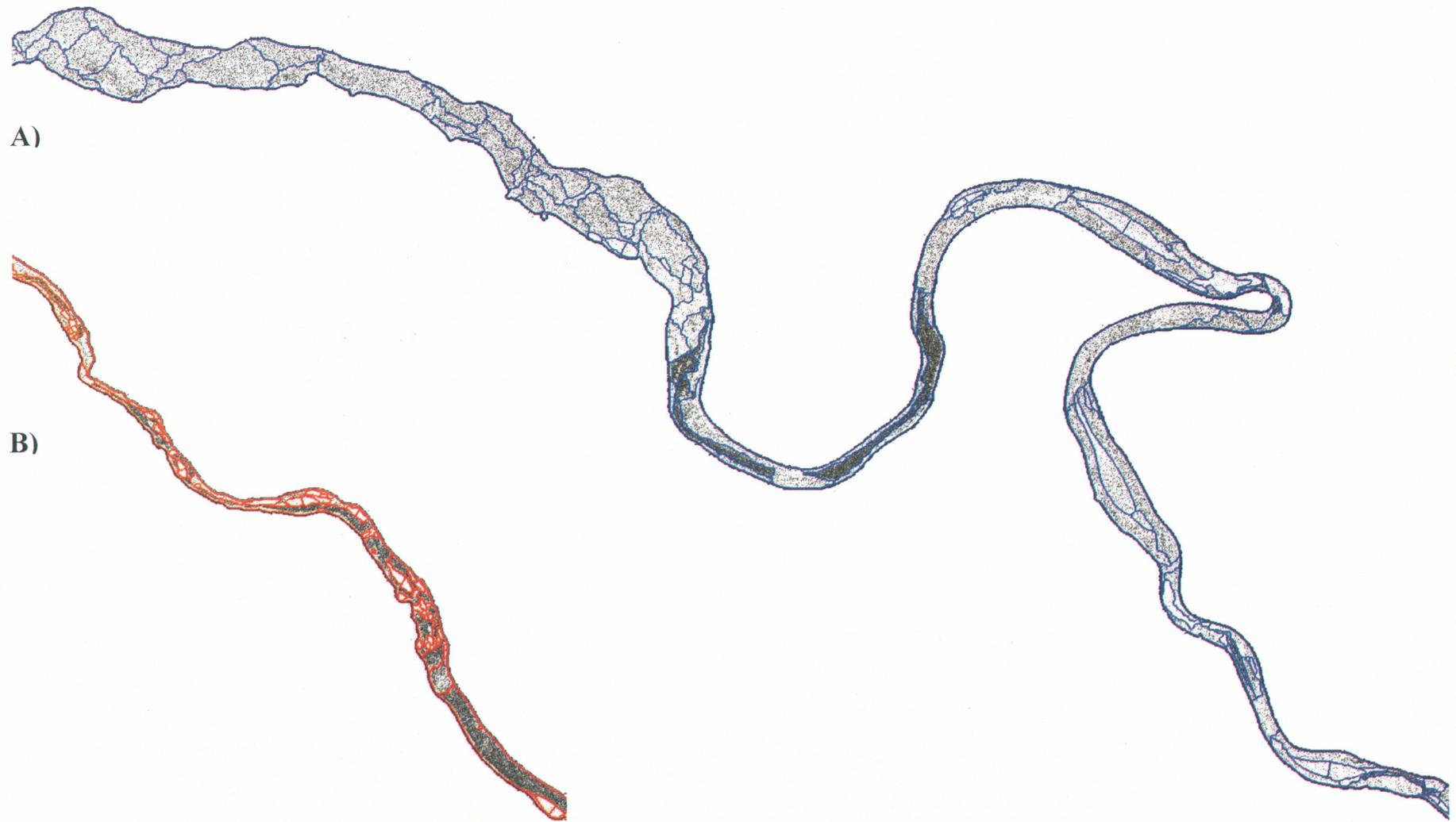
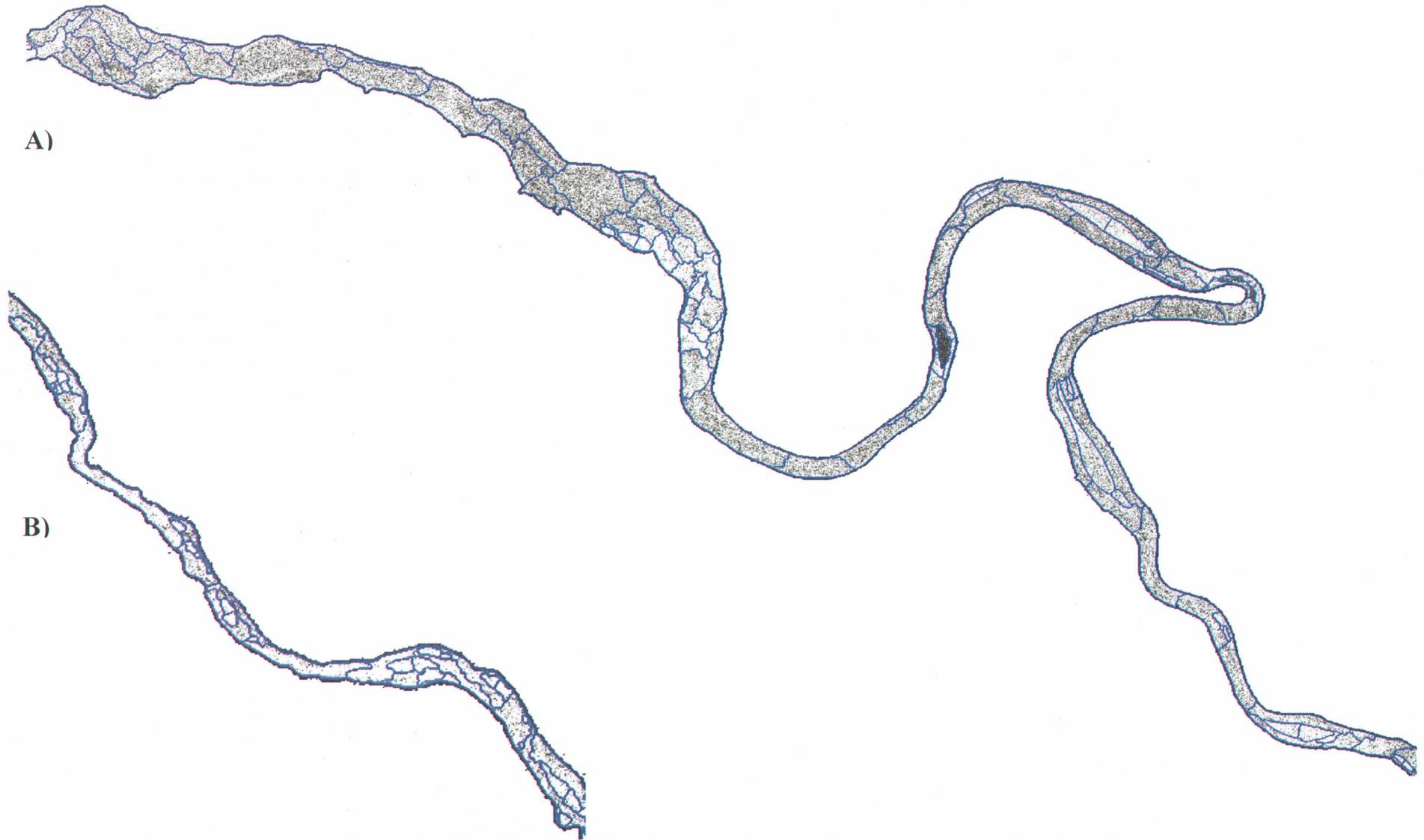


Figure 6.5 : Résultat de segmentation de l'image du 4 mars 2002, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond.



**Figure 6.6 : Résultat de segmentation de l'image du 11 février 2003, A : zone de l'aéroport, en U et de l'île Therrien ; B : zone du point #13 et de Richmond.**

**Tableau 6.1 : Caractéristiques de l'objet #21 de l'image RADARSAT du 6-01-2002**

id	21	GLDV Entropy (all dir.) Amplitude	4,7
Area (m <sup>2</sup> )	133700,0	GLDV Entropy (0°) Amplitude	4,6
Asymmetry	0,8	GLDV Entropy (135°) Amplitude	4,7
Border length (m)	2600,0	GLDV Entropy (45°) Amplitude	4,6
Border to Îles Amont neighbor-objects (m)	0,0	GLDV Entropy (90°) Amplitude	4,6
Border to Îles Aval neighbor-objects (m)	0,0	GLDV Mean (all dir.) Amplitude	41,4
Border to Petites îles neighbor-objects (m)	0,0	GLDV Mean (0°) Amplitude	41,5
Border to unclassified neighbor-objects (m)	2230,0	GLDV Mean (135°) Amplitude	42,8
Compactness	1,7	GLDV Mean (45°) Amplitude	42,3
Density	1,7	GLDV Mean (90°) Amplitude	39,1
Distance to Îles Amont neighbor-objects (m)	6575,2	Length (m)	767,0
Distance to Îles Aval neighbor-objects (m)	6364,8	Length/w idth	2,5
Distance to Petites îles neighbor-objects (m)	6147,1	Main direction	146,4
Distance to unclassified neighbor-objects (m)	0,0	Mean Altitude	96,9
Elliptic Fit	0,7	Mean Amplitude	0,1
GLCM Ang. 2nd moment (all dir.) Amplitude	0,0	Mean Largeur	765,8
GLCM Ang. 2nd moment (0°) Amplitude	0,0	Mean Profondeur	3,3
GLCM Ang. 2nd moment (135°) Amplitude	0,0	Mean Sinuosité	0,5
GLCM Ang. 2nd moment (45°) Amplitude	0,0	Rectangular Fit	0,8
GLCM Ang. 2nd moment (90°) Amplitude	0,0	Shape index	1,8
GLCM Contrast (all dir.) Amplitude	2893,6	Stddev Altitude	7,0
GLCM Contrast (0°) Amplitude	2889,6	Stddev Amplitude	0,1
GLCM Contrast (135°) Amplitude	3162,7	Stddev Largeur	102,4
GLCM Contrast (45°) Amplitude	2974,6	Stddev Profondeur	0,6
GLCM Contrast (90°) Amplitude	2546,6	Stddev Sinuosité	0,0
GLCM Correlation (all dir.) Amplitude	0,3	Width (m)	304,5
GLCM Correlation (0°) Amplitude	0,3	X center (m)	386970,0
GLCM Correlation (135°) Amplitude	0,2	Y center (m)	5081000,0
GLCM Correlation (45°) Amplitude	0,3	GLDV Ang. 2nd moment (0°) Amplitude	0,0
GLCM Correlation (90°) Amplitude	0,4	GLDV Ang. 2nd moment (135°) Amplitude	0,0
GLCM Dissimilarity (all dir.) Amplitude	41,4	GLDV Ang. 2nd moment (45°) Amplitude	0,0
GLCM Dissimilarity (0°) Amplitude	41,5	GLDV Ang. 2nd moment (90°) Amplitude	0,0
GLCM Dissimilarity (135°) Amplitude	42,8	GLDV Contrast (all dir.) Amplitude	2893,6
GLCM Dissimilarity (45°) Amplitude	42,3	GLDV Contrast (0°) Amplitude	2889,6
GLCM Dissimilarity (90°) Amplitude	39,1	GLDV Contrast (135°) Amplitude	3162,7
GLCM Entropy (all dir.) Amplitude	8,8	GLDV Contrast (45°) Amplitude	2974,6
GLCM Entropy (0°) Amplitude	7,8	GLDV Contrast (90°) Amplitude	2546,6
GLCM Entropy (135°) Amplitude	7,8	GLDV Entropy (all dir.) Amplitude	4,7
GLCM Entropy (45°) Amplitude	7,8	GLDV Entropy (0°) Amplitude	4,6
GLCM Entropy (90°) Amplitude	7,8	GLDV Entropy (135°) Amplitude	4,7
GLCM Homogeneity (all dir.) Amplitude	0,0	GLDV Entropy (45°) Amplitude	4,6
GLCM Homogeneity (0°) Amplitude	0,0	GLDV Entropy (90°) Amplitude	4,6
GLCM Homogeneity (135°) Amplitude	0,0	GLDV Mean (all dir.) Amplitude	41,4
GLCM Homogeneity (45°) Amplitude	0,0	GLDV Mean (0°) Amplitude	41,5
GLCM Homogeneity (90°) Amplitude	0,0	GLDV Mean (135°) Amplitude	42,8
GLCM Mean (all dir.) Amplitude	125,7	GLDV Mean (45°) Amplitude	42,3
GLCM Mean (0°) Amplitude	125,6	GLDV Mean (90°) Amplitude	39,1
GLCM Mean (135°) Amplitude	125,4	Length (m)	767,0
GLCM Mean (45°) Amplitude	126,0	Length/w idth	2,5
GLCM Mean (90°) Amplitude	125,9	Main direction	146,4
GLCM StdDev (all dir.) Amplitude	40,0	Mean Altitude	96,9
GLCM StdDev (0°) Amplitude	40,0	Mean Amplitude	0,1
GLCM StdDev (135°) Amplitude	40,2	Mean Largeur	765,8
GLCM StdDev (45°) Amplitude	40,1	Mean Profondeur	3,3
GLCM StdDev (90°) Amplitude	39,8	Mean Sinuosité	0,5
GLDV Ang. 2nd moment (all dir.) Amplitude	0,0	Rectangular Fit	0,8

Nous avons vu en haut que pour les faibles et les moyennes valeurs d'amplitude le paramètre d'échelle adéquat n'est pas le même. La figure 6.7 présente les trois niveaux de segmentation multirésolution de la zone en « U » de l'image du 6 janvier 2002, en utilisant un paramètre d'échelle variant respectivement de *un* à *trois*. Nous y remarquons clairement qu'au niveau *trois* de la segmentation les faibles et moyennes amplitudes sont sous représentées. En fait, pour les trois zones agrandies l'information reflétée change en fonction du paramètre d'échelle. Il est clair que le niveau *trois* de segmentation n'est pas adapté pour les faibles et moyennes rétrodiffusions. Par contre, ce niveau est très adapté pour présenter les plus fortes rétrodiffusions.

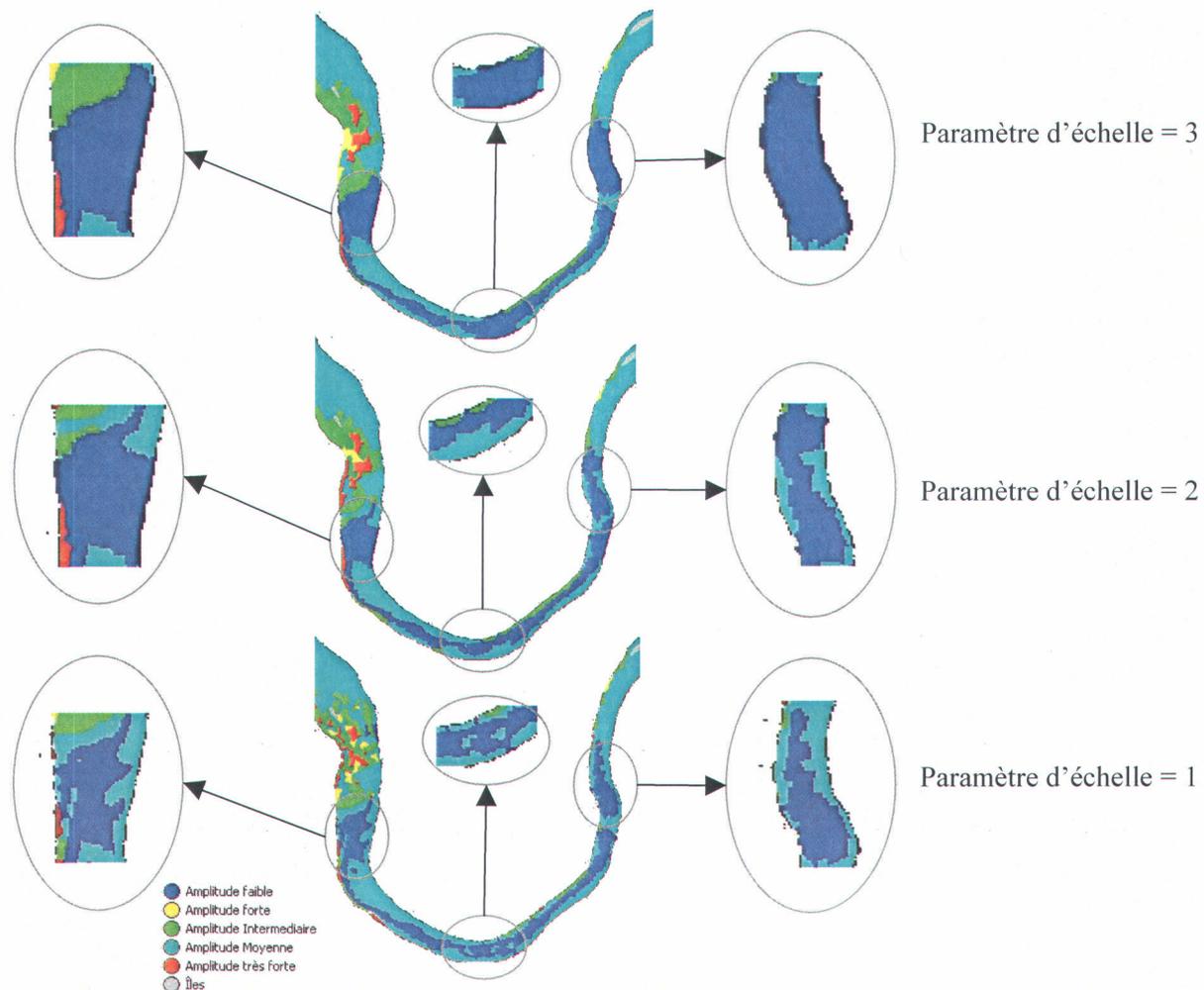


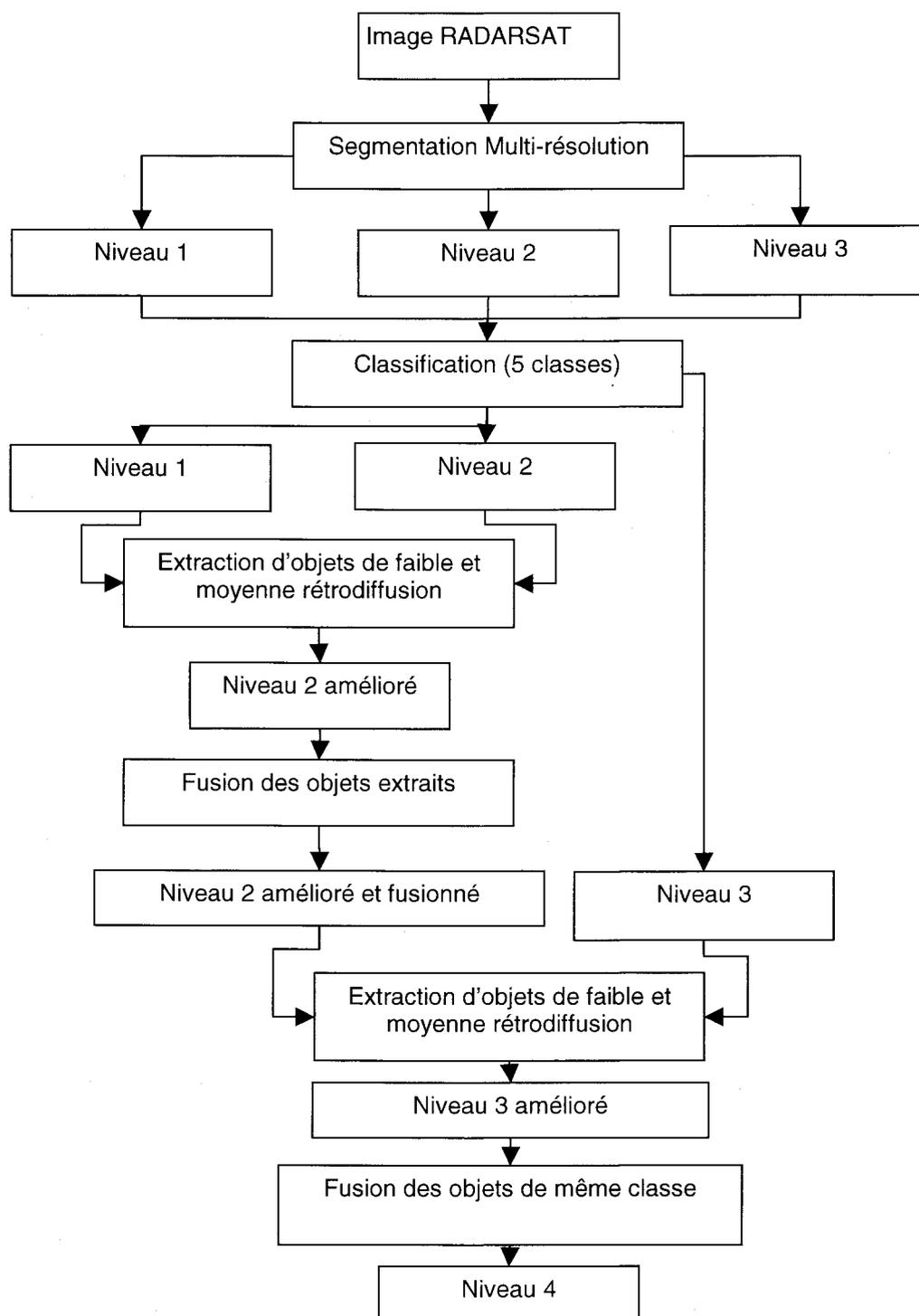
Figure 6.7 : Segmentation multirésolution de la zone en U de l'image RADARSAT du 6 janvier 2002.

Les niveaux *un* et *deux* sont adéquats pour présenter les objets de faibles et moyennes amplitudes, mais ils le sont moins vis-à-vis du critère de forme et de taille des objets. Pour pallier ce problème, nous avons eu recours à la segmentation basée sur la classification.

### 6.1.2 Segmentation basée sur la classification

Lors de la segmentation multirésolution nous avons constaté qu'avec un paramètre d'échelle de trois, les objets générés reproduisent assez bien les patrons de forme observés dans les images RADARSAT. Cependant, il est connu que les divers phénomènes contenus dans les images ne sont pas tous reliés au même facteur d'échelle. En fait, en utilisant différents facteurs d'échelle, différents phénomènes s'observent. Dans le cas de notre étude, il a été observé qu'avec un facteur d'échelle égal à trois les objets générés sont (i) représentatifs pour les grandes valeurs de rétrodiffusion, (ii) de taille et forme homogènes. À l'inverse, les objets obtenus pour les faibles valeurs de rétrodiffusion sont moins bons. Dans ce dernier cas, c'est l'information qui concerne les faibles valeurs de rétrodiffusion qui risque d'être perdue. Avec un paramètre d'échelle de deux et même de un, les objets obtenus pour les faibles et moyennes rétrodiffusions étaient très bons. Pour pallier ce problème et afin d'obtenir une segmentation représentative de tous les phénomènes observés dans les images RADARSAT à une échelle acceptable, nous avons eu recours à la segmentation basée sur la classification. La figure 6.8 présente l'organigramme de cette approche dont les étapes principales sont les suivantes :

- Segmentation multirésolution des images en utilisant un paramètre d'échelle variant de *un* à *trois*; les niveaux de segmentation multirésolution obtenus sont respectivement, niveau 1, niveau 2 et niveau 3.
- Classification des trois niveaux de l'étape précédente en fonction de l'amplitude du signal rétrodiffusé (les cinq classes sont les mêmes présentées dans la figure 6.7).
- Extraction des objets des classes « faibles » et « moyennes » amplitudes du niveau 1 et les inclure dans le niveau 2. Ce dernier devient ainsi amélioré.
- Fusionner les objets extraits du niveau 1 pour obtenir un niveau 2 amélioré et fusionné. Cette fusion ne concerne que les objets extraits du niveau 1, ceux déjà existant au niveau deux pour les autres classes restent intacts.
- Répétition de la même procédure, mais cette fois, en substituant le niveau 1 par 2 et ce dernier par le niveau 3.
- Le niveau quatre n'est rien d'autre que le niveau 3 amélioré mais dont, cette fois-ci, toutes les classes ont été fusionnées.



**Figure 6.8 : Schéma général de la segmentation basée sur la classification.**

Les figures 6.9 à 6.13 présentent les résultats obtenus pour les mêmes images présentées dans la partie segmentation multirésolution. Le niveau *trois* se trouve ainsi représentatif des phénomènes observés dans les images RADARSAT, tout en respectant les critères d'homogénéité de la forme et la taille des objets générés.

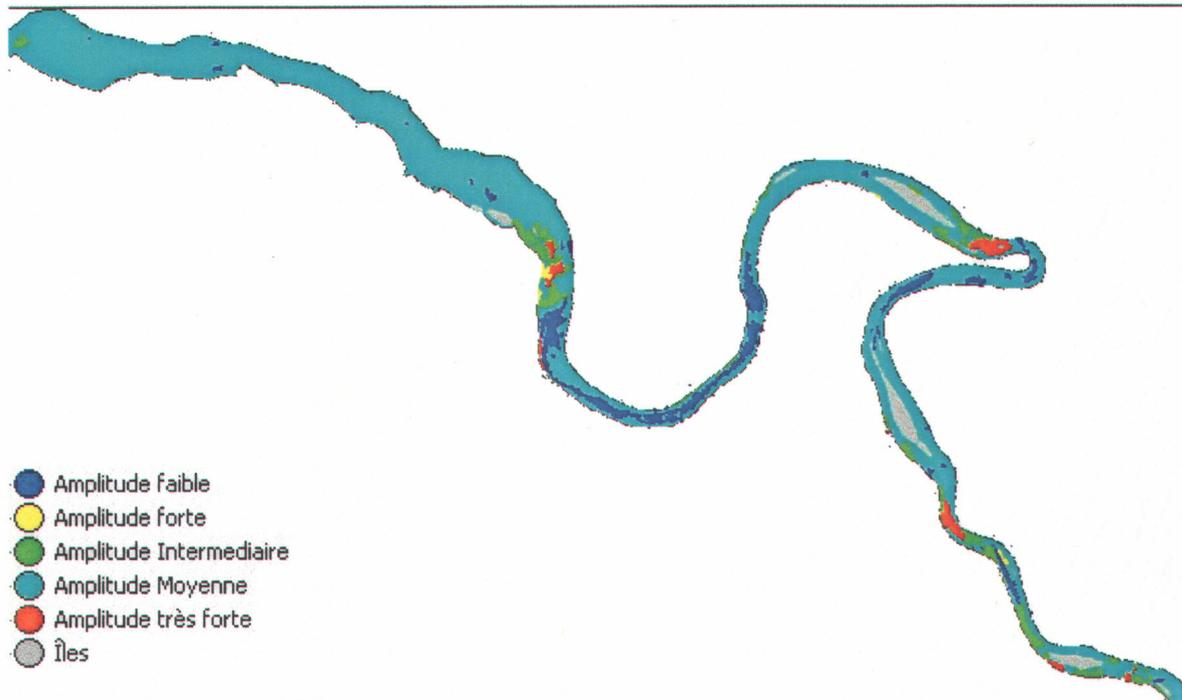


Figure 6.9 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 6 janvier 2002.

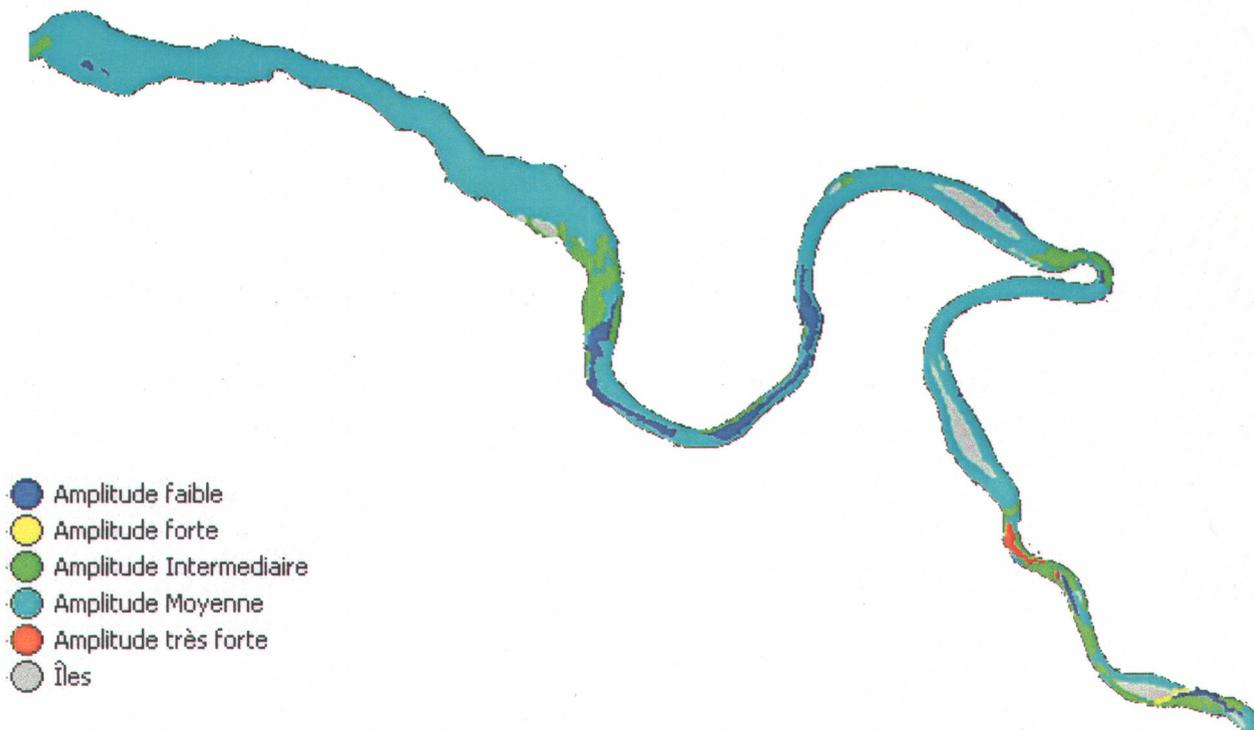


Figure 6.10 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 30 janvier 2002.

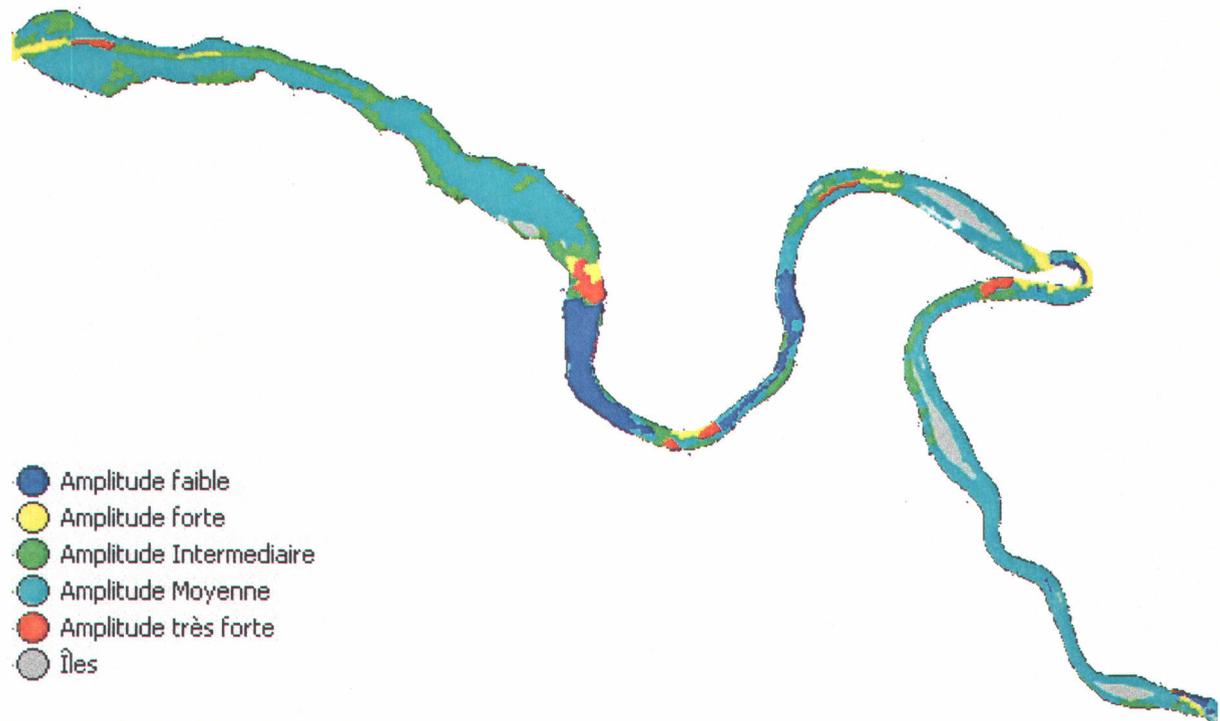


Figure 6.11 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 4 mars 2002.

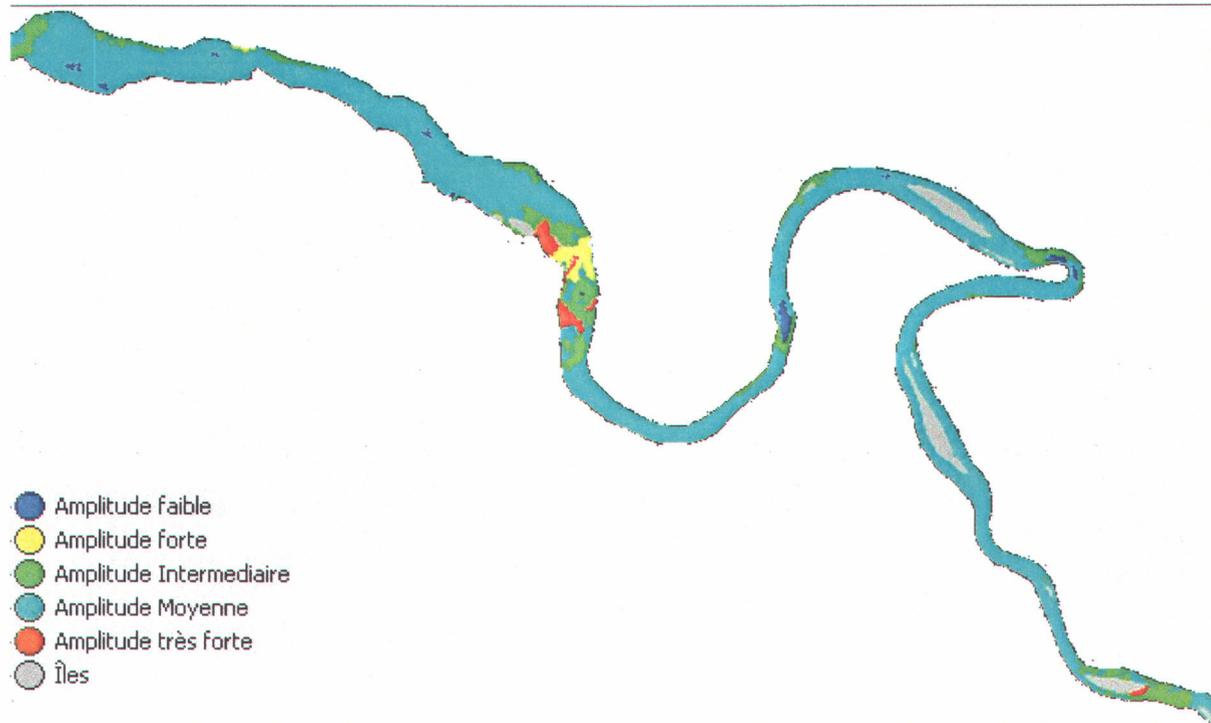


Figure 6.12 : Segmentation basée sur la classification de la partie avale de l'image du 11 février 2003.

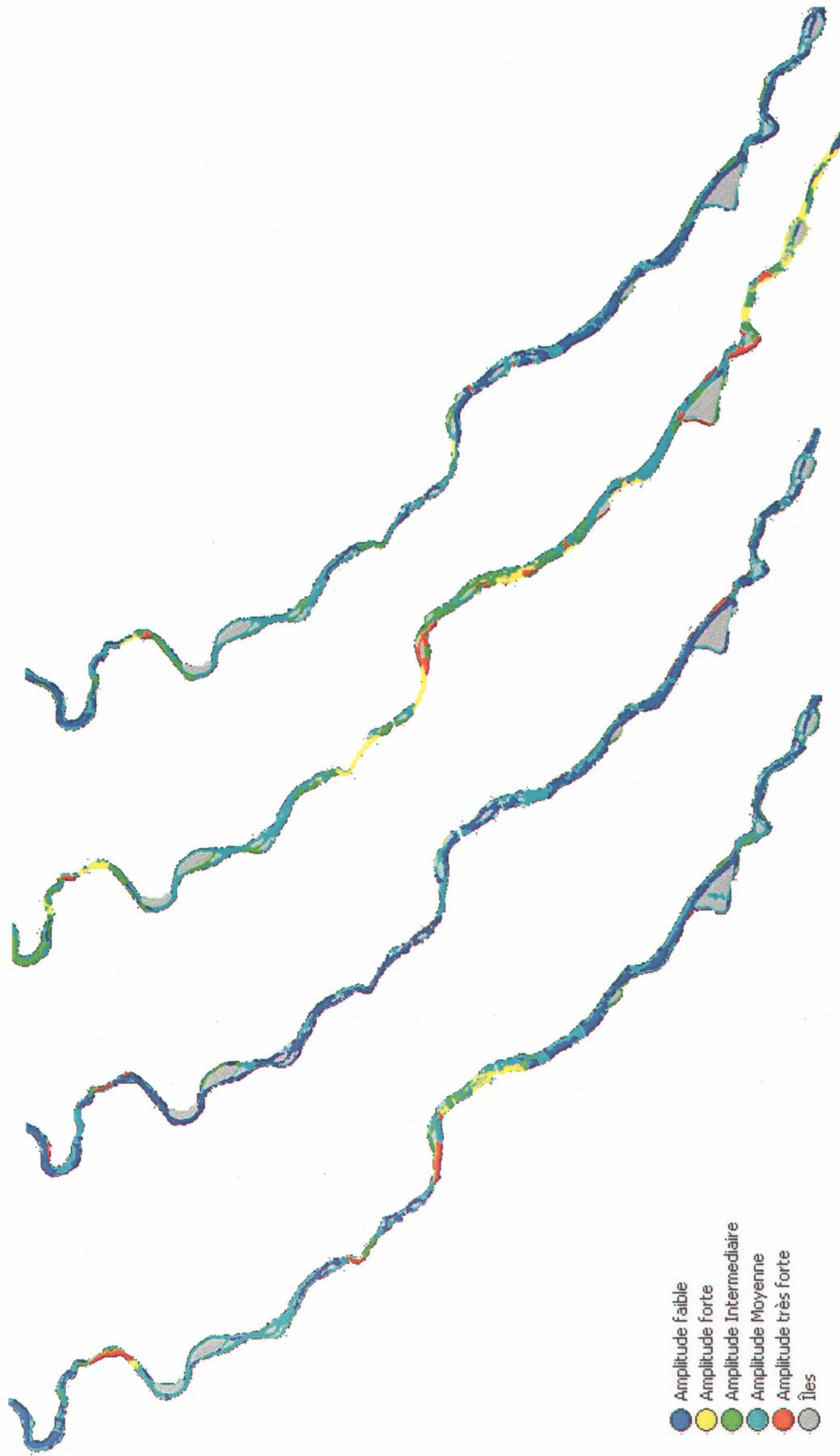


Figure 6.13 : Segmentation basée sur la classification de la partie amont des images du 6-01-2002, 30-01-2002, 4-03-2002 et du 11-02-2003.

### **6.1.3 Conclusion à retenir pour la segmentation**

La segmentation en objets des images RADARSAT est une étape de préparation cruciale à la classification orientée objet. Dans cette section, nous avons présenté l'approche que nous avons développée pour générer des objets significatifs. En effet, en combinant une segmentation basée sur la classification aux trois niveaux de segmentation multirésolution nous avons obtenu des objets homogènes en termes de taille, forme et surtout amplitude du signal rétrodiffusé. Nous avons aussi présenté dans le tableau 6.1 un exemple des caractéristiques reliées à chacun des objets de l'image. L'objet remplace alors le pixel en tant que nouvelle unité de base pour la classification. Nous avons aussi effectué une multitude de tests pour savoir quels paramètres de segmentation il faut retenir. Il fallait surtout s'assurer que les paramètres obtenus ne soient pas valides que pour l'image étudiée. En d'autres termes, l'approche de segmentation que nous avons développée est transférable et s'applique à toutes les images RADARSAT étudiées. Le fait que cette approche est transférable nous a aidé à automatiser l'étape de segmentation. En effet, un des objectifs de cette étude est d'automatiser le processus de classification orientée objet développé.

## **6.2 Structure Hiérarchique et classification orientée objet**

La hiérarchie ou la structure de la classification orientée objet est l'étape où nous synthétisons toutes les informations a priori réunies sur la glace de rivière. Les conclusions tirées des analyses qualitative et quantitative au côté des connaissances sur la théorie de glace de rivière sont regroupées sous forme de règles logiques de classification (section 2.4, chapitre 2). Cette section porte donc sur la façon dont nous avons formulé les informations sur la glace de rivière, l'objectif étant de distinguer les principales classes de glace de rivière, mais aussi d'en tirer le maximum d'information. Puisque ce sont les images RADARSAT qui constituent la source d'information principale sur le couvert de glace, nous présentons notre cheminement en fonction de la rétrodiffusion. En fait, dans un processus opérationnel de suivi de glace de rivière ce sont les images RADARSAT qui changent, les autres couches d'information reliées au SIG restent les mêmes. Cela dit, nous souhaitons avoir un ensemble de règles qui reproduit le maximum d'informations contenu dans les images RADARSAT sur le couvert de glace. Le genre de questions auxquelles nous avons essayé de trouver des réponses reflète des situations comme :

1. Comment distinguer l'eau libre? Quand la rivière est-elle complètement ou partiellement ouverte?

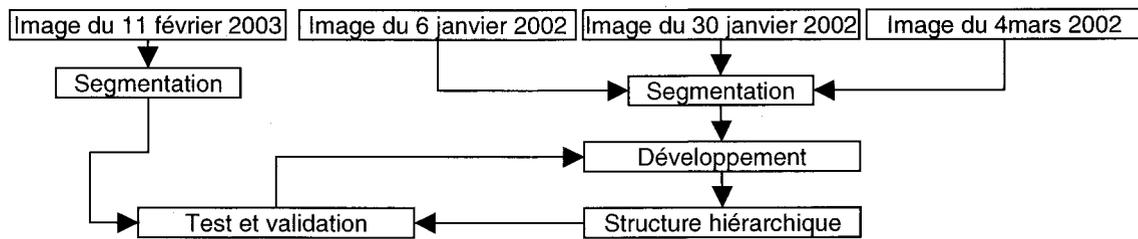
2. Comment distinguer un couvert de glace thermique? Est-ce qu'un couvert de glace complet peut-être classifié?
3. Est-il possible de classifier la glace de rive?
4. Pouvons-nous identifier un couvert de glace complet couvert de neige humide?
5. Est-ce qu'un couvert de glace formé de glace secondaire peut être distingué d'un couvert formé de glace superposée?
6. Le signal radar de la glace agglomérée se confond-il avec d'autres types de couvert de glace?
7. Quand est-ce que nous pouvons affirmer qu'il y a présence d'une zone d'embâcle dans l'image? Pouvons-nous définir le degré de risque relié à une zone d'embâcle?

Dans les sections qui suivent, nous avons essayé de répondre à chacune de ces questions. Nous exposons, s'il y a lieu, les difficultés qui sont reliées à chacune des questions susmentionnées et comment nous sommes parvenus à les surmonter.

Dans notre quête de développement de la structure hiérarchique de la classification orientée objet, nous avons gardé à l'esprit les éléments suivants :

- La structure développée doit être transférable d'une image à une autre. En fait, la structure doit être reliée aux concepts de la glace de rivière, ceux-ci sont régis par des règles récurrentes et transférables;
- Les outils pour exprimer les règles de classification doivent être liés aux principes et non seulement aux constats. Par exemple, nous pouvons constater sur une image qu'un chenal d'eau libre est un objet dont la longueur est supérieure à 600 mètres et dont la symétrie est supérieure à 0,85. Si la symétrie peut être retenue comme paramètre déterminant la longueur, elle n'est peut-être valide que pour l'image en question;
- Les relations entre les diverses classes et les groupes de classes doivent être bien structurées de façon à rendre notre structure souple, flexible et, si nécessaire, facilement modifiable;
- Utiliser au maximum les caractéristiques des objets calculés par le logiciel utilisé et n'avoir recours à la personnalisation de nouvelles caractéristiques que lorsque nous n'avons plus le choix. Ceci permettra aux utilisateurs de comprendre plus facilement la structure développée;

- Les images du 6 janvier, 30 janvier et 4 mars 2002 ont servi comme source de développement de la structure. L'image du 11 février 2003 a servi pour tester et valider la structure (figure 6.14).



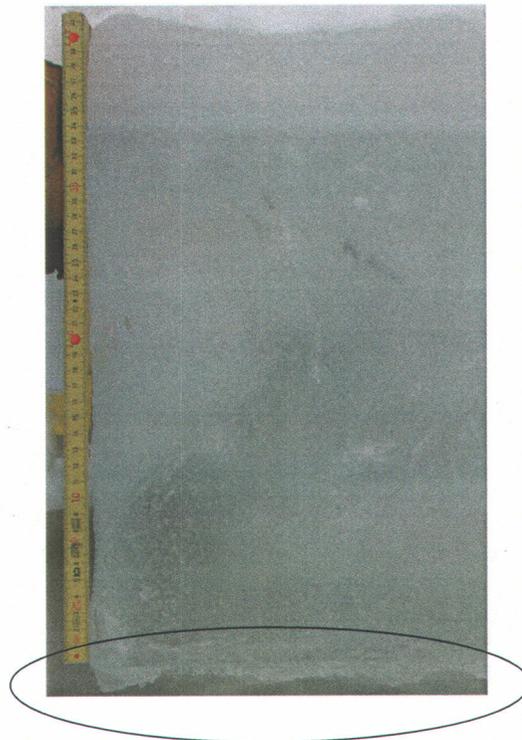
**Figure 6.14 : Schéma d'utilisation des images RADARSAT-1 pour le développement de la structure hiérarchique et la classification Orientée Objet.**

### 6.2.1 Eau libre

Bien qu'elle ne soit pas en soi une classe de glace de rivière, l'eau libre est la classe qui signifie l'absence de glace. Dans l'exercice de caractérisation de la glace de rivière que nous menons, l'eau libre est considérée comme la classe nulle. L'importance que revêt une bonne distinction de cette classe est capitale. En fait, dans les conditions hivernales, plus l'eau est libre sur une rivière plus les risques liés au couvert de glace s'atténuent. À l'opposé, si une rivière est complètement couverte de glace, il faut doubler de vigilance, car il y a une forte probabilité d'occurrence des phénomènes problématiques liés au couvert de glace. Un autre élément important, c'est que les équations d'hydrodynamique appliquées au cours d'eau dépendent fortement de la présence ou absence de l'eau libre. En fait, les équations de calcul du débit en présence d'un couvert de glace complet sont différentes de celles appliquées quand c'est un écoulement à l'eau libre. Il est donc très important de pouvoir déterminer la présence et la distribution spatiale de l'eau libre sur une rivière. Le problème principal qui se présente lors de l'utilisation des images RADARSAT, c'est que le signal radar de l'eau libre peut théoriquement se confondre avec celui du couvert de glace. En effet, selon la théorie de base du signal radar, s'il y a un fort contraste diélectrique à l'interface de deux milieux, le retour du signal dépend de la rugosité de la surface de cette interface. Plus cette surface est rugueuse plus il y a retour du signal, et à l'inverse, plus elle est lisse plus le retour est faible, la diffusion de surface est dite alors spéculaire. L'eau libre, en absence des vaguelettes de surface, est considérée comme surface spéculaire vis-à-vis du signal RADARSAT et apparaît comme des zones sombres sur les images. Cependant, ce n'est pas toute zone sombre sur la rivière qui doit être considérée automatiquement comme de l'eau libre. En effet, comme nous l'avons

présenté dans la figure 2.15 du chapitre 2, dans le cas d'une glace thermique très homogène l'interface glace noire / eau peut être spéculaire si la rugosité est faible. Dans ce cas, le retour du signal Radar est similaire à celui de l'eau libre. Un autre cas plus complexe peut mener au même constat, il s'agit de la présence de neige humide sur un couvert de glace. Étant donné que la neige humide absorbe le signal radar les pixels apparaissent aussi sombres. De ce qui précède, nous constatons que théoriquement plusieurs conditions mènent au même constat sur les images RADARSAT.

