

JOSÉE EMOND

SUIVI ET CARACTÉRISATION DE GLACES FLUVIALES PAR IMAGERIE THERMIQUE

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
FACULTÉ DE SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

Le suivi des glaces sur le fleuve St-Laurent est primordial, à des fins de sécurité civile, d'efficacité du transport maritime et de surveillance des changements climatiques. Alors que les études des glaces à la dérive sont habituellement locales, ce mémoire présente l'étude d'un tronçon d'environ 250 km sur le fleuve St-Laurent, entre Montréal et Québec, faite par imagerie infrarouge aéroportée. Par l'acquisition de températures de surface et avec une équation de diffusion de chaleur dans les glaces modélisée par éléments finis, le lien entre la température de surface et l'épaisseur des glaces est fait. Diverses caractéristiques supplémentaires des glaces sont extraites (concentration, taille, forme). Certaines limites d'utilisation, en termes de conditions météorologiques (pluie, neige ou brouillard) et en termes d'épaisseur maximale pouvant être détectée, sont toutefois atteintes. La thermographie infrarouge est appropriée au suivi des glaces sur le fleuve St-Laurent, mais elle a ses limites comme toute autre méthode.

Abstract

Surface ice observations on the St. Lawrence River are needed to provide a safe and effective waterway, as well as to study climate changes. Usually made locally, ice characterization is made on a reach of 250 km between Montreal and Quebec City, from airborne thermal imaging. Ice surface temperatures are acquired, and a heat transfer equation modeled through a finite-element model links these temperatures to ice thicknesses. Ice characteristics, such as concentration, size and shape, are also obtained. Operational limits in the form of rain, snow and fog, are encountered, as well as maximum detectable thicknesses due to the physics of heat transfer and to the model used. Overall, infrared imaging is a well-suited technology for drift ice observations on the St. Lawrence River, but it has its limits, just as any other technology.

Avant-Propos

La réalisation de ce projet de maîtrise a nécessité plusieurs étapes, de la planification à la réalisation des campagnes de terrain, en passant par le développement d'outils informatiques. Dans chacune de ces étapes, diverses personnes me sont venues en aide, en me donnant du temps, des conseils et en me fournissant du matériel. Je tiens donc à remercier avant tout mon directeur de maîtrise, Brian Morse, qui m'a conseillé tout au long du projet en me laissant toutefois de la latitude afin de développer mon jugement et de vivre des expériences desquelles je pourrais tirer des leçons et qui seraient formatrices. Pour ma seconde campagne d'instrumentation, il est essentiel de mentionner l'apport immense qu'a fait Alain A. Viau (Département de géomatique, Université Laval) en me prêtant une caméra thermique pour l'hiver 2009, de même que pour ses conseils donnés tout au long du projet. Je souhaite ensuite remercier Martin Richard, avec qui j'ai planifié et exécuté une campagne de terrain et qui m'a grandement aidé lors de développement d'outils informatiques pour traiter les données, et Dany Crépault, qui m'a aidé à préparer ma deuxième campagne de terrain. De même, la grande disponibilité et efficacité de Michel Petit (Port de Québec) doit être soulignée, car il a grandement facilité le déroulement de cette deuxième campagne d'instrumentation. Je souhaite souligner le travail de Michel Audet (Visionair-UAV), de Jacques Germain (Aéroplus La Baie) et de Patrick Boivin (Visionair-UAV) qui m'ont permis de réaliser mes campagnes aériennes d'acquisitions d'images thermiques. Les conseils de Xavier Maldague et de Clemente Ibarra Castanedo (Département de génie électrique), de même que l'aide matérielle apportée ont été appréciés. Plusieurs étudiants, dont André-Guy-Tranquille Temgoua, Yann Prat, Donon Bisanswa et Jérémy Mulet, de même que mon père, m'ont aidé lors du travail de terrain et je tiens à les en remercier. Enfin, je remercie tous mes amis et collègues qui ont participé de près ou de loin à mon projet et qui m'ont encouragé au fil des mois, particulièrement Patrice Beaulieu qui a m'a aidé au niveau matériel et a été présent niveau personnel.

*À Mathieu, à mes parents,
à mes amis et collègues,
qui m'ont soutenue, encouragée et aidée
tout au long de ce projet*

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Avant-Propos	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	ix
Introduction.....	1
Chapitre 1 - État des connaissances	3
Chapitre 2 - Méthode expérimentale	11
2.1 Campagnes aériennes.....	11
2.1.1 Objectifs et site d'étude	11
2.1.2 Instrumentation	12
2.1.2.1 Calibration de la caméra thermique	13
2.1.3 Déroulement des campagnes	14
2.1.4 Traitement des images	16
2.1.4.1 Hiver 2008	17
2.1.4.2 Hiver 2009	22
2.2 Campagnes d'instrumentation fixe	28
2.2.1 Objectifs et site d'étude	28
2.2.2 Instrumentation	29
2.2.2.1 Calibration de la caméra thermique	33
2.2.3 Déroulement de la campagne.....	33
2.2.4 Traitement des données	34
Chapitre 3 - Modélisation	37
3.1 Échanges de chaleur aux interfaces	37
3.1.1 À l'intervalle glace/air	37
3.1.2 Transfert de chaleur dans la glace.....	38
3.1.3 Modèle utilisé et simplifications.....	40
3.1.4 Vérifications par simulation 2D.....	44
3.1.5 Limites du modèle	47
3.1.6 Incertitude sur les épaisseurs	50
Chapitre 4 - Résultats et discussion	53
4.1 Campagnes aériennes.....	53
4.1.1 Résultats du 13 mars 2008.....	53
4.1.1.1 Exemples d'images thermiques	53

4.1.1.2	Méthode de calcul des statistiques.....	56
4.1.1.3	Température de l'air lors des jours précédents	58
4.1.1.4	Relation température de surface/épaisseur des glaces	59
4.1.1.5	Statistiques sur les glaces.....	61
4.1.1.5.1	Température médiane de surface des glaces	61
4.1.1.5.2	Épaisseur des glaces.....	63
4.1.1.5.3	Écart-type de l'épaisseur des glaces.....	64
4.1.1.5.4	Validation des épaisseurs des glaces.....	66
4.1.1.5.5	Concentration de glaces	72
4.1.1.5.6	Quantité de floes	73
4.1.1.5.7	Aire moyenne des floes.....	74
4.1.1.5.8	Excentricité des floes	74
4.1.1.5.9	Distribution des températures de surface sur chacun des floes.....	75
4.1.1.5.10	Épaisseur moyenne des floes vs aire des floes.....	76
4.1.2	Résultats du 24 février 2009	77
4.1.2.1	Exemple d'images thermiques.....	77
4.1.2.2	Température lors de la semaine précédant le vol.....	82
4.1.2.3	Relation température de surface/épaisseur des glaces	84
4.1.2.4	Statistiques sur les glaces.....	86
4.1.2.4.1	Température médiane de surface des glaces	87
4.1.2.4.2	Épaisseur des glaces.....	90
4.1.2.4.3	Écart-type de l'épaisseur des glaces.....	92
4.1.2.4.4	Validation des épaisseurs des glaces.....	94
4.1.2.4.5	Concentration des glaces.....	96
4.1.2.4.6	Quantité de floes	97
4.1.2.4.7	Aire moyenne des floes.....	98
4.1.2.4.8	Excentricité des floes	98
4.1.2.4.9	Distribution des épaisseurs sur chacun des floes	99
4.1.2.4.10	Épaisseur moyenne des floes vs aire des floes.....	100
4.1.3	Résultats du 25 février 2009	101
4.1.3.1	Exemples d'images thermiques	101
4.1.3.2	Température lors des heures précédant le vol.....	106
4.1.3.3	Relation température de surface/épaisseur des glaces	106
4.1.3.4	Statistiques sur les glaces.....	108
4.1.3.4.1	Température médiane de surface des glaces	108
4.1.3.4.2	Épaisseur des glaces.....	108
4.1.3.4.3	Écart-type de l'épaisseur des glaces.....	111
4.1.3.4.4	Validation des épaisseurs des glaces.....	111
4.1.3.4.5	Concentration des glaces.....	113
4.1.3.4.6	Quantité de floes	114
4.1.3.4.7	Aire moyenne des floes.....	114
4.1.3.4.8	Excentricité des floes	114
4.1.3.4.9	Distribution des épaisseurs sur chacun des floes	115
4.1.3.4.10	Épaisseur moyenne des floes vs aire des floes.....	115
4.1.4	Synthèse des campagnes aériennes.....	115
4.2	Campagnes d'instrumentation fixe	118
4.2.1	Résultats.....	125

4.2.1.1	Jeu 1 : 25 février 2009 (a).....	125
4.2.1.2	Jeu 2 : 25 février 2009 (b).....	129
4.2.1.3	Jeu 3 : 23 février 2009 (a).....	132
4.2.1.4	Jeu 4 : 23 février 2009 (b).....	135
4.2.1.5	Jeu 5 : 15 février 2009 (a).....	136
4.2.1.6	Jeu 6 : 28 février 2009	138
4.2.1.7	Observations générales sur les données acquises au port et recommandations	142
4.2.1.8	Notes sur le positionnement des appareils.....	143
4.2.1.9	Notes sur la correction des températures	144
4.2.2	Synthèse des données acquises au port.....	144
Chapitre 5 - Recommandations.....		146
Conclusion		149
Bibliographie		152
Annexe 1 – Terminologie des glaces.....		156
Annexe 2 – Code de l’œuf des cartes de reconnaissance des glaces		159
Annexe 3 - Cartes de reconnaissance des glaces de la Garde côtière canadienne pour le 13 mars 2008.....		161
Annexe 4 - Cartes de reconnaissance des glaces de la Garde côtière canadienne pour le 24 février 2009.....		168
Annexe 5 - Carte de reconnaissance des glaces de la Garde côtière canadienne pour le 25 février 2009.....		175

Liste des tableaux

Tableau 1 – Émissivité selon les différentes formes d'eau, dans la fenêtre 8 à 14 μm	7
Tableau 2 – Spécifications de la caméra thermique FLIR A40M	13
Tableau 3 – Spécifications de la caméra thermique FLIR SC2000	30
Tableau 4 - Conditions d'acquisition des images et thermiques et observations pour l'hiver 2009	119
Tableau 5 – Formes de glace et codes associés pour le code de l'œuf (Source : Service canadien des glaces, 2005).....	160
Tableau 6 – Taille des glaces et codes associés pour le code de l'œuf (Source : Service canadien des glaces, 2005).....	160
Tableau 7 – Codes pour les sarrasins (Source : Service canadien des glaces, 2005)	160

Liste des figures

Figure 1 - Avion Piper PA-128-40 utilisé pour les survols	12
Figure 2- Caméra thermique FLIR A40M (Source : FLIR Systems, 2004)	13
Figure 3 – Calibration de la caméra thermique A40M avec le corps noir Mikron 340.....	14
Figure 4 - Carte du fleuve St-Laurent entre Québec et Montréal (Google Earth) (Source : Emond et coll., 2010).....	15
Figure 5 - Position de la caméra thermique à 45°(a et b)	16
Figure 6 – Interface graphique développée pour les images de l’année 2008	19
Figure 7 – Exemple d’une érosion (opération morphologique) sur une image en niveau de gris	20
Figure 8 – Exemples de résultats du programme de segmentation automatique : à gauche, les images originales (a à e); à droite, les images segmentées (f à j).....	24
Figure 9 – Interface graphique : exemple de segmentation originale incorrecte (a), de la correction appliquée (b) et du résultat obtenu (c)	25
Figure 10 – Image thermique et segmentation correspondante présentant des floes de tailles diverses	27
Figure 11 - Image thermique et segmentation correspondante présentant un résultat incorrect en termes de taille des floes	27
Figure 12 - Plan de la région de Québec (a), du port de Québec (b) et du quai dans le secteur de l'estuaire de la rivière St-Charles (c) utilisé comme du site d'étude	29
Figure 13 - Instrumentation au port de Québec	30
Figure 14 – Instruments installés sur la nacelle au port de Québec.....	31
Figure 15 – Pyramide d’instrumentation posée au fond du fleuve près du quai, au port de Québec	32
Figure 16- Station météorologique installée au port de Québec.....	32
Figure 17 – Calibration de la caméra thermique SC2000 avec le corps noir Mikron 340 ...	33
Figure 18 – Exemple d’image thermique avec plaque et senseur de température.....	36
Figure 19 – Schéma des composantes thermiques agissant sur un couvert de glace (Adapté de Beltaos, 2008)	38

Figure 20 – Schéma des conditions limites pour l'équation de diffusion de chaleur dans la glace	39
Figure 21 - Courbe typique de la relation entre l'épaisseur et la température de surface des glaces	43
Figure 22 - Différences de température entre une solution avec $k_{xx}=0$ et $k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, pour un bloc convexe de 5 cm d'épaisseur maximale et 1 m de largeur	45
Figure 23 - Différences de température entre une solution avec $k_{xx}=0$ et $k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, pour un bloc convexe de 25 cm d'épaisseur maximale et 5 m de largeur	45
Figure 24 - Différences de température entre une solution avec $k_{xx}=0$ et $k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, pour un bloc convexe de 1 m d'épaisseur maximale et 5 m de largeur	45
Figure 25 – Différence d'épaisseur induite par l'utilisation d'un modèle 1D plutôt que 2D pour un floe convexe de 25 cm d'épaisseur maximale et de 5 m de largeur	46
Figure 26 – Floe irrégulier modélisé avec échange de chaleur dans les deux directions, issu d'une image thermique lors du survol du 13 mars 2008.....	47
Figure 27 – Exemple de courbe démontrant la limite d'épaisseur pouvant être détectée	48
Figure 28 - Historique de la météo menant à une courbe limite des températures de surface versus l'épaisseur	48
Figure 29 – Marge d'erreur sur l'épaisseur d'une glace pour différentes relation d'épaisseur en fonction de la température de surface, si l'erreur sur la température de surface est de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ (fuseau foncé) et $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (fuseau pâle)	52
Figure 30 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Montréal (Source : Emond et coll., 2010).....	54
Figure 31 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) au Lac St-Pierre (Source : Emond et coll., 2010).....	54
Figure 32 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Trois-Rivières (Source : Emond et coll., 2010)	55
Figure 33 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Trois-Rivières (Source : Emond et coll., 2010)	55
Figure 34 - Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Québec (Source : Emond et coll., 2010)	56
Figure 35 – Température de l'air lors de la semaine précédant le vol de mars 2008 (Source : Emond et coll., 2010).....	59

Figure 36- Températures de surface des glaces selon leur épaisseur lors de la journée du 13 mars 2008, à Québec.....	60
Figure 37 – Courbes de l'épaisseur des glaces selon leur température de surface pour le 13 mars 2008 pour des épaisseurs de 0 à 500 cm (a) et à l'intérieur des limites de validité (b).....	61
Figure 38 – Statistiques sur les glaces le long du fleuve St-Laurent pour le 13 mars 2008 .	62
Figure 39 – Graphique de l'épaisseur médiane et de l'épaisseur maximale détectée lors du 13 mars 2008.....	64
Figure 40 – Écart-type de l'épaisseur selon l'épaisseur médiane des glaces par image pour les données du 13 mars 2008	66
Figure 41 – Photographies prises pendant le survol du 13 mars 2008 (Source : Emond et coll., 2010)	67
Figure 42 – Épaisseur moyenne des floes selon l'aire de chacun des floes observés lors du survol du 13 mars 2008.....	76
Figure 43 - Images thermiques: lors du vol aller, près de Montréal, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, à 20 km à l'est de Montréal, originale (c) et modifiée (d).....	78
Figure 44 - Images thermiques au Lac St-Pierre : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d).....	79
Figure 45 - Images thermiques près de Trois-Rivières : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)	80
Figure 46 - Images thermiques près de Portneuf : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d).....	81
Figure 47 - Images thermiques près de Québec : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d).....	82
Figure 48 – Température de l'air lors de la semaine précédant le vol de février 2009	83
Figure 49 – Températures de l'air pendant la journée du 24 février 2009	83
Figure 50- Températures de surface des glaces selon leur épaisseur lors de la journée du 24 février 2009, à Québec.....	85
Figure 51 – Villes de référence pour les courbes d'épaisseur selon les températures de surface des glaces.....	86
Figure 52 – Courbes de l'épaisseur selon la température de surface ces glaces le long du fleuve : (a) Courbes à l'aller jusqu'à une épaisseur de 5 m, (b) Courbes dans les limites de validité pour l'aller, (c) Courbes dans les limites de validité pour le retour.....	86

Figure 53 – Statistiques sur les glaces le long du fleuve St-Laurent lors du vol aller du 24 février 2009	88
Figure 54 - Statistiques sur les glaces le long du fleuve St-Laurent lors du vol retour du 24 février 2009	89
Figure 55 – Épaisseur médiane et maximale le long du fleuve pour le vol du 24 février 2009	92
Figure 56 –Relation entre l'écart type de l'épaisseur des glaces et l'épaisseur médiane par image pour le 24 février 2009 aller et retour	93
Figure 57 – Épaisseur moyenne des floes en fonction de leur aire, pour les vols aller et retour du 24 février 2009	100
Figure 58 – Images thermiques: lors du vol aller, près des ponts, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d).....	102
Figure 59 - Images thermiques à 2,5 km des ponts : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)	103
Figure 60 - Images thermiques à 5 km des ponts : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d).....	104
Figure 61 - Images thermiques à 6,7 km des ponts (site d'instrumentation fixe) : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)...	105
Figure 62 – Températures de l'air pendant la journée du 25 février 2009, à Québec	106
Figure 63- Températures de surface des glaces selon leur épaisseur lors de la journée du 25 février 2009, à Québec.....	107
Figure 64 – Courbes de l'épaisseur selon la température de surface ces glaces à Québec : (a) jusqu'à une épaisseur de 5 m, (b) dans les limites de validité	108
Figure 65 – Statistiques sur les glaces entre le port et les ponts de Québec lors du vol aller du 25 février 2009.....	109
Figure 66 – Statistiques sur les glaces entre le port et les ponts de Québec lors du vol retour du 25 février 2009.....	110
Figure 67 – Épaisseur médiane et maximale entre le port et les ponts de Québec pour le vol du 25 février 2009.....	111
Figure 68 – Écart-type de l'épaisseur selon l'épaisseur médiane des glaces par image pour les données du 25 février 2009	112
Figure 69 – Épaisseur moyenne des floes en fonction de leur aire, pour les vols aller et retour du 25 février 2009	115

Figure 70 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 25 février 2009 (a)	125
Figure 71- Épaisseurs du IPS et calculées de l'imagerie infrarouge pour le 25 février 2009 (a)	126
Figure 72 – Histogramme des épaisseurs de glace obtenues du IPS et de l'imagerie thermique pour le 25 février 2009 (a)	127
Figure 73 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 25 février 2009	130
Figure 74 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes déduites des images thermiques (IR) , pour le 25 février 2009	130
Figure 75 - Exemple d'image thermique acquise le 25 février 2009	131
Figure 76 – Histogramme des épaisseurs de glaces pour le 25 février (b)	132
Figure 77 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 23 février 2009	132
Figure 78 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes déduites des images thermiques (IR) , pour le 23 février 2009 (a)	133
Figure 79 - Histogramme des épaisseurs pour les données du 23 février 2009 (a), avec les valeurs négatives dans la dernière classe	134
Figure 80 - Histogramme des épaisseurs pour les données du 23 février 2009 (a), avec les valeurs négatives dans la première classe	134
Figure 81 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 23 février 2009	135
Figure 82 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes et maximum déduites des images thermiques (IR) , pour le 23 février 2009	136
Figure 83- Histogramme des épaisseurs de glaces pour le 23 février 2009 (b), avec les valeurs négatives classées dans la dernière classe	136
Figure 84 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 15 février 2009	137
Figure 85 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes et maximum déduites des images thermiques (IR) , pour le 15 février 2009	137
Figure 86 - Histogramme des épaisseurs de glaces acquises par le IPS et par l'imagerie infrarouge (IR)	138

Figure 87 – Températures de l’air, de surface de la glace et de l’eau pour les données du 28 février 2009.....	139
Figure 88 – Épaisseurs du IPS et moyennes obtenues de l’imagerie thermique pour les données du 28 février 2009.....	140
Figure 89 - Histogramme des épaisseurs de glaces acquises par le IPS et par l'imagerie infrarouge (IR), avec les valeurs négatives dans la dernière classe, pour le 28 février 2009	140
Figure 90 - Histogramme des épaisseurs de glaces acquises par le IPS et par l'imagerie infrarouge (IR), avec les valeurs négatives dans la première classe, pour le 28 février 2009	141
Figure 91 – Exemple d’image réelle acquise pour le 28 février 2009, avec la caméra Canon EOS 20D	142
Figure 92. Exemple d’image réelle et thermique associée	144
Figure 93 – Code de l’œuf pour les cartes de reconnaissance des glaces (Source : Service canadien des glaces, 2005).....	159
Figure 94 – Carte des glaces pour le secteur Varennes-Contrecoeur, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	161
Figure 95 – Carte des glaces pour le secteur Contrecoeur-Sorel, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	162
Figure 96 – Carte des glaces pour le Lac St-Pierre, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	163
Figure 97 – Carte des glaces pour le Lac St-Pierre, le 13 mars 2008, entre 15h10 et 15h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	164
Figure 98 – Carte des glaces pour le secteur Trois-Rivières-Grondines, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	165
Figure 99 – Carte des glaces pour le secteur Grondines-Portneuf, le 13 mars 2008, entre 6h40 et 10h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	166
Figure 100 – Carte des glaces pour le secteur Portneuf St-Nicolas, le 13 mars 2008, entre 6h40 et 10h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	167
Figure 101 – Carte des glaces pour le secteur Varennes-Contrecoeur, le 24 février 2009, entre 6h45 et 8h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	168
Figure 102 – Carte des glaces pour le secteur Contrecoeur-Sorel, le 24 février 2009, entre 6h45 et 8h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)	169

- Figure 103 – Carte des glaces pour le Lac St-Pierre, le 24 février 2009, entre 15h00 et 15h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne) 170
- Figure 104 – Carte des glaces pour le secteur Trois-Rivières-Grondines, le 24 février 2009, entre 6h45 et 8h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne) 171
- Figure 105 – Carte des glaces pour le secteur Trois-Rivières-Grondines, le 25 février 2009, entre 6h45 et 7h50 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne) 172
- Figure 106 – Carte des glaces pour le secteur Grondines-Portneuf, le 24 février 2009, entre 6h40 et 13h20 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne) 173
- Figure 107 – Carte des glaces pour le secteur Portneuf St-Nicolas, le 24 février 2009, entre 6h40 et 13h20(HNE) (Source : Garde côtière canadienne) 174
- Figure 108 – Carte des glaces pour le secteur du port de Québec, le 26 février 2009, entre 6h40 et 10h25 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne) 175

Introduction

Problématique

Les cours d'eau en milieu nordique ont la particularité d'être couverts de glace pendant la période hivernale. Cette glace peut causer des problèmes à différents niveaux : elle peut endommager des structures, mettre en péril des citoyens lors d'inondations subséquentes à des embâcles ou encore entraver le transport maritime. De plus, avec les changements climatiques, le régime des glaces pourrait subir des modifications, entraînant la nécessité de disposer des outils appropriés afin de comprendre notre milieu et les modifications qui y surviennent. Ainsi, le suivi des glaces est primordial afin de réagir promptement et convenablement aux événements possibles et de comprendre les changements qui s'y produisent.

Au Canada, sur le fleuve St-Laurent, la navigation commerciale continue empêche la prise d'une couverture complète de glace pendant l'hiver, mais de nombreuses glaces sont présentes et leurs caractéristiques varient selon divers critères devant être évalués dans un contexte spatio-temporel. Toutefois, l'étendue importante de la zone à étudier nécessite une approche simple et pouvant facilement s'appliquer à une grande surface. Les outils utilisés actuellement pour le fleuve St-Laurent, bien qu'efficaces et opérationnels, pourraient être améliorés afin d'assurer un suivi plus précis, de faciliter l'acquisition des données et la recherche scientifique sur le sujet et de réduire les coûts d'opération. La télédétection est ainsi une approche à envisager et est couramment utilisée en milieu marin. Toutefois, la production de cartes de distribution d'épaisseur des glaces demeure un problème majeur pour la télédétection en milieu marin. Elle nécessite actuellement l'utilisation de différents capteurs combinés. Parmi les différentes zones du spectre de la lumière qui sont utilisées en télédétection, la zone infrarouge (typiquement 8-14 μm) offre de nombreuses possibilités et permettrait de réduire la complexité de l'opération. L'utilisation d'un capteur infrarouge permet, entre autres, d'obtenir la température de surface d'un objet étudié. Les images ou cartes de température de surface des glaces et de l'eau, combinées à des données météorologiques, permettent d'étudier les transferts de chaleur à l'interface entre le mélange glace/eau et l'air et de caractériser ce mélange glace/eau. La concentration des

glaces ainsi que diverses caractéristiques des glaces, dont surtout l'épaisseur, peuvent donc être calculées à partir de l'imagerie infrarouge.

Objectifs

Le principal but de la recherche est d'évaluer l'applicabilité de l'imagerie thermique pour le suivi des glaces en milieu fluvial. Globalement, cela permettra de contribuer au développement d'outils pour assurer une utilisation sécuritaire et prospère du fleuve St-Laurent. Plus spécifiquement, le but du projet est de déterminer l'épaisseur des glaces à partir d'images thermiques et de données météorologiques, ainsi que d'obtenir plusieurs autres caractéristiques (concentration, forme, etc.) des glaces sur le fleuve St-Laurent.

Contenu du mémoire

Le mémoire est rédigé en cinq grands chapitres. Le premier, soit l'état des connaissances, présente la théorie en lien avec l'imagerie thermique et présente les résultats connus pour le suivi des glaces par diverses méthodes de télédétection, dont l'imagerie thermique. Le second présente la portion expérimentale du projet de recherche, en décrivant les diverses campagnes de terrain qui ont été effectuées. Le troisième présente la modélisation qui a été utilisée pour faire le lien entre les températures de surface des glaces et leur épaisseur. Le quatrième montre les résultats bruts et traités de même que leur analyse. Enfin, le cinquième chapitre présente les impacts de la recherche et les recommandations.

Chapitre 1 - État des connaissances

La production de glaces se fait à la suite d'une perte de chaleur de l'eau vers l'atmosphère. Lorsque l'eau atteint la température de congélation, une perte additionnelle de chaleur cause la formation de glace. En eaux calmes, un couvert de glace se forme alors. Lorsque la vitesse de l'écoulement est typiquement supérieure à 0,6 m/s, la turbulence de l'écoulement cause la submersion des cristaux de glace (frasil) formés (Ashton, 1986). Lorsque la température de l'eau est légèrement sous le point de congélation, le frasil est actif : il est adhérent. Les cristaux s'agglomèrent en floes, qui montent à la surface. Ces floes s'agglomèrent ensuite en floes, ou assiettes de glaces.

Les pertes de chaleur à l'origine de la formation des glaces sont conséquentes aux transferts de chaleur qui se produisent à l'interface du mélange eau-glace et de l'air. Les principaux paramètres météorologiques impliqués dans ces échanges sont la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la pression barométrique, la couverture nuageuse et l'ensoleillement de même que les précipitations (Ashton, 1986). Toutefois, lorsque la production de glace est initialisée et qu'un couvert partiel ou complet est présent, les échanges de chaleur sont diminués par cette isolation. L'étude des transferts de chaleur doit alors tenir en compte la concentration et l'épaisseur des glaces.

Maykut (1978) a développé un modèle utilisant les données climatologiques pour prédire comment les composantes du bilan d'énergie à la surface, dont la température, sont influencées par l'épaisseur de la glace en milieu marin. Il a constaté que lorsque l'air est froid, la température de surface diminue rapidement avec l'augmentation de l'épaisseur de la glace. La température de surface d'une glace de 0,10 m d'épaisseur correspond à 50% de celle d'une glace épaisse de 3 à 4 mètres, alors qu'une glace de 0,80 m d'épaisseur a une température évaluée à 90% de ce même comparatif. Pour les glaces d'épaisseur supérieure à 1 m, les différents types de glaces (et donc différentes épaisseurs de glace) ont une faible différence de température à la surface et ils ne peuvent être distingués.

En ce qui concerne le lien entre l'épaisseur de la glace et la température à sa surface, Adachi et Yukimoto (2006) ont démontré la relation qui existe entre ces deux paramètres, qui est toutefois non linéaire. Ils ont montré que les variables d'énergie dont il faut tenir compte pour évaluer l'épaisseur de la glace varient selon son épaisseur. Pour des glaces minces, le refroidissement par les flux de chaleurs sensibles et latentes est le plus important. Lorsque les glaces sont plus épaisses, il faut tenir compte plutôt du refroidissement par émission de rayonnement de grandes longueurs d'onde, de la conduction thermique provenant du fond de la mer et du flux de chaleur sensible.

L'utilisation de la télédétection dans l'étude des glaces s'est faite jusqu'à maintenant davantage en milieu océanique qu'en milieu fluvial ou lacustre. En effet, la télédétection utilise divers satellites qui ont souvent une résolution spatiale insuffisante pour étudier les milieux en eau douce, généralement présents sur des surfaces ou des distances moindres (Rees, 2006). Les applications en eau douce commencent à se développer.

Un exemple de ces nouveaux développements de la télédétection pour les glaces en rivière est l'utilisation des images du satellite RADARSAT par Jasek et coll.(2003). Ils ont déterminé l'épaisseur de la glace formée à partir de ces images, combinées à des mesures sur le terrain. Ils ont basé leur analyse sur trois hypothèses, dont les deux suivantes ont pu être vérifiées. La première suppose qu'au fil du temps, les cavités sous un couvert de glace sont remplies par la progression thermique de la production de glace solide dans la « slush » présente sous le couvert. L'interface glace solide et « slush », par sa rugosité, provoque un retour de signal envoyé. Puisque cette interface se trouve davantage en profondeur lorsque l'épaisseur du couvert de glace est plus importante, le retour de signal est alors plus faible. Cette différence de retour de signal est donc liée à l'épaisseur de la glace. Malgré des difficultés liées à l'angle d'incidence différent des diverses images, de légères différences d'épaisseur de glace ont pu être perçues. La seconde hypothèse dit qu'aux endroits où de la glace consolidée est présente et donc où davantage de morceaux de glaces sont soulevés et retournés, l'importance du retour de signal peut être liée à l'épaisseur des glaces, puisque la présence de davantage de glaces consolidées en un lieu indique que ces glaces sont plus épaisses. La rugosité de la surface sous et au-dessus de la

glace consolidée, plus importante en présence de davantage de glace consolidée, a aussi confirmé cette hypothèse et l'épaisseur totale de glace a pu être évaluée.

Hall et coll. (1981) ont eux aussi étudié les glaces d'eau douce. À l'aide de radiomètres fonctionnant pour les longueurs d'onde entre 0,81 et 6 cm (micro-ondes), ils ont évalué l'épaisseur de la glace d'un couvert de glace sur un réservoir au Colorado. Utilisant le principe que l'intensité de l'émission d'ondes (température de brillance) est proportionnel au produit de la température de la surface et de son émissivité, et que l'émissivité est affectée par l'interface glace/air, l'interface glace/eau et l'épaisseur des glaces dans les micro-ondes, cette épaisseur peut être déduite à partir de la température de brillance. Ils ont obtenu une bonne relation ($R^2=0.98$) entre les valeurs obtenues pour le radiomètre captant les longueurs d'onde de 6 cm et les échantillons pris sur le terrain.

Drüe et Heinemann (2005) ont vérifié la précision de la concentration des glaces de mer obtenues par un algorithme qu'ils ont auparavant développé et qui utilise les données des satellites MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Avec les données MOD29 (masque et température de surface), les données MOD21KM (radiance à une résolution de 1 km et les données MOD35 (masque nuageux), les cartes ont été générées et comparées à des mesures de radiations longues prises à partir d'un avion. Une erreur de l'ordre de 10% a été évaluée. Ils ont pu obtenir des cartes à des résolutions d'un km, ce qui est plutôt fin comparé à d'autres produits comme ceux obtenus par micro-ondes passives, qui ont une résolution de 25 km.

L'utilisation de radars permet aussi d'obtenir l'épaisseur des glaces. Par contre, cette technique ne permet que de détecter des épaisseurs plus grandes que 5 cm en utilisant les algorithmes de Riek et coll. (1990), pour un radar qui à la base ne peut détecter que des épaisseurs supérieures à 20 cm (antenne de 900 MHz).

Parmi les différents types d'ondes pouvant être utilisées par satellites ou par instrumentation aéroportée, le domaine infrarouge en est un qui peut donner de l'information soit sur la température de surface, soit sur l'émissivité de cette surface. Par ailleurs, la thermographie infrarouge a de nombreuses applications, que ce soit en télédétection ou non. Autant en médecine elle peut permettre de trouver le diamètre, la

profondeur et le flot de sang d'une veine (Boué et coll. 2007), autant elle est envisagée pour la conservation de l'énergie dans les milieux urbains, par la mesure de la température des toits des différents édifices et l'isolation supplémentaire nécessaire (Callison et coll., 1987). En télédétection, on peut par exemple générer des cartes d'évapotranspiration (Loheide et Gorelick, 2005).

L'efficacité de la zone infrarouge du spectre de la lumière pour étudier les glaces a été démontrée. Li et coll. (1999) ont évalué la température à la surface des glaces avec différents instruments : des thermistances, un pyromètre pour rayonnement infrarouge et un microscanneur pour rayonnement infrarouge. Les technologies utilisant l'infrarouge ont donné des températures légèrement inférieures aux températures réelles, mais somme toute assez stables et suffisamment près de la réalité. La zone infrarouge est aussi appropriée en théorie puisque pour un corps à une température de 0°C, la longueur d'ondes dominante est 11 µm, alors que la zone infrarouge utilisée est généralement entre 8 et 14 µm (Rees, 2006).

Hori et coll. (2006) ont quant à eux évalué l'émissivité de la glace et de la neige pour les longueurs d'onde entre 8 et 14 µm. Ils ont trouvé que l'émissivité varie selon le type de surface (gros grain ou glace) et qu'elle varie aussi selon l'angle d'exitance. De plus, l'émissivité décroît en présence d'eau liquide et elle est liée à la grosseur des grains et à leur cimentation (Tonooka et Watanabe, 2005 ; Hori et coll., 2006). Salisbury et D'Aria (1992) ont quant à eux déterminé que l'émissivité de la glace dépend de sa composition mais surtout de sa rugosité. L'émissivité varie aussi selon la longueur d'ondes. Toutefois, tous les capteurs infrarouges n'utilisent pas exactement les mêmes longueurs d'onde. Les capteurs présents sur les satellites n'utilisent parfois qu'une zone entre 10,3 et 11,3 µm par exemple. Selon le type de capteur utilisé, il importe de bien choisir l'émissivité afin de bien calculer la température de surface. En effet, une différence d'émissivité de 0,045 dans le domaine infrarouge peut correspondre à une différence d'à peu près 3 °C dans certains cas (Rees et James, 1992).

Le tableau 1 montre les différentes valeurs d'émissivité pour l'eau, la glace et la neige dans la fenêtre 8 à 14 µm. Dans l'étude présente, l'émissivité utilisée pour la glace est de 0,97 et elle est considérée identique pour l'eau afin de faciliter le traitement d'images. L'émissivité de l'eau se situe davantage près de 0,96. Tel qu'expliqué à la section 4.1.4, l'erreur sur la

température mesurée, dans la gamme de températures observées des jeux de données, varie ainsi de 0,1 à 0,2°C.

Tableau 1 – Émissivité selon les différentes formes d'eau, dans la fenêtre 8 à 14 µm

Matériau	Émissivité ^(Source)
Eau distillée	0,96 ¹ à 0,97 ³
Cristaux de glace	0,98 ¹
Glace lisse	0,96 à 0,97 ^{1,2,3}
Glace rugueuse	0,97 ²
Glace de mer lisse	0,97 ²
Glace de mer rugueuse	0,97 ²
Neige	0,8 à 0,85 ¹
Neige à grains fins (70 µm)	0,99 ³
Neige à grains moyens (600 µm)	0,98 ³
Neige à grains grossiers (800 µm)	0,98 ³
Neige durcie au soleil (1100 µm)	0,97 ³

Sources : 1 - FLIR Systems, 2004.

2 - Salisbury et D'Aria, 1992.

3- Hori et coll., 2006.

Groves et Stringer (1991) ont évalué l'évolution de l'épaisseur de la glace de mer à partir de la température de surface, la température de l'air, la vitesse du vent et la température de l'eau, sur une période de 9 jours dans la mer des Tchouktches, à la limite entre la Sibérie et l'Alaska, au nord du détroit de Béring. Les températures de surface des glaces ont été prises à l'aide de la technologie AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), c'est-à-dire un radiomètre à résolution élevée installé sur un satellite et pouvant mesurer le rayonnement infrarouge thermique. Les températures ainsi acquises étaient suffisamment réalistes pour estimer l'épaisseur de la glace lors des premiers stades de formation de la glace à l'aide de modèles préétablis.

Rees (2006) relate les résultats obtenus par divers chercheurs. Ainsi, l'utilisation de la technologie AVHRR s'est révélée applicable au suivi du couvert de glace sur le lac Baïkal. Pour les grands lacs du Wisconsin, les dates de prise et de débâcle des glaces ont été évaluées avec l'AHVRR. Des différences de quelques jours ont été obtenues pour la date de prise, sans biais systématique. Les dates de débâcles ont été estimées avec un retard de 5 jours.

Par contre, il faut noter que la température de surface telle que calculée par l'AVHRR (entre 10,3 et 11,3 μm) diffère de la température de surface telle que calculée par des bilans d'énergie. Veihelmann et coll. (2001) ont obtenu des différences typiques de l'ordre de 2 K, malgré l'application de corrections atmosphériques. Quant à Yu et Rothrock (1996), ils ont aussi utilisé l'AVHRR pour évaluer les températures de surface, dans le but de déterminer l'épaisseur de glaces minces. Ils ont comparé les épaisseurs obtenues avec des épaisseurs mesurées par des sonars sous l'eau et visant vers le haut. Ils en ont déduit que l'épaisseur calculée grâce aux images thermiques diffère d'environ 2% pour chaque tranche de 10 cm. Des erreurs plus importantes se trouvent à la bordure des morceaux de glace, notamment dues à la résolution d'un kilomètre des images satellitaires.

Rees et James (1992) ont trouvé que la thermographie infrarouge permet bien la détection de la frontière eau-glace, mais que cela n'est généralement pas aussi contrasté que dans le visible ou dans le proche infrarouge, considérant la faible différence de température. Par ailleurs, la pénétration de la radiation infrarouge est généralement de l'ordre de quelques microns, ce qui fait qu'une mince couche de glace est vue opaque dans l'infrarouge et que la température perçue est réellement la température de surface, non influencée par la température de la matière sous-jacente.

Steffen et Lewis (1988) et Steffen (1986) ont effectué des vols au-dessus de la Baie de Baffin et ont acquis des températures de surface par infrarouge. Suite aux corrections atmosphériques nécessaires et à partir de bilans thermiques, ils ont évalué l'épaisseur des glaces à partir de la température de surface pour en faire la classification (nilas sombre et nouvelle glace, nilas clair, glace grise, glace blanchâtre, glace blanche : voir l'annexe 1). La présence d'une mince couche (<20 mm) de neige contenant de l'eau salée modifiait la température de surface de 1 à 4°C pour des glaces d'épaisseur inférieure à 0,3 m d'épaisseur. Selon les températures d'air enregistrées dans le secteur et les courbes mettant en lien la température de surface avec l'épaisseur des glaces, la présence de neige était considérée négligeable puisqu'elle ne modifiait pas la classification des glaces. Il pourrait en être tout autrement pour des conditions météorologiques, de neige et de glace différentes. Ils ont calculé l'épaisseur des glaces jusqu'à 0,5 m à partir de la température de l'air et de la température de surface.

Leppäranta et Lewis (2007) ont montré le potentiel de la thermographie infrarouge pour la production de cartes d'épaisseur de glace, en considérant que la température de surface de la glace est fonction de la chaleur qui est transmise à travers la glace vers la surface, qui elle-même dépend de l'épaisseur de la glace et du transfert de chaleur entre les glaces et l'atmosphère. Avec un modèle simple décrivant les flux de chaleur, ils ont évalué les épaisseurs de glace de mer, allant de l'eau libre à de la glace ayant jusqu'à 45 cm d'épaisseur, avec des résultats valides lorsque la température de l'air était inférieure à -4°C . Comme Maykut (1978), ils énoncent que les glaces d'une épaisseur supérieure à 1 m ne peuvent être différenciées. Ils ont constaté que la variance de la température de surface augmente avec la diminution de cette température et ont expliqué leur constat par le fait que les glaces plus âgées et donc plus épaisses montrent plus de variabilité structurelle. Or, à partir d'épaisseurs supérieures à 1 m, cette variance diminue.

Tel que les expériences précédemment décrites l'ont montré, la thermographie infrarouge, malgré le potentiel qu'elle a, nécessite la connaissance de paramètres particuliers et comporte quelques difficultés. Afin d'obtenir des images valides et d'avoir les renseignements nécessaires pour faire les corrections appropriées, il faut connaître l'émissivité de la surface, la température de l'air et son humidité, la distance à laquelle on se trouve du point visé, de même que la température réfléchie dont la source est l'environnement. Il importe aussi de connaître la couverture nuageuse, car elle modifie la température perçue et empêche la prise de données si un couvert se trouve entre le capteur infrarouge et la surface.

L'utilisation de la thermographie infrarouge en télédétection nécessite une correction atmosphérique (Girard et Girard, 1999). En effet, les particules, les gaz et l'humidité de l'air absorbent et émettent un rayonnement dans l'infrarouge. Toutefois, en considérant un ciel clair, la bande spectrale entre 10-12 μm est relativement transparente à la radiation, excepté pour la vapeur d'eau. Le fait de négliger l'absorption et l'émission par le dioxyde de carbone, l'ozone et autres gaz présents dans l'atmosphère peut causer de faibles erreurs, mais la source d'erreur majeure potentielle vient de l'estimation du coefficient d'absorption de la vapeur d'eau et de la nécessité d'avoir des profils de température et d'humidité (Price, 1983). Une technique utilisée pour vérifier si une correction atmosphérique est nécessaire

est de survoler un même point à différentes altitudes. Djavadi et Anderson (1987) ont effectué des vols au-dessus de différents types de surface, après la tombée du jour, alors que la température de l'air chute brusquement. Cette méthode s'est donc avérée inefficace et ils ont jugé que dès que la température de surface diffère d'un kelvin d'un vol à l'autre, la méthode de correction par vols à différentes altitudes n'est pas appropriée. Ainsi, malgré leurs constatations, cette technique, si employée adéquatement, peut être efficace, tel que montré par l'expérience de Leppäranta et Lewis (2007), dont les vols à deux altitudes différentes n'ont montré aucune différence de température. En calculant la correction atmosphérique avec un modèle simple de radiation (Price, 1983), ils ont obtenu une différence de température de $0,25^{\circ}\text{C}$ entre la température de surface et celle perçue à une altitude de 300 m. Rees et James (1992) ont aussi affirmé que par temps clair, la radiation du ciel dans le domaine infrarouge est très faible et qu'une correction peut être appliquée en pointant le capteur thermique vers le ciel. Ils ont, comme Leppäranta et Lewis (2007), eu à faire de faibles corrections atmosphériques.

Malgré la nécessité de connaître plusieurs paramètres atmosphériques et d'appliquer une correction appropriée, il demeure que la thermographie infrarouge permet d'obtenir aisément une température de surface des glaces et que celle-ci est liée à leur épaisseur par des notions de flux de chaleur.

Chapitre 2 - Méthode expérimentale

Un des objectifs du projet de maîtrise étant de prouver l'applicabilité de la thermographie infrarouge pour le suivi des glaces, une approche expérimentale a été utilisée et constitue le cœur du projet, afin de compléter les informations obtenues dans la littérature. Pour répondre aux objectifs de cette recherche, deux types de campagnes de terrain ont été utilisés : aériennes et fixe. Ces campagnes ont permis d'obtenir des images thermiques de glace dans diverses conditions et de compléter ces jeux de données par d'autres informations essentielles. Les objectifs, l'instrumentation utilisée ainsi que le déroulement de chacune de ces campagnes sont ici expliqués.

2.1 Campagnes aériennes

2.1.1 Objectifs et site d'étude

Les campagnes aériennes d'imagerie thermique avaient pour but l'acquisition d'un important jeu de données sur un tronçon du fleuve St-Laurent. Ainsi, chaque image thermique fournit de l'information sur les glaces présentes dans l'image, mais mises ensemble, elles enrichissent le jeu de données par le potentiel à faire le suivi des caractéristiques le long du fleuve St-Laurent. À chaque image thermique est donc associée une position géographique afin de tenir compte de l'aspect spatial.

Ces campagnes ont été effectuées aux hivers 2008 et 2009, entre Montréal et Québec. Le point de départ a été choisi en fonction du site de production des glaces, qui se trouve dans le Lac St-Louis à l'amont de l'île de Montréal. Les glaces qu'on y trouve sont donc présumées fort différentes de celles trouvées davantage en aval. En aval de Québec, la salinité de l'eau augmente et les caractéristiques des glaces sont donc modifiées. L'étude du bief entre Montréal et Québec permet de suivre l'évolution des glaces dans des conditions fluviales en eau douce. Il s'agit aussi d'un tronçon de près de 250 km, ce qui constitue une zone d'étude étendue. Plusieurs variations dans le comportement hydraulique de l'écoulement (courbes, profondeur, vitesses) sont présentes et leur effet sur la répartition et les caractéristiques des glaces peut ainsi être constaté. Le lac St-Pierre est un exemple d'une modification importante de l'écoulement, car il est caractérisé par un élargissement

du fleuve où les vitesses et la profondeur diminuent, causant la formation d'un couvert stable de glace. Un chenal de navigation est toutefois gardé ouvert au centre du lac par la navigation commerciale. Les marées semi-diurnes mixtes se font aussi sentir jusqu'à Trois-Rivières.

2.1.2 Instrumentation

Les survols ont été faits à bord d'un avion de type Piper Cherokee Cruiser PA-128-40 (figure 1), à bord duquel se trouvaient une caméra thermique et un GPS. La caméra thermique utilisée est une Thermovision™ A40M de FLIR (figure 2), dont les spécifications sont montrées au tableau 2. Ce type de caméra est de type micro-bolomètre non refroidi, à matrice à plan focal. Les bolomètres sont des détecteurs thermiques composés de résistances dont la conductivité est variable selon leur température. Il y a donc autant de résistances que de pixels, qui sont isolées thermiquement les unes des autres, mais dans lesquelles passe un courant électrique. Selon l'intensité du rayonnement infrarouge capté par les senseurs, le signal électrique est modifié et la température est déterminée selon la modification du signal (Gaussorgues, 1999). Le GPS utilisé est un SXBlue II, récepteur utilisant le système WAAS (Wide Area Augmentation System), qui lui donne une précision de l'ordre de 30 cm. Les positions sont acquises dans la projection Nad83 MTM 8. Aucune donnée d'altitude n'a été enregistrée par le GPS, et l'altitude de vol souhaitée a été tenue aussi bien que possible par le pilote.



Figure 1 - Avion Piper PA-128-40 utilisé pour les survols



Figure 2- Caméra thermique FLIR A40M (Source : FLIR Systems, 2004)

Tableau 2 – Spécifications de la caméra thermique FLIR A40M

Distance minimale de focalisation	0,1 m
Champ visuel	45° x 34°
Résolution thermique	0,08°C à 30°C
Résolution spatiale (IFOV)	1,3 mrad
Bande spectrale	7,5 à 13µm
Précision	+/- 2°C ou 2%
Type de détecteur	Matrice à plan focal Micro-bolomètre non refroidi 320 x 240 pixels

2.1.2.1 Calibration de la caméra thermique

La calibration de la caméra thermique a été faite en laboratoire en 2009. La calibration a été utilisée pour les données de 2009, mais elle ne l'a pas été pour les données de 2008. La calibration a été faite à température ambiante, à environ 20°C, à l'aide d'un corps noir Mikron 340. Celui-ci a la possibilité de descendre sous 0°C et a une précision de $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Toutefois, lorsque des températures aussi froides sont utilisées, un système de ventilation doit être utilisé pour empêcher la condensation. Étant donné que le laboratoire n'avait pas les équipements nécessaires, une approche différente a été utilisée afin de diminuer les risques de condensation. La calibration de chaque température s'est faite le plus rapidement possible, en quelques secondes, lorsque la température du corps noir s'était stabilisée. La température était ensuite remontée à la température ambiante, afin d'éliminer les risques de condensation. En supposant qu'une condensation avait effectivement pu se former, chaque

calibration de température a été espacée de plusieurs minutes, pour tenter de l'éliminer. La calibration a été faite pour des températures entre -20 et 30°C. Puisqu'il n'y a pas de risque de condensation pour les températures les plus élevées, celles-ci ont d'abord été calibrées, puis les températures ont été réduites. On observe à la figure 3 que la différence de température entre le corps noir et celle perçue par la caméra est plus importante pour les températures les plus basses. La caméra tend à surestimer les températures lorsque celles-ci sont inférieures à 10°C. Il est toutefois difficile de déterminer si cette surestimation est due à de la condensation ou si elle est représentative de la caméra. Les conditions d'opération différentes de la caméra lors des survols (température ambiante plus froide) pourraient aussi influencer sur la calibration. Il est tout de même considéré que la calibration effectuée doit être appliquée afin d'améliorer la qualité des résultats.