Pratiquement, nous avons constaté une nette distinction entre l'eau libre et la glace thermique sur toutes les images RADARSAT analysées. En fait, bien que la glace thermique présente une faible rétrodiffusion, cette dernière reste relativement forte par rapport à celle de l'eau libre. Théoriquement, pour que l'interface eau / glace thermique soit spéculaire dans les images RADARSAT il faut que sa rugosité soit inférieure à 0,7 cm (section chapitre 2). La figure 6.15 présente un échantillon de glace thermique prélevé sur la zone de l'aéroport le 11 février 2003. Nous observons que la rugosité à l'interface eau / glace est nettement supérieure au seuil précité.



**Figure 6.15 : Photos de glace thermique de la zone de l'aéroport le 11 février 2003.**

Il arrive que dans des images RADARSAT analysées le signal soit faible dans les zones où il y a présence de glace thermique. Toutefois, à l'opposé des zones d'eau libre, les pixels qui présentent un tel patron sont éparpillés alors que l'eau libre apparaît toujours comme des zones sombres homogènes. À partir de ce qui vient d'être mentionné, nous retenons ce qui suit :

1. Il est important de pouvoir déterminer l'eau libre;
2. Théoriquement, il y a possibilité que le signal radar de l'eau libre se confonde avec d'autres types de glace de rivière;
3. Pratiquement, le signal de l'eau libre est plus faible que la glace de rivière à cause de la difficulté d'avoir un couvert de glace présentant une très faible rugosité;
4. Les zones d'eau libre sont homogènes.

De ce qui précède, nous avons fixé comme objectif de pouvoir identifier les quatre éléments suivants reliés à l'eau libre :

1. Zones complètement ouvertes : ce sont les parties de la zone d'étude où l'eau est libre sur toute la largeur de la rivière;
2. Zones partiellement ouvertes : là où le profil transversal de la rivière est constitué à parts égales d'eau libre et de glace de rivière;
3. Petits chenaux d'eau libre : parties de la rivière couvertes de glace avec la présence d'un chenal d'eau libre;
4. Spots d'eau libre, partie de la rivière couverte de glace avec présence d'eau libre, la différence avec un chenal d'eau libre réside dans la forme et la taille.

Pour ces quatre éléments, le point de départ est l'amplitude du signal rétrodiffusé. La figure 6.16 présente l'organigramme de décision pour définir les éléments reliés à l'eau libre. Nous considérons tout objet dont l'amplitude moyenne est inférieure à 0.9 comme étant de l'eau libre. Si la superficie relative (SR) de cet objet est supérieure à 75 %, il est considéré comme zone complètement ouverte. La superficie relative est une nouvelle caractéristique que nous avons introduite pour calculer l'importance qu'occupe un objet dans son entourage, en terme de superficie (équation 6.1).

$$Superficie\_relative = \frac{SOAF}{\sum SOAANF} \quad \text{Équation 6.1}$$

Où :

SOAF : superficie de l'objet dont l'amplitude est faible;

SOAANF : superficie des objets avoisinants dont l'amplitude n'est pas faible.

Dans le cas où la superficie relative est comprise entre 0,25 et 0,75, l'objet est classé comme zone partiellement ouverte. Il reste alors le cas où la SR est inférieure à 0,25. Dans ce cas, si l'objet est en contact avec une des classes précitées, il est considéré comme appartenant à celle-ci, sinon le paramètre asymétrie est utilisé pour discriminer entre les classes « chenal d'eau libre » et « spot d'eau libre ». En fait, il a été observé qu'un chenal d'eau libre a une symétrie supérieure à 0,85.

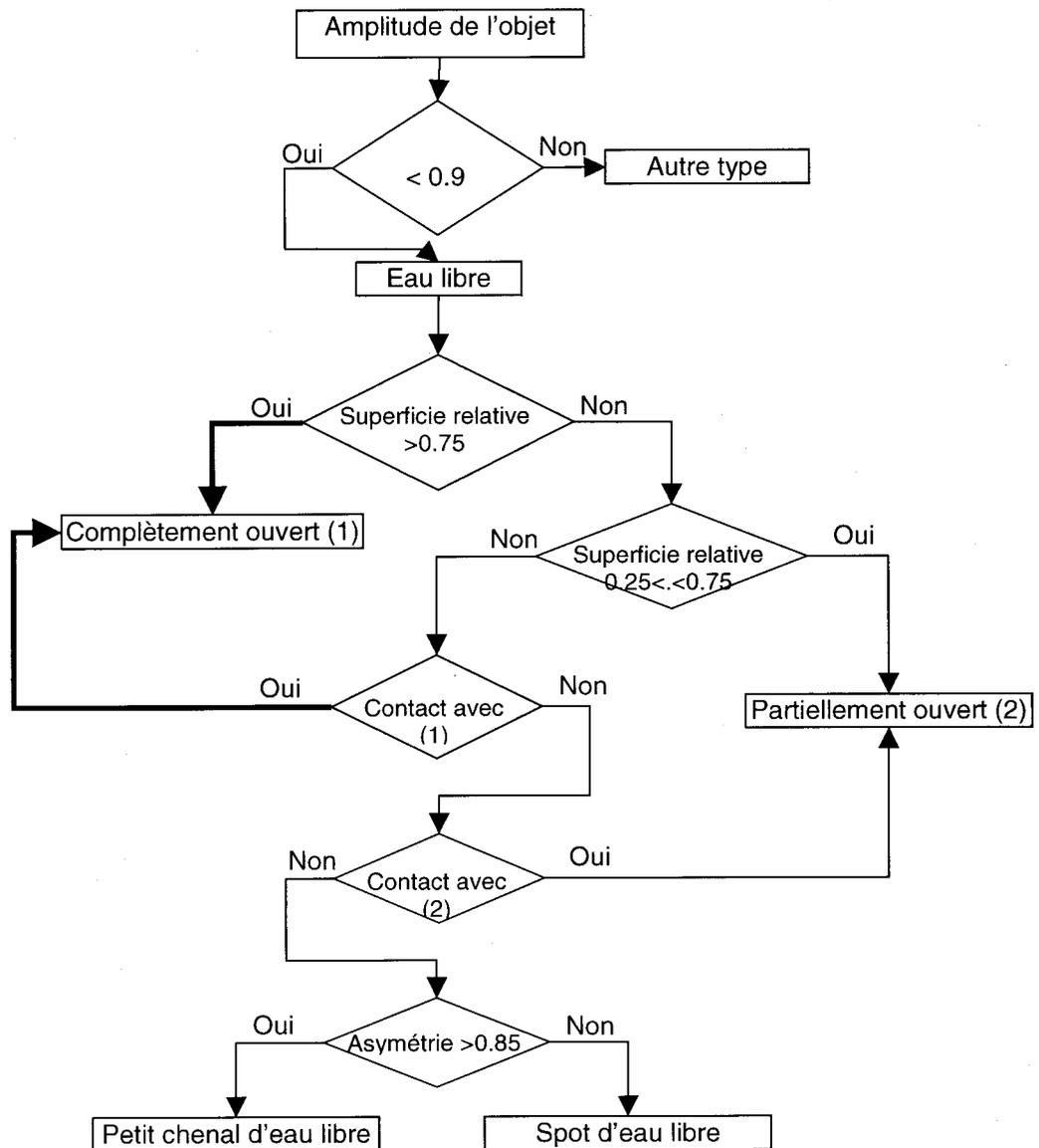


Figure 6.16 : Organigramme décisionnel pour l'eau libre et ses sous-classes.

### **6.2.2 Glace thermique**

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les conditions de formation de la glace thermique. Nous avons ainsi vu qu'elle se forme dans les zones où l'écoulement est laminaire notamment proche des rives (y compris les îles). La glace thermique est un type de glace très important à observer puisqu'elle peut intervenir lors d'embâcles. En effet, lorsqu'elle se détache mécaniquement, elle forme des blocs compacts et volumineux qui dévalent la rivière. Ils peuvent ainsi former des bouchons dans les zones d'obstruction et causer des dégâts matériels lors d'inondations. Le couvert de glace thermique lorsque fortement consolidé constitue en soit un obstacle naturel à tout ce qui vient de l'amont. La figure 6.17 présente une feuille de glace thermique qui obstrue un chenal d'eau libre, tandis que la figure 6.18 présente des blocs compacts de glace thermique sortant du couvert de glace.



**Figure 6.17 : Feuille de glace thermique bloquant un chenal d'eau libre.**



**Figure 6.18 : Blocs de glace thermique consolidés.**

Dans les images RADARSAT analysées, la zone type de formation par excellence de la glace thermique est celle de l'aéroport. Nous avons observé un couvert thermique complet, épais, et permanent. Les données historiques convergent aussi vers le même constat puisque cette zone a été couverte de glace thermique durant toute la période des données. La zone de l'aéroport est une zone large avec une profondeur considérable. Nous avons aussi observé la présence de ce type de glace dans des zones de largeur et profondeur moyennes et de faible sinuosité et aussi dans les parties de la rivière où de grandes îles sont présentes. Dans ce dernier cas, le couvert de glace thermique se développe dans les rives de la rivière et poursuit sa croissance jusqu'à ce qu'il soit complet au centre du chenal d'écoulement. Comme nous l'avons présenté ci-haut, le phénomène responsable de la rétrodiffusion dépend de la rugosité de l'interface eau / glace thermique. Ceci a été confirmé dans l'analyse de l'image polarimétrique CV-580 du 19 février 2003. La rétrodiffusion de la glace thermique est faible et son amplitude se situe aux alentours de 0,1 à 0,16. Nous pouvons avancer les règles suivantes pour la classification d'un couvert complet de glace thermique :

1. Amplitude du signal radar moyenne et homogène;
2. Zone de la rivière où la largeur varie de moyenne à importante, idem pour la profondeur et où la sinuosité est faible;
3. Zone de la rivière où il y a présence de grandes îles;
4. Les feuilles de glace thermiques peuvent se déplacer dans la rivière et se retrouver un peu partout.

Relativement à cette classe de glace, nous avons essayé de classer les éléments suivants :

1. Glace thermique;
2. Couvert complet de glace thermique et;
3. Glace de rive thermique.

La figure 6.19 présente l'organigramme décisionnel relatif à la classification de ces éléments. Nous avons considéré les objets dont l'amplitude est située entre 0,1 et 0,16 comme étant de la glace thermique. L'objet est classé comme étant un couvert complet de glace thermique si une des conditions suivantes est rencontrée :

- largeur de l'objet égale à la largeur de la zone de la rivière où il est situé;
- objet de grande taille et situé à proximité d'une grande île;
- objet de glace thermique entouré à 75 % d'objet de la même classe.

La glace thermique est classée comme étant glace de rive thermique si les trois conditions suivantes sont satisfaites:

- Aucune des conditions précitées pour le couvert complet ne se réalise;
- l'objet est en contact avec une zone d'eau libre partiellement ouverte;
- l'objet est situé sur la rive.

Si la dernière condition ne se réalise pas, l'objet est classé comme feuille de glace thermique. À noter l'existence d'un cas exceptionnel d'objet de moyenne amplitude qui n'est pas de la glace. En fait, nous avons observé dans les zones de rapides une moyenne amplitude bien que la réalité correspond à de l'eau libre. Donc, la classe « rapides » correspond aux objets de moyenne amplitude, entourés complètement d'eau libre et situés dans une zone de rapides.

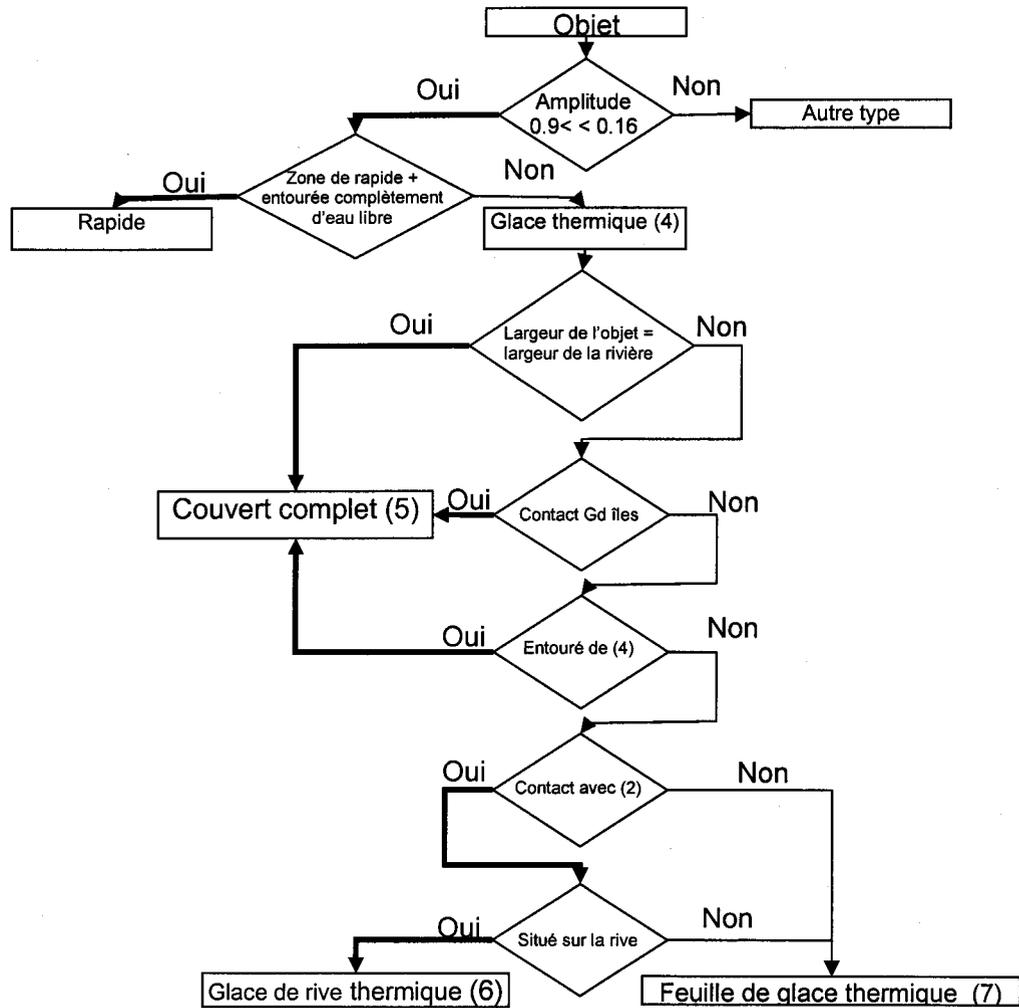
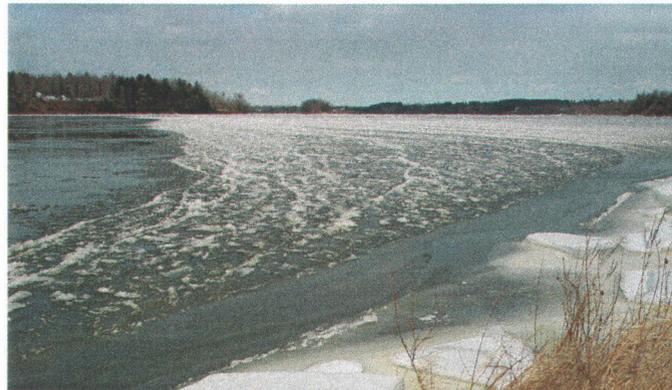


Figure 6.19 : Organigramme décisionnel pour la glace thermique et ses sous-classes.

### 6.2.3 Glace de rives

Nous venons de voir dans la section précédente que la glace thermique se forme proche des rives de la rivière et des grandes îles. Cependant, est-ce que toute la glace de rive est une glace thermique? La réponse est non. En fait, bien que la glace de rive se forme essentiellement de glace thermique, il arrive que du frasil et/ou de la neige demi-fondue se joignent à cette structure. La figure 6-20 présente une accumulation de frasil proche de la rive observée le 4 mars 2002.



**Figure 6.20 : Accumulation de frasil le 4 mars 2002 en face du point d'observation #6A.**

Un autre élément essentiel pour la glace de rive réside dans le fait qu'elle peut croître verticalement jusqu'à atteindre le lit de la rivière. En fait, la profondeur de l'eau est très faible proche des rives. Donc, en termes de rétrodiffusion des images RADARSAT, la glace de rive peut présenter plusieurs valeurs possibles selon les cas suivants :

- Faible rétrodiffusion correspondante à une glace thermique dont l'interface inférieure est l'eau ou les sédiments du lit de la rivière;
- Rétrodiffusion moyenne si (i) le frasil et/ou la neige fondue entre dans la formation de la glace de rive (ii) la glace thermique atteint le lit de la rivière où se trouvent de gros rochers ce qui augmentera la rugosité;
- Forte rétrodiffusion lorsque la glace agglomérée s'accumule sur les rives.

Nous avons présenté dans la section précédente comment classifier la glace de rive thermique. Nous y ajoutons les deux conditions suivantes :

- si l'amplitude est située entre 0,16 et 0,25 : le frasil est considéré comme un constituant de la glace de rive;
- si l'amplitude est supérieure à 0,25, il y a présence de glace agglomérée sur la rive.

#### 6.2.4 Neige humide

Au chapitre 2, nous avons vu que la neige humide absorbe le signal radar. Il en découle donc qu'un couvert de glace couvert de neige humide apparaît sombre dans une image RADARSAT. Nous avons vu qu'il est important de définir les zones d'eau libre et de ne pas les confondre avec d'autres types de glace. La neige humide conduit à une information erronée sur l'absence du couvert de glace. La figure 6.21 présente l'exemple de l'image RADARSAT du 24 mars 2001 où il y avait présence de neige humide sur le couvert de glace. Nous avons noté que lorsqu'il y a présence de neige humide cette tendance est générale et affecte tout le tronçon et non pas quelques portions seulement. Si pour cette image nous nous fions seulement sur la rétrodiffusion, nous aurions conclu qu'il n'y pas de couvert de glace et que l'eau est libre sur tout le tronçon. Évidemment, ceci est une grave erreur de jugement et peut conduire à prendre de mauvaises décisions sur la gestion de la glace de rivière. À partir de ce qui précède et en comparant cette image avec (i) l'image du 17 avril 2001 où il s'agissait bel et bien d'eau libre sur toute la rivière (figure 6.22) et (ii) le survol aérien du (2002) nous avons établi les règles suivantes :

- Même si le couvert de glace fond, il ne disparaît pas d'un coup;
- Le couvert de glace persiste dans les zones d'accumulation (rives) situées à la partie aval de la rivière (figure 6.22);
- Durant toutes les campagnes d'observation que nous avons menées, si la glace est couverte de neige, elle l'est sur tout le tronçon étudié.

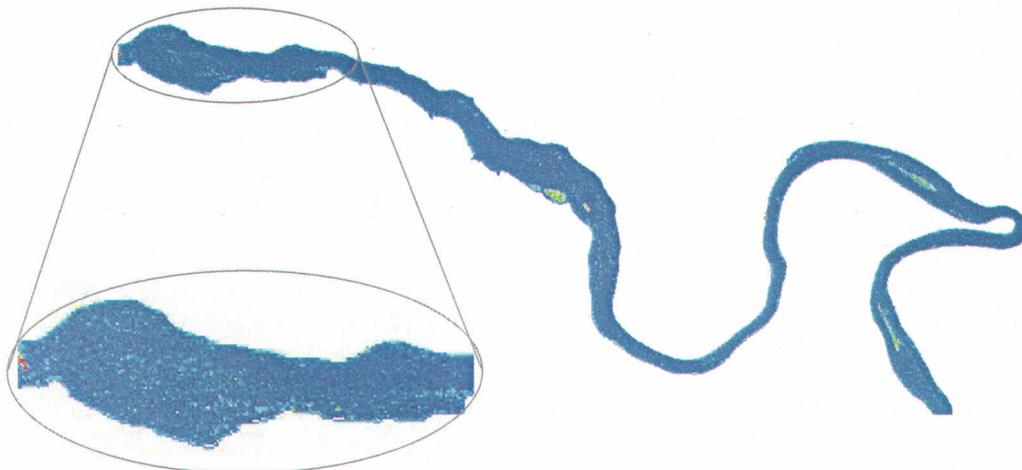
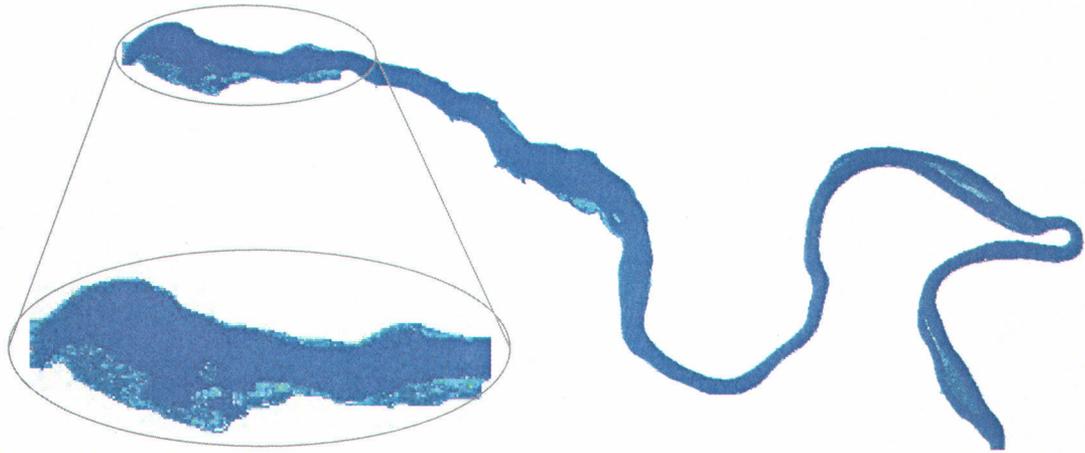


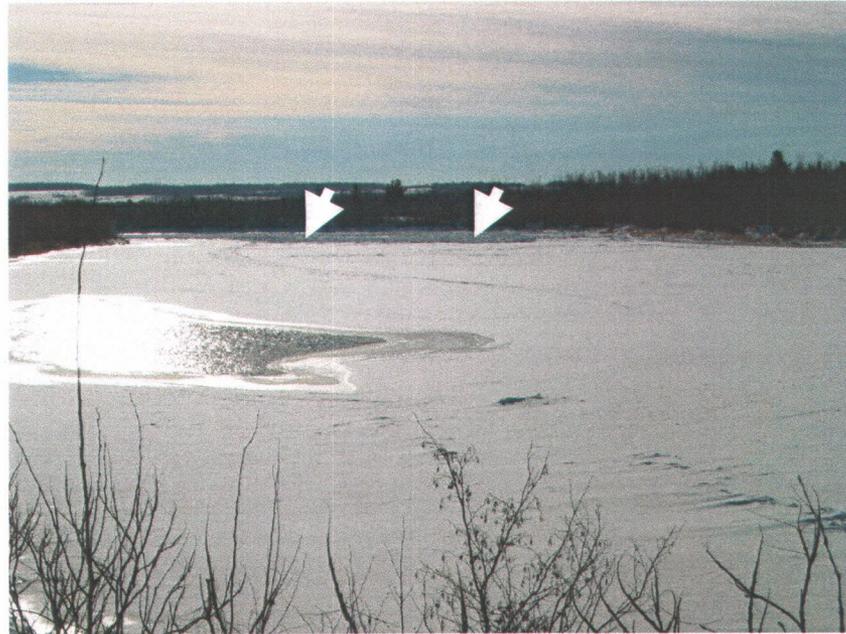
Figure 6.21 : Image RADARSAT du 24 mars 2001, neige humide.



**Figure 6.22 : A : Image RADARSAT du 17 avril 2001, eau libre et glace de rive.**

### **6.2.5 Glace agglomérée et zone d'embâcle**

Ce type de glace est essentiellement formé par le regel d'une agglomération de pièces de couvert de glace (figure 6.18). En effet, dans les zones vulnérables et sous un effet mécanique le couvert de glace peut céder et se concasser, les blocs ainsi libérés flottent et suivent le courant. Cependant, dans les zones d'obstruction, la course de ces blocs est freinée. Il est évident qu'avec un couvert formé de blocs de quelques mètres la rugosité à l'interface eau/couvert est énorme. Ainsi, nous avons exposé dans l'analyse qualitative que les zones de la rivière dont la rétrodiffusion est maximale sont fort probablement des zones de glace agglomérée. En effet, toutes les photos prises de glace agglomérée correspondent à des objets de forte rétrodiffusion. La figure 6.23 présente un couvert de glace agglomérée freinée par un couvert thermique.



**Figure 6.23 : Glace agglomérée en amont d'un couvert de glace thermique.**

L'embâcle est une accumulation stationnaire de glace fragmentée ou de frasil qui obstrue l'écoulement. La glace agglomérée peut donc former un embâcle s'il y a un risque d'obstruction de l'écoulement. L'organigramme de la figure 6.24 présente les règles décisionnelles relatives à la glace agglomérée et aux zones d'embâcles. Dans cette figure, toute amplitude supérieure à 0.25 et inférieure à 0,50 est classée comme de la glace agglomérée. Cependant, si l'amplitude est inférieure à 0,3 la glace est considérée comme moyennement agglomérée. Si dans ce dernier cas, le couvert de glace agglomérée est situé dans une zone d'agglomérat de petites îles, il est considéré comme à risque d'embâcle. Dans le cas où l'amplitude est située entre 0.3 et 0.5, le couvert de glace est classé comme étant de la glace fortement agglomérée. Cependant, si toute la largeur de la rivière est occupée par ce type de glace, il y a un risque d'embâcle. Dans ce cas, nous analysons la profondeur, si elle est grande le risque est modéré, par contre si la profondeur est faible le risque d'embâcle est considérable.

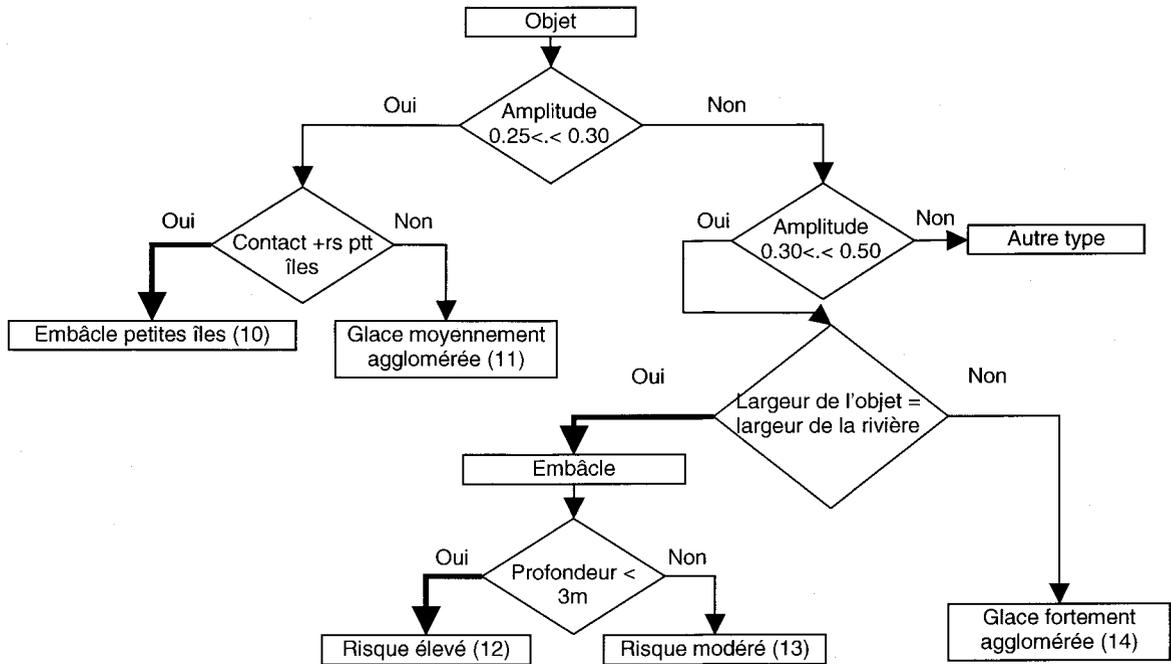


Figure 6.24 : Organigramme décisionnel pour la glace agglomérée et zones d'embâcle.

### 6.2.6 Glace secondaire vs glace superposée

Dans cette section, nous nous intéressons principalement aux types de glace de rivière dont l'amplitude du signal rétrodiffusé est située entre 0,16 et 0,25. En haut, nous avons vu les caractéristiques d'un couvert de glace thermique. Cependant, un couvert de glace primaire peut être formé à partir du frasil et de ses multiples variantes évolutives (chapitre 2). La figure 6.25 présente un couvert de glace formé à partir de radeaux de glace. Il est évident qu'après consolidation de ce couvert, sa texture et son homogénéité seront très différentes d'un couvert thermique, avec une rugosité de l'interface eau/couvert de glace plus élevée.



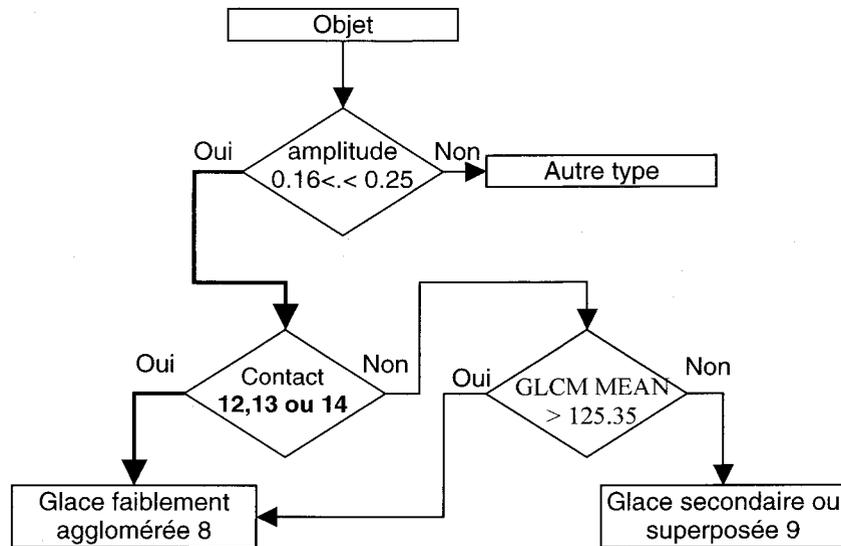
**Figure 6.25 : Couvert de glace en phase de formation à partir de radeaux de glace.**

En guise de rappel, la glace secondaire inclut toute forme de glace qui se forme en dessous du couvert de glace primaire, tandis que la glace superposée est celle qui se forme par au-dessus. La première catégorie compte quatre sous-classes alors que la deuxième en compte trois. Dès lors, il y a une multitude de combinaisons de formation d'un couvert de glace avec les différents types susmentionnés. À noter que quels que soient les types de glace qui se trouvent en dessous du couvert primaire, il y a une limitation de la pénétration du signal radar due au niveau de l'eau liquide. Le signal rétrodiffusé résulte alors soit de la diffusion de surface, soit de la diffusion de volume du couvert hétérogène de glace, soit d'une combinaison des deux. Dans l'analyse polarimétrique, nous avons confirmé que ces deux types de rétrodiffusion sont impliqués avec une prédominance de la diffusion de surface. Nous pouvons donc considérer que les objets dont la rétrodiffusion est moyenne comme appartenant à cette catégorie du couvert de glace. Les règles suivantes sont déduites :

- En aval d'une zone de rapide, il y a de fortes chances d'avoir un couvert primaire à base de frasil;
- Selon la figure 2.8, il est fort probable qu'un barrage suspendu se forme dans les régions de largeur moyenne à faible et dont la profondeur varie de faible à moyenne;
- Les changements de débits submergent plus les zones moins larges de la rivière que celles dont la largeur est importante. Ainsi, ceci favorise la formation de glace superposée sur un couvert de glace primaire;

- Vu que la diffusion de surface est le phénomène prédominant pour un tel couvert de glace, la rugosité dans l'interface eau/couvert est importante, mais reste à l'échelle de la longueur d'onde du signal;
- Un tel couvert se retrouve dans des zones de la rivière où la largeur, profondeur et sinuosité demeurent relativement stables et en absence des zones qui obstruent l'écoulement (agglomérat de petites îles et zone d'engorgement).

La figure 6.26 résume les éléments à prendre en compte pour la classification du couvert de glace secondaire ou superposée. Si l'amplitude d'un objet se situe entre 0,16 et 0,25 et qu'il est en contact avec une glace agglomérée (moyenne ou forte) il est classé comme étant de la glace faiblement agglomérée. Il est aussi classé dans cette classe si le paramètre de texture GLCM MEAN est supérieur à 125.35. Sinon, l'objet est considéré comme un couvert de glace secondaire ou superposée.



**Figure 6.26 : schéma de classification du couvert de glace secondaire.**

### 6.2.7 Synthèse de la structure hiérarchique

Nous venons de présenter les principales règles pour caractériser la glace de rivière de notre site d'étude. La figure 6.27 montre une vue globale de la structure hiérarchique de la classification orientée objet développée. La figure (6.27a) présente les liens de la structure de hiérarchie d'héritage, tandis que la figure (6.27b) présente les groupes de classes.



a)

b)

Figure 6.27 : Structure hiérarchique de la classification Orientée Objet développée.

La différence entre les deux composantes de la structure hiérarchique se résume au fait que la partie d'héritage permet aux objets reliés hiérarchiquement d'hériter d'attributs les uns des autres. La hiérarchie en groupe permet de regrouper des classes dont les attributs peuvent être totalement différents. En guise d'exemple, nous remarquons que les classes, îles amont, aval et petites îles sont indépendantes dans la structure de hiérarchie d'héritage. En fait, aucune de ces classes n'hérite des attributs d'une autre. Cependant, dans la partie structure de hiérarchie en groupe, nous trouvons que îles amont et îles aval sont regroupées sous le groupe « Grandes et Moyennes îles ». Ce dernier forme avec les petites îles le groupe des « Iles ». Par ce fait, si nous cherchons à déterminer la proximité d'un objet à une île, il suffit de chercher la caractéristique de l'objet : distance à « Iles-Groupe ». Il est possible aussi avec la structure de hiérarchie en groupe de choisir les classes ou les groupes de classes que nous voulons afficher. Nous pouvons ainsi afficher juste les groupes « eau libre » vs « couvert de glace » ou toute autre combinaison souhaitée (figure 6.29). L'organigramme global de la structure hiérarchique développé est présenté dans la figure 6.28.

Nous présentons dans la section qui suit les principaux niveaux d'information sur la caractérisation de glace obtenue. L'image du 30 janvier 2002 est utilisée comme démonstration, tandis que l'image du 11 février 2003 est utilisée pour tester la structure hiérarchique développée. Pour cette dernière image, les photos du survol hélicoptère ont été utilisées pour la validation.

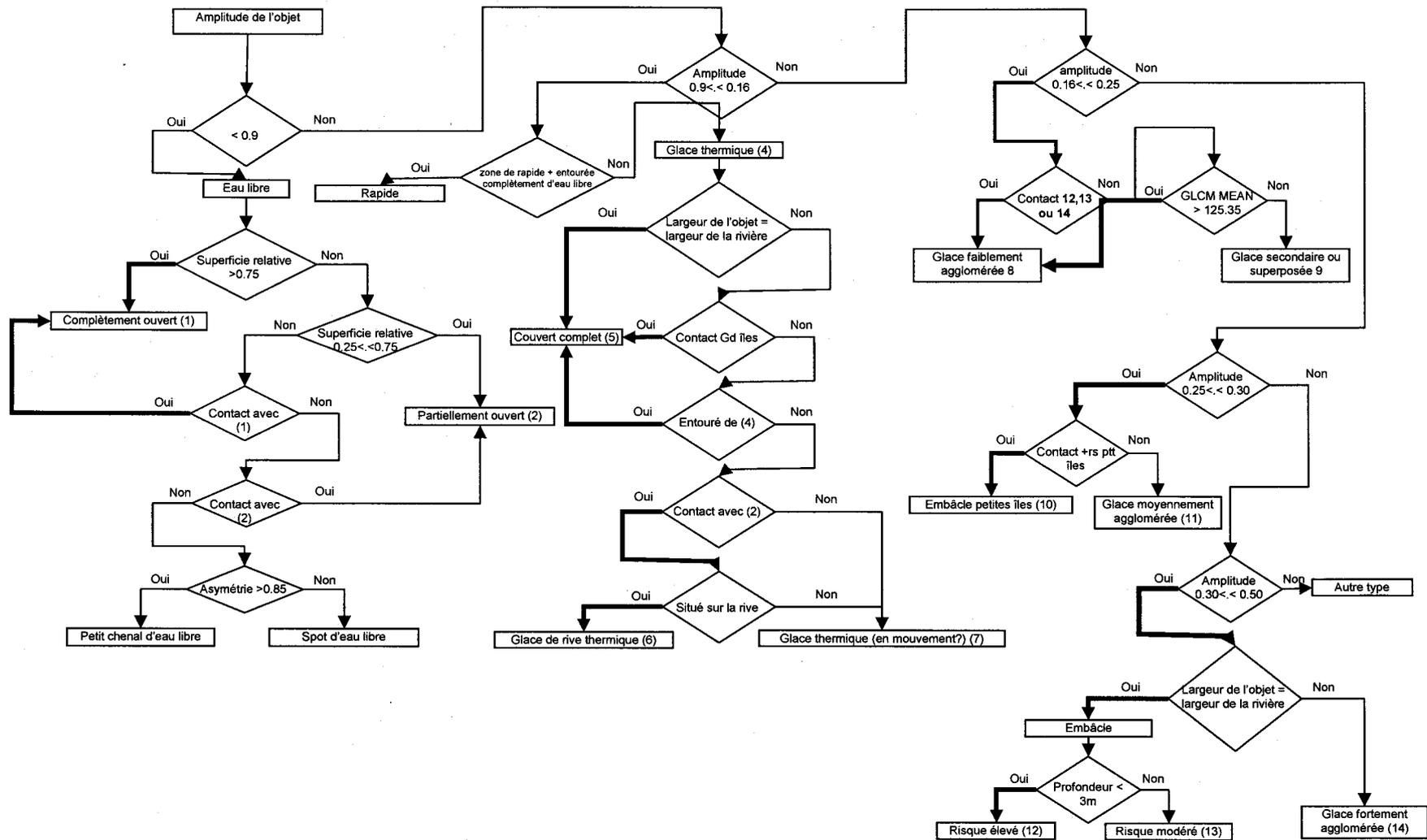


Figure 6.28 : Organigramme général de la Structure Hiérarchique de la Classification Orientée Objet.

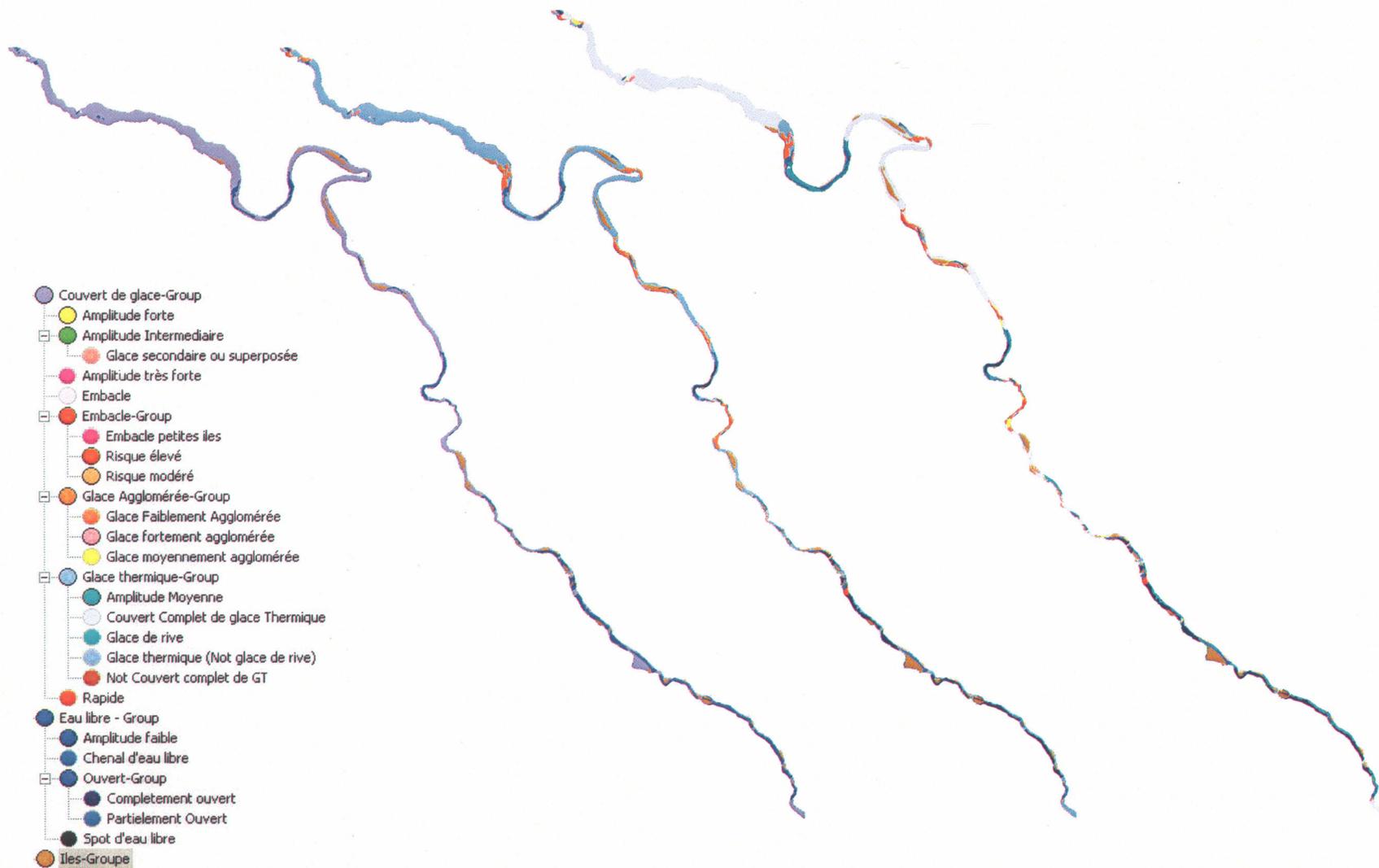


Figure 6.29 : Classification de l'image du 30 janvier 2002 avec différents niveaux d'information.

## 6.3 Résultats classification orientés objet

### 6.3.1 Différents niveaux d'information, image du 30 janvier 2002

Les figures (6.30 à 6.36) présentent un exemple des divers niveaux d'information que nous pouvons obtenir.

La figure (6.30) présente le niveau d'information le plus élémentaire. À ce niveau l'information mise en valeur est de savoir où il y a couvert de glace et où il n'y en a pas. Ce niveau est élémentaire, mais cette information peut être utilisée pour :

- Préparer une campagne de mesures de terrain. Il est important de pouvoir identifier facilement les zones où il est possible de prendre des mesures;
- Suivre l'évolution du front de glace dans le même hiver ou pouvoir comparer sommairement l'état de la glace de rivière avec les autres années. Cette information peut être utilisée par exemple dans les études sur les changements climatiques où l'intérêt est plus mis sur les dates d'apparition et disparition du couvert de glace que sur la nature du couvert.

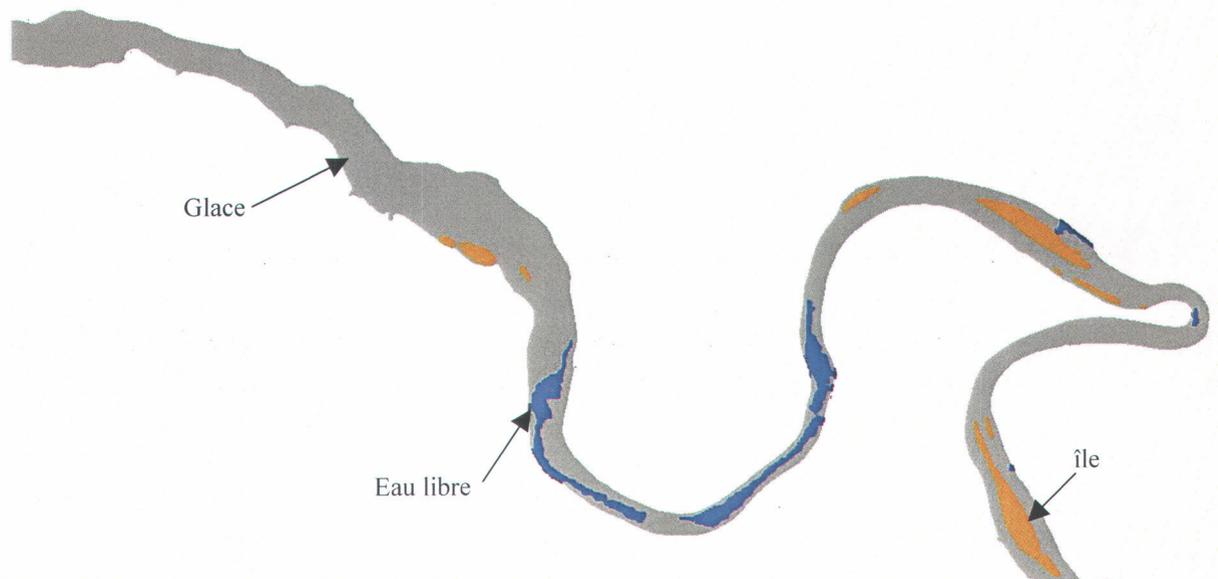
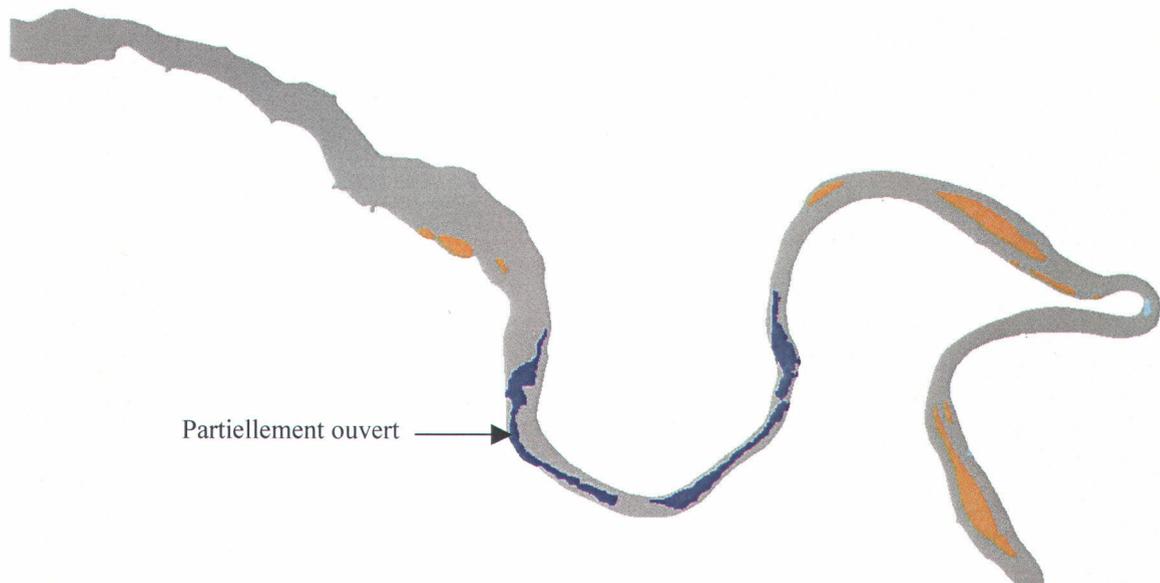


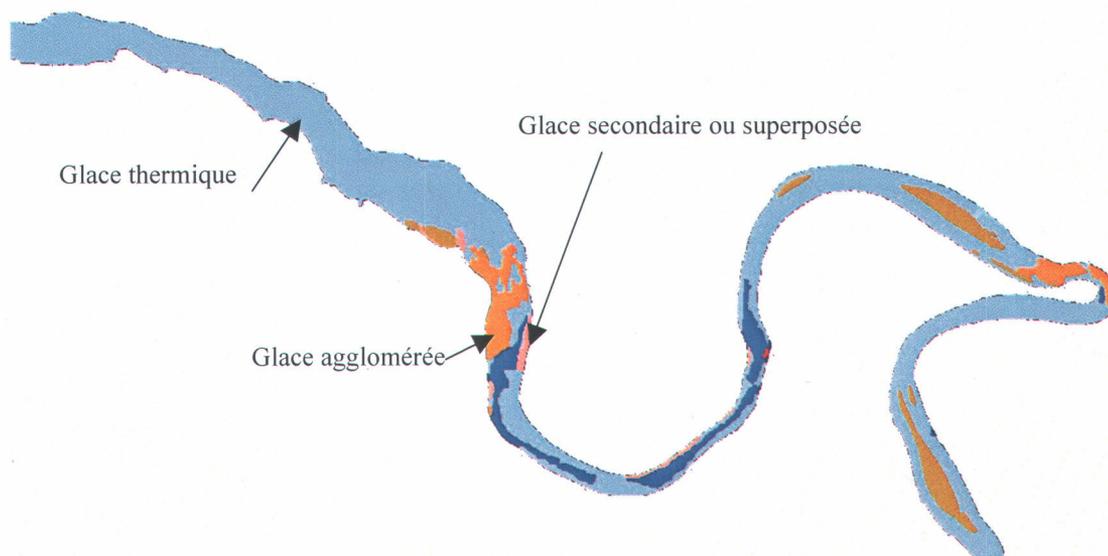
Figure 6.30 : Exemple de classification de la glace de rivière vs l'eau libre (30 janvier 2002).

Dans la figure 6.31, nous préservons toujours la même information sur le couvert de glace, cependant celle relative à l'eau libre est plus détaillée. En fait, nous remarquons que ce qui était présenté dans la zone « U » de la figure précédente comme étant uniquement de l'eau libre est maintenant présenté comme un chenal ouvert partiellement. Cette information est fortement intéressante lors de la modélisation des vitesses d'écoulement. En fait, les zones partiellement ouvertes sont des indicateurs sur les parties de la rivière où la vitesse d'écoulement est importante.



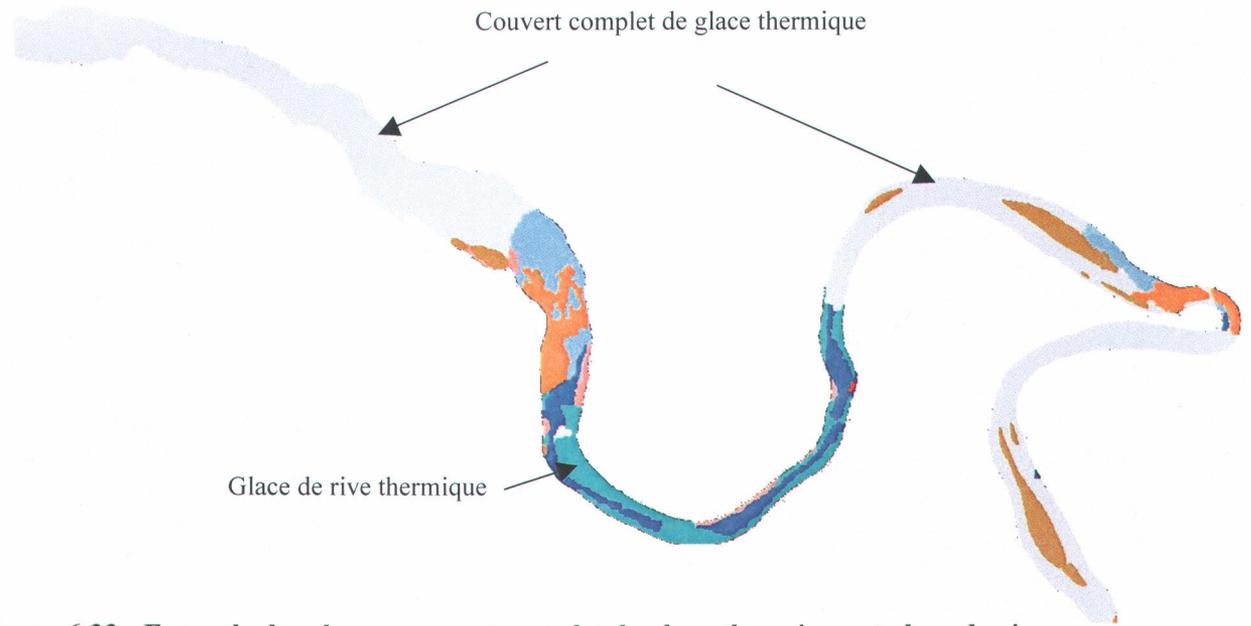
**Figure 6.31 : Exemple de classification des zones partiellement ouvertes (30 janvier 2002).**

Le niveau d'information suivant consiste à connaître la nature du couvert de glace présent. La figure 6.32 nous montre cette information, les classes glace thermique, glace agglomérée et glace secondaire ou superposée sont affichées. Ce niveau d'information peut être atteint avec des méthodes de classification conventionnelles (Gauthier *et al.*, 2006).



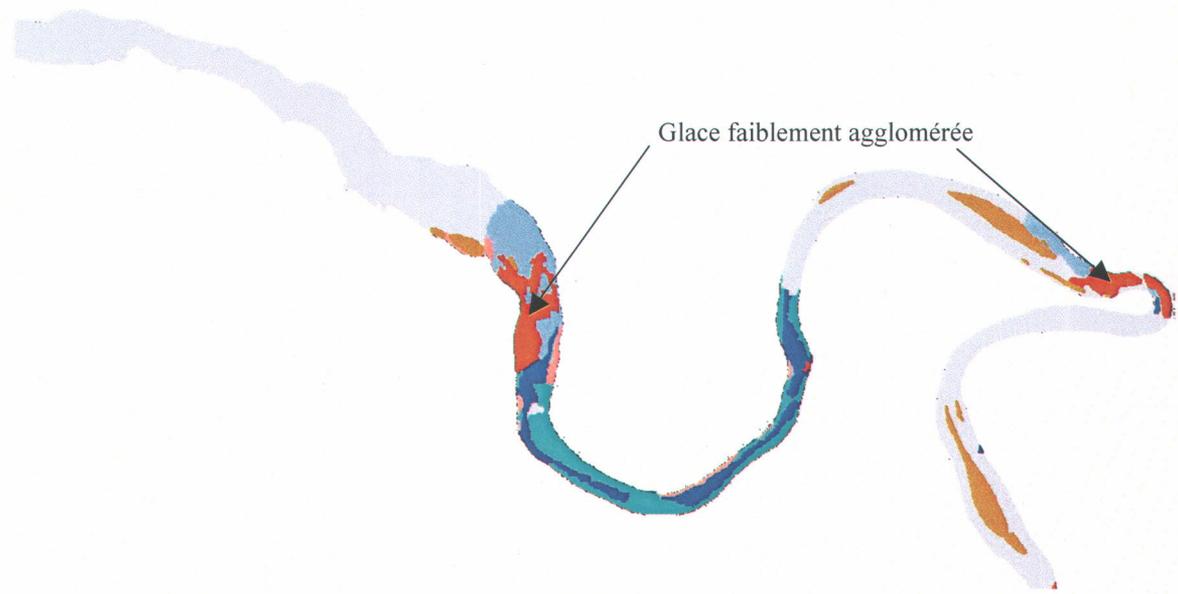
**Figure 6.32 : Exemple de classification du couvert de glace selon sa nature (30 janvier 2002).**

Nous avons remarqué dans la figure précédente que dans nombreuses parties de la rivière, la glace thermique forme un couvert complet. La figure 6.33 montre que désormais cette observation apparaît dans la classification. En plus, la glace thermique adjacente à la rive est maintenant classée comme de la glace thermique de rive. Donc, deux nouvelles classes qui reflètent un niveau d'information supérieure à celui obtenu avec les méthodes de classification conventionnelles où ce type d'information ne se reflète pas dans la classification.



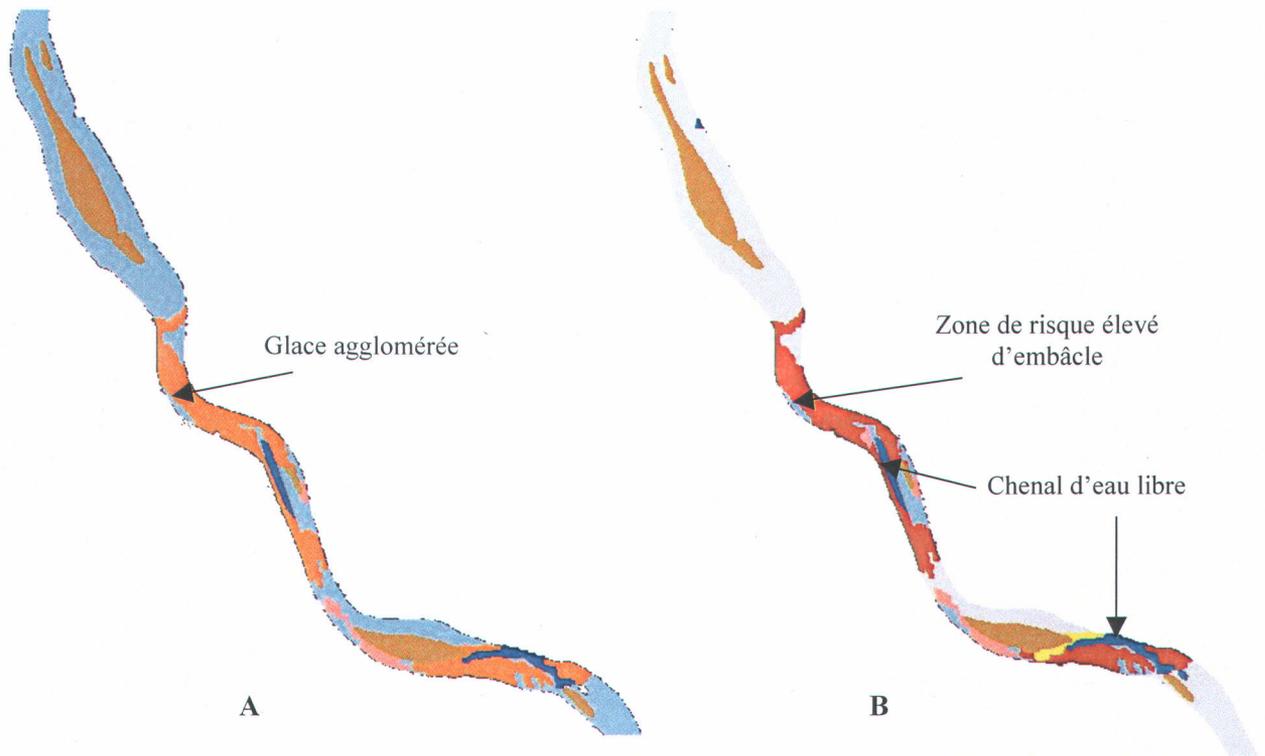
**Figure 6.33 : Exemple des classes couvert complet de glace thermique et glace de rive thermique (30 janvier 2002).**

Nous avons vu que dans la structure hiérarchique qu'il y a trois classes liées à la glace agglomérée : faiblement, moyennement et fortement agglomérée. Le groupe de classes « glace agglomérée » qui apparaît en orange dans la figure 6.33 contient ces trois sous-classes. Dans la zone du « bec du canard » et la zone des rapides Mkowksen la glace agglomérée est classée comme étant de la glace faiblement agglomérée (figure 6.34).

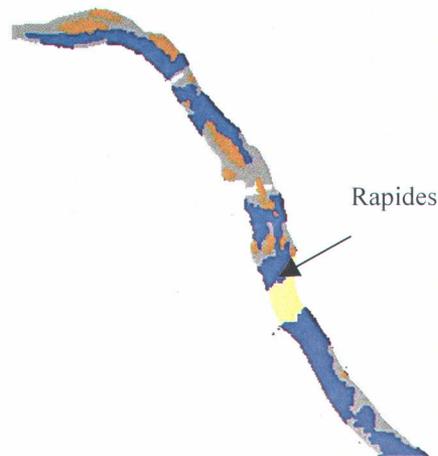


**Figure 6.34 : Exemple de la classe : glace faiblement agglomérée (30 janvier 2002).**

La glace fortement agglomérée est un bon indicateur de la formation d'embâcle. La figure (6.35-a) présente le niveau de classification du couvert de glace qui reflète seulement sa nature. Nous y remarquons la présence d'eau libre, glace thermique, secondaire ou superposée et finalement de glace agglomérée. La figure (6.35-b) présente un autre niveau d'information où nous observons la présence de la classe « glace fortement agglomérée » dans le méandre en amont de l'île Therrien. Puisque cette classe occupe la majorité de la largeur et que la profondeur est faible dans cette zone, elle a été classée comme « zone de risque élevé d'embâcle ». Dans la même figure (6.35-b), nous remarquons que les chenaux d'eau libre sont classés en tant que tels et non seulement comme de l'eau libre. Dans la figure 6.36, la classe « Rapides » apparaît, en jaune, en amont de la ville de Richmond. En fait, nous remarquons que l'eau libre entoure cette classe et que selon le SIG c'est une zone où la profondeur est très faible. En se fiant seulement au signal radar cette zone sera classée comme faisant partie du couvert de glace et plus spécifiquement comme de la glace thermique.



**Figure 6.35 : a- classification du couvert de glace selon sa nature, b- classification du couvert de glace selon ce qu'il représente; zone de l'île Therrien et de l'île Brown (30 janvier 2002).**



**Figure 6.36 : Exemple de la classe « rapides », zone de Richmond (30 janvier 2002).**

### 6.3.2 Résultat de la classification pour l'image du 11 février 2003

Dans cette section nous présentons le résultat de la classification de l'image RADARSAT-1 du 11 février 2003. Différents niveaux d'information sont exposés, nous avons utilisé les photos prises lors du survol hélicoptère du 12 février 2003 comme outil de validation.

#### 6.3.2.1 Classification au niveau glace - non glace

Les figures (6.37 à 6.39) présentent le premier niveau d'information, eau libre vs glace de rivière. Nous remarquons qu'à ce stade la correspondance entre la classification et la réalité terrain est très bonne. À noter que pour cette image, le couvert de glace est dominant par rapport à l'eau libre. En fait, la surface totale couverte de glace est de  $17,39 \text{ km}^2$  alors que celle de l'eau libre n'est que de  $0,54 \text{ km}^2$ .

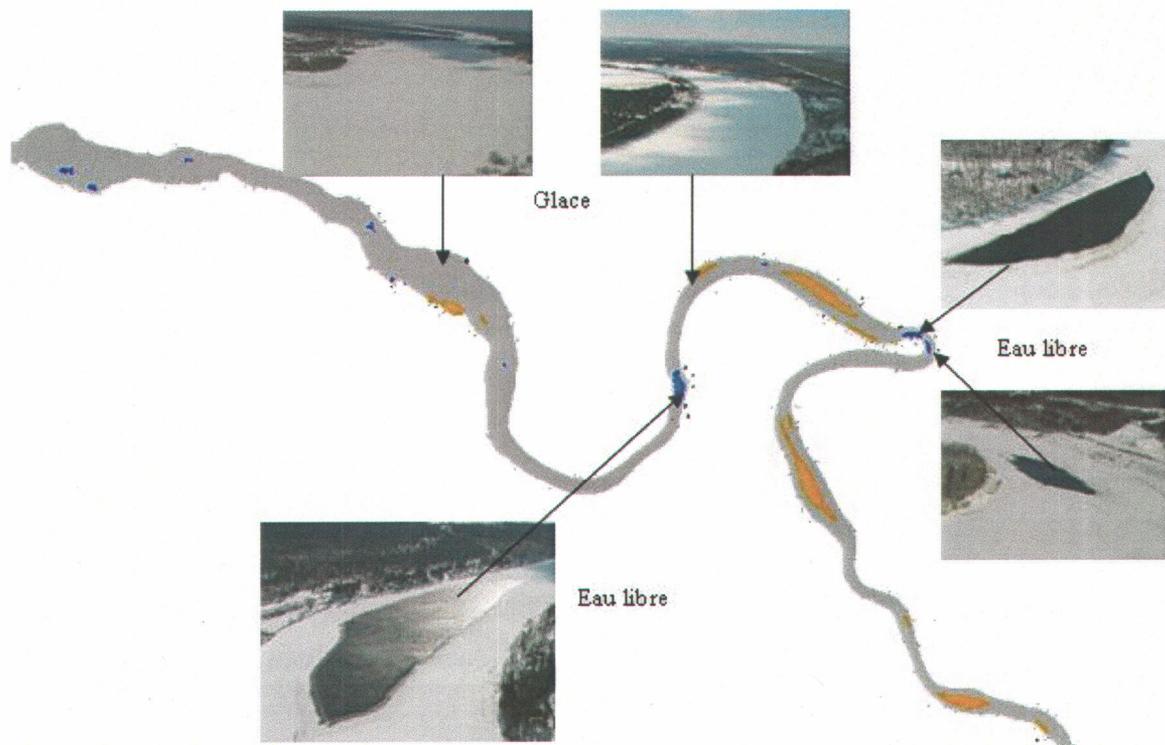
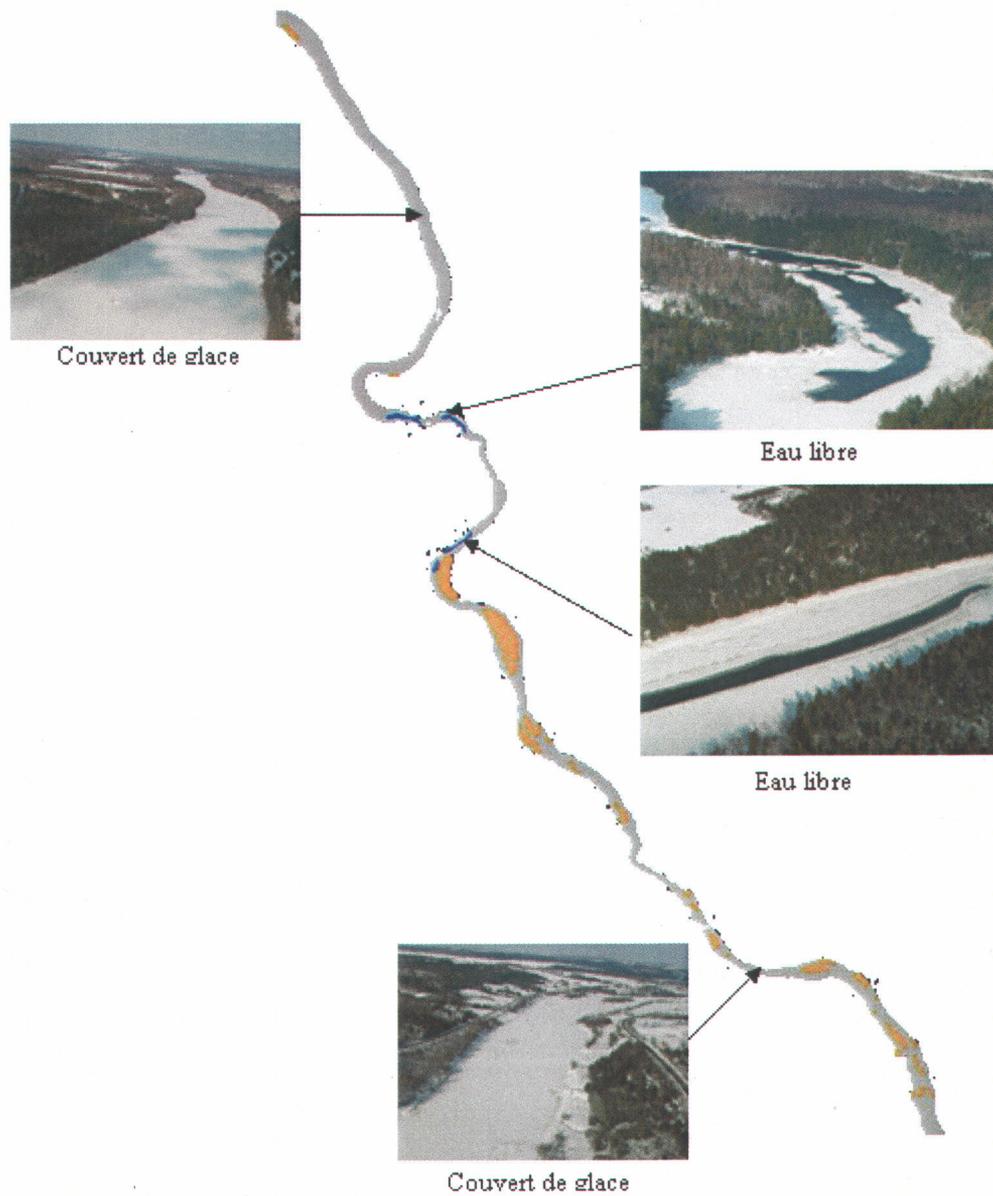
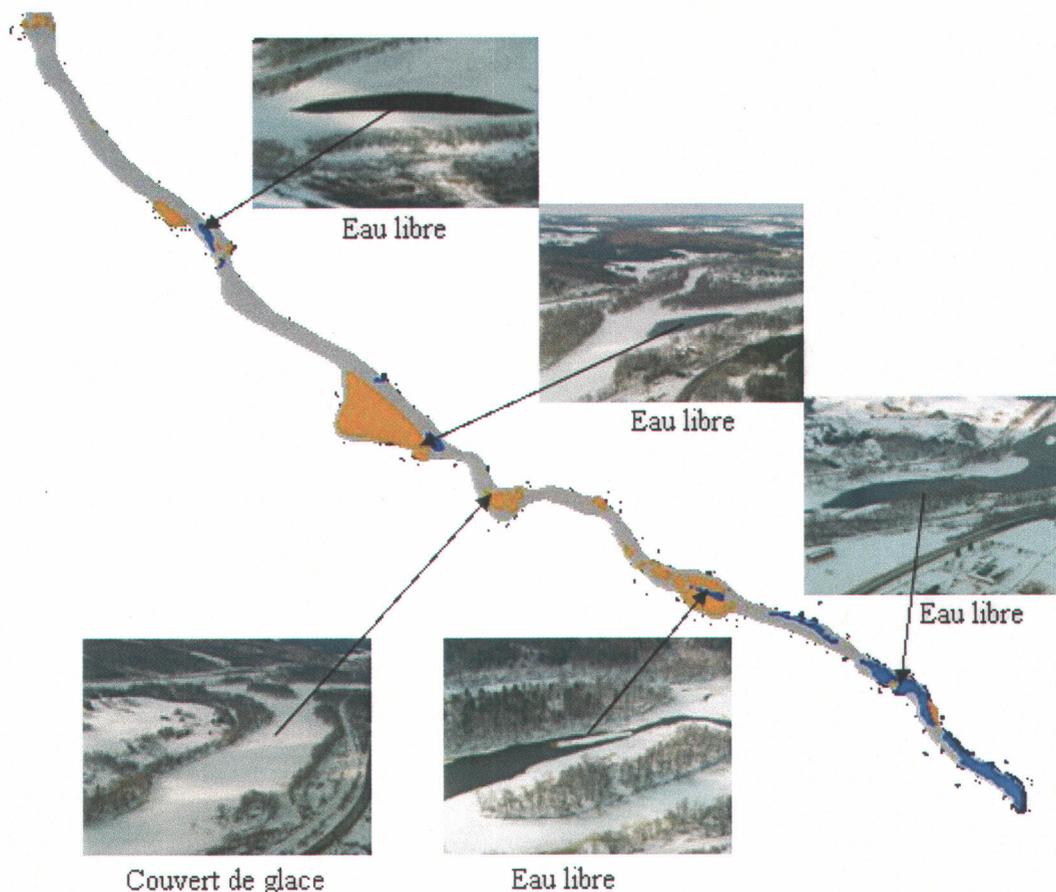


Figure 6.37 : Classification « eau libre vs couvert de glace » de la partie aval de l'image RADARSAT du 11 février 2003.



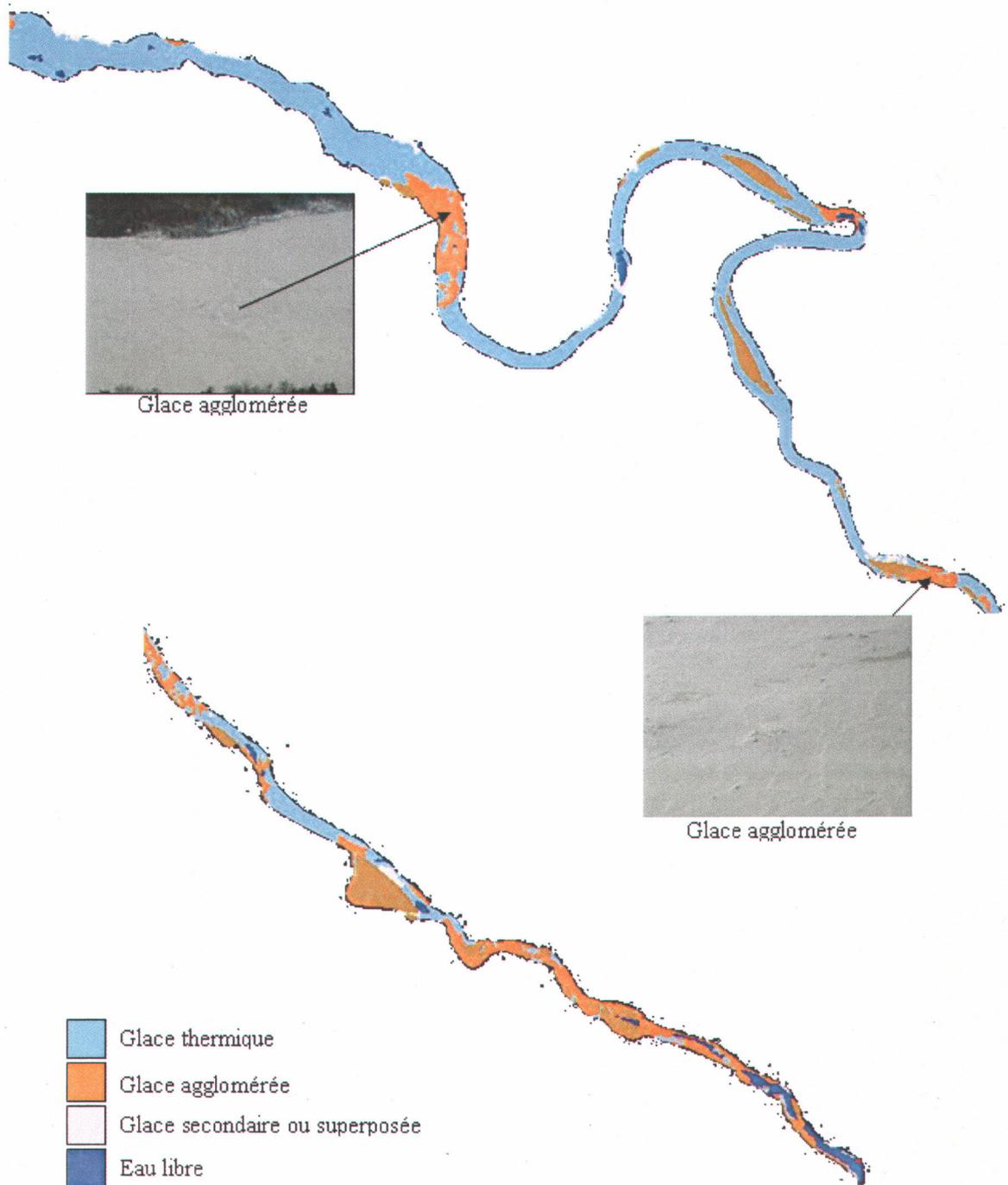
**Figure 6.38 : Classification « eau libre vs couvert de glace » de la partie amont de l'image RADARSAT du 11 février 2003.**



**Figure 6.39 : Classification « eau libre vs couvert de glace » de la zone de la ville de Windsor l'image RADARSAT du 11 février 2003.**

### 6.3.2.2 Classification de la nature du couvert de glace

À ce niveau de classification, la glace est classée selon sa nature, ce qui équivaut au niveau d'information atteint par les méthodes de classification conventionnelles. Les trois classes principales de glace sont : glace thermique qui couvre  $12,24 \text{ km}^2$  soit  $70,38 \%$  de la surface totale, glace secondaire ou superposée qui couvre  $0,71 \text{ km}^2$  ( $4,08 \%$ ) et glace agglomérée qui couvre  $4,44 \text{ km}^2$  ( $25,53 \%$ ). Les photos dans les figures (6.40 et 6.41) montrent des exemples de glace agglomérée. À noter que les photos acquises sont prises de loin et qu'il y avait un épais couvert de neige sur la glace. Dans la figure 6.41, nous remarquons que la glace agglomérée se trouve surtout dans les zones d'obstacles (rétrécissement de la largeur, agglomérat de petites îles et zones sinueuses).



**Figure 6.40 : Classification de l'image RADARSAT du 11 février 2003 selon la nature du couvert de glace; en haut la partie aval de la rivière et en bas la zone de la ville de Windsor.**

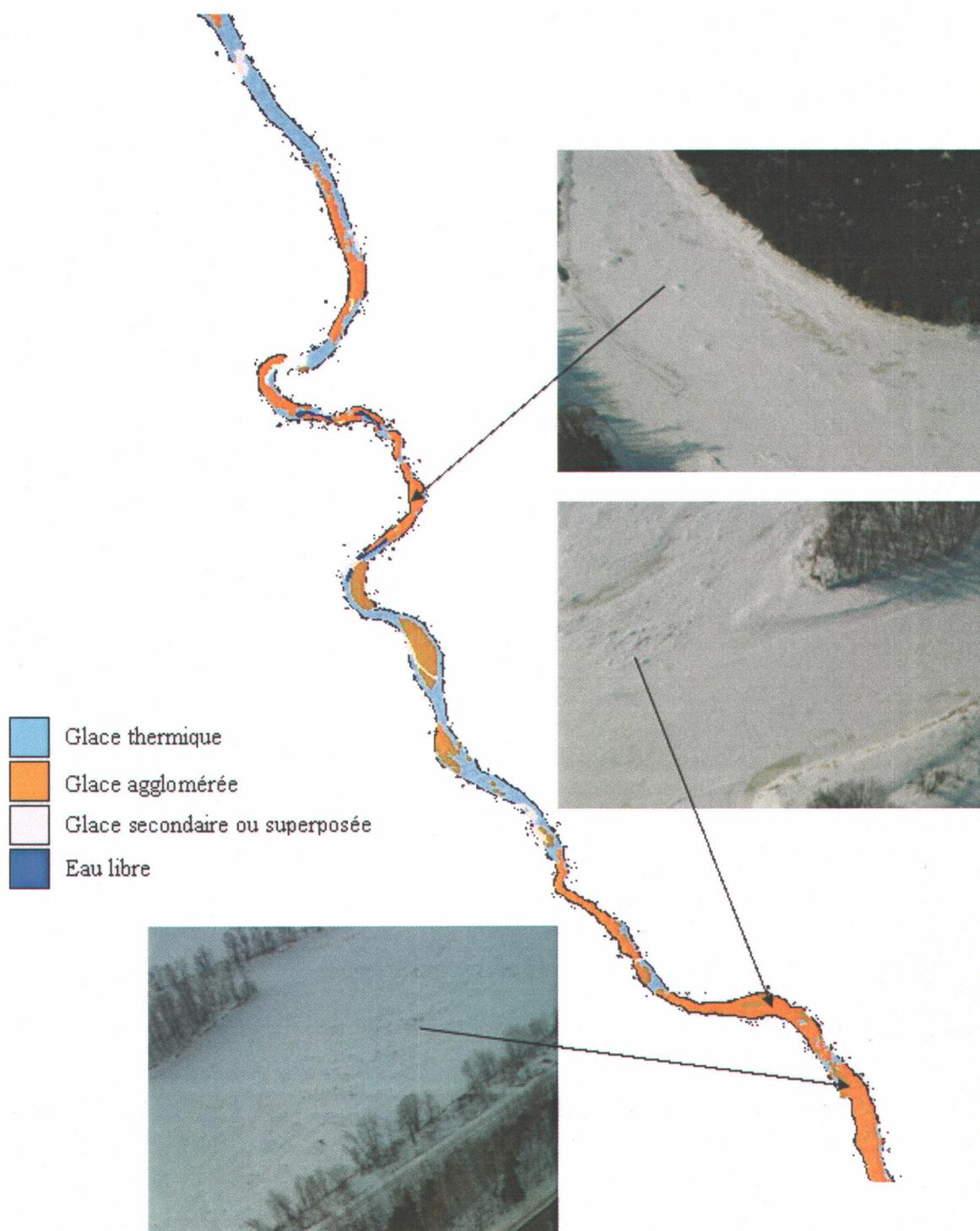
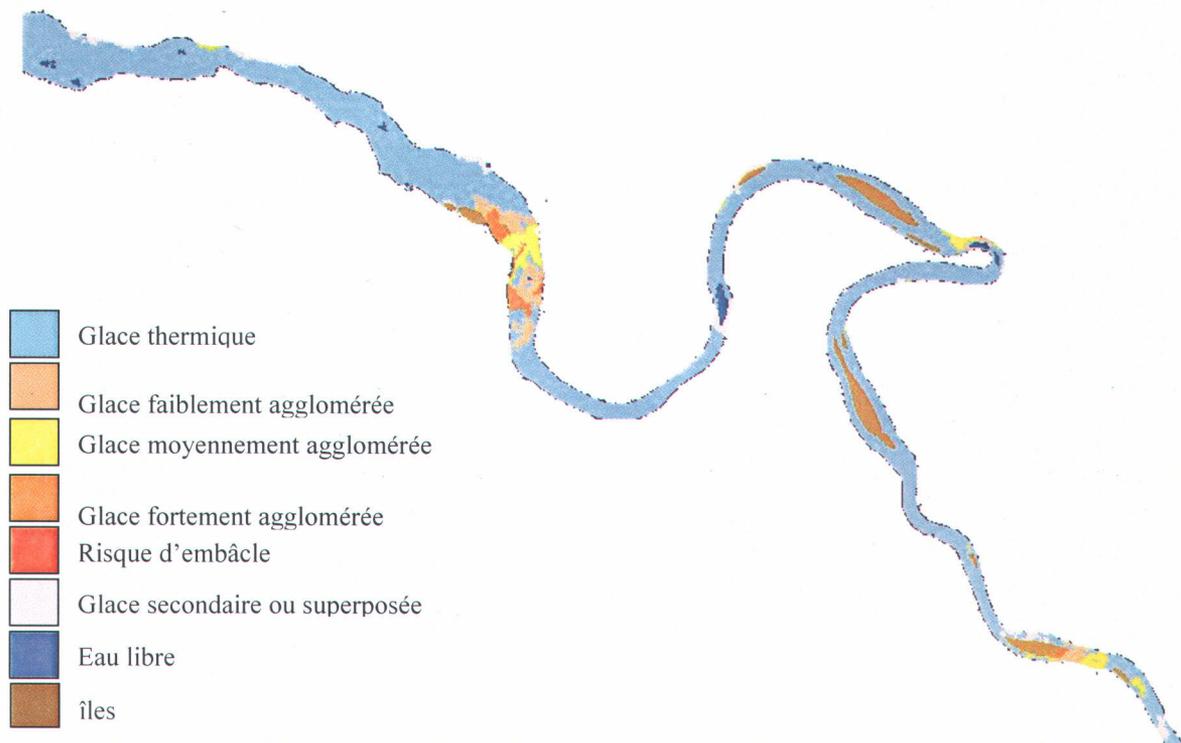


Figure 6.41 : Classification de la partie amont de l'image RADARSAT du 11 février 2003 selon la nature du couvert de glace.

### 6.3.2.3 Détection des zones à risque d'embâcles

L'un des aspects innovateurs de cette recherche est de pouvoir déterminer directement de l'image RADARSAT les zones à risque d'embâcle. Les figures (6.42 à 6.44) présentent le niveau de classification où ces zones apparaissent en rouge. Nous remarquons aussi que désormais la glace agglomérée est subdivisée en trois sous-classes : faiblement agglomérée, moyennement agglomérée et fortement agglomérée. Seule cette dernière classe entre dans la détermination des zones à risque (modérés ou élevé) d'embâcle. Dans la figure 6.42, aucune zone d'embâcle n'est présente. Dans la figure 6.43 trois zones à risque sont montrées, il est important de noter que ce sont encore les mêmes zones observées dans les images RADARSAT de l'hiver 2002. En fait, ces zones sont localisées dans les deux rétrécissements à la hauteur de la ville de Richmond là où il y a une forte agglomération de petites îles. Des zooms sont faits pour ces zones là, et nous remarquons qu'un autre niveau de classification apparaît. Il s'agit de la classification relative au degré du risque relié à chaque zone à risque d'embâcle. Ce risque varie de modéré à élevé et dépend de la profondeur. À noter aussi l'apparition de l'embâcle relatif aux petites îles.



**Figure 6.42 : Classification des zones à risque d'embâcle dans la partie aval de la rivière le 11 février 2003.**

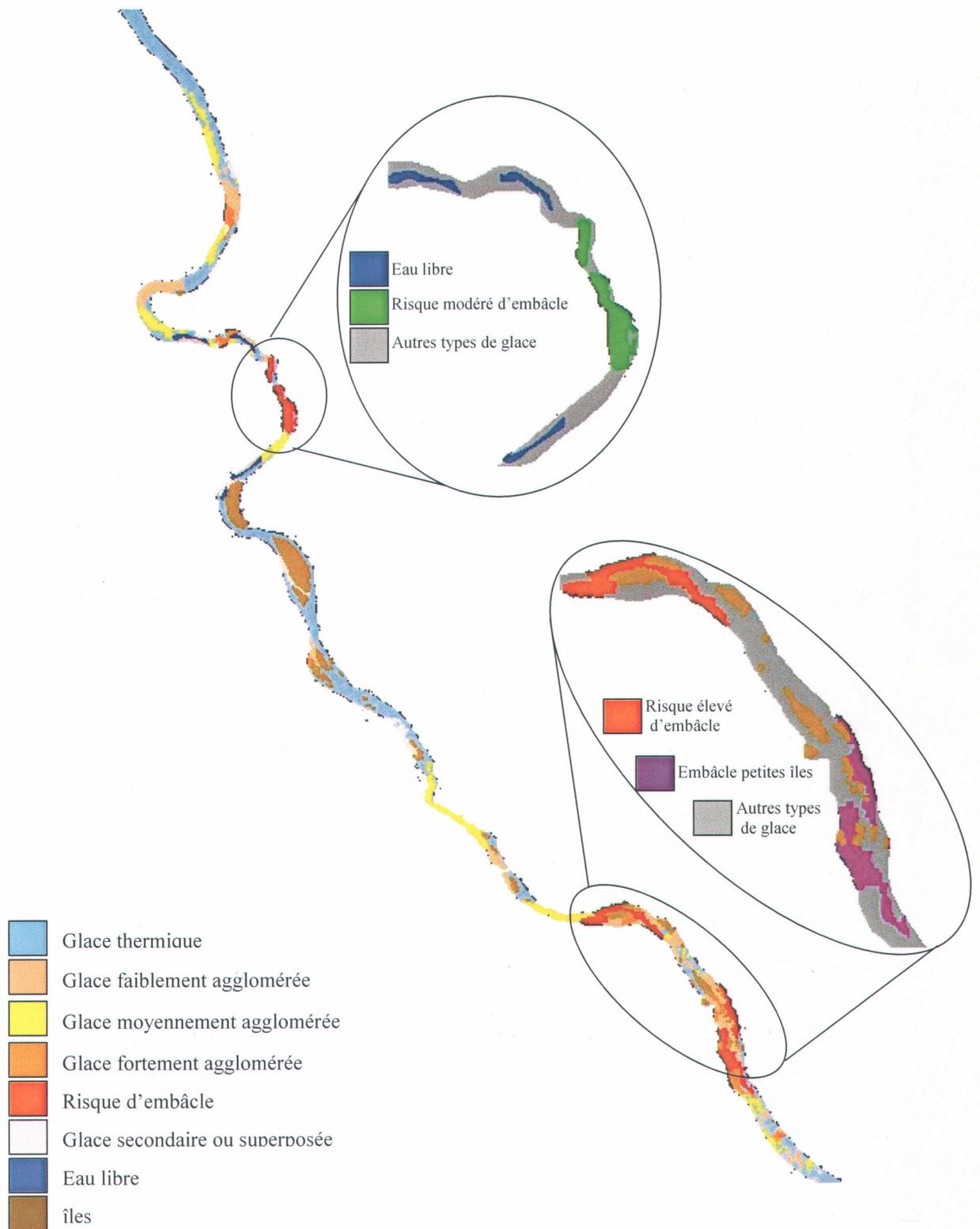
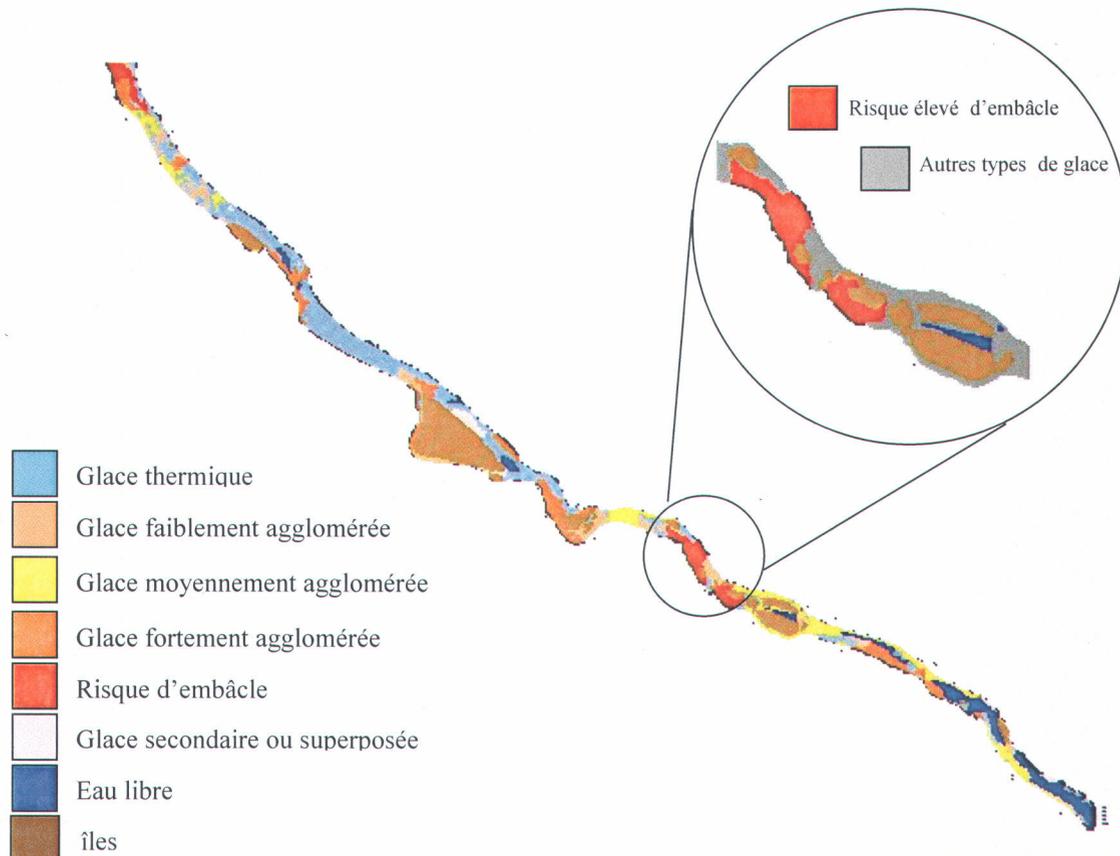


Figure 6.43 : Classification des zones à risque d'embâcle dans la partie amont de la rivière le 11 février 2003.



**Figure 6.44 : Classification des zones à risque d'embâcle dans la zone de Windsor le 11 février 2003.**

#### 6.3.2.4 Classification du couvert complet de glace thermique

Nous avons observé à plusieurs reprises dans les figures précédentes la présence de la classe « glace thermique ». Nous présentons dans la figure 6.45 un niveau de classification où la glace thermique, s'il y a lieu, est classée comme « couvert complet de glace thermique ». Nous avons déjà mentionné que cette information est importante lors du calcul de plusieurs paramètres hydrodynamiques, notamment, du débit et de la vitesse d'écoulement sous la glace.

Le tableau 6.2 présente quelques données sur le résultat de classification orientée objet de l'image RADARSAT du 11 février 2003.

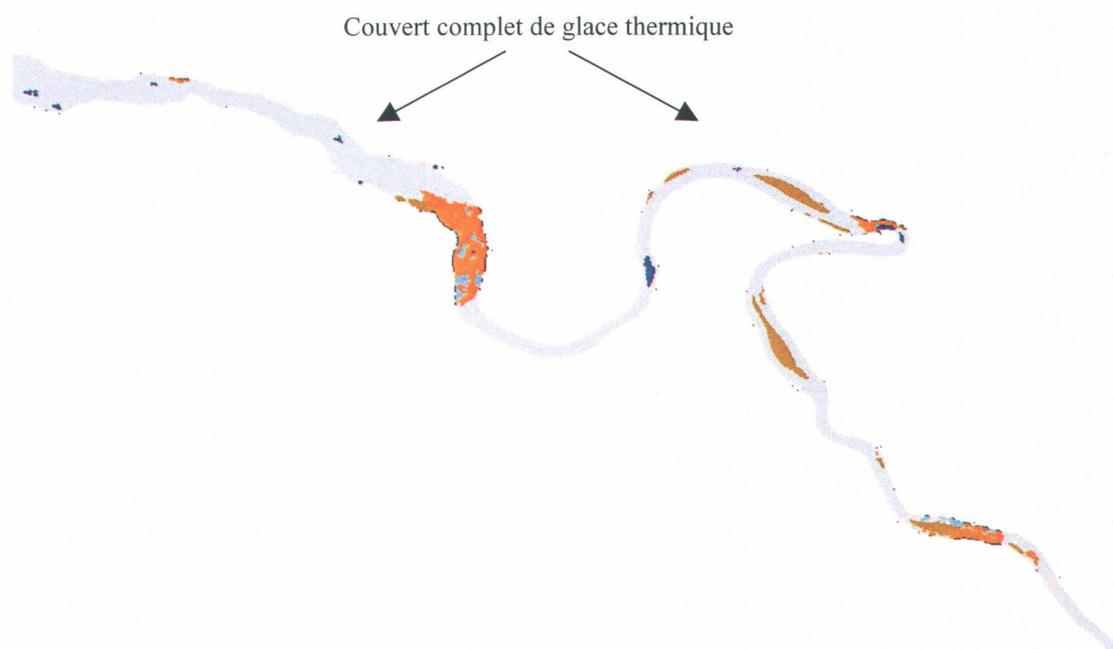


Figure 6.45 : Classification des zones couvertes complètement de glace thermique de la partie aval de la rivière le 11 février 2003.

Tableau 6.2 : Résultat de la classification de l'image RADARSAT du 11 février 2003

Classe	Nombre d'objets	Amplitude moyenne	Superficie (km <sup>2</sup> )
<b>Glace thermique-Group</b>	<b>250</b>	<b>0,15</b>	<b>12,23</b>
Couvert Complet de glace Thermique	124	0,15	10,47
Glace de rive	4	0,15	0,03
Glace thermique	122	0,15	1,73
<b>Glace Agglomérée-Group</b>	<b>180</b>	<b>0,28</b>	<b>4,39</b>
Glace Faiblement Agglomérée	77	0,25	2,31
Glace moyennement agglomérée	71	0,27	1,69
Glace fortement agglomérée	32	0,38	0,40
<b>Glace secondaire ou superposée</b>	<b>43</b>	<b>0,22</b>	<b>0,57</b>
<b>Embacle-Group</b>	<b>22</b>	<b>0,34</b>	<b>0,81</b>
Risque élevé d'embâcle	16	0,35	0,54
Risque modéré d'embâcle	2	0,36	0,09
Embâcle petites îles	4	0,27	0,18
<b>Eau libre - Group</b>	<b>35</b>	<b>0,08</b>	<b>0,55</b>
Complètement ouvert	3	0,07	0,11
Partiellement Ouvert	5	0,08	0,16
Chenal d'eau libre	8	0,08	0,17
Spot d'eau libre	19	0,08	0,11

## 6.4 Automatisation du processus de la classification

Un des objectifs spécifiques de cette recherche est de développer une méthode de classification semi-automatique. La figure 6.46 présente le schéma général de classification où les étapes automatisées sont encadrées en rouge. La majorité des étapes du processus de classification sont automatiques. En fait, la correction radiométrique et l'élimination des zones hors rivière se font automatiquement à l'aide du module *Modeler* du logiciel *PCI Geomatica* (figures 6.47 et 6.48). La segmentation des images en objet, la classification orientée objet et l'exportation de son résultat sont toutes des étapes qui se font automatiquement dans le logiciel *eCognition* (figure 6.49). Cependant, le processus n'est pas complètement automatisé puisque nous procédons manuellement à (i) la correction géométrique de l'image RADARSAT dans le module *OrthoEngine* du logiciel *PCI Geomatica*, et (ii) la création du projet de classification orienté objet et l'intégration des couches du SIG.