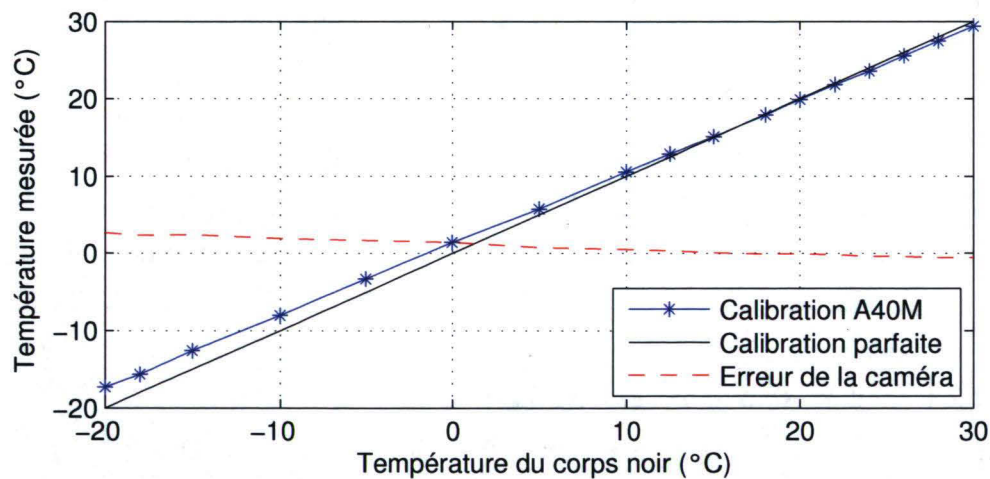


Figure 3 – Calibration de la caméra thermique A40M avec le corps noir Mikron 340

2.1.3 Déroutement des campagnes

À l'hiver 2008, deux survols ont été faits, soit le 13 mars 2008 et le 28 mars 2008. Lors du vol du 13 mars, les glaces, bien qu'en apparence assez minces, étaient présentes sur l'ensemble du tronçon survolé entre Montréal et Québec (figure 4). En ce qui concerne celui du 28 mars, étant donné la tardiveté du vol dans la saison hivernale et les températures clémentes l'ayant précédé, très peu de données ont pu être acquises et le vol a été écourté.

Ces données n'ont pas été considérées dans l'étude. Ainsi, lorsqu'il est fait référence à des résultats de l'année 2008, seul le survol du 13 mars est considéré.

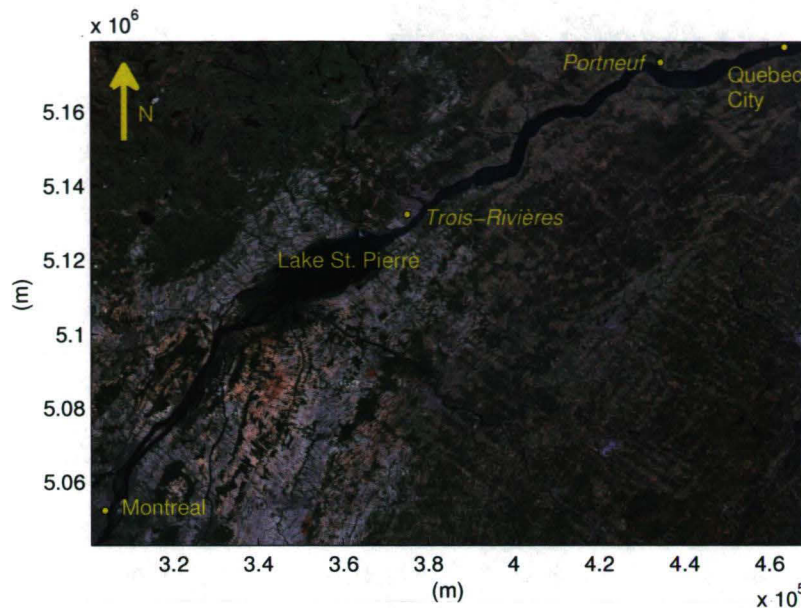


Figure 4 - Carte du fleuve St-Laurent entre Québec et Montréal (Google Earth) (Source : Emond et coll., 2010)

En 2008, la caméra thermique était installée à l'oblique dans l'avion, tel que montré à la figure 5. L'angle était de 45° par rapport à la verticale. Il n'y avait aucune vitre devant l'objectif de la caméra. La position de la caméra a induit des erreurs généralisées dans les images qui ont nécessité des traitements plus poussés et qui sont expliqués à la section 2.1.4.1. Le survol a été effectué à une altitude de 800 pieds (244 m) et a été fait de jour, entre 10h30 et 13h30, au départ de la ville de Québec. Un aller-retour vers Montréal a été fait. Les images ont été acquises à une fréquence de 0,25 HZ et les coordonnées géographiques ont été acquises simultanément. Seules les données du vol retour sont utilisées suite à un mauvais fonctionnement du GPS lors du vol aller.

En 2009, deux survols ont été faits : le 24 et le 25 février. La caméra thermique a été installée à la verticale, à l'intérieur de l'avion, avec l'objectif situé au-dessus d'un trou percé dans le plancher de l'avion. Un premier survol a été effectué à deux altitudes différentes, soit 800 pieds à l'aller au départ de Québec (244 m) et 5500 pieds (1676 m) au retour. Ce survol s'est fait de nuit, entre 18h20 et 21h25, entre Québec et Montréal, le 24



Figure 5 - Position de la caméra thermique à 45°(a et b)

février. Le lendemain, un second survol a été effectué entre le port de Québec (site de l'instrumentation fixe, voir section 2.2.1) et le pont de Québec. Il a eu lieu entre 22h22 et 22h43, aux altitudes de 800 pieds (244 m) à l'aller et de 5500 pieds (1676 m) au retour. Une altitude supérieure a été utilisée au retour afin de couvrir le fleuve sur une plus grande largeur et de vérifier la qualité des informations qui pouvaient être tirées de ce jeu de données. En effet, chaque pixel de l'image thermique couvre une surface plus grande, pouvant moins bien détecter les changements soudains comme les contours. Les images ont été acquises à une fréquence de 1 Hz afin d'améliorer la juxtaposition des images voisines.

2.1.4 Traitement des images

Les images thermiques doivent être corrigées pour les effets atmosphériques (Rogers, 2010; Byrnes et Schott, 1986; Schowengerdt, 2007; MacHin et coll., 2009). En effet, une caméra thermique capte non seulement le signal infrarouge émis par l'objet visé, mais aussi celui émis par tout élément environnant de même que celui réfléchi par ces mêmes éléments. Par exemple, les nuages ou les gaz présents dans l'atmosphère vont émettre leur propre rayonnement, puisque le signal infrarouge est lié à la température d'un corps et que tout objet, puisqu'il se trouve nécessairement au-dessus du zéro absolu (0 K), émet un rayonnement. De plus, la transmission de l'ensemble de ces rayonnements est influencée par la composition de l'atmosphère traversée. Les constituants gazeux peuvent absorber le rayonnement; il peut aussi y avoir diffusion et diffraction. De plus, l'atmosphère est

hétérogène : il peut y avoir des différences de densité ou de contenu sur diverses couches (Gaussorgues, 1999). Une simplification a été utilisée dans le cadre de ce projet, pour effectuer la correction appropriée. Sachant que l'eau libre, en conditions hivernales, est à 0°C, et en supposant que l'altération du signal est uniforme sur chacune des images, les températures sont corrigées en ramenant les pixels d'eau à une température de 0°C. Le détail de cette correction, de même que toutes les étapes effectuées, sont présentés aux sections 2.1.4.1 et 2.1.4.2.

2.1.4.1 Hiver 2008

Les images thermiques ont été produites à partir du logiciel ThermaCam Researcher®, afin qu'elles aient 256 niveaux de gris. Le niveau 0 correspond à une température de -25°C et un niveau de 255 à 5°C. Il faut souligner que ces températures sont les températures perçues par la caméra et non pas les températures de surface réelles. Elles ont ensuite été traitées avec le logiciel MATLAB™. Une interface graphique a été développée afin de faire les corrections sur chacune des images et est montrée à la figure 6. Cette interface a permis de corriger les températures des images et de faire la segmentation eau/glace.

La première étape de traitement, après avoir chargé une image, était la correction des températures. En effet, les images acquises montraient des températures beaucoup plus froides qu'attendues. Par exemple, l'eau se trouvait à une température de près de -8°C plutôt que 0°C. Il est donc évident que des effets atmosphériques modifiaient la température perçue. Or, cette modification est supposée uniforme sur l'ensemble de l'image. Ainsi, la température des glaces subit les mêmes altérations que celle de l'eau. En ramenant la température de l'eau à 0°C, il est présumé que la température des glaces est corrigée pour atteindre sa vraie valeur. Une autre observation est que la température a un gradient généralisé sur l'image. Par exemple, à la figure 6a, la température diminue en allant vers le coin droit supérieur. Afin de corriger ces deux anomalies thermiques, la correction des températures est effectuée en 2 étapes.

La première étape consiste à éliminer la tendance générale des températures à varier sur l'ensemble de l'image. Tel que vu à la figure 6a, cinq verticales sont surimposées sur l'image, et les profils de température sur ces cinq droites sont montrés sur les cinq graphiques situés à droite. On remarque que malgré la présence d'eau sur la majorité de

l'image, les courbes de température ne sont pas verticales, alors qu'elles devraient l'être si toute l'eau était à la même température. Pour chacune de ces verticales, une courbe de tendance polynomiale de degré 2 est estimée à partir de tous les pixels sur la verticale. Les cinq polynômes sont ensuite utilisés pour interpoler une matrice de correction sur l'ensemble de l'image. La matrice résultante est soustraite de la matrice originale, ce qui diminue la tendance générale de l'image à avoir des températures plus froides à une extrémité.

La seconde opération consiste à ajuster les températures afin que l'eau soit à 0°C. L'utilisateur doit donc sélectionner des points sur chacune des verticales, le plus uniformément possible (figure 6b). Les cinq graphiques à la droite permettent de s'assurer que les points sélectionnés sont bien des points d'eau par leur position sur la courbe. Une matrice est ensuite interpolée sur l'ensemble de l'image, à partir de la valeur des pixels de ces points. Cette matrice est soustraite de l'image corrigée à la première étape, afin que les pixels perçus comme de l'eau soient à 0°C. Les deux étapes de correction sont effectuées après la sélection des points d'eau par l'utilisateur, sans montrer les résultats intermédiaires. La réussite de ces deux opérations est montrée par les profils verticaux des cinq verticales et des points d'eau à la température de 0°C (figure 6c). L'image finale en couleur, pour bien discerner les températures, est montrée à la figure 6d.

La segmentation eau/glace des images est ensuite effectuée. Une température par défaut de -0,5°C est d'abord utilisée pour faire la segmentation. L'utilisateur peut ensuite basculer de mode d'affichage pour vérifier la justesse de la segmentation et modifier la température seuil au besoin, à tout moment. L'image segmentée en noir et blanc est surimposée sur l'image finale en couleur. En modifiant le niveau de transparence de la segmentation, l'utilisateur peut juger efficacement de la qualité de la segmentation (figure 6e). Ce niveau peut être modifié dynamiquement et graduellement, au besoin. La segmentation peut aussi être imposée sur l'image originale, sur l'image originale avec une échelle de couleur améliorée ou sur l'image corrigée, afin de fournir les outils nécessaires à l'utilisateur pour bien évaluer la segmentation. Un autre mode d'affichage en trois dimensions, soit en mettant en évidence les glaces en leur attribuant une épaisseur, est également disponible, tel que montré à la figure 6f.

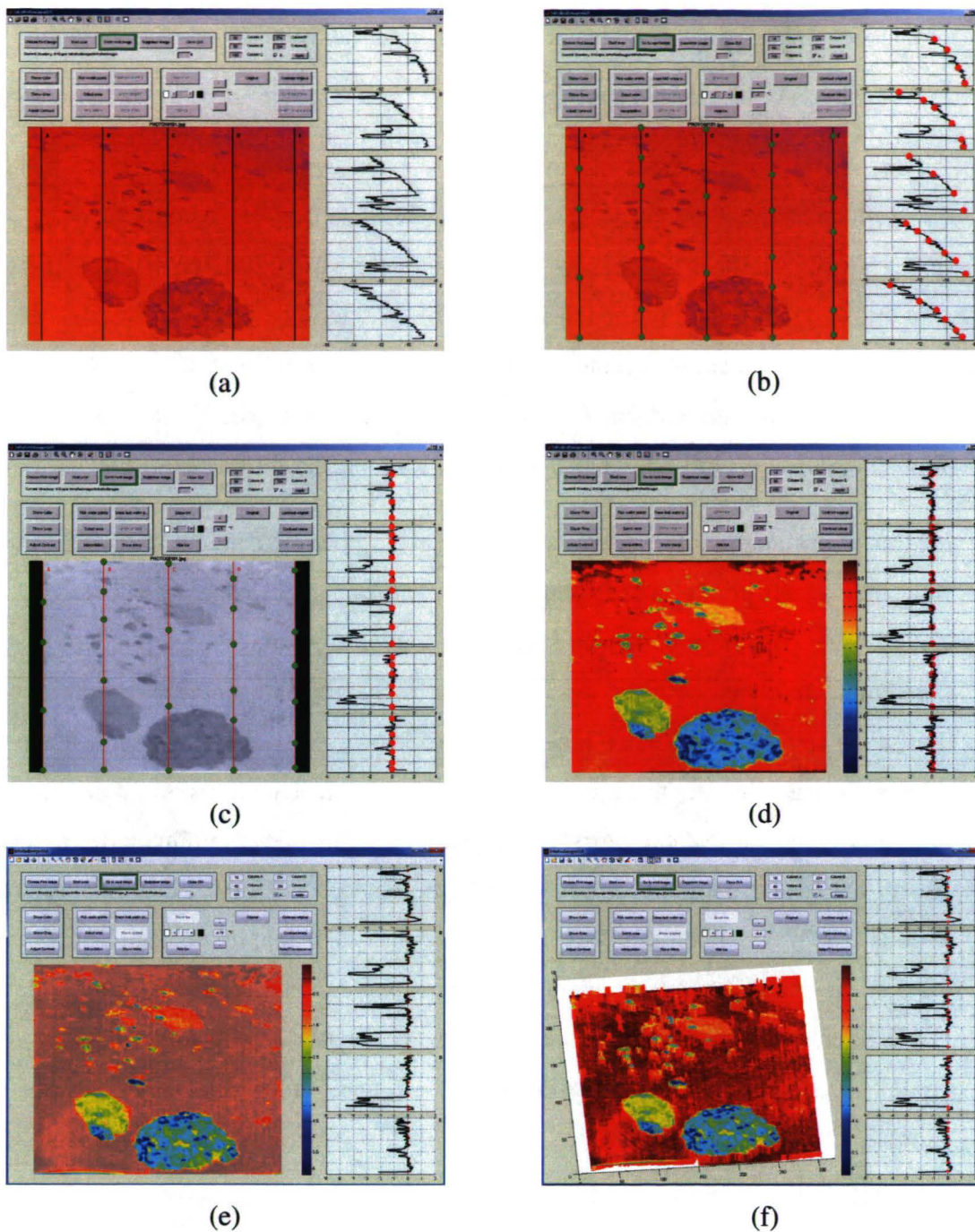


Figure 6 – Interface graphique développée pour les images de l'année 2008

Parallèlement à ces corrections de température, l'utilisateur peut éliminer des portions de l'image qu'il ne souhaite pas traiter. Par exemple, si de la glace de rive ou un navire est présent dans l'image, il est possible de les éliminer. La suite des traitements et calculs sera fait sur la partie effective des images. Lorsque la correction des températures et la sélection de la partie effective de l'image, le cas échéant, sont faites, le résultat est sauvegardé et la

prochaine image est affichée. Si, malgré tous les traitements, le résultat n'est pas convenable, l'utilisateur peut choisir d'éliminer cette image du jeu de données. Chacune des 1614 images ont été traitées ainsi et il en est demeuré 1102 après analyse.

Un traitement automatique des 1102 images segmentées a ensuite été effectué afin de mieux séparer les floes proches les uns des autres et vus comme un seul floe. Le terme floe sera utilisé dans ce mémoire pour désigner toute assiette de glace. L'annexe 1 présente une nomenclature plus détaillée, dans laquelle le terme floe est associé à des assiettes de glace de 20 m et plus d'extension. Puisque la taille de chacun des floes n'est en général pas connue et qu'elle peut varier dans l'image, le terme général floe est utilisé.

Le traitement automatique a été appliqué afin de pouvoir calculer des statistiques sur les floes individuels plutôt que sur l'ensemble des floes dans l'image, tel que décrit à la section 4.1.1.2. Des opérations morphologiques d'ouvertures ont été appliquées, puisqu'elles permettent d'adoucir les contours, de briser les « langues de glace » reliant deux floes et d'éliminer les petites saillies (Gonzalez et Woods, 2008). Une ouverture d'image consiste à dilater l'image érodée avec un élément structurant. Une érosion, pour une opération morphologique en niveau de gris, consiste à prendre la valeur minimale des pixels couverts par un élément structurant, qui est superposé à chacun des pixels de l'image (Gonzalez et Woods, 2008). La dilatation consiste à utiliser la valeur maximale. La figure 7 montre une érosion sur une image en niveau de gris, avec un élément structurant carré de 3 x 3 pixels. Les éléments qui ont une intensité plus élevée, dans le cas présent les glaces, sont donc érodés. L'érosion diminue la taille de glaces, mais enlève aussi les protrusions et les isthmes. En dilatant le résultat de l'érosion, les glaces retrouvent leur taille initiale, mais le contour est plus lisse.

190	180	170	120	100	→	160	150	110	90	90
180	160	150	110	90		50	50	50	60	80
100	50	60	90	80		20	20	20	30	60
20	20	30	60	70		20	20	20	30	60

Figure 7 – Exemple d'une érosion (opération morphologique) sur une image en niveau de gris

Différentes tailles d'éléments structurants ont été utilisées, car chaque élément a un impact important sur les objets de taille similaire, et les floes varient considérablement en superficie sur une même image. La segmentation finale utilisée est une combinaison des ouvertures et de la segmentation originale par température, ce qui permet à la fois d'avoir des floes davantage distincts tout en conservant les petits morceaux isolés de glace dans les résultats.

Les images ont ensuite été géoréférencées. À chaque image correspond une position acquise par le GPS lors du survol de l'avion. Toutefois, les images prises à l'oblique doivent être redressées (voir les figures 29 à 33 à la section 4.1.1.1). Pour ce faire, une transformation projective a été utilisée dans MATLAB™. Une image thermique de référence a été choisie selon divers critères afin de déterminer cette transformation projective :

- 1- L'image devait présenter des repères géographiques sur l'ensemble de son image afin de permettre la sélection de points de repère sur une plus grande surface possible et surtout dans les extrémités.
- 2- Les repères géographiques se devaient d'être à une élévation la plus près possible de celle de l'eau et des glaces, afin de générer une projection applicable pour les images du fleuve.
- 3- L'image sur laquelle étaient sélectionnés les points de repère devait avoir été acquise alors que l'avion était à l'horizontale : l'avion ne devait pas être dans un virage.

Sur la base de ces trois critères, une image a été sélectionnée et l'image correspondante sur Google Earth a été utilisée pour déterminer la transformation projective à partir des points de repère sur chacune des images. Peu d'images répondaient à ces critères puisqu'elles avaient généralement que de l'eau ou de la glace de rive comme objets. Les autres images présentant des repères géographiques ont été redressées selon la transformation pour s'assurer de sa justesse. Chaque image entière redressée couvre une surface d'environ 6,1 ha. Des exemples d'images originales et redressées sont montrés à la section 4.1.1.1. Une série de calculs a ensuite été effectuée sur les images corrigées et redressées, dont les détails et les résultats sont montrés à la section 4.1.1.

En principe, la correction géométrique devrait aussi tenir compte des effets de lacet, roulis et tangage de l'avion lors de la prise des images. Toutefois, l'avion n'était pas équipé de l'instrumentation nécessaire. Lors des virages ou même en ligne droite, si l'avion n'est pas parfaitement à l'horizontale, le roulis de l'avion fait en sorte que la couverture de l'image est différente de celle obtenue lors du redressement des images. En ligne droite, il est estimé que le roulis peut atteindre 3° alors qu'il peut s'élever à $30-40^\circ$ dans les virages. Pour tenir compte de cet effet, les images acquises alors que l'avion effectuait un virage dont l'angle de roulis associé a été estimé à 3° et plus sont identifiées différemment dans les graphiques des résultats impliquant une mesure surfacique. L'angle de tangage de l'avion est généralement petit ($<1^\circ$) et l'effet est donc peu important. Le lacet n'influe pas sur la couverture de l'image mais sur sa position. La position utilisée pour situer les images thermiques est la position de l'avion. En réalité, la position centrale de l'image en est distante d'une valeur équivalente à l'altitude de vol peu importe le lacet, soit 244 m, puisque la caméra est installée à un angle de 45° par rapport à la verticale. Si un lacet de par exemple 5° était observé, la position du centre de l'image serait déplacée de 20 m, mais serait toujours distante de 244 m de la position de l'avion. Puisque la position de l'avion est utilisée pour situer les images, l'erreur du lacet est négligeable.

2.1.4.2 Hiver 2009

Comme pour les données de l'hiver 2008, les images thermiques acquises ont été générées afin qu'elles aient 256 niveaux de gris, le niveau 0 correspond à une température de -25°C et un niveau de 255 à 5°C .

Le traitement des images en 2009 a subi davantage d'étapes. La première étape consistait à utiliser la calibration de la caméra thermique sur les températures de surface apparentes mesurées. Ensuite, un programme de segmentation automatique des glaces a été utilisé pour faire la différenciation eau/glaces.

Le programme de segmentation automatique a été développé en C++, à l'aide de la librairie Open Computer Vision, sous Visual Studio (Open CV, 2010). Dans ce programme, un lissage par filtre médian de 3×3 pixels a d'abord été appliqué afin d'éliminer le bruit dans les images en niveau de gris. Il a permis d'obtenir un lissage robuste mais qui préserve les

contours. Une transformation morphologique de « Black hat », itérée à 50 reprises, a été utilisée. Un « Black hat » est la soustraction de l'image originale de la fermeture de l'image effectuée par l'application d'un élément structurant. L'élément utilisé avait la forme d'un carré de 3 x 3 pixels et était appliqué à chacun des pixels. Une fermeture d'image par opération morphologique consiste à éroder l'image dilatée avec un élément structurant. La fermeture, en dilatant d'abord une image, augmente un peu la taille des glaces tout en lissant les bordures, puis diminue ensuite la taille des floes par l'érosion. Il en résulte un lissage des bordures, la fermeture de trous et le remplissage des creux en périphérie. En somme, les floes sont mieux séparés et moins inégaux.

Un seuil a ensuite été appliqué sur les résultats des opérations « Black hat ». Ces opérations, avec le seuil utilisé, a toutefois éliminé les grandes zones de glaces froides, comme les grands floes ou la glace de rive. Un seuillage sur l'image originale, en utilisant une faible température, a été combiné au résultat des « Black hat » pour obtenir une image globale correcte. La figure 8 montre des résultats de segmentation automatique. La qualité du traitement est en général bonne. Par contre, comme pour la figure 8 (g), de l'eau est détectée là où de la glace compose le gros floe. On remarque aussi que pour les petits floes situés près les uns des autres, la différenciation des floes n'est pas optimale.

La suite du traitement a été faite d'une façon similaire à celle des images de l'année 2008. Une interface graphique a été développée dans MATLAB™. L'utilisateur visualisait chaque image de températures de surface, une à une, en même temps que le résultat de la segmentation automatique. Des opérations d'ouverture (opérations morphologiques) étaient préalablement appliquées au résultat de la segmentation automatique et combinées au résultat brut pour améliorer la différenciation des floes tout en conservant les petits floes. Une couleur aléatoire a été attribuée à chacun des floes pour bien les différencier. La figure 9 montre un exemple de segmentation automatique non réussi. En (a), on observe que le grand floe dans la partie inférieure de l'image est mal segmenté. Des points d'eau (points rouges en b) sont ensuite sélectionnés par l'utilisateur. Le programme utilise ces points d'eau pour interpoler une matrice sur l'ensemble de l'image, pour corriger les températures d'eau et les ramener à 0°C. Une segmentation est alors appliquée avec un seuil de

température près de 0°C. Une série d'ouvertures est ensuite appliquée pour lisser les floes obtenus. Le résultat montré en (c) est ainsi obtenu.

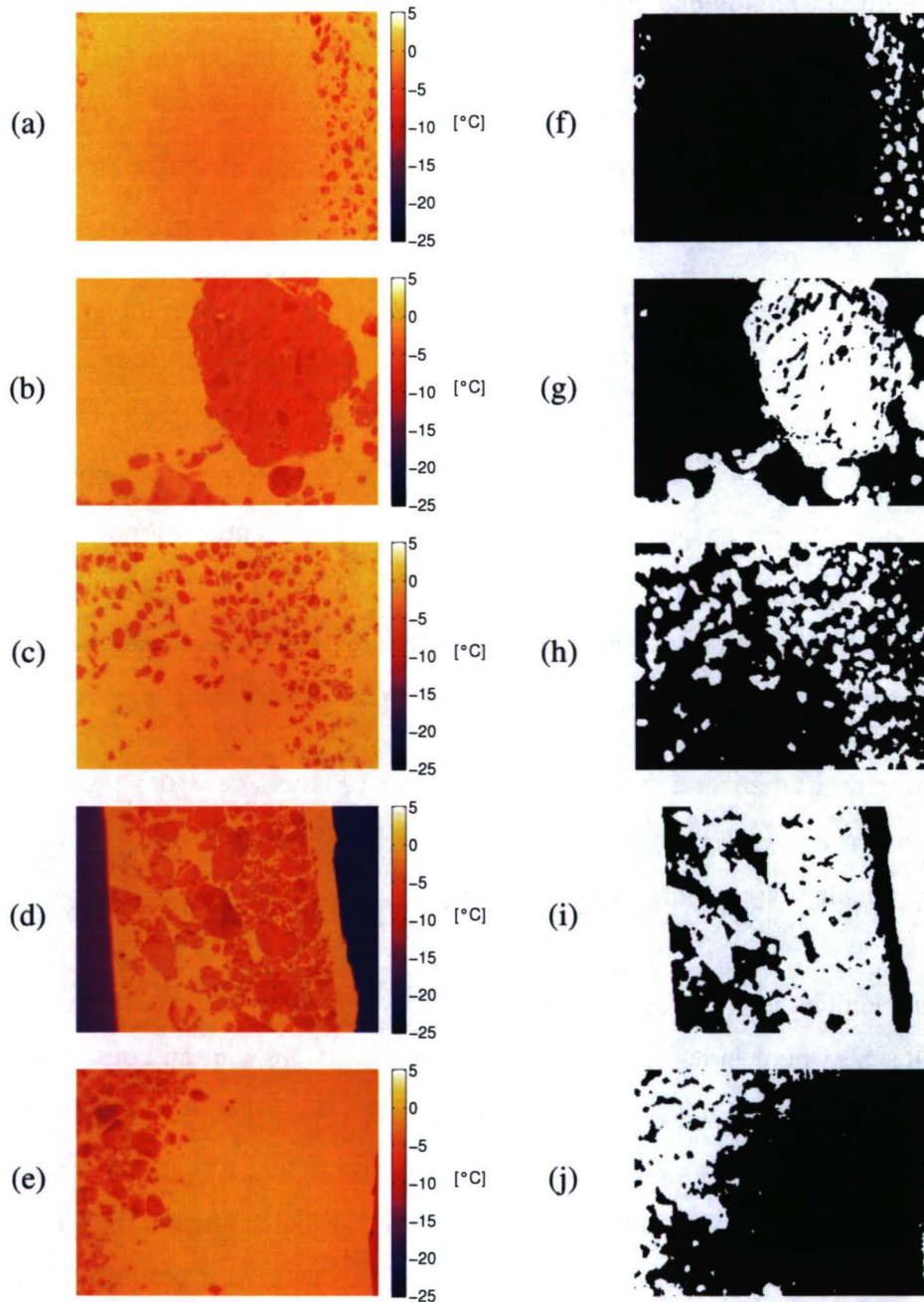


Figure 8 – Exemples de résultats du programme de segmentation automatique : à gauche, les images originales (a à e); à droite, les images segmentées (f à j)

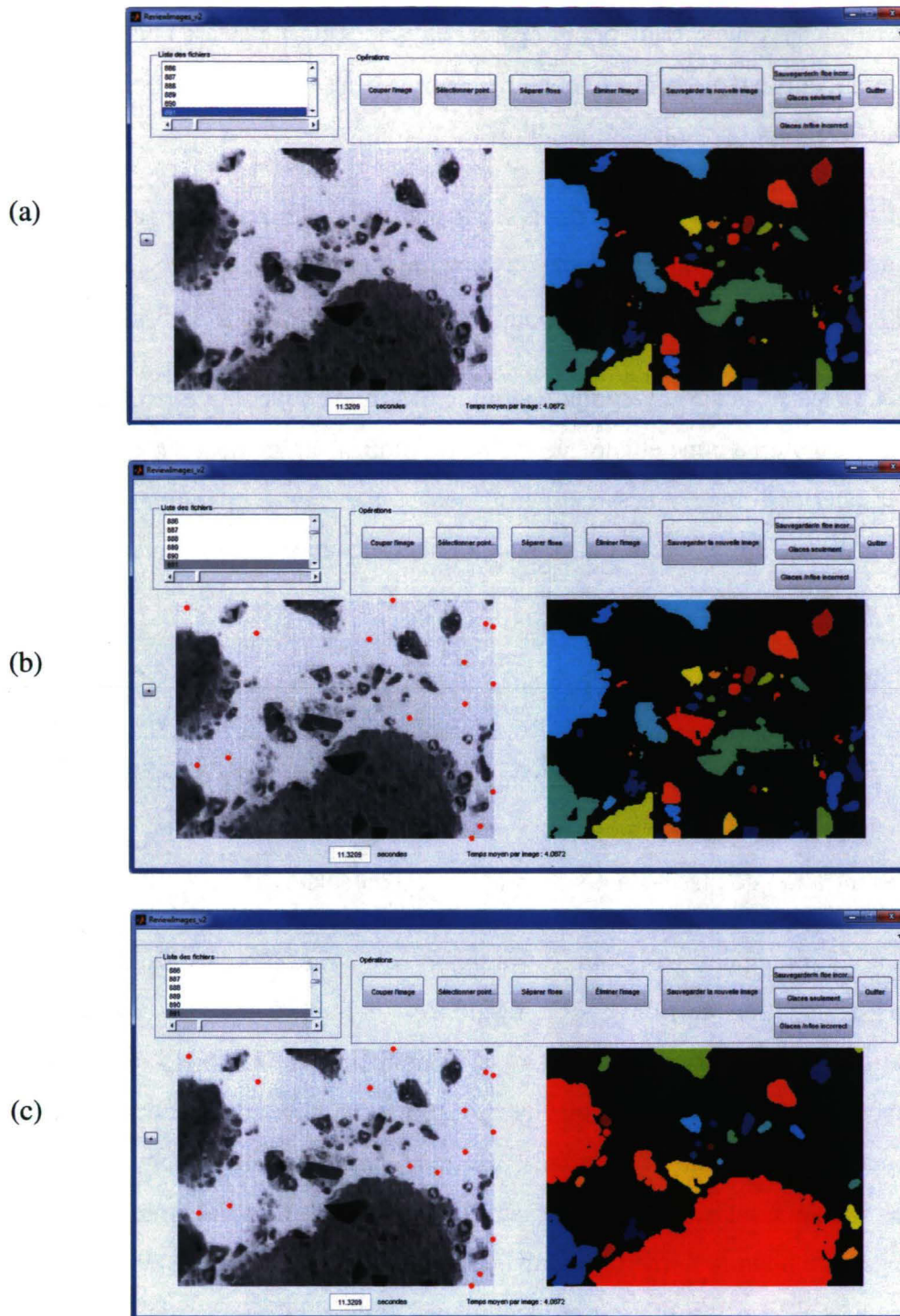


Figure 9 – Interface graphique : exemple de segmentation originale incorrecte (a), de la correction appliquée (b) et du résultat obtenu (c)

L'utilisation d'un pourcentage d'eau a aussi été faite dans certains cas pour améliorer la segmentation initiale. L'ensemble des valeurs des pixels sur l'image sont classées en ordre

croissant et la valeur seuil pour séparer les glaces de l'eau est choisie en fonction d'un percentile qui est modifié au goût de l'utilisateur. La segmentation est automatique et permet de voir si le résultat est amélioré ou non.

Il arrivait aussi que le résultat de la segmentation en termes eau/glace était suffisant, mais que des floes collés étaient détectés comme un seul floe. Un outil permettant de tracer une ligne les séparant a été développé pour améliorer la différenciation des floes.

Dans les images acquises à grande altitude, il arrive souvent que la glace de rive soit dans l'image. Un outil a donc été développé pour éliminer rapidement les zones de glaces froides en périphérie d'image, aussi à partir de seuillage et d'opérations morphologiques de fermeture et de dilatation. L'image peut aussi être coupée manuellement si le résultat n'était pas approprié.

La figure 10 montre que la segmentation est efficace même si des floes de taille diverses sont présents sur l'image. La figure 11 montre une image dans laquelle les floes collés n'ont pu être différenciés correctement, et il serait même difficile de le faire à l'œil nu. Les résultats pour ce type d'image sont conservés, mais aucune statistique surfacique, excepté la concentration de glaces en pourcentage, n'est calculée.

Lorsque le traitement nécessaire est terminé (sélection de points d'eau, pourcentage d'eau et bris de jonction de floes), si le résultat est correct, l'image est sauvegardée. Si cette opération n'a pas déjà été faite dans les traitements préliminaires, tous les pixels perçus comme de l'eau sont utilisés pour interpoler une matrice de correction des températures et ramener tous les points d'eau à 0°C, ce qui corrige simultanément les températures des glaces. Si le nombre et la taille des floes estimés sont incorrects, les résultats sont sauvegardés, mais le numéro des images est conservé afin de les éliminer des statistiques surfaciques. S'il n'y a que de la glace dans l'image, la matrice de correction de l'image précédente est utilisée pour corriger les températures et le numéro d'image conservé en mémoire. Si le résultat est insuffisant ou que l'image couvre trop les rives, l'image est éliminée. Toutes les images acquises en 2009 ont ainsi été visualisées et traitées une à une, soit 11 367 images, dont 9 022 ont été conservées.

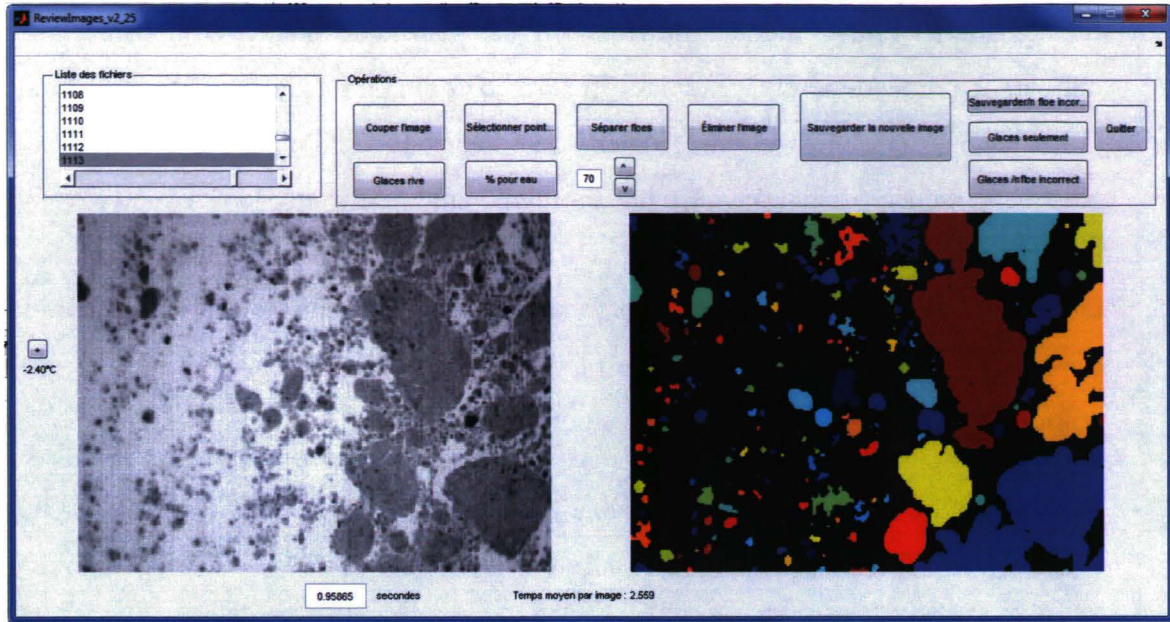


Figure 10 – Image thermique et segmentation correspondante présentant des floes de tailles diverses

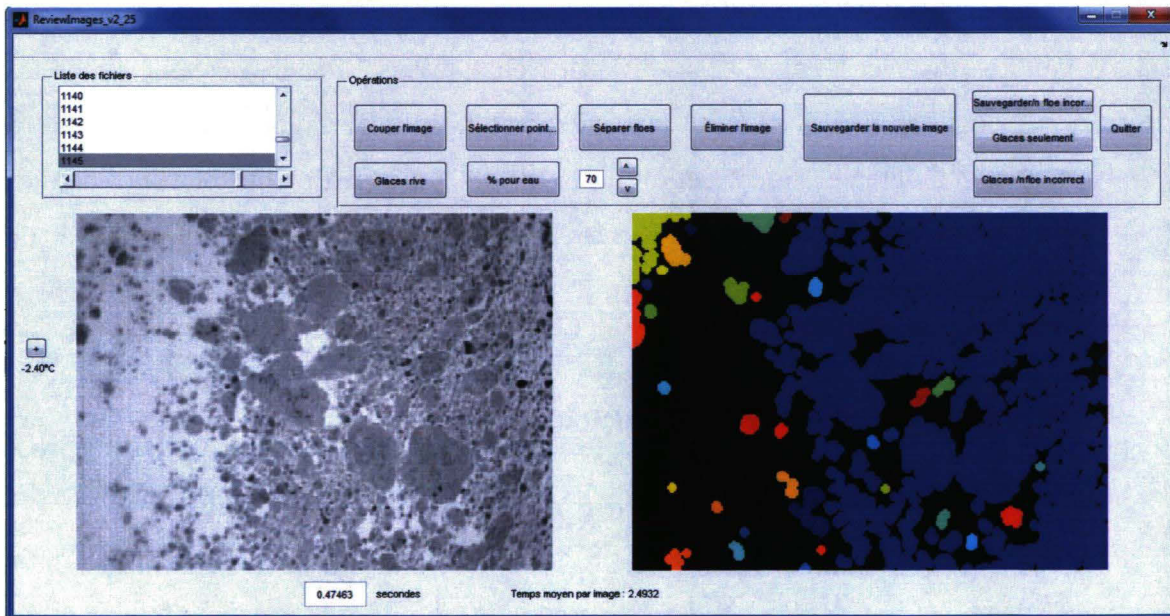


Figure 11 - Image thermique et segmentation correspondante présentant un résultat incorrect en termes de taille des floes

Idéalement, les images auraient dû être corrigées pour la distorsion. Or, les images acquises ont peu de points de références pour effectuer la correction à partir d'orthophotographies et la fonction utilisée pour le redressement des images de 2008 n'est évidemment pas valide, puisque la caméra n'était pas installée au même angle. Souvent, la rive, où se trouvent des éléments facilement reconnaissables et fixes, n'est présente que dans une partie ou une moitié de l'image. Pour corriger la distorsion, il faut des points sur l'ensemble de l'image. Puisque chaque image est prise à partir d'une position différente, on ne peut utiliser les points de deux images acquises ou plus pour générer des points sur l'ensemble de l'image.

Une évaluation de l'erreur géométrique a toutefois été effectuée. Une dizaine d'images ont été analysées. Des points de repère ont été sélectionnés sur ces images, de même que sur des orthophotographies montrant les mêmes objets. La distance entre chacun des points dans l'image thermique a été calculée, et le même calcul a été fait pour les points de l'orthophotographie. Le rapport de la distance sur l'image thermique et de la distance sur l'orthophotographie, pour l'ensemble des paires de points, a été calculé. En moyenne, ce rapport valait 5%. L'écart-type des rapports pour chaque paire de points était d'environ 0,3%. Les distances, selon la position des points dans l'image, peuvent donc être sous-estimées ou surestimées de 6%. Cette erreur est jugée suffisamment basse pour les résultats surfaciques à obtenir. La correction de la distorsion, à partir d'un montage permettant la distinction de points sur un quadrillé dans le domaine thermique et non pas dans le domaine visible, serait à inclure dans de futurs travaux.

2.2 Campagnes d'instrumentation fixe

2.2.1 Objectifs et site d'étude

La campagne d'instrumentation fixe a été déployée afin d'acquérir des images thermiques dans diverses conditions météorologiques et d'ensoleillement afin de juger de leur effet sur la qualité des images acquises et sur l'information qu'on peut en tirer. Le choix du site d'étude s'est fait en fonction de son accessibilité et de la présence de glaces en mouvement. Le port de Québec, par l'absence de glaces de rive, le passage de glaces à proximité des quais, une bonne profondeur d'eau et une bonne accessibilité a été choisi, plus précisément

le quai 22. Le site d'étude était donc sur le fleuve St-Laurent, à côté de l'embouchure de la rivière St-Charles, tel que montré à la figure 12.

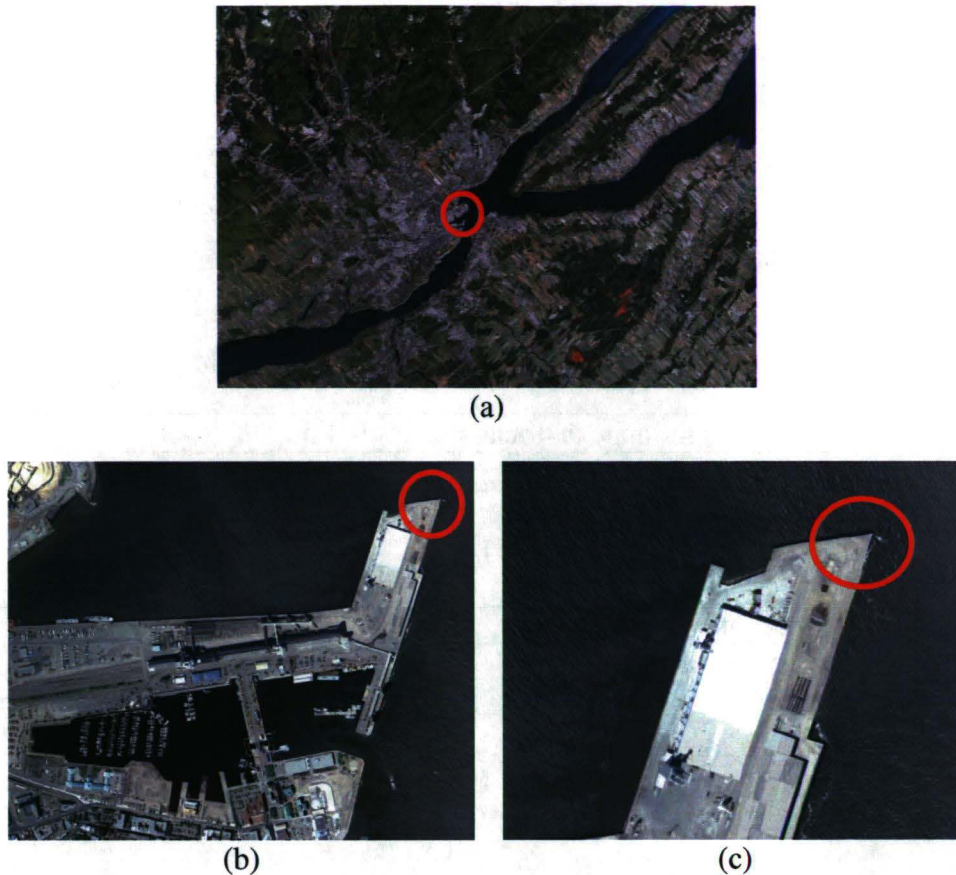


Figure 12 - Plan de la région de Québec (a), du port de Québec (b) et du quai dans le secteur de l'estuaire de la rivière St-Charles (c) utilisé comme du site d'étude

2.2.2 Instrumentation

Une caméra thermique différente de celle employée lors des campagnes aériennes a été utilisée. Il s'agit d'une SC2000 de FLIR, dont les caractéristiques sont montrées au tableau 3. Une caméra Canon EOS 20D a permis d'obtenir des images réelles simultanées, afin de vérifier la présence d'eau ou de glace (et leurs particularités). Un laser Advantage® III de Laser Atlanta a été utilisé afin de connaître la distance entre les caméras et la surface de l'eau/ des glaces. Ces trois instruments ont été installés sur une nacelle qui était positionnée au-dessus de l'eau lors de l'acquisition de données (figure 13 et figure 14). La nacelle

n'était pas laissée en place en permanence, ni le camion sur laquelle elle était montée. D'une fois à l'autre, un positionnement le plus similaire possible était choisi.

Dans le champ de vision de la caméra thermique a été positionnée une plaque d'aluminium peinte en noir (afin que son émissivité soit près de 1) sur laquelle était posé un senseur de température de surface (RTD-830 d'Oméga). La prise de photos, de mesures de distances du laser et de température de surface de la plaque était contrôlée par un CR10X, aux 2 secondes. La caméra thermique prenait aussi des images aux 2 secondes.

Tableau 3 – Spécifications de la caméra thermique FLIR SC2000

Distance minimale de focalisation	0.3 m
Champ visuel	24° x 29°
Résolution thermique	0.1°C à 30°C
Résolution spatiale (IFOV)	1.3 mrad
Bande spectrale	7.5 à 13µm
Précision	+/- 2°C ou 2%
Type de détecteur	Matrice à plan focal Micro-bolomètre non refroidi 320 x 240 pixels



Figure 13 - Instrumentation au port de Québec

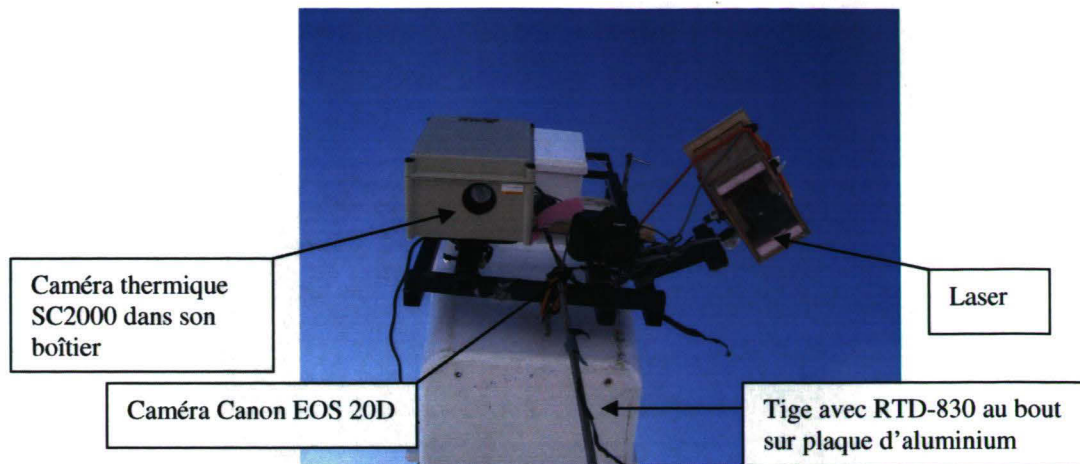


Figure 14 – Instruments installés sur la nacelle au port de Québec

Considérant qu'un des objectifs principaux de l'utilisation de l'imagerie thermique est de déterminer l'épaisseur des glaces selon la température de surface, un IPS4 (Ice Profiling Sonar) a été installé au fond du fleuve afin de vérifier l'épaisseur des glaces (Emond et coll., 2010; Richard et coll., 2010). Il a été posé sur une pyramide d'instrumentation (figure 15), munie d'autres instruments (capteurs de température, de salinité, courantomètre, davantage destinés à un autre projet mené simultanément; Richard et coll., 2010). La pyramide d'instrumentation a été déposée par une grue à environ 15 m du quai, au fond de l'eau. Selon la bathymétrie à cet endroit, la pente du fond était relativement faible et la profondeur près de 10,7 m à marée basse, le marnage étant d'environ 5 m. Le IPS n'acquiert toutefois que la quille de la glace (ne mesure pas le voile), ce qui correspond à environ 90% de la hauteur totale du floe. Par ailleurs, il ne tient pas uniquement compte de la hauteur de la croûte solide de glace, mais aussi de la portion de « slush » présente sous les floes. Le IPS, qui a un rayon d'étude de $1,8^\circ$, couvre donc une surface de 0,4 à 0,8 m² pour des profondeurs de 11 à 16 m. De plus, il faut noter que le IPS utilise les retours acoustiques les plus forts. Ainsi, l'épaisseur mesurée est celle qui est prédominante sur la surface couverte, et non pas une moyenne. Sa précision pour la mesure d'épaisseur est de 0,05 m. Il émet des ondes sonores à la fréquence 420 kHz qui sont réfléchies à l'interface eau/glace sur sa zone d'étude. Il est aussi muni d'un capteur de pression et d'un indicateur d'inclinaison, qui, avec les propriétés de transmission du signal dans l'eau, permettent d'obtenir la hauteur de la quille de la glace. Ainsi, en positionnant la caméra thermique le

plus près possible du IPS, les épaisseurs calculées avec l'imagerie thermique peuvent être vérifiées avec les données du IPS.



Figure 15 – Pyramide d'instrumentation posée au fond du fleuve près du quai, au port de Québec

Une station météorologique a aussi été installée, afin de connaître localement les conditions lors de l'acquisition des images thermiques. Cette station était dotée d'un hygromètre, d'un pyranomètre, d'un anémomètre et prenait des mesures aux cinq minutes.



Figure 16- Station météorologique installée au port de Québec

2.2.2.1 Calibration de la caméra thermique

La calibration de la caméra SC2000 a été faite selon la même méthodologie expliquée à la section 0, pour la calibration de la caméra A40M. Les températures perçues par la caméra SC2000 (figure 17) semblent moins diverger des températures émises par le corps noir que la A40M. La caméra sous-estime légèrement les températures lorsque celles-ci sont inférieures à -10°C . La calibration est appliquée pour toutes les données acquises avec la caméra SC2000.

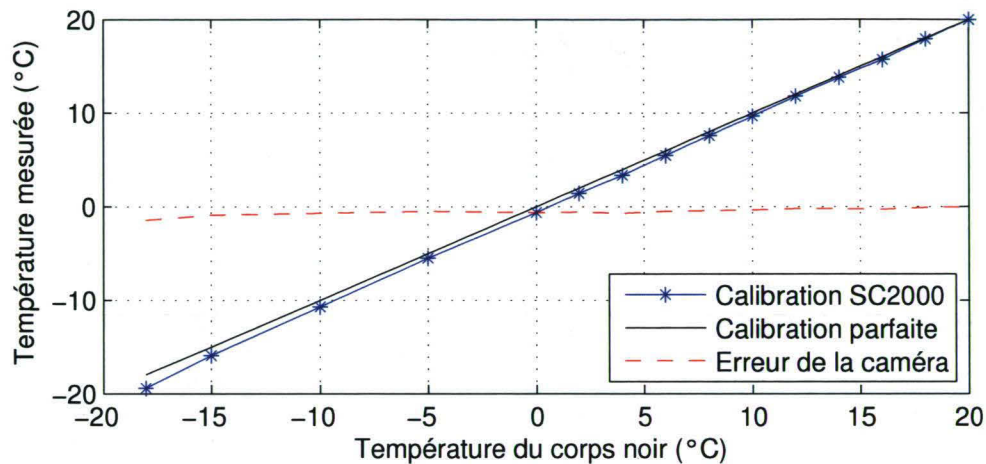


Figure 17 – Calibration de la caméra thermique SC2000 avec le corps noir Mikron 340

2.2.3 Déroulement de la campagne

La campagne d'instrumentation s'est déroulée du 10 février au 8 mars 2009, période au cours de laquelle des données thermiques ont été acquises lors de 17 jours, sur des durées variant entre 20 minutes et 5 heures. La méthode d'acquisition des images thermiques a été améliorée au fil des sorties, permettant éventuellement d'obtenir des images ayant une bonne mise au point. Suite à des difficultés de fonctionnement, les données acquises par le laser ne couvrent pas entièrement les intervalles d'acquisitions d'images thermiques. Les données du capteur de température sur la plaque positionnée dans le champ de vision des caméras n'ont pu être récupérées, mais il est supposé qu'elle doit correspondre à la température de l'air lorsque l'ensoleillement est faible ou nul.

Il convient de souligner que le choix du site, bien que convenable mais non idéal au premier abord, a permis d'atteindre les objectifs. En effet, des conditions hydrauliques particulières étaient présentes au site d'étude. Du fait qu'il se situait au confluent de la rivière St-Charles et du fleuve St-Laurent, à la marée montante, les glaces montaient dans la rivière St-Charles jusqu'à ce qu'elles butent contre le couvert solide de la rivière. Lorsque la marée descendait, les glaces descendaient le fleuve, mais la présence du couvert stable au nord de l'île d'Orléans causait encore un arrêt temporaire du flux de glaces. Selon les conditions de vent et les conditions hydrauliques, les glaces étaient parfois poussées loin du site d'étude et il en résultait que les images thermiques acquises ne montraient que de l'eau. Ainsi, des images thermiques ont pu être acquises non seulement dans diverses conditions météorologiques, mais parfois, des séries d'images ne représentant que de l'eau ou d'autres montrant des glaces immobiles ont été acquises. La présence unique d'eau, par la connaissance de sa température qui est de 0°C, permet de vérifier l'exactitude des données acquises. Par la présence de glaces immobiles, on peut vérifier l'effet du soleil (intensité, angle) ou de l'effet d'une faible accumulation de neige. Ces observations et résultats sont détaillés à la section 4.2.

2.2.4 Traitement des données

Afin de visualiser les résultats bruts, dans le but de déterminer et préparer le traitement et l'analyse requise, une interface graphique a été développée dans MATLAB™. Cet outil permet de montrer sur un même graphique la température de l'air telle que mesurée avec la station météorologique toutes les cinq minutes, la moyenne de la température de surface dans l'image (eau et glace confondues) prise environ toutes les deux secondes ainsi que les épaisseurs mesurées par le IPS chaque minute. Si la plaque était présente dans l'image, sa température de surface, obtenue de l'image thermique, était aussi affichée. La synchronisation des appareils a été faite au mieux. Les divers événements ont ensuite été visualisés selon ce modèle et l'analyse subséquente a été faite en commençant par les événements qui semblaient les meilleurs pour la qualité des informations qu'on pourrait en tirer.

Des analyses qualitatives ont été faites pour les données qui ont été acquises en plein jour. En effet, le rayonnement solaire (par son intensité et son angle) peut influencer sur les températures de surface mesurées. Ainsi, de nuit, les températures de surface mesurées sont considérées beaucoup plus près de la température réelle. De plus, les températures d'air parfois élevées de jour causent des incertitudes au niveau de l'analyse, puisque des températures d'air au-dessus de 0°C résultent en des températures de surface des glaces de 0°C. Les données de jour sont donc utilisées afin d'évaluer les effets de divers paramètres météorologiques sur la thermographie des glaces. Une fois les meilleurs événements nocturnes déterminés, ceux-ci ont été traités ainsi.

1. Correction des températures brutes de surface à partir de la courbe de calibration de la caméra thermique.
 - a. La correction est effectuée simplement en utilisant la fonction déterminée pour la calibration à la section 2.2.2.1 pour chacun des pixels de l'image.
2. Correction des températures de surface afin que la température de la plaque corresponde à la température de l'air.
 - a. La détermination de la température de la plaque a nécessité une approche plus complexe. En effet, tel que montré à la figure 18, la plaque, qui mesurait environ 2,5 cm par 2,5 cm, était peinte en noir afin que son émissivité soit à 1. Or, un capteur de température de surface métallique a été posé à la surface, et la température mesurée vis-à-vis ce capteur est grandement sous-évaluée. Une forme correspondant à la plaque a été déterminée manuellement pour chaque image. Puis, les températures à l'intérieur de cette forme ont été classées dans un histogramme à 10 classes. La moyenne de tous les points se trouvant à l'intérieur des 2 classes les plus nombreuses a été utilisée. Il a donc été considéré (tel que généralement observé après la visualisation des images) que les points correspondant à la plaque plutôt qu'aux capteurs étaient plus nombreux (ou plus chauds).

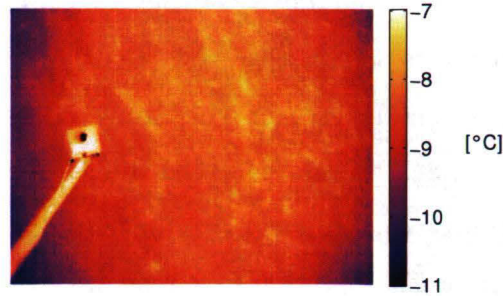


Figure 18 – Exemple d’image thermique avec plaque et senseur de température

3. Correction des températures de surface afin que tous les points qui correspondent à l’eau se retrouvent à 0°C.
 - a. L’algorithme développé en C++, avec les fonctions de la librairie OpenCV et expliqué à la section 2.1.4.2, a été utilisé pour faire une première segmentation eau/glace. La segmentation obtenue par la méthode précédente est ensuite vérifiée par l’utilisateur. Si elle n’est pas satisfaisante, d’autres méthodes de segmentation sont possibles (sélection de points ou de région) permettant de déterminer le niveau (ou la température) auquel faire la segmentation. Tous les points considérés comme de l’eau (ou sélectionnés si la seconde méthode a dû être utilisée) sont ensuite utilisés pour faire l’interpolation sur la matrice entière couvrant l’image. Une matrice ramenant tous les points d’eau à 0°C est ainsi calculée, et les pixels correspondant à de la glace sont corrigés en même temps.

Chapitre 3 - Modélisation

Un des objectifs de ce mémoire étant de déterminer l'épaisseur des glaces à partir de leur température de surface, il est important de détailler l'approche qui a été utilisée pour faire le lien entre ces deux variables. Il convient en premier lieu d'aborder les échanges de chaleur qui se produisent aux interfaces eau/glace et glace/air. Puis, le transfert de chaleur à travers la glace et sa modélisation sont traités. Enfin, le modèle final utilisé ainsi que les simplifications utilisées sont expliqués.

3.1 Échanges de chaleur aux interfaces

3.1.1 À l'intervalle glace/air

L'équation 1 (Beltaos, 2008) présente les différentes composantes thermiques qui agissent sur un couvert de glace (couvert ou non de neige) et la figure 19 schématise leur action:

$$E_n = E_{si} + E_{li} + E_{ei} + E_{hi} + E_{pi} + E_w \quad [1]$$

où E_{si} est la radiation solaire nette absorbée par la glace (toujours positif)

E_{li} est l'échange de chaleur net en radiation d'ondes longues entre la glace (ou neige) et l'air (positif ou négatif)

E_{ei} est le gain ou la perte de chaleur dû à la condensation ou à l'évaporation sur la surface de la glace (ou neige) (positif pour de la condensation, négatif pour de l'évaporation)

E_{hi} est le flux de chaleur sensible entre la surface de la glace (ou neige) et l'atmosphère, par convection (positif ou négatif)

E_{pi} est la chaleur transmise par advection de la pluie ou neige à la glace (ou neige) (positif pour de la pluie, généralement négatif pour de la neige)

E_w est la chaleur transmise par convection de l'eau à la glace, sous la glace (positive ou nulle)

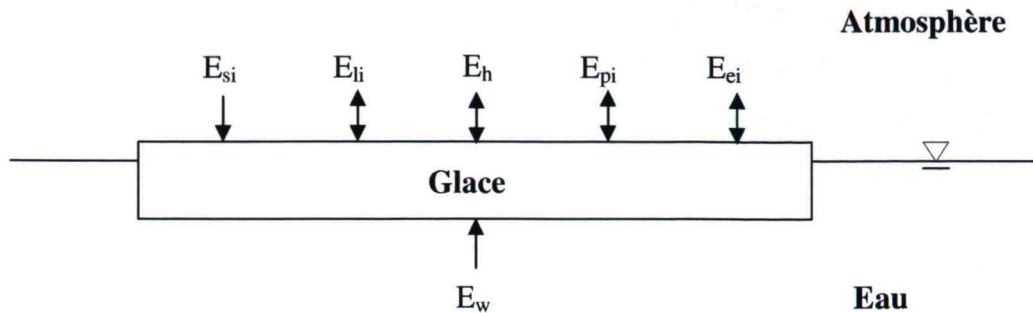


Figure 19 – Schéma des composantes thermiques agissant sur un couvert de glace (Adapté de Beltaos, 2008)

Ainsi, la température de surface du couvert de glace dépend de nombreux facteurs. Toutefois, plutôt que de déterminer la valeur de l'ensemble de ces facteurs, la modélisation du transfert de chaleur à l'intérieur de la glace, par l'utilisation de simplifications et d'hypothèses, est privilégiée et expliquée aux sections 3.1.2 et 3.1.3.

3.1.2 Transfert de chaleur dans la glace

Afin de modéliser le transfert de chaleur dans la glace, une simple équation de diffusion (équation 2) a été utilisée, soit :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [2]$$

où T est la température de la glace ($^{\circ}\text{C}$)

ρ est la masse volumique de la glace à une température près de 0°C ($\sim 917 \text{ kg/m}^3$)

C est la chaleur spécifique de la glace ($\sim 2,06 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)

k est la conductivité thermique de la glace ($\sim 2,21 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$)

t est le temps (s)

x est l'axe défini dans la direction de l'épaisseur de la glace, de l'interface eau/glace à l'interface glace/air (positif vers le haut) (m)

$$q = k \frac{dT}{dx} = H_{ia} (T_s - T_a)$$

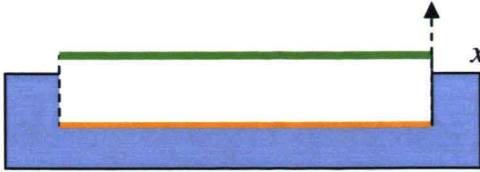
$$T(x=0) = 0$$


Figure 20 – Schéma des conditions limites pour l'équation de diffusion de chaleur dans la glace

Une première condition limite de Dirichlet, spécifiant que la température du floe à son interface avec l'eau doit être de 0°C (équation 3, figure 20), a été posée pour résoudre le système. En effet, la surface inférieure de la glace est formée de glace sous forme de « slush », dont la température est à 0°C .

$$T(x=0) = 0^{\circ}\text{C} \quad [3]$$

La seconde condition limite, de Neumann, impose un flux de chaleur à la surface supérieure de la glace. Ce flux, q (W/m^2), est estimé de manière empirique et est proportionnel au gradient de température sur l'épaisseur de la glace. Cette condition est exprimée à l'équation 4 et montrée à la figure 20:

$$q = k \frac{dT}{dx} = H_{ia} (T_s - T_a) \quad [4]$$

où H_{ia} est un coefficient de transfert de chaleur empirique ($\text{W}/\text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$) qui dépend des conditions météorologiques locales

T_a est la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

T_s est la température de surface de la glace ($^{\circ}\text{C}$)

Il faut souligner que si la température à la surface de la glace et celle de l'air était identique, il n'y aurait pas d'échange de chaleur entre eux. Si l'échange de chaleur était nul, le gradient de température dans la glace serait aussi nul, ce qui est impossible puisque que l'eau

et l'air sont à des différentes températures. La température de la glace se situe donc entre ces deux valeurs.

En considérant un système permanent, la relation entre l'épaisseur de la glace et sa température de surface obtenue est montrée à l'équation 5.

$$h = \frac{k}{H_{ia}(T_a/T_s - 1)} \quad [5]$$

3.1.3 Modèle utilisé et simplifications

La première simplification du modèle utilisé est le fait qu'il n'y a pas de neige sur la glace. En effet, cette hypothèse est posée, car les conditions d'enneigement varient d'un floe à l'autre, d'un endroit à l'autre. Les précipitations nivales mesurées à des stations météorologiques le long du fleuve pourraient être utilisées, mais tous les floes n'ont pas été générés au même moment et leur âge est inconnu. Ainsi, on ne pourrait évaluer à partir de quel moment l'accumulation de neige doit être calculée. De plus, les vents étant importants sur le fleuve, la neige qui peut se retrouver sur les floes s'en retrouve balayée. Bref, cette simplification doit être posée pour rendre les calculs possibles. Il est aussi considéré qu'il n'y a pas d'eau à la surface des glaces.

Une seconde simplification posée est la formulation des transferts thermiques entre la glace et l'air qui ne tient pas compte de tous les termes présentés à la section 3.1.1. En effet, il est admis que le coefficient de transfert de chaleur entre la glace et l'air (H_{ia}) peut être posé comme étant dépendant de la vitesse du vent (Ashton, 1986), tel que montré ci-dessous :

$$H_{ia} = 10 + 3.75V_a \quad [6]$$

où V_a est la vitesse du vent en m/s.

Il est présumé que ce coefficient inclut toutes les composantes thermiques présentées à la section 3.1.1. Il a été vérifié que les valeurs obtenues pour ce coefficient étaient plausibles (Emond et coll., 2010).

L'absence de fonte ou de génération de glace lors de la simulation, malgré la présence de conditions météorologiques permettant ces phénomènes, est supposée. Le but de la modélisation n'étant pas de déterminer l'épaisseur de la glace suite à certaines conditions météorologiques, mais bien de déterminer la relation entre l'épaisseur de la glace et sa température de surface, cette hypothèse a été posée afin de simplifier le modèle ainsi que de réduire le temps de calcul. Lors des simulations, il a été constaté que le profil de température sur l'épaisseur de la glace changeait assez rapidement. Pour une glace de 5 cm d'épaisseur, un pas de temps d'une heure dans les simulations était suffisant pour obtenir un profil de température linéaire dans la glace. Pour une glace de 1,6 m d'épaisseur, ce pas de temps d'une heure était insuffisant pour stabiliser le profil de température sur l'épaisseur entière de la glace. Toutefois, les changements de température à la surface étaient très rapides. Ainsi, surtout pour des glaces minces, les conditions météorologiques des derniers pas de temps de la simulation seront celles qui auront le plus d'influence sur la température de surface calculée. De plus, la variation d'épaisseur se fait plutôt lentement. Par exemple, en utilisant l'équation 7 présentée par Ashton (1986), on obtient une variation de 0,3 mm/h avec les valeurs spécifiées dans l'exemple.

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{H_{ia}}{\rho\lambda} (T_s - T_a) \quad [7]$$

où λ est l'enthalpie de fusion de la glace (334 kJ/kg)

H_{ia} , tel que défini par l'équation 6, est posé à 25 W/m²°C

$(T_s - T_a)$ est posé égal à 1°C.

Considérer l'épaisseur constante est l'équivalent d'utiliser l'épaisseur qui serait obtenue vers les derniers pas de temps d'une simulation permettant les modifications d'épaisseurs. Au cours de ces derniers pas de temps, l'épaississement se ferait lentement et serait alors peu important. Quant à la température de surface, elle se stabiliserait rapidement pendant ces mêmes pas de temps. Une simulation sur plusieurs jours est tout de même utilisée pour recréer au mieux le profil de la température sur l'épaisseur selon l'inertie thermique de la glace. Le fait de conserver l'épaisseur constante pendant la simulation thermique des

épaisseurs vs les températures de surface introduit nécessairement une erreur, mais elle est ainsi considérée négligeable. Par ailleurs, puisque chaque floe est unique en termes d'historique, puisqu'ils n'ont pas tous été générés au même moment et qu'ils ont subi des conditions différentes, la fonte et l'épaississement sont propres à chacun des floes. La généralisation du modèle par l'élimination de ces deux paramètres est donc effectuée.

Dans le but de faire le lien entre la température de surface et l'épaisseur de la glace, l'équation 2, avec les conditions et simplifications montrées aux équations 3, 4 et 6, a été modélisée à l'aide d'éléments finis dans MATLAB™, à partir de l'application MATMEFL 2.2.01 (Robert, 2006), avec les modifications requises pour créer le modèle voulu. Une modélisation en mode non permanent, plutôt que l'utilisation de l'équation 5, a été faite afin d'obtenir une meilleure précision et d'améliorer la qualité des résultats.

Différentes simulations ont été roulées, en utilisant un bloc rectangulaire d'épaisseur constante, en modifiant l'épaisseur d'une simulation à l'autre. Les épaisseurs ont varié de 0,15 cm jusqu'à 12,8 m. Ce bloc rectangulaire représentait une portion d'un bloc considéré de largeur infinie. Le modèle, bien qu'en deux dimensions, a été appliqué comme s'il n'était qu'en une seule dimension, afin de voir la variation de la température de la glace sur l'épaisseur. Le modèle a été résolu en mode non permanent, par la formulation Euler implicite, en modifiant les conditions limites de flux à chaque itération en fonction des températures de surface obtenues à l'itération précédente et les conditions météorologiques qui variaient. En combinant les résultats des simulations pour des mêmes conditions météorologiques mais des épaisseurs différentes, il résulte une courbe telle que celle montrée à la figure 21, mettant en lien les épaisseurs et les températures de surface des glaces. Un polynôme d'interpolation cubique Hermite par partie (Pchip) a été utilisé pour interpoler une courbe entre les points.

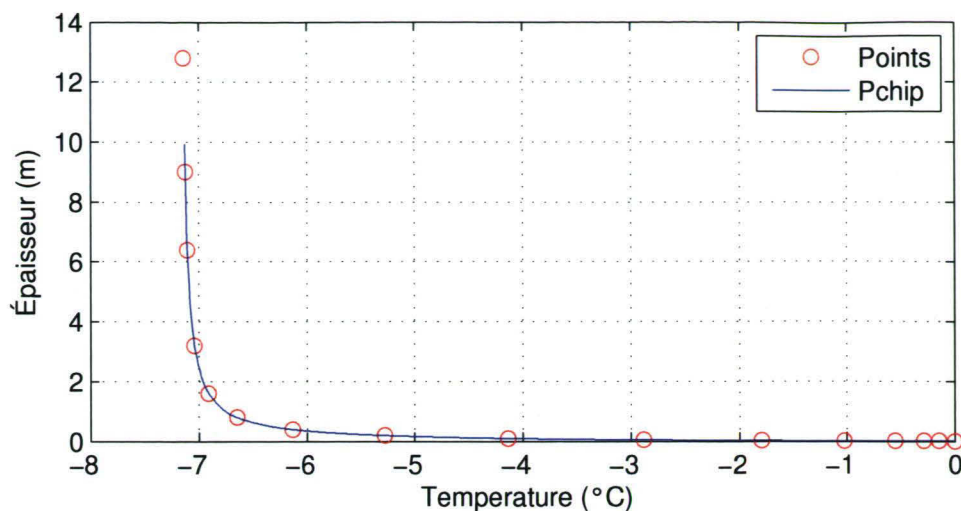


Figure 21 - Courbe typique de la relation entre l'épaisseur et la température de surface des glaces

Pour les données des survols, des courbes telles que celle à la figure 21 ont été générées à différents endroits, à différents pas de temps, afin de bien modéliser les conditions propres à chaque image. Les données horaires de température d'air et de vent de neuf stations météorologiques d'Environnement Canada, réparties le long du fleuve, ont été utilisées. Ces données ont ensuite été interpolées pour six positions le long du trajet de survol, réparties uniformément et selon les particularités du fleuve St-Laurent (ex. Lac St-Pierre, changements relativement brusques de direction). Étant donné le temps de calcul nécessaire au développement de chacune de ces courbes et le fait que les conditions météorologiques étaient interpolées entre les positions, il a été jugé que seulement six courbes réparties sur le fleuve pouvaient être calculées par la modélisation. Pour chacune de ces positions, les données des trois stations météorologiques les plus près ont été interpolées selon la distance les séparant de la position voulue. Pour les cinq jours précédents les vols, un pas de temps d'une heure a été utilisé pour résoudre le système. Pendant la durée d'acquisition d'images thermiques, le pas de temps a été réduit à 5 minutes. Pour chacune des images, la relation température de surface vs épaisseur des glaces a ensuite été interpolée à partir des courbes pour les six positions de référence. Cette interpolation a été faite de façon linéaire, selon la distance séparant la position voulue des positions de référence précédente et suivante sur la trajectoire de vol. Il en résulte une relation température de surface vs épaisseur des glaces unique à chaque image, mais découlant d'interpolation.

Pour les données acquises au site d'instrumentation fixe, des courbes ont été générées pour une seule position évidemment, et à des pas de temps de 1h, entre le 15 février et le 9 mars 2009. Pour chaque image thermique, une courbe a été interpolée en fonction des courbes obtenues pour les pas de temps horaires précédent et suivant.

3.1.4 Vérifications par simulation 2D

Tel que mentionné à la section précédente, le modèle utilisé dans MATLAB™ l'a été selon un espace unidimensionnel. Toutefois, ce même modèle peut être utilisé pour faire une simulation en deux dimensions, en ajustant les conditions limites et en permettant la diffusion de chaleur selon l'axe horizontal. Deux vérifications ont été faites avec un modèle 2D. La première vérification visait à démontrer que le modèle 1D pouvait bel et bien être appliqué. En effet, puisque les floes ont des épaisseurs variables sur leur surface, il en résulte des températures de surface variables sur cette même aire. Ces températures de surface différentes sur un même floe mènent nécessairement à la conclusion que la diffusion de la chaleur ne se fait pas que dans le plan vertical, entre les faces inférieure et supérieure des blocs, mais également à l'horizontale.

Afin de vérifier l'importance de ces flux de chaleur selon une deuxième dimension, des blocs de glace convexes ont été modélisés en deux dimensions, en limitant ou non la diffusion dans l'axe horizontal. Le problème a été résolu en mode non permanent, comme pour la simulation en une dimension, jusqu'à ce que la solution se stabilise. La température de l'air a été posée constante à $-7,3^{\circ}\text{C}$ et la vitesse du vent a été posée à 5 m/s. Le coefficient de transfert de chaleur entre la glace et l'air était donc de $29 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$. Le flux de chaleur entre la glace et l'air, qui est la condition limite appliquée à la surface supérieure du bloc de glace, était modifié à chaque itération, selon la température de surface calculée à chacune. La température des faces inférieures et des côtés était imposée à 0°C .

Des exemples de différence entre la solution permettant les échanges dans l'axe horizontal ($k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$) et celle ne permettant les échanges que dans une seule direction ($k_{xx}=0 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), pour un bloc convexe d'épaisseur maximale variable, sont montrés de la figure 22 à la figure 24. On y voit que pour les cas présentés, les erreurs induites dans les

températures de surface ne dépassent pas $0,06^{\circ}\text{C}$ pour les épaisseurs de 5 et 25 cm, mais qu'elles atteignent près de $0,15^{\circ}\text{C}$ lorsque le bloc a une épaisseur maximale de 1 m.

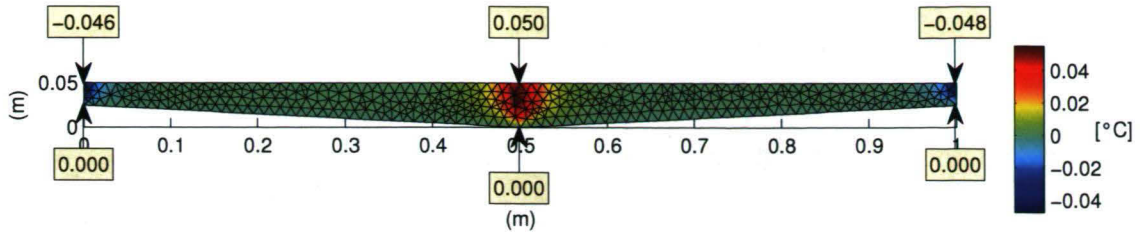


Figure 22 - Différences de température entre une solution avec $k_{xx}=0$ et $k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, pour un bloc convexe de 5 cm d'épaisseur maximale et 1 m de largeur

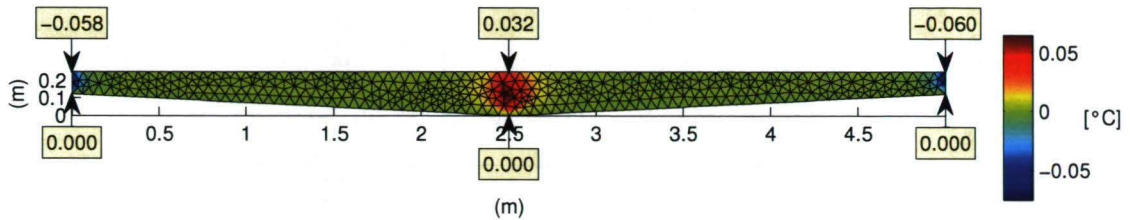


Figure 23 - Différences de température entre une solution avec $k_{xx}=0$ et $k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, pour un bloc convexe de 25 cm d'épaisseur maximale et 5 m de largeur

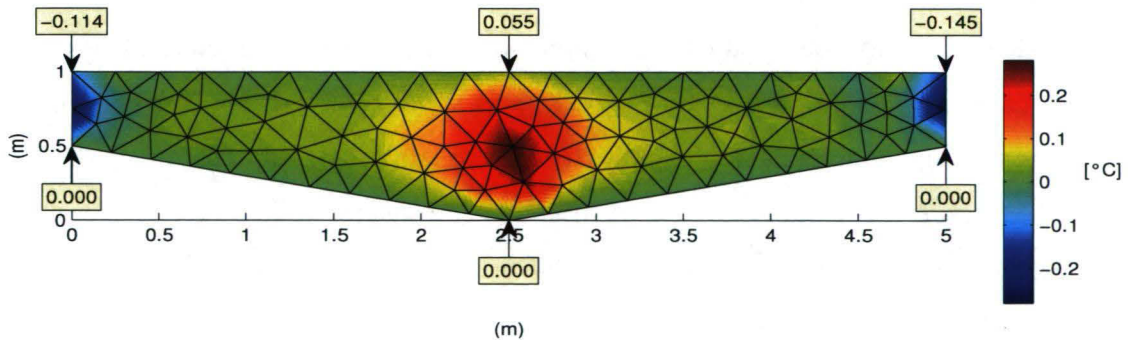


Figure 24 - Différences de température entre une solution avec $k_{xx}=0$ et $k_{xx}=2,21 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, pour un bloc convexe de 1 m d'épaisseur maximale et 5 m de largeur

Il incombe aussi de vérifier l'erreur générée dans les épaisseurs par les imprécisions des températures de surface. Pour convertir les températures de surface en épaisseurs, une courbe des épaisseurs selon la température de surface a été générée en déterminant les températures de surface pour des épaisseurs prédéfinies, de la même façon qu'à la section

3.1.3. Il s'agit donc d'une modélisation équivalente à 1D du même type que celui utilisé pour déterminer les épaisseurs à partir des images thermiques le long du fleuve et au port de Québec. La figure 25 montre les différences induites pour un bloc convexe de 25 cm d'épaisseur maximale. On y constate que l'erreur est locale et de faible importance. Aux extrémités, l'épaisseur est légèrement supérieure lorsque la diffusion est possible dans les deux dimensions, puisque les températures sont un peu plus faibles (figure 23). L'épaisseur au centre est plus faible, car les températures sont plus élevées. La différence d'épaisseur pour cette simulation varie de 5 à 6 mm.

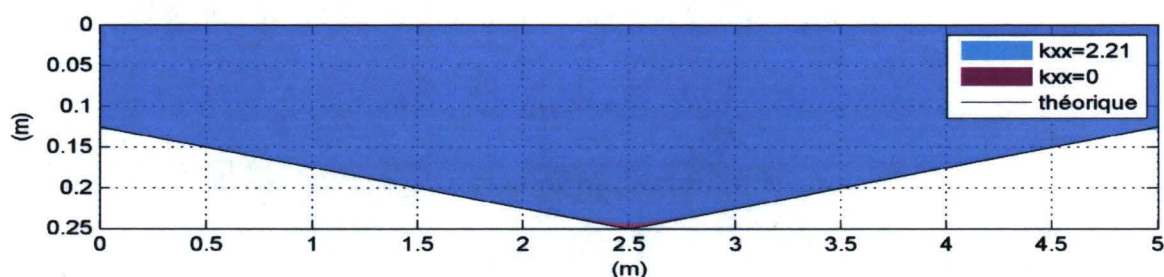


Figure 25 – Différence d'épaisseur induite par l'utilisation d'un modèle 1D plutôt que 2D pour un floe convexe de 25 cm d'épaisseur maximale et de 5 m de largeur

Cette simulation 2D a aussi été appliquée à un floe typique observé sur une image thermique du vol de l'année 2008. Les épaisseurs utilisées pour représenter le floe ont été calculées à partir des résultats de la simulation thermique 1D et déterminées pour une coupe localisée au centre du floe. Ce floe était presque circulaire, d'une épaisseur maximale de 5 cm et d'un diamètre de 5 m (figure 26). La température de l'air était de $-10,8^{\circ}\text{C}$ et la vitesse du vent de 1,5 m/s lors de l'acquisition de cette image, pour un coefficient de transfert de chaleur entre la glace et l'air de $15,7 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Une température de 0°C a été imposée aux surfaces en contact avec l'eau. Un flux de chaleur variant à chaque itération a été imposé sur la face supérieure. La température de chaque élément a été calculée à l'aide d'un modèle permettant les échanges de chaleur bidimensionnels et un autre ne permettant que les échanges unidimensionnels. Les épaisseurs ont été déterminées à partir des éléments de surface. Pour chaque élément, la différence d'épaisseur entre la solution permettant les échanges en deux dimensions et celle ne permettant que les échanges à la verticale a été calculée. Par élément, cette erreur relative pouvait s'élever à 65%. Les valeurs maximales

étaient situées aux extrémités, là où l'épaisseur est la plus faible. Une intégration des erreurs obtenues pour la coupe transversale a été faite en considérant un floe circulaire, pour calculer l'erreur globale sur le floe. L'erreur relative intégrée s'est élevée à 0,1%.

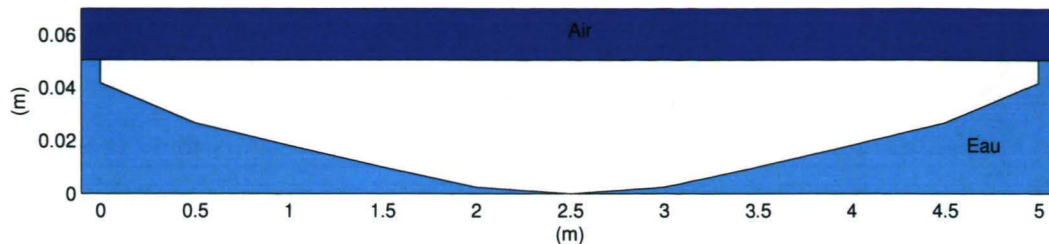


Figure 26 – Floe irrégulier modélisé avec échange de chaleur dans les deux directions, issu d'une image thermique lors du survol du 13 mars 2008

3.1.5 Limites du modèle

La principale limite du modèle vient de la forme de la courbe entre la température de surface de la glace et son épaisseur, tel que montré à la figure 21. Y sont identifiés les points obtenus lors de la modélisation, ainsi que le polynôme d'interpolation cubique Hermite par partie (Pchip) généré pour interpoler entre les valeurs connues. Cette courbe a été générée pour une température d'air de $-7,3^{\circ}\text{C}$ et une vitesse de vent de 5 m/s. Pour les températures entre 0 et -6°C , une faible différence d'épaisseur est déterminée par un grand changement de température de surface. Ainsi, la température de surface est très différente d'une épaisseur à l'autre et on peut donc bien estimer les épaisseurs avec cette courbe, même si des imprécisions demeurent dans les températures de surface. Or, entre -6 et -7°C , les températures changent moins rapidement en fonction des épaisseurs, jusqu'à ce qu'il soit impossible de déterminer l'épaisseur d'une glace en fonction de sa température de surface. En effet, une glace à -7°C aurait une épaisseur de 5 m, alors qu'une glace à $-7,1^{\circ}\text{C}$ aurait une épaisseur d'environ 12 m. Il est évident que malgré la bonne couverture des valeurs d'épaisseurs possibles, seules les épaisseurs jusqu'à 2 m environ pourraient être bien déduites, et que l'incertitude serait appréciable dès 1 m. Ces valeurs limites d'épaisseur varieront également selon les conditions météorologiques. Elles sont considérées dans le traitement des données de l'année 2009 (des survols et de l'instrumentation fixe).

La forme de la figure 27 est davantage limitative que celle de la figure 21, car on y voit que la température de surface d'une glace de 12,8 m d'épaisseur est plus grande que celle d'une glace de 8,4 m. Cette courbe provient d'une des simulations thermiques effectuées dans le cadre de ce projet, et constitue un exemple parmi tant d'autres. Les conditions météorologiques utilisées pour obtenir cette courbe, montrées à la figure 28, ne sont pas des conditions extrêmes. On y constate une température d'air près de -5°C , avec un historique de températures oscillant autour de cette valeur pour les trois jours précédents. La vitesse du vent est inférieure à 10 km/h au moment de la génération de la courbe, alors qu'elle est souvent plus élevée lors des jours précédents. Ces combinaisons de conditions et d'historique de conditions ont généré une courbe telle que montrée à la figure 27. Plusieurs courbes du même genre sont à prévoir pour les simulations sur l'ensemble de l'hiver.

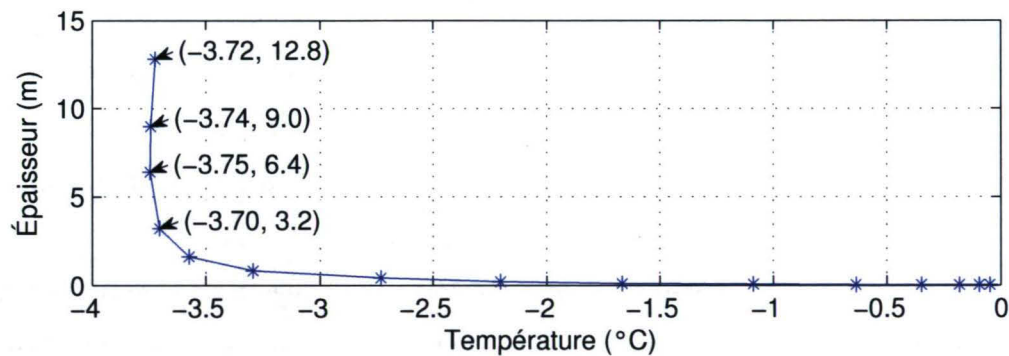


Figure 27 – Exemple de courbe démontrant la limite d'épaisseur pouvant être détectée

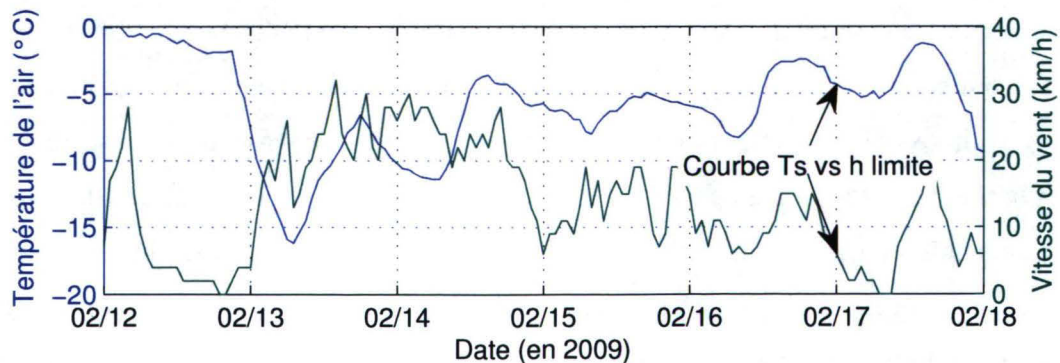


Figure 28 - Historique de la météo menant à une courbe limite des températures de surface versus l'épaisseur

Afin d'éliminer les valeurs d'épaisseurs calculées qui sont impossibles ou imprécises, six critères de rejet ont été déterminés. Ces critères, absents lors de l'analyse des données de l'hiver 2008, ont été rajoutés au traitement des images de l'hiver 2009 afin d'en augmenter la valeur. Ces critères se définissent comme suit :

1. Si l'épaisseur de la glace est supérieure à l'épaisseur d'une glace plus froide de $0,1^{\circ}\text{C}$, la valeur est exclue. Ce type d'invalidité sera par la suite identifié comme étant dû à la forme de la courbe, étant donné que la courbe ne suit plus la forme d'une fonction exponentielle.
2. Si la différence d'épaisseur entre une glace à une température précisée et une glace plus froide de $0,1^{\circ}\text{C}$ est supérieure à $0,10\text{ m}$, la valeur est exclue.
3. Si l'épaisseur de la glace est plus grande que $12,8\text{ m}$, soit l'épaisseur la plus grande utilisée dans la modélisation faite pour déterminer la courbe de l'épaisseur en fonction de la température de surface, la valeur est exclue.
4. Si la température de la glace est inférieure à la température limite pour laquelle les épaisseurs peuvent être calculées, la valeur est exclue. Cette température limite est la première valeur où une température peut avoir deux épaisseurs différentes, comme montré à la figure 27. Sur cette même figure, la température limite correspondrait à $-3,72^{\circ}\text{C}$. Toutes les courbes n'ont pas une valeur limite : ce critère est donc appliqué si échéant.
5. Si l'épaisseur de glace obtenue est inférieure à zéro, la valeur est exclue. Une épaisseur négative peut survenir lorsque le polynôme d'interpolation liant les températures de surface aux épaisseurs est mal ajusté pour les très faibles épaisseurs ou pour les très grandes épaisseurs, ou lorsque suite à la correction des températures, des glaces près de 0°C se retrouvent au-dessus de 0°C .
6. Si la température de surface de la glace est inférieure à la température de l'air, la valeur est exclue.

3.1.6 Incertitude sur les épaisseurs

Les limites de validité mentionnées à la section précédente permettent d'utiliser les courbes de température de surface versus les épaisseurs pour un domaine sur lequel les hypothèses de calcul posées sont valides. Chaque mesure d'épaisseur est tout de même empreinte d'une erreur. Cette incertitude est principalement due à l'erreur sur la température de surface mesurée. Les hypothèses posées et les simplifications utilisées pour alléger les calculs de la relation entre l'épaisseur d'une glace et sa température de surface introduisent aussi une imprécision lors de la détermination de l'épaisseur. Cette influence est toutefois considérée de moindre importance.

L'incertitude associée à l'épaisseur, en la considérant principalement due à l'erreur sur la température de surface, varie pour chaque épaisseur et pour chaque moment de prise de mesure. En effet, la relation utilisée pour obtenir les épaisseurs à partir des températures de surface est non linéaire et cette relation est différente pour chaque pas de temps en fonction des conditions météorologiques précédentes. L'erreur varie donc d'un pixel à l'autre d'une même image et d'une image à l'autre. Pour simplifier la présentation des résultats, l'erreur n'est pas incluse dans les graphiques du chapitre 4, mais il faut tout de même la considérer.

La figure 29 montre les marges d'erreur sur l'épaisseur si l'erreur sur la température de surface est de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ et de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, pour différentes relations d'épaisseur selon la température de surface. L'incertitude de $0,2^{\circ}\text{C}$ est associée à la différence d'émissivité entre la glace et l'eau. L'erreur de $0,5^{\circ}\text{C}$ est liée à la température seuil de $-0,5^{\circ}\text{C}$ qui a été utilisée dans plusieurs cas pour faire la segmentation eau/glace. Ce seuil permettait d'obtenir une segmentation valide aux yeux de l'observateur, à partir de l'image thermique et non d'une image réelle. Cette température de segmentation diffère d'une image à l'autre et peut être plus près de 0°C dans certains cas.

Les résultats de la section 4.2.1 montrent que la température moyenne de l'eau par image est en général bien ajustée à une température de 0°C . Ainsi, la majorité des pixels ont une incertitude de $0,2^{\circ}\text{C}$. Le seuil de $-0,5^{\circ}\text{C}$ utilisé pour la segmentation montre plutôt que la bordure des floes est plus difficile à établir dans le domaine thermique que dans le domaine visible (Rees et James, 1992), notamment parce que de la « slush » peut s'y trouver.

L'incertitude est donc plus importante en périphérie des floes. L'erreur de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ sur les épaisseurs est donc jugée comme étant l'erreur possible maximale. Mentionnons aussi que lorsque des points d'eau étaient sélectionnés pour faire la correction des températures, tel qu'expliqué à la section 2.1.4, les points choisis n'étaient généralement pas situés tout près des floes. Cette affirmation ne s'applique toutefois pas aux matrices de correction générées suite à une segmentation automatique des floes.

Sur la figure 29, le trait plein noir correspond à l'épaisseur déterminée. Le fuseau de couleur foncée correspond à la marge d'erreur si la température diffère de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, et celui de couleur pâle si la température diffère de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. On constate que l'erreur pour une même épaisseur varie selon la courbe de détermination des épaisseurs. Cette erreur varie aussi selon l'importance de l'épaisseur, pour chacune des courbes. Les épaisseurs en deçà de 0,2 m ont généralement une incertitude de l'ordre de 0,01 à 0,02 m, et une incertitude maximale de $\pm 0,05$ m. Au-delà de 0,2 m, l'incertitude, pour une différence de température $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, atteint une valeur moyenne d'environ $\pm 0,05$ m alors que l'erreur maximale probable augmente rapidement.

Les courbes étendues sur une gamme de température de surface plus grande, signifiant que la température de l'air est plus froide, génèrent des petites erreurs sur une plus grande gamme d'épaisseur. Ainsi, plus la température de l'air est froide, plus la gamme d'épaisseur pouvant être mesurée est grande, et plus chaque mesure est précise. Il faut aussi mentionner que la plupart des épaisseurs obtenues pour les différentes campagnes de mesures sont inférieures à 0,2 m et ont ainsi une bonne précision. Les glaces plus épaisses ont une incertitude plus grande, mais la précision de la mesure demeure acceptable.

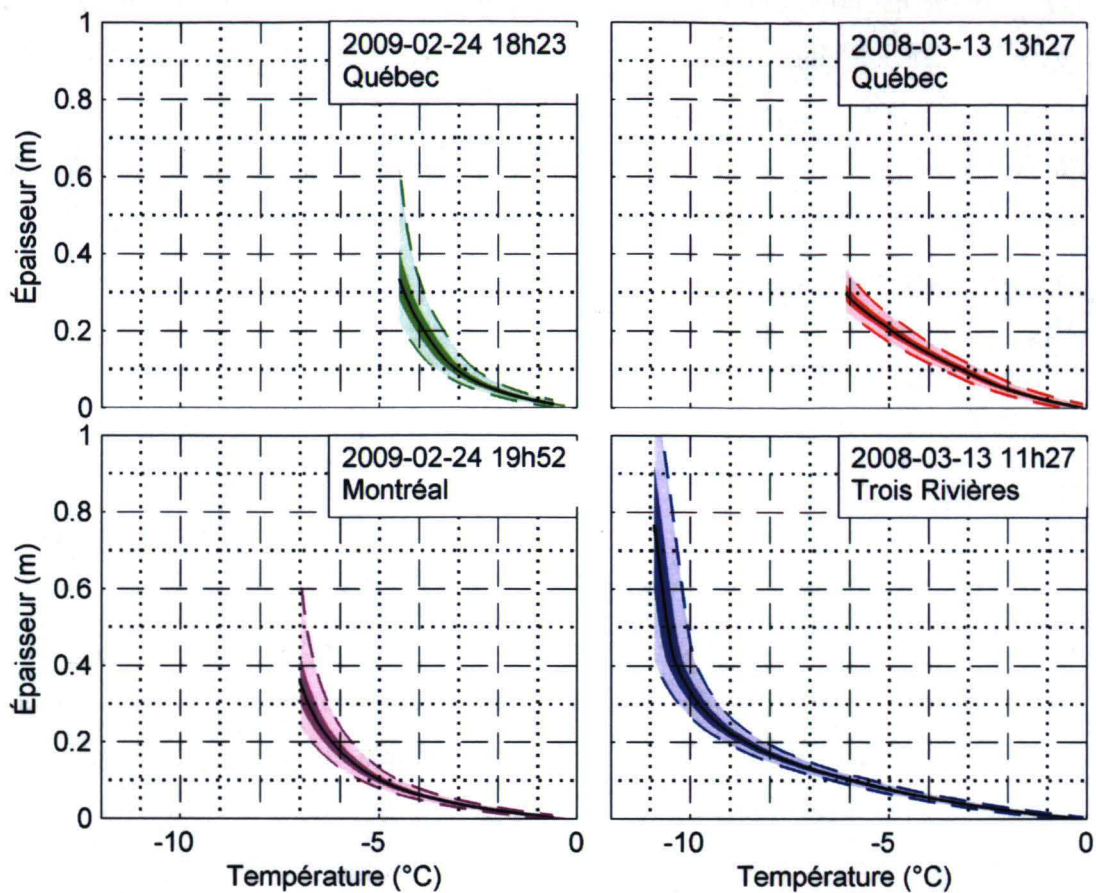


Figure 29 – Marge d'erreur sur l'épaisseur d'une glace pour différentes relation d'épaisseur en fonction de la température de surface, si l'erreur sur la température de surface est de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (fuseau foncé) et $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (fuseau pâle)

Chapitre 4 - Résultats et discussion

4.1 Campagnes aériennes

4.1.1 Résultats du 13 mars 2008

4.1.1.1 Exemples d'images thermiques

Les images acquises lors de l'hiver 2008 ont été utilisées dans un article pour une édition spéciale du *Journal of River Research* conjointement avec le *Committee on River Ice Processes and the Environment* (Emond et coll., 2010). Certaines images présentées dans cette section proviennent de la version finale et sont identifiées comme telles. Certains graphiques sont fortement inspirés de l'article mais différents. Avant de montrer les analyses et résultats complets sur les données, quelques images typiques sont montrées afin de montrer visuellement les possibilités.

De la figure 30 à la figure 34, les images thermiques originales (a) et rectifiées et corrigées (b) pour les températures de surface sont montrées. La méthodologie détaillée à la section 2.1.4.1 a été utilisée pour corriger et projeter les images. Les coordonnées centrales des images, obtenues par simples opérations de trigonométrie, sont en Nad83 MTM8 et chaque case du grillage correspond à une aire de 200 m x 200 m. Les échelles des températures respectives sont également affichées au centre de chaque figure. Les températures corrigées, montrées sur l'échelle de droite, sont utilisées dans la description des images. La figure 30 est une image typique acquise près de Montréal. On y voit plusieurs glaçons de température élevée et de petite taille. Les températures de surface corrigée varient entre -2 et 0°C. Il est donc présumé que les épaisseurs sont plutôt faibles.

La figure 31 montre une image acquise au Lac St-Pierre. La première évidence est qu'on voit la glace de rive. En effet, une zone bleue démontrant des faibles températures de surfaces est visible. Dans l'image corrigée et projetée (b), cette zone a été éliminée afin de ne faire l'analyse que sur les floes libres de mouvement. En observant les températures de surface corrigées, on voit qu'elles sont un peu plus froides qu'à Montréal. Il y a davantage

de glaces près de -2°C et elles peuvent descendre jusqu'à -4°C . Les morceaux de glace ont aussi des dimensions plus importantes.