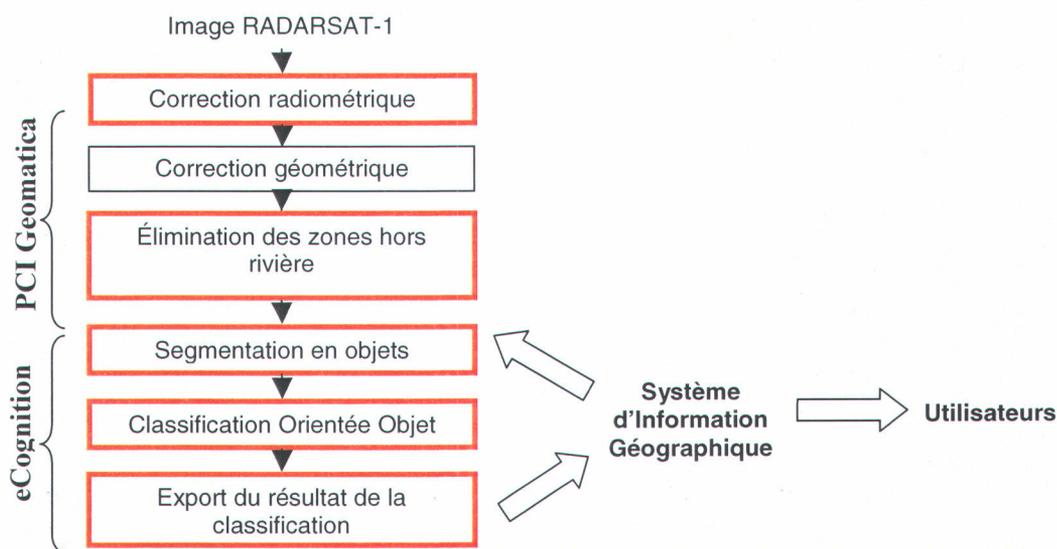


Figure 6.46 : Schéma des étapes automatisées du processus de classification des images RADARSAT.

L'interaction entre le système d'information géographique et le processus de classification se fait en deux temps. Le premier, consiste à intégrer les diverses couches thématiques et matricielles du SIG au projet de classification. Le deuxième, consiste cette fois à l'exportation du résultat de la

classification orientée objet vers les SIG. C'est à partir du SIG que les différents utilisateurs auront accès au résultat de la classification.

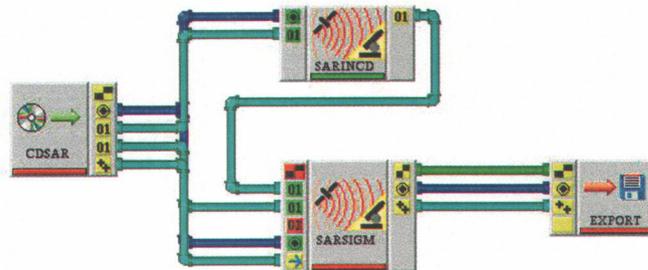


Figure 6.47 : Automatisation de la correction radiométrique.



Figure 6.48 : Automatisation de l'application d'un masque sur les zones hors rivière.

Operation	Level	Parameters	
Segmentation	-> Level 1	(3, 0.01, 0.20)	
Segmentation	-> Level 1	(2, 0.01, 0.20)	
Segmentation	-> Level 1	(1, 0.01, 0.20)	
Load Class Hierarchy	All Levels	Classes_amplitudes.dkb	
Classification	Level 1		
Classification	Level 2		
Classification	Level 3		
Classification Based Object Extraction	Level 2		
Classification Based Fusion	Level 2		
Classification Based Object Extraction	Level 3		
Classification Based New Level	Level 3		
Classification	Level 4		
Load Class Hierarchy	All Levels	Classes-Amplitude-Tout 30 janvier 2002.dkb	
Classification	Level 3	class-related, 3 cycles	
Export image object shapes	Level 3	(ObjectShapes.shp, Polygon (smoothed))	

Figure 6.49 : Automatisation de la segmentation, classification et export des résultats.

## **6.5 Conclusions**

Dans le présent chapitre, nous avons présenté la méthode de segmentation développée. Celle-ci consiste à une combinaison de la segmentation multirésolution et celle basée sur la classification, toutes deux disponibles dans le logiciel eCognition. Pour le premier type de segmentation, trois niveaux de segmentation ont été calculés avec des facteurs d'échelle variant d'un à trois. Il s'est avéré lors de cette phase de segmentation qu'un poids  $w$  du facteur forme (équation 2.29) de seulement 0.01 est suffisant, au-delà de cette valeur les objets obtenus ne sont plus satisfaisants. Le deuxième type de segmentation, basé sur la classification, est nécessaire pour obtenir des objets représentatifs des faibles rétrodiffusions. Le niveau trois de la segmentation a été retenu pour la classification. À la différence du deuxième niveau, dans le niveau trois, la taille et la forme des objets sont significatives pour appliquer les relations de proximité interobjet. Les images RADARSAT-1 de l'hiver 2002 ont été utilisées dans le développement de cette méthode de segmentation.

Nous avons également présenté la structure hiérarchique développée pour la classification orientée objet. En fait, elle a été compilée à partir de la compréhension théorique des phénomènes de la glace de rivière et leur interaction avec le signal Radar, et des résultats des analyses qualitative et quantitative. Cette structure nous a permis de regrouper nos connaissances sur les processus de glace de rivière sous forme de règles logiques. Les résultats de la classification orientée objet de l'image du 11 février 2003, obtenus avec cette structure, nous montrent clairement l'efficacité d'une telle approche. Non seulement la glace de rivière a été caractérisée selon sa nature (glace thermique, secondaire, agglomérée), mais nous avons réussi à ressortir des informations intéressantes sur le couvert de glace en intégrant, au processus de classification, le contexte morphologique et thématique du SIG. L'information la plus importante d'un point de vu opérationnel est la localisation des zones d'embâcle. Nous n'avons pas seulement réussi à localiser les zones d'embâcle, mais aussi à leur attribuer une évaluation du risque qu'elles représentent. D'autres informations sur le couvert ont été ajoutées, telles que les zones couvertes complètement de glace thermique, la localisation de la glace de rive, les zones de rapides, etc.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les étapes d'automatisation de la classification, depuis l'acquisition de l'image RADARSAT jusqu'à la livraison des résultats de classification aux divers utilisateurs (personnes ou organismes). Notons que les résultats de la classification sont présentés selon trois niveaux d'information : (1) glace / non-glace, (2) la nature de la glace et (3) ce que le couvert de glace représente (zones d'embâcle, etc.).

## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

L'étude des mécanismes liés à la formation de la glace de rivière et des embâcles revêt un grand intérêt pour les scientifiques et les gestionnaires de la ressource en eau. Cet intérêt est justifié par le risque de dégâts humains, matériels et économiques lié au phénomène de la glace de rivière. Ainsi, dans ce travail de recherche, nous avons visé à améliorer la compréhension de ce phénomène et surtout à fournir, dans une perspective opérationnelle, un outil de classification capable d'améliorer le processus de suivi et de caractérisation de la glace de rivière. Pour ceci, nous avons identifié le site de la rivière Saint-François reliant la ville de Windsor à celle de Drummondville (Qc). Ce site est caractérisé par la présence de problèmes dus à la glace de rivière, une morphologie très variable, et par la disponibilité d'une banque de données historiques sur le couvert de glace. Nous avons, ainsi, demandé l'acquisition de 19 images RADARSAT-1 *mode fin* de ce site et plusieurs campagnes d'observations de terrain ont été menées. Les images RADARSAT-1 *mode fin* ont été utilisées pour exploiter leur grand potentiel à caractériser la glace de rivière.

Nous avons par la suite monté un système d'information géographique afin d'obtenir une meilleure caractérisation contextuelle de la rivière Saint-François. Les phases du montage de ce système sont décrites dans le chapitre 3. Nous avons évalué qualitativement et quantitativement l'apport des données contextuelles à la classification des images RADARSAT-1. L'analyse qualitative consistait à analyser les images RADARSAT de l'hiver 2002 par rapport aux observations terrain et aux données contextuelles du SIG. Dans l'analyse quantitative, nous avons identifié, à partir des observations terrain, sur les images RADARSAT plusieurs classes de glace de rivière sur lesquelles a été menée une étude de séparabilité. Celle-ci a montré que leur séparabilité passe du simple au double lorsque les paramètres morphologiques et de forme d'objets sont ajoutés à ceux de l'image RADARSAT. En somme, les analyses qualitative et quantitative constituent deux composantes nécessaires pour la compréhension des processus de glace de rivière. En parallèle, nous avons analysé une image polarimétrique (Convair-580) de l'hiver 2003 qui a permis de définir la diffusion de surface comme le mécanisme de diffusion prédominant du signal Radar.

Le potentiel des images RADARSAT-1 pour la caractérisation de la glace de rivière dépend fortement de la technique de classification utilisée. Ainsi, nous avons développé une méthode de

classification orientée objet, qui s'appuie sur l'objet comme unité de base de classification. En plus des éléments intrinsèques de l'image RADARSAT-1, cette approche tient en considération les relations géométriques entre les objets (la topologie) et les relations sémantiques des objets (le contexte). Pour une utilisation optimale de ce type de classification, nous avons développé une technique de segmentation en objets des images RADARSAT-1 et nous avons monté une structure hiérarchique qui regroupe les caractéristiques de chacune des classes de glace de rivière.

## **7.1 Contributions à la recherche**

Ce travail de recherche a un caractère multidisciplinaire et il a été réalisé dans une perspective scientifique mais aussi de gestion de la ressource. Nous jugeons que notre contribution à la recherche est considérable au niveau de deux principaux volets. En effet, sur le plan scientifique, nous avons développé une nouvelle procédure pour caractériser la glace de rivière à plusieurs niveaux d'information y compris l'évaluation du degré de risque lié à la présence des embâcles. Nous avons également développé une méthodologie de construction de la structure hiérarchique de la classification orientée objet et un processus de segmentation en objets des images RADARSAT-1 spécifique à la glace de rivière. Sur le plan gestion de la ressource, nous avons développé une technique qui permet l'automatisation des processus de segmentation et de classification ce qui facilite son utilisation dans un contexte opérationnel. Nous avons, également, optimisé le temps de traitement en cas d'urgence (embâcle et/ou inondation) dès l'acquisition d'une image RADARSAT-1 (ou RADARSAT-2) jusqu'à la fin de la classification. Nous jugeons que la technique développée constitue un outil d'aide considérable aux différentes entités décisionnelles intéressées par le suivi et la caractérisation de la glace de rivière. Ces différentes contributions scientifiques et opérationnelles nous ont mené à différentes conclusions :

**Les images RADARSAT-1 mode fin constituent l'outil le plus approprié pour une meilleure caractérisation de la glace de rivière.** Ainsi, leur utilisation a permis de :

1. Acquérir l'information en continu sur la glace de rivière de jour comme de nuit en présence ou absence de nuages. En temps d'urgence, les images peuvent être livrées dans un délai de 4 heures (après réception).
2. Fournir une fine résolution nominale de 8 mètres et par la suite obtenir un meilleur résultat de la classification orientée objet.

3. Effectuer la caractérisation de la glace en présence d'un couvert nival sec par-dessus le couvert de glace. Notons que le couvert nival était sec sur la majorité des images utilisées.
4. Fournir à la communauté scientifique une nouvelle étude de la caractérisation de la glace de rivière.

**Le développement d'un système d'information géographique, SIG, constitue un moyen nécessaire pour la caractérisation de la glace de rivière.** En effet, le SIG a permis de :

1. Confirmer clairement la grande variabilité morphologique de la rivière Saint-François au niveau de la largeur de la rivière, sa sinuosité et sa profondeur;
2. déterminer les îles (grandes et petites) et les zones de rapides grâce à l'utilisation des couches thématiques à partir des données de la BDTQ au 20.000e;
3. intégrer les îles et les zones de rapides dans le processus de classification;
4. regrouper les données de terrain et les données historiques afin de faciliter l'interprétation des images RADARSAT-1. En plus, les données historiques ont été transformées de bases de données conventionnelles en des cartes se superposant spatialement à notre site d'étude;
5. mettre en évidence la relation entre les phénomènes de glace observés historiquement et la morphologie de la rivière.

En résumé, le SIG a été développé selon deux volets : statique et dynamique. Le volet statique a permis le calcul des indices morphologiques et à déterminer les zones d'îles et de rapides. Le volet dynamique est relié aux observations terrain et aux données historiques. Ainsi, le système d'information géographique constitue un outil pour effectuer la mise à jour de sa partie dynamique en y ajoutant, des nouvelles observations terrain et aussi en archivant les résultats de la classification des images RADARSAT.

**Les analyses qualitative et quantitative nous ont permis de développer une méthode d'extraction des connaissances sur la glace de rivière pour les synthétiser sous forme d'une structure hiérarchique de la classification orientée objet.** En effet, l'analyse quantitative nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. L'eau libre correspond aux faibles valeurs de rétrodiffusion des images;
2. la glace thermique est représentée par des valeurs moyennes de rétrodiffusion;
3. les fortes rétrodiffusions représentent la glace agglomérée;

4. la rétrodiffusion des zones de rapides est semblable à celle de la glace thermique;
5. les zones d'engorgement constituent un obstacle au couvert de glace et favorisent la formation de glace agglomérée;
6. les zones d'agglomérats formés de petites îles constituent un obstacle au couvert de glace et favorisent la formation de glace agglomérée;
7. plusieurs zones de la rivière sont couvertes complètement de glace thermique.

Les résultats de l'analyse quantitative ont démontré que la séparabilité, entre les diverses classes de glace, passe du simple au double lorsque les paramètres morphologiques et de forme d'objets sont ajoutés à ceux de l'image RADARSAT. L'analyse quantitative et l'analyse qualitative ont permis la validation de l'hypothèse de base de cette recherche, qui stipule « l'introduction des caractéristiques de la rivière dans le processus d'analyse des images RADARSAT-1 (mode fin) permet une meilleure valorisation des informations qu'elles contiennent". Elles ont aussi permis de valider la seconde, soit l'apport de l'analyse de texture et de l'analyse polarimétrique comme source d'information.

**La combinaison de deux méthodes de segmentation en objets des images RADARSAT a permis l'obtention d'objets de taille et de forme pouvant être utilisés dans la classification orientée objet.** En effet, nous avons réussi à :

1. Obtenir des objets qui reflétaient avec fidélité les formes (*pattern*) observables dans les images RADARSAT;
2. Extraire l'information non seulement à partir des pixels, mais également à partir des objets, tout en reflétant les divers phénomènes de glace de rivière observés à diverses échelles spatiales.

**La classification orientée objet a permis d'augmenter les caractéristiques détectables de la glace de rivière par rapport aux méthodes de classification conventionnelles.** En effet, l'application et la validation de la classification orientée objet effectuée sur l'image du 11 février 2003 ont permis de :

1. Combiner dans la même approche de classification les images RADARSAT-1 et les données du SIG;
2. obtenir une classification multi-niveaux. En fait, avec la structure hiérarchique développée, nous avons caractérisé la rivière au niveau glace/non glace, au niveau de la nature de la glace (thermique, secondaire, agglomérée) et au niveau de ce que le couvert

de glace représente (embâcle, couvert complet, zone ouverte complètement ou partiellement, chenal d'eau libre, etc.);

3. automatiser les processus de segmentation, de classification et d'export des résultats de classification. Ainsi, nous avons développé une méthode semi-automatique pour extraire les informations de la glace de rivière;
4. de regrouper dans une structure hiérarchique quatorze classes reflétant les diverses caractéristiques de la rivière Saint-François lors de présence de glace de rivière.

Finalement, il faut mentionner que l'épine dorsale de toute classification orientée objet est sa structure hiérarchique. En effet, cette dernière utilise la connaissance sur les processus de glace de rivière, l'interaction avec le signal radar et les résultats des analyses qualitative et quantitative.

En résumé, tous les objectifs de cette recherche ont été atteints et les deux hypothèses vérifiées. De ce fait, nous avons réussi à atteindre l'objectif ultime : « Développement d'une approche de classification orientée objet pour une meilleure caractérisation de la glace d'une rivière de taille moyenne à l'aide des images du satellite RADARSAT-1 et d'un système d'information géographique : cas de la rivière Saint-François, Québec. ».

## 7.2 Limites du sujet de recherche et recommandations

Les principales limites de ce travail de recherche sont les suivantes :

1. Absence de suffisamment d'images CV-580 pour pouvoir effectuer une analyse polarimétrie complète sur toute la rivière. Les deux images dont nous disposons ne couvrent que la partie aval de la rivière. En plus, l'une d'elles n'était pas calibrée adéquatement. Nous recommandons l'acquisition d'une série d'images polarimétriques correspondant à diverses conditions du couvert de glace. Une analyse polarimétrique plus complète sera un atout au renforcement de la structure hiérarchique en préparation de la venue des images RADARSAT-2.
2. Observations terrain au potentiel limité : les données de terrain sont constituées principalement par les photos prises lors des campagnes d'observation. La limite principale de ces photos est la couverture de la glace par la neige. À l'exception de la glace fortement agglomérée qui apparaît malgré la présence de la neige, les autres types de glace sont difficiles à valider visuellement. En fait, bien que nous ayons effectué le 11 février 2003 une campagne de mesures, les données restent insuffisantes vu le nombre

restreint de sites visités sur la rivière. Il est fortement recommandé de procéder à des échantillonnages, sur la glace, en nombre significatif lors de campagnes de terrain.

3. L'incertitude sur l'information des observations terrain et leur nombre restreint ne permettent pas d'effectuer une analyse statistique complète. En fait, le nombre de caractéristiques, tous types combinés, liées à chaque objet dépasse la centaine. Pour pouvoir effectuer une analyse statistique robuste du genre analyse multivariée (p. ex., analyse en composantes principales ou analyse de groupement), il faudrait avoir au minimum un nombre d'objets équivalent à celui des variables. Nous recommandons d'effectuer une telle analyse aussitôt que les données terrain seront en nombre suffisant.

### **7.3 Pistes de recherches**

De plus en plus d'études sont réalisées sur les mécanismes liés à la glace de rivière. Notre recherche constitue un apport considérable pour améliorer la connaissance scientifique de ce phénomène, toutefois, il est indispensable de poursuivre ces efforts pour atteindre une meilleure compréhension, caractérisation et prévision des événements liés à la glace de rivière. Suite à notre étude, plusieurs avenues de recherche s'ouvrent et s'inscrivent selon deux axes, à savoir :

#### **1- Amélioration de la classification :**

1. Utiliser les images du satellite RADARSAT-2 : les principaux avantages de ces images sont (1) la résolution spatiale de 3 mètres, la plus fine résolution disponible pour les satellites commerciaux, (2) un temps de livraison de 3 heures en mode urgence et (3) une pleine capacité polarimétrique.
2. Introduire la modélisation hydrodynamique et les données météorologiques dans l'analyse qualitative : il sera intéressant d'avoir une idée claire sur le régime et les vitesses d'écoulement lors de l'interprétation des images RADARSAT-1 (et 2), ainsi que sur les conditions météo avant et durant l'acquisition des images.
3. Effectuer une analyse statistique exhaustive en présence de plusieurs données in situ. Ceci permettra de renforcer la structure hiérarchique développée et d'y accroître le rôle des paramètres de textures.

**2- Apport de la classification aux autres axes de recherche sur la glace de rivière :**

1. Évaluer l'apport des résultats de la classification à la modélisation de la glace de rivière : plusieurs modèles de glace existent (RIVICE, RIVJAM, ICEJAM, HEC-RAS, etc.) d'où l'importance d'évaluer l'apport de la classification quant à la validation des *outputs* de ces modèles.
2. Comprendre les besoins de caractérisation de la glace et ajuster la classification en conséquence : selon à ce qu'on s'intéresse à calculer le débit sous glace, prévenir le risque d'embâcle, évaluer les changements climatiques, ou encore suivre les changements géomorphologiques des berges, le besoin en caractérisation diffère d'une application à une autre. Il est important d'évaluer les besoins de chaque type d'application et d'essayer d'y adapter la classification. En fait, les mécanismes de la glace de rivière peuvent être étudiés sous plusieurs angles, et selon les objectifs fixés, nous pouvons tirer de nouvelles règles de classification.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems : A Management Perspective*. Ottawa, WDL Publications.
- Arzandeh, S., et J. Wang (2002). Texture evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping. *Can. Journ. Of Rem. Sens.*, Vol. 28, No. 5, pp. 653-666.
- Ashton, G.D. (1986). *River and Lake Ice Engineering*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 485 p.
- Atkinson, C.H., et T.W. Waters (1978). Ice regime at Churchill Falls, Labrador- a comparison of design expectations with actual performance. *Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden, Part 2*, pp. 163-186.
- Beltaos, S. (2000). Advances in river ice hydrology. *Hydrological Processes*, 14 : 1613–1625.
- Beltaos, S. (1995). *River Ice Jams*. Water Resource Publications, LLC. ISBN Number 0-918334-87-X, 372 p.
- Beltaos, S. (1990). Fracture and Breakup of river ice cover. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(2), 173-183.
- Beltaos, S. (1984). A conceptual model of river ice breakup. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 11(3), pp. 516-529.
- Bonn, F. et G. Rochon (1996). *Précis de télédétection : principes et méthodes* Vol1, presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.
- Burrough, P.-A. (1986). *Principles of geographic information systems for land resources assesment*. Oxford, Clarendon.

- CCRS (Canadian Center of Remote Sensing). (2002). Site web :  
<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/db/glossary/>
- Chen et al, 1998: The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision (2<sup>nd</sup> Edition), by C. H. Chen, L. F. Pau, P. S. P. Wang (eds.), pp. 207-248, World Scientific Publishing Co., 1998.
- Cloude, S. R. et E. Pottier (1997) An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 35, No 1, pp. 68-78.
- Comrey, A. L., et Lee, H.B. (1992). A first course in factor analysis. (2<sup>nd</sup>. Ed.) Hillsdale, N.J: Erlbaum.
- Cooper, D.W., Mueller, R.A., et R.J. Schertler (1976). Remote Profiling of Lake Ice using an S-band Short-Pulse Radar aboard an All-Terrain Vehicle. Radio Science 11, pp. 375-381.
- CRIPE (Committee on River Ice Processes and the Environment) (2001). site web :  
[http://www.riverice.ualberta.ca/about\\_CRIPE.htm](http://www.riverice.ualberta.ca/about_CRIPE.htm).
- CRREL (2002), River ice guide and glossary. Site web :  
[http://www.crrel.usace.army.mil/crrel-divisions/ice-eng/ice\\_guide/iceguide.htm](http://www.crrel.usace.army.mil/crrel-divisions/ice-eng/ice_guide/iceguide.htm).
- Davar, K.S., Beltaos, S., et B. Pratte (1996). A primer on hydraulics of ice covered rivers. Committee on River Ice Processes and the Environment, 192 p.
- Demuth, M.N. et T.D. Prowse (1991). A physical model of ice overthrust during the break-up of intact river-ice covers. Proc. North Hydrology Symposium, T.D. Prowse and C.S.L. Ommaney (Editors), 10-12 July 1990, Saskatoon, Canada, pp. 57-73.
- Deslauriers, C.E. (1968). Ice break-up in rivers, ice pressure against structures. National Research Council Technical Memorandum No. 92, Associate Committee on Geotechnical Research, pp. 217-230.

- Dikshit, O., et D.P. Roy (1996). An empirical investigation of image resampling effects upon the spectral and textural supervised classification of a high spatial resolution multi-spectral image. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 9, pp. 1085-1092.
- Dingman, S.L., et A. Assur (1996). The effects of thermal pollution on river ice conditions. Pt. II : A simplified method of calculation. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering. Laboratory Research Report 206 Pt. II, 10 p.
- Dingman, S.L., Weeks, W.F et Y.C. Yen (1968). The effects of thermal pollution on river ice conditions. *Water Resources Research*, Vo. 4, No. 2, pp. 349-362.
- Drinkwater, M.R. (1989). Limex '87 Ice Surface Characteristics : Implications for C-Band SAR Backscatter Signatures. *IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 27, No. 5, pp. 501-513.
- Dueker, K.-J., (1979). Land Resource Information Systems: a Review of Fifteen Years Experience. *Geo-Processing*, 1: 105-128.
- Dutton, G. (1999) Scale sinuosity and point selection in digital line generalization, website: <http://www.spatial-effects.com/papers/jour/GDutton-CAGIS.pdf>
- eCognition user guide (2001). Definiens Imaging. Site web : [www.definiens-imaging.com](http://www.definiens-imaging.com).
- Elachi, C., Bryan, M.L., et W.F. Weeks (1976). Imaging Radar Observations of Frozen Arctic Lakes, *Remote Sensing of Environment*, No. 5, pp. 1113-1119.
- Environment Canada (1988). Flood events in Canada, 1983-87. Water planning and Management Branch, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa, Canada, 84 p.
- Evans, S. (1965). The Dielectric Properties of Ice and Snow- A Review. *Journal of Glaciology*, 5, pp. 773-792.

- Gauthier, Y., Weber, F., Savary, S., Jasek, M., Paquet, L.-M., et Bernier, M., (2006). A COMBINED CLASSIFICATION SCHEME TO CHARACTERISE RIVER ICE FROM SAR DATA. EARSel eProceedings 5, 1/2006, page 77 : 88.
- Gilfilian, R.E., Kline, W.L., Osterkamp, T.E., et C.S. Benson (1972). Ice formation in a small Alaskan stream. Proceedings of Banff Symposia on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Banff, Canada, pp. 505-513.
- Gogineni, S.p. (1984). Radar Backscatter from Summer and Ridged Sea Ice, and the design of Short-Range Radars, Ph.D. Dissertation, The University of Kansas, Lawrence, K.S.
- GD, 2005. Grand dictionnaire terminologique. Office québécois de la langue française. Document en ligne : <http://www.granddictionnaire.com>.
- Hall-Beyer, M., 2004, GLCM Texture: A Tutorial v.2.7.1, on-line document, [http://www.ucalgary.ca/~mhallbey/texture/texture\\_tutorial.html](http://www.ucalgary.ca/~mhallbey/texture/texture_tutorial.html).
- Hall, D. (1998). Remote Sensing of Snow and Ice Using Imaging Radar. Dans : Hederson and Lewis (ed), Principles and Applications of Imaging Radar- Manual of Remote Sensing, 3<sup>rd</sup> Edition, Vol.2, John Wiley and Sons, pp. 677-703.
- Hall, D.K., et J. Martinec (1985). Remote sensing of ice and snow. Chapman and Hall Ltd, 189 p.
- Hall, D.K. *et al.* (1994). Analysis of ERS-1 synthetic aperture Radar data of frozen lakes in northern Montana and implications for climate studies. Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. C11 : pp.22,473-22,482.
- Hallikainen, M. et F.T. Ullaby (1986). Dielectric and Scattering Behavior of Snow at Microwave Frequencies. Proc. of the international Geoscience and Remote Sensing Symposium, Zurich, Switzerland, pp. 87-91.

- Hallikainen, M. *et al.* (1984). The dielectric behavior of snow in the 3- to 37 GHz range. Proceedings of IGARSS'84 Symposium, Strasbourg, August 1984, Vol. 2, pp. 169-174.
- Haralick, R.M., K. Shanmugam and I. Dinstein (1973). Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. SMC-3(6) : 610-620.
- Henderson, F.M., et A.J Lewis (1998). Principles and Applications of IMAGING RADAR. Manual of Remote Sensing 3<sup>rd</sup> Edition, Vol. 2. ISBN 0-471-29406-3. 866 p.
- Hobbs, P. (1974). *Ice physics*. Clarendon Press, Oxford.
- Hydro-Québec, (1996). Suivi du couvert de glace à l'aide de l'imagerie satellitaire RADARSAT-1, Rapport No RI 2904 1996, Hydro-Québec, Montréal, Canada. 72 p.
- Ice Engineering, (1999). Ice Engineering , US Army Corps of Engineers, site web : <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1612/toc.htm>.
- Jeffries, M.O. *et al.* (1994). Structural and stratigraphic features and ERS-1 synthetic aperture Radar backscatter characteristics of ice growing on shallow lakes in NW Alaska, winter 1991-1992. Journal of Geophysical Research, Vol. 99. No. C11 : pp. 22459-22471.
- INRIA (Institut National de la Recherche en Informatique et en Automatique). (2001). Site Web : <http://www.inria.fr/>.
- Koshkariov, A.-V., V.-S. Tikunov, et A.-M. Trofimov. (1989). The Current State and the Main Trends in the Development of Geographic Information Systems in the URSS. International Journal of Geographic Information Systems, 3-3 : 257-272.

- Leconte, R., Brissette, F., et M. Galarneau (1998). Utilization of RADARSAT data for snow, ice jams and flood monitoring at the watershed scale: Final Report. ETS, Université du Québec, 84 p.
- Leconte, R. et P.D. Klassen (1991). Lake and river ice investigations in northern Manitoba using airborne SAR imagery. *Artic*, 44, 1, 153-163.
- Leconte, R., et T. J. Pultz (1991). Evaluation of the potential of RADARSAT for flood mapping using simulated satellite SAR imagery. *Can. Journ. Of Rem. Sens*, Vol. 17, No. 3, pp. 241-249.
- Lee, J. S., M. R. Grunes et G. De Grandi (1997) Polarimetric SAR speckle filtering and its impact on classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 37, pp. 2363-2373.
- Lohmann, G. (1991). An Evidential Reasoning Approach to the Classification of Satellite Images. Thèse de doctorat, Université technique de Munchen, 103 pages.
- Luscombe, A.P. *et al.* (1993). The RADARSAT Synthetic Aperture Radar Development. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19. No. 4, Nov-Dec 1993, p 302.
- Marcotte, N. (1984). Anchor ice in Laching Rapids, result of observations and analysis. *Proceedings of the IAHR International Symposium on Ice, Hamburg, Germany*, Vol. 1, pp. 151-159.
- Marr, D. (1982). *Vision*, W.H. Freeman&Co, NewYork (13<sup>th</sup> printing 1996).
- MEF, (1996). *État de l'écosystème aquatique du bassin de la rivière Saint-François, 1991-1995*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques, envirodoq no EN960340, 12 p.
- Melloh, R.A. et L.W. Gatto (1990). Interpretation of passive and active microwave imagery over snow-covered lakes and rivers near Fairbanks, Alaska. *Proceedings of*

the Workshop on Application of Remote Sensing in Hydrology, Saskatoon, Saskatchewan, February 13-14, NHRI Symposium, 5, 159-178.

Michel, B. (1978). *Ice Mechanics*. Les presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 499 p.

Michel, B. (1971). *Winter regime of rivers and lakes*. U.S. Army CRREL, Cold Region Science and Engineering Monograph III-B1a, Hanover, New Hampshire, U.S.A., 131 p.

Michel, B. (1967). From the nucleation of ice crystal in clouds to the formation of frazil ice in rivers. (In Oura, H., ed. *Physics of snow and ice : Proc. of International Conference on Low Temperature Science, 1966, Vol. I, Pt. I, (Sapporo)*, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, pp.129-136.

Michel, B. et Drouin. (1981). Backwater curves under ice cover of the Lagrande River. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 3. pp. 351-363.

Michel, B., et Ramseier (1971). Classification of river and lake ice. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 36-45.

Morse, B., et Hicks, F. (2005). Advances in river ice hydrology 1999–2003, *Hydrol. Process*, 19, 247–263.

MRN (Ministère des Ressources Naturelles) (2002). Site web : <http://www.mrn.gouv.qc.ca>.

ONÉ (Office National de l'Énergie), (2001). Rapport annuel de l'office national de l'énergie 2001, Cat. No. NE1-2001E-1<sup>E</sup>, ISBN 0-662-31834-X, Internet: <http://www.neb-one.gc.ca>.

Osterkamp, T.E. (1977). Frazil-ice nucleation by mass exchange processes at the air-water interface. *Journal of Glaciology*, 19(8), pp. 619-625.

- Osterkamp, T.E. (1974). *Supercooling and frazil ice formation in a small sub-arctic stream* Proc. Research Thermal Regime of River Ice, Tech. Memorandum No. 114, Natural Research Council of Canada, pp. 104-109.
- Page, D.F. et R.O. Ramseier (1975). Application of Radar techniques to ice and snow studies. *Journal of Glaciology*, Vol. 15. No. 73, pp. 171-191.
- Peake, W.H., et T.L. Olover (1971). The response of terrestrial surface at microwave frequencies. Ohio State University Electroscience Laboratory, Technical Report AFAL-TR-70-301.
- Pelletier, K., and F. Hicks. (2003). Monitoring Breakup Development on the Athabasca River using RADARSAT-1 SAR imagery. Proceedings 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Edmonton, AB, June 19-20, 2003.
- Pierce, L., Xie, H., Dobson, M.C., et F. Ulaby (1998). Texture features for classification with ERS/JERS composites. In Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 6-10 July 1998, Seattle, Wash. CD-ROM. IEEE Inc., Piscataway, N.J.
- Pultz, T.J. et R.J. Brown (1987). SAR image classification of agricultural targets using first- and second -order statistics. *Can. Journ. Of Rem. Sens.*, Vol. 13, No. 2, pp. 85-91.
- Polidori, L. (1997). *Cartographie RADAR*. GORDON and BREACH Science Publishers. ISBN 90-5699-051-9. 287 p.
- Prowse TD, Beltaos S. (2002). Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrological Processes*, 16 : 805-822.
- Pultz, T.J., Leconte, R., St-Laurent, L., et L. Peters (1991). Flood mapping with airborne SAR imagery : Case of the 1987 Saint-John River flood. *Can. Wat. Resours.*, 16, 2, 173-189.

- Raney, K.R. (1998). Radar Fundamentals : Technical Perspective. Dans : Hederson and Lewis (ed), Principles and Applications of Imaging Radar- Manual of Remote Sensing, 3<sup>rd</sup> Edition, Vol.2, John Wiley and Sons, pp. 9-130.
- Raphael, J.M. (1962). Prediction of temperature in rivers and reservoirs. Journal of the Power Division, ASCE, July, pp. 157-181.
- Robert G. Jahn and Brenda J. Dunne. (1997). Return to the Source: Rediscovering Lost Knowledge and Ancient Wisdom. Symposium, University of Delaware, September 27-29, Newark, On-line document: [http://www.scientificexploration.org/jse/articles/jahn1/jahn1\\_toc.html](http://www.scientificexploration.org/jse/articles/jahn1/jahn1_toc.html)
- Roger A. Stacey Consultants Ltd, (1997). National Remote Sensing Working Group, Report submitted to Canada Centre for Remote Sensing, January 1997.
- Schulson, E.M (1999). The Structure and Mechanical Behavior of Ice, Journal of The Minerals, Metals & Materials Society JOM, 51 (2) (1999), pp. 21-27.
- SCRHCENB (Sous-Comité Responsable des glaces de cours d'eau du Nouveau-Brunswick. (1989). Guide des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick. Site web : <http://www.gnb.ca/0009/0369/0004/index-f.html>.
- Shen, H.T. (1996). River Ice Processes- State of Research. IAHR Ice Symposium, Beijing.
- Shen, H.T. et L.A Chiang (1984). Simulation of growth and decay of river ice cover. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, 110(7), pp. 985-971.
- Shen, H.T., et D.S. Wang (1992). Frazil jam evolution and transport of low density granules. Report No. 92-10, Departement of Civil and Electrical Engineering, Clarkson University, Potsdam, New York, U.S.A.
- Shulyakovskii, L.G. (1996). Manual of forecasting ice-formation for rivers and inland lakes. Manual of Hydrological Forecasting No. 4, Central Forecasting Institute of

- URSS, 1963. Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel.
- Starosolszky, Ö. (1970). Ice in hydraulic engineering. Report No. 70-1, Division of Hydraulic Engineering, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Trondheim, Norway, 165 p.
- Svenson, u., Billfalk, L., et Hammar, L. 1989. A mathematical model of border-ice formation in rivers. *Cold Regions Science and Technology*, 16 (2), pp. 179-189.
- Tabachnick, B.G., et Fidell, L.S. (1996). *Using Multivariate Statistics* (3<sup>rd</sup> Ed.). HarperCollins College Publisher, ISBN 0-673-99414-7.
- Thibault, D., Bilodeau, L., Briand, M-H., Leconte R., et M. Rheault (1997). Suivi du couvert de glace à l'aide de l'imagerie satellitaire RADARSAT-1, Phase II., Hydro-Québec, 46 p.
- Touzi, R., A. Lopes, J. Bruniquel et P. W. Vachon (1999) Coherence estimation for SAR imagery, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, N°. 1, pp. 135-149.
- Touzi, R., and Charbonneau, F.J. (2004) PWS: a friendly and effective tool for polarimetric image analysis, *Canadian Journal for Remote Sensing*, Volume 30, pp. 566-572
- Tracy, B.T. and S.F. Daily, 2003: River Ice Delineation with RADARSAT SAR Proceedings 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Edmonton, AB, June 19-20, 2003.
- Treiz, P.M., Howarth, P.J., Filho, O.R., et E.D. Soulis (2000). Agricultural crop classification using SAR tone and texture statistics. *Can. Journ. Of Rem. Sens.*, Vol. 26, No. 1, pp. 18-29.

- Tsang, G. (1982). Frazil and anchor ice : A monograph. National Research Council of Canada, Subcommittee on Hydraulics of Ice-Covered Rivers, Ottawa, 93 p.
- Tso B & P M Mather, 2001. Classification Methods for Remotely Sensed Data (Taylor and Francis), 332 p.
- Petryk, S., Gatto, L.W., Prowse, T.D., Demuth, M., Wuebben, J.L. and S. Beltaos., 1996. Chapter 8 : Field Observations and Measurements in River Ice Jams (S. Beltaos ed.). Wat. Res. Pub., LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., A.K. Fung (1986). Microwave Remote Sensing, Active and passive: Vol. III, From Theory to Application. Artech House, Dedham, 1986, 2162 pages.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., A.k. Fung (1982). Microwave Remote Sensing, Active and passive: Vo2. I Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Addison-Wesley, ISBN 0-201-10760-0 (v. 2), 1064 p.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., A.K Fung (1981). Microwave Remote Sensing, Active and passive: Vol. I Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Addison-Wesley, ISBN 0-201-10759-7 (v. 1), 456 p.
- UNEP (2002). United Nations Environmental Programme, site web : <http://www.unep.org/>.
- Van der Sanden, J. J. and D. H. Hoekman. (2005). Review of relationships between grey-tone co-occurrence, semivariance and autocorrelation based image texture analysis approaches. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 38, No. 3, pp. 207-213.
- Weber, F., D. Nixon, et J. Hurley (2003). Semi-automated classification of river ice types on the Peace River using RADARASAT-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery. Can.J.Civ.Eng, Vol. 30, pp. 11-27.

Weber, F., D. Nixon, et J. Hurley (2001). Identification of river ice types on the Peace River using RADARSAT-1 SAR imagery. *Proceedings of the 11th River Ice Workshop, Committee on River Ice Processes and the Environment (CGU-HS)*, Université d'Ottawa, Ottawa, Ontario, May.

**ANNEXE-A**

---

Photos de terrain





Annexe A-1 : Photos terrain zone de l'aéroport; point d'observation #6.

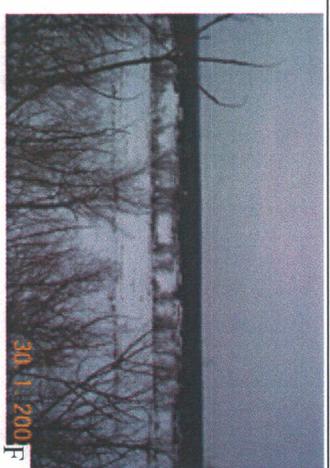
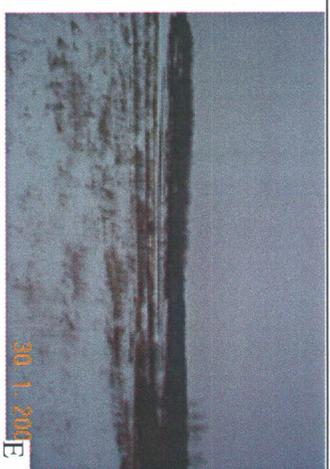
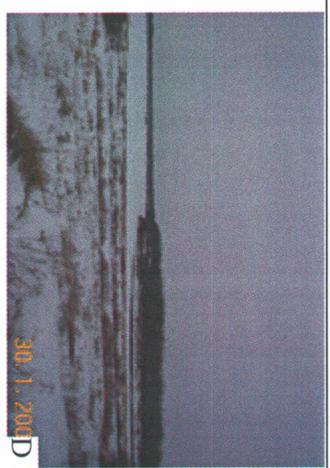


Annexe A- 2 : Photos terrain de la zone en « U » ; points d'observation #6A, 26 et 27.

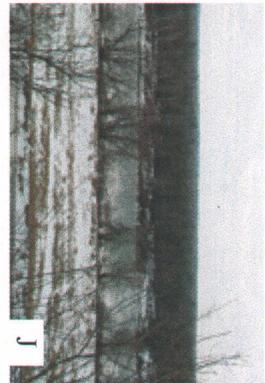
6 janvier 2002



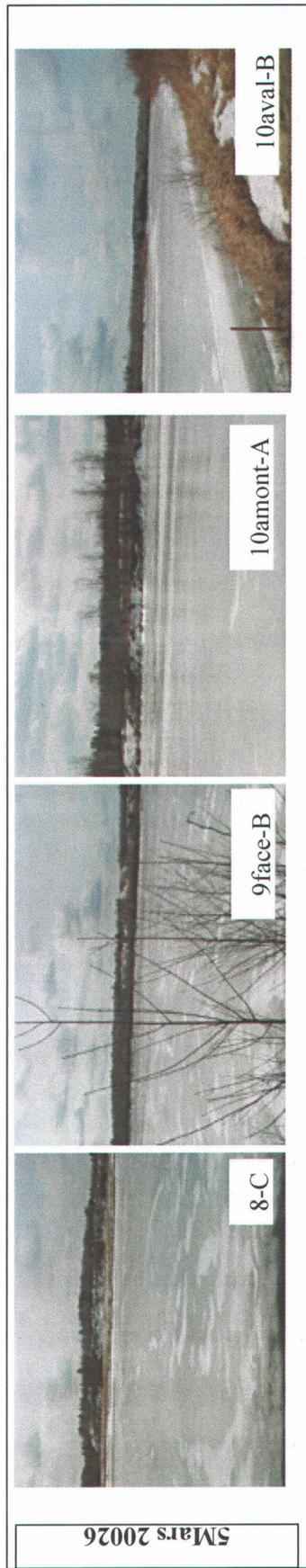
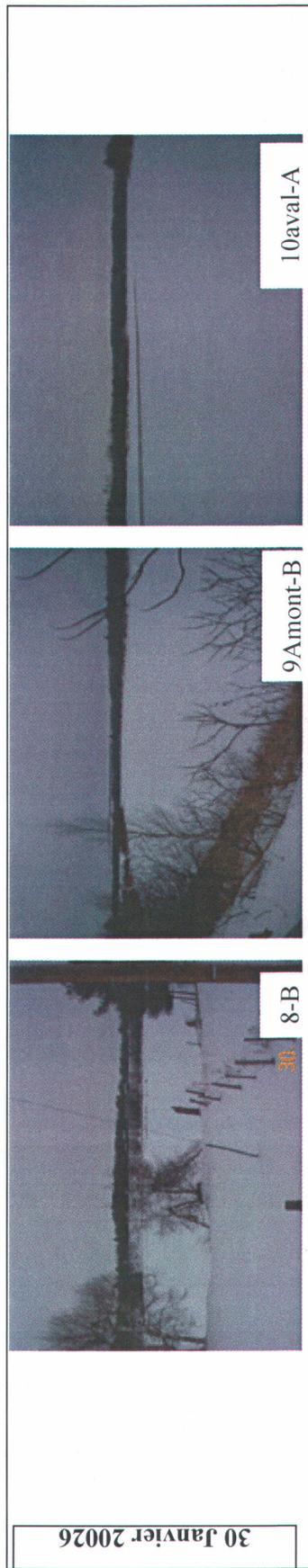
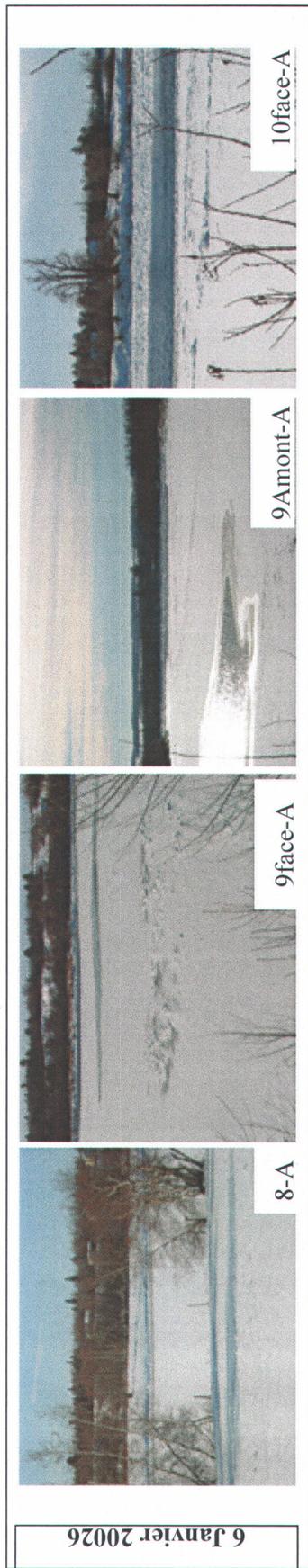
30 janvier 2002



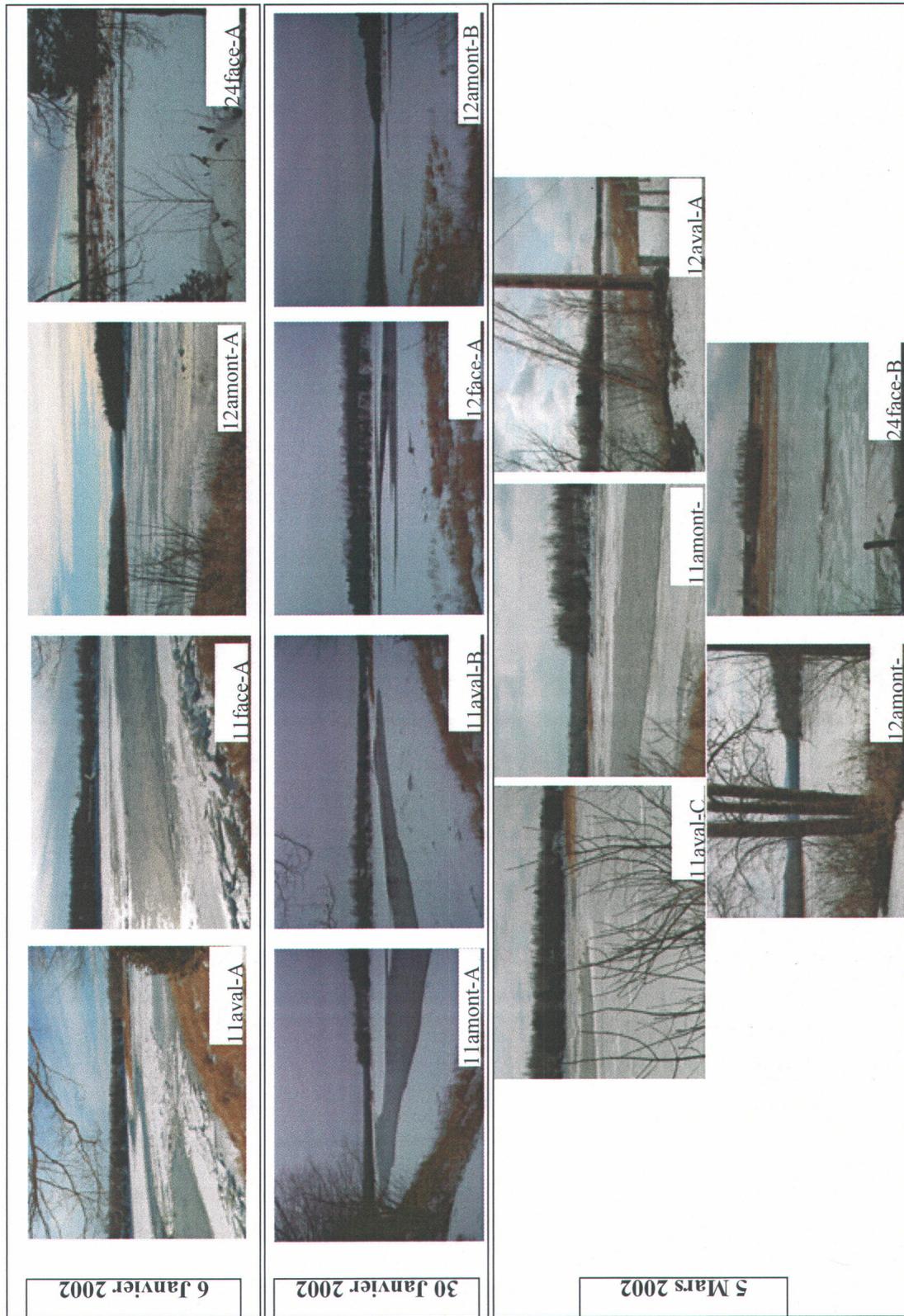
5 Mars 2002



Annexe-A3 : Photos terrain de la zone de la tête du Canard ; points d'observation #7