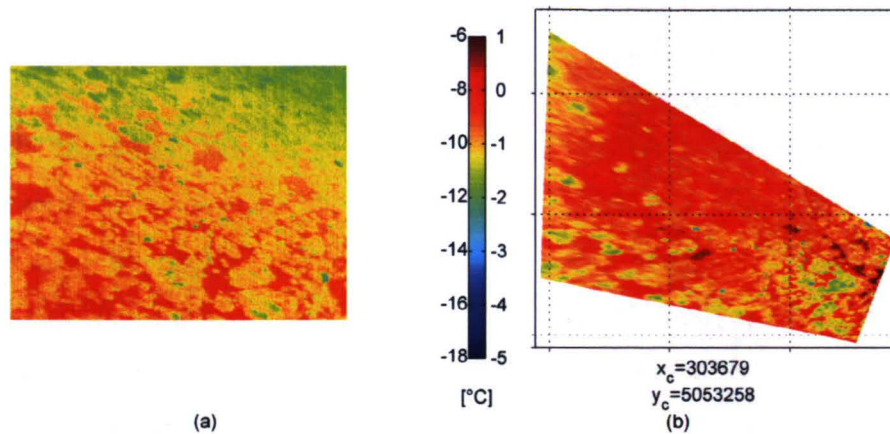


Figure 30 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Montréal (Source : Emond et coll., 2010)

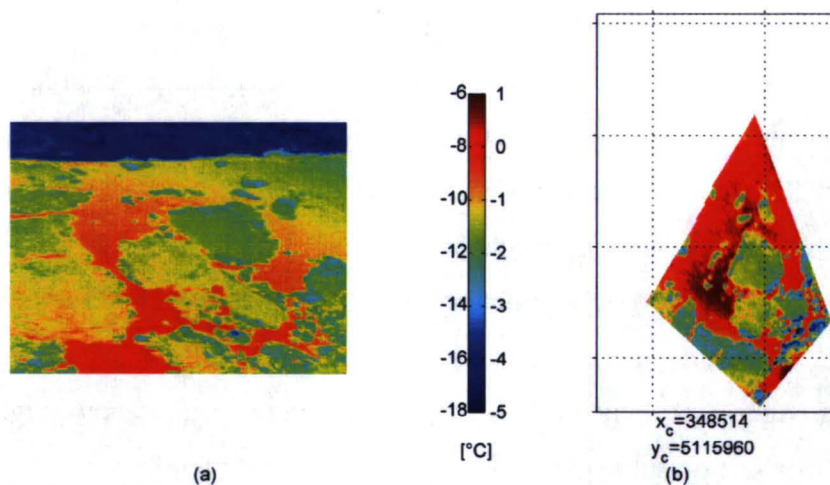


Figure 31 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) au Lac St-Pierre (Source : Emond et coll., 2010)

La figure 32 et la figure 33 montrent les glaces dans le secteur de Trois-Rivières. Une première évidence est la grande variabilité des températures de surface, beaucoup plus importante qu'à Montréal et qu'au Lac St-Pierre. Cette variabilité est visible sur chacun des floes individuellement, mais aussi d'un floe à l'autre. Une hypothèse apportée pour expliquer la présence de morceaux de glace petits mais épais (figure 33) est que les vagues

généérées par le passage des navires ont brisé la glace de rive et que des fragments s'en sont détachés (Stander et coll., 2005).

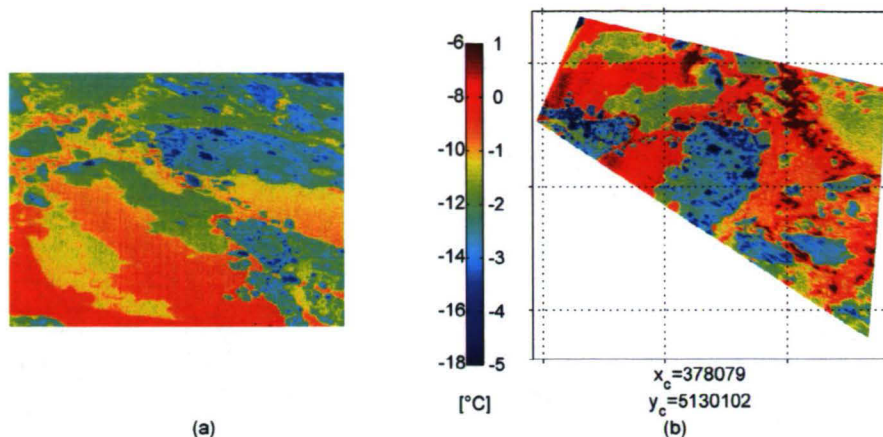


Figure 32 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Trois-Rivières (Source : Emond et coll., 2010)

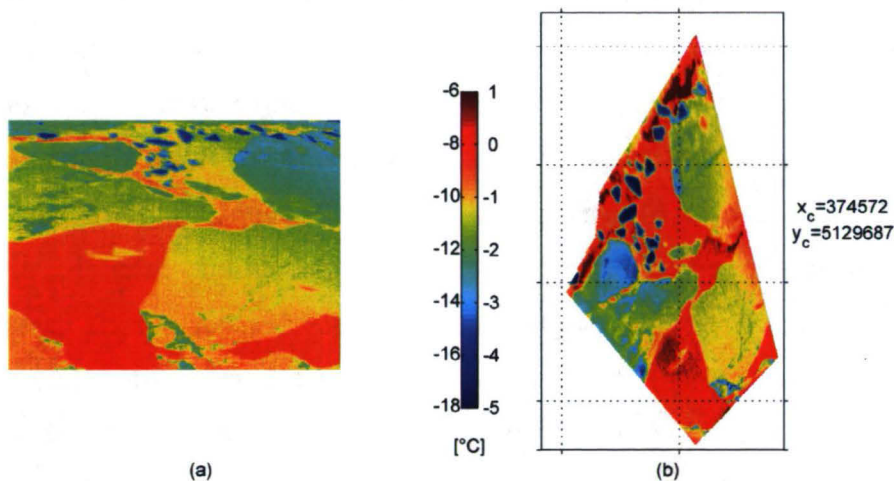


Figure 33 – Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Trois-Rivières (Source : Emond et coll., 2010)

La figure 34 montre une image acquise près de Québec. Les floes présents sont beaucoup plus petits que dans les autres secteurs montrés, possiblement brisés sous l'action de la marée. Une certaine variabilité des températures de surface demeure, puisque plusieurs floes sont environ à -1°C alors que quelques fragments se rapprochent plutôt de -4°C .

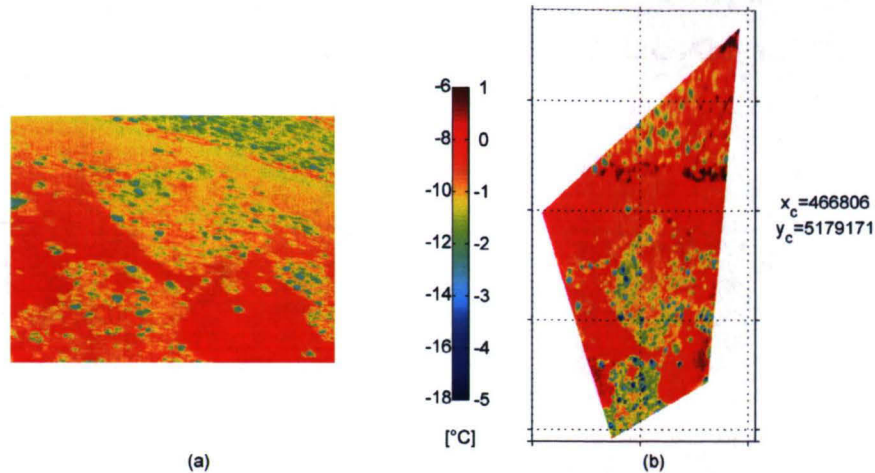


Figure 34 - Images thermiques des glaces avant projection (a) et après projection (b) près de Québec (Source : Emond et coll., 2010)

Les figures précédentes permettent de montrer que les caractéristiques des glaces varient le long du fleuve. Également, dans un même secteur, il y peut y avoir une importante variation de ces caractéristiques. En effet, chaque floe a sa propre histoire spatiale, temporelle, thermique et mécanique. Certains floes sont générés à l'amont et, au cours de leur parcours, subiront des changements de températures (fonte ou épaissement), rencontreront des obstacles, suivront des courants secondaires qui les amèneront à avoir leurs propres caractéristiques, possiblement différentes d'un floe généré au même moment dans un même secteur. Tout le long du fleuve, puisque celui-ci n'est évidemment pas couvert d'un couvert fixe de glace, principalement en lien avec le passage des navires, de nouvelles glaces seront générées et auront aussi leur propre histoire. Certains floes pourront être des fragments de glaces de rives. Selon la vitesse du courant et le passage des navires, les glaces seront brisées en morceaux ou demeureront intactes. Il demeure que, de la figure 30 à la figure 34, les glaces semblaient être plus épaisses en allant vers l'aval, alors qu'elles ont pu s'épaissir au fil de leur cheminement. La variabilité en termes de dimensions et de températures est aussi plus importante vers l'aval, tel qu'abordé dans ce présent paragraphe.

4.1.1.2 Méthode de calcul des statistiques

Malgré la grande variabilité des caractéristiques des glaces le long du fleuve, des statistiques ont été extraites des images thermiques afin de voir si des tendances générales pouvaient être extraites. Un tel processus vise à caractériser efficacement et simplement les

glaces tout le long du fleuve et non localement, contrairement à la plupart des études déjà entreprises (Morse et coll., 2003; Morse et Richard, 2009).

Les images montrées précédemment sont en fait des matrices de températures de surface et la coordonnée géographique de l'avion au moment de l'acquisition de chacune est connue. Cela permet donc de situer les statistiques générées le long du fleuve.

De nombreuses statistiques ont été extraites par image :

- Médiane de la température des glaces : Il s'agit de la médiane des températures de tous les pixels représentant de la glace, sans les isoler par floes.
- Épaisseur médiane des glaces : Pour chaque pixel, une épaisseur est calculée à partir de la température du pixel. La relation liant la température de surface à l'épaisseur telle que générée à la section 3.1.3 est utilisée. L'épaisseur médiane est donc la médiane de tous les pixels de glace dans l'image, en dehors des zones coupées.
- Écart-type de l'épaisseur : L'écart-type est aussi calculé sur l'ensemble des pixels de glace.
- Concentration des glaces : La concentration est obtenue en calculant le pourcentage de pixels de glaces par rapport au nombre total de pixels effectifs dans l'image. Les zones coupées ne sont pas considérées.
- Aire moyenne des floes : À chaque pixel correspond une aire de $0,25 \text{ m}^2$. L'aire de chacun des floes par image a été évaluée et la valeur moyenne est conservée.
- Nombre de floes par hectare : Le nombre de floes dans chaque image est calculé et divisé par l'aire effective couverte par l'image.
- Excentricité des floes : L'excentricité des floes a été évaluée pour chacun des floes par image, et la moyenne de toutes ces excentricités par image a été conservée. L'excentricité associée à chaque floe est déterminée en calculant l'excentricité d'une ellipse ayant les mêmes moments centraux de deuxième ordre que le floe de glace. Le calcul commence en attribuant la valeur 1 aux éléments inclus dans la

forme étudiée, soit un floe de glace à la fois, et la valeur zéro aux autres floes et à l'eau (équation 8). Les composantes du centroïde (équation 9) sont calculées à partir des moments bruts (équation 10). Les moments centraux (équation 11) sont ensuite calculés à partir de ces composantes du centroïde (équation 9) (Gonzalez et Woods, 2008).

$$I(i, j) = 1, \quad (i, j) \in S \quad [8]$$

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad [9]$$

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q I(i, j), \quad (i, j) \in S \quad [10]$$

$$u_{pq} = \sum_i \sum_j (i - \bar{x})^p (j - \bar{y})^q I(i, j), \quad (i, j) \in S \quad [11]$$

Finalement, l'excentricité est calculée à partir de l'équation 12, dans laquelle a représente le demi-axe majeur et b le demi-axe mineur de l'ellipse ayant les mêmes moments centraux de second ordre que le floe de glace étudié.

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad [12]$$

Une excentricité évaluée à un représente une ligne alors qu'une excentricité de zéro représente un cercle.

4.1.1.3 Température de l'air lors des jours précédents

Les conditions météorologiques des jours précédant le vol, en termes de température d'air, sont montrées à la figure 48, pour aider à l'interprétation des résultats. Les températures sont montrées pour les trois villes principales et presque également distantes que sont Montréal, Trois-Rivières et Québec. Lors des journées du 10 et 11 mars, les températures ont atteint jusqu'à -12°C à Montréal et -18°C à Québec, permettant ainsi une bonne production de glaces ainsi que leur épaissement. Par contre, le 12 mars, la veille du vol,

des températures supérieures à 0°C ont été observées dans ces deux mêmes villes. Il a donc pu y avoir de la fonte en surface et l'augmentation des températures internes de la glace. Le jour du vol, le 13 mars, les températures étaient entre -10 et $-6,5^{\circ}\text{C}$. La vitesse moyenne du vent était de 10 km/h et le ciel était dégagé et ensoleillé. Il est présumé que la température de l'air a été sous le point de congélation suffisamment longtemps avant le vol pour que les températures internes aient retrouvé un profil d'équilibre permettant la détermination des épaisseurs à partir de la température de surface et pour qu'il n'y ait pas d'eau à la surface.

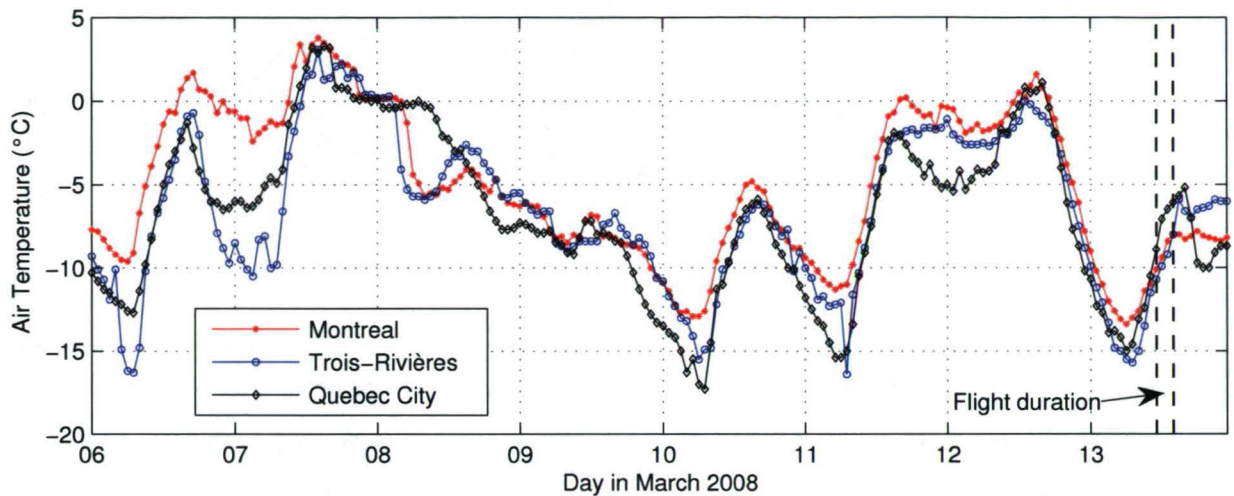


Figure 35 – Température de l'air lors de la semaine précédant le vol de mars 2008 (Source : Emond et coll., 2010)

4.1.1.4 Relation température de surface/épaisseur des glaces

La figure 36 montre, pour la ville de Québec, lors du 13 mars 2008, l'évolution de la relation température de surface vs épaisseur des glaces pendant la journée. Les données de minuit à 13h30, soit l'heure de fin du vol, y sont présentées. Le dynamisme de la relation, dépendant évidemment des changements de températures, est bien montré. On voit qu'un refroidissement de l'air et de la surface de la glace se fait aux alentours de 7h du matin. C'est en effet ce qui était observé sur la figure 35. On remarque aussi qu'un bloc d'une épaisseur constante d'un mètre par exemple aura une température d'environ -9°C vers minuit, puis de -12°C vers 7h, suite au refroidissement, pour ensuite atteindre une température approximative de -8°C vers 13h30. De plus, selon le profil montré, le discernement des épaisseurs serait optimal vers 7h, alors que la température de l'air est plus basse. La température de surface selon les différentes épaisseurs a alors un plus grand

intervalle de différence et des épaisseurs plus grandes peuvent être discernées avant d'atteindre la limite de validité (section 3.1.5).

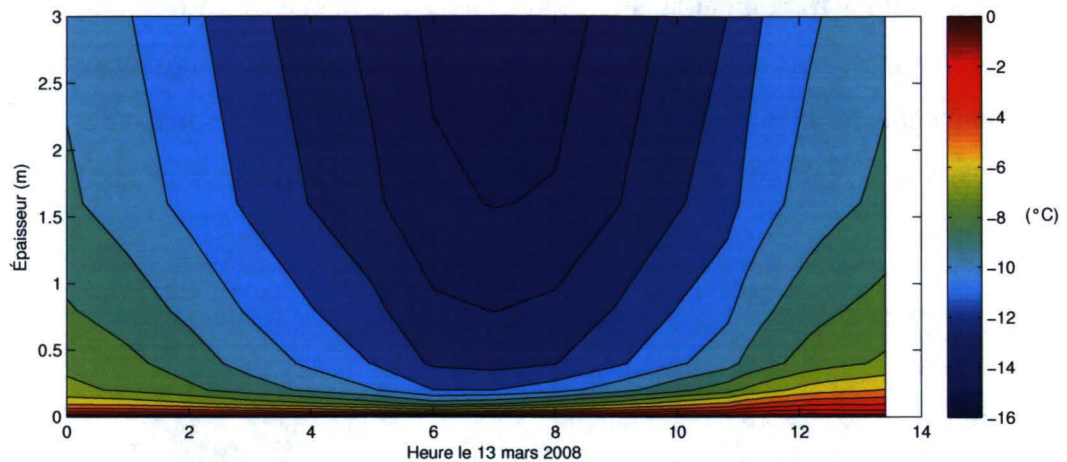


Figure 36- Températures de surface des glaces selon leur épaisseur lors de la journée du 13 mars 2008, à Québec

La figure 37 montre la relation épaisseur des glaces vs température de surface pour six positions le long du fleuve. Les points pleins représentent les limites de validité des relations. Ces limites ont été établies, pour le km 1 et 50, selon le critère qui dicte qu'une différence de température de surface de 0,1 °C ne doit pas engendrer une différence d'épaisseur supérieure à 0,1 m. Par contre, dans le cas des autres bornes kilométriques, la limite de validité a été imposée afin que la température de surface des glaces ne soit pas inférieure à la température de l'air. Puisque ces conditions se sont présentées à plusieurs endroits, comme à Québec, il faut présumer que l'augmentation rapide des températures a fait en sorte que le profil des températures, pour les glaces plus épaisses, n'était pas stabilisé. On ne peut donc qu'efficacement discerner des glaces plus minces dans lesquels les transferts de chaleur se seront faits plus rapidement.

La figure 37 montre aussi que la relation entre l'épaisseur des glaces et leur température de surface varie selon le lieu, car les conditions météorologiques y sont différentes. La nécessité de générer plusieurs de ces courbes est donc démontrée.

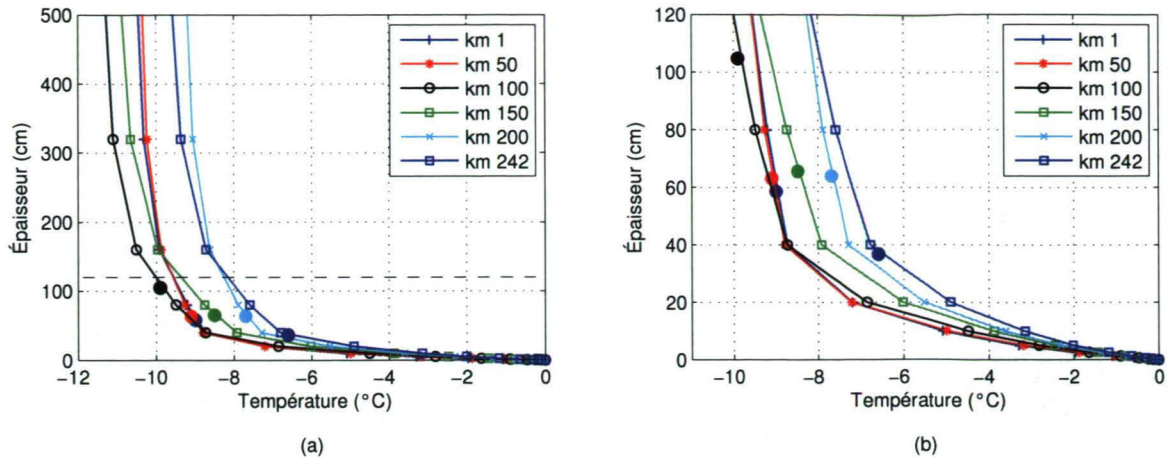


Figure 37 – Courbes de l'épaisseur des glaces selon leur température de surface pour le 13 mars 2008 pour des épaisseurs de 0 à 500 cm (a) et à l'intérieur des limites de validité (b)

4.1.1.5 Statistiques sur les glaces

La figure 38 montre les statistiques qui ont été générées sur les glaces. Les statistiques présentées à la section 4.1.1.2 y sont montrées dans cet ordre : température médiane de surface des glaces, épaisseur médiane des glaces, écart-type de l'épaisseur, concentration des glaces, nombre de floes par hectare, aire moyenne des floes et excentricité moyenne des floes.

4.1.1.5.1 Température médiane de surface des glaces

Dans le premier graphique de la figure 38, la température médiane des glaces est montrée. Une première évidence est que, dans l'ensemble, les points voisins sont cohérents. En effet, on remarque de nombreuses tendances sectorielles. Cette observation ajoute une crédibilité aux résultats des traitements d'image et permet de les considérer justes. Près de Montréal, les glaces commencent à se former sur le fleuve. On peut donc présumer qu'elles sont plus minces et plus chaudes en surface. Les températures médianes sur les premiers 60 kilomètres se situent entre -1 et $-0,5^{\circ}\text{C}$. Au Lac St-Pierre, les températures diminuent jusqu'à -2°C et augmentent ensuite à partir du km 100. Entre Trois-Rivières et Québec, les températures oscillent davantage, tout en demeurant autour d'une moyenne de -1°C . Il est à noter que dans cette figure et autres figures subséquentes, les températures des glaces ne dépassent pas la valeur de $-0,5^{\circ}\text{C}$. En effet, lors de la segmentation des images, malgré la

correction préalable des températures, il a été jugé qu'une valeur de $-0,5$ plutôt que de 0°C donnait un résultat visuellement plus juste, en termes de différenciation eau/glaces.

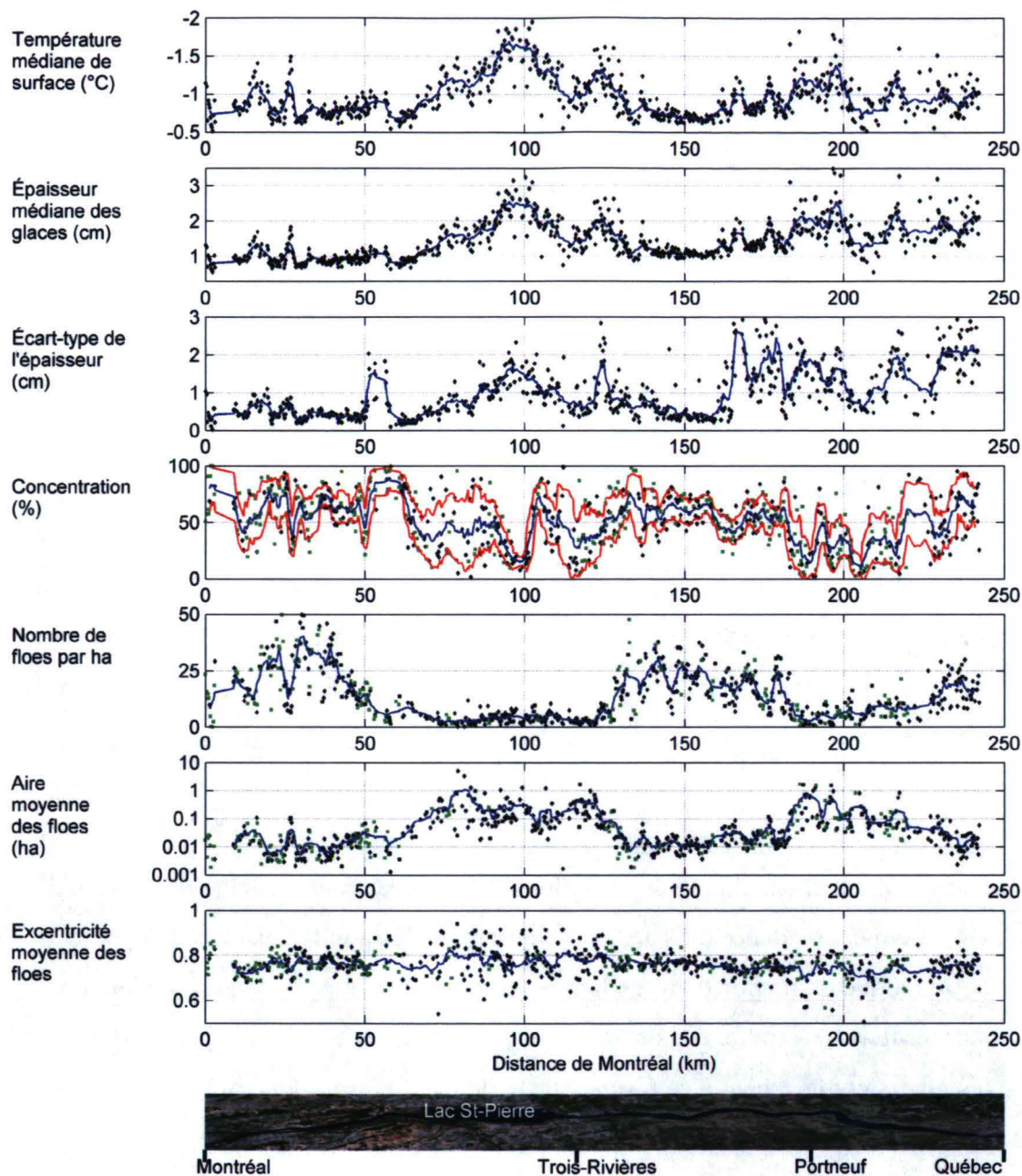


Figure 38 – Statistiques sur les glaces le long du fleuve St-Laurent pour le 13 mars 2008

4.1.1.5.2 *Épaisseur des glaces*

Le deuxième graphique de la figure 38 montre l'épaisseur médiane des glaces pour chacune des images. Tel qu'attendu, les épaisseurs suivent la même tendance que les températures de surface des glaces, à l'exception d'une tendance générale à l'augmentation des épaisseurs avec l'augmentation du kilométrage. Près de Montréal, les glaces ont une épaisseur médiane d'environ 1 cm. Cette épaisseur augmente au Lac St-Pierre, jusqu'à 3 cm. Une diminution des épaisseurs jusqu'à 1 cm est visible entre les km 100 et 150. Une augmentation graduelle marquée d'une grande variabilité est ensuite dénotée jusqu'à Québec, atteignant une épaisseur de près de 2 cm.

La figure 37 présentée à la section 4.1.1.4 montre les relations qui ont été utilisées pour déterminer l'épaisseur des glaces en fonction de leur température de surface. Les courbes ici montrées sont valides pour le moment auquel l'avion est passé au-dessus de chacune des positions. On remarque que les courbes, bien que légèrement différentes les unes des autres, sont suffisamment semblables pour que les épaisseurs le long du fleuve suivent sensiblement la même tendance que les températures de surface. On voit aussi que pour une même épaisseur, la température de surface associée est plus élevée en direction de Québec (avec l'augmentation du kilométrage). Ainsi, une glace de 20 cm d'épaisseur a à Montréal (km 1) une température d'environ -7°C alors qu'elle se rapproche de -5°C vers Québec. Puisque le vol a été effectué alors que la température de l'air augmentait, tel que montré à la figure 35, cette observation est tout à fait plausible. L'augmentation des épaisseurs est donc plus importante que la diminution des températures, telles que montrées à la figure 38.

La modification de la relation épaisseur vs température de surface le long du fleuve indique aussi qu'une glace ayant une température plus élevée à Montréal sera plus mince que les glaces ayant la même température de surface dans une autre localité. Le fait d'attribuer à Montréal des glaces minces, car on y voit des températures élevées, n'est donc pas erroné.

La figure 39 montre l'épaisseur médiane des glaces le long du fleuve de même que les épaisseurs maximales observées. Les tendances observées pour les épaisseurs médianes y sont reproduites sur une échelle plus étendue et avec une plus grande variabilité. Ainsi, de Montréal au Lac St-Pierre (km1 à 60), les épaisseurs maximales se trouvent entre 3 et 12

cm. Au Lac St-Pierre, les épaisseurs maximales atteignent jusqu'à 17 cm vers le km 100. Après une diminution des épaisseurs maximales du km 100 à 150, comme observé pour les épaisseurs médianes, elles varient ensuite de 10 à 27 cm jusqu'à Québec. On remarque donc que globalement les épaisseurs augmentent vers Québec. On voit aussi que la variabilité des épaisseurs entre le km 170 et 240 est considérable, et que la différence entre épaisseurs maximales et médianes y est la plus importante. Ce secteur semble donc marqué par un plus grand amalgame de glaces ayant des particularités différentes. Considérant qu'il s'agit de l'endroit où les glaces les plus âgées peuvent se trouver selon le sens de l'écoulement (à l'exception des glaces de rive du Lac St-Pierre et de leurs fragments), que les marées ont un plus grand effet sur le mouvement des glaces et que de nouvelles glaces sont formées tout le long du fleuve, incluant dans ce secteur, cette variabilité est tout à fait plausible.

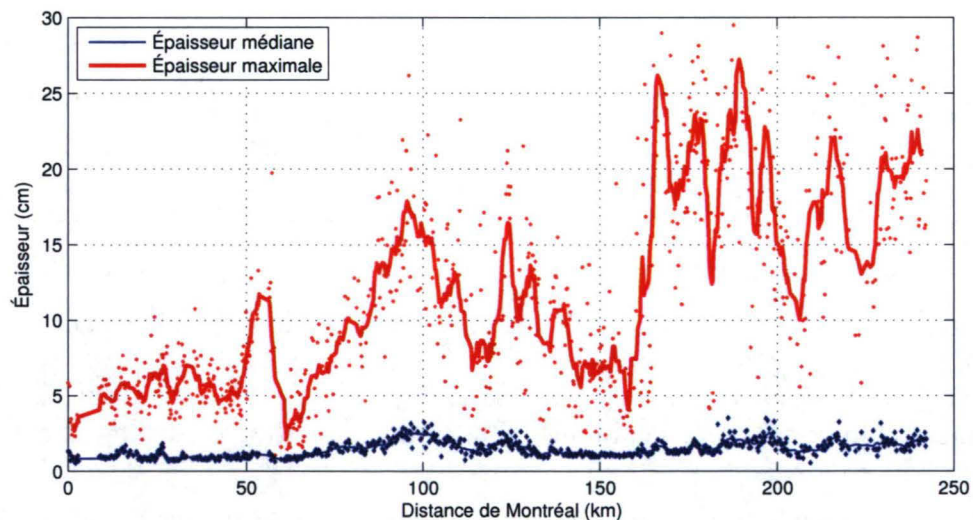


Figure 39 – Graphique de l'épaisseur médiane et de l'épaisseur maximale détectée lors du 13 mars 2008

4.1.1.5.3 Écart-type de l'épaisseur des glaces

Le troisième graphique de la figure 38 montre l'écart-type de l'épaisseur des glaces pour chaque image le long du fleuve. Un écart-type élevé peut être associé à une variabilité plus importante des épaisseurs sur chaque floe individuellement, ou à une plus grande différence d'épaisseurs d'un floe à un autre. Il est présumé que là où les glaces sont le plus âgées, soit

en aval, elles risquent d'avoir une variabilité d'épaisseur plus grande sur chaque floe. En effet, les glaces ont subi davantage de bris, unions, fonte, épaissement, mouvement dû aux marées, etc. Elles sont donc moins uniformes qu'une nouvelle glace ayant subi peu de modifications. Également, puisque les glaces se forment tout le long du fleuve, c'est vers l'aval du tronçon étudié que devrait se trouver une grande variabilité des épaisseurs d'un floe à l'autre, puisqu'anciens et nouveaux floes se côtoient.

De la figure 38, un premier constat évident est que l'écart-type suit la même tendance que l'épaisseur des glaces. D'environ 0,5 cm près de Montréal, l'écart-type augmente jusqu'à 2 cm au Lac St-Pierre, puis diminue jusqu'au km 150. Il varie ensuite entre 1 et 3 cm jusqu'à Québec. Par ailleurs, l'écart-type, tout en atteignant sa valeur maximale, varie beaucoup dans le tronçon des km 170 à 240, là où la marée est plus importante. Globalement, l'écart-type augmente vers Québec, comme le faisait l'épaisseur.

Un graphique mettant en évidence la relation entre l'écart-type et l'épaisseur des glaces est montré à la figure 40. Malgré la dispersion des données, principalement à l'extérieur du Lac St-Pierre, une relation entre l'écart-type et l'épaisseur est visible entre ces deux variables, tel que mentionné précédemment. Les données au Lac St-Pierre ont été isolées, car l'écoulement y est fort différent et puisqu'il est possible d'y trouver davantage de morceaux de glaces de rives fragmentés. On y remarque une moins grande dispersion des données. Des équations d'interpolation linéaire ont été utilisées afin de vérifier la relation entre les deux variables. Une relation directe est pratiquement observée pour l'ensemble des floes, alors que l'écart-type augmente moins rapidement en fonction de l'épaisseur médiane au Lac St-Pierre. Une explication possible est que les floes plus épais sont plus uniformes, s'ils proviennent de la glace de rive, car ils ont alors subi des conditions météorologiques davantage similaires et ont été moins perturbés préalablement à leur dérive.

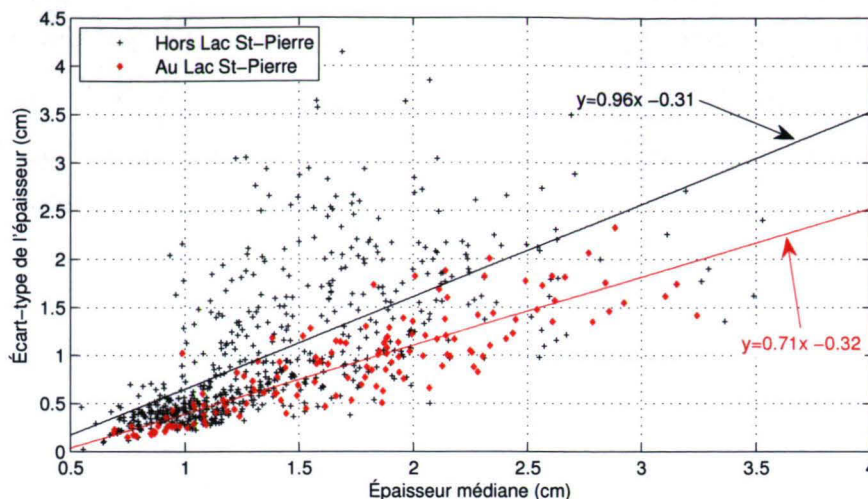


Figure 40 – Écart-type de l'épaisseur selon l'épaisseur médiane des glaces par image pour les données du 13 mars 2008

4.1.1.5.4 Validation des épaisseurs des glaces

Les épaisseurs calculées sont relativement faibles et la justesse des résultats pourrait être questionnée. Aucune donnée terrain n'a été acquise pendant les vols, étant donné la difficulté associée à cette tâche. Les floes étudiés par l'imagerie thermique sont à la dérive sur le fleuve : l'accès est donc difficile. L'étude s'est déroulée entre Montréal et Québec, soit sur près de 250 km. Il aurait été difficile de relever des épaisseurs à différents endroits dans le but d'obtenir une bonne validation, au moment du passage de l'avion. Par ailleurs, ces mesures de validation auraient été ponctuelles alors que les images présentent des résultats plus globaux. Chaque pixel, couvrant près de $0,25 \text{ m}^2$, n'est représenté que par une épaisseur dans les images et couvre une superficie plus grande que les mesures ponctuelles possibles de l'épaisseur de la glace.

Afin de vérifier la justesse des résultats, diverses méthodes ont été utilisées. Dans l'analyse présentée ci-dessous, il faut garder en mémoire que l'épaisseur mesurée avec la caméra thermique n'inclut pas la couche de « slush » pouvant se trouver sous le floe et qu'elle n'inclut que la croûte solide. En effet, la condition limite posée à la frontière inférieure de la glace est une température de 0°C . Or, la « slush » se trouve aussi à une température de 0°C .

Comparaison avec des photographies

La figure 41 montre deux photographies prises pendant le survol. Ces images donnent une idée de ce que la caméra thermique mesurait, de la distance à laquelle les mesures étaient prises et de l'étendue des mesures. Ces photographies ne sont pas réellement des données de validation, mais contribuent à l'interprétation des résultats.



(a)



(b)

Figure 41 – Photographies prises pendant le survol du 13 mars 2008 (Source : Emond et coll., 2010)

La figure 41(a) a été prise aux alentours du km 50. On y voit du nilas et des glaces très minces. Certaines grandes plaques sont visibles, de même que plusieurs petits morceaux difficilement dissociés. Selon la figure 39, les glaces dans ce secteur avaient une épaisseur médiane d'environ 1 cm et une épaisseur maximale entre 5 et 10 cm. La figure 41 (b) a été

prise près du km 240, soit près de la ville de Québec. Les glaces qu'on y voit semblent en général plus épaisses bien que quelques glaces minces soient encore visibles. Une plus grande variabilité des épaisseurs est donc observée. De la figure 39, les épaisseurs médianes et maximales se situaient entre 2 et 22 cm.

Pour la figure 41(b), une épaisseur médiane de 2 cm peut sembler faible. Plusieurs glaces, davantage blanches et possiblement couvertes de neige ou formées de glace ayant des propriétés émissives différentes, pourraient donc être mal évaluées en termes d'épaisseur. Cette affirmation met en évidence une limite de l'imagerie thermique : l'émissivité de la surface visée doit être connue. Si des objets d'émissivité différente sont visibles dans une seule et même image, chacune des émissivités doit être connue. Une caractérisation de l'émissivité des glaces et de sa variation pour le St-Laurent, suite à diverses conditions météorologiques, pourrait donc être nécessaire dans le cadre d'une campagne de mesure subséquente.

Comparaison avec la méthode des degrés-jours

Le taux d'épaississement des glaces au Lac St-Louis, juste à l'amont de Montréal dans le fleuve St-Laurent, a été étudié par Hausser et coll. (1986). Ils ont développé une courbe de tendance sous la forme de l'équation 13, pour ajuster les épaisseurs de glaces mesurées sur le terrain. L'épaisseur (h en m) y dépend du nombre de degrés-jours de gel (DD en °C).

$$h = 0.1 \left(-1 + \sqrt{1 + 0.125DD} \right) \quad [13]$$

Les floes vus dans la région de Montréal seront nécessairement jeunes, au maximum un jour, puisqu'ils sont formés dans le même secteur. Lorsque l'équation 13 est utilisée avec la température du jour précédent le vol, une épaisseur de 3,3 cm est calculée. Près de Québec, en supposant qu'il y a des floes récemment formés (1 jour) et que les floes les plus âgés ont près de 5 jours, l'épaisseur varie de 3,8 à 4,5 cm. Les épaisseurs médianes et maximales près de Montréal étaient respectivement de 1 et 3 cm, ce qui correspond très bien à ce que l'équation des degrés-jours permet d'obtenir pour un âge égal ou inférieur à un jour. Près de Québec, les épaisseurs médiane et maximale mesurées étaient de 2 et 22 cm. En termes

d'épaisseur médiane, le résultat est similaire à ce que prédit l'équation. Par contre, en termes d'épaisseur maximale, les épaisseurs observées sont plus importantes.

L'impression que les épaisseurs obtenues étaient trop faibles tel qu'indiqué au début de la section 4.1.1.5.4 n'est donc pas justifiée. De plus, les floes peuvent être plus âgés que cinq jours dans le secteur de Québec, s'ils proviennent de glace de rive fragmentée ou s'ils ont vécu des conditions hydrauliques particulières ralentissant leur parcours (dont l'influence de la marée fait partie). En considérant les épaisseurs médianes, les valeurs obtenues sont dans le même ordre de grandeur que celles découlant de l'équation des degrés-jours de gel.

Comparaison avec des observations antérieures

Morse et coll. (2003) fait état des épaisseurs de glace observées au Lac St-Pierre à partir d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) et d'un IPS (Ice Profiling Sonar). En mars, les épaisseurs moyennes horaires ont varié de 5 à 40 cm. Toutefois, ces épaisseurs incluent la partie « slush » sous le floe puisque ces appareils font la détection des glaces dès qu'une couche relativement solide est frappée. À partir de mesures manuelles, ils ont mesuré des épaisseurs de couche solide de glace entre 5 et 30 cm. Bref, les mesures par imagerie thermique sont dans le même ordre de grandeur.

Comparaison avec les cartes de reconnaissance des glaces (Garde côtière canadienne)

Environnement Canada, par son Service canadien des glaces, produit des cartes de reconnaissance des glaces sur le fleuve St-Laurent. Les produits archivés sont distribués par la Garde côtière canadienne. Ces cartes sont tracées par les spécialistes du service, à partir de leurs observations visuelles effectuées à bord de navires et d'hélicoptères de la Garde côtière. Elles donnent des renseignements, valides au moment des observations, sur la concentration, le stade d'évolution et la taille des floes. Les chenaux d'eau libre, les lignes de démarcation et les fractures sont marquées.

Des cartes ont été produites pour le 13 mars 2008 le long du fleuve. La plupart de ces cartes ont été générées dans l'avant-midi, alors qu'une carte a aussi été générée en fin d'après-midi au Lac St-Pierre. Les cartes utilisées sont montrées à l'annexe 3. La terminologie utilisée est détaillée à l'annexe 1 et la description du code de l'œuf des cartes de reconnaissance des glaces est faite à l'annexe 2.

Entre Varennes et Contrecoeur (figure 94), la concentration des glaces varie de 80 à 90%. Du nilas et de la nouvelle glace sont présents sous forme de glaçons et de glace en crêpes. Des glaçons de glace grise (entre 10 et 15 cm) sont aussi observés localement. De Contrecoeur à Sorel (figure 95), la concentration des glaces varie aussi de 80 à 90%. La glace grise correspond à environ 10% de la surface et le nilas et la nouvelle glace constitue l'autre 90%. Au Lac St-Pierre (figure 96 et figure 97), dans les zones non occupées par la glace de rive, les concentrations de glace sont aux alentours de 90%. Environ 10% de glace grise est visible par endroits et entre 20 et 30% de sarrasins d'épaisseur faible et moyenne sont observés. Sinon, la glace nouvelle et le nilas occupent le reste de la superficie. Sur la figure 97, on voit dans la zone orangée que des glaçons entre 30 et 70 cm d'épaisseur provenant de la glace de rive sont apparus. De Trois-Rivières à Grondines (figure 98), il y a présence de glace nouvelle et de nilas, de sarrasins minces et d'épaisseur moyenne, et un faible pourcentage de glaçons entre 30 et 70 cm d'épaisseur par endroits, le tout couvrant environ 90% de la superficie. De Grondines à Portneuf (figure 99), les concentrations totales de glaces sont plus variables, de 30 à 90% selon les endroits. Le nilas et la nouvelle glace sont encore une fois les plus présents, de même que certains glaçons de 30 à 70 cm d'épaisseur. Des sarrasins sont aussi observés. De Portneuf à St-Nicolas (figure 100), des concentrations variables mais surtout près de 80%, de la nouvelle glace et du nilas, quelques glaçons de 30 à 70 cm d'épaisseur, et quelques sarrasins minces à épais sont visibles.

Bref, il ressort de l'analyse de ces cartes que le nilas et la nouvelle glace, dont l'épaisseur est inférieure à 10 cm, sont les principales formes de glace observées. Quelques glaçons plus épais (entre 30 et 70 cm) n'ont toutefois pas été détectés lors du survol avec la caméra thermique. Il faut aussi noter que ces cartes montrent bien que les caractéristiques des glaces et le pourcentage de couverture varie sur la largeur du fleuve et non pas seulement selon l'axe d'écoulement. Les conditions hydrauliques causent la formation de zones distinctes. Le survol a dans l'ensemble été fait au-dessus du chenal de navigation, mais les particularités observées ne sont pas nécessairement valides pour toute la largeur du fleuve.

Simplifications utilisées

Pour faire la simulation des températures de surface selon l'épaisseur des glaces par éléments finis, certaines hypothèses ont dû être posées. Par exemple, le coefficient de transfert de chaleur (H_{ia}) entre l'air et la surface de la glace, évalué à l'aide de l'équation 6, se trouvait généralement entre 15 et 18 $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ashton (1986) a pour sa part évalué un coefficient variant de 10 $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ à 25 $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, pour un vent allant jusqu'à 4 m/s. Marcotte (1975) a estimé une valeur de coefficient de transfert de chaleur de 28 $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ à Montréal en janvier. Les coefficients utilisés lors de la modélisation, pour le mois de mars, semblent donc cohérents.

La simulation par éléments finis utilise les conditions météorologiques précédant le vol aux six sites de référence choisis. Par contre, les glaces observées lors du vol à un endroit en particulier n'ont pas subi exactement cet historique de température, puisqu'il a suivi le cours du fleuve pendant ce laps de temps. Toutefois, comme chaque floe a son historique et qu'il est impossible de connaître l'historique de chaque floe, cette simplification a été utilisée. Il est considéré que les conditions météorologiques sont suffisamment semblables pour ne pas introduire une erreur considérable, surtout que les floes sont relativement minces et qu'alors les températures en surface atteignent plus rapidement leur valeur d'équilibre. Par ailleurs, Siles (2001) a démontré que les épaisseurs de glace sont principalement liées aux températures de l'air au cours des 24 dernières heures, bien que les températures sur une durée jusqu'à quatre jours, étant donné le parcours des glaces, influent sur leur épaisseur.

Une autre simplification utilisée est l'absence de fonte et d'épaississement des glaces. Toutefois, pour ce survol, les épaisseurs de glace étant faibles, le temps nécessaire à l'obtention d'un profil de température adéquat sur l'épaisseur de la glace est relativement court. La modification de l'épaisseur de la glace est donc minime pendant ce cours laps de temps.

Enfin, les courbes montrées à la figure 37 montrent que pour les faibles épaisseurs de glace, une erreur sur la température de surface mesurée se traduit en une faible erreur sur l'épaisseur mesurée. Ainsi, même si la température de surface était légèrement faussée lors

de la correction des températures, il n'en résulterait pas une erreur importante sur l'épaisseur. Cette affirmation n'est toutefois pas valide lorsque les glaces atteignent l'épaisseur approximative de 20 cm. La plupart des épaisseurs mesurées se trouvant sous cette valeur, les épaisseurs obtenues sont donc crédibles.

4.1.1.5.5 Concentration de glaces

Le quatrième graphique de la figure 38 montre la concentration superficielle des glaces sur le fleuve St-Laurent. La ligne bleue correspond à la moyenne mobile de la concentration et les lignes rouges correspondent à un écart-type au-dessous et au-dessus de la moyenne mobile. Les points en vert sont ceux qui ont été acquis lorsque l'angle de roulis était supérieur à 3°. Il a été estimé que lorsque l'angle de roulis est de 3°, l'erreur sur la concentration est d'environ 1%, alors qu'elle est de 20% pour les aires.

La concentration varie beaucoup le long du fleuve, pouvant passer de 0 à 100%. Évidemment, ces concentrations sont valides pour l'aire sondée et non pas pour la largeur entière du fleuve, puisque les images thermiques n'étaient pas acquises sur l'ensemble de la largeur. Certaines tendances sectorielles sont encore une fois visibles. Entre le km 0 et 60, les concentrations sont relativement élevées, près de 75%. Au Lac St-Pierre, les concentrations diminuent aux alentours de 50% puis sont très faibles près de sa sortie. Les écarts-types sont aussi plus importants dans le Lac St-Pierre. Près de Trois-Rivières, la concentration augmente, suite au rétrécissement du fleuve, et une concentration relativement constante à environ 60% est visible entre les km 120 et 180. Elle oscille ensuite jusqu'à Québec, tout en augmentant légèrement, étant donné le rétrécissement du fleuve dans ce secteur. Il faut aussi noter que les données acquises à un angle de roulis supérieur à 3° ne divergent pas des autres données.

Morse et coll. (2003) ont montré que les concentrations de glace le long du chenal de navigation du Lac St-Pierre sont élevées, atteignant près de 90% pendant tout l'hiver. Dans le jeu de données ici présenté, les concentrations dans ce secteur sont plus près de 50%, mais sont très étendues. Richard et Morse (2008) ont déterminé des concentrations de glace de surface près de la ville de Québec. Ils ont observé que les concentrations pouvaient changer très rapidement, selon la direction du courant, et qu'elle pouvait facilement passer

de 0 à 100% en quelques heures. Les concentrations de glace étaient aussi fortement liées aux températures d'air et aux conditions de vent.

Les cartes de reconnaissance des glaces situées à l'annexe 3 et décrites à la section 4.1.1.5.4 montrent que la concentration le long du fleuve se trouvait généralement autour de 80 à 90%, avec quelques secteurs entre 30 et 60%. Ces concentrations sont valides pour l'ensemble de la largeur du fleuve. En général, les concentrations tirées des données thermiques étaient supérieures à 50% et souvent près de 70-80%, malgré quelques pointes plus basses. Ces différences pourraient être dues à des conditions locales, puisque les concentrations sur les cartes de reconnaissance du Service canadien des glaces n'ont pas une grande résolution spatiale. Chaque carte couvre entre 15-20 km de biefs et ont entre 3 et 8 classes pour décrire la concentration des glaces. En comparaison, chaque image thermique couvre moins de 500 m de longueur et plus de détails peuvent donc être discernés.