Annexe A-4 : Photos terrain de la zone de l'île Therrien ; points d'observations #8, 9 et 10



Annexe A-5 : Photos terrain de la zone de l'île Brown ; points d'observation # 11, 12 et 24

6 Janvier 2002



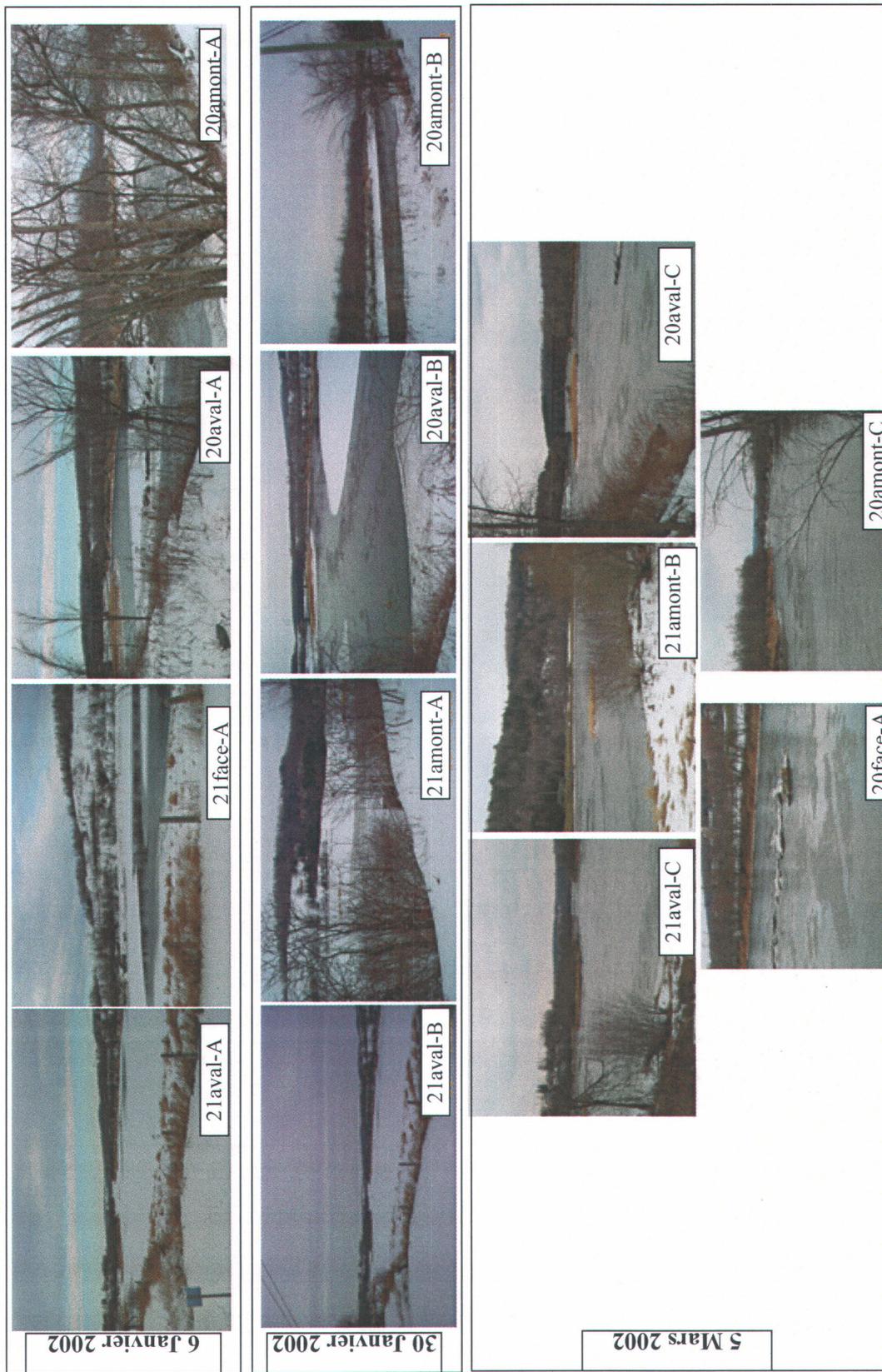
30 Janvier 2002



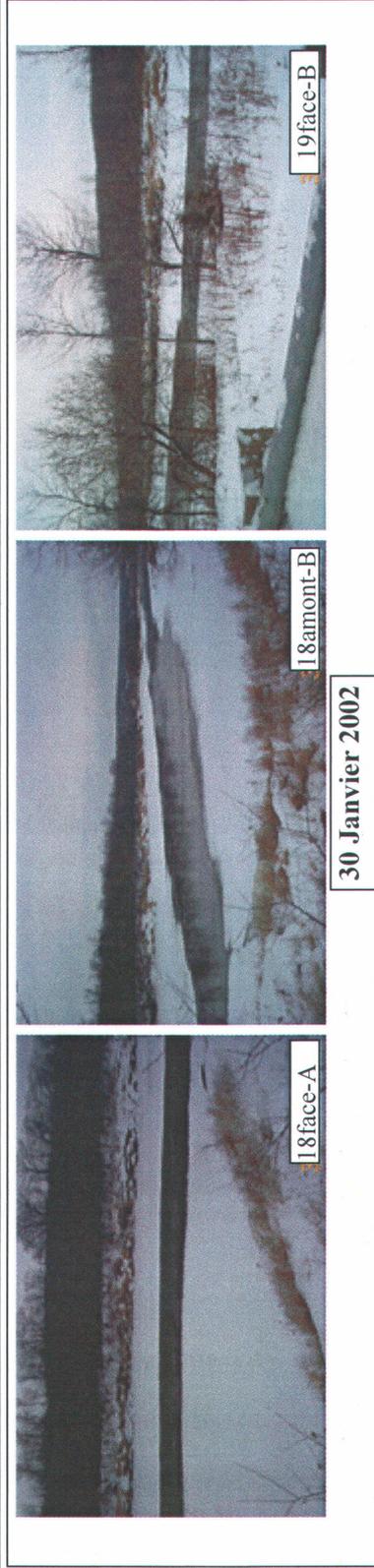
5 Mars 2002



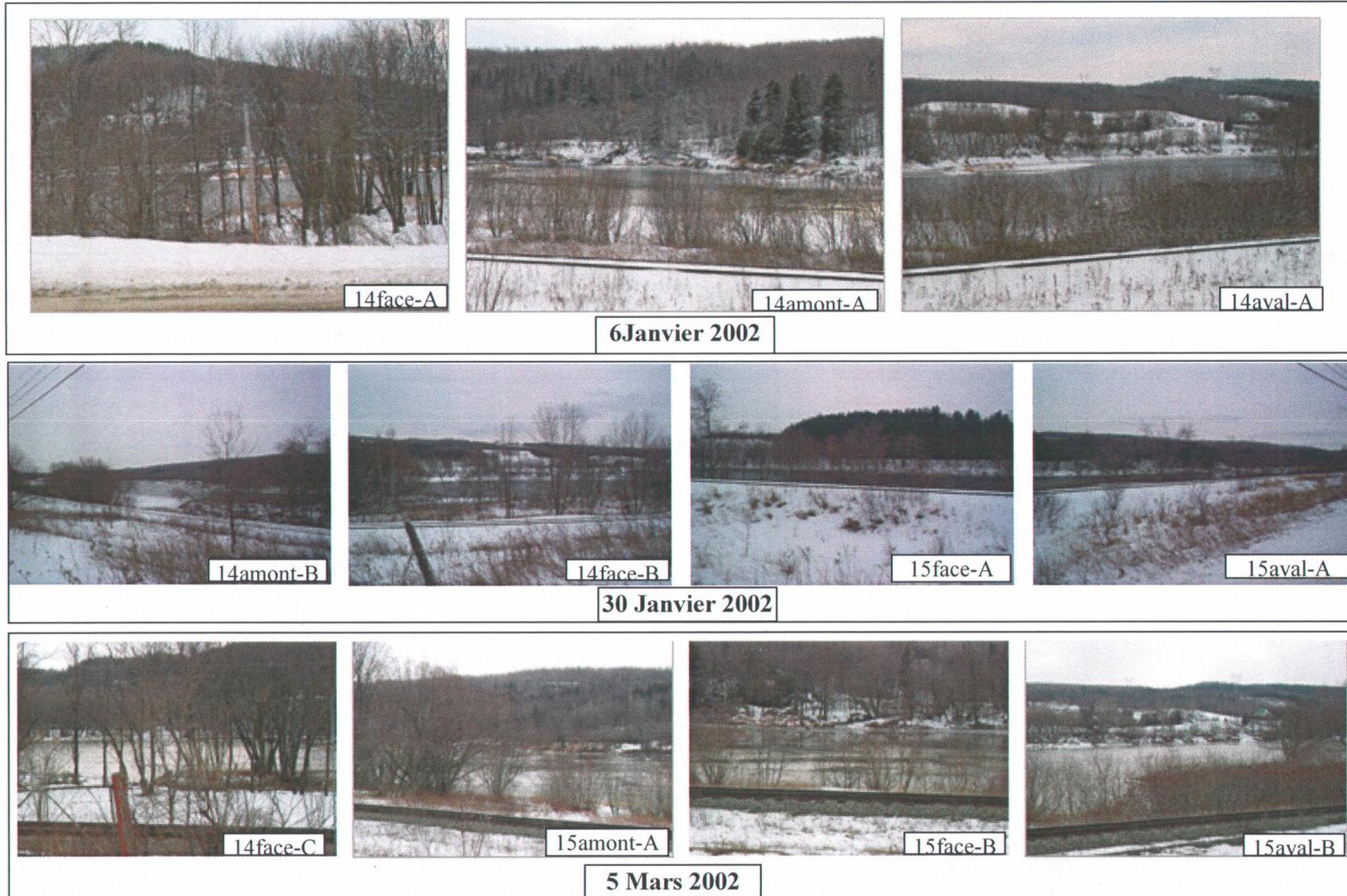
Annexe A-6 : Photos terrain de la zone d'Ulverton ; point d'observation #22



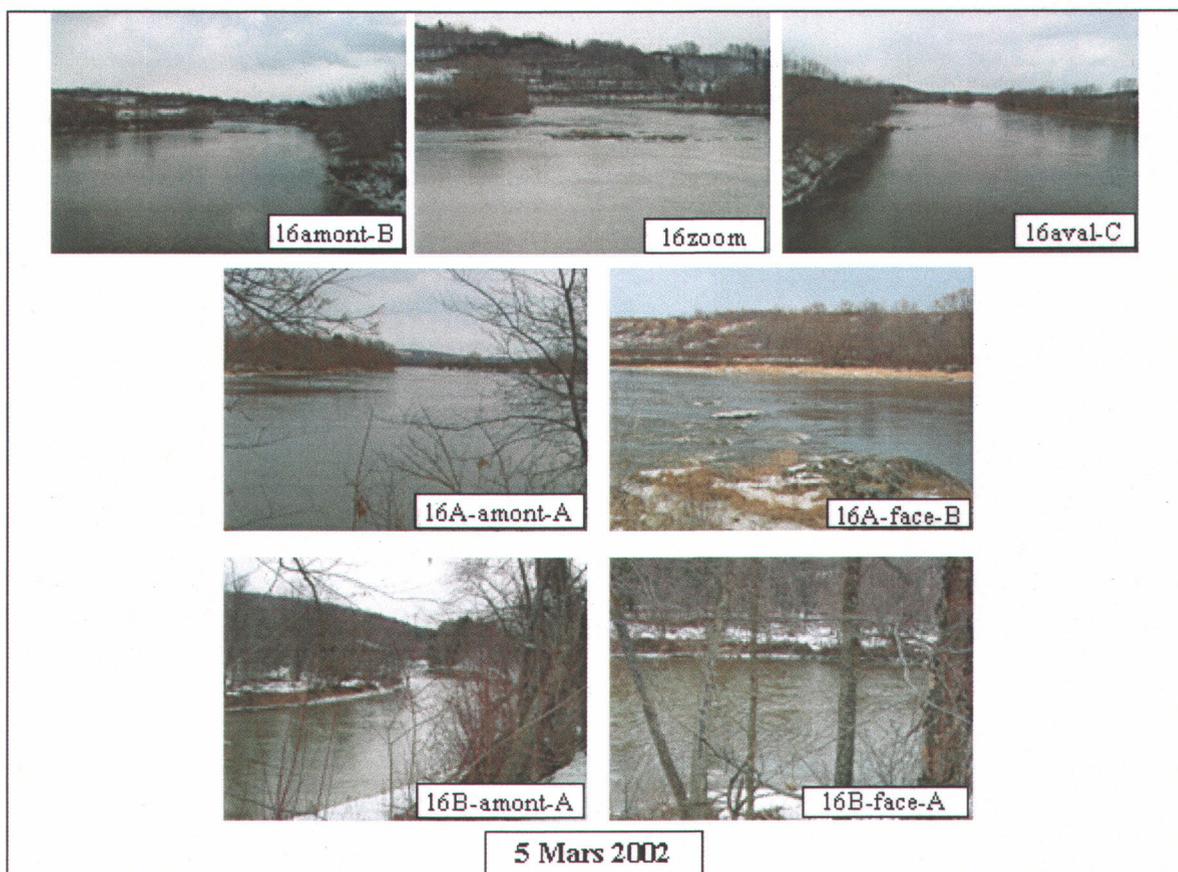
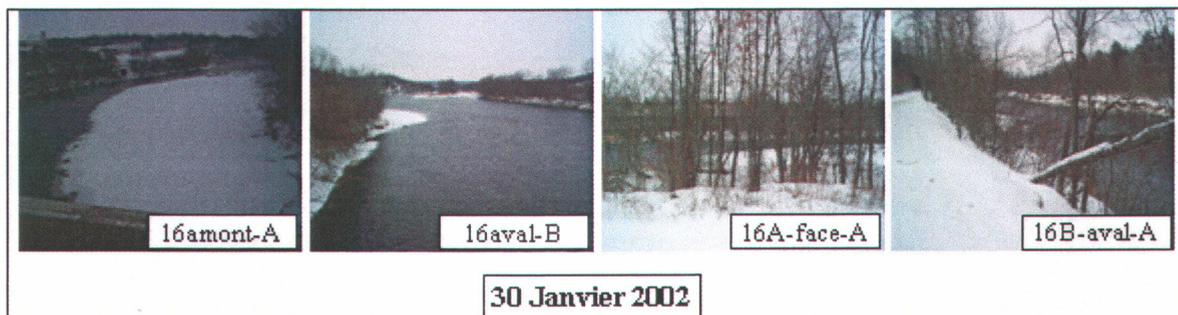
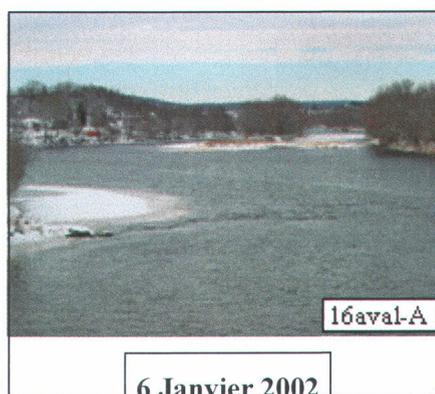
Annexe-A-7 : Photos terrain de la zone des points d'observation # 13-20



Annexe A-8 : Photos terrain de la zone de la ville de Richmond ; points d'observation # 17, 18 et 19



Annexe-A-9 : Photos terrain de la zone des points d'observation #14-15



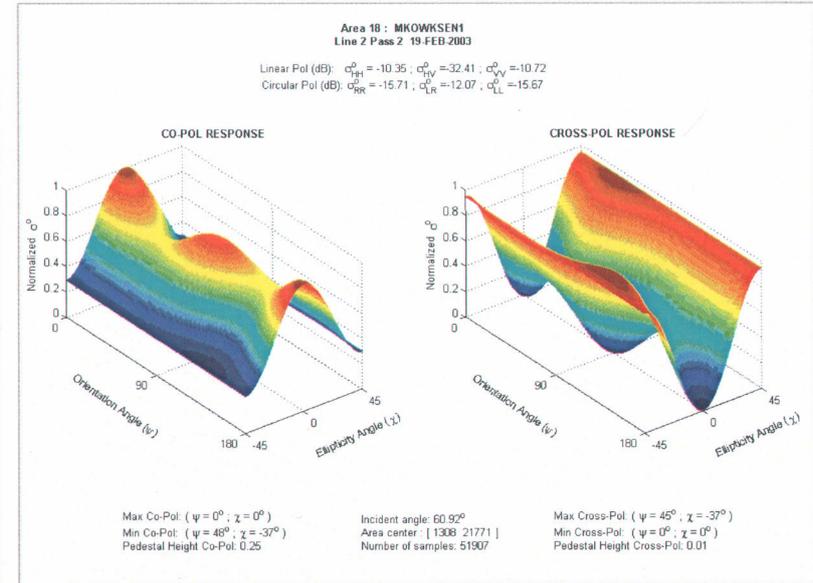
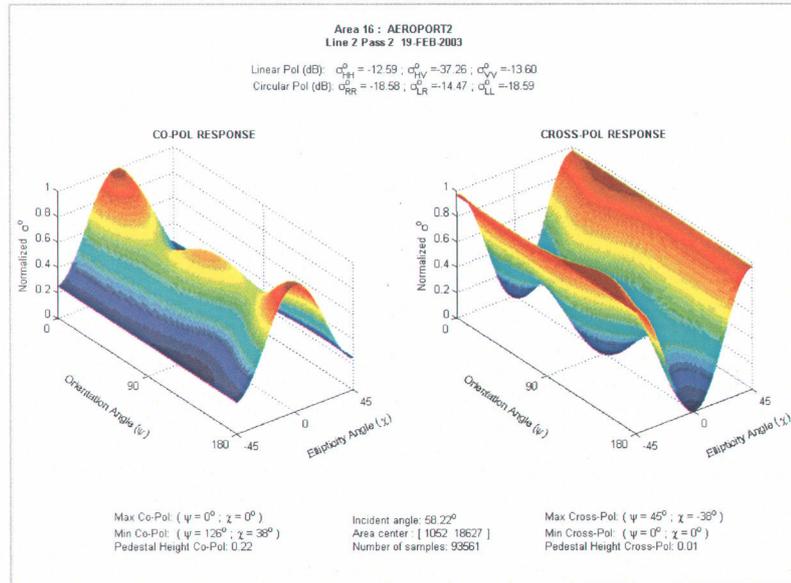
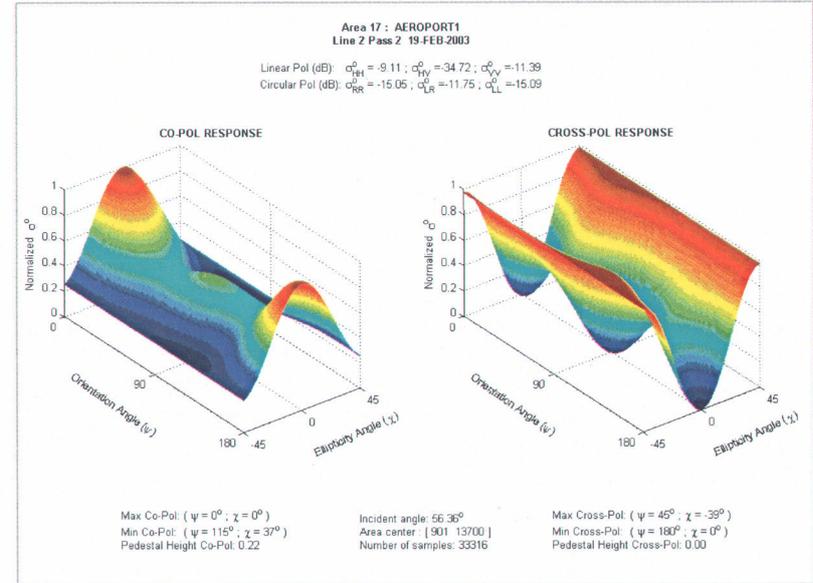
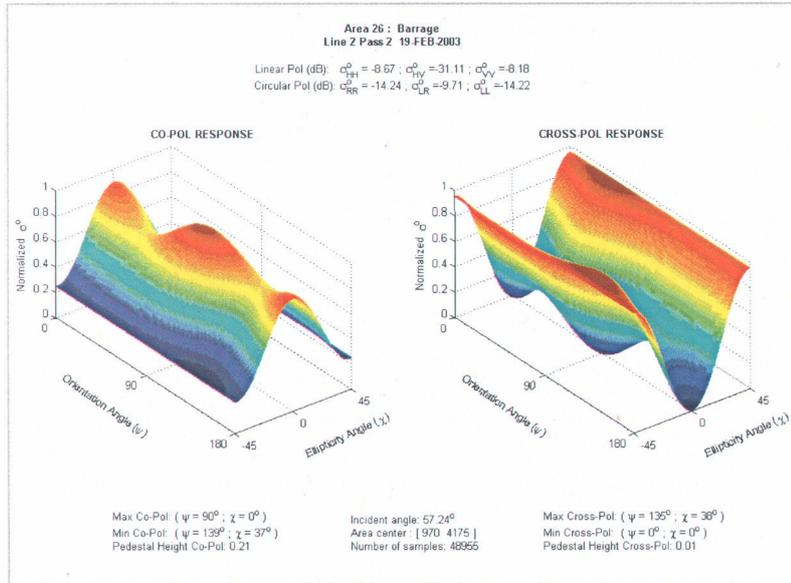
Annexe A-10 : Photos terrain de la zone de la ville de Windsor ; Points d'observation #16, 16A et 16B

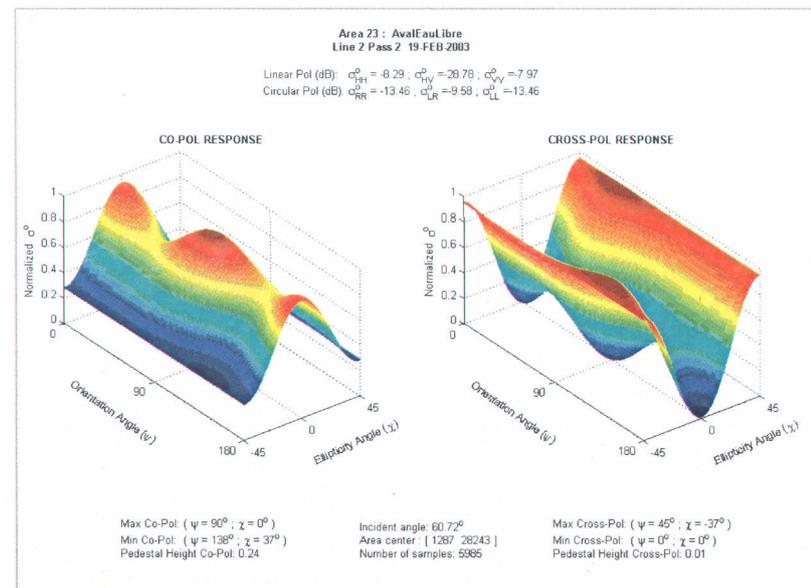
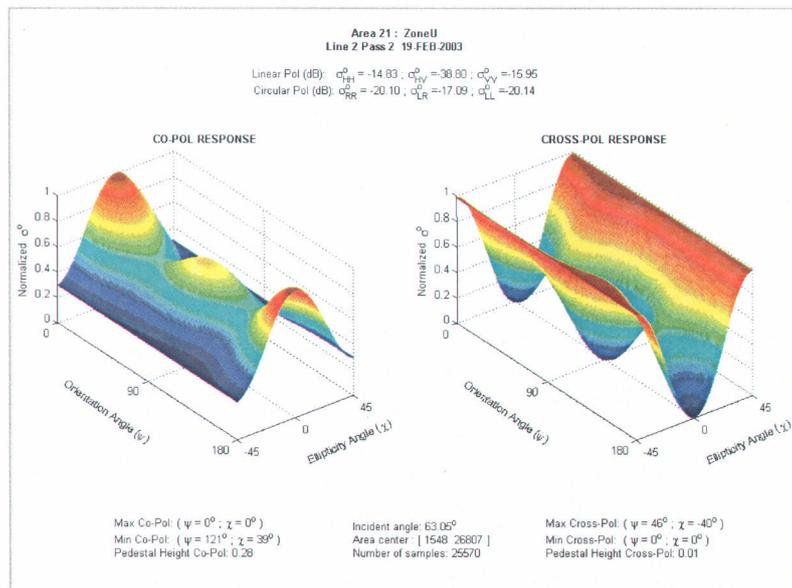
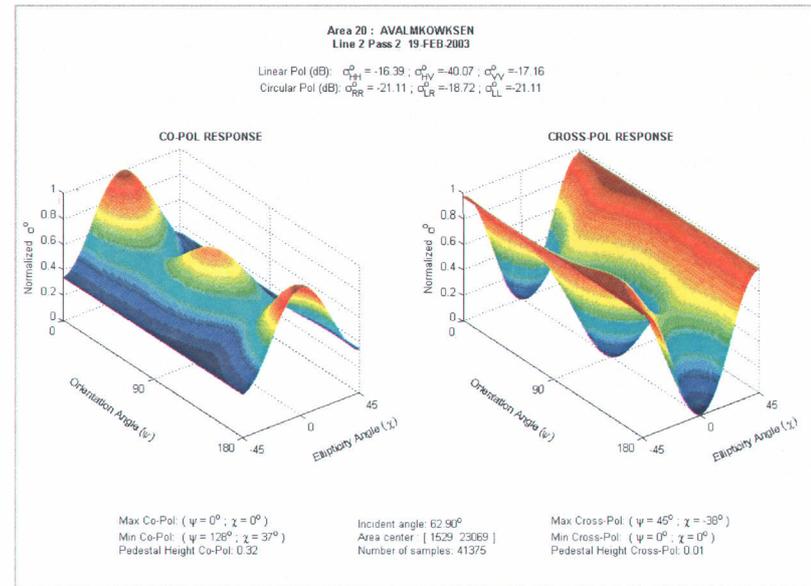
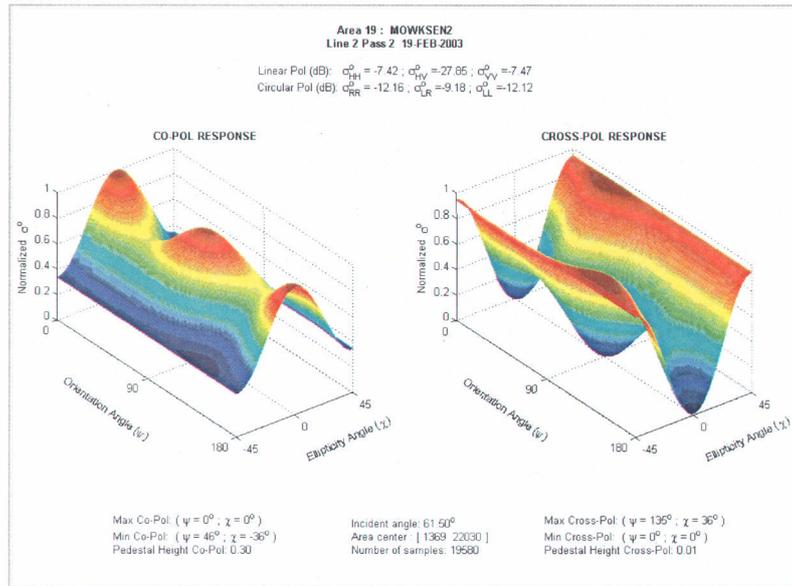
## **ANNEXE-B**

---

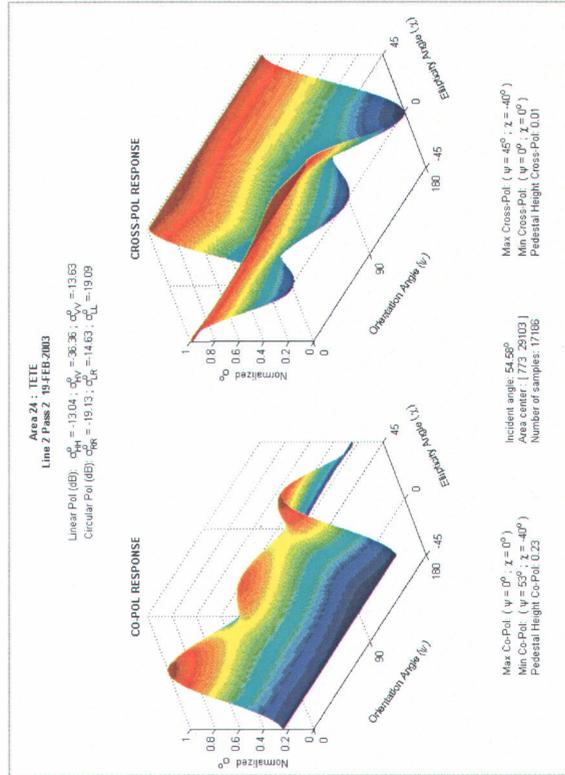
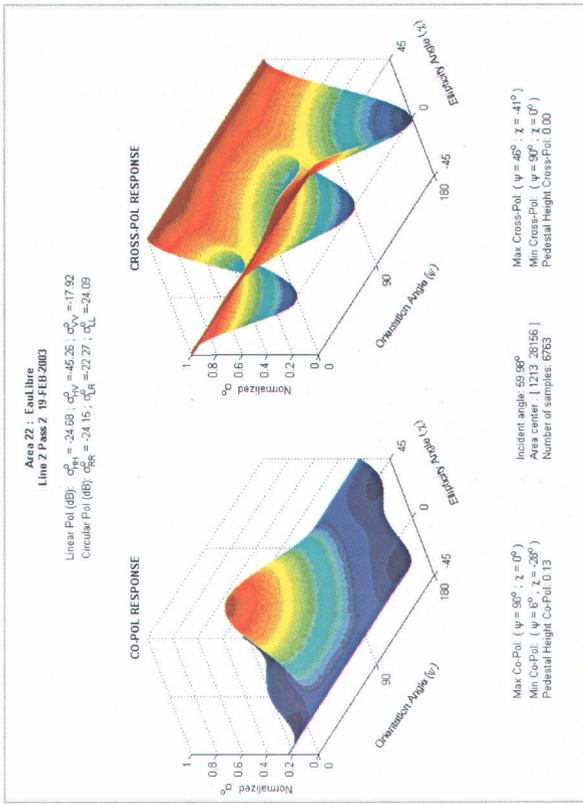
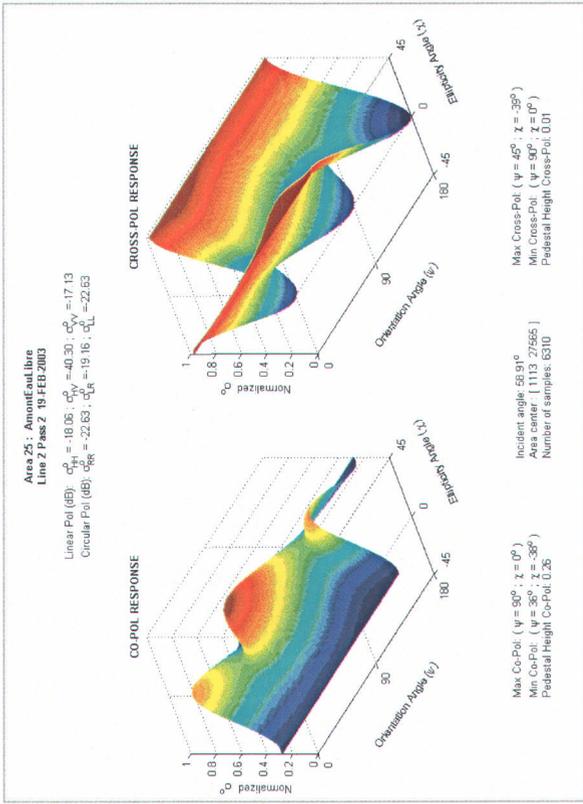
# Analyse Polarimétrique

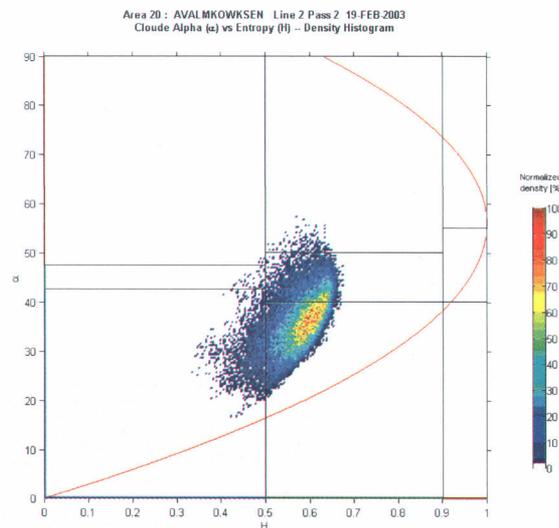
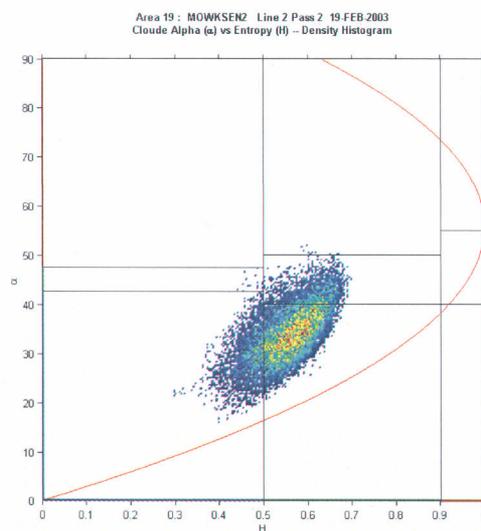
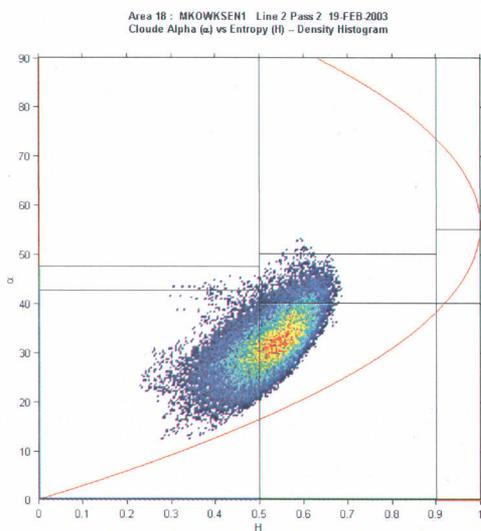
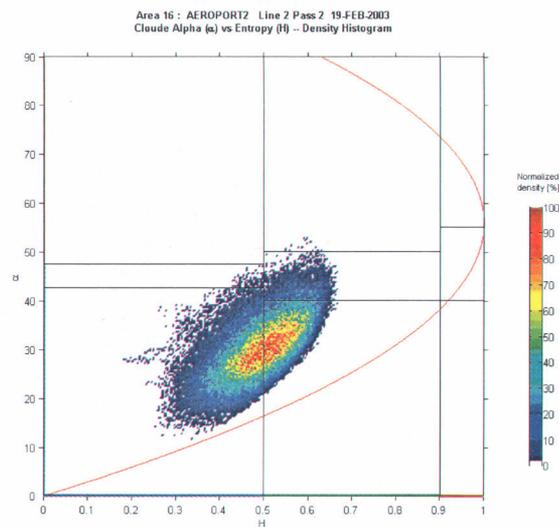
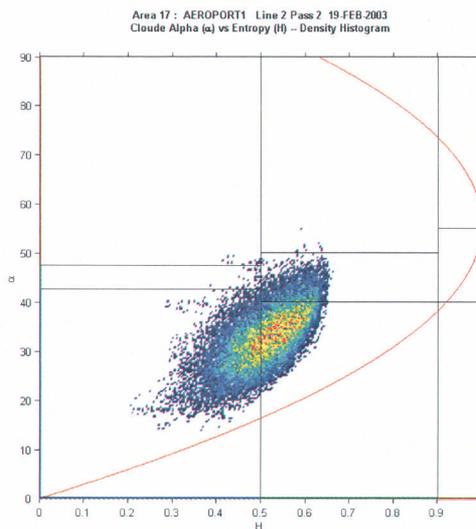
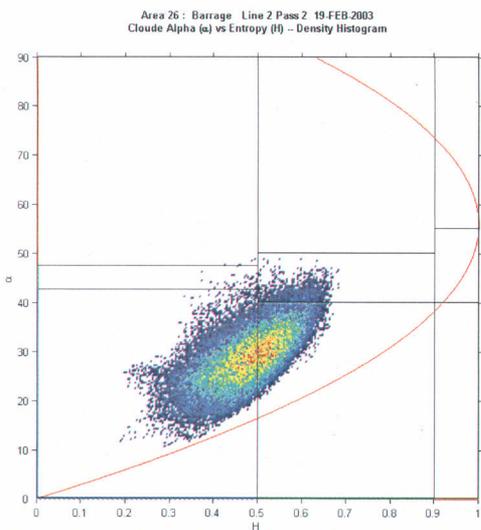


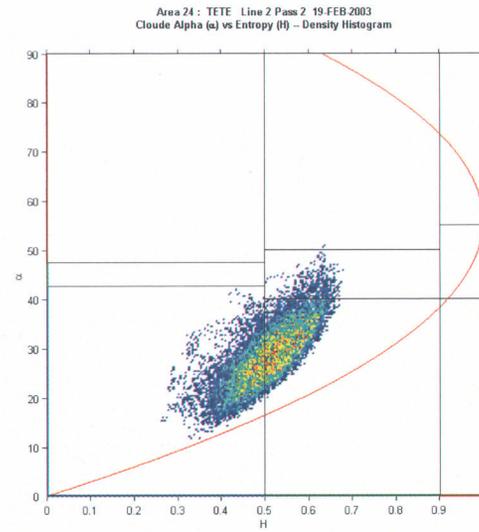
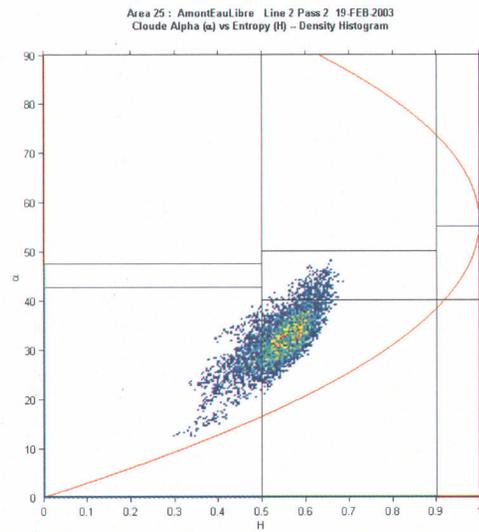
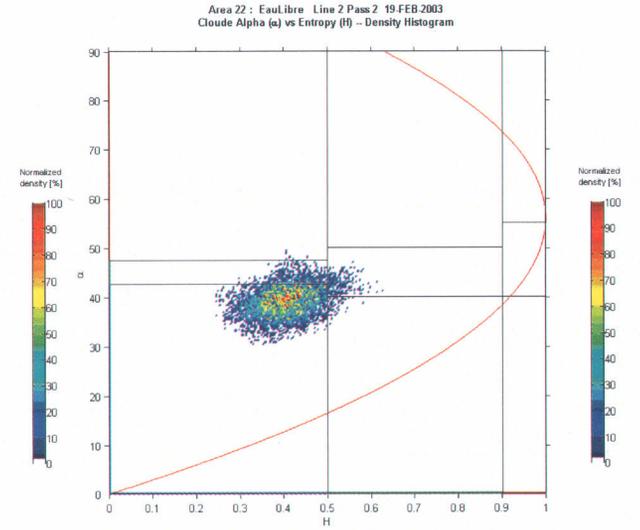
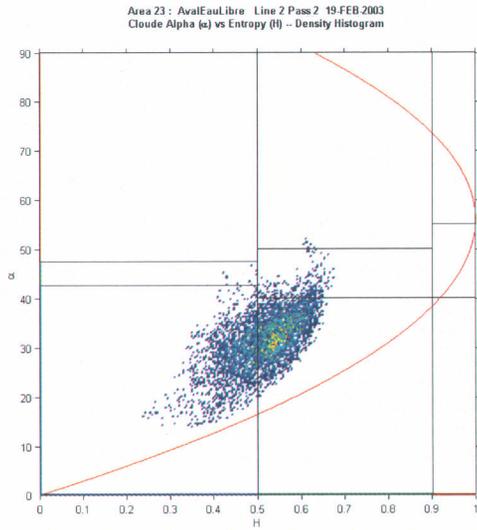
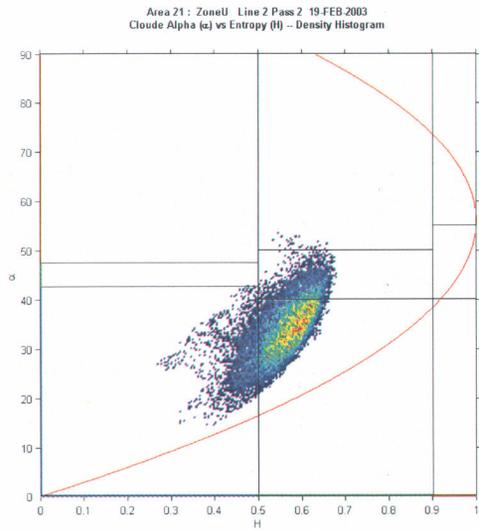




Annexe B, Analyse polarimétrique







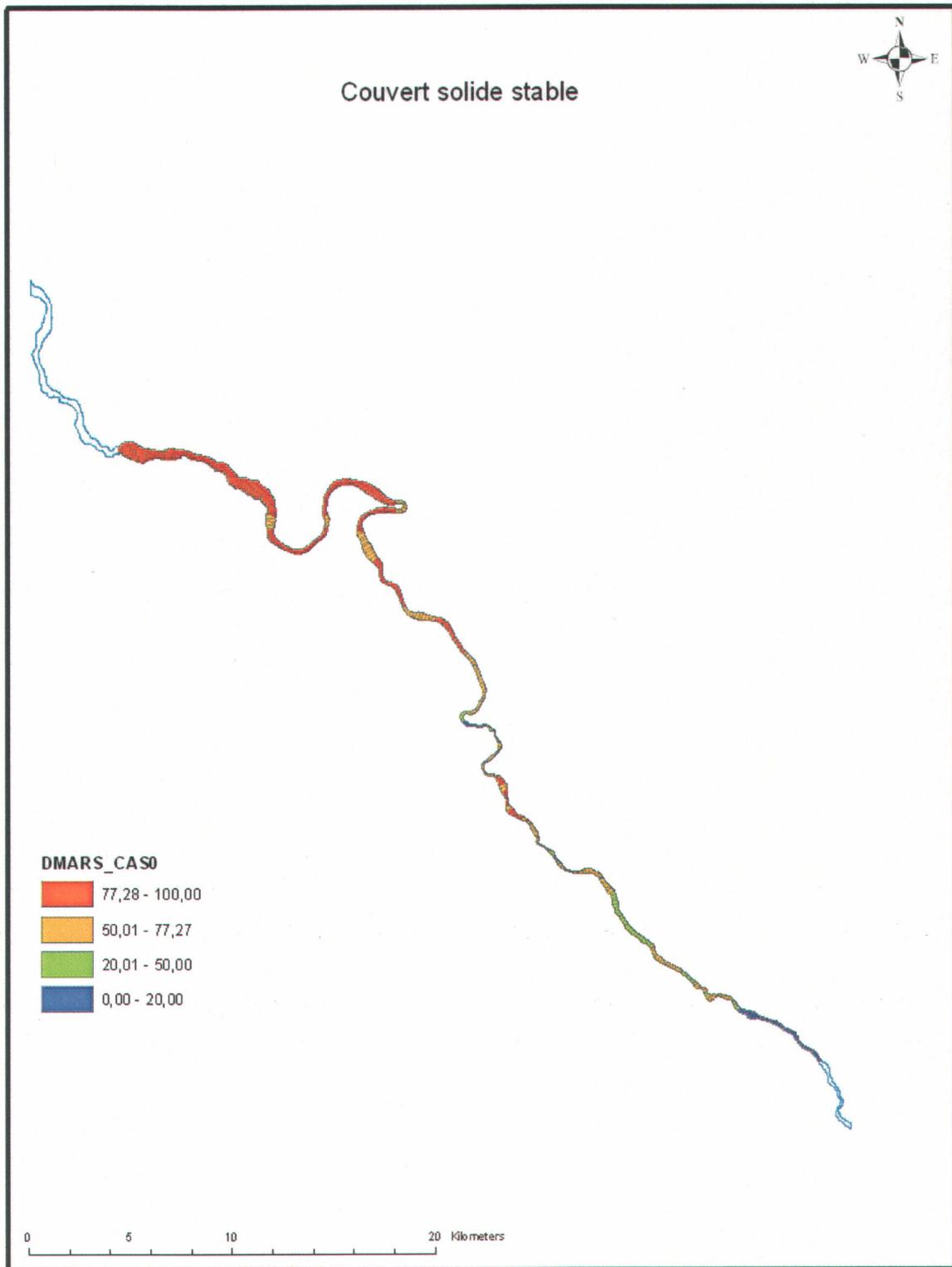
Zone	Polarisation linéaire			Polarisation circulaire			Co-Pol					Cross-Pol				Angle d'incidence	
	$\sigma^{\circ}_{HH}$	$\sigma^{\circ}_{HV}$	$\sigma^{\circ}_{VV}$	$\sigma^{\circ}_{RR}$	$\sigma^{\circ}_{LR}$	$\sigma^{\circ}_{LL}$	max		min		Hauteur du socle	max		min			Hauteur du socle
							$\psi$	$\chi$	$\psi$	$\chi$		$\psi$	$\chi$				
Barrage	-8.67	-31.11	-8.18	-14.24	-9.71	-14.22	90	0	139	37	<b>0.21</b>	135	38	0	0	0.01	57.24
Aéroport1	-9.11	-34.72	-11.39	-15.05	-11.75	-15.09	0	0	115	37	<b>0.22</b>	45	-39	180	0	0	56.36
Aéroport2	-12.59	-37.26	-13.60	-18.58	-14.47	-18.59	0	0	126	38	<b>0.22</b>	45	-38	0	0	0.01	58.22
Mkowksen 1	-10.35	-32.41	-10.72	-15.71	-12.07	-15.67	0	0	48	-37	<b>0.25</b>	45	-37	0	0	0.01	60.92
Mkowksen 2	-7.42	-27.85	-7.47	-12.16	-9.18	-12.12	0	0	46	-36	<b>0.30</b>	135	36	0	0	0.01	61.50
Mkowksen amont	-16.39	-40.07	-17.16	-21.11	-18.72	-21.11	0	0	128	37	<b>0.32</b>	45	-38	0	0	0.01	62.90
Zone U	-14.83	-38.80	-15.95	-20.10	-17.09	-20.14	0	0	121	39	<b>0.28</b>	46	-40	0	0	0.01	63.05
Aval eau libre	-8.29	-28.78	-7.97	-13.46	-9.58	-13.46	90	0	138	37	<b>0.24</b>	45	-37	0	0	0.01	60.72
Eau libre	-24.68	-45.26	-17.92	-24.15	-22.27	-24.09	90	0	6	-28	<b>0.13</b>	46	-41	90	0	0	59.98
Amont eau libre	-18.06	-40.30	-17.13	-22.63	-19.16	-22.63	90	0	36	-38	<b>0.26</b>	45	-39	90	0	0.01	58.91
Tête	-13.04	-36.36	-13.63	-19.13	-14.63	-19.09	0	0	53	-40	<b>0.23</b>	45	-40	0	0	0.01	54.58

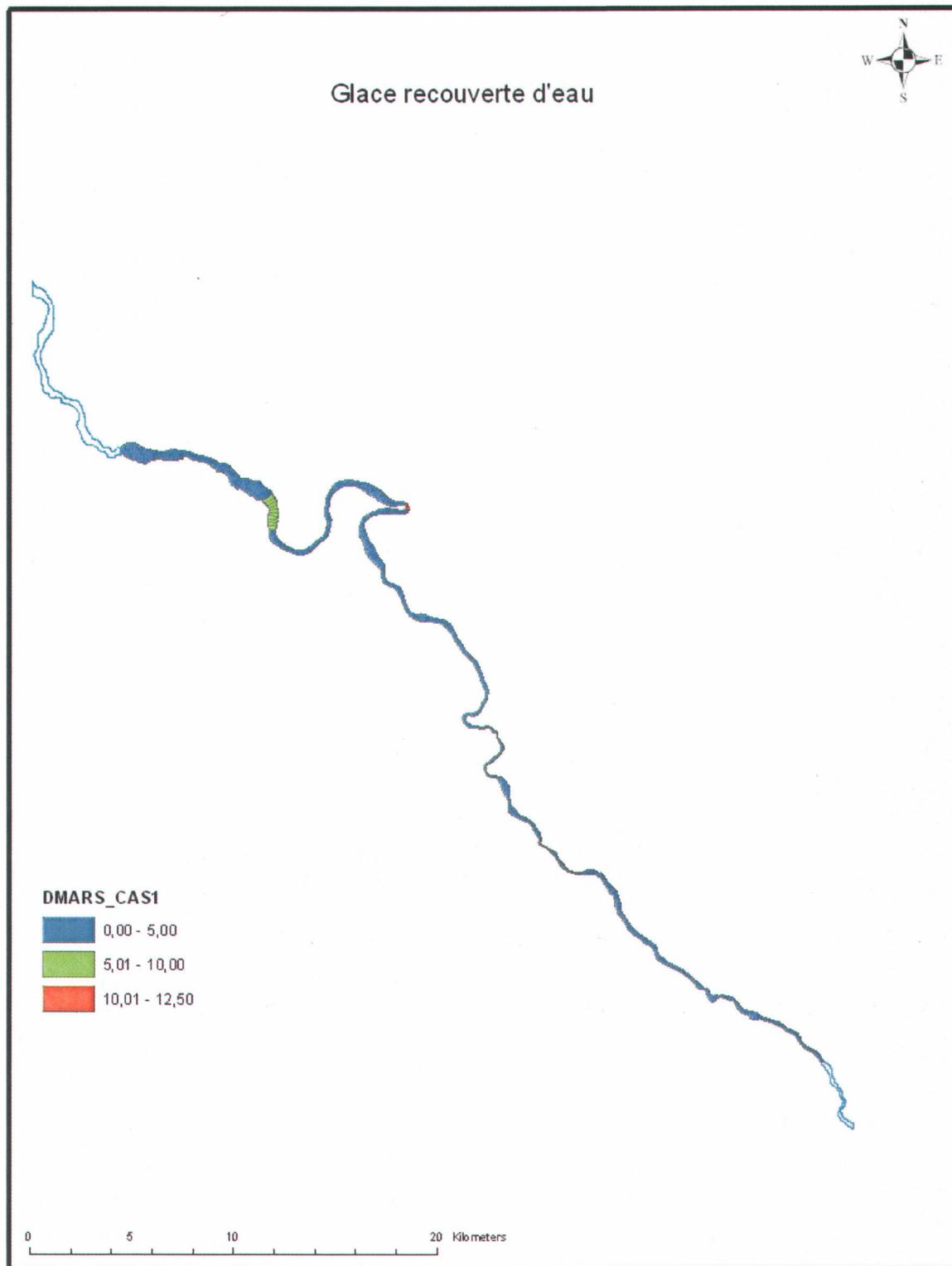
## ANNEXE-C

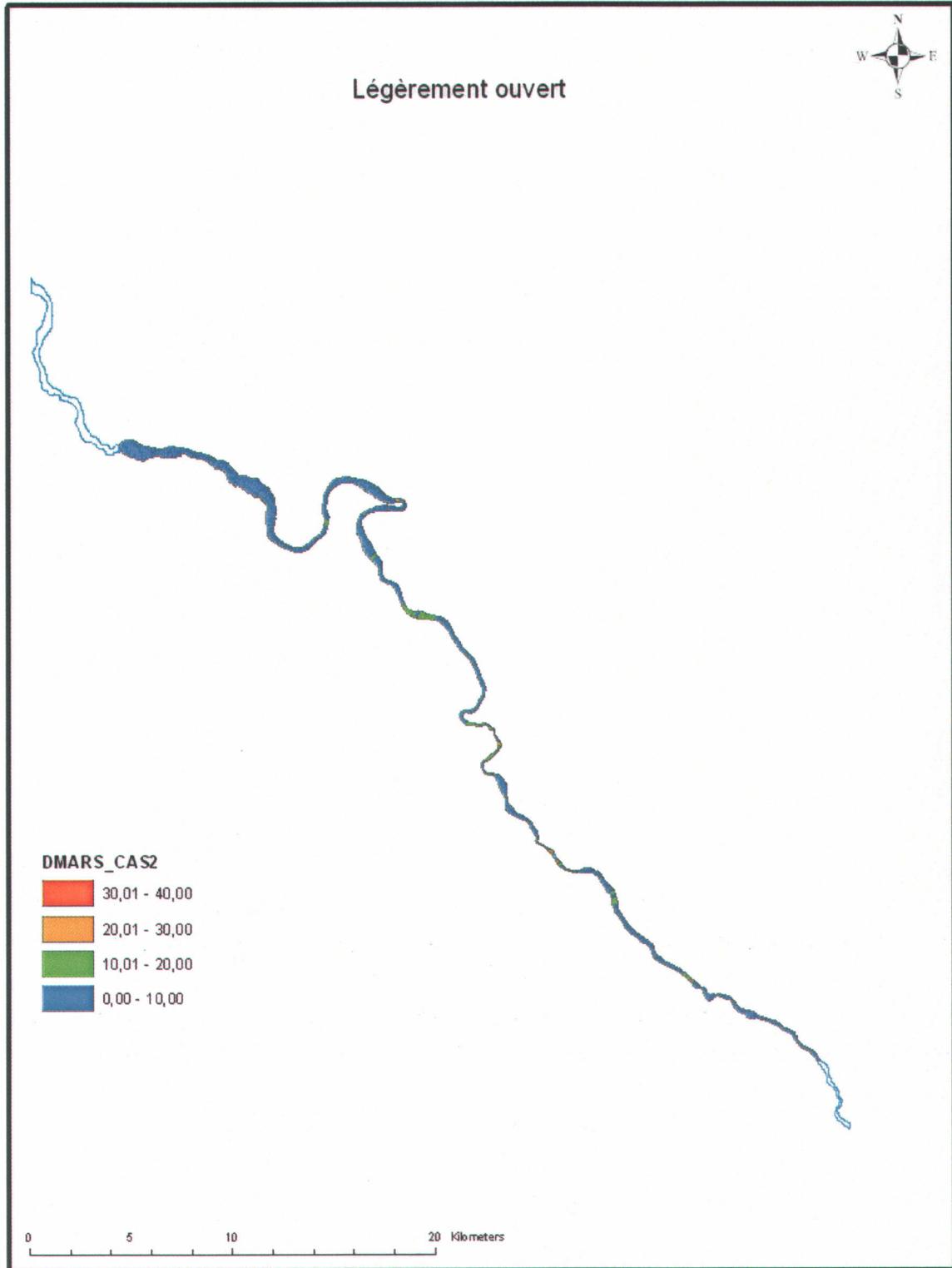
---

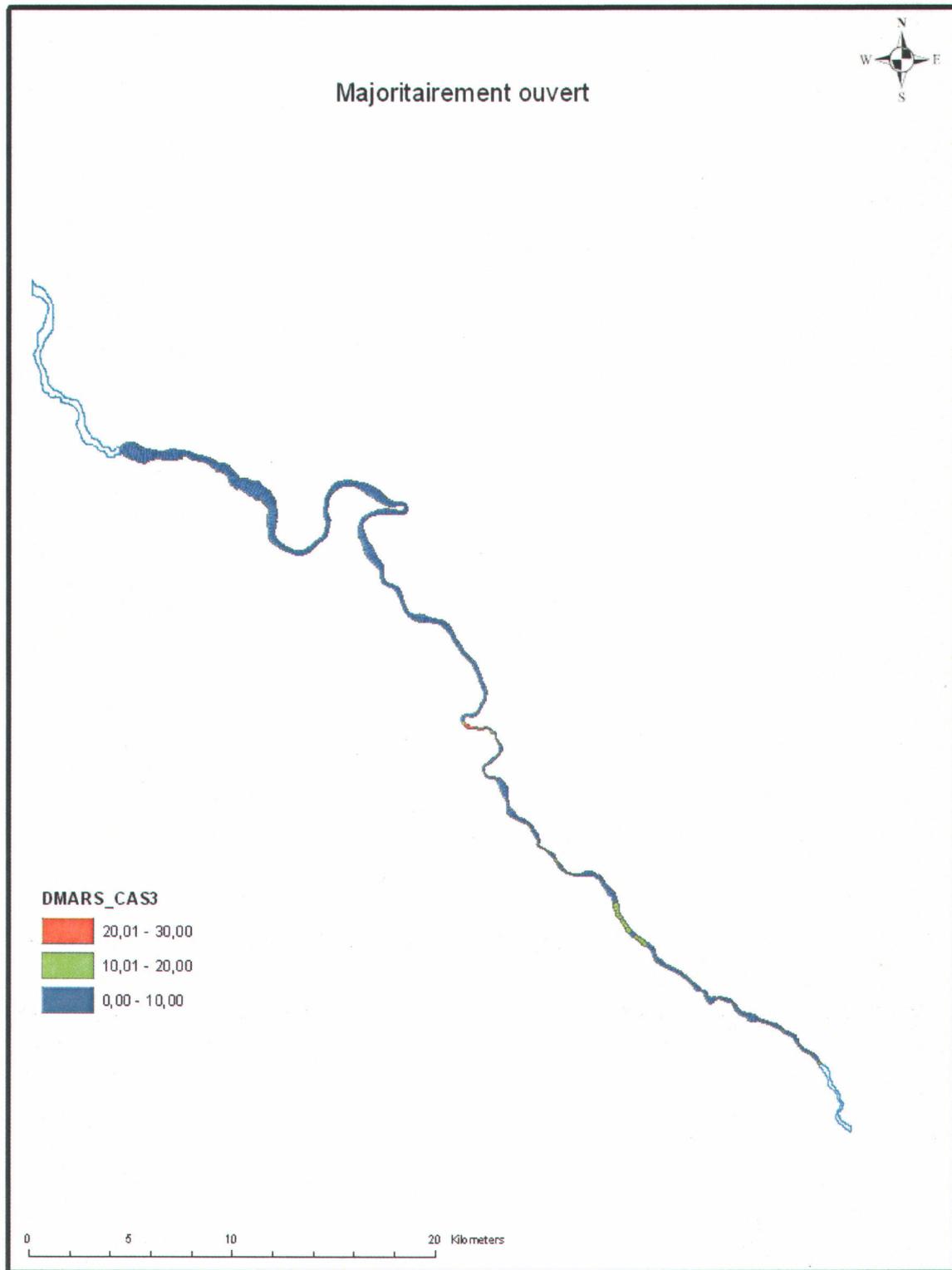
# Probabilités Historiques

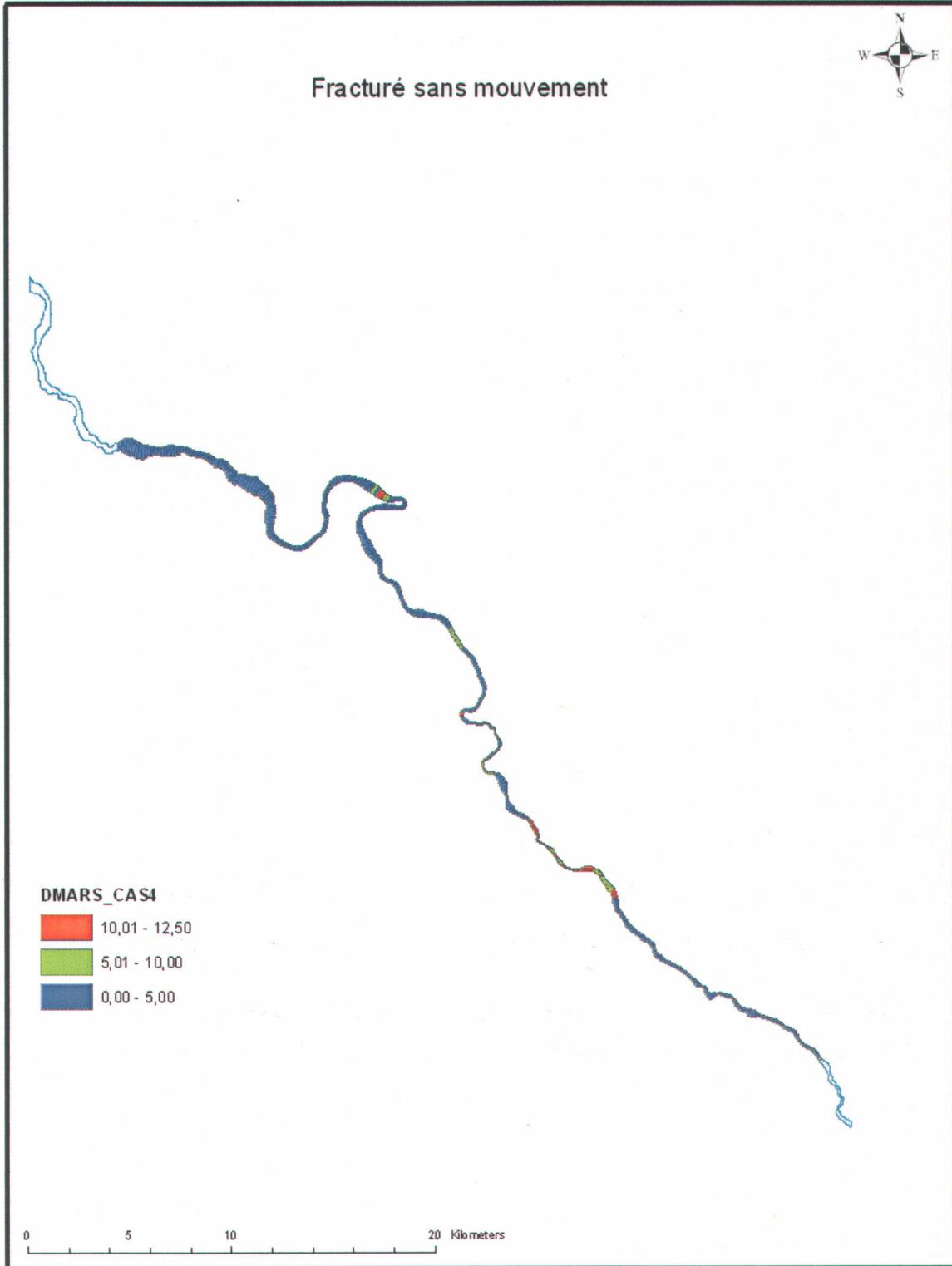


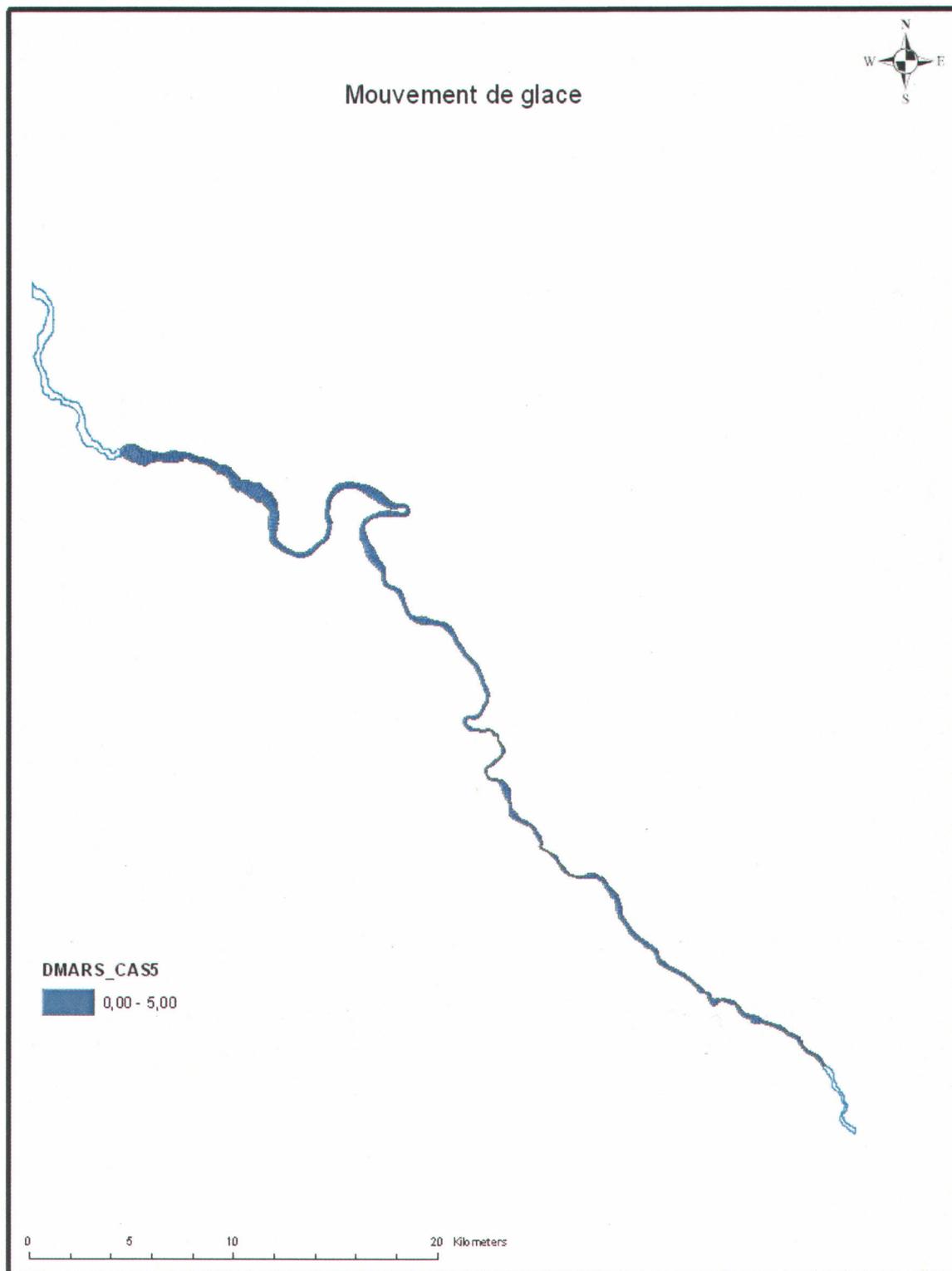


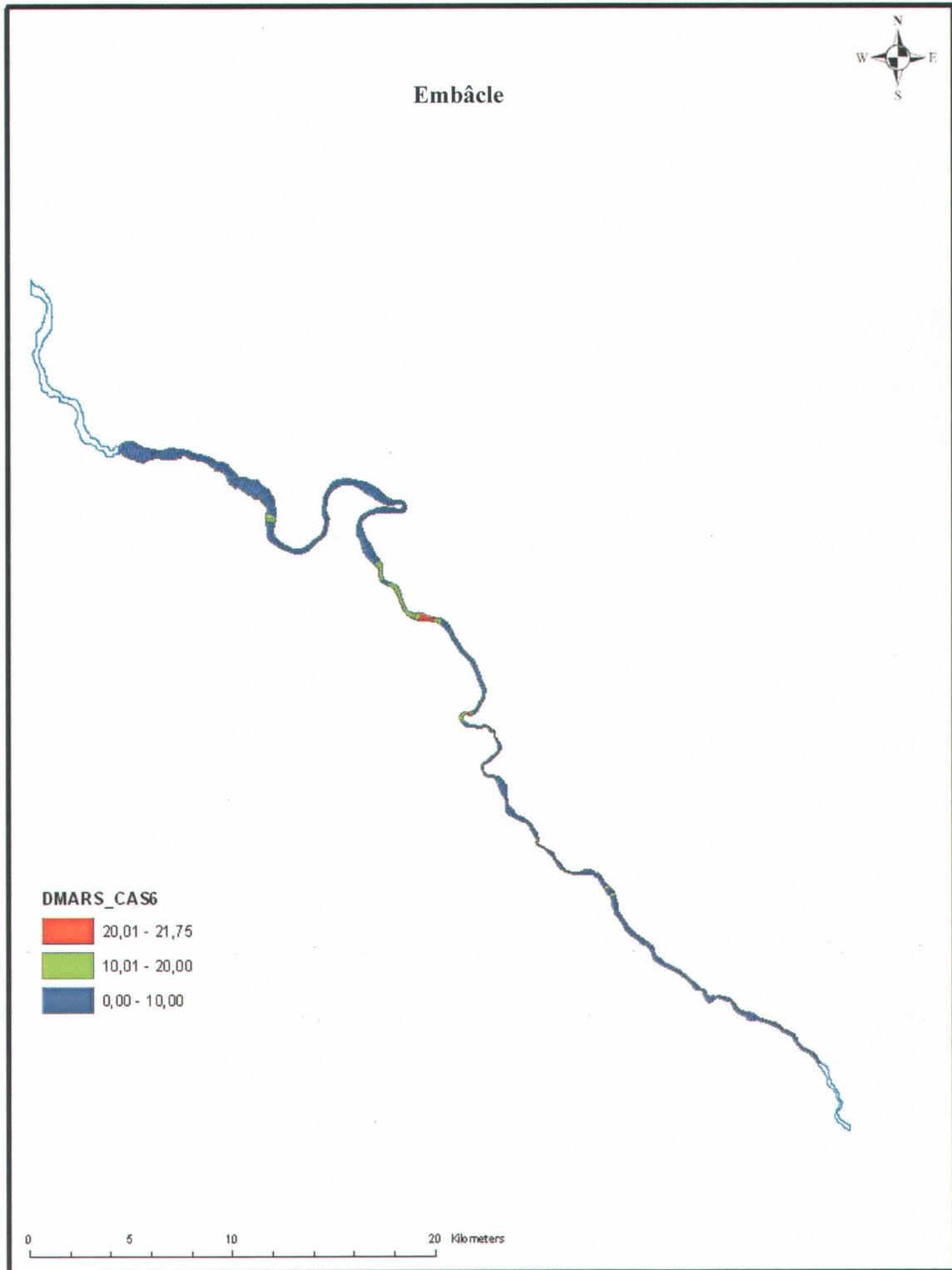


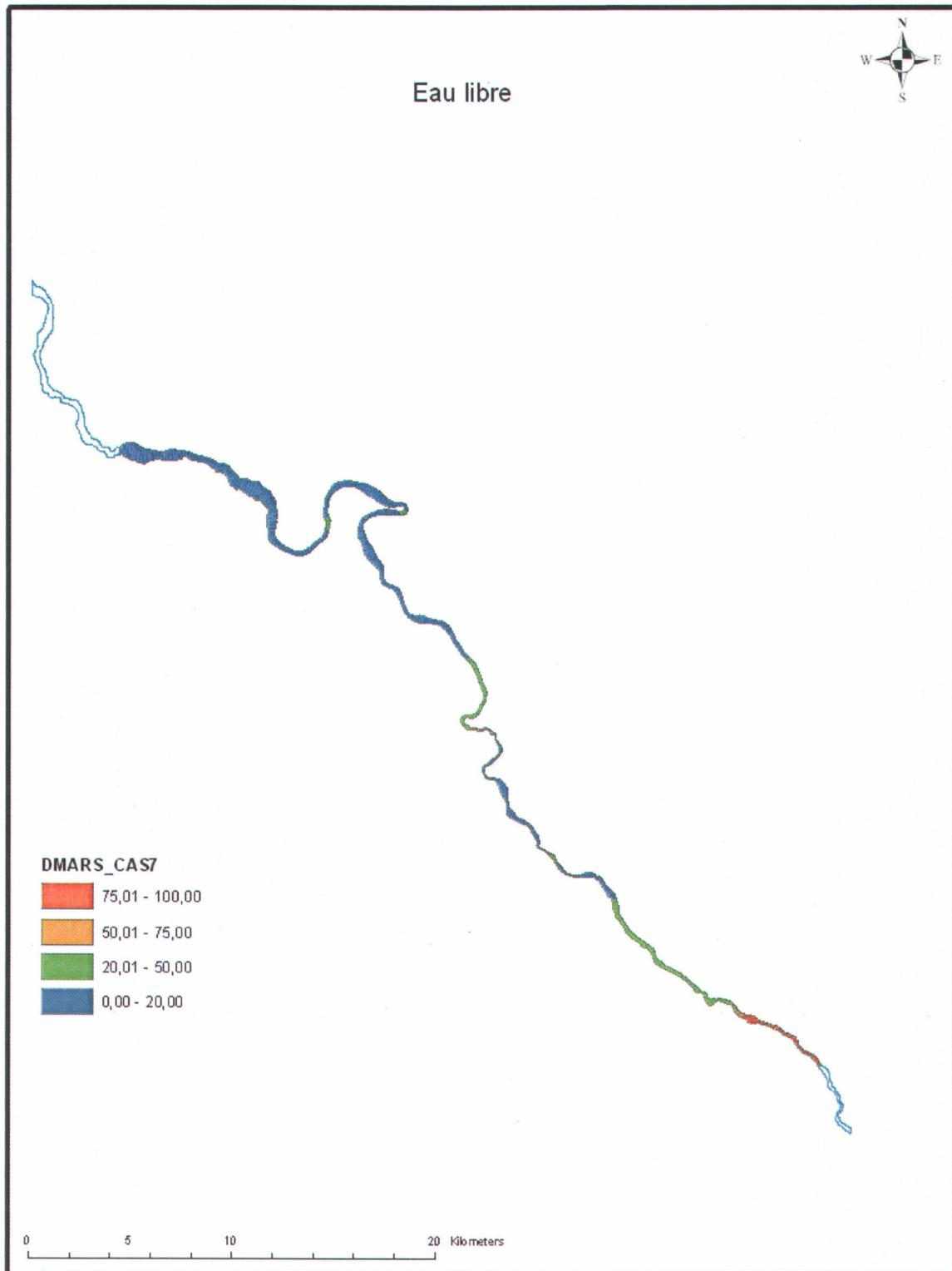


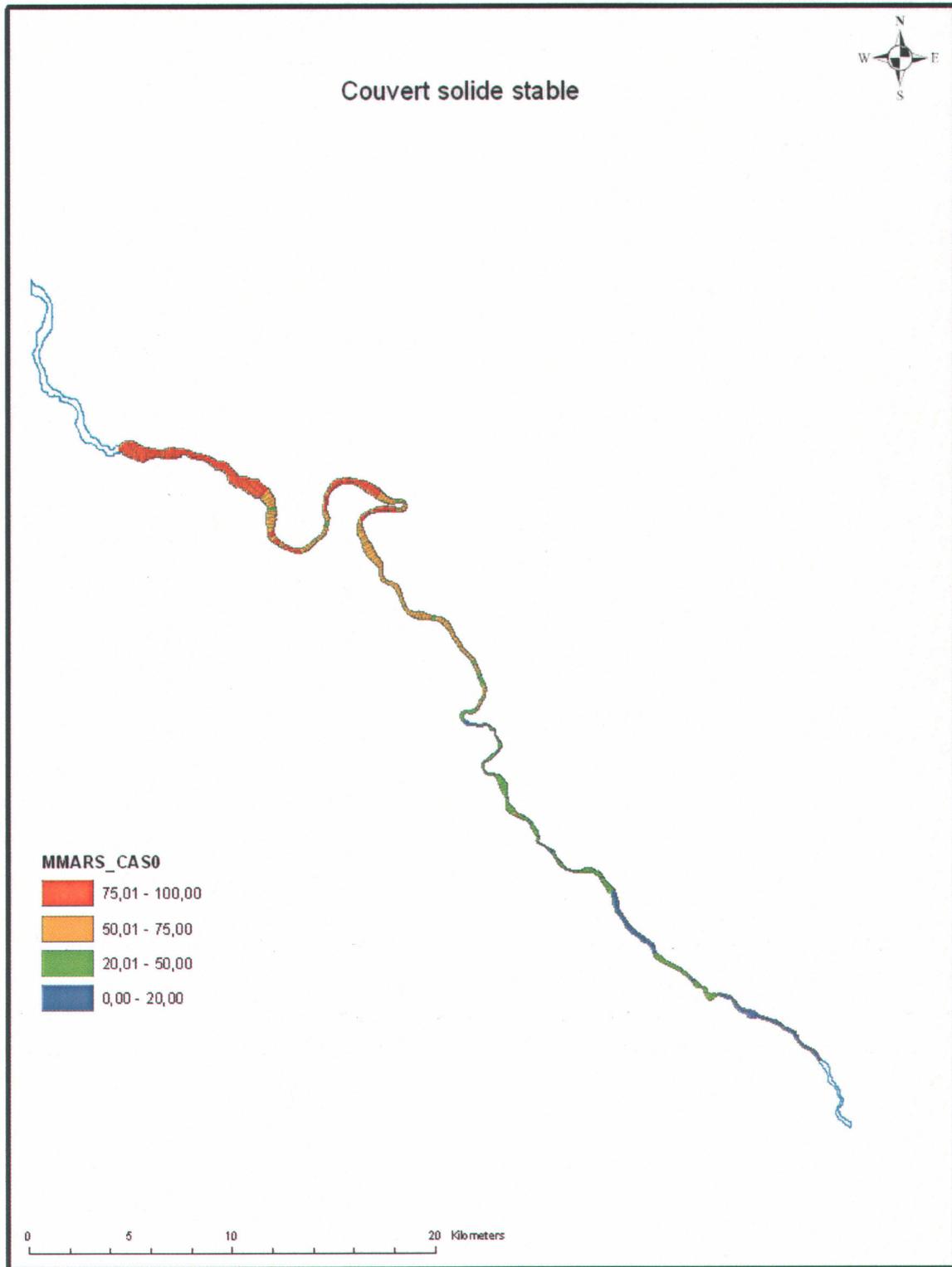


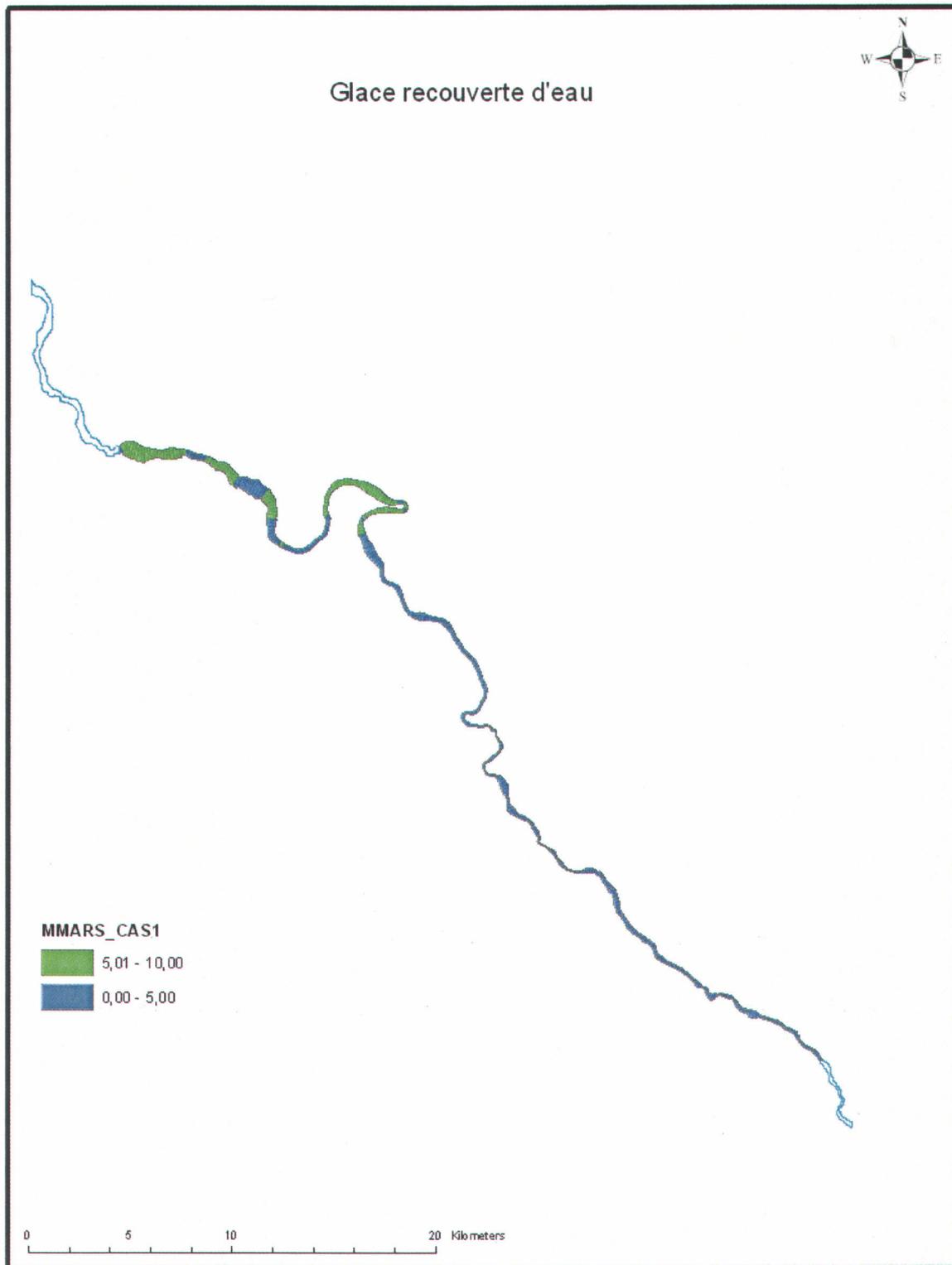


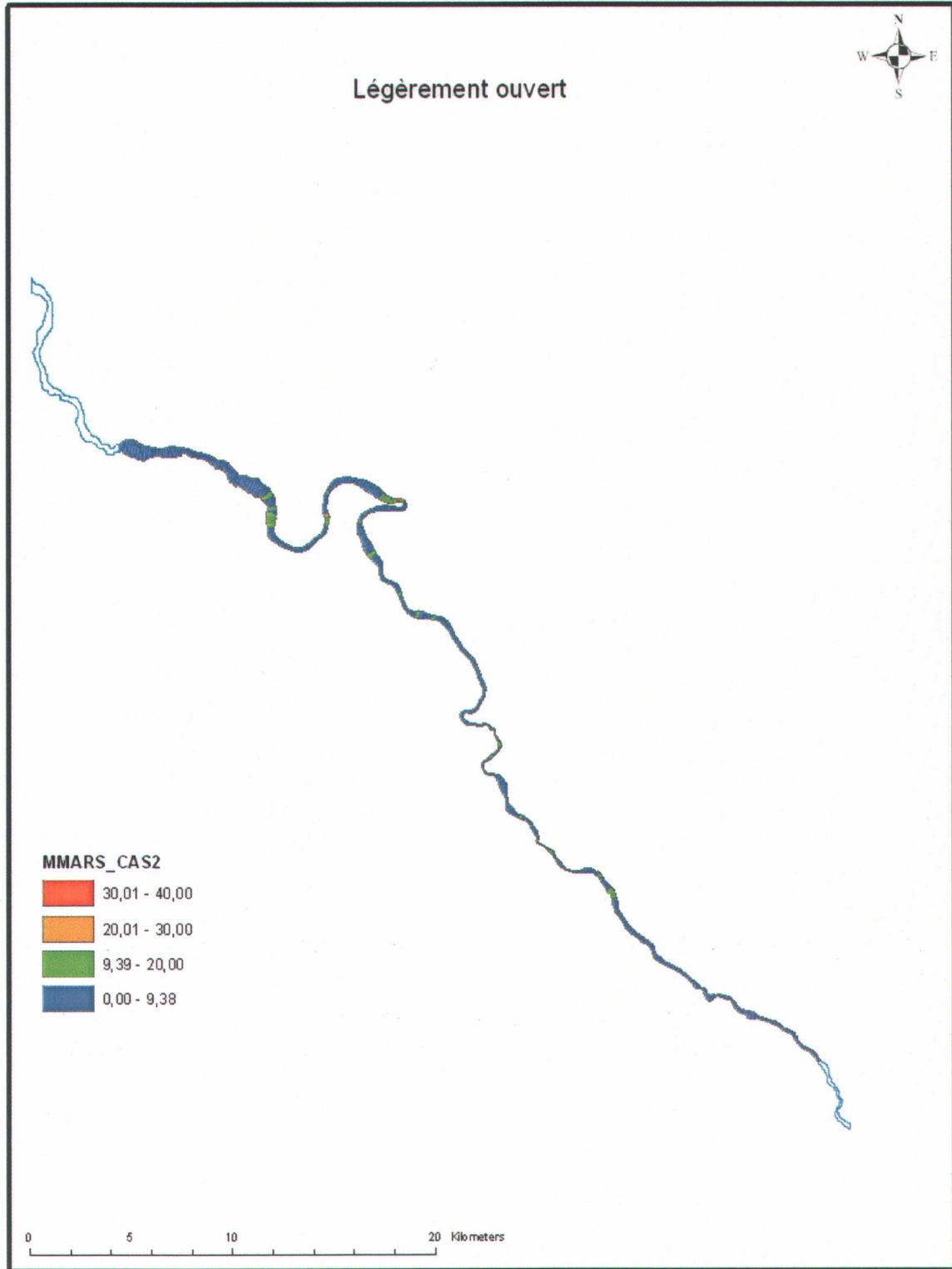


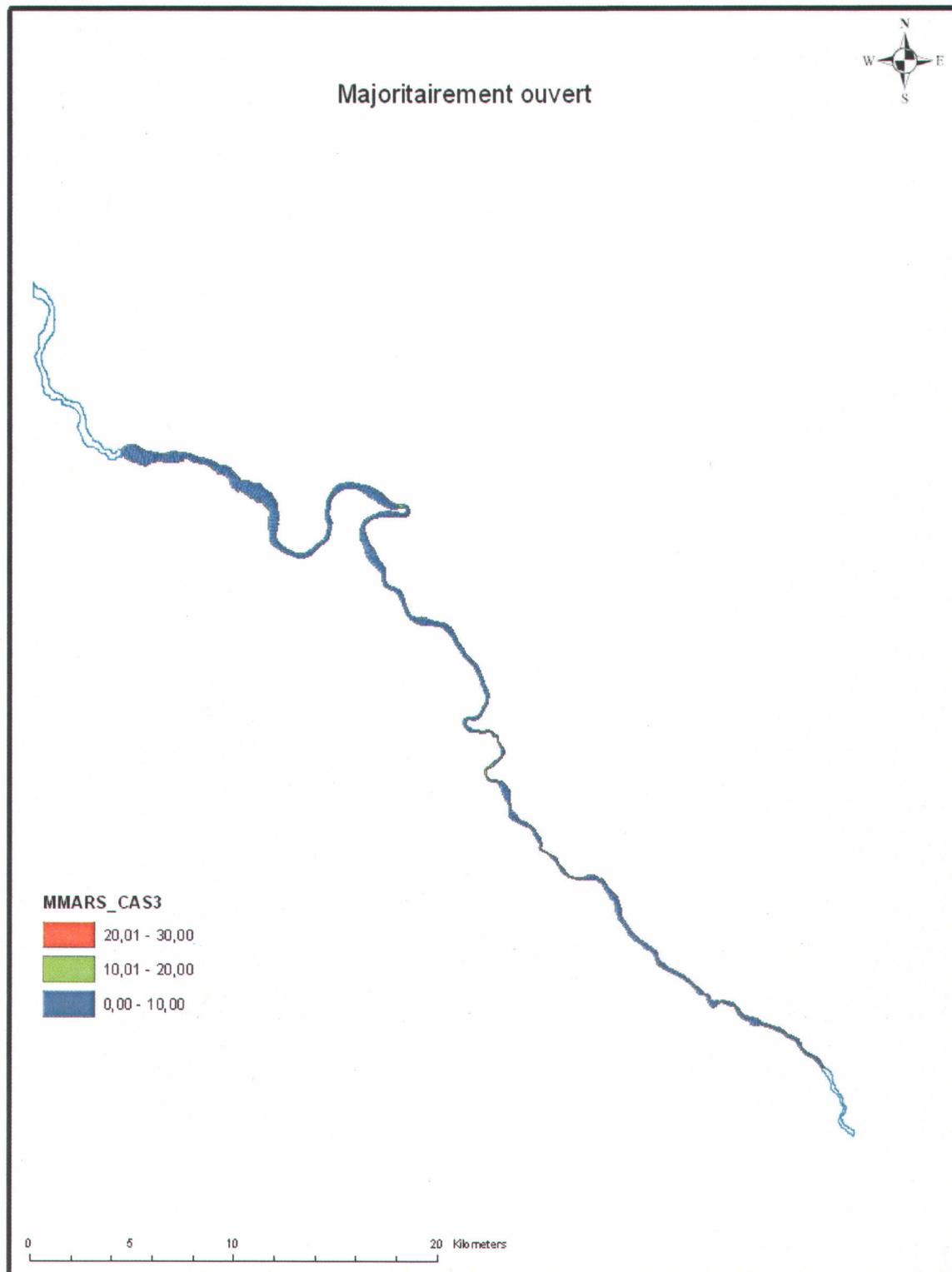


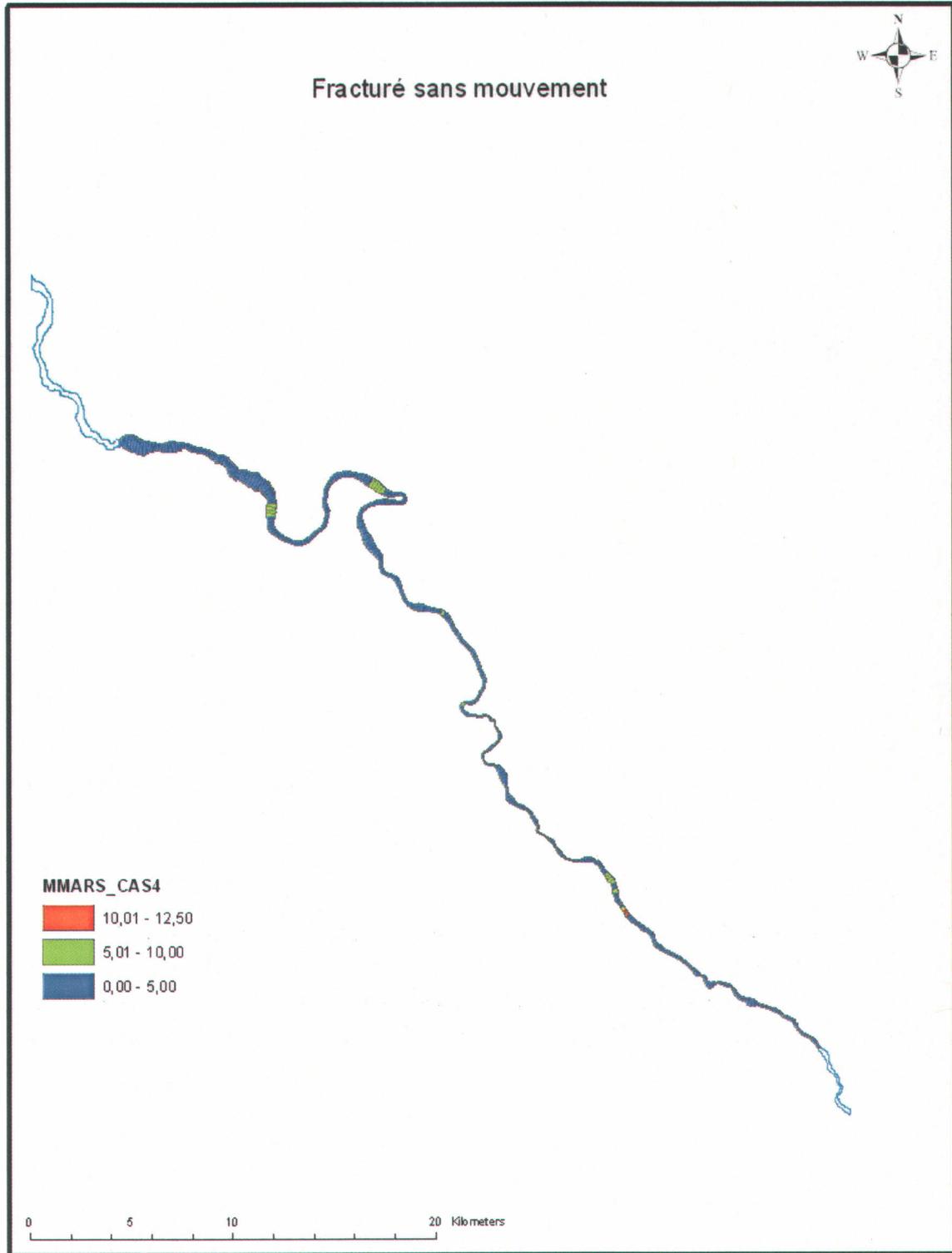


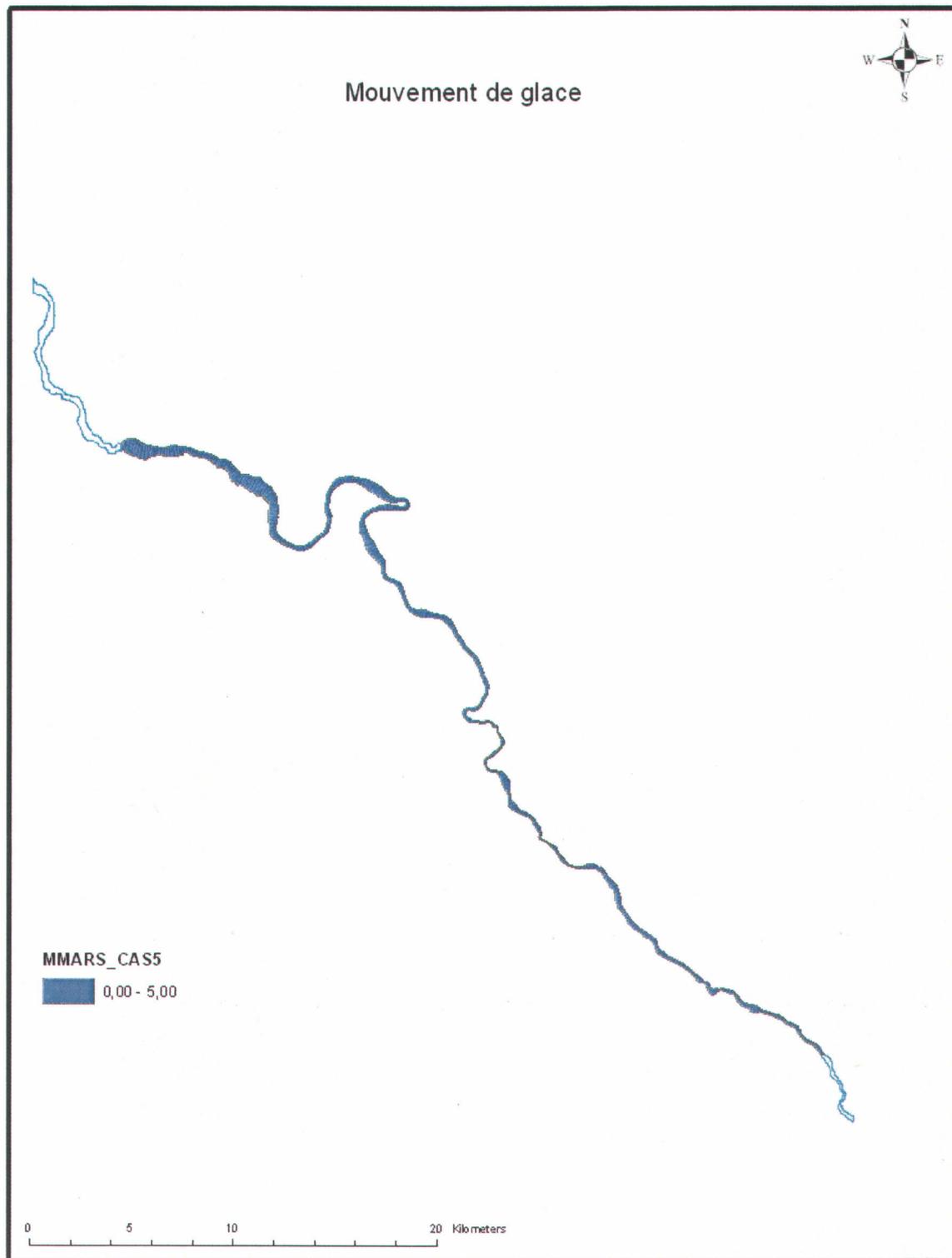


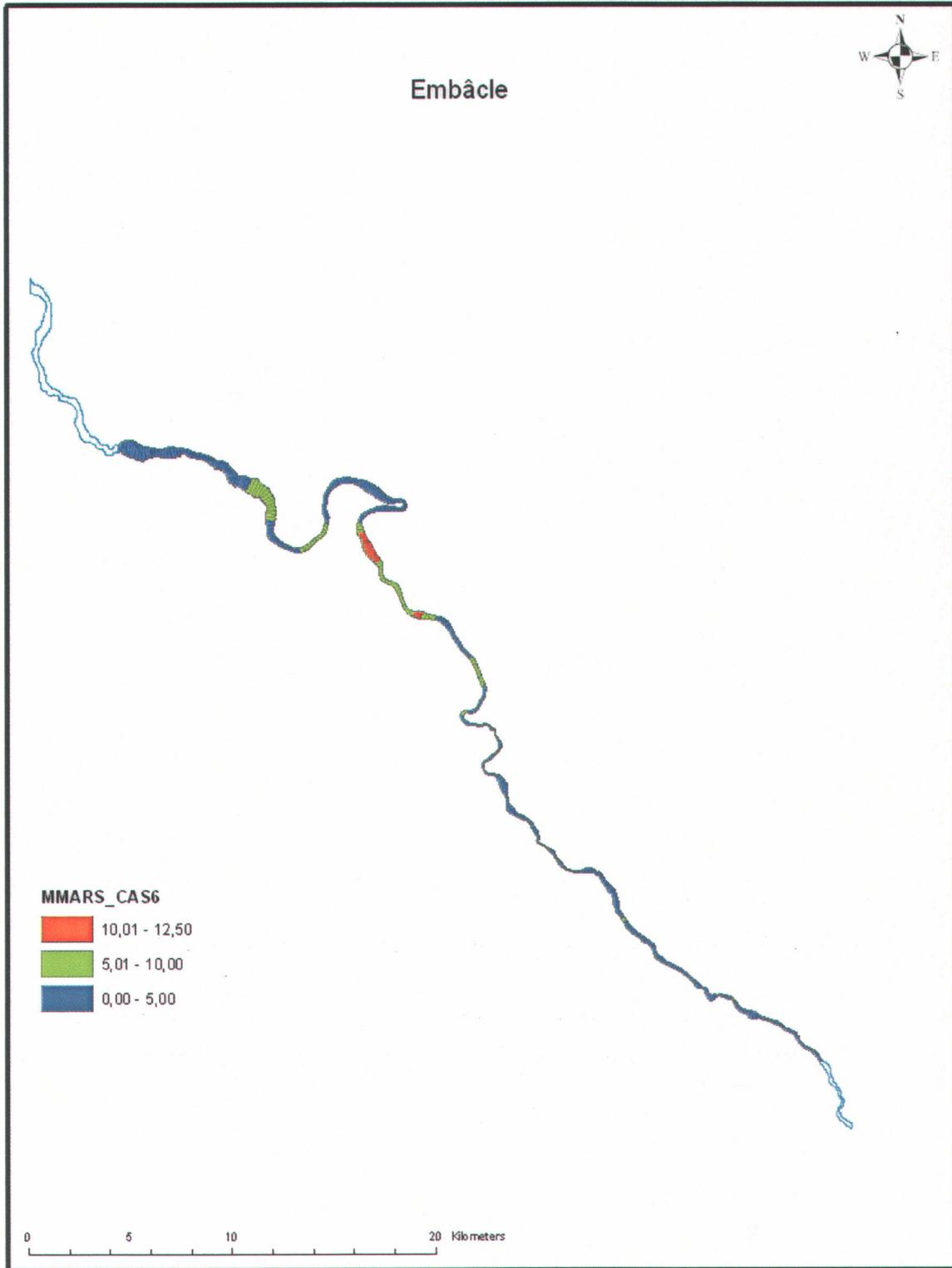


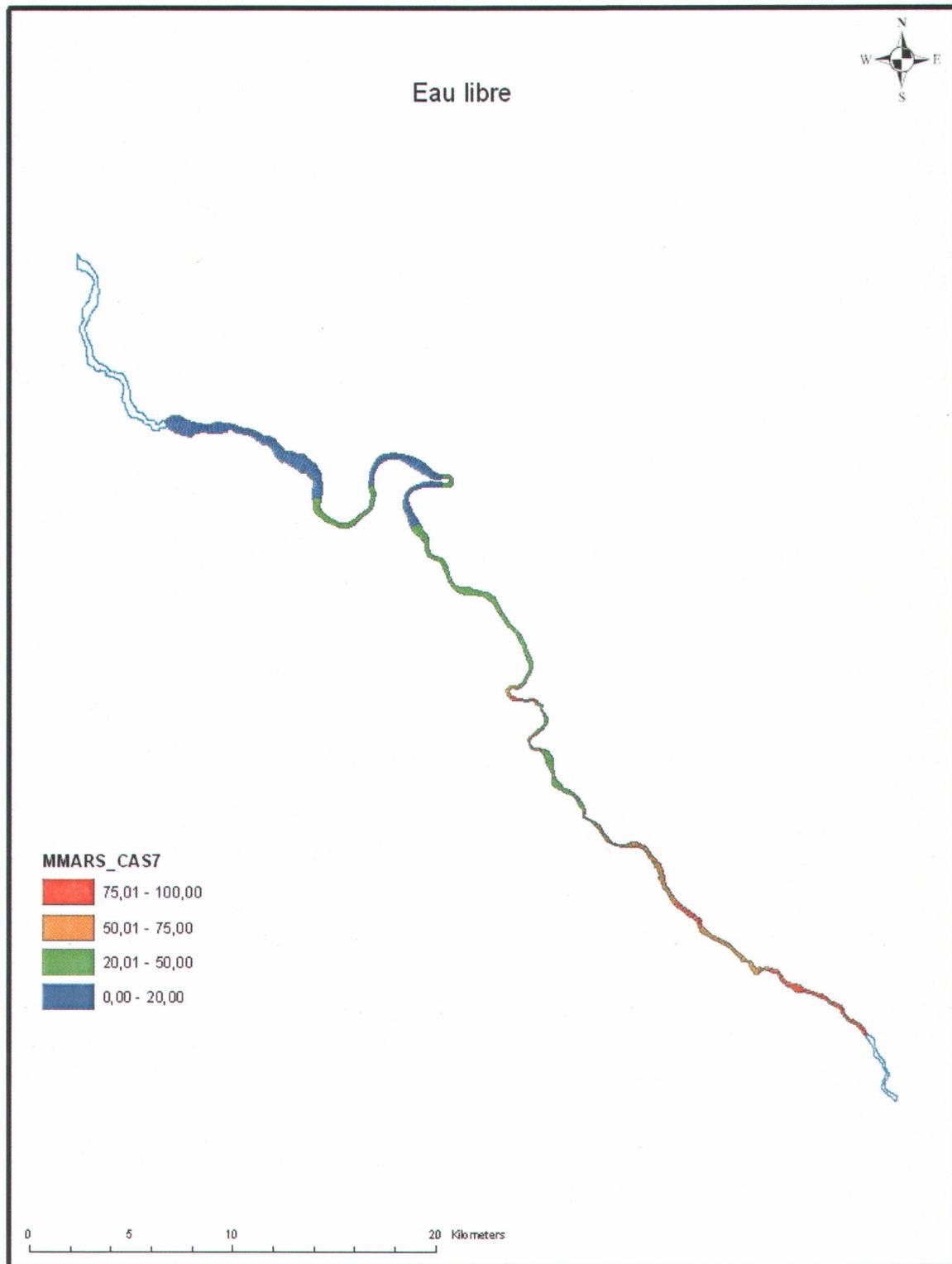


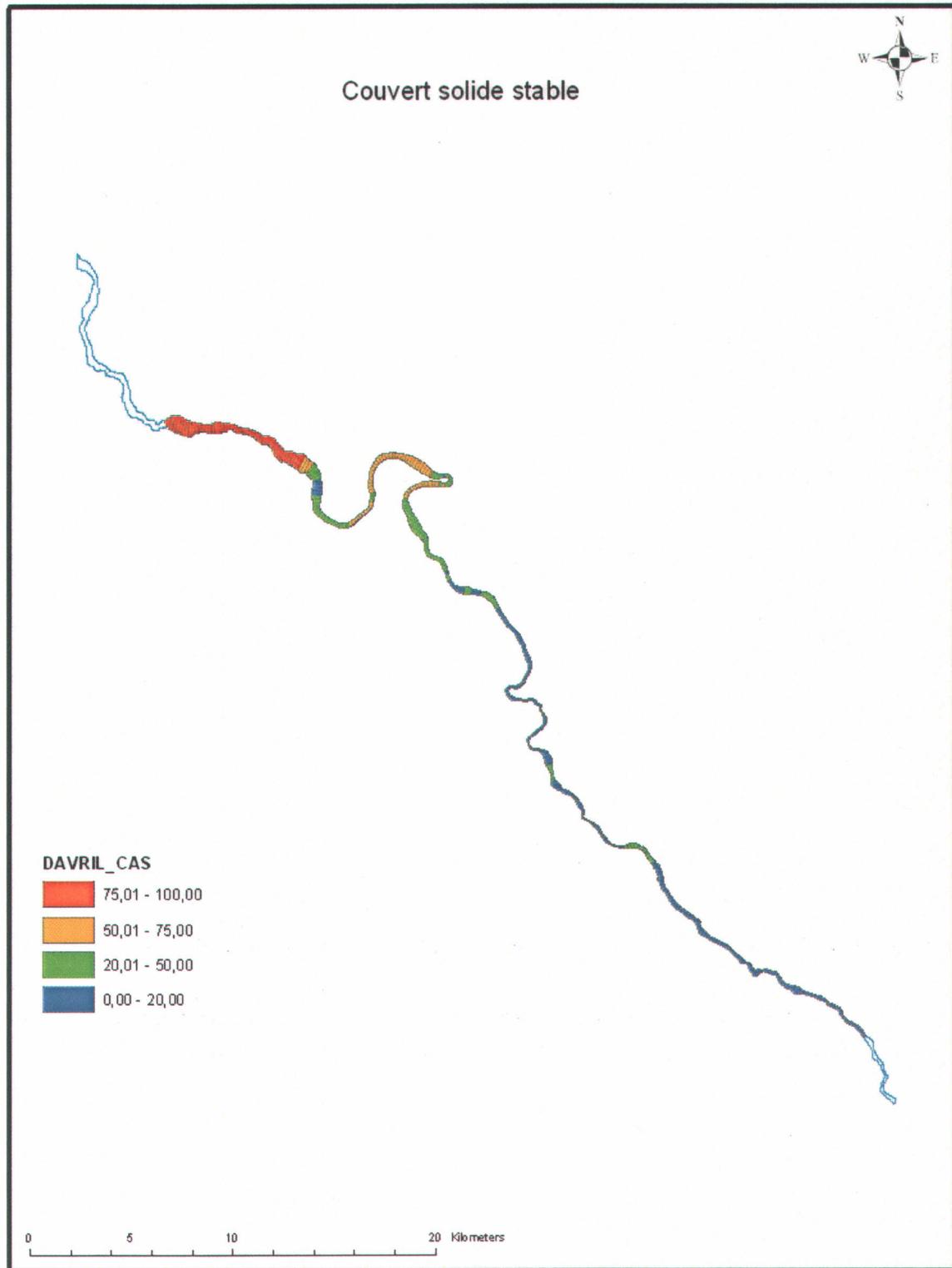


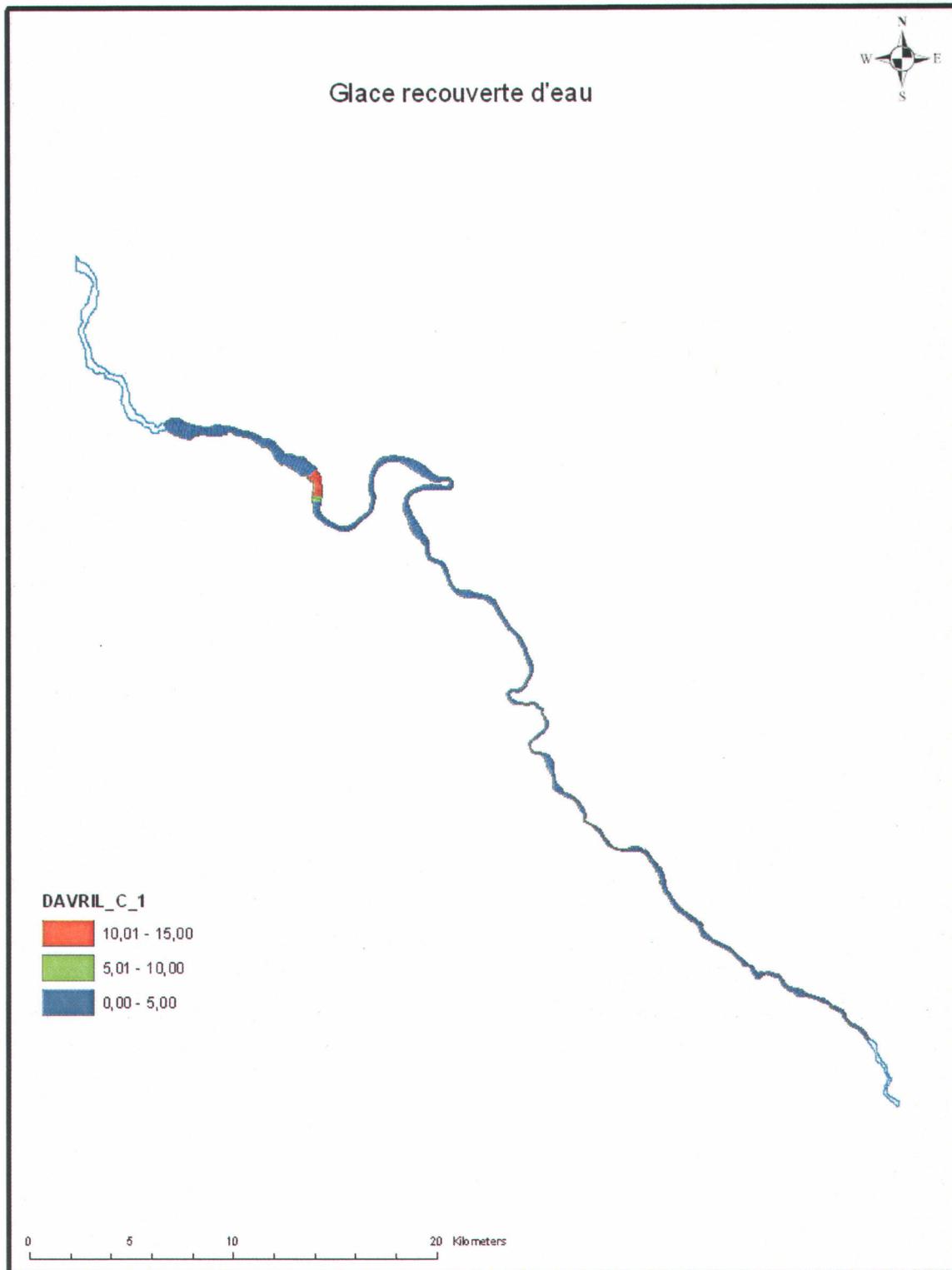


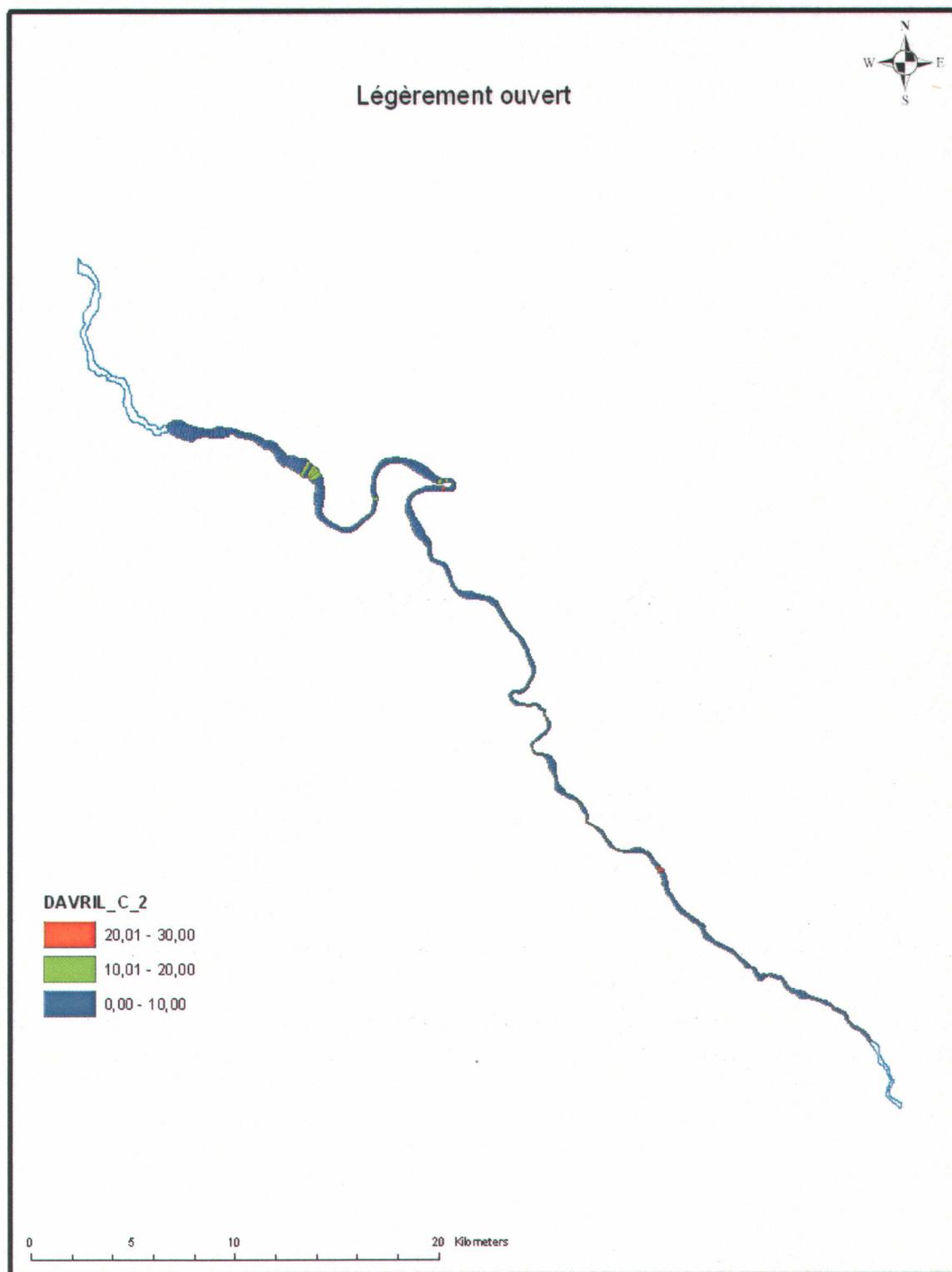


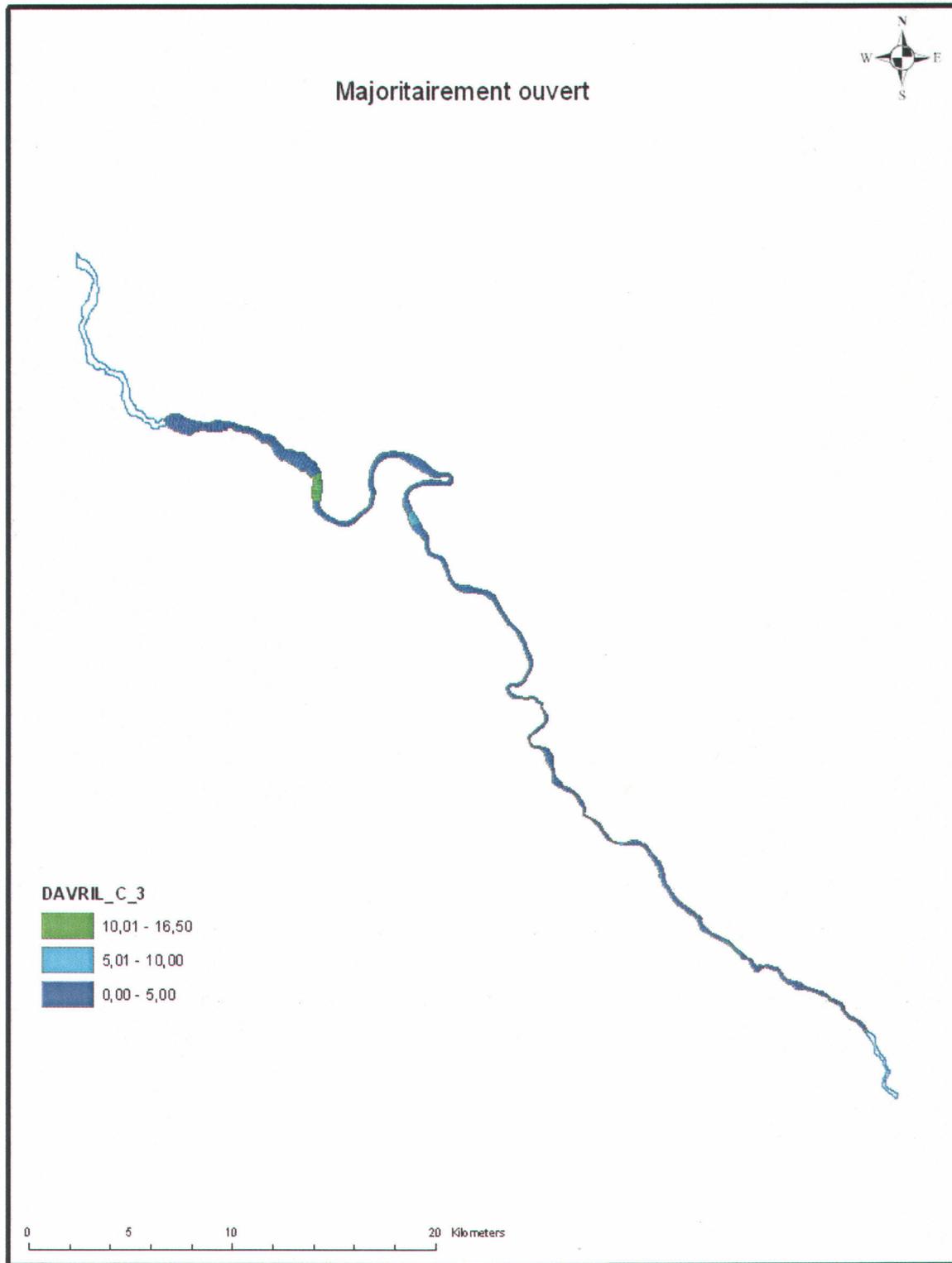


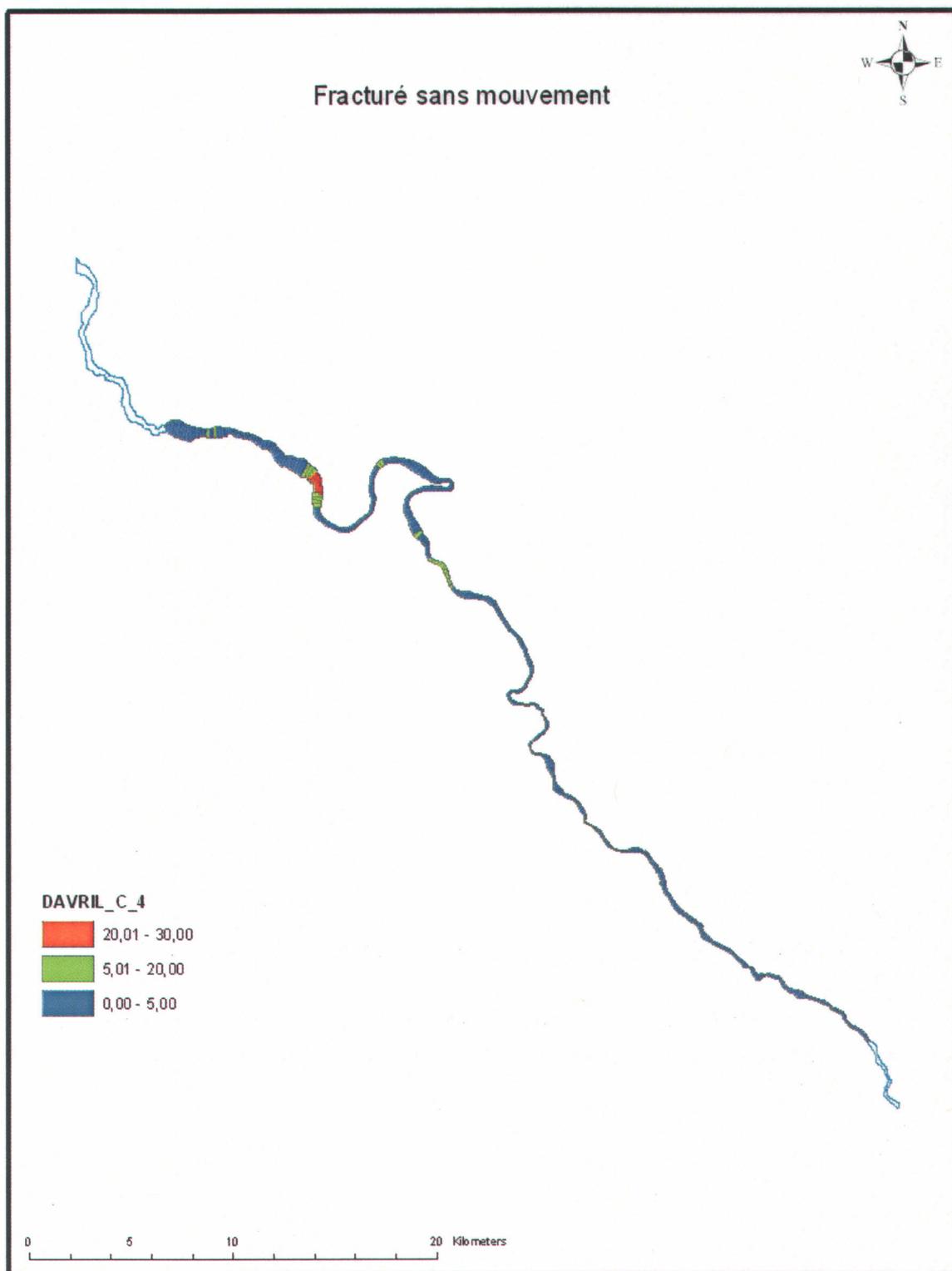


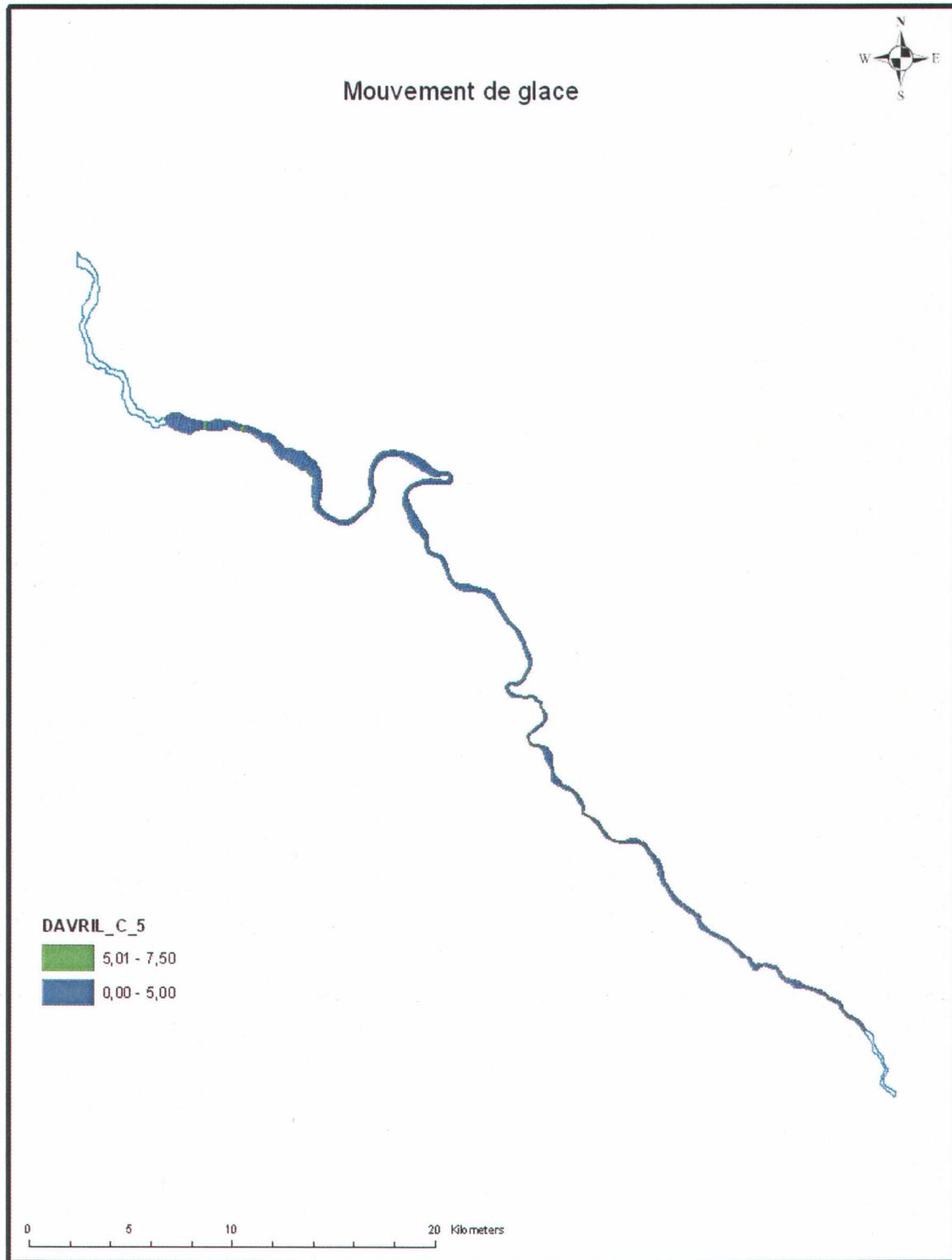


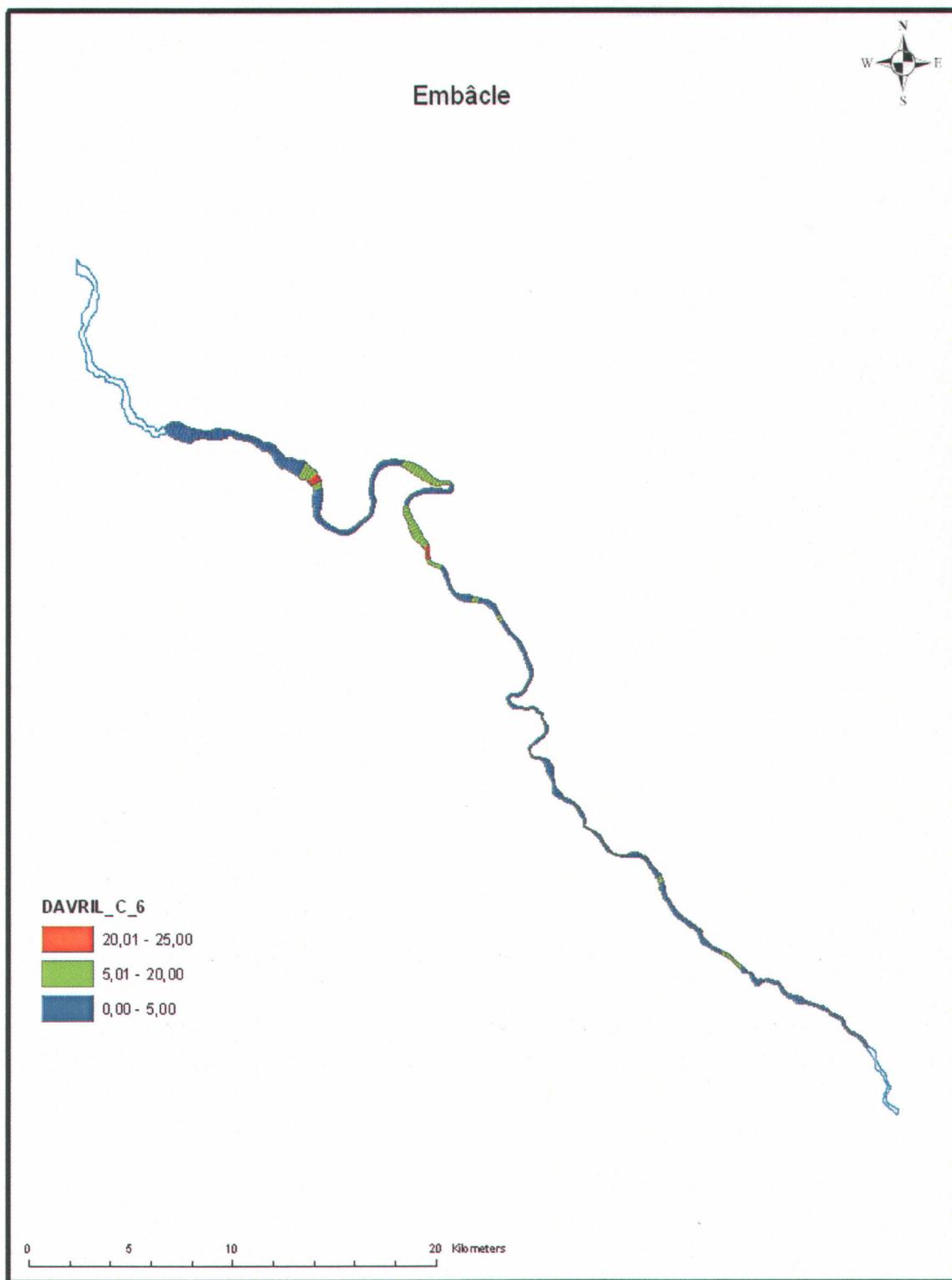


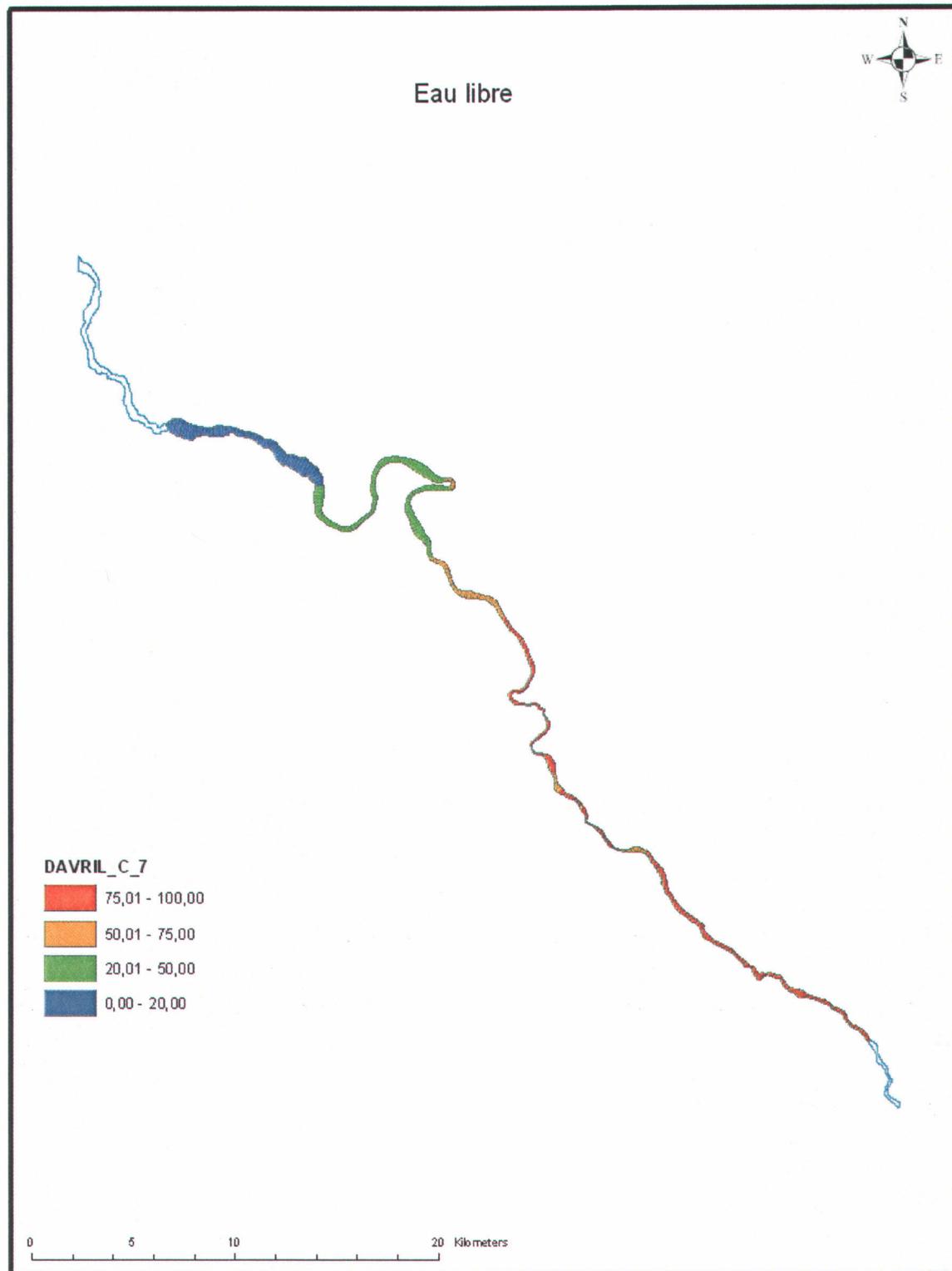












## **ANNEXE-D**

---

# Valeurs descriptives des objets utilisés lors de l'analyse quantitative



**Tableau des index des paramètres**

2	Class	47	GLCM Mean (0°) Amplitude
3	Area (m <sup>2</sup> )	48	GLCM Mean (135°) Amplitude
4	Asymmetry	49	GLCM Mean (45°) Amplitude
5	Border length (m)	50	GLCM Mean (90°) Amplitude
6	Border to Îles Amont neighbor-objects (m)	51	GLCM StdDev (all dir.) Amplitude
7	Border to Îles Aval neighbor-objects (m)	52	GLCM StdDev (0°) Amplitude
8	Border to Petites îles neighbor-objects (m)	53	GLCM StdDev (135°) Amplitude
9	Border to unclassified neighbor-objects (m)	54	GLCM StdDev (45°) Amplitude
10	Compactness	55	GLCM StdDev (90°) Amplitude
11	Density	56	GLDV Ang. 2nd moment (all dir.) Amplitude
12	Distance to Îles Amont neighbor-objects (m)	57	GLDV Ang. 2nd moment (0°) Amplitude
13	Distance to Îles Aval neighbor-objects (m)	58	GLDV Ang. 2nd moment (135°) Amplitude
14	Distance to Petites îles neighbor-objects (m)	59	GLDV Ang. 2nd moment (45°) Amplitude
15	Elliptic Fit	60	GLDV Ang. 2nd moment (90°) Amplitude
16	GLCM Ang. 2nd moment (all dir.) Amplitude	61	GLDV Contrast (all dir.) Amplitude
17	GLCM Ang. 2nd moment (0°) Amplitude	63	GLDV Contrast (135°) Amplitude
18	GLCM Ang. 2nd moment (135°) Amplitude	64	GLDV Contrast (45°) Amplitude
19	GLCM Ang. 2nd moment (45°) Amplitude	65	GLDV Contrast (90°) Amplitude
20	GLCM Ang. 2nd moment (90°) Amplitude	66	GLDV Entropy (all dir.) Amplitude
21	GLCM Contrast (all dir.) Amplitude	67	GLDV Entropy (0°) Amplitude
22	GLCM Contrast (0°) Amplitude	68	GLDV Entropy (135°) Amplitude
23	GLCM Contrast (135°) Amplitude	69	GLDV Entropy (45°) Amplitude
24	GLCM Contrast (45°) Amplitude	70	GLDV Entropy (90°) Amplitude
25	GLCM Contrast (90°) Amplitude	71	GLDV Mean (all dir.) Amplitude
26	GLCM Correlation (all dir.) Amplitude	72	GLDV Mean (0°) Amplitude
27	GLCM Correlation (0°) Amplitude	73	GLDV Mean (135°) Amplitude
28	GLCM Correlation (135°) Amplitude	74	GLDV Mean (45°) Amplitude
29	GLCM Correlation (45°) Amplitude	75	GLDV Mean (90°) Amplitude
30	GLCM Correlation (90°) Amplitude	76	Length (m)
31	GLCM Dissimilarity (all dir.) Amplitude	77	Length/width
32	GLCM Dissimilarity (0°) Amplitude	78	Main direction
33	GLCM Dissimilarity (135°) Amplitude	79	Mean Altitude
34	GLCM Dissimilarity (45°) Amplitude	80	Mean Amplitude
35	GLCM Dissimilarity (90°) Amplitude	81	Mean Largeur
36	GLCM Entropy (all dir.) Amplitude	82	Mean Profondeur
37	GLCM Entropy (0°) Amplitude	83	Mean Sinuosité
38	GLCM Entropy (135°) Amplitude	84	Rectangular Fit
39	GLCM Entropy (45°) Amplitude	85	Shape index
40	GLCM Entropy (90°) Amplitude	86	Stddev Altitude
41	GLCM Homogeneity (all dir.) Amplitude	87	Stddev Amplitude
42	GLCM Homogeneity (0°) Amplitude	88	Stddev Largeur
43	GLCM Homogeneity (135°) Amplitude	89	Stddev Profondeur
44	GLCM Homogeneity (45°) Amplitude	90	Stddev Sinuosité
45	GLCM Homogeneity (90°) Amplitude	91	Width (m)
46	GLCM Mean (all dir.) Amplitude	92, 93	X center (m), Y center (m)

id	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
96	E	179200	0,83	2580	0,00	0,00	0,00	920,00	1,42	1,75	1392,50	1219,80	1808,70	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2060,40
134	E	55700	0,98	2540	0,00	0,00	0,00	2530,00	2,25	0,98	1429,80	1125,90	62,19	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3534,90
161	E	41000	0,65	1080	0,00	0,00	0,00	770,00	1,69	1,87	2838,10	2519,70	260,66	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2611,50
192	E	65200	0,97	2780	80,00	300,00	20,00	1960,00	2,25	0,99	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3113,30
201	E	42700	0,93	2140	90,00	180,00	100,00	1210,00	2,43	1,05	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3175,70
245	E	179300	0,98	4980	200,00	1390,00	0,00	3180,00	2,40	0,93	0,00	0,00	833,02	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1826,30
253	E	33300	0,49	980	90,00	0,00	0,00	890,00	1,71	1,98	0,00	26,63	505,46	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3733,90
264	E	130200	0,95	3700	70,00	90,00	160,00	2760,00	2,54	0,99	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2088,90
290	E	53400	0,82	1640	50,00	0,00	0,00	1120,00	1,64	1,61	0,00	85,24	228,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1748,10
102	E_GL	85300	0,73	1960	0,00	0,00	0,00	1310,00	2,29	1,58	546,56	756,84	310,40	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2187,70