4.1.1.5.6 *Quantité de floes*

Le cinquième graphique de la figure 38 montre le nombre de floes par hectare pour chaque image. Les points verts représentent les données acquises lorsque l'angle de roulis est supérieur à 3°, et ces données ne divergent pas des autres données. Des tendances sectorielles sont encore une fois visibles. Entre Montréal et le Lac St-Pierre, il y a en moyenne environ 25 floes par ha, mais il y a beaucoup de variations dans les données. Au Lac St-Pierre, il y a très peu de floes par ha. Entre Trois-Rivières et Portneuf, le nombre de floes remonte à près de 25 floes par ha. Vers Québec, le nombre se situe davantage entre 0 et 25.

Le nombre de floes par hectare peut être lié aux modifications de largeur du fleuve, aux changements de direction, aux marées présentes à l'aval de Trois-Rivières : toute force susceptible de déplacer ou de briser les floes est liée au nombre de floes visibles.

Dans l'analyse de cette statistique, il faut garder en mémoire que la séparation des floes faite à l'aide d'un seuil et d'opérations morphologiques n'est pas parfaite. Certains floes qui peuvent être dissociés à l'œil ne le sont pas nécessairement par le traitement numérique, étant donné leur proximité. À l'inverse, un floe unique pourra être séparé en deux floes

selon la forme qu'il a. Afin de vérifier la justesse de l'isolation des floes, un survol des segmentations mettant bien en évidence chacun des floes décelé par le traitement numérique a été effectué. Une qualification de la séparation des floes a été effectuée en fonction de ce qui est vu par l'œil. Une séparation pour laquelle certains floes étaient mal discernés, mais dont le résultat demeurait représentatif de l'image, était jugée bonne. Les séparations qualifiées de mauvaise qualité ont été éliminées des graphiques. Par ailleurs, il faut noter que même l'œil humain ne peut, dans certains cas, discerner si une forme contient deux floes ou un seul floe.

4.1.1.5.7 Aire moyenne des floes

Le sixième graphique de la figure 38 montre la taille moyenne des floes, en hectare. La taille des floes varie entre 50 m² à 5 ha. Les points verts, acquis lors de virages, ne divergent pas des autres données. En comparant avec le graphique du nombre de floes par hectare, on constate que les tendances sont inversement proportionnelles. Évidemment, plus les floes sont grands, moins il y en aura dans chacune des images (exemple à la figure 31). Lorsque les floes sont petits, il est possible qu'il y ait beaucoup de floes dans l'image, mais il pourrait n'y avoir tout de même que quelques petits floes et la concentration totale de glace serait moins élevée. Ces petits floes sont généralement dus au bris de floes de taille supérieure, par des conditions hydrauliques en surface ou le passage de navires.

Morse et coll. (2003) ont estimé le diamètre moyen des floes dans le Lac St-Pierre, en supposant qu'ils étaient circulaires, à 60 m. La surface associée est de 0,28 ha. Les tailles mesurées avec l'imagerie thermique, en général entre 0,1 et 0,4 ha, sont donc cohérentes.

Des cartes de reconnaissance des glaces du Service canadien des glaces (annexe 3), la taille de floe la plus souvent observée est de 2 à 20 m et peut aller jusqu'à 500 à 2000 m. L'aire associée varie donc de 3 à 315 m² (0,03 ha) jusqu'à 20 à 315 ha pour certains floes. L'aire de la nouvelle glace est généralement indéterminée. Les classes d'aire sur ces cartes sont plutôt larges et la comparaison est donc difficile.

4.1.1.5.8 Excentricité des floes

Le septième graphique de la figure 38 montre l'excentricité moyenne des ellipses qui ont les mêmes moments centraux de second ordre que les floes. La moyenne de l'excentricité

des floes dans chaque image est montrée sur le graphique. Les points verts, acquis lors de virages, ne divergent pas des autres données. L'excentricité est relativement constante, excepté que les valeurs sont davantage dispersées au Lac St-Pierre de même que près du km 200. Ces zones correspondent aux endroits où l'aire des floes est plus grande. Il faut toutefois mentionner que plus les floes sont grands, plus ils risquent de chevaucher la bordure de l'image sur une distance suffisamment grande pour influencer la forme déduite. Étant donné que les bords de l'image sont droits, et qu'une ligne a une excentricité égale à un, il est probable que l'excentricité de ces grands floes soit surestimée. Il est aussi possible que ces grands floes soient davantage oblongs que les autres. En supposant que ces floes tournent moins bien sur eux-mêmes que les autres floes, la friction et la fragmentation seront concentrées sur les mêmes faces et sculpteront les floes en forme oblongue.

4.1.1.5.9 Distribution des températures de surface sur chacun des floes

La distribution de températures sur la surface du floe est représentative de la distribution des épaisseurs et donc de la forme du floe sur un plan vertical. Par exemple, un floe plat aurait la même température de surface sur toute sa superficie. Un floe au contour plus épais aurait des températures de surface inférieures sur sa périphérie. Enfin, un floe dont le centre serait plus épais aurait les températures de surface les plus faibles à cet endroit.

Les images thermiques montrées de la figure 30 à la figure 34 sont utilisées pour tenter de définir la forme des floes sur le plan vertical. La première observation est qu'il n'y a pas de tendance générale quant à la distribution des températures sur la surface. Par exemple, la figure 32 présente de larges floes dont certains ont leurs températures minimales dispersées de façon inégale sur leur surface ou parfois en bordure des floes. La figure 31 montre de larges floes de température relativement uniformes, mais avec certaines bandes en périphérie plus froides. La figure 33 montre des grands floes de température assez uniforme, mais de petits floes très froids ayant une périphérie plus chaude. La figure 34 montre des amoncellements de glaçons de températures variables. La figure 30 montre des petits floes de température uniforme. À l'exception de glaces plutôt minces qui sont évidemment pratiquement planes, les températures sont distribuées de manière apparemment non organisée, et donc la forme des floes sur le plan vertical l'est tout autant.

4.1.1.5.10 Épaisseur moyenne des floes vs aire des floes

La figure 42 montre la relation entre l'épaisseur moyenne d'un floe et sa superficie, et ce pour chacun des floes observés pendant le survol du 13 mars 2008. Les points verts représentent toujours les points acquis lors des virages et ces points ne divergent pas des autres données.

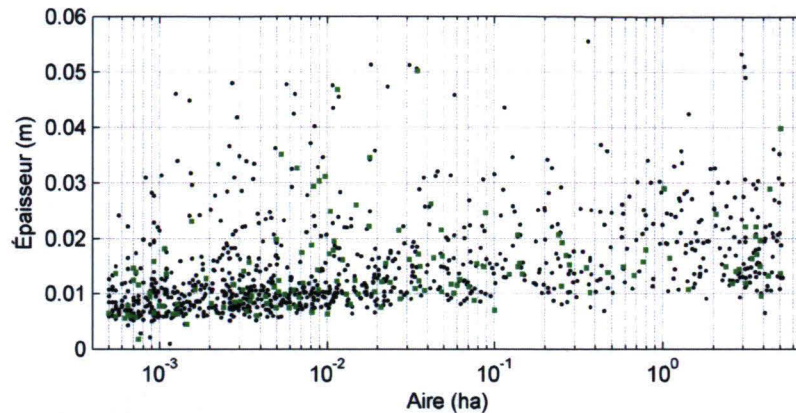


Figure 42 – Épaisseur moyenne des floes selon l'aire de chacun des floes observés lors du survol du 13 mars 2008

En général, les points sont relativement dispersés. Il semble tout de même y avoir une légère tendance à ce que les floes plus grands soient plus épais. Toutefois, cette tendance est très peu marquée. On remarque surtout que les points sont concentrés entre les aires de 0,001 à 0,01 ha, et que les floes de grande taille sont plus rares. Évidemment, avec les vitesses d'écoulement, les rétrécissements, les amas de glaces et le passage des navires, les impacts et forces appliquées sur les glaces limitent la présence de grands floes.

Un second agglomérat de points, bien que moins dense, est observé à la droite de la figure 42 pour ces grands floes. En effet, la taille maximale des images est de 6,1 ha, et elle est souvent inférieure suite à la troncature des images. La bordure de l'image vient aussi modifier la perception de la taille du floe par rapport à sa taille réelle. Ainsi, plusieurs floes voient leur taille limitée par la taille de l'image. Cette observation pourrait expliquer la densité plus importante de points près des aires de 4 à 5 ha. Ces points seraient en réalité dispersés davantage, sur des aires de floes plus grandes, si l'image couvrait une plus grande surface.

Bref, la tendance entre la taille et l'épaisseur d'un floe n'est pas marquée et dépend fortement d'une dynamique complexe dans laquelle interviennent plusieurs facteurs.

4.1.2 Résultats du 24 février 2009

L'analyse d'images et l'extraction de statistiques pour les campagnes de l'année 2009 ont été faites de façon similaire à celles de la campagne de 2008.

4.1.2.1 Exemple d'images thermiques

Des exemples d'images thermiques acquises le long du fleuve lors des vols aller et retour du 24 février 2009 sont montrés de la figure 43 à la figure 47. Les images originales se situent toujours à gauche alors que les images corrigées selon la méthodologie décrite à la section 2.1.4.2 sont montrées à droite. La température de ce qui a été jugé de l'eau se retrouve effectivement à une température de 0°C sur l'ensemble des images corrigées, contrairement à ce qui est observé sur les images originales. Les coordonnées centrales des images sont en Nad83 MTM8. Il s'agit toutefois de coordonnées approximatives, telles que décrites ultérieurement à la section 4.1.2.4. Les échelles des températures respectives aux images originales et corrigées sont également affichées, en degrés Celsius. Dans la description des images, les températures corrigées sont utilisées.

La figure 43(a-b) montre une image acquise près de Montréal lors du vol aller. Étant donné le décalage observé dans les images au vol retour, il a été estimé que le début de la prise d'image s'est fait environ 20 km plus loin. Près de Montréal, on observe de petits morceaux de glace de température élevée et des glaçons dont la température corrigée va jusqu'à -4°C. Au retour (figure 43 c-d), à 20 km de Montréal, la glace mince occupe une plus grande superficie. Il semble toutefois s'agir majoritairement de nouvelles glaces minces, dont la température va jusqu'à -2°C.

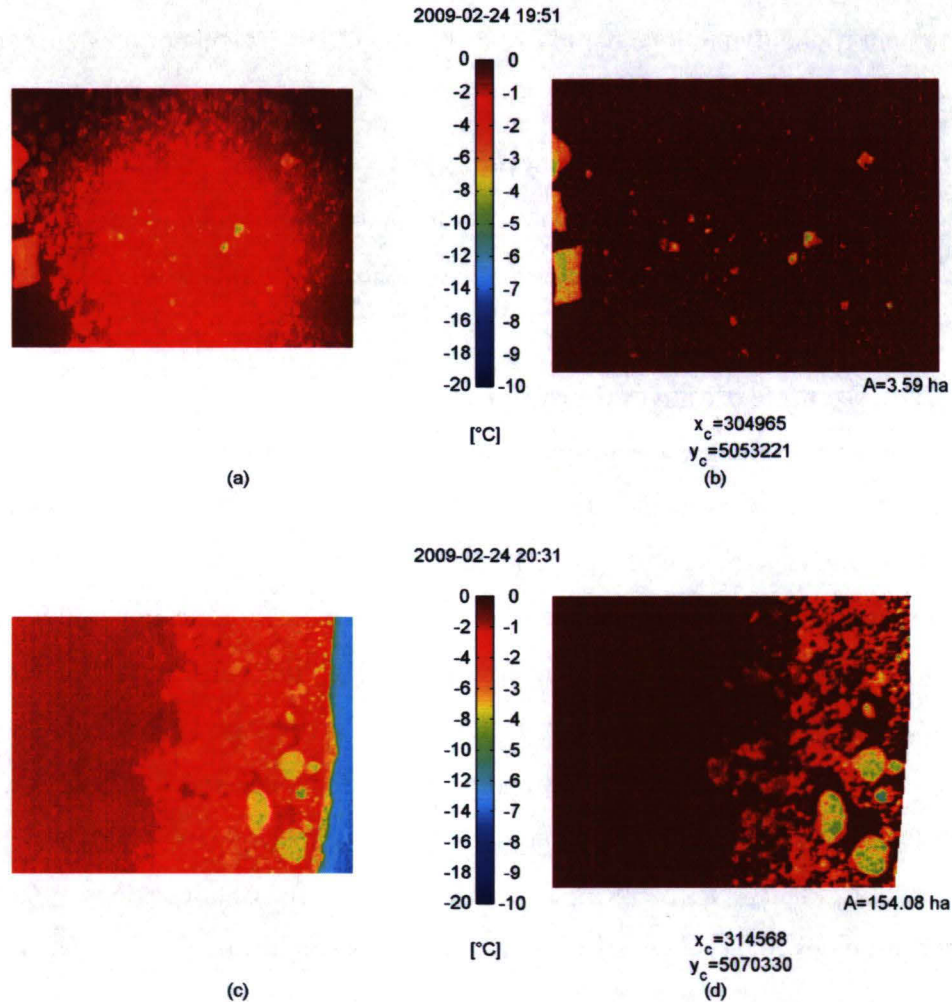


Figure 43 - Images thermiques: lors du vol aller, près de Montréal, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, à 20 km à l'est de Montréal, originale (c) et modifiée (d)

La figure 44 montre les images acquises dans le Lac St-Pierre. Les photographies acquises lors des vols aller et retour montrent une grande concentration de glaces dont la température de surface a de grandes variations tout en pouvant atteindre près de -10°C . On voit aussi que la différenciation des floes et l'estimation de leur aire est plus aisée dans les images prises à l'aller, puisque le vol s'est fait à plus basse altitude et que la superficie couverte par chaque image est inférieure. On voit toutefois que les images (c) et (d) permettent de survoler l'ensemble de la largeur du chenal de navigation ouvert dans le Lac St-Pierre.

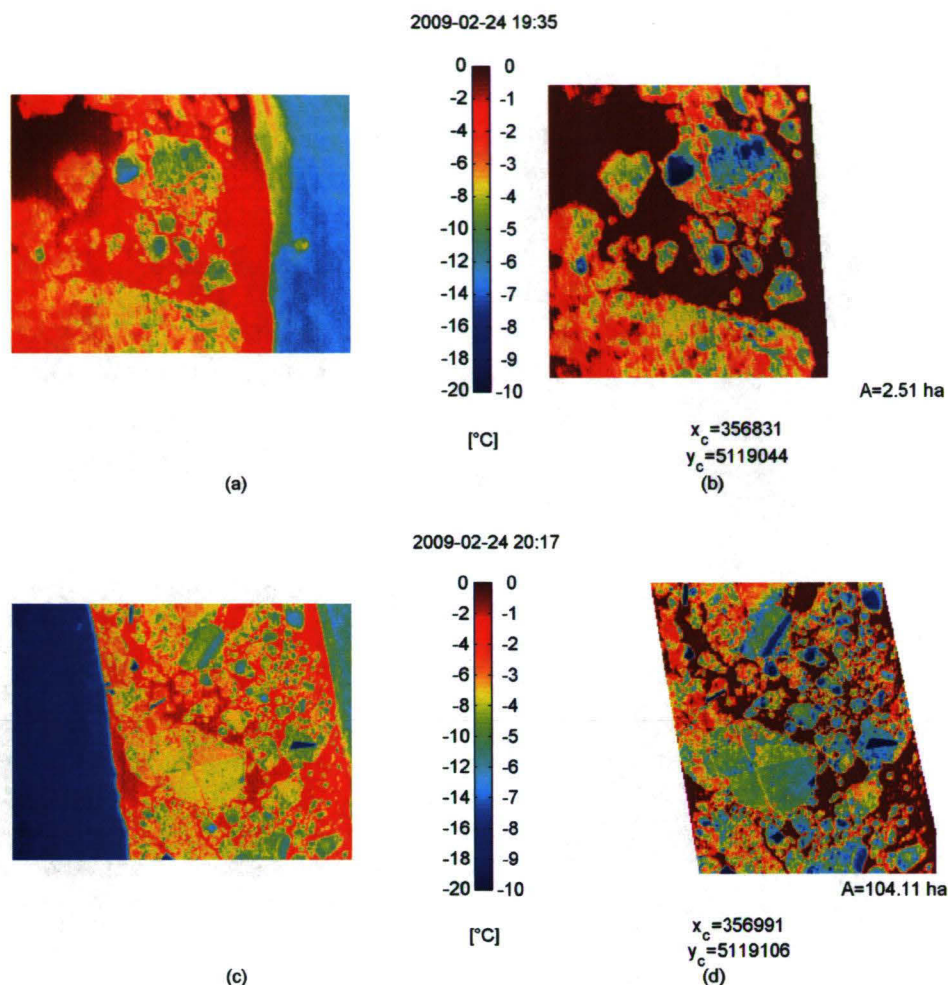


Figure 44 - Images thermiques au Lac St-Pierre : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

La figure 45 montre des images acquises près de Trois-Rivières lors des vols aller et retour. Les teintes et formes semblables montrent que les caractéristiques des glaces lors des vols dans les deux directions sont cohérentes. De nombreux floes de taille moyenne, dont la température varie de -1 à -6°C en grande partie sont observés.

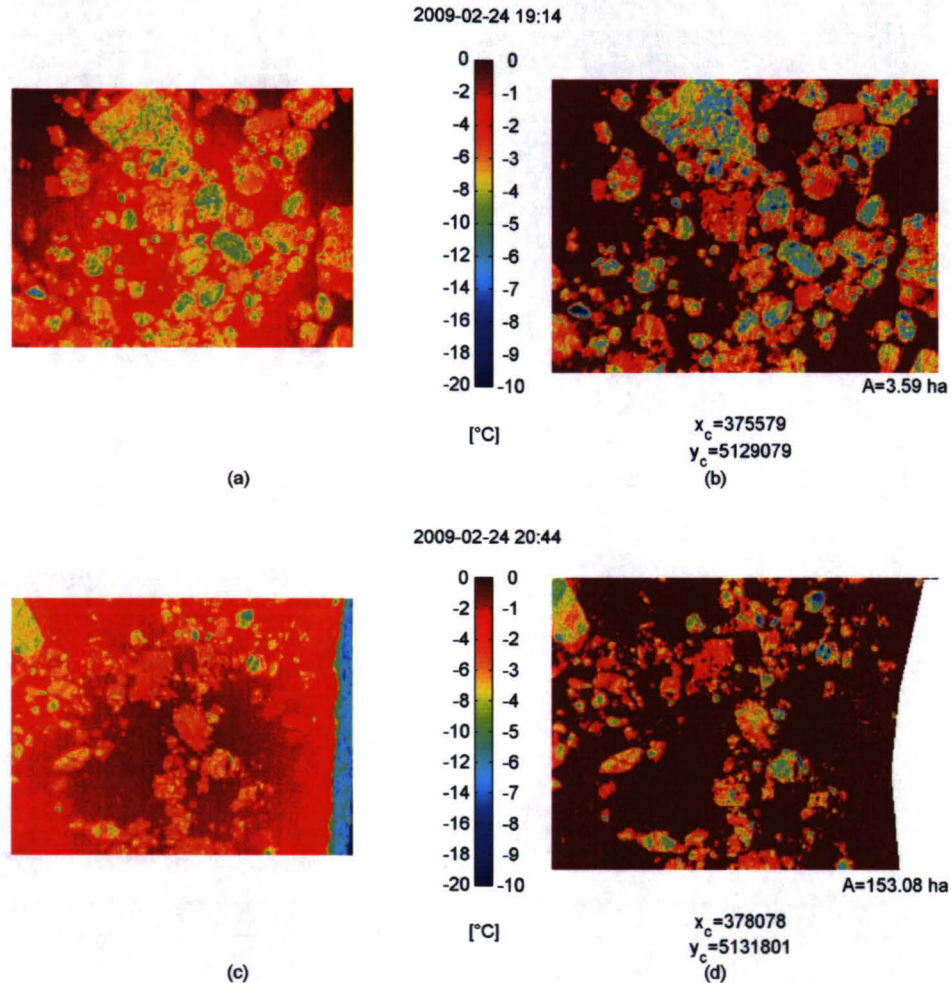


Figure 45 - Images thermiques près de Trois-Rivières : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

La figure 46 montre des images acquises près de Portneuf. Les températures de surface observées se situent entre -1 et -5°C à l'aller comme au retour. Les floes observés à l'aller semblent être mieux développés et non pas des amas de petits glaçons tels qu'observés au retour. Il faut souligner que la position a été approximée dans chacun des cas et que les images peuvent donc avoir été prises au-dessus de secteurs différents, bien qu'estimés à proximité de Portneuf. La différence d'altitude peut aussi jouer sur la détection et la différenciation des floes, mais ne devrait pas modifier de façon importante la forme des floes perçus.

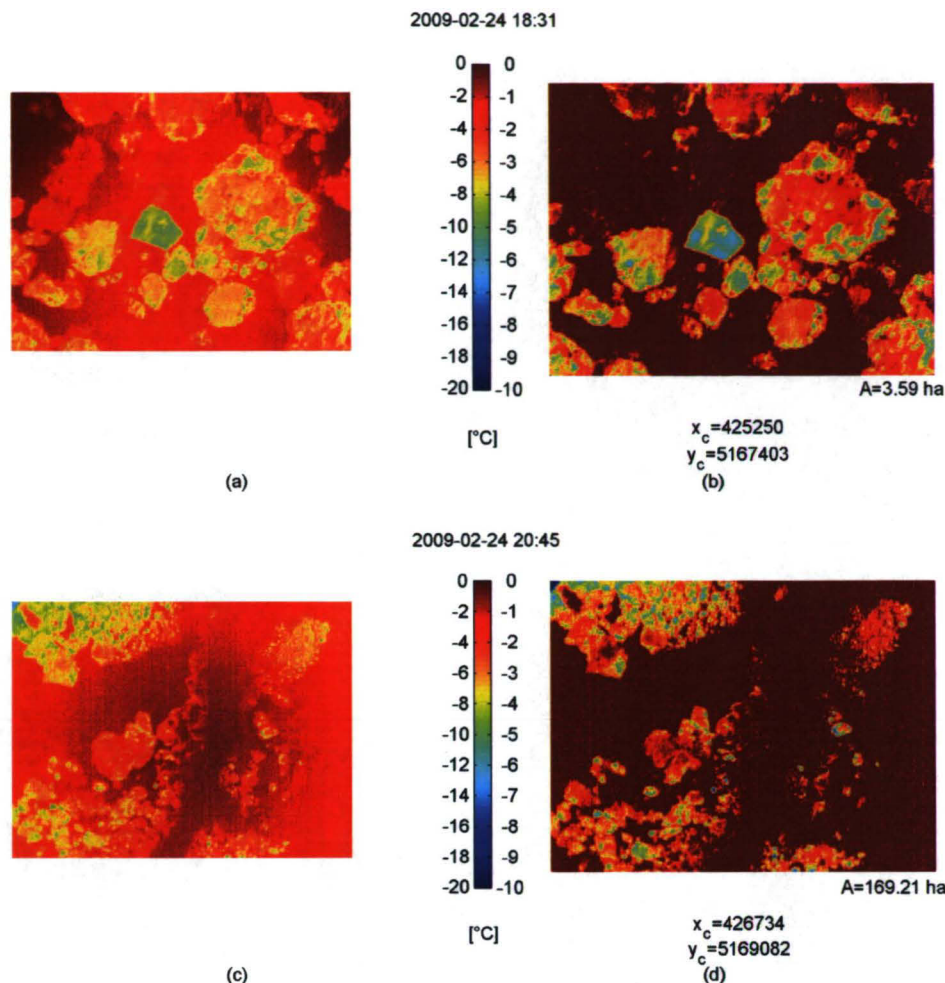


Figure 46 - Images thermiques près de Portneuf : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

La figure 47 montre des images acquises à proximité de la ville de Québec. À l'aller, des floes de températures de -1 à -6 °C sont observés. Au retour, les températures peuvent descendre jusqu'à environ -8 °C. Il faut noter que la température de l'air, détaillée à la section 4.1.2.2, subit une baisse lors du vol. C'est à Québec, puisque le survol aller et le survol retour y sont plus espacés dans le temps, que cette baisse de température est plus marquée. La forme des floes est sensiblement la même. La différence d'échelle permet d'apprécier le détail pouvant être obtenu lors du vol à plus faible altitude.

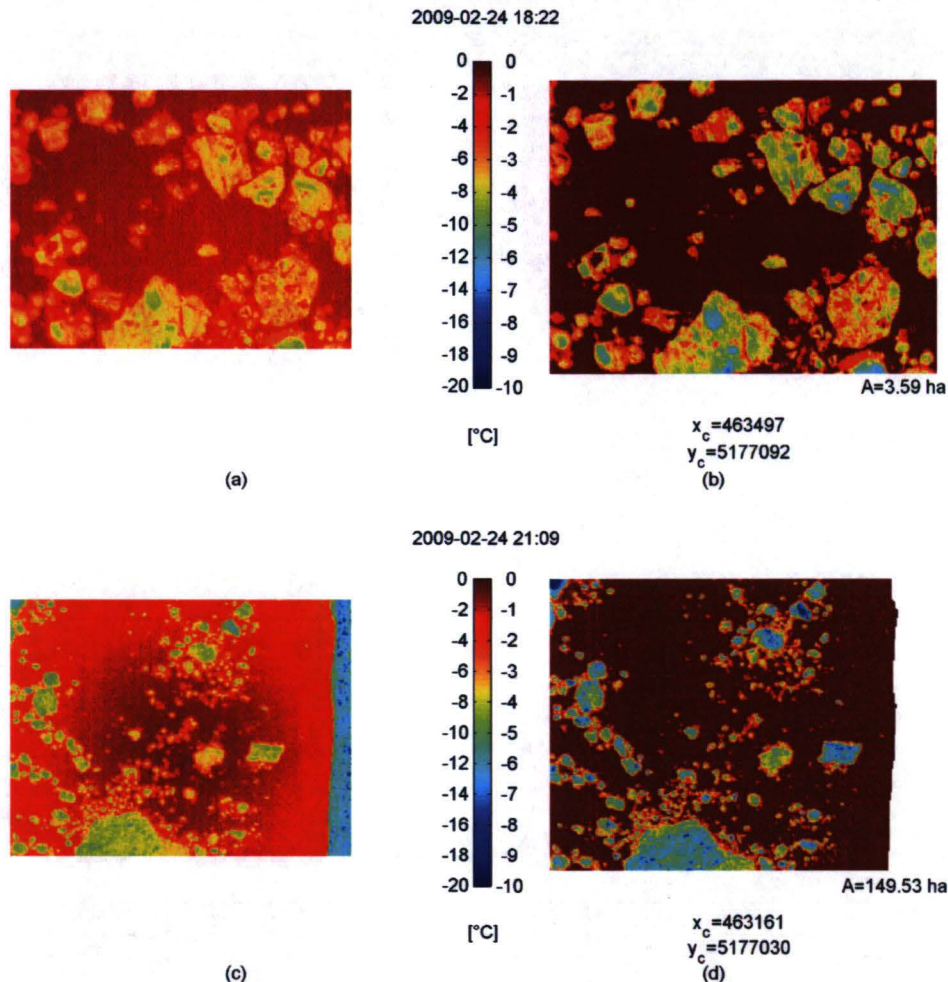


Figure 47 - Images thermiques près de Québec : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

4.1.2.2 Température lors de la semaine précédant le vol

La figure 48 montre les températures de l'air telles qu'obtenues des stations météorologiques d'Environnement Canada, à Montréal (Mc Tavish), Trois-Rivières et Québec (Beauport). Il en ressort que des températures supérieures à 0°C , antérieures au vol, n'ont été observées que les 18 et 19 février, dans les trois villes. Si des températures aussi élevées avaient été observées quelques heures avant le vol, le profil des températures dans la glace aurait pu être affecté dans une mesure qui empêche la détermination de l'épaisseur, selon l'ampleur de cette dernière.

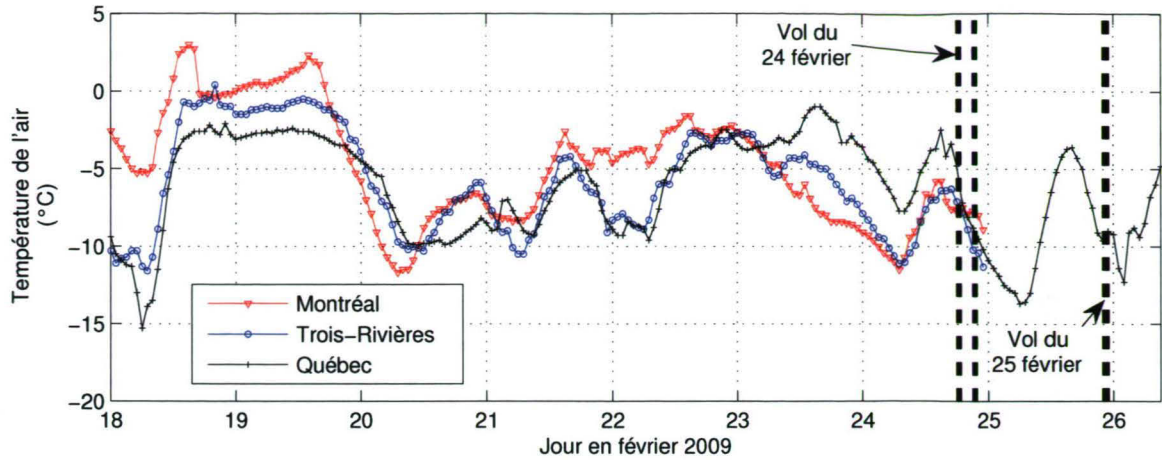


Figure 48 – Température de l'air lors de la semaine précédant le vol de février 2009

La figure 49 fait un zoom sur les températures de l'air lors de la journée du 24 février 2010. On observe tout d'abord une diminution des températures jusqu'à environ 8h du matin, puis une augmentation jusqu'à environ 15h, suivie d'une seconde diminution. Il y a donc une baisse de température pendant le vol qui est fait de 18h20 à 21h25. En moyenne, pendant le survol, la température de l'air est de -7°C .

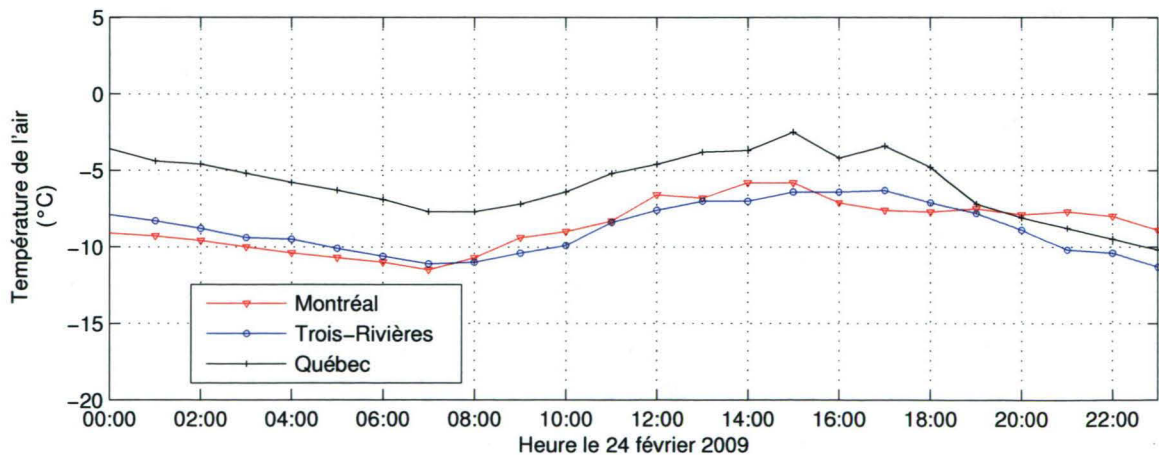


Figure 49 – Températures de l'air pendant la journée du 24 février 2009

4.1.2.3 Relation température de surface/épaisseur des glaces

La figure 50 montre la relation entre la température de surface des glaces et leur épaisseur, pour la ville de Québec, lors de la journée du 24 février 2009. Ces courbes ont été obtenues à l'aide de la modélisation décrite aux sections 3.1.2 et 3.1.3. L'impact des changements de températures de l'air observés pendant la journée (figure 49) y est évident. À minuit, lorsque la température de l'air est d'environ -3°C , le graphique de la figure 50 montre que la température de surface d'une glace d'environ 0,5 m d'épaisseur sera du même ordre qu'une glace beaucoup plus épaisse, jusqu'à trois mètres d'épaisseur. Avec la chute de température des premières heures, la température de surface des glaces plus épaisses va se refroidir et les températures de surface seront donc davantage différentes, améliorant la différenciation des épaisseurs. Vers 9h, la température de l'air commence à se réchauffer. L'impact sur la température de surface des glaces va se faire sentir principalement au cours de la dixième heure. Il s'agit donc d'un point tournant et il s'agit aussi du moment où la relation température de surface / épaisseur est optimale pour la différenciation des épaisseurs et pour l'épaisseur maximale pouvant être détectée.

La figure 50 permet aussi d'apprécier la relation et la modification de la relation température vs épaisseur des glaces lors du vol, soit de 18h20 à 21h25. En effet, la relation est considérablement modifiée. Au départ du vol, une glace d'environ 0,5 m a une température d'environ -5°C . Au retour, vers 21h30, une glace de cette même épaisseur aura plutôt une température de l'ordre de -8°C . Il est donc mis en évidence par un tel graphique que les simulations thermiques permettant de faire la relation entre les températures de surface et les épaisseurs doivent absolument être générées sur l'ensemble du temps d'acquisition de données, s'il s'étend sur plus d'une heure, afin de tenir compte de l'aspect dynamique du problème.

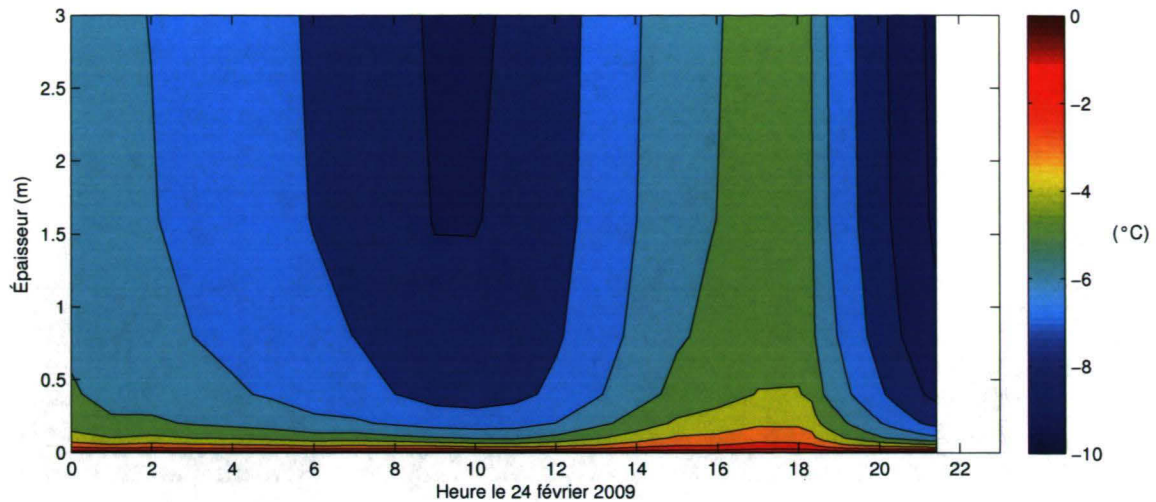


Figure 50- Températures de surface des glaces selon leur épaisseur lors de la journée du 24 février 2009, à Québec

La figure 51 montre la position des villes de références utilisées sur la figure 52 pour montrer plus explicitement la relation entre la température de surface des glaces et leur épaisseur, le long du fleuve. Dans la figure 52 (a), les courbes obtenues pour la simulation thermique jusqu'à une épaisseur de 5 m sont montrées. Toutefois, il est évident qu'à partir d'environ 1 m d'épaisseur, il sera impossible de faire la différenciation des épaisseurs. Les graphiques présentés en (b) et en (c) montrent respectivement les relations lors des vols aller et retour. Les courbes ici montrées sont celles obtenues à la hauteur de chacune des municipalités lors du passage de l'avion. La variation temporelle et spatiale des courbes est donc considérée. Les cercles pleins montrent les limites de validité de chacune des courbes. Bien que plusieurs critères de validité explicités à la section 3.1.5 aient été utilisés, le critère généralement utilisé pour les courbes montrées est celui qui dit que lorsqu'une différence de température de $0,1^{\circ}\text{C}$ engendre une différence d'épaisseur de 0,1 m, la limite de validité doit être imposée. Les épaisseurs maximales discernables varient donc entre 50 cm et 75 cm et varient selon les lieux et le moment. La figure 52 met donc l'accent sur l'importance de développer plusieurs relations température de surface vs épaisseur le long du fleuve, sinon une erreur importante serait générée.

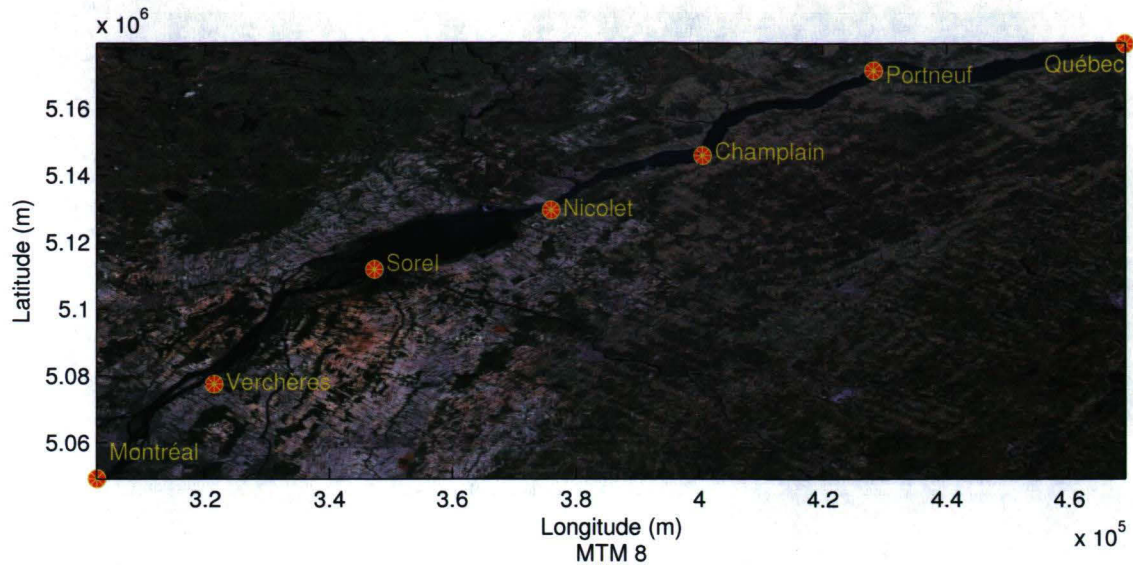


Figure 51 – Villes de référence pour les courbes d'épaisseur selon les températures de surface des glaces

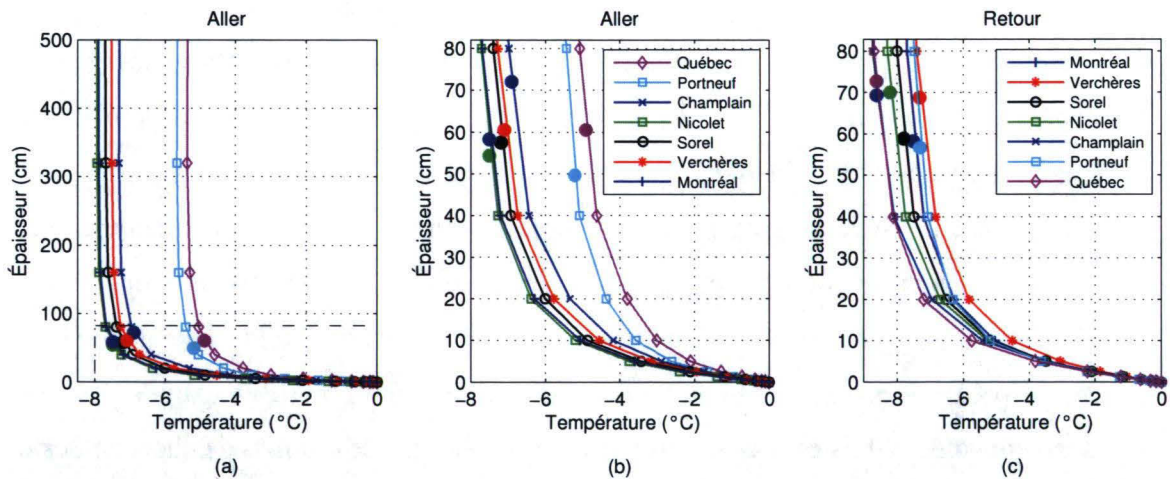


Figure 52 – Courbes de l'épaisseur selon la température de surface des glaces le long du fleuve : (a) Courbes à l'aller jusqu'à une épaisseur de 5 m, (b) Courbes dans les limites de validité pour l'aller, (c) Courbes dans les limites de validité pour le retour

4.1.2.4 Statistiques sur les glaces

La figure 53 montre les statistiques obtenues pour les données du vol aller du 24 février 2009, alors que la figure 54 montre les statistiques pour le vol retour. La méthode utilisée pour extraire les statistiques est la même que pour les données de 2008. Les statistiques surfaciques tiennent compte du changement d'altitude de vol entre l'aller et le retour.

Toutefois, l'aspect concernant l'angle de l'avion lors des changements de direction n'est pas inclus à l'analyse. En effet, les positions ont été enregistrées pour environ une centaine d'images, alors que le jeu de données pour l'aller comportait 5633 images. De même au retour, aucune coordonnée n'a été acquise pour les 4339 images. Suite au traitement des images, 5146 images ont été conservées pour le vol aller (91%) et 3393 images pour le vol retour (78%). Les coordonnées pour chacune des images ont été générées à partir des coordonnées de l'année 2008, puisque la ligne de vol était similaire. Les images prises à Québec, Trois-Rivières et Montréal, par la représentation d'infrastructures facilement reconnaissables (ponts et La Ronde), ont servi de limites connues pour interpoler entre elles. Les positions ont donc été interpolées linéairement entre les positions considérées connues. Pour le vol retour, un certain délai entre la fin de prise de photos lors du vol aller et le début des images lors du retour, associé en partie à la prise d'altitude, a été constaté. La position effective du début des données a été estimée à partir du temps écoulé et de la vitesse moyenne de vol mais demeure approximative. Pour l'ensemble des points, la position géographique est approximative mais ne peut pas être largement faussée. Elle est donc utilisée pour situer les données le long du fleuve comme pour les données de 2008, où toutes les coordonnées étaient disponibles.

4.1.2.4.1 Température médiane de surface des glaces

Le premier graphique de la figure 53 montre la température de surface corrigée médiane des glaces lors du vol aller du 24 février 2009 effectué à une altitude de 245 m. La température varie de -5 à 0°C. Les mêmes tendances sectorielles que celles observées pour le vol du 13 mars 2008, montrées à la figure 38 à la section 4.1.1.5.1, sont présentes. Près de Montréal et jusqu'au km 50, les températures les plus chaudes sont observées, aux alentours de -1°C. Du km 50 à l'entrée du Lac St-Pierre, les températures diminuent jusque vers -4°C. Les températures augmentent ensuite à partir de la sortie du Lac St-Pierre jusqu'au km 150. Une légère diminution des températures se fait alors sentir jusqu'à Québec.

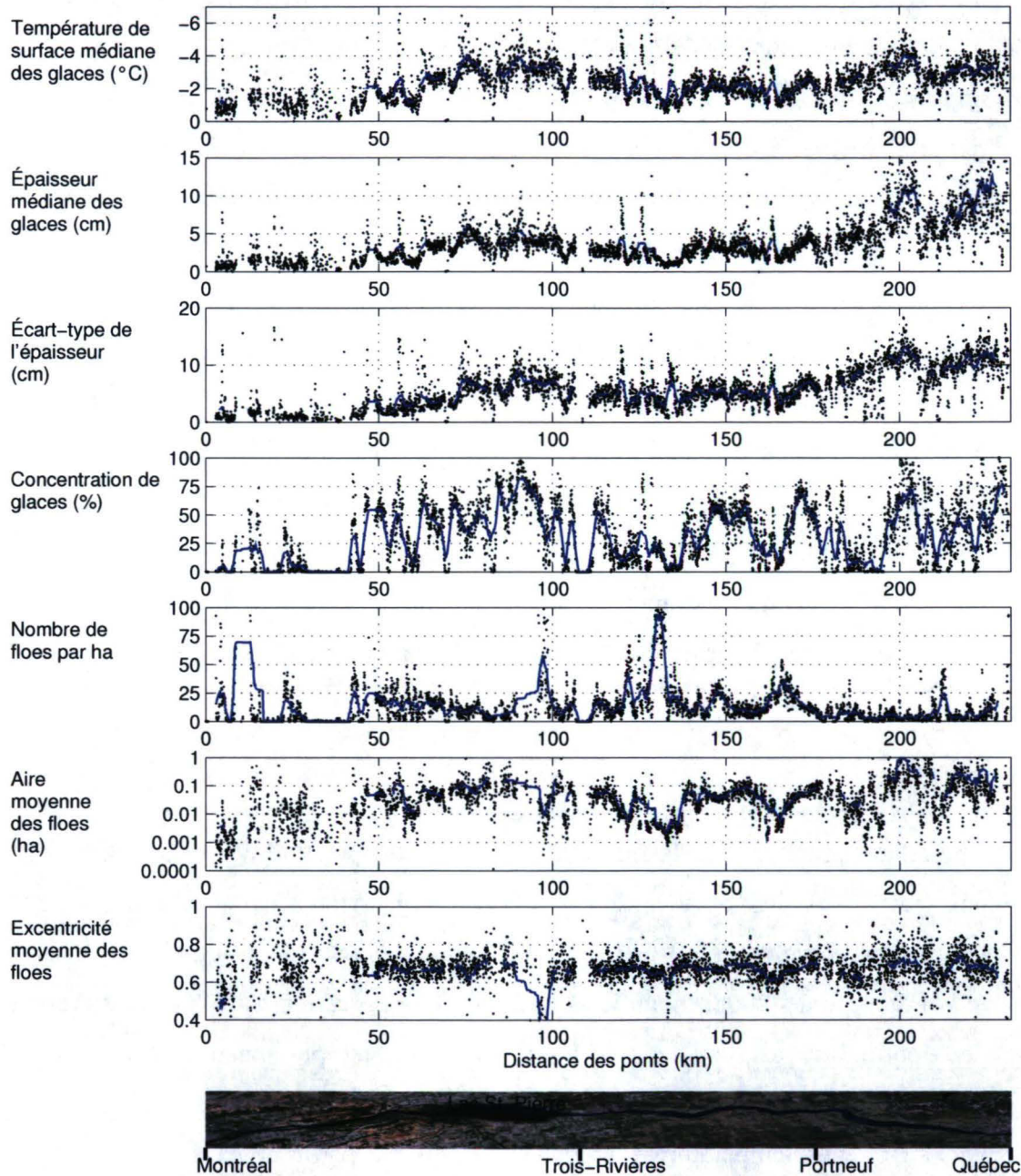


Figure 53 – Statistiques sur les glaces le long du fleuve St-Laurent lors du vol aller du 24 février 2009

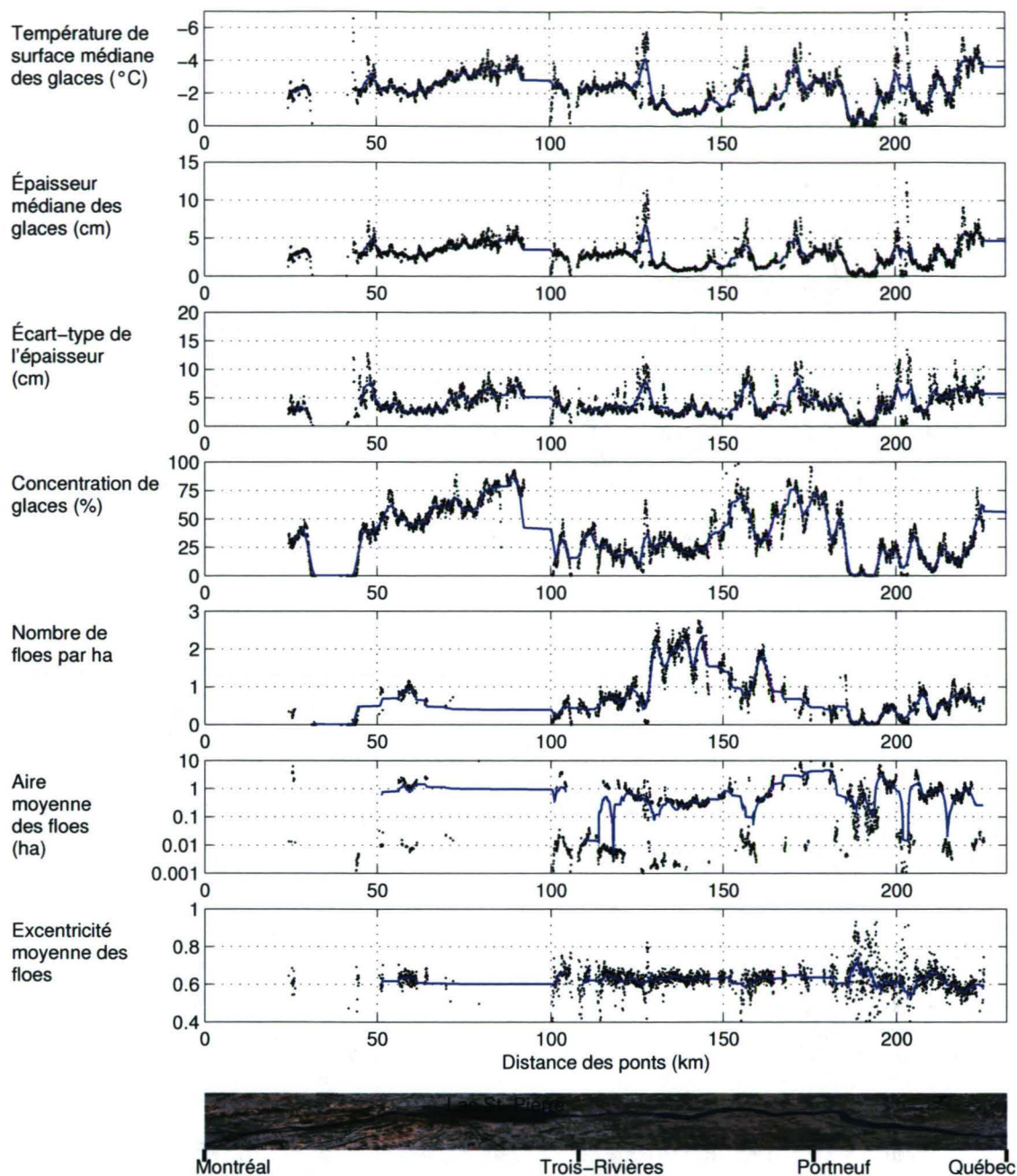


Figure 54 - Statistiques sur les glaces le long du fleuve St-Laurent lors du vol retour du 24 février 2009

La figure 52 montre quant à elle que pour une même épaisseur, la température de surface d'une glace d'épaisseur constante était inférieure à Montréal que dans les autres localités lors du vol aller. Ainsi, des températures de surface médianes des glaces plus chaudes sont nécessairement liées à des épaisseurs moindres, et non pas à une relation épaisseur/température différente.