126	E_GL	104500	0,81	2400	430,00	20,00	0,00	1340,00	1,80	1,72	0,00	0,00	1400,10	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2931,20
125	E_GL_GR	92500	0,90	2300	350,00	0,00	0,00	1080,00	1,65	1,45	0,00	311,82	1266,70	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2482,60
141	E_GR	74800	0,60	1620	0,00	0,00	0,00	980,00	1,66	2,03	41,95	342,80	1829,40	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2575,20
193	E_Griv	1800	0,85	300	0,00	0,00	0,00	160,00	2,42	1,06	284,13	90,04	228,76	0,44	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	4638,60
311	E_Griv_GRiveFlottante	166600	0,88	3040	0,00	0,00	0,00	530,00	2,34	1,42	2294,80	1942,90	391,75	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2125,00
129	Embacle	75500	0,83	1900	0,00	0,00	0,00	1620,00	1,80	1,60	651,07	663,24	841,57	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3042,80
204	Embacle	78300	0,96	2300	0,00	90,00	0,00	920,00	1,45	1,17	237,64	0,00	431,51	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2988,00
130	GA	94300	0,90	3600	0,00	0,00	0,00	1900,00	3,53	1,25	1240,80	1450,90	260,92	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2394,90
42	GL	589300	0,70	4140	0,00	0,00	0,00	1540,00	1,38	2,04	4250,80	4039,00	3830,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2677,50
45	GL	328100	0,83	4020	0,00	0,00	0,00	1200,00	1,90	1,73	3281,50	3077,40	2893,90	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2653,30
46	GL	540800	0,83	5080	0,00	0,00	0,00	1180,00	1,66	1,75	1923,40	1741,00	1610,70	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2849,50
71	GL	195400	0,87	3260	310,00	290,00	0,00	1560,00	1,68	1,61	0,00	0,00	2014,50	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2833,60
121	GL	180500	0,98	4960	120,00	2070,00	0,00	1590,00	2,61	0,99	0,00	0,00	187,13	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2835,60
136	GL	81500	0,98	3660	0,00	0,00	240,00	2190,00	3,20	0,84	981,97	681,91	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3001,70
143	GR	58900	0,16	1340	0,00	0,00	0,00	880,00	1,50	2,16	201,13	86,02	2073,60	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2544,20
144	GR	168600	0,84	3200	260,00	200,00	0,00	1000,00	1,86	1,67	0,00	0,00	2225,20	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2581,00
162	GRive	24900	0,90	1220	0,00	0,00	0,00	530,00	2,45	1,27	2829,00	2533,60	423,41	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3608,50
191	GRive	50300	0,98	2560	0,00	0,00	80,00	1230,00	2,25	0,90	427,71	421,62	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3617,00
266	GRive	25000	0,94	1980	150,00	150,00	0,00	750,00	3,34	0,91	0,00	0,00	367,51	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2598,30
268	GRive	37300	0,96	2460	0,00	0,00	350,00	980,00	4,03	0,80	247,97	264,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2563,20
203	GRive_sub	31800	0,89	2180	0,00	0,00	80,00	990,00	3,85	0,98	9,50	195,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3526,60
304	Rapide	33600	0,25	1360	0,00	0,00	0,00	830,00	1,86	1,92	1917,70	1789,40	1591,80	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2678,00
72	E	72500	0,50	1520	0,00	0,00	0,00	1270,00	1,84	2,05	1309,50	1469,90	1073,40	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1574,40
74	E	53100	0,95	2860	0,00	0,00	0,00	2470,00	4,06	0,95	1158,40	1270,20	810,34	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2567,30
85	E	341800	0,90	8440	0,00	0,00	0,00	7060,00	6,12	0,72	2163,90	2050,90	1971,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1764,30
100	E	39700	0,97	2220	0,00	0,00	0,00	2220,00	3,14	0,93	1582,60	1295,80	77,07	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2274,30
104	E	48900	0,92	2400	0,00	0,00	0,00	1990,00	3,52	0,91	233,55	277,17	1983,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2038,30
189	E	289400	0,99	7520	200,00	1580,00	220,00	3100,00	2,45	0,78	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1585,60
199	E	138300	0,94	4500	130,00	320,00	510,00	2130,00	3,56	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1758,00
220	E	24500	0,54	1420	0,00	0,00	0,00	860,00	3,19	1,33	449,32	727,39	139,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2954,10
222	E	11000	0,77	580	0,00	0,00	0,00	580,00	1,56	1,60	746,53	1019,90	475,34	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1402,00
243	E	20100	0,87	1140	140,00	160,00	0,00	440,00	2,22	1,24	0,00	0,00	76,91	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2583,90
152	E_F	62800	0,96	3160	120,00	340,00	20,00	2110,00	3,14	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2411,60
213	E_Grive	464500	0,97	9580	700,00	580,00	0,00	1230,00	3,36	0,75	0,00	0,00	382,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1625,50
241	E_Grive_F	125700	0,95	5320	420,00	340,00	60,00	2060,00	6,55	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2079,10
29	GL	383300	0,64	3580	0,00	0,00	0,00	2210,00	1,67	2,05	4536,40	4320,40	4113,60	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3010,80
34	GL	124400	0,83	2620	0,00	0,00	0,00	1760,00	1,96	1,60	2104,70	1924,60	1795,50	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2814,00
37	GL	136000	0,86	2700	0,00	0,00	0,00	1580,00	1,82	1,66	1498,60	1290,30	1118,20	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3376,40
64	GL	157100	0,97	4500	720,00	840,00	60,00	750,00	2,43	0,98	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3102,30
73	GL	77700	0,59	1660	0,00	0,00	0,00	1660,00	1,75	1,99	986,45	1107,00	625,22	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2700,90