Le premier graphique de la figure 54 montre les températures médianes de surface pour le vol retour effectué à 1676 m d'altitude. Comme pour le vol aller, les températures de surface se trouvent généralement entre -6 et 0°C. Toutefois, on constate que les points sont moins dispersés que pour le vol aller. Cette particularité, partiellement attribuée au nombre moins important de points (3393 contre 5146), est aussi présumée être liée à l'altitude de vol. En effet, pour les images du vol retour, puisqu'il a été effectué à une plus grande altitude, chaque image et chaque pixel couvre donc une plus grande aire. La température par pixel correspond donc à une moyenne de température d'une plus grande surface et les valeurs extrêmes sont atténuées. De même, lorsque la température médiane par image est obtenue, cette valeur est davantage moyennée. Les résultats sont donc plus concentrés autour de la ligne bleue qui est une moyenne mobile entre les points.

Les tendances observées en termes de variations de température de surface pour les vols du 13 mars 2008 et du 24 février 2009 aller sont partiellement retrouvées. Les données près de Montréal ne peuvent être comparées puisqu'absentes lors du vol retour. Du km 50 jusqu'au milieu du Lac St-Pierre, les températures diminuent. Elles augmentent ensuite jusqu'au km 150. Ensuite vers Québec, des variations importantes accompagnées d'une baisse globale de température à partir du km 190 sont observées.

4.1.2.4.2 *Épaisseur des glaces*

Le deuxième graphique de la figure 53 montre les épaisseurs des glaces associées aux températures médianes du premier graphique, pour le vol aller. Les épaisseurs sont les plus faibles à proximité de Montréal, en deçà de 5 cm. Au Lac St-Pierre, les épaisseurs sont d'environ 5 cm. De la sortie du Lac St-Pierre jusqu'au km 175, les épaisseurs sont généralement sous 5 cm, bien que plus élevées que celles observées près de Montréal. Au-delà du km 175, les épaisseurs médianes augmentent considérablement, jusqu'à atteindre 15 cm. La dispersion des données est d'ailleurs plus importante dans ce dernier tronçon.

Le deuxième graphique de la figure 54 montre les épaisseurs de glace mesurées lors du vol retour. Globalement, les épaisseurs sont plus faibles. Au Lac St-Pierre, les épaisseurs sont encore d'environ 5 cm. Entre l'exutoire du Lac St-Pierre et le km 175, les épaisseurs sont bien en deçà de 5 cm, à l'exception de 3 pics. Du km 175 à Québec, on observe une

augmentation des épaisseurs, mais elles n'atteignent pas les 15 cm observés à l'aller. Cette différence peut facilement être expliquée grâce à la figure 52. Sur cette figure, à Québec, pour une température constante de -4°C par exemple, l'épaisseur de glace perçue au vol aller est de l'ordre de 22 cm alors qu'elle n'est que de 7 cm pour le vol retour. La chute de température d'air explique ce phénomène. Or, les températures mesurées sont du même ordre au vol aller comme au vol retour. Il en résulte donc des épaisseurs plus faibles au retour. D'environ 18h le 24 février à 2h le 25 février, la marée était descendante. Les floes épais observés au départ de Québec ont donc pu réellement être évacués vers l'aval et non observés au retour. Il est aussi possible que l'altitude de vol plus élevée, puisque non seulement elle lisse les données mais peut aussi augmenter légèrement les températures perçues, ait influé sur les résultats. En effet, il est présumé que les températures mesurées peuvent être un peu plus élevées, puisque chaque pixel couvre une plus grande surface et que les pixels en bordure des glaces peuvent donc intégrer davantage d'eau. Selon la taille des floes, cette influence sera plus ou moins importante.

La figure 55 montre les épaisseurs médianes et maximales observées lors des vols aller et retour. Une explication est nécessaire pour justifier les sauts observés dans les valeurs d'épaisseur maximale. Tel que détaillé à la section 3.1.5, des limites ont été établies selon divers critères pour assurer la justesse des épaisseurs obtenues. L'un de ces critères, et celui le plus souvent rencontré, est le fait qu'une température de surface inférieure de $0,1^{\circ}\text{C}$ à la température mesurée ne doit pas résulter en une différence d'épaisseur plus grande que 0,1 m. Or, lorsque les limites des courbes d'épaisseur vs température de surface ont été établies, des intervalles de $0,1^{\circ}\text{C}$ ont été utilisés. Une même température de surface limite était donc utilisée pour plusieurs images consécutives, jusqu'à ce qu'elle ne soit plus valide. La ligne verte sur les graphiques de la figure 55 représente les températures limites de validité. Les sauts liés aux intervalles de $0,1^{\circ}\text{C}$ y sont bien visibles. Pour chacun des changements de température limite, une différence d'épaisseur limite d'environ 0,1 m est donc observée. Si une discrétisation plus fine des températures avait été utilisée pour la détermination des limites de validité, ces sauts seraient moins importants.

Autant au vol aller qu'au vol retour, les épaisseurs maximales se sont situées entre 60 et 70 cm. Lorsque ces épaisseurs maximales se situent dans la partie supérieure du graphique, il

s'agit des limites du modèle et non pas de l'épaisseur maximale réellement présente sur le site. Si la limite est atteinte, il est fort probable que des glaces aient effectivement des épaisseurs plus grandes. Il est par contre impossible de les distinguer avec la technologie utilisée, en fonction des hypothèses posées et des conditions météorologiques présentes. Il est aussi à noter que ces limites de validité n'avaient pas été utilisées pour les données de 2008. Les épaisseurs maximales obtenues alors étaient davantage près de 30 cm, ce qui correspond à la moitié des épaisseurs pouvant être perçues en 2009.

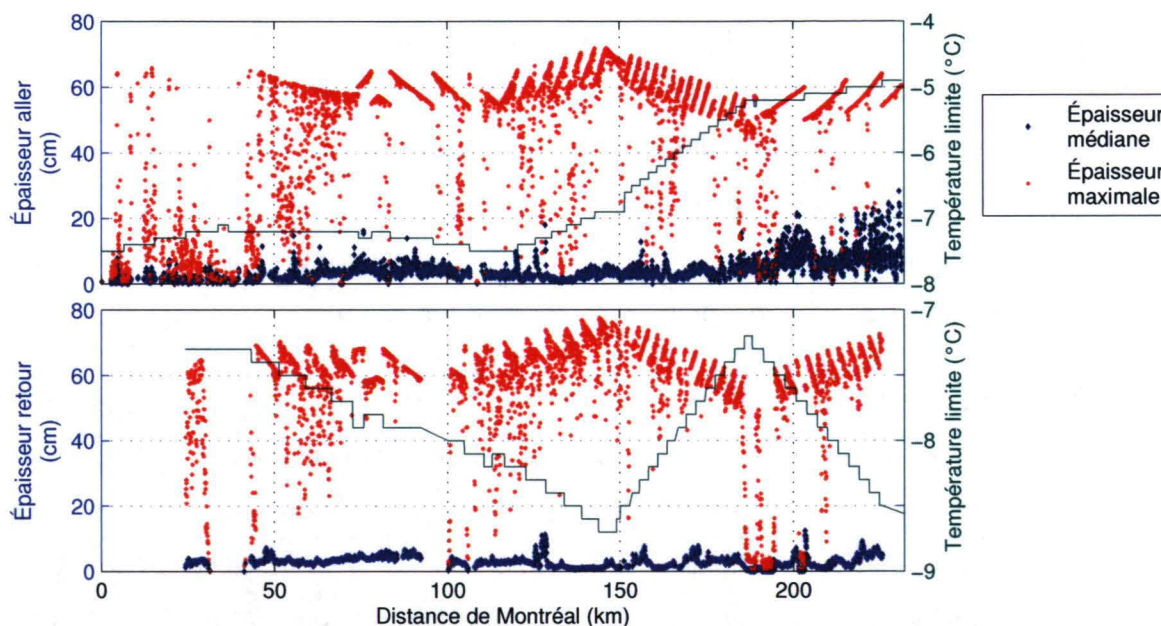


Figure 55 – Épaisseur médiane et maximale le long du fleuve pour le vol du 24 février 2009

4.1.2.4.3 Écart-type de l'épaisseur des glaces

En ce qui concerne l'écart type pour le vol aller, montré sur le troisième graphique de la figure 53, il a un comportement semblable à celui observé pour les données de 2008. En présence d'une épaisseur médiane faible, l'écart-type de l'épaisseur est également faible, et vice-versa pour les épaisseurs médianes plus fortes. Le troisième graphique de la figure 54 montre l'écart-type pour le vol retour. Le même comportement est observé.

La figure 56 montre plus explicitement cette relation. Sur cette figure, l'écart-type par image est comparé à l'épaisseur médiane par image. Les données du vol aller du 24 février 2009 sont montrées au graphique supérieur, alors que les données du vol retour sont

montrées au graphique inférieur. À une épaisseur médiane plus forte correspond effectivement un écart-type plus grand. Si l'épaisseur médiane est plus forte, il y a non seulement des floes plus épais, mais fort probablement des floes plus épais dispersés à travers des floes plus minces. Chaque floe peut aussi être non régulier et avoir une distribution d'épaisseur plus variée que pour un floe plus mince. La relation montrée à la figure 56 concorde donc avec ce qui est attendu.

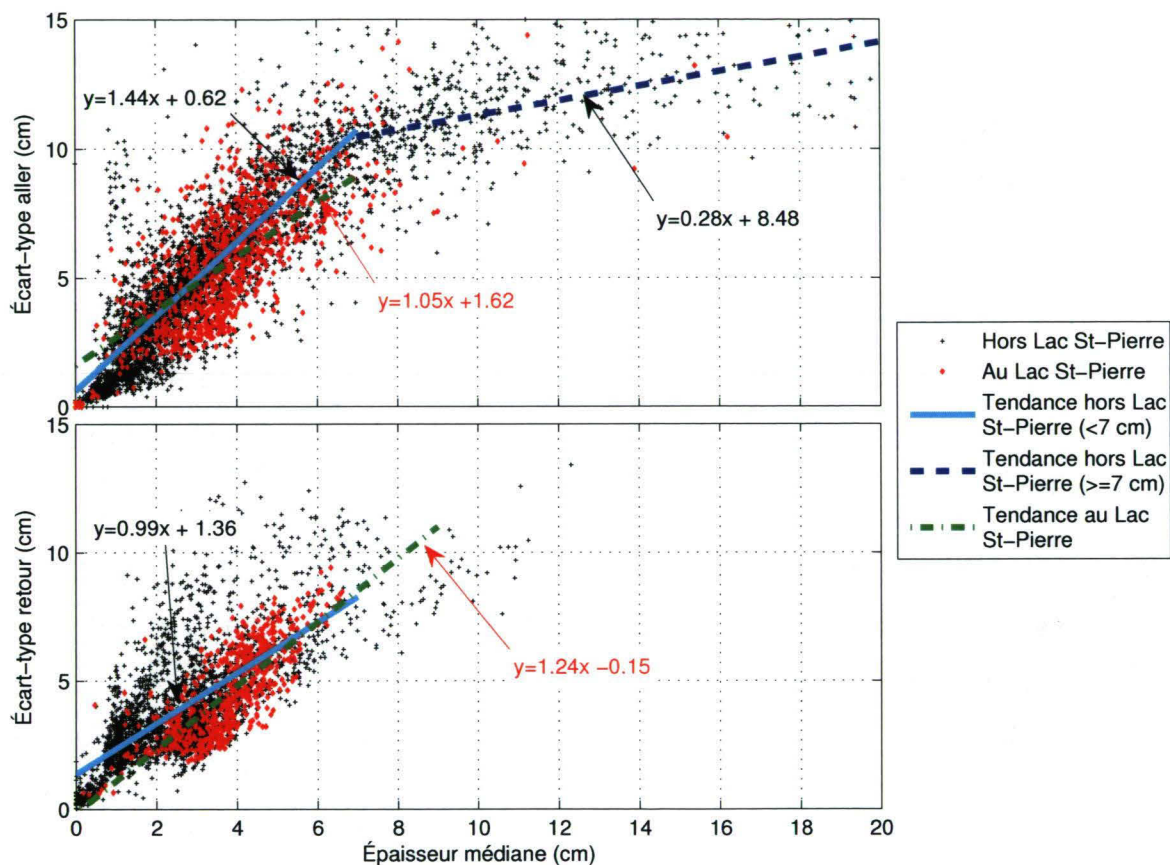


Figure 56 – Relation entre l'écart type de l'épaisseur des glaces et l'épaisseur médiane par image pour le 24 février 2009 aller et retour

Pour les données du vol aller, deux droites ont été utilisées pour montrer la tendance de l'écart-type selon l'épaisseur. En effet, pour les épaisseurs au-dessus de 7 cm, il semble que l'écart-type n'augmente plus aussi rapidement en fonction de l'épaisseur médiane. Cette observation n'a pas pu être confirmée pour les données du vol retour puisqu'il n'y avait pas de données pour les épaisseurs plus grandes que 10 cm. Une explication possible est que si l'épaisseur médiane est plus importante, il y a peut-être davantage de floes épais dont

l'épaisseur réelle dépasse la limite de validité des épaisseurs. Les valeurs extrêmes sont donc éliminées et l'écart-type diminue. En 2008, les pentes observées pour les épaisseurs inférieures à 7 cm étaient de 0,71 au Lac St-Pierre et 0,96 hors Lac St-Pierre, plutôt que de 1,05 et 1,44 à l'aller et 1,24 et 0,99 au retour. Bien que différentes, elles ne sont pas si éloignées et la grande dispersion des points est présente dans tous les cas.

4.1.2.4.4 Validation des épaisseurs des glaces

Les épaisseurs médianes sont relativement faibles, bien que plus élevées que celles observées lors du vol de mars 2008. Le vol ayant été effectué tard dans la saison hivernale en 2008, en présence de conditions météorologiques moins sévères, ces résultats sont plausibles. De la même façon qu'il a été fait pour les données de 2008, quelques méthodes sont ici utilisées pour valider les épaisseurs obtenues.

Comparaison avec la méthode des degrés-jours

L'équation 13 développée par Hausser et coll. (1986), montrée à la section 4.1.1.5.4 est utilisée pour déterminer l'épaisseur théorique possible des glaces à différents endroits dans le fleuve St-Laurent.

Pour la région de Montréal, en supposant que les floes ont un jour, l'épaisseur devrait se trouver près de 4 cm selon l'équation de Hausser. L'épaisseur médiane observée près de Montréal était entre 0 et 2,5 cm, alors que l'épaisseur maximale variait de 0 à 60 cm. Près de Québec, pour des floes d'âge variant de un à cinq jours, l'équation de Hausser donne des épaisseurs variant de 3 à 12 cm. Les épaisseurs médianes observées près de Québec étaient entre 5 et 20 cm, alors que les épaisseurs maximales se trouvaient près de 60 cm. En termes d'épaisseur médiane, le résultat est similaire à ce que prédit l'équation. Par contre, en termes d'épaisseur maximale, les épaisseurs observées sont plus importantes.

Comparaison avec des observations antérieures

Morse et coll. (2003) font état des épaisseurs de glace observées au Lac St-Pierre à partir d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) et d'un IPS (Ice Profiling Sonar). De la fin février au début mars, les épaisseurs moyennes étaient de 10 à 50 cm. Tel que spécifié à la section 4.1.1.5.4, ces mesures incluent la « slush », alors que la couche solide de glace a entre 5 et 30 cm. Les mesures par imagerie thermique sont encore une fois dans le même

ordre de grandeur, puisque l'épaisseur médiane obtenue au Lac St-Pierre est d'environ 5 cm. L'épaisseur maximale obtenue des données thermiques est toutefois plus grande, car elle est d'environ 60 cm, définie par la limite de validité.

Comparaison avec les cartes de reconnaissance des glaces (Garde côtière canadienne)

Les cartes générées pour le 24 février 2009 par le Service canadien des glaces d'Environnement Canada, l'ont été généralement pour l'avant-midi. Les cartes utilisées sont montrées à l'annexe 4.

Entre Varennes et Contrecoeur (figure 101), la concentration des glaces est d'environ 70%. Sur ce, 10% des glaces sont des sarrasins de faible épaisseur (<1 m) et les autres 60% sont du nilas en glaçons (2-20 m) ou petits floes (20-100 m). De Contrecoeur à Sorel (figure 102), la concentration des glaces est généralement de 90%, dont 10% sont des sarrasins de faible épaisseur et les autres 80% sont du nilas ou de la nouvelle glace (<10 cm) sous forme de glaçons ou de floes moyens (100-500 m). Il y a aussi en très faible concentration de la glace entre 30 et 70 cm d'épaisseur. Au Lac St-Pierre (figure 103), dans les zones non occupées par la glace de rive, les concentrations de glace varient de 60 à 90%, dont 10% sont des sarrasins minces. Le reste est du nilas sous forme de glaçons (2-20 m) ou de floes moyens (100-500 m). Une faible portion de glace de 30 à 70 cm d'épaisseur est visible dans la partie amont du Lac St-Pierre. De Trois-Rivières à Grondines (figure 104 et figure 105), la variation des concentrations et types de glaces sur la largeur du fleuve est particulièrement visible. Selon les secteurs et le moment, la concentration de glaces varie entre 60% et 90%, dont 10 à 30% sont des sarrasins de faible épaisseur. Il y a aussi présence en faible proportion de glace de 30 à 70 cm d'épaisseur, et surtout de nilas présent sous différentes tailles (2 à 500 m). De Grondines à Portneuf (figure 106), au centre du fleuve, les concentrations varient de 60 à 80%. Dans la partie gauche du bief (défini en regardant vers l'aval), là où il y a 60% de glaces, il n'y a que du nilas sous forme de floes moyens et de la glace grise (10-15 cm) en petits glaçons (<2 m). Vers la droite, là où la concentration est de 80%, il y a présence de sarrasins de faible épaisseur, d'un peu de glace blanchâtre (15-30 cm) et surtout de nilas de taille variant de 2 à 100 m. De Portneuf à St-Nicolas (figure 107), la concentration est généralement de l'ordre de 80%, à l'exception d'un court secteur vers Portneuf qui est plutôt près de 60%. On retrouve principalement du

nilas ayant de 2 à 500 m de dimension, mais aussi de la glace de 15 à 30 cm d'épaisseur sous forme de glaçons (2-20 m).

Bref, les cartes de reconnaissance des glaces montrent généralement la présence de nilas ou nouvelle glace (<10 cm), de sarrasins d'épaisseur inférieure à 1 m, en plus de la présence en une concentration moindre de 10% de glaces plus épaisses pouvant aller jusqu'à 30 cm d'épaisseur et 70 cm dans certains cas. Les épaisseurs médianes obtenues avec l'imagerie thermique sont de 5 à 15 cm, et les épaisseurs maximales, limités par les critères de validité, sont entre 60 et 70 cm. Il n'a toutefois pas été exclu que des épaisseurs plus importantes soient présentes, et les sarrasins pouvant atteindre près d'un mètre d'épaisseur ne seraient donc pas détectés. À cette exception près, les valeurs d'épaisseurs obtenues avec les images thermiques sont près de celles relevées par Environnement Canada.

4.1.2.4.5 Concentration des glaces

De la figure 53, la concentration des glaces lors du vol aller est visiblement très variable, pouvant varier de 0 à 100%. Des variations tout aussi importantes avaient été notées pour les données de 2008. À la figure 54, pour le vol retour, la concentration de glaces varie également entre 0 et 100%, mais il se développe davantage des tendances par secteur. À l'aller, la concentration est faible près de Montréal, augmente au Lac St-Pierre jusqu'à une moyenne de 50%, diminue près de Trois-Rivières près de 25%, et fluctue ensuite jusqu'à Québec entre 0 et 75%, avec une grande dispersion de données. Au retour, la concentration subit une hausse du km 50 à la sortie du Lac St-Pierre, passant de 30 à 80%. Elle est ensuite faible près de Trois-Rivières, près de 25%, jusqu'au km 150, avant de subir des fluctuations jusque vers Québec, toutefois moins marquées qu'à l'aller. On note aussi des concentrations un peu plus faibles à Québec au retour.

En 2008, alors que le survol a aussi été fait alors que la marée était descendante, les concentrations étaient élevées à Montréal. Elles étaient près de 50% au Lac St-Pierre jusque vers le km 200, à l'exception de la sortie du Lac St-Pierre qui était marquée par une chute drastique de la concentration. La concentration diminuait jusque vers 25% au km 200 avant de remonter jusqu'à 75% à Québec. Les seules constantes entre 2008 et 2009 semblent donc être une concentration approximative de 50% au Lac St-Pierre et des fluctuations

entre le km 175 et Québec. Bien que les deux survols aient été faits lors du jusant, plusieurs facteurs expliquent des distributions différentes. Par exemple, les conditions météorologiques, par les températures différentes mais aussi par les vents différents pouvant pousser les glaces, vont causer des conditions de glace différentes qui vont se mouvoir de façon distincte. L'historique du passage de navires est aussi distinct. Des moments différents dans la période de jusant sont aussi possibles. Il a aussi été présenté à la section 4.1.1.5.5 que la concentration des glaces pouvait varier très rapidement. Bref, le profil de concentration des glaces semble être unique au moment sondé.

4.1.2.4.6 *Quantité de floes*

Le cinquième graphique de la figure 53 montre le nombre de floes par hectares lors du vol aller. Ce nombre se situe généralement en-dessous de 25, alors que quelques extrêmes pouvant varier de 50 à 100 sont perçus. En 2008, le nombre de floes par hectares variait généralement entre 0 et 25. Sur le cinquième graphique de la figure 54, le nombre de floes pour le vol retour de l'année 2009 est beaucoup plus petit, atteignant un maximum de 3. En effet, ce deuxième graphique montre les données qui ont été acquises à une plus grande altitude. Chaque pixel couvrait une plus grande surface et des floes qui auraient paru distincts à une plus faible altitude semblaient ne former qu'un seul floe à l'altitude de vol de 1676 m. L'aire totale couverte par image était beaucoup plus grande, d'environ 159 ha comparativement à 3,6 pour le vol à faible altitude. Le nombre de floes par hectare détecté diminue donc très rapidement, et la résolution spatiale ne permet pas de compter un nombre de floes suffisant.

Notons que plusieurs données sont absentes sur ce graphique de la figure 54, contrairement aux quatre graphiques précédents. En effet, lors de la visualisation des images, la segmentation était vérifiée. Les images pour lesquelles la différenciation des floes était jugée insatisfaisante étaient notées et ont été exclues des graphiques ayant un aspect spatial quantifiant chacun des floes. Par exemple, la concentration de glaces dans l'image n'est pas affectée, mais l'aire de chaque floe ou le nombre de floes détecté est faussé.

Il faut donc conclure que si des statistiques spatiales faisant intervenir la taille individuelle ou le nombre de floes sont désirées, une meilleure résolution spatiale serait nécessaire. Il

faudrait alors utiliser un capteur ayant davantage de pixels ou effectuer le vol à plus faible altitude.

4.1.2.4.7 Aire moyenne des floes

Le sixième graphique de la figure 53 montre l'aire moyenne des floes en hectares, pour le vol aller. Elle varie de 1 m^2 à $10\,000 \text{ m}^2$. Elle est généralement entre 100 et 1000 m^2 . À la section 4.1.2.4.4 sur la validation des épaisseurs de glace, la consultation des cartes de reconnaissance des glaces produites par le Service canadien des glaces a été faite. La dimension des glaces variait généralement de 2 à 100 m, quelques fois jusqu'à 500 m. L'aire associée, si le floe est circulaire, varie donc en général de 4 m^2 à 1 ha. Les valeurs obtenues sont donc dans le même ordre, mais il est difficile de valider davantage les aires obtenues. En 2008, les aires avaient varié de 10 m^2 à 10 ha, obtenues avec un vol à faible altitude.

Le sixième graphique de la figure 54 montre des aires de floes, pour le vol retour, variant de 10 m^2 à 10 ha. Tel que stipulé à la section précédente, la résolution spatiale insuffisante résulte en une détection de floes juxtaposés comme des floes uniques. Les tailles évaluées sont donc supérieures à celle obtenues du vol aller. Il est raisonnable de croire que ces données du vol retour sont moins justes.

4.1.2.4.8 Excentricité des floes

L'excentricité des floes pour le vol aller de 2009, montrée au septième graphique de la figure 53 se situe entre 0,6 et 0,7. Pour le vol retour, tel que montré à la figure 54, elle est davantage constante et près de 0,6. En 2008, l'excentricité variait de 0,7 à 0,8. Il semble donc que les floes étaient un peu moins oblongs en 2009, davantage circulaires. Cette différence n'est attribuée à aucun phénomène physique particulier. Par contre, les images de 2008 ont fait l'objet d'une correction géométrique par projection alors que celles de 2009 ont été utilisées sans correction. Il semble plausible que cette différence d'excentricité et donc de forme des floes soit liée à cette projection. Il faut toutefois mentionner que la méthodologie décrite à la section 2.1.4.1 a été développée afin d'optimiser cette projection et de diminuer au maximum son erreur.

4.1.2.4.9 Distribution des épaisseurs sur chacun des floes

Afin de discuter de la distribution des épaisseurs sur chacun des floes, les exemples d'images thermiques montrés à la section 4.1.2.1 sont utilisés.

Près de Montréal (figure 43), il y a présence de glaçons minces, qui semblent être d'épaisseur relativement uniforme, en faible concentration et faible taille. Puisque les glaces sont minces, il est logique qu'il y ait moins de valeurs extrêmes. Au Lac St-Pierre (figure 44), une plus grande variabilité des températures de surface, et donc des épaisseurs, est observée. Toutefois, les épaisseurs maximales peuvent se situer autant au centre d'un floe qu'à sa bordure. On observe aussi que les variations locales et ponctuelles sont moins importantes pour l'image acquise au retour, que les floes semblent être de températures plus uniformes. Il s'agit fort probablement de l'aspect lisseur de l'altitude élevée expliqué précédemment, dû à une moins bonne résolution spatiale. Cette mauvaise résolution spatiale qui résulte en une difficulté à dissocier des floes connexes est d'ailleurs bien illustrée dans l'image acquise au retour. On voit ce qui semble être une multitude de floes, mais puisqu'ils sont très près les uns des autres, ils ne peuvent être dissociés. On remarque aussi une variabilité de la taille des floes et une concentration de glaces assez importante. La concentration des glaces au Lac St-Pierre avait été évaluée entre 50% et 75%. La figure 45 montre des images acquises près de Trois-Rivières. On y voit des floes de taille moins importante qu'au Lac St-Pierre, une concentration moindre, ainsi qu'une variabilité des épaisseurs moins importantes. Tel que mentionné précédemment, aucun patron de distribution des épaisseurs sur la surface des floes n'est détecté. La figure 46 montre des floes près de Portneuf. Aucun patron de distribution d'épaisseur ne ressort. De la figure 47, près de Québec, aucune distribution d'épaisseur typique n'est observée. L'image acquise à grande altitude semble toutefois montrer des épaisseurs plus grandes au centre des floes, mais la tendance n'est pas bien marquée. La taille des floes est relativement variable. Sur l'ensemble des images, les floes étaient relativement circulaires, corroborant l'excentricité entre 0,6 et 0,7. Bref, la distribution des épaisseurs sur la surface de floe ne semble pas suivre de patron particulier, tel qu'il avait été observé avec les données de 2008.

4.1.2.4.10 Épaisseur moyenne des floes vs aire des floes

La figure 57 montre l'épaisseur moyenne de chacun des floes selon son aire. En 2008, selon la figure 42, il y avait une petite tendance à ce que les floes plus grands aient une épaisseur moyenne supérieure. En 2009, cette tendance est moins évidente. Pour le vol aller, les valeurs maximales d'épaisseurs sont observées pour les floes de 0,003 à 0,01 ha. Une légère tendance à l'augmentation de l'épaisseur selon l'aire est visible. Pour le vol retour, aucune tendance ne se présente, si ce n'est une variation nulle de l'épaisseur selon l'aire. Il convient de rappeler l'imprécision sur les aires des images acquises au retour, à plus grande altitude, ce qui limite donc l'analyse pouvant être faite. Bref, les données de 2009, combinées aux données de 2008, ne permettent pas d'établir une relation forte entre l'épaisseur moyenne d'un floe et sa taille.

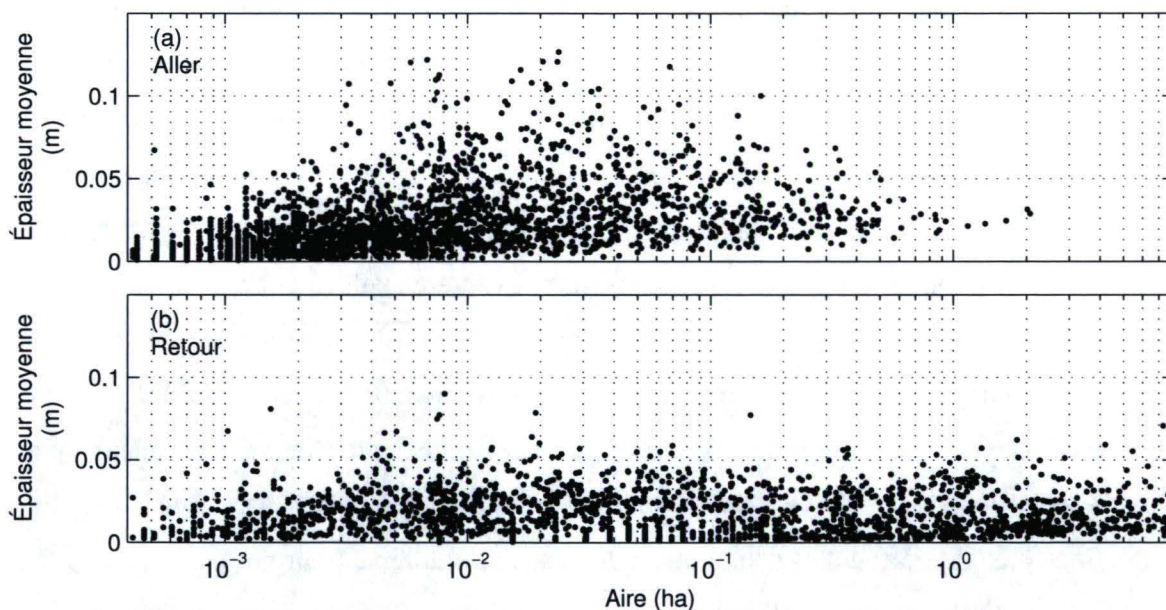


Figure 57 – Épaisseur moyenne des floes en fonction de leur aire, pour les vols aller et retour du 24 février 2009

4.1.3 Résultats du 25 février 2009

Un vol aller-retour entre le port de Québec et les ponts de Québec a été effectué le 25 février 2009 entre 22h22 et 22h43. Les résultats sont détaillés à cette section et analysés de la même façon que les vols Québec-Montréal.

4.1.3.1 Exemples d'images thermiques

Des exemples d'images thermiques sont montrés aux quatre figures suivantes. Pour chacune des figures, l'image brute acquise lors du vol aller (altitude=244 m) est montrée en (a), l'image corrigée aller en (b), l'image brute du vol retour (altitude =1676 m) en (c) et l'image corrigée du vol retour en (d). Les échelles des températures respectives sont également affichées, en degrés Celsius. Les coordonnées centrales sont exprimées en Nad83 MTM7.

La figure 58 montre des images acquises près des ponts. On y voit plusieurs glaçons dont chacun a une température de surface relativement uniforme, mais qui varie considérablement d'un glaçon à un autre. Elle varie de -1 à -10°C. Or, tel qu'il sera montré à la figure 62 de la section 4.1.3.2, la température de l'air lors du vol était supérieure à -10°C. Les limites de validité du modèle pour déterminer l'épaisseur de la glace en fonction de la température de surface seront donc atteintes. Sur l'image atteinte à plus grande altitude, on retrouve le même type de couverture de glace. Toutefois, la résolution spatiale rend l'analyse des données plus difficile, car chaque glaçon ne couvre que quelques pixels.

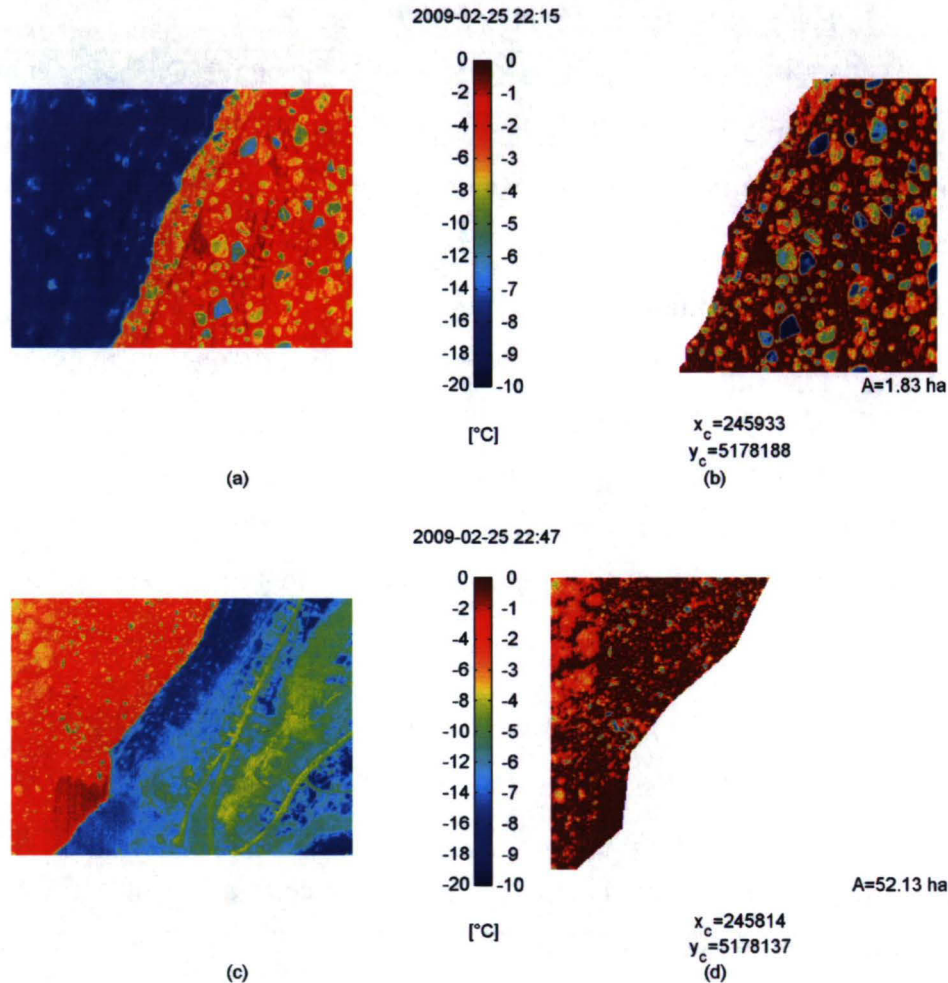


Figure 58 – Images thermiques: lors du vol aller, près des ponts, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

La figure 59 montre des glaces photographiées à environ 2,5 km des ponts, vers le nord-est, soit vers le port de Québec. Les glaces semblent avoir une taille supérieure à celle de la figure 58, tout en étant généralement plus minces. Sur la figure 59(d), on observe toutefois une combinaison de grandes plaques de glaces ainsi que de petits glaçons plus froids. Cette image est également un bon exemple pour mettre en évidence la différenciation des floes difficiles à haute altitude.

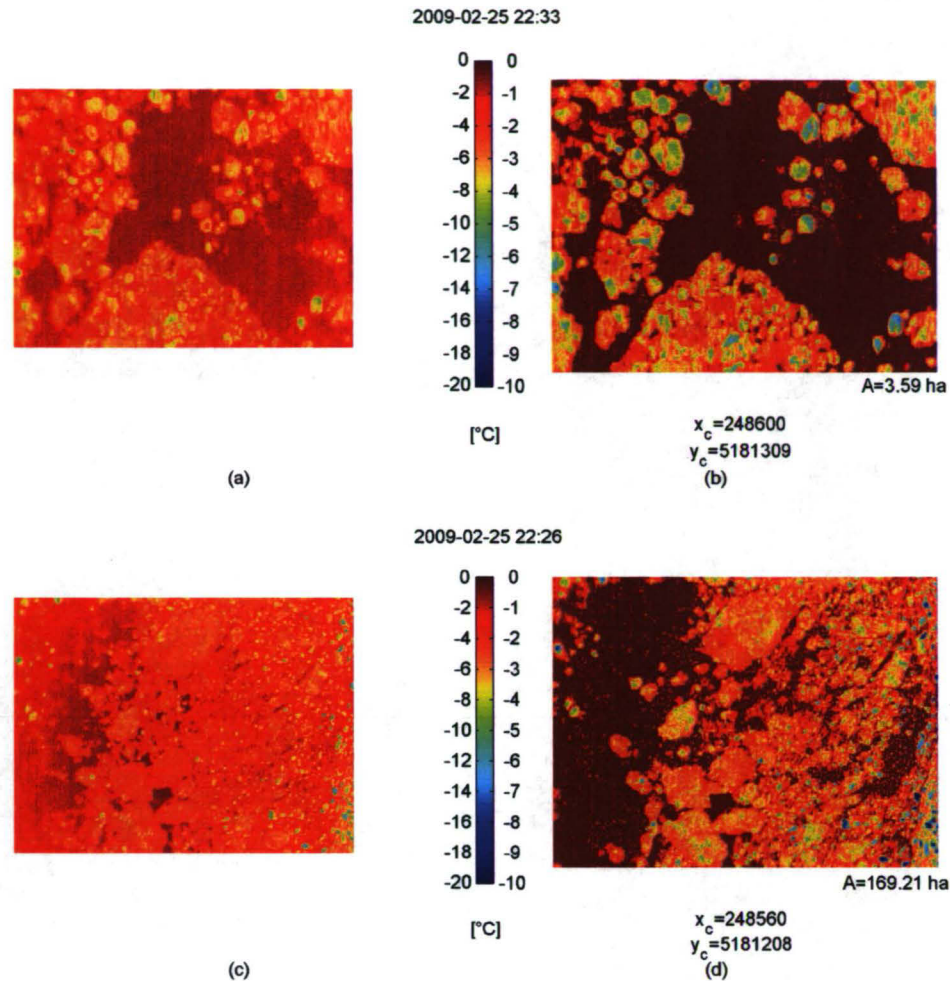


Figure 59 - Images thermiques à 2,5 km des ponts : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

La figure 60 montre des images acquises à environ 5 km des ponts. On voit d'ailleurs sur la figure 60 (c) la Citadelle de Québec. Les images acquises à faible et haute altitudes montrent toutes deux des floes de petites tailles, de températures relativement différentes. Une faible concentration de glace est observée.

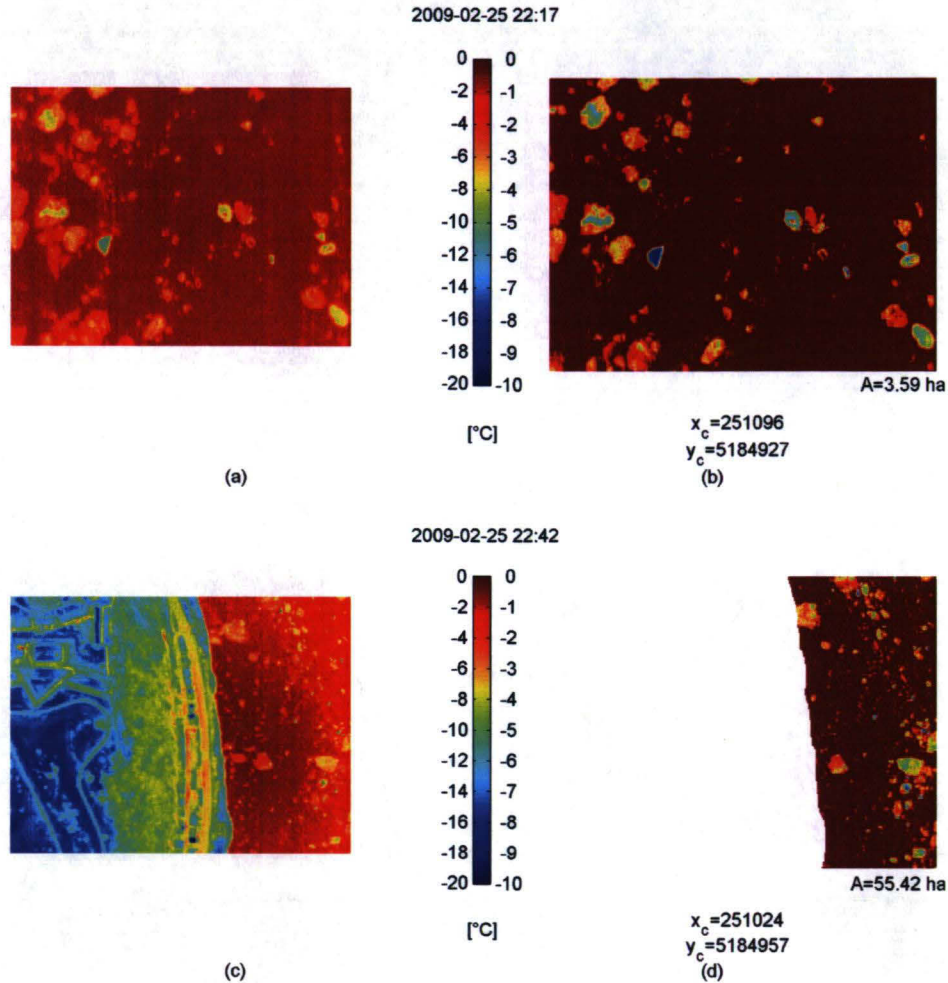


Figure 60 - Images thermiques à 5 km des ponts : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

La figure 61 montre quant à elle les images acquises au port de Québec, près du site d'instrumentation fixe. Sur la figure 61 (a), on voit d'ailleurs deux points plus chauds près de la pointe du quai qui prouvent notre présence lors du survol. Les glaces observées le sont en concentration assez faible, et la température est généralement assez élevée (supérieure à -5°C).

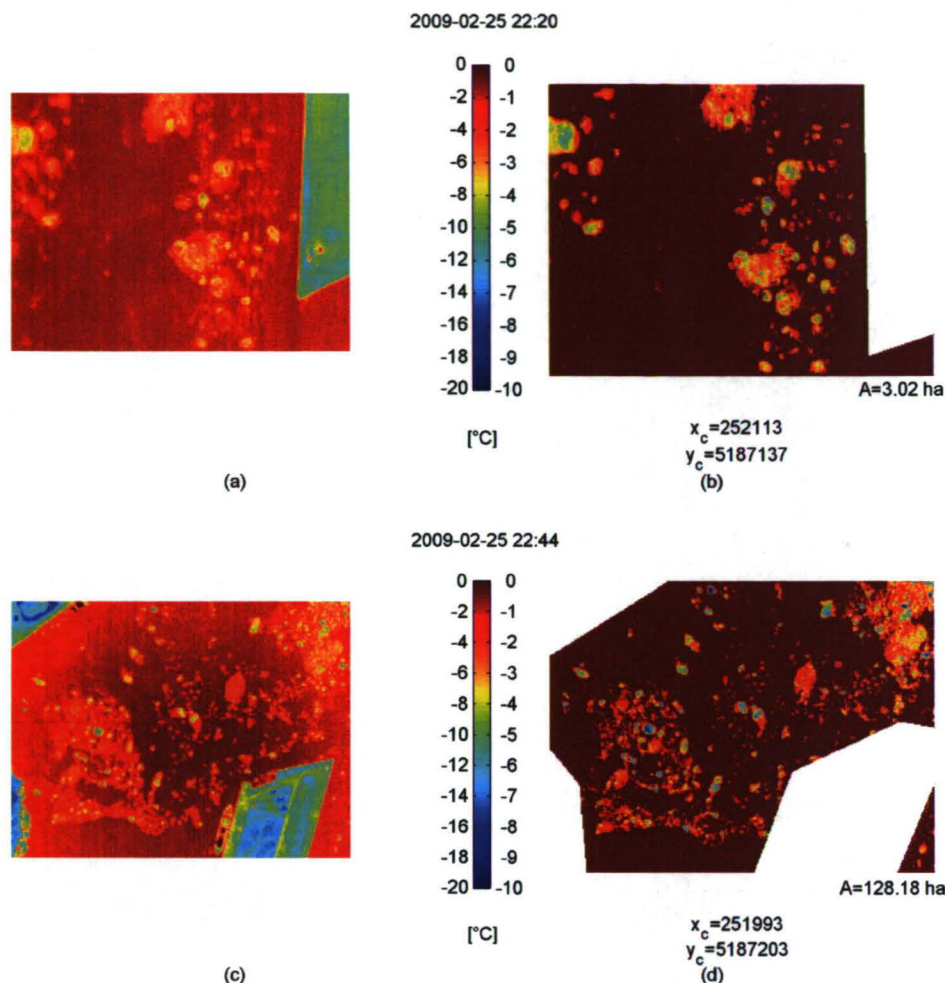


Figure 61 - Images thermiques à 6,7 km des ponts (site d'instrumentation fixe) : lors du vol aller, originale (a) et modifiée (b); lors du vol retour, originale (c) et modifiée (d)

Sur l'ensemble des images thermiques montrées pour le survol du 25 février, on constate que les caractéristiques des glaces, en termes de taille, de forme et de concentration, sont différentes d'une image à l'autre, même si le tronçon couvert n'a que 7 km de longueur. La marée était descendante lors du vol, ce qui cause un important mouvement des glaces. Ces glaces peuvent parfois s'accumuler dans certains secteurs avant que la force exercée soit suffisante pour les déloger. Les images peuvent aussi avoir été prises à des endroits différents sur la largeur du fleuve. La répartition des glaces est donc fortement différente, même entre des secteurs aussi rapprochés.

4.1.3.2 Température lors des heures précédant le vol

La température de l'air près de Québec lors de la semaine précédant le vol a été montrée à la figure 48. On y voit que la température était sous zéro pour la semaine entière. Le profil de température dans la glace est donc jugé approprié pour déterminer l'épaisseur en fonction de la température de surface. La figure 62 montre plus en détail les températures lors de la journée du vol, soit le 25 février 2009. À partir de 16h, la température de -4°C a chuté jusque sous -9°C vers 22h, et a augmenté jusqu'à -9°C pendant le vol, qui s'est déroulé entre 22h22 et 22h43.

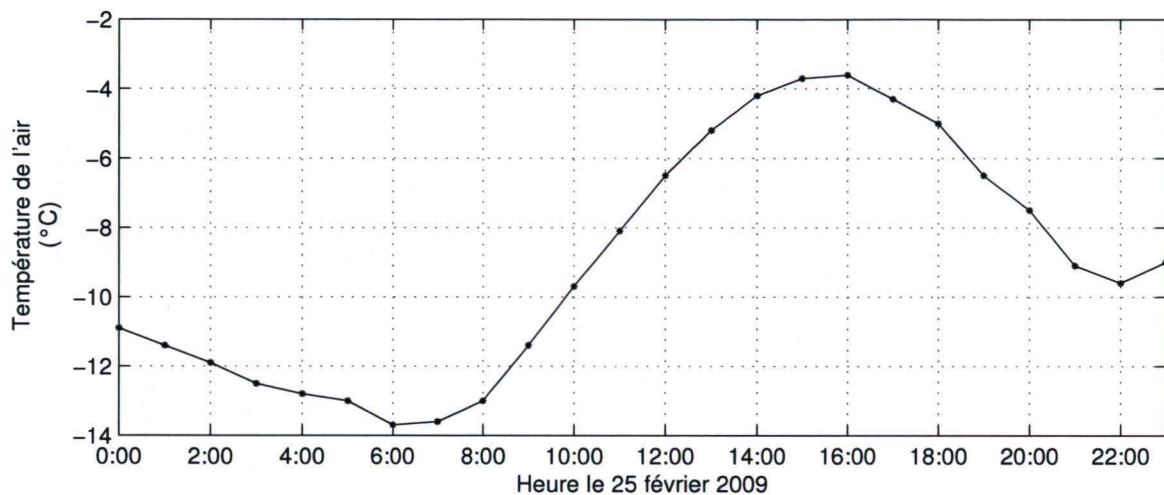


Figure 62 – Températures de l'air pendant la journée du 25 février 2009, à Québec

4.1.3.3 Relation température de surface/épaisseur des glaces

La figure 63 montre la relation entre la température de surface des glaces et leur épaisseur, à Québec, pour la journée du vol. Vers 8h le matin, la relation était optimale puisqu'elle couvrait un plus large éventail de températures. Vers 16h, la pire relation pour la détection des épaisseurs est visible, alors que la température de l'air avait augmenté jusqu'à -4°C pendant la journée. Le vol s'est déroulé entre 22h22 et 22h43, alors que la relation avait commencé à s'améliorer et permettait de détecter une gamme intéressante d'épaisseurs, sans toutefois atteindre l'optimum de 8h.