id	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
96	1530.90	2214.70	2355.40	2140.30	4.41	4.26	4.42	4.43	4.40	31.70	27.67	33.17	33.64	32.31	870.32	2.97	167.72	91.75	0.08	217.89
134	2550.10	3271.90	4740.80	3570.90	4.75	4.51	4.64	4.75	4.64	45.84	39.48	44.57	52.90	46.40	900.46	6.48	156.03	99.67	0.06	204.07
161	2517.00	3119.80	2577.10	2234.40	4.57	4.40	4.52	4.45	4.38	38.63	37.35	41.85	39.27	36.05	348.14	1.75	22.08	81.07	0.06	149.77
192	2847.70	2605.00	3984.20	3015.80	4.69	4.54	4.53	4.71	4.57	42.80	40.52	39.59	48.76	42.33	899.87	5.52	134.19	105.36	0.06	151.22
201	2984.80	2638.70	4101.50	2978.70	4.62	4.47	4.43	4.61	4.46	40.03	39.11	36.53	45.91	38.59	653.81	4.13	144.59	108.66	0.08	133.56
245	1799.10	1435.40	2475.40	1594.70	4.42	4.38	4.31	4.32	4.34	31.55	31.51	28.97	35.95	29.78	1635.80	6.23	128.68	114.25	0.07	158.45
253	3654.10	3889.30	4171.90	3309.30	4.77	4.56	4.61	4.66	4.55	49.10	47.49	49.87	52.55	46.50	300.00	1.58	93.89	114.36	0.06	211.32
264	2115.60	1981.30	2629.10	1627.80	4.43	4.39	4.37	4.50	4.28	32.48	32.53	32.05	36.24	29.07	1244.10	4.67	122.60	79.62	0.07	161.57
290	1537.50	1383.60	2329.20	1741.10	4.30	4.15	4.16	4.35	4.21	29.71	27.95	27.21	34.48	29.18	459.48	2.40	140.39	116.99	0.07	159.24
102	2033.40	2588.20	2216.50	1911.60	4.47	4.38	4.46	4.45	4.32	34.08	33.03	37.11	34.54	31.65	591.95	1.79	80.51	96.19	0.10	204.60
126	2702.70	2765.50	3456.50	2799.60	4.67	4.58	4.59	4.68	4.60	41.35	39.60	40.63	44.66	40.51	679.47	2.46	138.48	99.54	0.13	334.93
125	2077.40	2593.90	2773.40	2484.30	4.60	4.45	4.54	4.61	4.45	38.14	34.90	38.66	40.85	38.16	724.87	3.44	150.47	93.17	0.11	320.42
141	2545.40	2708.10	2967.50	2078.60	4.60	4.54	4.55	4.59	4.40	38.56	38.21	39.94	41.82	34.25	460.00	1.70	77.06	0.00	0.16	234.66
193	2863.80	4103.70	6078.60	5501.00	3.94	2.76	3.00	3.43	3.08	54.33	41.31	46.87	67.58	61.47	108.35	2.69	159.10	109.34	0.42	135.08
311	2112.80	2198.00	2508.50	1680.50	4.44	4.38	4.43	4.48	4.31	32.14	31.68	32.92	34.78	29.19	1047.20	2.81	111.32	35.07	0.10	146.29
129	2676.90	3187.70	3368.30	2937.40	4.70	4.57	4.65	4.66	4.60	44.36	41.01	44.36	45.71	42.42	622.22	2.85	151.60	99.67	0.38	184.74
204	3086.30	3208.90	3333.50	2322.90	4.70	4.65	4.65	4.68	4.49	42.90	44.47	44.67	45.67	36.78	860.83	6.54	95.58	110.06	0.33	127.22
130	2159.80	2308.00	2798.70	2312.10	4.68	4.49	4.51	4.61	4.49	37.45	35.42	36.92	41.33	36.12	1208.40	2.34	135.99	94.83	0.24	186.63
42	2637.30	2975.90	2973.20	2155.60	4.61	4.58	4.62	4.68	4.56	39.62	39.02	41.88	40.78	36.81	1380.00	4.39	90.38	95.93	0.12	469.10
45	2699.60	2784.30	2973.20	2155.60	4.61	4.58	4.62	4.68	4.56	38.15	38.04	39.33	40.27	34.97	1348.30	2.91	107.76	92.74	0.12	285.95
46	2766.60	2871.50	3235.80	2524.10	4.67	4.64	4.67	4.72	4.61	40.71	40.09	41.05	43.12	38.59	1586.00	2.80	113.71	94.34	0.12	365.68
71	2616.90	3242.30	2843.30	2631.50	4.67	4.60	4.71	4.65	4.61	40.81	39.35	43.68	40.69	39.50	959.17	2.80	44.22	97.02	0.12	262.43
121	2527.80	2874.90	3244.20	2695.30	4.68	4.59	4.65	4.72	4.63	41.28	39.15	41.59	44.12	40.25	1697.50	6.12	149.03	95.89	0.12	397.20
136	2413.40	2838.20	3731.90	3022.70	4.69	4.53	4.60	4.70	4.62	42.08	38.16	41.09	46.87	42.18	1278.10	6.27	156.94	88.28	0.14	157.19
143	2503.00	2732.50	2868.00	2072.20	4.59	4.49	4.53	4.64	4.38	37.72	37.97	38.88	39.78	34.24	333.10	1.26	111.80	0.00	0.18	226.90
144	2478.70	2977.60	3128.90	2337.80	4.63	4.56	4.56	4.68	4.55	38.98	38.10	37.70	42.96	37.14	1058.00	3.57	134.03	0.00	0.12	239.70
162	2908.10	3789.10	4094.50	3641.70	4.68	4.36	4.51	4.51	4.47	45.61	41.23	47.68	48.64	44.90	484.64	3.54	5.49	53.99	0.12	168.98
191	3416.20	3311.20	4501.90	3238.40	4.75	4.61	4.61	4.74	4.59	46.55	45.06	44.78	52.85	43.52	890.02	7.00	125.68	98.94	0.12	148.88
266	2490.30	2210.30	3305.70	2390.50	4.48	4.30	4.16	4.46	4.28	36.44	35.13	32.92	42.95	34.81	645.86	4.99	127.90	55.92	0.14	162.57
268	2567.70	2122.40	3324.00	2235.80	4.45	4.28	4.26	4.48	4.26	34.80	33.57	31.74	41.18	32.69	773.94	3.98	143.16	28.81	0.16	123.44
203	3544.60	3055.10	4306.10	3196.00	4.69	4.50	4.42	4.66	4.46	44.22	44.15	41.15	49.91	41.65	689.89	3.67	123.10	92.51	0.16	84.31
304	2034.90	2908.70	2994.70	2770.80	4.58	4.25	4.51	4.50	4.45	39.10	34.06	41.23	41.40	39.67	250.00	1.00	82.17	2.63	0.11	188.51
72	975.41	1814.60	1834.90	1670.90	4.22	4.00	4.20	4.21	4.16	26.87	22.16	28.86	28.91	27.53	458.38	1.57	38.59	96.71	0.08	405.58
74	1765.90	3212.50	2855.60	2634.00	4.56	4.25	4.57	4.48	4.46	36.64	29.99	41.71	37.40	37.45	920.94	3.93	14.86	92.55	0.11	436.85
85	1399.50	2022.90	1913.20	1721.00	4.37	4.27	4.43	4.39	4.34	29.97	27.26	32.26	31.04	29.30	2593.80	3.22	32.53	82.57	0.07	205.65
100	1777.20	2222.40	3011.50	2083.30	4.50	4.26	4.33	4.52	4.35	35.54	31.59	35.25	40.77	34.53	799.40	5.13	155.11	99.67	0.09	212.24
104	2220.90	2142.10	2638.50	1146.40	4.32	4.27	4.25	4.38	3.96	30.01	31.57	30.96	34.96	22.49	838.67	4.09	105.46	0.00	0.10	227.95
189	1507.10	1227.60	2192.40	1413.50	4.20	4.14	4.10	4.33	4.12	26.09	25.35	23.78	30.65	24.57	2495.30	8.76	134.26	113.23	0.08	174.32
199	1838.30	1671.10	2194.40	1325.90	4.32	4.29	4.26	4.39	4.20	29.32	29.61	28.67	32.73	26.22	1441.00	4.21	130.31	65.96	0.08	165.64
220	3141.70	3328.30	3703.10	1633.00	4.53	4.35	4.44	4.48	4.08	39.10	40.29	42.19	44.87	28.98	340.00	1.48	69.45	96.98	0.12	164.94
222	803.17	2098.80	1354.00	1353.80	4.08	3.60	3.89	3.77	3.85	25.84	20.42	30.64	25.91	26.41	206.98	2.50	8.86	99.22	0.09	183.43
243	2290.60	1644.30	3861.30	2541.70	4.41	4.19	4.07	4.37	4.16	35.22	33.16	29.26	43.68	34.80	346.00	2.68	143.63	104.01	0.09	149.48
152	2290.30	2090.30	3280.30	1963.30	4.52	4.41	4.35	4.60	4.36	35.64	34.34	33.46	41.98	32.77	946.64	4.54	136.16	106.64	0.08	157.73
213	1437.90	1340.30	2187.50	1533.80	4.21	4.14	4.15	4.33	4.15	26.19	24.62	24.41	30.46	25.25	3222.10	6.86	144.15	114.19	0.09	161.97
241	2196.90	2114.60	2602.30	1402.20	4.39	4.39	4.35	4.49	4.15	30.95	32.11	31.04	35.56	25.08	1885.80	4.32	105.59	110.85	0.11	160.84
29	2889.10	3231.30	3224.50	2697.60	4.71	4.67	4.72	4.73	4.65	42.41	41.30	43.78	44.12	40.43	1119.20	1.96	88.30	96.85	0.14	470.09
34	2785.10	2878.50	3110.20	2481.10	4.65	4.59	4.62	4.65	4.55	40.40	40.19	41.01	42.34	38.07	844.04	2.92	120.47	92.89	0.13	371.48
37	3184.50	3299.30	3924.80	3097.80	4.77	4.69	4.70	4.80	4.68	45.81	44.95	45.61	48.85	43.85	869.99	3.06	139.11	91.74	0.13	411.04
64	3090.50	3094.00	3608.90	2616.70	4.70	4.67	4.65	4.75	4.59	42.80	42.59	42.45	46.27	39.91	1592.10	6.64	117.81	92.82	0.13	403.10
73	2437.00	2784.30	2845.50	2737.00	4.63	4.48	4.55	4.57	4.56	40.28	38.06	40.78	41.68	40.61	536.02	2.11	12.41	97.24	0.17	466.90
88	2895.90	3100.00	3589.50	3022.70	4.73	4.65	4.72	4.78	4.70	43.28	40.73	43.56	46.01	42.81	2295.30	9.55	150.83	94.71	0.14	358.08
75	2171.10	3213.00	2919.70	2919.70	4.64	4.48	4.63	4.58	4.55	40.56	36.53	43.64	41.89	40.17	894.72	4.14	16.92	91.80	0.18	398.03

id	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
96	1.09	0.35	0.89	1.52	24.91	0.05	38.13	0.63	0.07	292.88	396630.00	5077500.00
134	1.82	0.37	0.73	2.69	0.05	0.03	18.71	0.44	0.04	138.95	400120.00	5073600.00
161	1.16	0.74	0.83	1.33	41.77	0.03	34.11	0.66	0.18	198.83	403220.00	5067500.00
192	1.84	0.37	0.68	2.72	20.60	0.03	34.68	0.75	0.08	163.16	406410.00	5082000.00
201	1.95	0.37	0.54	2.59	15.02	0.04	35.39	1.18	0.09	158.49	407900.00	5080000.00
245	1.42	0.21	0.65	2.94	9.76	0.04	25.40	0.49	0.09	262.78	413850.00	5054400.00
253	1.93	0.44	0.86	1.34	10.90	0.02	39.51	2.02	0.09	190.00	414490.00	5053800.00
264	1.46	0.39	0.56	2.56	53.41	0.04	18.50	1.10	0.07	266.26	415970.00	5053200.00
290	1.28	0.32	0.81	1.77	13.48	0.04	32.33	0.27	0.05	191.17	421090.00	5048800.00
102	0.93	0.91	0.67	1.68	17.39	0.06	41.41	0.52	0.17	330.51	400330.00	5077700.00
126	1.11	0.36	0.79	1.86	3.08	0.06	37.60	0.63	0.02	276.36	399040.00	5075100.00
125	1.07	0.32	0.82	1.89	24.54	0.06	95.02	0.56	0.09	210.68	399200.00	5075200.00
141	0.00	0.35	0.85	1.48	0.00	0.09	38.61	0.00	0.06	270.00	401650.00	5072300.00
193	1.78	0.36	0.64	1.77	0.02	0.24	13.10	0.50	0.01	40.23	406410.00	5061900.00
311	0.88	0.46	0.70	1.86	49.15	0.07	42.85	1.40	0.17	372.61	403510.00	5067000.00
129	1.82	0.37	0.79	1.73	0.01	0.16	8.80	0.13	0.00	218.32	399350.00	5074300.00
204	2.56	0.44	0.87	2.05	9.67	0.16	48.12	1.59	0.07	131.60	408680.00	5059600.00
130	1.76	0.36	0.70	2.93	21.48	0.14	44.21	0.59	0.08	275.56	399760.00	5074000.00
42	4.73	0.36	0.90	1.35	11.81	0.05	88.09	0.72	0.08	590.00	389030.00	5089600.00
45	4.17	0.33	0.86	1.75	20.72	0.06	66.06	0.98	0.11	462.75	390130.00	5080600.00
46	3.88	0.36	0.86	1.73	16.89	0.05	84.65	0.74	0.08	567.44	391270.00	5080100.00
71	1.45	0.61	0.81	1.84	12.32	0.06	57.88	0.42	0.10	342.80	396980.00	5078800.00
121	0.51	0.41	0.78	2.92	18.39	0.05	103.76	0.64	0.15	277.59	398720.00	5076000.00
136	1.74	0.39	0.62	3.21	31.68	0.07	61.31	0.75	0.14	203.74	400360.00	5073200.00
143	0.00	0.29	0.87	1.38	0.00	0.10	29.27	0.00	0.04	264.40	401960.00	5072200.00
144	0.00	0.31	0.85	1.95	0.00	0.06	59.38	0.00	0.08	296.41	402410.00	5072000.00
162	0.68	0.65	0.74	1.93	51.24	0.06	8.25	0.66	0.05	131.16	403110.00	5067400.00
191	1.66	0.39	0.69	2.85	32.13	0.05	93.71	0.77	0.13	127.06	406190.00	5062300.00
266	0.98	0.29	0.50	3.13	57.74	0.09	66.57	1.05	0.15	129.35	416150.00	5053200.00
268	0.52	0.47	0.41	3.18	50.00	0.12	19.22	0.91	0.03	194.37	416280.00	5052900.00
203	4.04	0.37	0.45	3.06	41.37	0.09	43.66	2.42	0.17	182.69	408140.00	5059800.00
304	0.00	0.38	0.74	1.85	15.86	0.06	52.87	0.08	0.10	250.00	396710.00	5077100.00
72	0.29	0.44	0.84	1.41	1.85	0.06	27.89	0.49	0.01	291.23	393860.00	5077000.00
74	1.32	0.39	0.53	3.10	21.01	0.07	84.17	0.55	0.08	234.09	394090.00	5077400.00
86	1.19	0.43	0.09	3.61	35.65	0.04	38.54	0.77	0.10	806.42	396330.00	5076700.00
100	1.60	0.37	0.66	2.79	0.06	0.05	8.79	0.36	0.04	155.79	400040.00	5073700.00
104	0.00	0.32	0.43	2.71	0.00	0.08	51.47	0.00	0.08	205.03	401850.00	5072300.00
189	2.01	0.34	0.64	3.49	15.01	0.06	52.65	1.58	0.19	284.73	414300.00	5054100.00
199	1.14	0.43	0.43	3.03	57.14	0.05	22.62	1.03	0.08	341.95	416110.00	5063100.00
220	1.42	0.89	0.47	2.27	14.00	0.08	26.29	0.47	0.17	230.00	400270.00	5078000.00
222	1.12	0.98	0.84	1.38	0.21	0.07	17.62	0.38	0.01	82.88	400490.00	5077800.00
243	1.29	0.30	0.63	2.01	26.21	0.06	41.52	0.42	0.08	129.04	407850.00	5060100.00
152	2.02	0.38	0.49	3.15	17.24	0.05	32.97	0.73	0.07	208.58	406460.00	5061900.00
213	1.49	0.34	0.44	3.51	20.86	0.08	43.83	1.41	0.08	483.92	420360.00	5050000.00
241	2.15	0.42	0.17	3.75	3.13	0.09	64.15	1.62	0.08	436.69	408570.00	5069700.00
29	4.65	0.38	0.84	1.45	7.19	0.06	76.50	0.54	0.07	570.35	388800.00	5080600.00
34	3.80	0.34	0.81	1.86	20.36	0.06	91.55	0.88	0.08	288.90	391360.00	5080100.00
37	3.67	0.38	0.85	1.83	22.78	0.05	106.02	0.92	0.08	284.46	391910.00	5079900.00
64	1.37	0.26	0.70	2.84	23.28	0.05	115.43	0.97	0.07	239.62	398850.00	5078900.00
73	1.49	0.42	0.84	1.49	0.02	0.08	10.53	0.28	0.04	254.34	394000.00	5077500.00
88	0.77	0.41	0.80	2.85	21.28	0.06	105.65	0.66	0.16	240.28	398870.00	5075800.00
75	0.58	0.44	0.68	2.32	21.11	0.09	98.36	0.64	0.11	215.89	394070.00	5077100.00

*Annexe D, Valeurs descriptives des objets utilisés lors de l'analyse quantitative*

<b>id</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	
76	GRive	34200	0,85	1220	0,00	0,00	0,00	790,00	1,75	1,54	1297,90	1111,30	1958,40	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3273,30	
77	GRive	31500	0,98	1640	0,00	0,00	0,00	790,00	1,74	1,02	1396,30	1204,40	2098,30	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2088,10	
124	GRive	26100	0,90	1220	0,00	0,00	0,00	600,00	2,06	1,28	2809,60	2552,30	418,72	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3030,10	
193	GRive	42600	0,89	2480	230,00	120,00	180,00	820,00	5,32	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3087,90	
229	GRive	26000	0,80	920	0,00	0,00	0,00	530,00	1,60	1,62	2345,70	2040,10	421,33	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2642,00	
159	Grive_F	19500	0,96	980	0,00	0,00	0,00	710,00	1,51	1,20	194,40	44,88	270,26	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3755,40	
106	Grive_Grug	114500	0,89	2460	0,00	0,00	0,00	1480,00	1,89	1,50	0,00	150,27	1904,80	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2422,50	
242	Grive_Sub	35900	0,95	2260	0,00	0,00	160,00	1090,00	3,36	0,86	0,00	275,39	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3187,00	
105	Grug	29100	0,94	1700	520,00	0,00	0,00	1110,00	2,95	0,99	0,00	249,23	1671,60	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3139,30	
136	E	68300	0,79	2120	0,00	0,00	0,00	1670,00	2,36	1,46	498,14	708,78	229,03	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2651,80	
274	E	111800	0,89	3320	310,00	120,00	210,00	2060,00	2,44	1,29	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3044,80	
280	E	75700	0,93	2180	110,00	90,00	0,00	1450,00	1,55	1,40	0,00	0,00	150,50	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2848,80	
314	E	78100	0,90	3000	260,00	190,00	0,00	2460,00	3,03	1,14	0,00	0,00	152,19	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3468,60	
316	E	60200	0,95	2400	0,00	0,00	200,00	1330,00	1,81	1,11	497,91	562,01	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3526,20	
123	E_Frazil	79400	0,63	1700	0,00	0,00	0,00	1160,00	1,94	1,85	963,23	1120,70	670,87	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2464,60	
144	E_Frazil	163400	0,56	2180	0,00	0,00	0,00	2170,00	1,62	2,12	1087,50	1287,70	813,35	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2956,00	
174	E_Frazil	32100	0,96	1840	0,00	0,00	0,00	1390,00	2,75	1,02	367,68	239,03	2062,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2948,40	
189	E_Frazil	77500	0,80	1880	0,00	0,00	0,00	1180,00	2,20	1,57	2932,90	2612,70	112,80	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2579,10	
197	E_Frazil	68100	0,83	1940	0,00	0,00	0,00	1650,00	2,23	1,54	2357,70	2046,70	427,91	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3203,10	
222	E_Frazil	88800	0,92	3320	510,00	130,00	510,00	1090,00	2,81	1,22	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2302,60	
223	E_Frazil	21700	0,71	1360	0,00	0,00	280,00	750,00	3,19	1,52	309,98	432,15	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2719,70	
128	E_nape de glace	250100	0,90	4740	0,00	0,00	0,00	3020,00	2,95	1,20	1467,60	1117,60	1759,90	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2298,50	
125	Frazil	42300	0,42	1280	0,00	0,00	0,00	1100,00	2,01	1,93	1143,70	1267,20	789,97	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3183,50	
105	GA	19500	0,75	1640	0,00	0,00	0,00	1030,00	5,75	0,98	647,57	764,61	207,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3504,50	
107	GA	39700	0,56	1180	0,00	0,00	0,00	1180,00	1,45	1,96	622,33	744,32	213,77	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3041,60	
110	GA	43400	0,22	1220	0,00	0,00	0,00	980,00	1,73	2,09	715,92	837,37	309,34	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2890,90	
121	GA	39700	0,38	1180	0,00	0,00	0,00	1180,00	1,69	2,02	806,42	921,20	449,30	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2624,60	
122	GA	26200	0,86	1640	0,00	0,00	0,00	1640,00	3,17	1,20	893,13	1009,10	602,86	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3382,90	
124	GA	55300	0,37	1480	0,00	0,00	0,00	1140,00	2,03	2,08	966,60	1083,70	587,94	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3044,40	
40	GL	137700	0,97	4260	0,00	0,00	0,00	2250,00	3,09	0,82	5691,60	5474,40	5269,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2807,00	
49	GL	109900	0,73	1900	0,00	0,00	0,00	1900,00	1,60	1,90	5236,60	5021,30	4809,80	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3059,80	
50	GL	98900	0,87	2080	0,00	0,00	0,00	2080,00	1,70	1,53	4767,50	4551,60	4343,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3080,80	
52	GL	94900	0,90	2200	0,00	0,00	0,00	1200,00	1,71	1,44	4661,50	4446,50	4240,20	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2791,90	
61	GL	112400	0,96	3000	0,00	0,00	0,00	1600,00	2,13	1,16	2735,40	2535,50	2368,60	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2680,60	
62	GL	78500	0,88	2100	0,00	0,00	0,00	1590,00	1,66	1,53	2590,80	2376,70	2175,80	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3344,90	
88	GL	178100	0,97	4480	630,00	850,00	130,00	710,00	2,15	0,95	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2458,20	
153	GL	235900	0,98	5100	160,00	2040,00	330,00	1010,00	1,70	0,97	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2919,80	
162	GL	83200	0,93	2500	270,00	0,00	0,00	1090,00	1,92	1,24	0,00	431,20	1230,60	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3160,40	
163	GL	152700	0,83	2960	120,00	0,00	0,00	1720,00	2,11	1,49	0,00	57,56	1251,10	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2847,40	
167	GL	72700	0,96	2900	270,00	630,00	0,00	600,00	2,80	0,93	0,00	0,00	1299,90	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2582,80	
173	GL	47200	0,86	1740	0,00	0,00	0,00	1040,00	2,35	1,48	87,75	70,69	2010,50	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2835,50	
175	GL	66900	0,89	1880	0,00	0,00	0,00	1100,00	1,45	1,51	69,67	63,97	2307,10	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2481,10	
43	GL (concassée)	66200	0,98	2240	0,00	0,00	0,00	2240,00	1,74	1,05	5431,50	5215,50	5006,10	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2913,60	
48	GL (concassée)	33300	0,98	1620	0,00	0,00	0,00	1620,00	1,77	1,03	4821,10	4605,60	4396,80	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3221,30	
59	GL (concassée)	79800	0,98	2960	0,00	0,00	0,00	2830,00	2,12	0,89	2927,60	2725,60	2553,70	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2775,10	
166	GL (sombre)	136700	0,94	2760	0,00	0,00	260,00	800,00	1,41	1,36	970,21	624,40	0,00	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2422,40	
164	GL_Frazil	231000	0,90	4340	0,00	0,00	70,00	1300,00	2,41	1,35	1062,70	1163,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2638,20	
150	GR	79000	0,95	2680	0,00	0,00	0,00	1390,00	2,19	1,15	2334,10	2038,50	1750,40	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2299,30	
172	GR	25100	0,92	1340	0,00	0,00	0,00	1290,00	1,86	1,27	186,82	62,02	1988,40	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3291,60	
76		2493,90	3568,00	3477,60	3551,30	0,34	0,52	0,22	0,30	0,26	43,54	37,78	45,16	45,26	45,95	7,80	6,51	6,57	6,59	6,58	0,02



Annexe D, Valeurs descriptives des objets utilisés lors de l'analyse quantitative

id	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
76	0.03	0.02	0.02	0.02	123.89	126.04	123.44	122.85	123.23	43.04	41.45	43.32	43.69	43.60	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3273.30
77	0.03	0.03	0.02	0.03	120.15	123.93	118.77	119.06	118.85	32.89	32.29	32.79	33.24	32.94	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	2088.10
124	0.02	0.03	0.03	0.02	122.34	124.83	120.66	122.05	121.79	41.75	41.02	42.30	41.62	41.93	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	3030.10
193	0.03	0.02	0.03	0.04	122.94	123.12	124.08	124.05	124.05	42.40	42.22	41.94	43.57	41.75	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3087.90
229	0.02	0.03	0.02	0.03	123.71	123.11	123.60	122.24	125.89	42.32	42.36	42.25	42.66	41.92	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	2642.00
159	0.02	0.02	0.02	0.03	122.52	121.66	120.72	121.30	126.99	43.91	44.74	45.00	43.79	41.79	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3755.40
106	0.03	0.03	0.02	0.03	124.50	124.05	124.55	123.88	125.50	39.42	39.64	39.60	40.00	38.40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2422.50
242	0.03	0.02	0.02	0.02	122.29	121.75	124.24	119.17	124.00	41.35	41.40	40.74	42.65	40.39	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3187.00
105	0.03	0.02	0.03	0.03	124.43	124.21	123.43	123.74	126.37	43.27	43.60	43.61	43.51	42.27	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3139.30
136	0.03	0.03	0.02	0.03	127.38	126.20	126.72	128.26	128.32	41.30	40.47	40.90	42.83	40.92	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	2651.80
274	0.02	0.02	0.02	0.02	127.26	127.29	127.56	127.68	126.50	42.46	42.24	42.24	44.06	41.11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3044.80
280	0.02	0.02	0.03	0.03	126.24	126.50	126.13	126.45	125.86	39.91	40.53	39.36	41.20	38.46	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	2848.80
314	0.02	0.02	0.02	0.02	129.51	128.84	129.47	130.49	129.24	45.56	44.48	45.32	47.17	45.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3488.60
316	0.03	0.02	0.02	0.02	126.03	126.96	126.45	125.11	125.63	45.10	43.23	45.02	46.69	45.37	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3526.20
123	0.03	0.03	0.03	0.03	125.09	126.21	124.74	125.12	124.30	37.96	37.45	38.17	38.65	37.52	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2464.60
144	0.02	0.02	0.02	0.02	126.84	126.66	126.92	126.84	126.92	41.76	41.37	42.02	41.76	41.90	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2956.00
174	0.04	0.03	0.03	0.04	127.90	127.87	127.91	128.55	127.27	45.51	44.03	43.42	45.26	41.20	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	2948.40
189	0.03	0.03	0.03	0.03	124.89	125.01	124.59	125.14	124.82	37.72	37.74	38.66	37.50	36.34	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2579.10
197	0.02	0.02	0.02	0.02	126.44	126.25	126.75	126.09	126.66	43.38	43.39	43.18	43.98	42.97	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3203.10
222	0.03	0.03	0.03	0.03	123.23	122.84	123.85	122.03	124.19	35.73	35.52	35.26	36.32	35.77	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	2302.60
223	0.02	0.03	0.02	0.03	122.98	123.05	124.38	121.31	123.18	37.80	37.70	38.39	37.31	36.94	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	2719.70
128	0.03	0.03	0.03	0.03	125.37	125.69	125.84	124.81	125.14	37.23	36.19	36.24	37.05	37.40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2988.50
125	0.03	0.02	0.02	0.02	126.84	127.45	127.21	126.51	126.17	40.80	40.09	42.03	40.47	40.57	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3183.50
105	0.03	0.02	0.03	0.02	126.16	127.45	126.38	125.24	125.56	47.14	44.12	47.65	48.79	47.84	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	3504.50
107	0.02	0.02	0.02	0.02	126.21	126.46	126.46	125.92	126.02	41.18	41.14	41.31	41.04	41.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3041.60
110	0.03	0.02	0.03	0.03	125.82	126.60	125.61	125.43	125.65	41.87	41.03	41.68	42.11	41.84	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2890.90
121	0.03	0.02	0.03	0.01	125.85	125.89	125.91	126.06	125.93	40.20	40.07	39.99	40.36	40.37	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	2624.60
122	0.03	0.02	0.02	0.03	125.33	125.64	124.00	125.59	126.08	44.00	43.90	43.77	44.47	43.82	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3382.90
124	0.02	0.02	0.02	0.02	124.89	126.12	124.66	124.23	124.52	42.00	41.56	42.32	42.14	41.95	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3044.40
40	0.03	0.03	0.02	0.03	123.99	123.57	124.34	122.93	125.12	38.92	39.19	38.89	39.75	38.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2807.00
49	0.02	0.02	0.02	0.02	126.96	126.93	127.11	127.05	126.74	41.39	41.33	41.58	41.36	41.29	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3059.80
50	0.02	0.02	0.02	0.02	127.18	127.35	127.41	127.11	126.86	41.17	41.25	41.32	41.10	40.99	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3080.80
52	0.03	0.02	0.03	0.02	125.59	125.47	125.17	125.51	126.23	41.03	41.37	41.31	41.38	40.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2791.90
61	0.03	0.03	0.03	0.03	124.11	123.75	124.68	123.07	124.97	38.99	38.87	38.79	39.55	38.70	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2680.60
62	0.02	0.02	0.02	0.02	126.44	126.36	126.97	125.93	126.48	42.73	42.77	42.23	43.54	42.37	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3344.90
88	0.03	0.03	0.03	0.03	123.95	123.77	124.87	122.69	124.49	38.23	38.32	38.13	38.56	37.88	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	2458.20
153	0.02	0.02	0.02	0.02	125.24	125.68	125.77	124.51	124.99	40.70	40.52	40.50	41.06	40.69	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2919.80
162	0.03	0.02	0.02	0.03	124.14	125.43	124.87	122.61	123.63	42.24	41.72	42.12	42.76	42.29	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3160.40
163	0.03	0.02	0.02	0.02	125.21	125.95	125.33	124.55	125.01	41.77	41.36	41.60	42.23	41.88	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2847.40
167	0.03	0.02	0.02	0.04	123.90	123.36	124.18	122.49	125.58	41.47	41.53	41.19	42.09	41.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2582.80
173	0.03	0.03	0.02	0.03	124.61	123.93	124.67	123.58	126.26	41.98	41.93	42.11	42.89	40.91	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2835.50
175	0.03	0.03	0.03	0.03	123.97	123.92	125.04	122.64	124.28	39.65	39.43	39.43	40.27	39.42	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2481.10
43	0.02	0.02	0.02	0.02	125.61	125.60	125.36	124.90	126.58	42.30	42.34	42.17	42.26	42.43	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2913.60
48	0.02	0.03	0.02	0.02	125.45	125.15	125.50	124.87	126.28	42.51	42.64	42.55	42.49	42.36	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3221.30
59	0.02	0.02	0.02	0.02	125.21	125.03	125.37	124.31	126.14	41.91	42.03	41.58	42.16	41.86	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2775.10
166	0.03	0.03	0.03	0.03	124.88	125.79	125.40	123.84	124.49	41.52	40.94	41.38	42.04	41.70	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	2422.40
164	0.03	0.02	0.03	0.03	124.68	124.93	125.35	123.43	125.01	40.83	40.61	40.56	41.40	40.72	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2638.20
150	0.03	0.02	0.04	0.03	123.85	124.56	121.87	125.22	123.77	41.77	41.24	42.82	41.26	41.85	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	2299.30
172	0.02	0.03	0.02	0.02	122.98	123.40	123.26	121.24	124.01	42.36	42.42	42.64	42.64	42.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3291.60

id	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
76	2493,90	3568,00	3477,60	3551,30	4,66	4,38	4,56	4,52	4,52	43,54	37,78	45,16	45,26	45,95	460,00	3,54	177,29	88,47	0,12	202,99
77	1376,00	2403,90	2324,10	2246,60	4,38	4,09	4,33	4,31	4,28	32,83	27,08	35,61	35,26	33,35	729,59	9,70	1,93	97,62	0,14	213,79
124	2291,00	3514,30	3306,20	3015,00	4,58	4,29	4,50	4,42	4,39	40,84	36,06	44,74	42,66	39,94	443,17	3,66	4,06	51,90	0,15	168,82
193	3069,40	3169,00	3616,90	2492,20	4,63	4,51	4,51	4,59	4,44	40,90	40,33	41,11	45,03	37,11	772,74	2,63	133,31	100,47	0,17	179,57
229	2738,30	2904,40	3028,30	1896,00	4,50	4,29	4,41	4,39	4,21	37,74	38,34	40,13	39,49	33,02	318,07	2,43	97,78	55,91	0,16	154,76
159	3916,70	4556,60	4006,60	2540,60	4,66	4,47	4,52	4,44	4,20	45,92	48,06	50,85	47,73	37,05	420,00	6,00	85,42	109,16	0,28	117,83
106	2285,30	2572,90	2715,80	2115,40	4,59	4,52	4,57	4,58	4,46	37,66	36,67	38,87	39,70	35,41	920,91	3,92	96,55	2,00	0,19	245,19
242	3272,90	3085,10	3558,20	2831,00	4,65	4,50	4,51	4,56	4,44	42,92	43,14	42,63	45,13	40,80	733,00	4,46	117,65	96,45	0,17	91,10
105	2942,20	3402,80	3299,40	2911,20	4,67	4,44	4,55	4,49	4,45	43,41	41,72	45,44	44,79	41,67	558,96	3,64	66,95	32,58	0,26	301,68
136	2543,40	2620,00	3357,40	2084,90	4,56	4,46	4,45	4,60	4,40	37,26	36,34	36,28	42,16	34,23	641,51	2,55	121,56	98,11	0,09	169,46
274	2897,30	3053,90	3581,80	2646,30	4,68	4,62	4,63	4,71	4,57	41,68	41,10	41,70	44,99	38,93	951,21	3,32	125,91	115,29	0,08	187,27
280	2822,90	2802,70	3468,10	2301,00	4,59	4,48	4,52	4,62	4,41	39,31	39,06	39,33	43,68	35,17	698,74	4,17	109,10	115,41	0,08	163,20
314	3156,80	3475,40	3966,80	3275,50	4,76	4,64	4,68	4,76	4,66	45,55	43,57	46,35	48,10	44,18	910,79	3,51	145,51	118,20	0,07	172,02
316	2966,50	3683,60	3920,70	3532,90	4,73	4,58	4,66	4,69	4,62	45,23	42,61	45,88	47,04	45,37	684,16	4,29	158,97	108,60	0,08	106,25
123	1877,70	2756,10	2695,60	2528,60	4,55	4,41	4,53	4,52	4,48	36,82	33,89	38,64	38,28	36,47	550,00	1,96	18,88	97,30	0,07	463,47
144	2823,50	3158,30	3064,10	2777,70	4,71	4,64	4,70	4,68	4,64	42,72	41,83	43,88	43,49	41,67	680,00	1,74	175,47	96,82	0,06	411,24
174	3176,00	3230,00	3557,00	1826,40	4,54	4,43	4,43	4,52	4,20	38,05	39,73	39,61	42,86	29,96	619,51	4,35	106,36	0,00	0,09	213,70
189	2662,00	3098,20	2645,60	1907,80	4,54	4,46	4,55	4,48	4,36	36,77	37,25	40,34	37,45	32,01	607,48	2,17	70,77	97,14	0,08	148,74
197	3131,10	3386,90	3321,70	2972,60	4,72	4,62	4,64	4,64	4,58	44,24	44,10	45,89	44,97	42,02	589,14	2,29	140,85	1,07	0,08	171,24
222	2388,50	1964,40	2905,90	1949,90	4,45	4,37	4,35	4,50	4,33	33,64	33,45	31,65	38,07	31,37	1108,30	4,93	130,03	108,94	0,09	224,76
223	2809,40	2541,00	3140,80	2386,50	4,48	4,22	4,26	4,36	4,19	37,57	38,06	36,18	41,36	34,68	405,50	2,38	137,83	100,29	0,10	171,05
128	1852,40	2662,30	2394,10	2283,80	4,53	4,43	4,57	4,53	4,49	35,33	32,38	37,83	36,27	34,82	1591,40	3,44	5,11	77,86	0,08	206,08
125	2532,80	3848,50	3243,50	3108,80	4,66	4,45	4,64	4,54	4,48	42,43	38,91	47,05	42,38	41,38	387,59	1,77	12,72	95,39	0,07	459,62
105	2866,00	3569,70	4071,20	3513,00	4,67	4,33	4,42	4,46	4,48	45,79	40,33	46,58	48,92	47,33	510,00	2,32	171,51	97,27	0,20	433,32
107	2772,10	3350,90	3317,40	2725,40	4,68	4,49	4,60	4,52	4,48	43,18	41,51	45,62	44,91	40,67	312,61	1,69	8,62	97,27	0,37	419,17
110	2280,90	3174,70	3391,50	2714,50	4,63	4,40	4,54	4,56	4,49	40,45	36,54	42,24	43,63	39,37	300,00	1,20	147,17	95,69	0,27	403,60
121	2204,20	3083,30	2785,00	2426,50	4,59	4,37	4,55	4,49	4,39	39,48	35,97	43,47	40,23	38,24	315,35	1,48	47,62	97,26	0,35	434,29
122	3325,50	3388,40	4064,50	2750,90	4,71	4,52	4,51	4,55	4,38	45,11	44,65	45,24	49,82	40,71	443,92	2,37	116,29	97,25	0,24	469,52
124	2490,40	3513,10	3388,90	2784,20	4,68	4,49	4,65	4,62	4,52	42,52	39,13	45,70	44,74	40,49	350,00	1,09	31,57	92,34	0,31	436,88
40	3024,20	2843,50	3364,30	1994,30	4,61	4,59	4,57	4,66	4,43	38,61	39,76	38,98	42,49	33,19	1583,90	5,90	105,65	88,24	0,17	625,60
49	2826,80	3293,30	3228,70	2891,00	4,71	4,62	4,68	4,69	4,62	43,80	42,01	45,59	45,04	42,57	623,66	2,21	101,56	97,38	0,13	537,23
50	2960,80	3343,20	3185,60	2832,70	4,72	4,63	4,70	4,67	4,62	43,91	42,74	45,97	44,57	42,33	700,00	2,92	91,74	97,38	0,12	457,63
52	2712,80	3125,10	3115,60	2213,40	4,64	4,56	4,63	4,64	4,48	39,72	38,66	41,81	42,51	35,91	831,94	4,27	87,23	91,54	0,17	500,15
61	2783,60	2568,60	3305,60	2061,70	4,58	4,53	4,52	4,62	4,43	37,86	38,03	37,61	41,95	33,85	1043,10	4,54	116,51	87,56	0,17	294,45
62	3356,80	3319,60	3845,10	2858,30	4,74	4,68	4,66	4,74	4,59	44,83	44,53	44,34	48,76	41,68	683,22	3,57	121,88	97,09	0,16	319,36
88	2410,40	2353,60	2994,80	2074,40	4,54	4,50	4,50	4,60	4,43	35,91	35,41	35,71	39,40	33,10	1585,40	6,57	118,32	93,62	0,16	401,91
153	2572,20	2856,30	3386,20	2864,20	4,68	4,59	4,64	4,72	4,63	40,85	38,56	40,73	44,03	40,06	1742,70	7,57	150,92	95,07	0,15	373,72
162	2592,20	3012,40	3839,90	3197,50	4,68	4,52	4,58	4,70	4,62	41,88	38,04	41,15	46,08	42,26	859,74	4,63	150,88	89,34	0,13	287,54
163	2259,10	2926,30	3335,20	2868,50	4,67	4,52	4,63	4,69	4,64	40,68	36,88	41,25	43,77	40,82	956,13	2,83	162,66	99,52	0,16	257,78
167	2565,30	2539,20	3200,90	2023,40	4,59	4,52	4,50	4,63	4,40	37,80	37,48	36,95	42,65	34,10	1053,20	5,45	112,49	89,82	0,18	300,89
173	2895,80	2805,50	3429,80	2207,30	4,65	4,54	4,53	4,63	4,42	41,13	42,01	41,29	45,07	36,11	592,38	3,16	100,77	0,00	0,18	237,06
175	2459,10	2423,20	2745,60	2296,20	4,56	4,48	4,44	4,54	4,45	37,17	36,94	36,66	39,34	35,76	592,49	3,63	124,60	0,00	0,15	246,11
43	2680,60	3044,60	3329,70	2599,20	4,68	4,57	4,63	4,64	4,51	42,50	41,30	44,01	45,00	39,68	886,87	6,84	97,87	97,38	0,25	538,33
48	2895,60	3529,20	3543,10	2918,30	4,70	4,51	4,56	4,58	4,43	44,97	42,60	47,94	47,52	41,80	609,79	6,31	85,65	97,39	0,26	507,18
59	2750,40	2767,40	3183,80	2400,20	4,66	4,58	4,55	4,68	4,52	40,73	40,47	40,10	44,38	37,97	1016,20	6,10	117,03	94,66	0,24	312,95
166	1906,80	2327,10	3108,10	2349,10	4,56	4,40	4,51	4,64	4,50	36,45	32,88	35,88	41,22	35,84	949,61	4,67	158,17	96,23	0,13	169,73
164	2350,40	2577,30	3206,70	2417,30	4,61	4,52	4,58	4,68	4,55	37,98	35,65	37,94	41,94	36,37	1233,70	2,74	129,08	95,50	0,15	187,83
150	2133,50	2994,80	1926,10	2140,80	4,54	4,43	4,62	4,38	4,44	35,92	34,52	42,26	32,85	34,03	941,31	5,11	28,41	84,70	0,22	169,06
172	3178,10	3455,40	3613,10	2922,90	4,68	4,45	4,50	4,54	4,41	44,88	44,19	45,58	47,63	42,16	401,91	3,47	126,21	0,00	0,26	231,45

*Annexe D, Valeurs descriptives des objets utilisés lors de l'analyse quantitative*

<b>id</b>	<b>82</b>	<b>83</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>86</b>	<b>87</b>	<b>88</b>	<b>89</b>	<b>90</b>	<b>91</b>	<b>92</b>	<b>93</b>
76	1,31	0,36	0,83	1,65	29,87	0,06	47,93	0,61	0,08	130,00	396650,00	5077700,00
77	1,30	0,32	0,85	2,31	9,57	0,09	25,13	0,58	0,05	75,23	396510,00	5077700,00
124	0,66	0,64	0,74	1,89	51,30	0,08	8,18	0,67	0,06	121,19	403110,00	5067400,00
193	2,91	0,41	0,33	3,00	38,69	0,09	96,07	2,10	0,17	293,32	414970,00	5053600,00
229	0,98	0,40	0,86	1,43	51,76	0,09	44,54	1,05	0,12	130,69	403540,00	5067000,00
159	2,01	0,44	0,82	1,75	13,65	0,13	24,35	0,73	0,06	70,00	408700,00	5059700,00
106	0,03	0,33	0,82	1,82	14,00	0,10	28,05	0,21	0,04	235,08	401730,00	5072200,00
242	3,86	0,37	0,50	2,98	37,44	0,09	42,05	2,35	0,16	164,40	408160,00	5059800,00
105	0,44	0,40	0,51	2,49	46,79	0,11	68,45	0,65	0,06	153,72	401400,00	5072300,00
136	1,35	0,79	0,67	2,03	9,24	0,05	25,74	0,53	0,20	251,38	400290,00	5078000,00
274	2,87	0,48	0,65	2,48	3,45	0,04	51,26	2,03	0,07	286,78	414780,00	5053600,00
280	2,18	0,42	0,87	1,98	0,02	0,04	18,34	0,59	0,06	167,74	415780,00	5053300,00
314	1,63	0,34	0,59	2,68	5,99	0,03	33,39	0,72	0,04	259,70	420990,00	5049000,00
316	2,46	0,42	0,70	2,45	33,04	0,03	37,74	1,06	0,16	159,32	421380,00	5048300,00
123	1,14	0,49	0,77	1,51	0,65	0,03	15,73	0,44	0,02	280,00	393810,00	5077400,00
144	0,54	0,46	0,84	1,35	1,56	0,03	39,82	0,59	0,04	390,00	393940,00	5077100,00
174	0,00	0,28	0,67	2,57	0,00	0,06	61,90	0,00	0,09	142,56	401950,00	5072300,00
189	1,39	0,60	0,71	1,69	22,96	0,04	28,86	0,45	0,20	280,09	403300,00	5067500,00
197	0,01	0,56	0,75	1,86	10,46	0,03	22,44	0,11	0,14	257,27	403290,00	5067100,00
222	1,65	0,30	0,70	2,79	6,34	0,05	63,95	0,58	0,09	225,01	405690,00	5062500,00
223	1,38	0,30	0,66	2,31	30,16	0,05	54,46	0,59	0,13	170,69	405860,00	5062400,00
128	0,99	0,38	0,61	2,37	39,89	0,04	40,82	0,72	0,09	463,07	396620,00	5077300,00
125	1,21	0,39	0,78	1,56	13,24	0,03	64,23	0,22	0,05	219,55	394080,00	5077400,00
105	2,25	0,53	0,44	2,94	0,02	0,10	26,58	0,43	0,01	220,00	393780,00	5077800,00
107	2,55	0,52	0,88	1,48	0,02	0,15	28,29	0,31	0,03	184,69	393890,00	5077900,00
110	2,32	0,41	0,82	1,46	12,25	0,13	53,12	0,34	0,06	250,00	394070,00	5077900,00
121	1,99	0,47	0,87	1,48	0,01	0,17	17,20	0,18	0,06	212,58	393950,00	5077700,00
122	1,63	0,47	0,61	2,53	0,01	0,11	5,65	0,22	0,05	186,93	393890,00	5077600,00
124	1,71	0,38	0,82	1,57	21,32	0,14	82,73	0,42	0,07	320,00	394100,00	5077600,00
40	3,51	0,35	0,59	2,87	28,37	0,09	250,58	1,54	0,12	268,44	387800,00	5081000,00
49	5,21	0,37	0,86	1,43	0,02	0,05	101,40	0,20	0,02	282,76	388100,00	5080700,00
50	4,55	0,39	0,76	1,65	0,04	0,05	61,15	0,31	0,07	240,00	388760,00	5080600,00
52	4,43	0,28	0,80	1,79	23,14	0,08	130,86	1,20	0,07	194,80	389080,00	5080900,00
61	3,61	0,26	0,75	2,24	29,28	0,09	98,19	1,25	0,09	229,71	390930,00	5080400,00
62	4,10	0,39	0,86	1,87	4,91	0,07	25,98	0,35	0,04	191,12	390850,00	5080200,00
88	1,37	0,26	0,67	2,65	21,72	0,09	110,86	0,93	0,06	241,16	398870,00	5078800,00
153	0,62	0,46	0,78	2,63	20,32	0,07	108,59	0,64	0,18	230,22	398660,00	5076100,00
162	1,18	0,32	0,76	2,17	30,33	0,06	105,70	0,54	0,11	185,60	399250,00	5075100,00
163	1,32	0,37	0,76	1,89	3,60	0,08	67,36	0,65	0,01	337,59	399210,00	5074800,00
167	1,72	0,44	0,59	2,69	29,78	0,10	67,24	0,72	0,02	193,28	400920,00	5072300,00
173	0,00	0,31	0,76	2,00	0,00	0,09	8,91	0,00	0,02	187,31	401790,00	5072200,00
175	0,00	0,33	0,87	1,82	0,00	0,08	60,81	0,00	0,08	163,30	402380,00	5072100,00
43	5,11	0,34	0,81	2,18	0,03	0,11	128,56	0,26	0,02	129,59	388160,00	5080800,00
48	4,44	0,30	0,77	2,22	0,01	0,11	57,65	0,20	0,01	96,59	388910,00	5080700,00
59	3,93	0,28	0,62	2,62	15,94	0,11	42,34	0,72	0,06	166,52	390710,00	5080400,00
166	1,95	0,39	0,88	1,87	18,16	0,07	40,09	0,58	0,09	203,30	400290,00	5073200,00
164	1,71	0,37	0,65	2,26	19,99	0,08	41,12	0,50	0,07	451,03	399690,00	5074000,00
150	1,47	0,41	0,73	2,38	33,16	0,12	41,21	0,67	0,10	184,19	396580,00	5076600,00
172	0,00	0,30	0,73	2,11	0,00	0,12	13,69	0,00	0,02	115,90	401940,00	5072200,00

**REPROGRAPHIE DE LA REMISE FINALE  
DU MÉMOIRE OU DE LA THÈSE**

Lors de la remise finale de mon mémoire ou de ma thèse, les photocopies ont été effectuées par :

l'étudiant(e) :



*Les photocopies effectuées par l'étudiant(e)  
seront sous sa responsabilité.*

Ali Elbattay  
Nom

Ali Elbattay  
Signature

Nom du directeur de recherche: Monique Bernier

Nom du co-directeur de recherche: Tahz B.M.J Ouazda

Boursier ou non-boursier: non-boursier