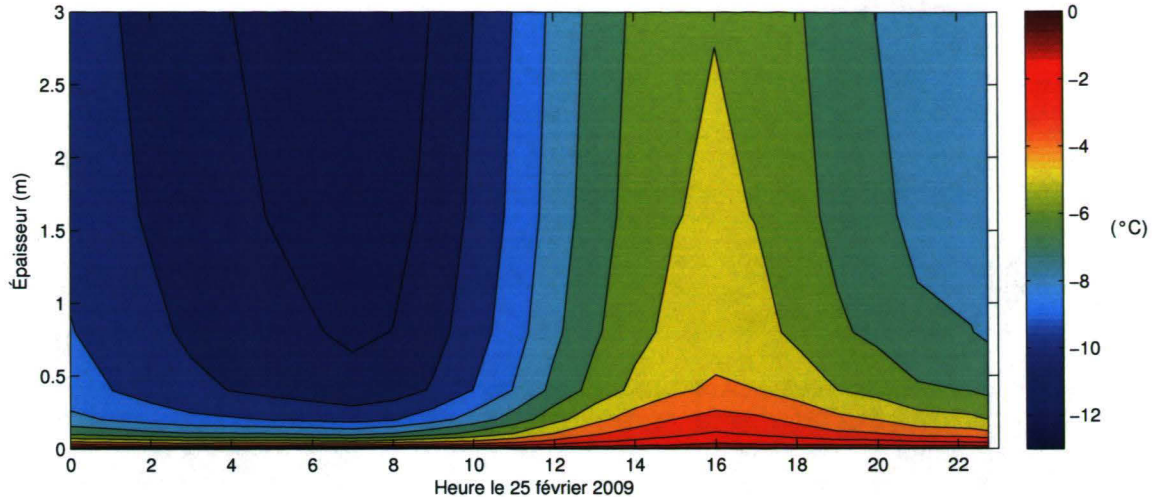


Figure 63- Températures de surface des glaces selon leur épaisseur lors de la journée du 25 février 2009, à Québec

La figure 64 montre la courbe utilisée pour déterminer les épaisseurs en fonction de la température de surface. La figure 64(a) montre la relation jusqu'à une épaisseur de 5 m alors que la figure (b) montre la relation dans ses limites de validité. Une seule courbe a été utilisée dans le temps comme dans l'espace. En effet, le vol s'est effectué sur une période de 20 minutes et n'a couvert qu'un tronçon de sept kilomètres. Il a été jugé qu'une seule courbe serait suffisante pour l'ensemble des données. La limite de validité de la courbe est indiquée par le point bleu. On constate sur la figure 64(a) que les températures de surface inférieures à -9°C ne résulteront pas en des épaisseurs valides. Par ailleurs, les températures de surface inférieures à -9°C , soit la température de l'air, n'ont pas de sens physique valide selon les hypothèses utilisées. Elles le seraient si le profil de température n'est pas stabilisé et que le cœur interne de la glace est à une plus basse température que celle de l'air. L'épaisseur limite, déterminée par une multitude de critères, est d'environ 70 cm et la température limite utilisée est d'environ -7°C .

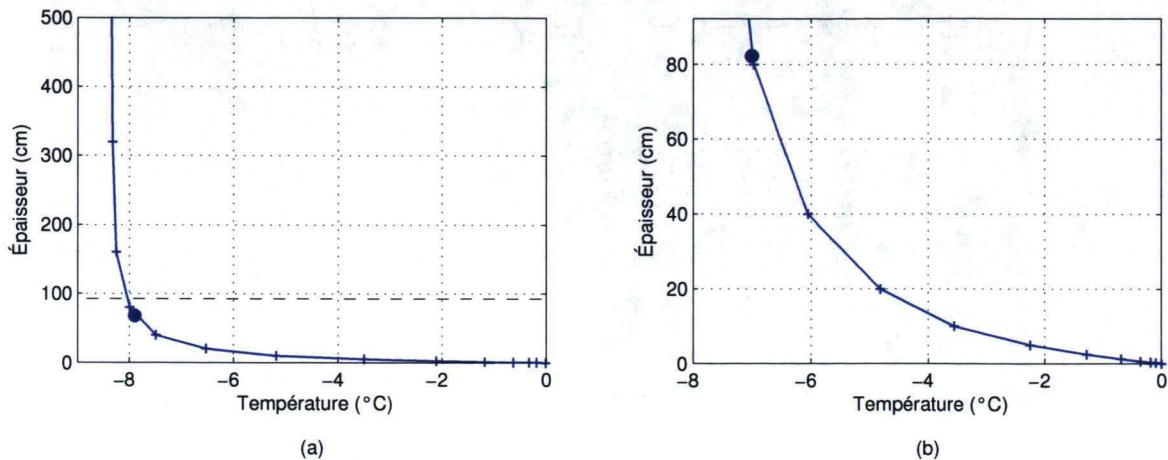


Figure 64 – Courbes de l'épaisseur selon la température de surface ces glaces à Québec : (a) jusqu'à une épaisseur de 5 m, (b) dans les limites de validité

4.1.3.4 Statistiques sur les glaces

La figure 65 montre les statistiques obtenues pour le vol aller du 25 février 2009, à basse altitude, entre le port et les ponts à Québec. La figure 66 montre les données du vol retour à grande altitude.

4.1.3.4.1 Température médiane de surface des glaces

La température médiane de surface des glaces varie entre -3 et $-1,5^{\circ}\text{C}$ lors du vol aller. Malgré quelques variations, elle est relativement constante. Au vol retour, les températures se situent davantage entre $-2,5$ et -1°C . Cette légère hausse peut être due à l'aspect lisse et qui inclut davantage d'eau dans les pixels de bordure des glaces, ou être réellement une augmentation de la température de surface. Le vol s'est effectué alors que la température de l'air augmentait, mais il convient de souligner que le vol total aller-retour n'a duré que 20 minutes et que l'augmentation de température n'était donc pas considérable.

4.1.3.4.2 Épaisseur des glaces

Lors du vol aller, l'épaisseur médiane des glaces s'est trouvée entre 2,5 et 7,5 cm. Lors du vol retour, puisque la température de surface était inférieure et que la relation la mettant en lien avec l'épaisseur est la même pour toutes les données, il est évident que les épaisseurs obtenues seront inférieures. C'est effectivement ce qui observé au deuxième graphique de la figure 66, puisque les épaisseurs se situent davantage entre 2,5 et 5 cm.

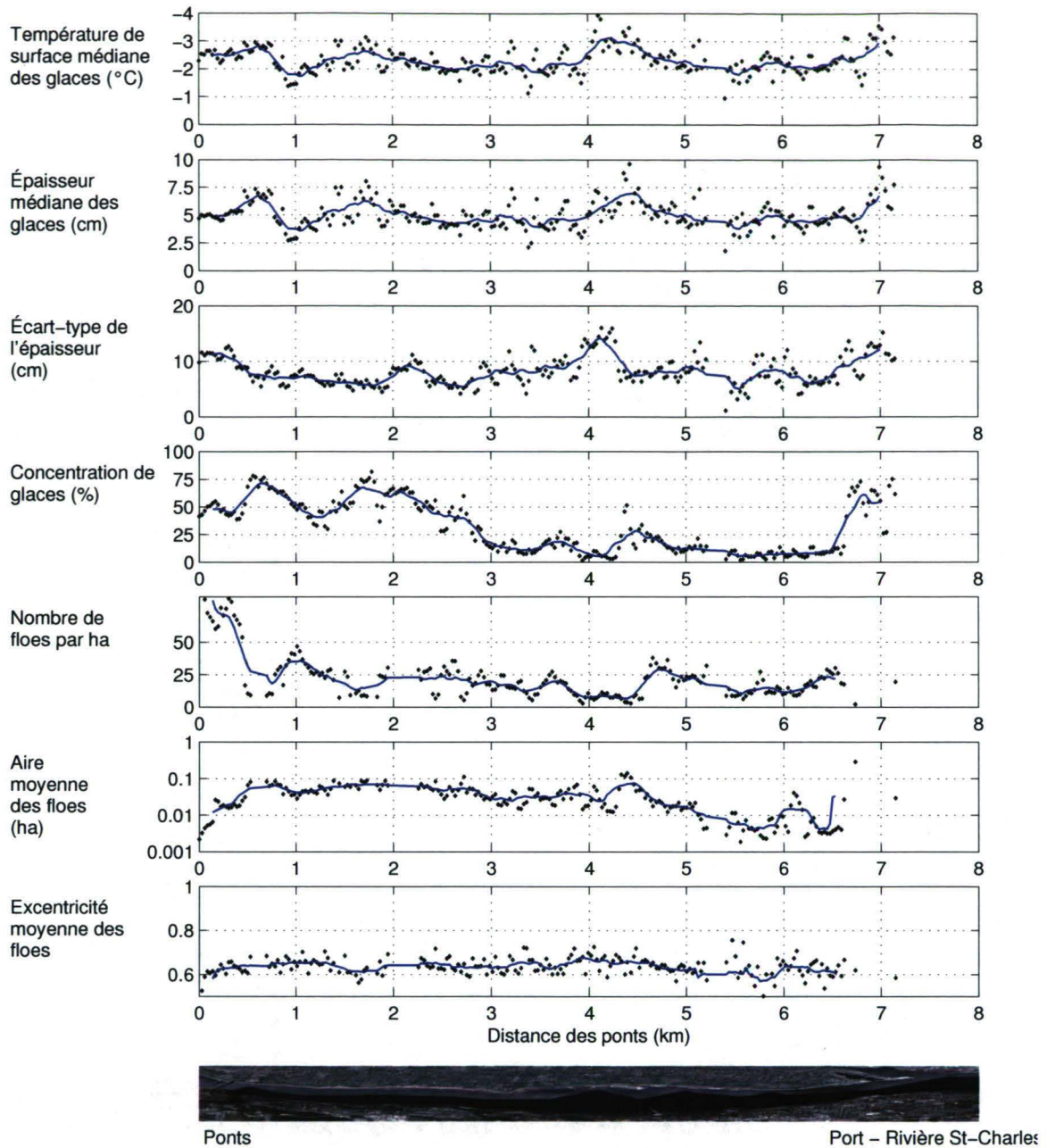


Figure 65 – Statistiques sur les glaces entre le port et les ponts de Québec lors du vol aller du 25 février 2009

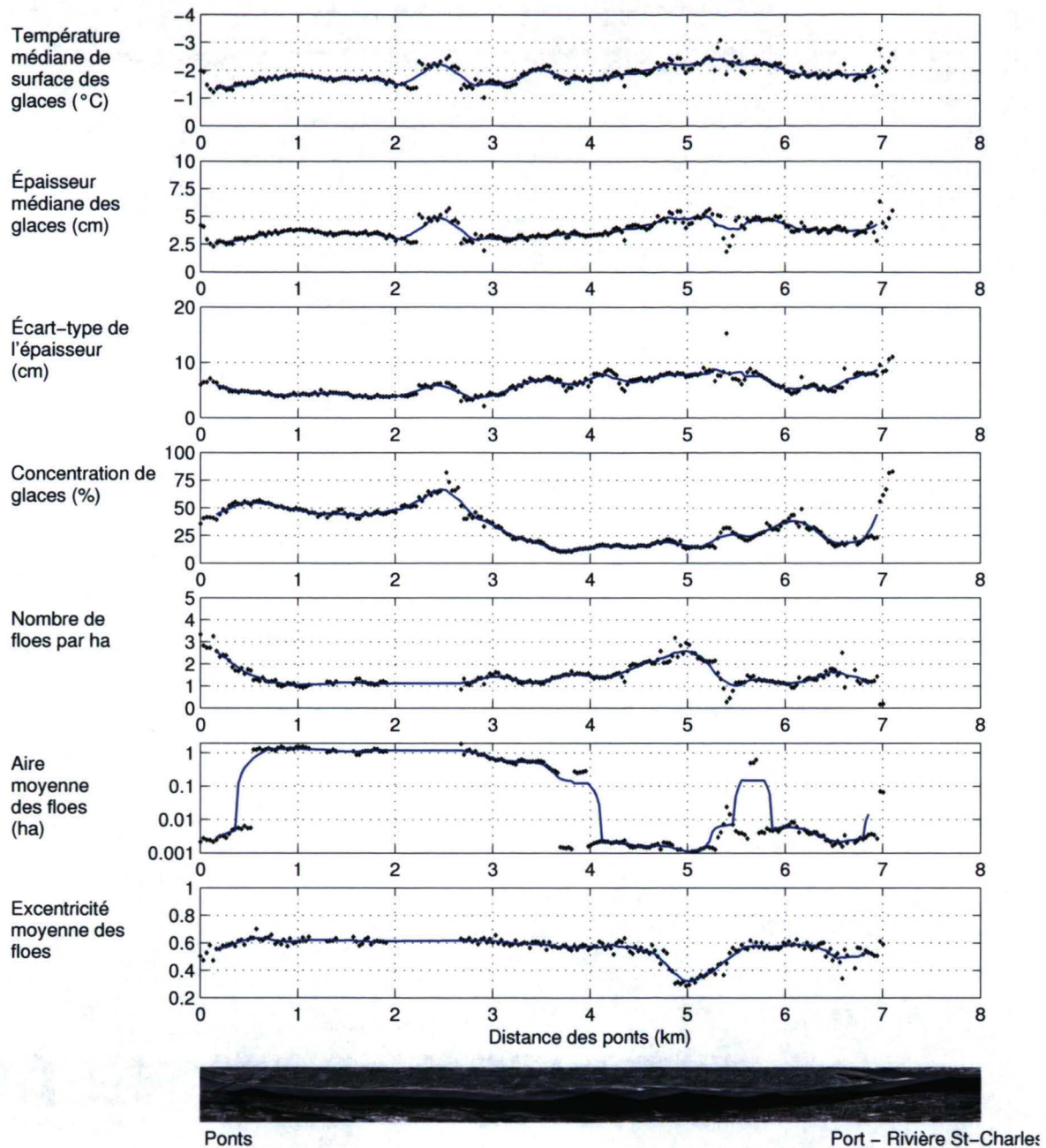


Figure 66 – Statistiques sur les glaces entre le port et les ponts de Québec lors du vol retour du 25 février 2009

La figure 67 montre les épaisseurs médianes et maximales évaluées lors des vols aller et retour. La constance des épaisseurs maximales sous-entend que celle-ci est déterminée par la limite de validité qui avait été estimée à environ 80 cm selon la figure 64. Elle est en

réalité de 82 cm. Il y avait donc fort probablement des épaisseurs supérieures à 82 cm, qui n'ont pas pu être détectées.

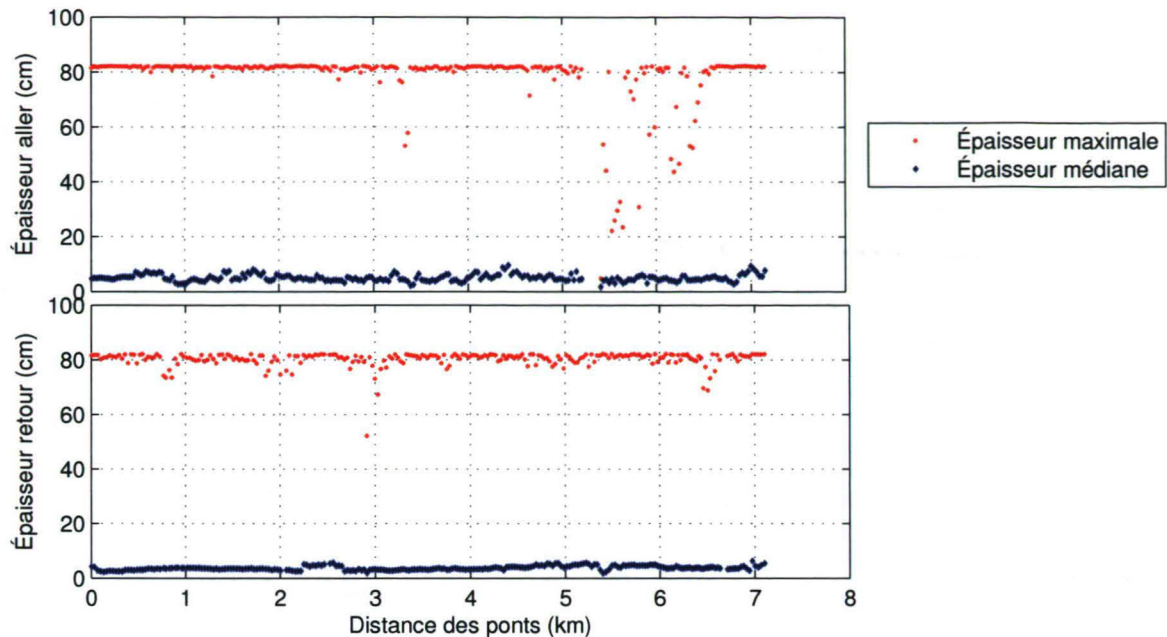


Figure 67 – Épaisseur médiane et maximale entre le port et les ponts de Québec pour le vol du 25 février 2009

4.1.3.4.3 Écart-type de l'épaisseur des glaces

L'écart-type de l'épaisseur des glaces selon cette épaisseur, pour les vols aller et retour, est montré à la figure 68. Tel que remarqué pour les jeux de données de mars 2008 et du 24 février 2009, on constate une augmentation de l'écart-type lorsque l'épaisseur médiane augmente. Toutefois, la tendance, décrite par les équations affichées sur la figure, ont des pentes relativement différentes. Cette pente, pour l'ensemble des données de 2008 et de 2009, a varié de 0,54 à 1,44 pour les épaisseurs inférieures à 7 cm.

4.1.3.4.4 Validation des épaisseurs des glaces

La validation des épaisseurs de glaces obtenues pour le 25 février 2009 est effectuée de trois façons. L'équation d'Hausser et coll. (1986) de l'épaisseur en fonction des degrés-jours de gel est d'abord utilisée. Pour Québec, en considérant une durée de 1 jour à 5 jours, l'épaisseur de glace varie de 5 à 12 cm. L'épaisseur médiane calculée par l'imagerie

thermique était pour sa part entre 2,5 et 7,5 cm. L'épaisseur maximale pouvant être mesurée était de 82 cm, mais il semble raisonnable de croire que des épaisseurs supérieures étaient présentes. L'équation de Hausser donne des résultats similaires en terme d'épaisseur médiane, mais les épaisseurs maximales observées sont beaucoup plus grandes.

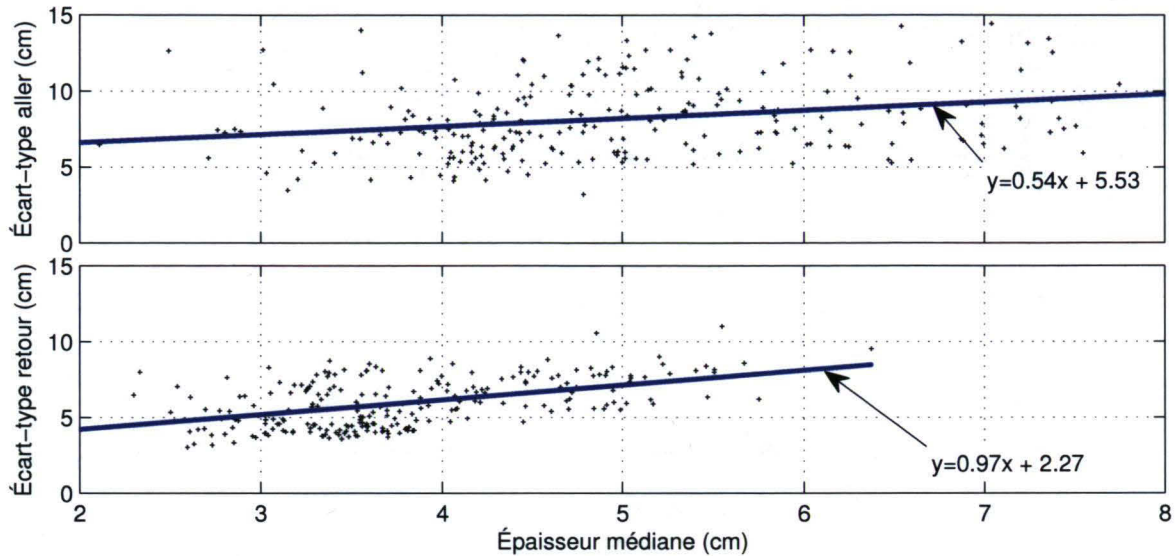


Figure 68 – Écart-type de l'épaisseur selon l'épaisseur médiane des glaces par image pour les données du 25 février 2009

Une carte de reconnaissance des glaces au port de Québec du Service canadien des glaces est aussi utilisée. Elle a été générée pour le 26 février au matin. Présentée à la figure 108 de l'annexe 5, on y observe une concentration de glaces généralement de 80%. Les sarrasins d'épaisseur inférieure à 1 m constituent entre 20 et 40%. Le reste des glaces est du nilas (<10 cm), sous forme de glaçons jusqu'à des floes moyens (2 à 500 m). Quelques glaces entre 30 et 70 cm d'épaisseur sont aussi visibles. Près du Port de Québec, la concentration totale de glace est davantage près de 60%. Cette carte a toutefois été générée le 26 février au matin. La carte précédente, produite le 25 au matin, montrait une concentration de 80% dans ce secteur. Cette carte indique que la plupart des glaces ont moins de 10 cm d'épaisseur, de même qu'entre 20 et 40% des glaces ont des épaisseurs supérieures, pouvant aller jusqu'à 1 m.

Puisque des images ont été prises au-dessus du site d'instrumentation fixe, et que des données thermiques et épaisseurs de glaces y ont été acquises la soirée même du vol, à peu

de temps d'intervalle, la gamme d'épaisseur obtenue peut être comparée. Deux séries ont été acquises le 25 février. Une première a été acquise entre 21h et 21h15. Pendant cet intervalle, le IPS a mesuré 70% de glaces d'épaisseur inférieure à 10 cm. Il a aussi détecté quelques glaces entre 20 et 30 cm et entre 50 et 60 cm. Près de 15% des glaces avaient une épaisseur supérieure à 74 cm (figure 72, section 4.2.1.1). Les données de l'imagerie thermique sur le site d'instrumentation ont montré qu'il y avait environ 50% de glaces d'épaisseur inférieure à 10 cm, quelques glaces entre 20 et 70 cm, et qu'environ 10% des glaces avaient une épaisseur supérieure à 74 cm. Ces données sont cohérentes avec ce qui a été noté par l'observateur des glaces du Service canadien des glaces. Elles le sont aussi avec les données obtenues lors du survol, puisque l'épaisseur médiane était entre 2,5 et 7,5 cm et que l'épaisseur maximale pouvant être détectée et qui a été détectée était de 82 cm.

Un second jeu de données a été acquis le 25 février au site d'instrumentation fixe. Il l'a été entre 22h30 et 23h, au moment du survol. De la figure 76 de la section 4.2.1.2, on voit que les glaces détectées étaient toutes inférieures à 10 cm, autant par les données du IPS que par les données de la caméra thermique. Il n'y a donc pas de glaces plus épaisses qui ont passé au-dessus du site d'instrumentation pendant ce laps de temps. Par ailleurs, il y avait effectivement moins de glace qui passait près du quai à ce moment, car les conditions d'écoulement s'étaient modifiées pendant la soirée. Il demeure que les résultats sont cohérents avec ceux du survol.

4.1.3.4.5 Concentration des glaces

Lors du vol aller, la concentration des glaces était entre 50 et 75% pour les premiers trois kilomètres, alors qu'elle a diminué sous 25% pour les quatre derniers kilomètres (quatrième graphique de la figure 65). Au vol retour (figure 66), une concentration entre 25 et 75% pour les trois premiers kilomètres a été observée, et elle s'est située entre 10 et 50% pour les derniers kilomètres. De la carte du Service canadien des glaces (figure 108), une concentration entre 60 et 80% a été notée. Toutefois, pour cette carte, la concentration est uniforme pour la largeur du fleuve. Il a été observé lors du 25 février qu'elle variait sur la largeur du fleuve et qu'elle était inférieure par moment le long du quai au site d'instrumentation fixe. Il est donc possible, selon la portion survolée, que les concentrations obtenues soient inférieures. Par ailleurs, la concentration obtenue est notée

par image, alors qu'elle est globale sur la carte de reconnaissance des glaces. Les concentrations obtenues des deux méthodes sont donc similaires pour les trois premiers kilomètres, mais divergent davantage pour les derniers.

4.1.3.4.6 Quantité de floes

Au vol aller, selon le cinquième graphique de la figure 65, il y avait une moyenne de 25 floes par hectare le long du tronçon. Au vol retour (figure 66), ce nombre était considérablement inférieur, autour de 1 à 2. La mauvaise résolution spatiale, malgré l'élimination des segmentations non représentatives du nombre et de l'aire individuelle des floes, aurait ainsi généré des résultats aussi différents et jugés moins fiables.

4.1.3.4.7 Aire moyenne des floes

Au vol aller, selon le sixième graphique de la figure 65, chaque floe avait en moyenne entre 0,01 et 0,1 ha de superficie. Au vol retour (figure 66), cette superficie a été évaluée à environ 1 ha pour les trois premiers kilomètres et 0,001 ha pour la dernière partie du tronçon. Comme pour les autres statistiques surfaciques, exceptée la concentration, les données du vol retour sont jugées moins représentatives, car grandement dépendante d'une différenciation des floes difficiles à effectuer.

4.1.3.4.8 Excentricité des floes

Au vol aller, l'excentricité des floes s'est située entre 0,6 et 0,7. Au retour, elle était généralement de 0,6, à l'exception d'une baisse jusqu'à 0,3 à environ 5 km des ponts. Après visionnement des images dans ce secteur, il semble que cette baisse pourrait être attribuée au survol de petits floes circulaires plus éloignés les uns des autres. Ils auraient donc été mieux différenciés. Chacun de ces floes n'aurait couvert que quelques pixels. Dans les images des autres secteurs, plusieurs floes connexes pouvaient être considérés comme un seul floe et leurs formes en étaient donc modifiées. Malgré que la qualité de la segmentation et du dénombrement des floes ait été qualifiée et jugée acceptable pour l'ensemble des images dont les résultats sont montrés à la figure 66, la résolution spatiale insuffisante altère la perception des floes et influe sur la qualité des statistiques surfaciques.

4.1.3.4.9 Distribution des épaisseurs sur chacun des floes

Les exemples d'images montrés de la figure 58 à la figure 61 présentent des floes sans patrons particuliers de distribution de température ou d'épaisseur sur la superficie des floes. Comparativement aux exemples pour les jeux de données de mars 2008 et du 24 février 2009, la distribution des températures sur la surface semble un peu plus uniforme, sans toutefois montrer une tendance marquée.

4.1.3.4.10 Épaisseur moyenne des floes vs aire des floes

La figure 69 montre l'épaisseur moyenne des floes en fonction de leur aire. Comme pour les données du 24 février 2009, une pente pratiquement nulle est observée entre ces deux variables. La corrélation entre ceux deux variables semble donc être négligeable.

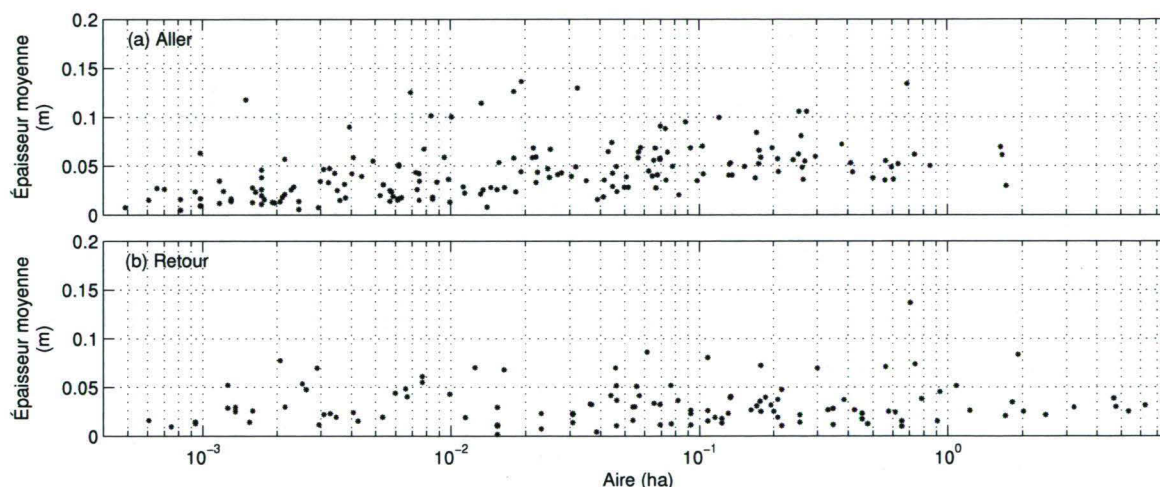


Figure 69 – Épaisseur moyenne des floes en fonction de leur aire, pour les vols aller et retour du 25 février 2009

4.1.4 Synthèse des campagnes aériennes

Les campagnes aériennes d'acquisition d'images thermiques de glaces ont permis d'observer et de quantifier plusieurs caractéristiques des glaces. L'aspect visuel et qualitatif des données s'est avéré très intéressant. En effet, le visionnement des images permet d'apprécier la concentration des glaces, leur forme, la variabilité de leur température de surface et donc de leur épaisseur, de même que la distribution des épaisseurs sur chacun des floes. Elles permettent de voir rapidement l'importance de la couverture de glace. Certaines caractéristiques, comme la distribution des épaisseurs sur chacun des floes, n'ont pas

résulté en des relations définies. Il ne s'agit toutefois pas d'un échec, mais bien de la constatation que le mécanisme complexe de formation des glaces de même que leur histoire thermique, mécanique et hydraulique ne peuvent être exprimés par une simple relation et qu'une certaine composante chaotique est présente.

Un aspect particulièrement intéressant de ces campagnes est la couverture de longs tronçons (près de 250 km dans le cas des survols Québec-Montréal) et la génération de statistiques sur leur totalité. L'étude de la concentration des glaces ou de leur épaisseur le long du fleuve peut ainsi être effectuée sur une vaste étendue impossible à couvrir à partir d'instruments conventionnels de mesures de glaces. Il s'agit d'ailleurs d'un avantage associé à toute forme de télédétection. En termes de concentration ou d'épaisseurs, des tendances sectorielles ont souvent pu être observées. Si davantage de jeux de données étaient acquis, leur étude pourrait résulter en l'élaboration de tendances définies selon les marées et les conditions météorologiques. Cela pourrait par contre découler en des modèles prévisionnels forts complexes, lourds et coûteux à résoudre. Il pourrait aussi s'avérer que le système est chaotique à un point tel que de telles tendances seraient impossibles à extraire. Il demeure que les conditions actuelles pourraient être bien quantifiées sur une grande superficie et qu'on pourrait ainsi améliorer nos connaissances et notre compréhension de la production et du transport de glaces sur le fleuve St-Laurent.

L'imagerie thermique présente un avantage particulièrement intéressant, parce qu'elle intègre plusieurs phénomènes physiques en une simple mesure. En effet, la température de surface des glaces est régie par plusieurs variables, que ce soit la température de l'air, le rayonnement d'ondes courtes et longues, la vitesse du vent, les flux de chaleur ou microclimats présents à la surface des floes. Le signal thermique émis par les glaces est aussi modifié par la composition de l'atmosphère jusqu'au capteur, qui détecte en même temps le rayonnement des composantes environnantes. L'image thermique donne une température de surface apparente des objets visés, intégrant tous les facteurs pouvant entrer en jeu. Lorsqu'utilisée pour l'étude de glaces en présence d'eau libre, la connaissance de la température de l'eau (0°C) permet de corriger la température apparente en une température de surface présumée réelle. L'imagerie thermique intègre donc tous les phénomènes possibles mais fournit une solution simple.

Par contre, quelques limites associées à l'imagerie thermique et à la méthodologie ont été soulevées. Une première constatation est la mesure de températures de surface des glaces inférieures à la température de l'air. Si le profil de température sur l'épaisseur de la glace est stabilisé, une telle observation ne devrait pas se produire. On peut donc se questionner sur la justesse de la température acquise. Une difficulté mentionnée dans la section État des connaissances est la détermination de l'émissivité de la glace, indispensable à la détermination de la température. Dans le cas présent, une valeur unique d'émissivité a été utilisée. Toutefois, celle-ci peut varier selon le type de glace. Elle est aussi différente pour de la neige, qui peut couvrir les glaces. La surface des glaces est aussi inégale, pouvant modifier le rayonnement réfléchi et capté par la caméra selon les surfaces. Bref, l'émissivité des glaces est un facteur important qui mériterait une étude plus approfondie pour les types de glace pouvant être observés sur le fleuve St-Laurent.

La correction des températures, faite à partir de la connaissance de la température de l'eau, pourrait aussi induire une faible erreur dans les températures. En effet, l'émissivité de l'eau (0,96) est quelque peu différente de celle de la glace, estimée à 0,97 d'après les résultats de Hori et coll. (2006). Il a été vérifié que cette différence ne génère pas d'erreurs importantes, mais de l'ordre de 0,1 à 0,2°C. Des températures inférieures à la température de l'air ne sont donc pas expliquées et la méthodologie appliquée pour la correction est jugée appropriée.

De plus, pour l'année 2009, la calibration des deux caméras thermiques a été faite. Ainsi, si le capteur s'était avéré inexact, la température mesurée de prime abord aurait été corrigée par la calibration. Toutefois, il est difficile de calibrer la caméra pour des températures sous zéro. Le corps noir utilisé pour la calibration pouvait descendre sous zéro, mais il n'était pas équipé de la ventilation nécessaire pour éliminer la condensation possible, puisque la calibration était faite à température ambiante, soit environ 20°C. La calibration s'est toutefois faite le plus rapidement possible, avec des temps d'attente entre chaque température, pour tenter de réduire la condensation au minimum et d'éliminer celle qui aurait pu apparaître. Il demeure que la calibration, notamment car elle est faite dans des conditions d'utilisation différentes, pourrait modifier la température de surface et l'amener sous la température de l'air. En effet, pour la caméra A40M utilisée lors des survols, la

température mesurée par la caméra pour les températures sous zéro était supérieure à celle générée par le corps noir (figure 3). La différence était d'autant plus importante que la température était froide. Le fait d'utiliser la calibration de la caméra a ainsi diminué les températures mesurées. Si la qualité de la calibration, par les conditions d'utilisation différentes et les difficultés d'opération du corps noir, était insuffisante, elle a pu engendrer des erreurs.

4.2 Campagnes d'instrumentation fixe

Toutes les séries de données acquises en mode fixe n'ont pas été traitées quantitativement en termes d'épaisseurs de glace, car plusieurs de ces séries présentent des particularités qui causent une analyse imprécise ou peu riche en informations. Certains jeux de données, après analyse visuelle, ne présentent que de l'eau, ce qui élimine leur utilité en termes d'étude des glaces. D'autres ont été acquis pendant que de la neige, de la pluie ou de la grêle tombait, précisément dans le but de déterminer l'influence de ces précipitations, tel que décrit à la section 2.2.1. D'autres avaient très peu de données du IPS, qui servent à comparer les valeurs d'épaisseurs. L'étude de glaces immobiles pour voir l'effet de l'accumulation de la neige ou l'influence de l'angle d'incidence du soleil a aussi été faite. Comme l'analyse subséquente est coûteuse en temps, étant donné le grand nombre d'images par jeu de données, il est important de choisir judicieusement les jeux à analyser.

Le tableau 4 présente un aperçu de toutes les séquences d'acquisition d'images thermiques au port de Québec à l'hiver 2009. Pour chacune, les conditions météorologiques sont présentées, ainsi que les observations générales suite à la visualisation des images thermiques et des données du IPS. Certaines conclusions y sont aussi présentées.

En somme, les données acquises en soirée et présentant un fort potentiel pour la comparaison des épaisseurs de glaces mesurées par le IPS et calculées à partir des images thermiques ont été privilégiées, et six jeux ont donc été analysés quantitativement. Les résultats sont montrés aux sections 4.2.1.1 à 4.2.1.6.

Tableau 4 - Conditions d'acquisition des images et thermiques et observations pour l'hiver 2009

Date	Heure	Conditions météorologiques				Marée	Observations thermiques	Observations IPS	Conclusions
		T _{air} (°C)	H.r. (%)	V (km/h)	Autres				
02/10	autour de 22h	-5,6*	78*	13*		Jusant (H à 18h48)	-Passage de nombreuses glaces -Mauvais focus	-E : 0,5 à 0,6 m	
02/11	19h52 à 20h15	0,5*	98*	7*	Brouillard	Jusant (H à 19h33)	-Aucune glace visible -Saut brusque dans les T _s = recalibration automatique	-E : 0 à 1,2 m	1-2
	20h40 à 21h00	0,4*	97*	6*			- T _s autour de 0°C	-E : 0 à 2,2 m	
02/15	11h27 à 11h37	-6,9*	66*	17*	Nuageux	Jusant (H à 10h06)	-Principalement de l'eau, quelques glaces par groupes isolés	-E : 0,002 à 0,012 m -Plusieurs données manquantes	
	12h06 à 12h24	-6,9*	66*	17*				-E : 0 à 0,35 m -Plusieurs données manquantes	

Date	Heure	Conditions météorologiques				Marée	Observations thermiques	Observations IPS	Conclusions
		T _{air} (°C)	H.r. (%)	V (km/h)	Autres				
02/20	12h18 à 12h37	-9,7	73	44	Nuageux	Flot (B à 10h03)	-Que de l'eau, sauf pour un groupe de glaces minces vu en partie	-E : 0 à 0.035 m -Plusieurs données manquantes	
		-9,8*	79*	28*					
02/23	20h20 à 20h50	-3,2	66	27	Vent faible	Jusant (H à 17h48)	-Principalement de l'eau, plusieurs glaces vers la fin	-Manque plusieurs données -Un bloc de 2,5m, un de 0,5 m	
		-3,3*	71*	15*					
	21h14 à 21h40	-3,3	65	32			-Quelques glaces	-Un bloc de près de 2 m, quelques autres minces, manque de données	
		-3,1*	63*	15*					
02/24	8h00 à 8h24	-6,6	57	53	Soleil	Jusant (H à 6h15)	-Saut brusque dans les T _s = recalibration automatique	-Deux glaces entre 0,02 et 0,03 m, aucune autre donnée	
		-7,7*	57*	24*			-Que de l'eau		
	19h33 à 19h40	-7,2	59	28		Jusant (H à 18h18)	-Très mauvais focus	-Aucune donnée	
		-7,7*	67*	21*			- Que de l'eau		

Date	Heure	Conditions météorologiques				Marée	Observations thermiques	Observations IPS	Conclusions
		T _{air} (°C)	H.r. (%)	V (km/h)	Autres				
02/25	20h52 à 21h07	-5,2 -9,1*	67 70*	16 6*		Jusant (H à 18h48)	-Plusieurs glaces	-Quelques glaces allant jusqu'à 1,5 m.	
	22h25 à 22h45	-7,1 -9,3*	72 73*	5 5*		Jusant (H à 18h48)	-Plusieurs glaces	-Beaucoup données, E environ 0,07-0,08 m au maximum.	
02/26	9h40 à 10h08	-3,5 -3,8*	77 83*	3 4*	Neige	Jusant (H à 7h09)	-Quelques glaces -Présence de flocons de neige dans l'image	-Plusieurs glaces entre 0,01 et 0,05 cm	3
	10h21 à 10h28	-3,5 -3,8*	81 83*	13 4*		Jusant (H à 7h09)	-Quelques glaces	-E :0,03 à 0,18 m	
02/28	9h40 à 13h15	-9,5 -9,8 *	55 55*	26 15*	Soleil, peu venteux	Jusant (H à 8h12)	- Belles images montrant plusieurs glaces	-Nombreuses glaces de quelques cm à 2,2 m	

Date	Heure	Conditions météorologiques				Marée	Observations thermiques	Observations IPS	Conclusions
		T _{air} (°C)	H.r. (%)	V (km/h)	Autres				
03/01	11h05 à 11h50	-8,4 -9,3*	63 65*	55 25*	Soleil, venteux	Jusant (H à 8h48)	-Glaces immobiles - T _s constantes excepté pour quelques sauts possiblement dus à la recalibration de la caméra	-Glaces dont l'épaisseur varie de 1.6 à 1.9 m, diminution graduelle de l'épaisseur dans le temps	
03/02	10h48 à 16h	-8,2 -8,7*	74 77*	33 17,8*	Neige (environ 4 cm)	Jusant (H à 9h27, B à 17h21)	-Glaces en mouvement puis immobilisées -T _s des glaces immobiles diminue dans le temps, jusqu'à T _{air} .	- Épaisseurs variables au début, puis constantes lors de l'arrêt des glaces	4
03/03	13h20 à 14h02	-7,8 -8,2*	45 52*	34 28*	Soleil, venteux	Jusant (H à 10h12)	-Glaces immobiles - T _s relativement constantes, sauf pour recalibration caméra	-Épaisseurs varient dans le temps, de 0,75 à 1 m	
03/04	11h10 à 13h10	-8,2 -8,9*	40 45 *	30 21*	Soleil, pour vérifier effet angle soleil	Jusant (H à 11h06)	- Empilement désordonné de glaces immobiles - T _s diminue dans le temps, comme T _{air} .	-E : 2,5 à 2,7 m, principalement près de 2.52 m	5

Date	Heure	Conditions météorologiques				Marée	Observations thermiques	Observations IPS	Conclusions
		T _{air} (°C)	H.r. (%)	V (km/h)	Autres				
03/05	14h45 à 16h15	-5,2 -5,7*	39 46*	25 23*	Nuageux avec percées de soleil	Jusant (H à 12h15, B à 20h27)	-Principalement de l'eau, quelques petites glaces minces isolées au début, de plus en plus de glaces avec des T _s de plus en plus froides -Pic (baisse) de T _s correspondant au bloc de 3 m (du IPS).	-Surtout des glaces minces (quelques centimètres), un bloc de 3 m et quelques-uns près de 1 m.	
03/06	14h40 à 16h20	-1,8 -2*	90 96*	13 8*	Pluie et grêle	Jusant (H à 13h39)	-Surtout de l'eau, quelques glaces à T _s élevée (-0,5°C environ) -Images réelles montrent davantage de glace	-Glaces minces, avec quelques pics entre 2 et 4 m (pas vus dans le thermique)	6
03/07	14h45 à 17h05	4,6 4,2*	62 69*	19 15*	Soleil	flot et Jusant (H à 15h03)	-Mouvement perceptible à la visualisation des images thermiques, mais T _s au-dessus de 0°C.	-Surtout des glaces de quelques centimètres, quelques une jusqu'à 4,5 m	7

Date	Heure	Conditions météorologiques				Marée	Observations thermiques	Observations IPS	Conclusions
		T _{air} (°C)	H.r. (%)	V (km/h)	Autres				
03/08	16h35 à 18h20	0,5 0,3*	50 55*	35 18*	Soleil	Jusant (H à 16h12)	-Quelques glaces, principalement de l'eau vers la fin	-Quelques glaces jusqu'à 2,5 m -Manque plusieurs données, surtout vers la fin	

Notes : * : Donnée météo de la station d'Environnement Canada à la Baie de Beauport. Les données sans astérisque sont celles de notre station météorologique.

Abréviations utilisées :

T : température	V : vitesse du vent	B : marée basse
T _s : température de surface	E : épaisseur des glaces	
H. r. : humidité relative de l'air	H : marée haute	

Conclusions :

- 1 -Lorsque la température de l'air est légèrement au-dessus de 0°C, la température de surface des glaces est à 0°C.
- 2-Le brouillard empêche toute mesure.
- 3-Si la neige ne tombe pas trop abondamment, il est possible de mesurer la température de surface des glaces, avec un traitement adéquat pour ne pas la fausser.
- 4-La présence d'accumulation de neige récente ne permet pas d'obtenir des températures de surface valides.
- 5- Les changements de température de surface des glaces surviennent très rapidement avec les variations de température de l'air
- 6-La pluie qui tombe cause une température de surface de 0°C.
- 7-Des températures élevées font que la température de surface des glaces, peu importe leur épaisseur, est à 0°C.

4.2.1 Résultats

4.2.1.1 Jeu 1 : 25 février 2009 (a)

Ce jeu de données, tel que montré au tableau 4, a été acquis aux alentours de 21h, par une température moyenne d'air d'environ -8°C et une vitesse de vent de 24 km/h. On y remarque le passage de plusieurs glaces dans les images thermiques et plusieurs données du IPS sont disponibles pour comparer les épaisseurs. La figure 70 montre d'abord la température de surface corrigée des glaces, de l'eau et la température de l'air. Évidemment, tous les points d'eau sont en moyenne à environ 0°C . Bien que la température de surface des glaces soit généralement entre celle de l'eau et celle de l'air, quelques points ont une température inférieure à celle de l'air. Or, ce phénomène est impossible, à moins d'un changement soudain dans la température de l'air, ce qui n'est pas le cas. Cette observation pourrait aussi être due à une mauvaise correction des températures dans les images thermiques, mais la méthodologie utilisée est jugée suffisamment complète pour ne pas être la source de ce problème. Il demeure que la détermination d'une épaisseur pour de tels points est impossible.

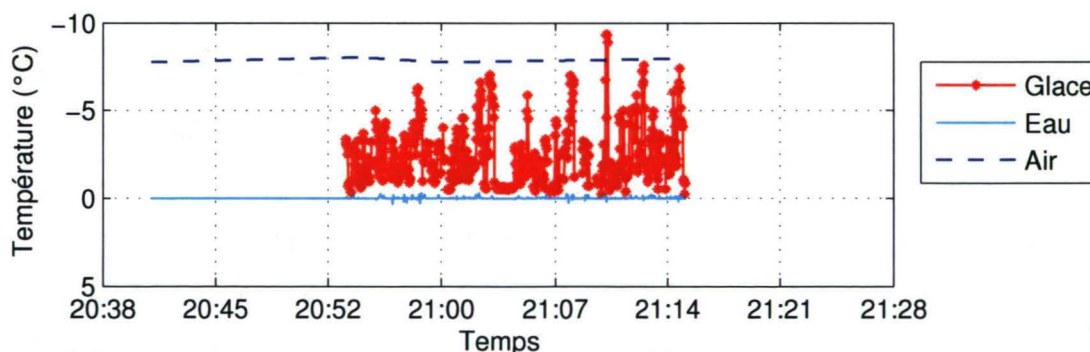


Figure 70 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 25 février 2009 (a)

La figure 71 montre quant à elle les épaisseurs moyennes de glaces mesurées par le IPS et par l'imagerie infrarouge dans le temps. Les résultats non valides sont ceux exclus par les critères de la section 3.1.5. Néanmoins, ils sont conservés afin de comparer les données du IPS excédant l'épaisseur valide du thermique. Dans la majorité des cas, les valeurs non valides de la figure 71 ont été exclues, car une diminution de température de $0,1^{\circ}\text{C}$

engendrait une augmentation de l'épaisseur de plus de 10 cm. Toutefois, ces valeurs non valides semblent être près des valeurs extrêmes mesurées par le IPS. De la figure 71, il est difficile de juger de la justesse des résultats de l'imagerie thermique. En effet, il y a beaucoup plus de données thermiques (aux 2 secondes plutôt qu'aux minutes) et les pics ne sont pas parfaitement synchronisés. Il demeure que globalement les épaisseurs sont du même ordre, mais une analyse de la distribution des données des deux méthodes est prônée afin d'enrichir l'analyse.

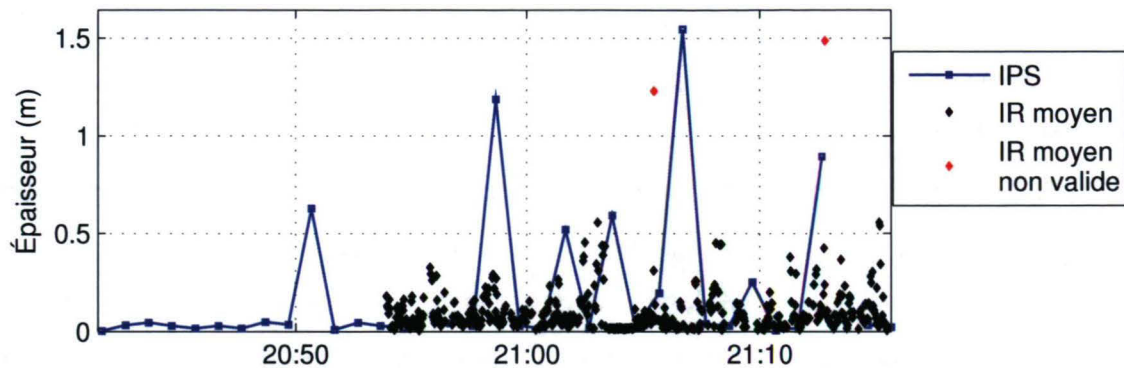


Figure 71- Épaisseurs du IPS et calculées de l'imagerie infrarouge pour le 25 février 2009
(a)

Cette analyse des distributions des épaisseurs déduites par l'imagerie infrarouge et l'IPS est montrée sous forme d'histogramme à la figure 72. Pour générer cet histogramme, tous les pixels dans la moitié supérieure de chaque image ont été utilisés pour les données infrarouges. Il s'agit donc des pixels les plus loin du quai et plus représentatifs de la glace à la dérive. Toutes les données du IPS disponibles sur la période de temps au cours de laquelle les images thermiques ont été acquises sont utilisées. La zone d'incertitude du IPS est mise en valeur par la couleur rouge. En effet, le IPS possède une incertitude considérable pour les épaisseurs inférieures à 10 cm. Pour les autres épaisseurs, une incertitude de 5 cm persiste. Il convient aussi de préciser que les données de l'imagerie infrarouge pour les épaisseurs inférieures à 10 cm sont considérées valides, mais qu'elles ont été mises en rouge afin de bien montrer le pourcentage de données pour lequel il n'y a pas de comparaison valide du IPS. La zone d'incertitude de l'imagerie infrarouge, est quant à elle délimitée par une épaisseur maximale obtenue des critères présentés à la section 3.1.5. Cette épaisseur maximale est déterminée pour chaque image, et la plus petite valeur

calculée sur l'ensemble du jeu de données est utilisée dans l'histogramme. Certaines glaces d'épaisseur supérieure à cette limite peuvent donc avoir été mesurées. Dans ce dernier cas, il faut aussi noter que les glaces ayant une épaisseur calculée supérieure à cette limite sont effectivement plus épaisses que la valeur de la limite, mais qu'il est impossible de déterminer une épaisseur précise pour ces glaces.

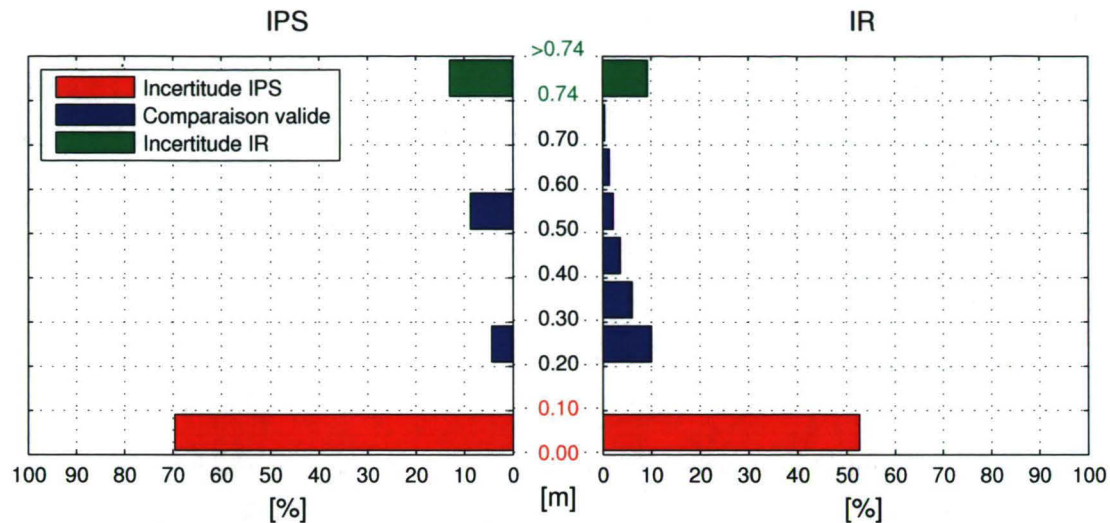


Figure 72 – Histogramme des épaisseurs de glace obtenues du IPS et de l'imagerie thermique pour le 25 février 2009 (a)

Pour cette partie des données du 25 février, trois types d'invalidité sont présents dont les deux premiers sont celui de la température de surface inférieure à la température de l'air, tel que mentionné précédemment, et celui qui donne des différences d'épaisseurs supérieures ou égales à 10 cm pour un changement de température de 0,1°C. Toutes les valeurs supérieures aux limites déterminées par ces critères ont été mises dans la classe >0,74 m. Une autre invalidité de la modélisation des températures de surface vs les épaisseurs de glace est aussi présente dans les courbes, mais ne consiste pas en une valeur limite maximale d'épaisseur : il s'agit du calcul d'épaisseurs négatives. Ces valeurs ont été ici incluses dans les valeurs >0,74 m. Elles auraient aussi pu être incluses dans la première classe, soit les épaisseurs inférieures à 10 cm, car ces valeurs négatives peuvent parfois être générées par le polynôme d'interpolation pour des glaces minces. Suite à la correction des températures, des glaces qui avaient une température tout près de 0°C pouvaient se retrouver légèrement au-dessus de ce seuil. Si le pourcentage de valeurs négatives est

important, le choix du classement de ces valeurs aura un fort impact sur la forme de la distribution. Ici, pour ce jeu de données, elles représentent environ 2% des valeurs et ne modifient pas considérablement la forme de la distribution.

Afin d'analyser la figure 72, il convient de souligner les différences entre la valeur mesurée par le IPS et celle obtenue de l'imagerie infrarouge. En effet, l'épaisseur donnée par le IPS est celle qui engendre les retours acoustiques les plus forts sur l'aire perçue dans son rayon d'action, soit environ $0,7 \text{ m}^2$. Il s'agit donc de l'épaisseur prédominante sur cette petite surface sondée, qui sera plus près de l'épaisseur moyenne que de l'épaisseur maximale. Il faut de plus considérer que l'épaisseur du IPS ne tient compte que de la quille de la glace, soit environ 90% de sa hauteur totale : l'épaisseur est alors sous-estimée. Toutefois, le IPS tient aussi compte de la « slush » sous la glace, alors qu'elle n'est pas incluse dans l'épaisseur déduite des images thermiques. Cette surestimation est par contre difficile à quantifier, car elle peut varier considérablement dans le temps. La caméra thermique prend quant à elle une image sur une surface de près de 9 m^2 . Par ailleurs, elle est localisée plus près du quai et peut ne pas observer exactement les mêmes glaces. L'analyse de tous les pixels a été choisie afin de pallier à ces imprécisions. En effet, l'analyse de l'ensemble des données du IPS par rapport à l'ensemble des données de l'imagerie thermique permet de comparer les caractéristiques générales des glaces dans les conditions en présence, plutôt que de comparer des mesures isolées de floes possiblement distincts. Bref, la comparaison globale permet de voir les tendances dans les épaisseurs de glaces obtenues des deux méthodes.

En étudiant la figure 72, on constate premièrement que la distribution des épaisseurs du IPS et de celles calculées avec l'imagerie thermique sont semblables. Entre 50 % (selon IR) et 70 % (selon IPS) des glaces sont d'une épaisseur inférieure à 10 cm. Par contre, l'incertitude sur le IPS pour ces épaisseurs est considérable. Il est difficile d'affirmer si ces épaisseurs obtenues par le IPS sont en réalité nulles ou légèrement supérieures à 10 cm, mais il est fort probable qu'elles soient effectivement entre 0 et 10 cm. Selon l'imagerie thermique, environ 10% des glaces auraient une épaisseur supérieure à 74 cm, alors que le IPS montre que ce pourcentage est de l'ordre de 12%. Pour les épaisseurs entre 10 et 74 cm, la distribution est quelque peu différente, mais demeure plausible étant donné le

nombre de données inférieur du IPS qui ne permet pas de mesurer autant de glaces que l'imagerie thermique. Bref, considérant les différences d'acquisition des épaisseurs selon les deux méthodes et la taille de l'échantillon dans chaque cas, il ressort que les épaisseurs du IPS et celles calculées sont du même ordre de grandeur, distribuées de manière semblable et que les résultats de l'imagerie thermique sont plausibles

Ainsi, de ce premier jeu de données, on peut déduire que les épaisseurs mesurées dans les conditions météorologiques présentes (-8°C , vent de 24 km/h) et dans l'obscurité sont acceptables.

4.2.1.2 Jeu 2 : 25 février 2009 (b)

Le deuxième jeu de données acquis lors du 25 février 2009 l'a été un peu plus tard que le premier, entre 22h30 et 23h. Il a été acquis au moment où l'avion effectuait un survol au-dessus de ce secteur. Les conditions d'acquisition sont sensiblement les mêmes. Toutefois, il y avait très peu de glaces à ce moment.

L'étude de la figure 73 montre que contrairement au premier jeu de données, toutes les températures de surface des glaces se trouvent entre celle de l'air et celle de l'eau. Également, les températures sont près de celle de l'eau, et il est possible de conclure que les glaces sont plus minces. La figure 74 permet en effet de vérifier cette dernière affirmation. Les données mesurées par le IPS varient entre 2 et 7 cm d'épaisseur. Pour plusieurs de ces données, aucune glace n'avait été vue dans les images thermiques, sauf entre 22h40 et 22h50, où les épaisseurs moyennes obtenues avec l'imagerie thermique sont très près de celles du IPS. Ainsi, les données des deux appareils concordent et confirment le calcul effectué avec les images thermiques. Aucune valeur d'épaisseur moyenne calculée à partir des images thermiques n'a été jugée non valide.

On note aussi l'absence de quelques données du IPS dans la figure 74. Ces données manquantes peuvent en pratique être expliquées par deux causes : soit il y a de la glace de fond sur le IPS, soit il détecte des retours provenant d'au-dessus de la surface de l'eau. Cette deuxième cause peut survenir lorsqu'il n'y a pas de glace ou lorsque les épaisseurs des glaces sont très faibles. Elle est donc la plus probable dans le cas présent.

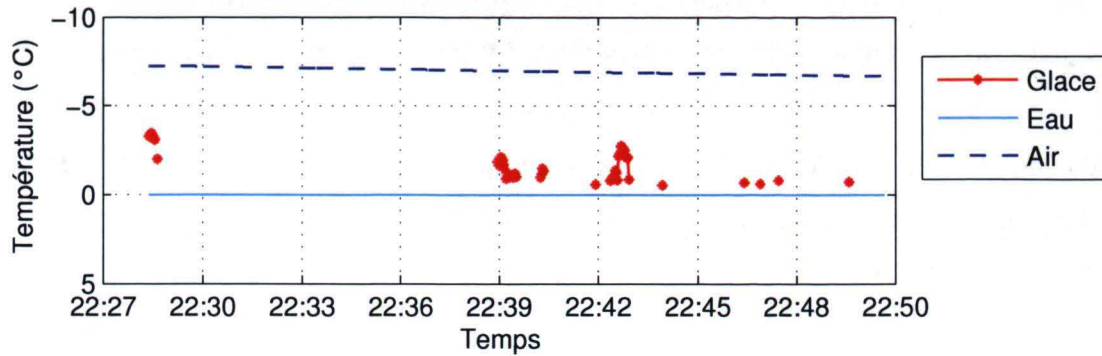


Figure 73 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 25 février 2009

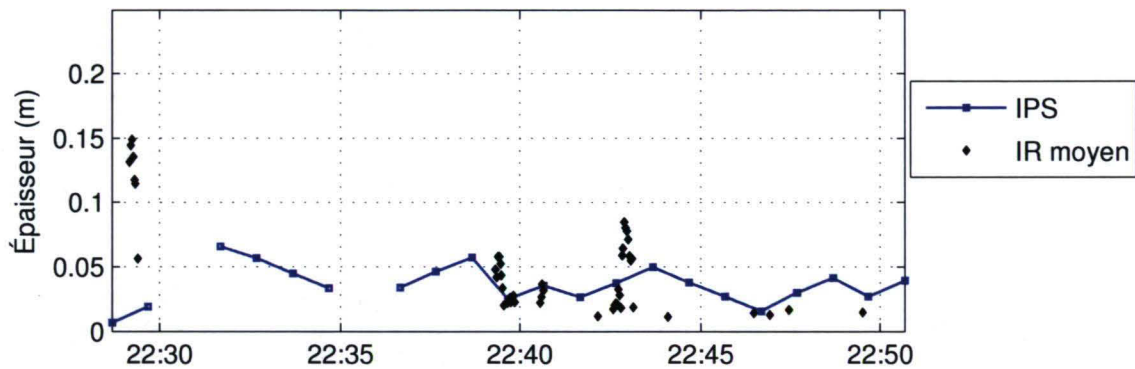


Figure 74 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes déduites des images thermiques (IR) , pour le 25 février 2009

La présence de glace détectée par le IPS et l'absence de glace dans les données thermiques, en plusieurs points, est quelque peu problématique. Plusieurs hypothèses peuvent par contre être posées pour tenter de répondre à cette incertitude. Il faut d'abord garder en mémoire que l'erreur de mesure du IPS est de $\pm 0,05$ m, ce qui implique une erreur relative importante pour les faibles épaisseurs. Il faut aussi considérer que l'analyse des images thermiques est subjective, car un analyste étudie chacune des images afin d'en détecter le contenu. Considérant que les images ont été acquises par temps froid, en soirée, il est fort possible qu'une mince couche de glace se soit nouvellement formée sur l'ensemble de la surface de l'eau. Si cette glace est assez régulière et très mince et si elle couvre en bonne partie la surface visible dans l'image, il se peut que le traitement ait été quelque peu faussé. La figure 75 montre un exemple d'image brute acquise dans ce jeu de données. On y voit

une surface relativement uniforme et près de 0°C, bien que quelques irrégularités pourraient être interprétées comme étant des morceaux de glaces côtes à côtes. Lors du traitement, elles ont été interprétées comme des variations de températures de l'eau, puisque la surface de l'eau n'est jamais perçue comme parfaitement uniforme. Toutefois, après analyse des données du IPS, il ressort qu'il s'agissait possiblement de glaces minces.

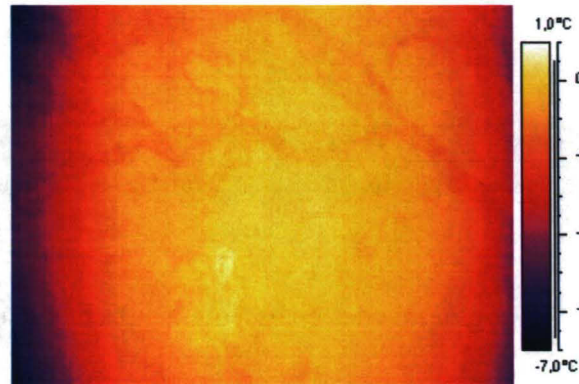


Figure 75 - Exemple d'image thermique acquise le 25 février 2009

Un histogramme de l'ensemble des données du IPS et de l'imagerie thermique est aussi montré à la figure 76 afin d'analyser globalement les résultats. Les deux histogrammes sont identiques et laissent croire que les épaisseurs calculées avec l'imagerie thermique sont correctes. Toutefois, les épaisseurs ne se retrouvant que dans la classe 0-10 cm, il est difficile de conclure que la modélisation thermique permet de bien évaluer les épaisseurs lorsque les glaces sont plus épaisses.

Il ressort de l'analyse des figures précédentes pour le jeu du 25 février(b) que les épaisseurs mesurées par le IPS sont valides et qu'elles sont similaires à celles obtenues dans les images thermiques, malgré qu'elles ne se situent que dans la classe d'épaisseur 0-10 cm. Par contre, il est aussi conclu que lorsque les glaces sont très minces et qu'elles couvrent l'ensemble de l'image thermique, il est difficile de bien les discerner et analyser.

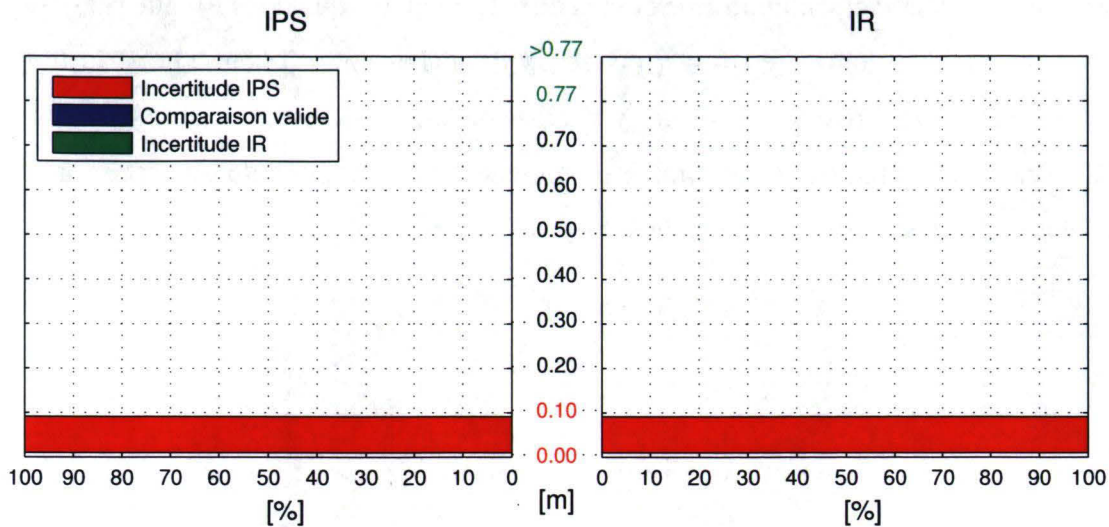


Figure 76 – Histogramme des épaisseurs de glaces pour le 25 février (b)

4.2.1.3 Jeu 3 : 23 février 2009 (a)

Les données acquises le 23 février 2009 constituent les jeux de données 3 et 4. Elles ont été acquises par une température d'air d'environ -3°C et des vents de 15 km/h, en soirée. La figure 77 montre encore une fois que plusieurs glaces ont des températures de surface inférieures à celle de l'air, étant donc des données impossibles à utiliser, mais laissant croire à la présence de glaces très épaisses.

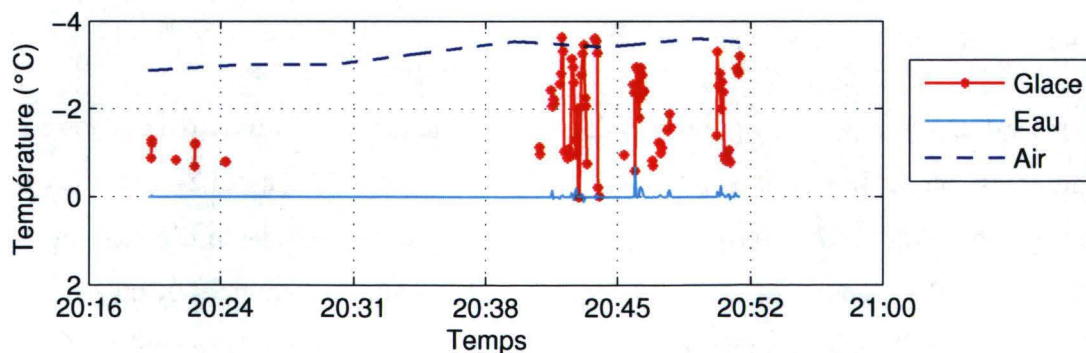


Figure 77 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 23 février 2009

La figure 78 est quant à elle très intéressante. En effet, plusieurs données du IPS sont manquantes, laissant croire à l'absence de glaces tel que vu dans les données thermiques.

Quelques points du IPS ont de faibles épaisseurs, de quelques centimètres à peine. Par contre, la présence d'un seul point d'épaisseur de plus de 2 m est notée. Ce point précis est très intéressant, car il concorde, dans le temps et les épaisseurs, aux épaisseurs obtenues par les calculs et les images thermiques, à environ 20 cm près. Or, la forme de la courbe des épaisseurs en fonction des températures de surface fait qu'une imprécision dans la température de surface d'une glace épaisse va engendrer une erreur considérable sur l'épaisseur déduite. Comme pour les résultats du premier jeu de données, on peut tirer de la figure 78 que la température de surface est suffisamment précise, de même que la courbe utilisée pour en déduire l'épaisseur.

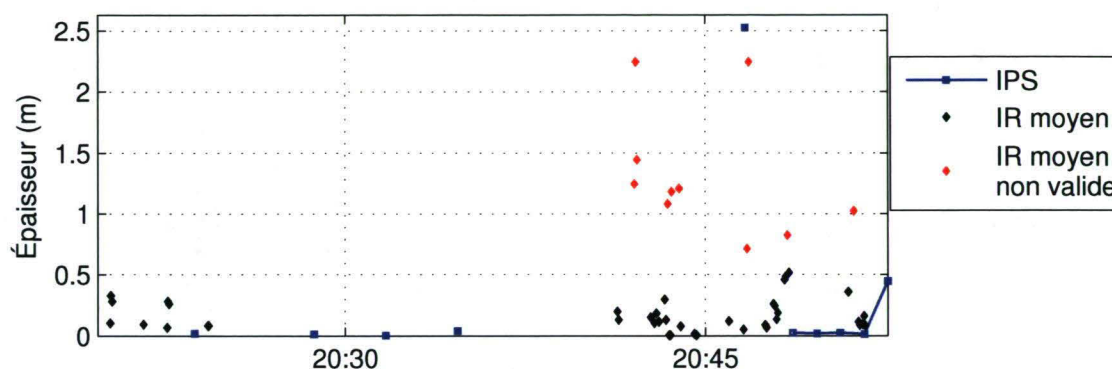


Figure 78 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes déduites des images thermiques (IR), pour le 23 février 2009 (a)

La figure 79 montre la distribution des épaisseurs obtenues des deux méthodes. Pour les données thermiques, l'ensemble des pixels de la moitié supérieure de toutes les images prises pendant le temps couvert par ce troisième jeu de données est utilisé. Au premier abord, les distributions, à leurs extrêmes, semblent être à l'opposé. Par contre, il faut tenir compte du fait que les valeurs négatives, qui en réalité peuvent être des valeurs d'épaisseurs près de 0 ou très élevées, ont été classées dans la dernière classe, soit celle des valeurs non valides. Un second histogramme a été généré en classant les valeurs négatives dans la classe d'épaisseur inférieure à 10 cm, tel que montré à la figure 80. Les formes de distribution du IPS et de l'imagerie thermique sont davantage comparables et similaires. Par ailleurs, le fait que le IPS ait détecté plusieurs glaces minces et que de nombreuses données soient manquantes prouve qu'il y avait souvent pas de glaces ou des glaces minces. Il semble donc logique que les valeurs négatives déduites de l'imagerie thermique

proviennent effectivement de glaces minces devant être classées dans la première classe plutôt que dans les classes de grandes épaisseurs.

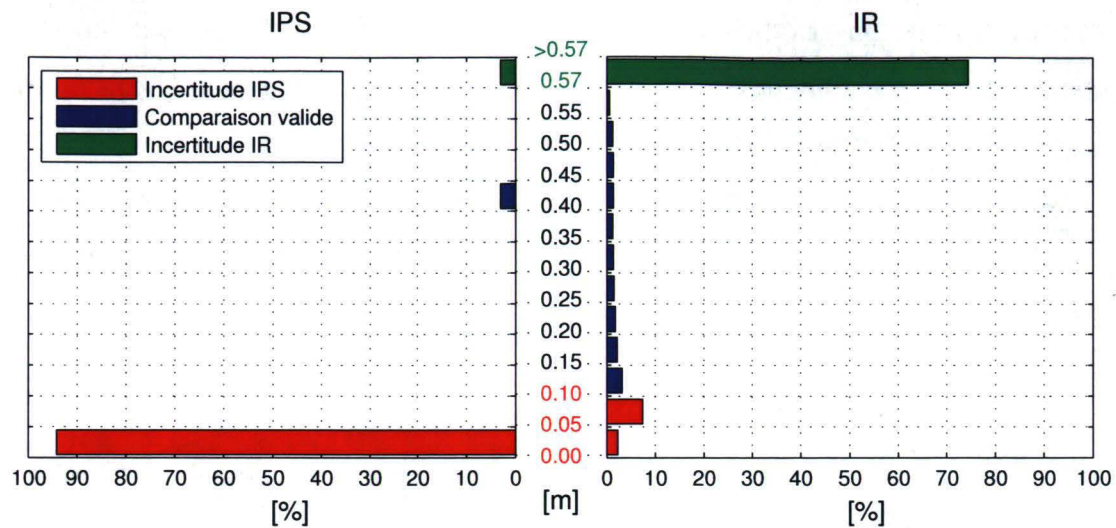


Figure 79 - Histogramme des épaisseurs pour les données du 23 février 2009 (a), avec les valeurs négatives dans la dernière classe

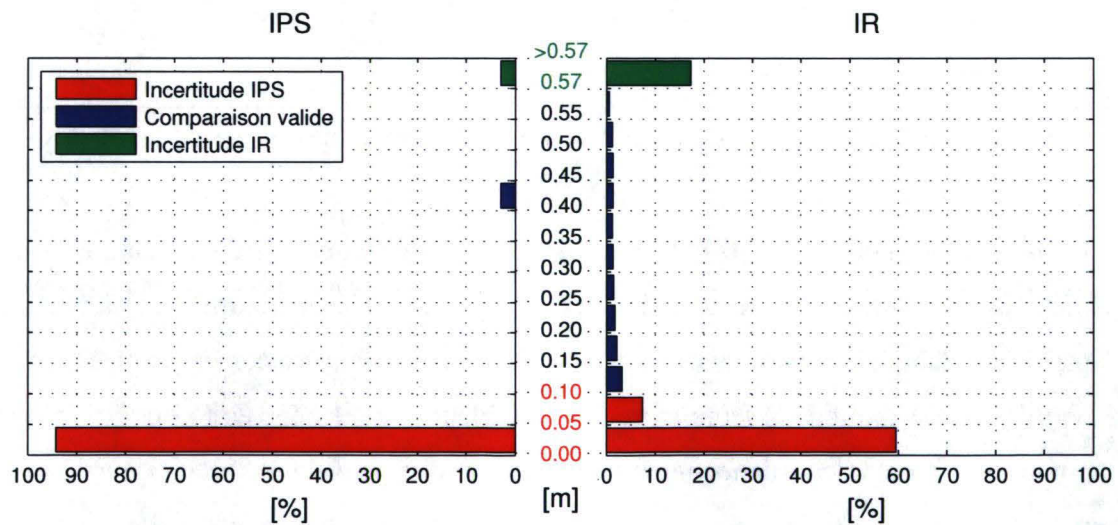


Figure 80 - Histogramme des épaisseurs pour les données du 23 février 2009 (a), avec les valeurs négatives dans la première classe

L'analyse du jeu de données 3 révèle donc que les températures de surface corrigées et les épaisseurs calculées sont valides, comme c'était le cas dans le premier jeu de données. Même la valeur extrême détectée par le IPS à près de 2,5 m est assez bien évaluée par la

modélisation et l'imagerie thermique, puisqu'on obtient une valeur d'environ 2,25 m. Cette valeur, puisque son erreur était plus grande que 10 cm, a été classée non valide. Par contre, en tenant compte de cette incertitude supérieure à 10 cm, la valeur calculée par l'imagerie thermique est correcte, puisqu'elle est suffisamment près de 2,5 m.

4.2.1.4 Jeu 4 : 23 février 2009 (b)

Le second jeu de données acquis le 23 février 2009 montre le passage de quelques glaces, tel que vu à la figure 81. Les températures de surface sont près de celle de l'air dans plusieurs cas, la dépassant même à certaines occasions. Assurément, les valeurs d'épaisseurs de glace calculées ne seront pas valides.

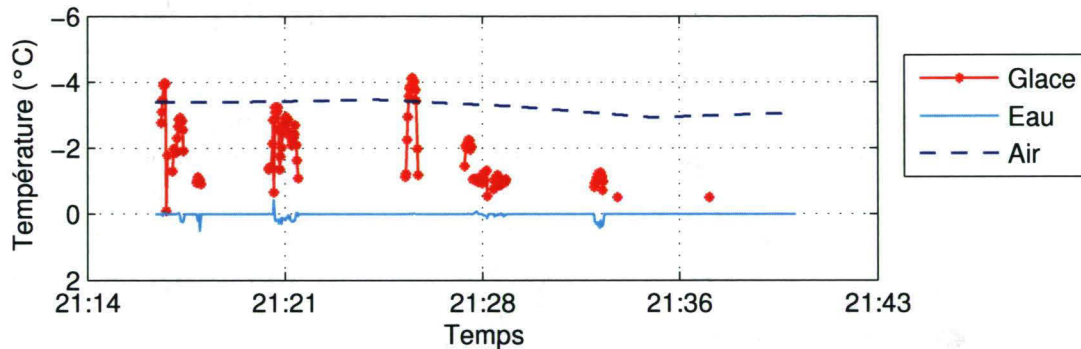


Figure 81 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 23 février 2009

La figure 82 montre les épaisseurs calculées à partir des images thermiques. On y remarque la présence de glaces minces, le manque de données du IPS probablement dû à l'absence de glaces et la présence d'une glace épaisse dans les valeurs du IPS. Ce point, à 1,9 m d'épaisseur, peut se comparer au point calculé quelques minutes plus tôt à partir des données thermiques. Le point des données thermiques est classé non valide, car son incertitude dépasse 10 cm. D'autres épaisseurs près de 1,5 m sont aussi notées.

La distribution des épaisseurs a été faite en classant les valeurs négatives dans la première classe, puisque le IPS montre des épaisseurs faibles ou nulles et que les données ont été acquises quelques minutes plus tard que le jeu de données précédent. La figure 83, présentant l'histogramme des épaisseurs pour les deux méthodes, montre des distributions

semblables. Quelques pixels de glaces d'épaisseurs entre 5 et 60 cm ont été mesurés avec l'imagerie thermique. Étant donné la superficie couverte par la caméra thermique comparée à celle couverte par le IPS, ainsi que le taux d'échantillonnage, le fait que le IPS n'ait pas détecté de glaces de ces épaisseurs ne remet pas en cause ces épaisseurs entre 5 et 60 cm.

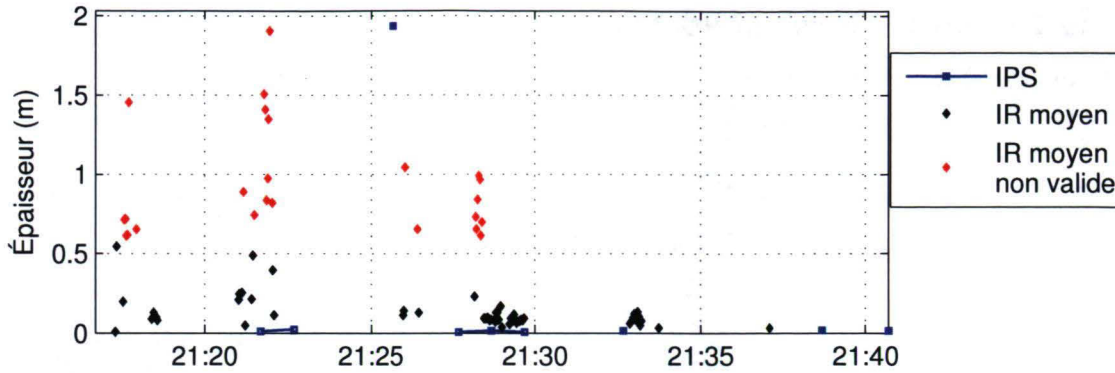


Figure 82 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes et maximum déduites des images thermiques (IR) , pour le 23 février 2009

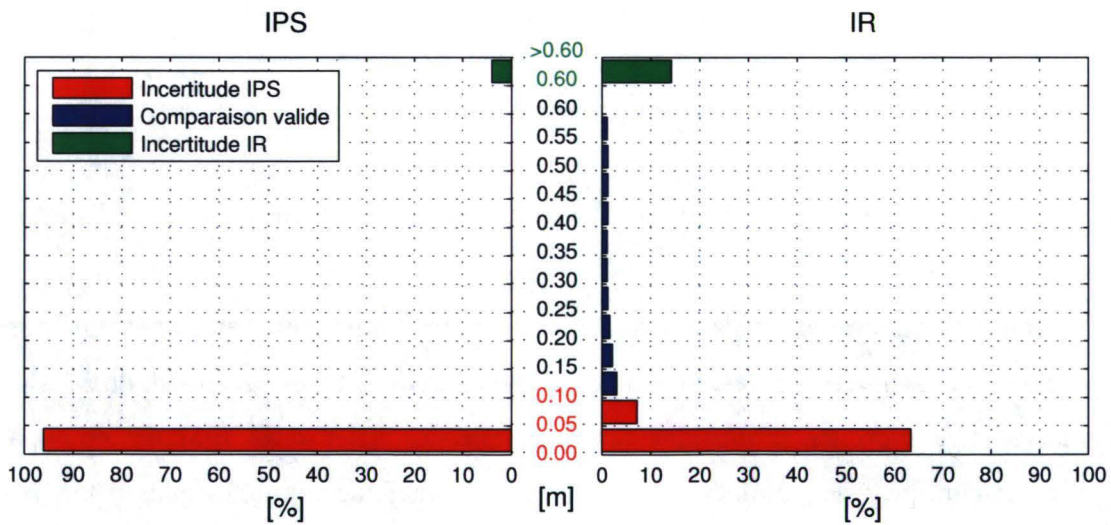


Figure 83- Histogramme des épaisseurs de glaces pour le 23 février 2009 (b), avec les valeurs négatives classées dans la dernière classe

4.2.1.5 Jeu 5 : 15 février 2009 (a)

Les données du 15 février ont été analysées afin de déterminer le potentiel des images acquises de jour. Elles ont été acquises vers 11h30, par temps nuageux : l'effet du soleil

n'est donc pas problématique. La figure 84 montre la température moyenne de l'air, de la glace et de l'eau suite à la correction des images. On y constate que les températures d'air étaient autour de $-6,9^{\circ}\text{C}$. De plus, les vents soufflaient à près de 17 km/h. Les températures moyennes des glaces oscillent bien entre la température de l'eau et celle de l'air et sont donc crédibles.

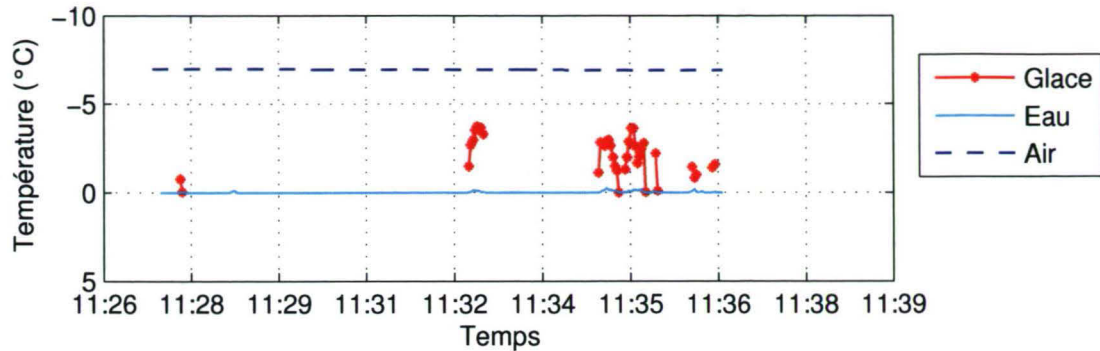


Figure 84 - Températures de surface des glaces et de l'eau et température de l'air pour le 15 février 2009

La figure 85 montre les épaisseurs obtenues de l'imagerie thermique et du IPS. L'allure du graphique est similaire, par l'absence de glaces à plusieurs moments. Les épaisseurs moyennes obtenues par l'imagerie thermique sont toutefois un peu plus grandes.

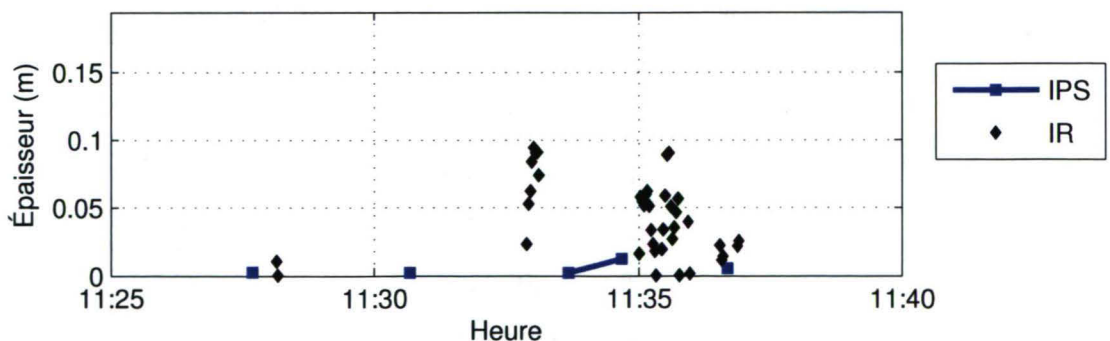


Figure 85 - Épaisseurs mesurées par le IPS et épaisseurs moyennes et maximum déduites des images thermiques (IR) , pour le 15 février 2009

L'incertitude de l'imagerie infrarouge débute avec les épaisseurs supérieures à 0,52 m. Dans ce cas-ci, aucune épaisseur supérieure à cette limite de validité n'a été obtenue. De l'histogramme de la figure 86, on constate que 100% des épaisseurs mesurées par le IPS

seraient inférieures à 10 cm et donc empreintes d'incertitudes. Par contre, environ 70% des données IR sont aussi inférieures à 10 cm. Les autres 30% peuvent atteindre une épaisseur maximale de 30 cm. Globalement, pour le 15 février, l'histogramme permet de démontrer que les distributions des épaisseurs obtenues des deux méthodes présentent des similitudes. Toutefois, étant donné que le IPS ne prend des mesures que toutes les minutes et qu'il s'agit alors d'une mesure locale, alors que la caméra infrarouge mesure des températures converties en épaisseurs environ toutes les deux secondes et qu'elle couvre une surface de près de 9 m², il est plausible que les résultats montrent certaines différences. Il demeure que dans l'ensemble, la comparaison pour le 15 février est possible et accorde une validité aux données infrarouges.

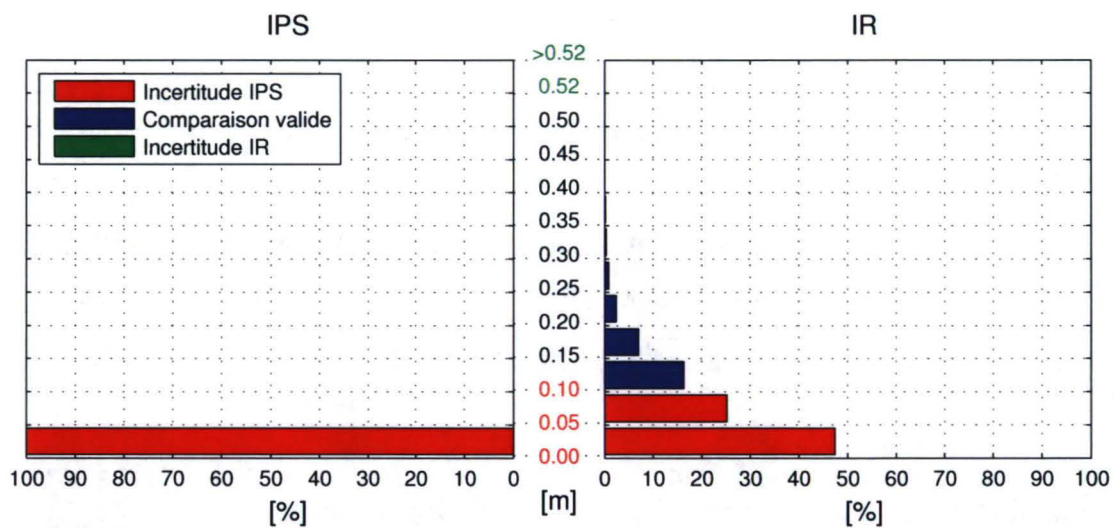


Figure 86 - Histogramme des épaisseurs de glaces acquises par le IPS et par l'imagerie infrarouge (IR)

Ainsi, de prime abord, les données acquises par temps nuageux semblent pouvoir être utilisées au même titre que des images acquises dans l'obscurité. Davantage de jeux de données pris dans ces conditions permettraient toutefois de donner davantage de crédit à cette affirmation.

4.2.1.6 Jeu 6 : 28 février 2009

Le jeu de données du 28 février 2009 est le plus complet, car il contient plus de 4800 images analysées, alors que les autres jeux en contenaient en moyenne 600. Tel que montré

à la figure 87, la température de l'air était d'environ -8°C lors de son acquisition. Du tableau 4, on voit que les conditions étaient ensoleillées, avec des vents faibles. La majorité des températures de surface de la glace étaient entre celle de l'eau et de l'air. La température de l'eau oscille davantage que pour les autres jeux de données et laisse planer l'idée que la correction des températures n'a pas été aussi optimale que pour les autres jeux de données.

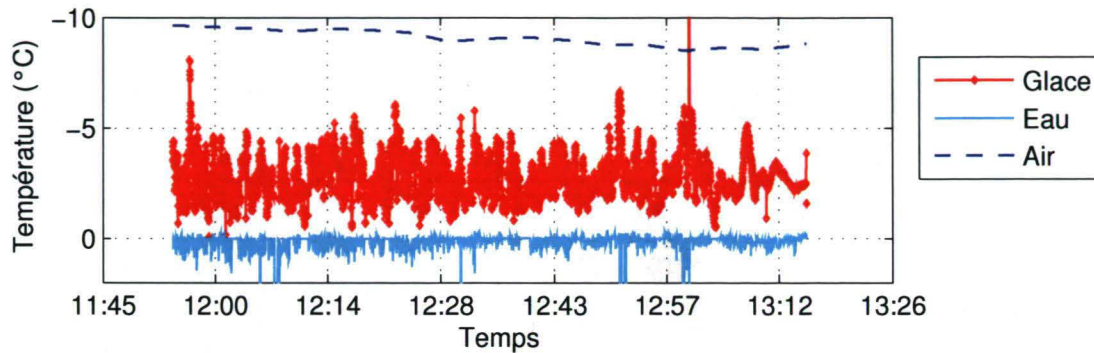


Figure 87 – Températures de l'air, de surface de la glace et de l'eau pour les données du 28 février 2009

À la figure 88, les différences entre l'épaisseur moyenne obtenue de l'imagerie thermique pour chaque image et les valeurs du IPS sont particulièrement évidentes. Bien que les données du IPS comprennent plusieurs valeurs près de zéro, elles incluent aussi nombre de points dont l'épaisseur est supérieure à 0,5 m. Ce graphique laisse aussi entrevoir que les résultats semblent être en moins bonne concordance que pour les autres séries de données.

L'histogramme des épaisseurs obtenues pour tous les pixels des images, comparé à celui de toutes les données du IPS, est montré à la figure 89. Globalement, la distribution demeure la même. Il y a par contre davantage de glaces supérieures à 0,36 m perçues par le IPS que perçues par l'imagerie thermique. Cette forme d'histogramme est obtenue en incluant les valeurs négatives d'épaisseurs dans la dernière classe, ce qui signifie que ces valeurs négatives proviendraient d'un mauvais ajustement du polynôme d'interpolation pour les grandes épaisseurs de glaces. Considérant le nombre de points dont l'épaisseur est supérieure à 0,5 m pour le IPS, il est plausible que ces valeurs négatives correspondent à de grandes épaisseurs.

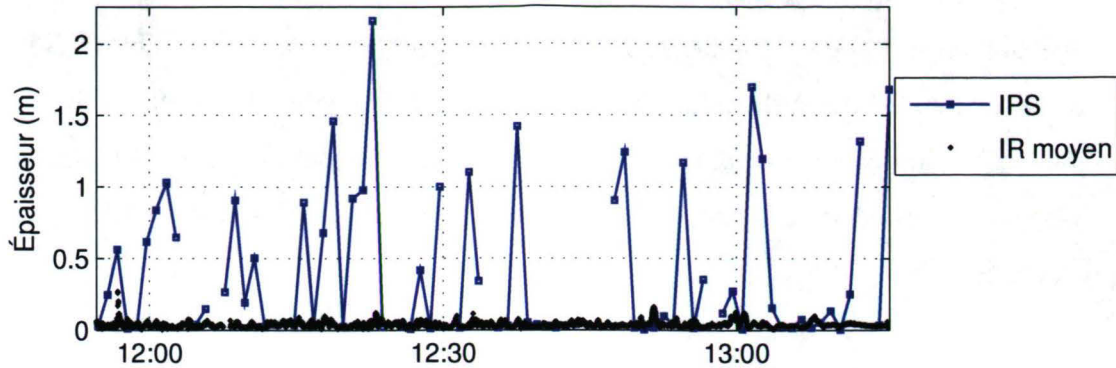


Figure 88 – Épaisseurs du IPS et moyennes obtenues de l'imagerie thermique pour les données du 28 février 2009

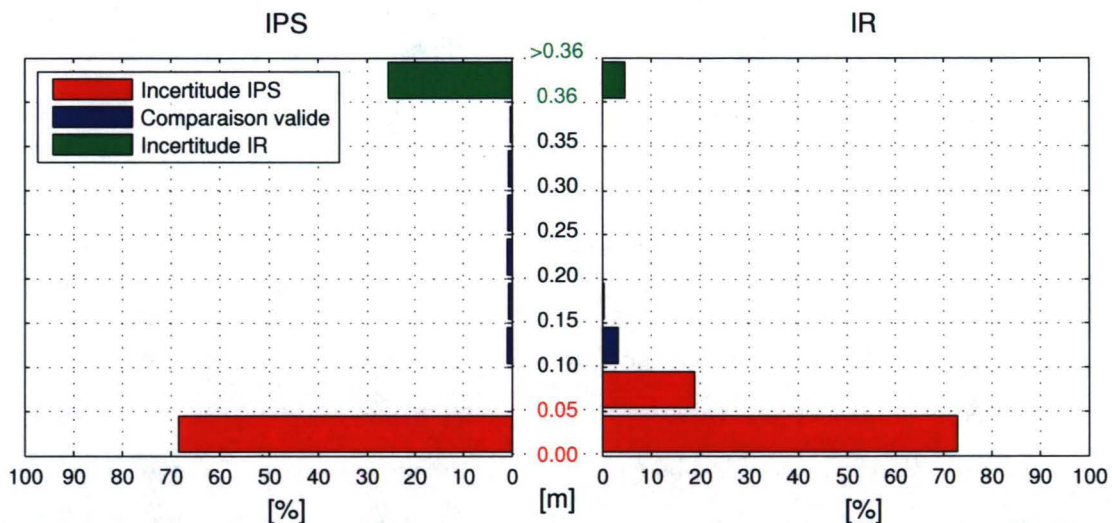


Figure 89 - Histogramme des épaisseurs de glaces acquises par le IPS et par l'imagerie infrarouge (IR), avec les valeurs négatives dans la dernière classe, pour le 28 février 2009

La figure 90 montre quant à elle la distribution en incluant les valeurs négatives dans la première classe. Ce classement serait aussi possible, étant donné qu'il y a de nombreuses glaces minces dans les données. Toutefois, il n'y a alors aucune glace d'épaisseur supérieure à 0,36 m, ce qui ne concorde pas avec les valeurs obtenues du IPS. Par ailleurs, les valeurs moyennes montrées à la figure 88 ne montrent aucune grande épaisseur. Si des pixels ayant des températures faibles et des épaisseurs considérables étaient effectivement présents, ils ne couvriraient pas l'ensemble de l'image.

Les images réelles acquises en même temps que les images thermiques ont été consultées. On y voit des images ne présentant que de l'eau, et d'autres montrant des glaces assez épaisses, parfois formées d'empilement de glaces, et dont la surface est très blanche, démontrant qu'il s'agit de glaces assez bien formées ayant possiblement subi des chutes de neige (figure 91). La première version de l'histogramme est donc plausible.

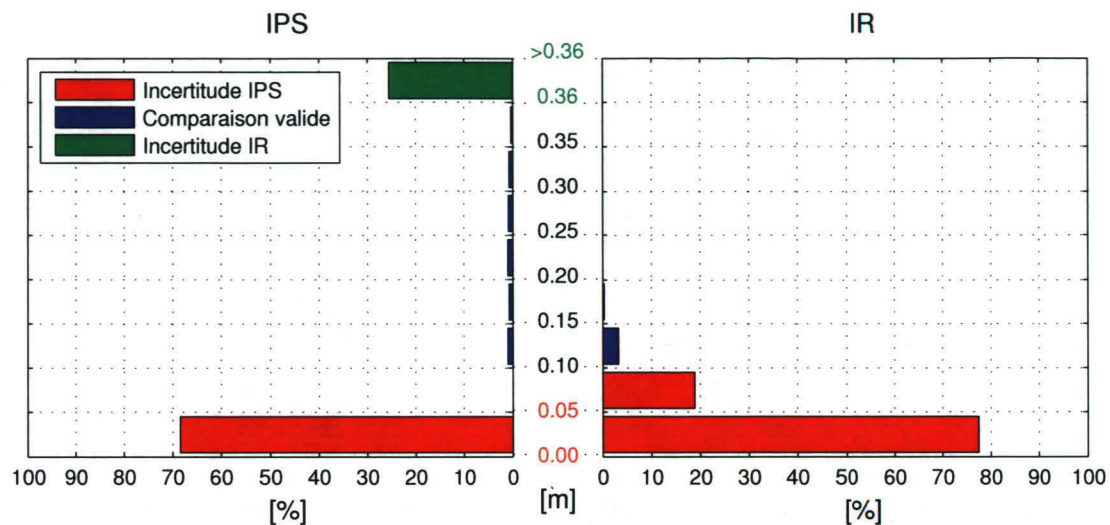


Figure 90 - Histogramme des épaisseurs de glaces acquises par le IPS et par l'imagerie infrarouge (IR), avec les valeurs négatives dans la première classe, pour le 28 février 2009

De plus, il faut noter que pour certaines images, aucun point d'eau ne permet de corriger de manière appropriée les températures de surfaces mesurées par la caméra thermique. L'image réelle montrée à la figure 91, prise par la caméra Canon EOS 20D, illustre le cas où aucun point d'eau ne peut être utilisé pour corriger l'image. Dans un tel cas, les points qui étaient considérés comme de l'eau étaient ceux dont la température était maximale et il fallait qu'ils se trouvent en très petit nombre. Au cours du traitement, la possibilité de conserver la matrice de correction des images précédentes a été ajoutée. Toutefois, tel que montré à la figure 87, les températures subissent tout autant d'oscillations au début qu'à la fin de la série de données, ce qui laisse envisager un mauvais ajustement des températures malgré l'ajout de cette option. Bref, lorsque les glaces couvrent entièrement l'image, la correction des températures ne peut être appliquée avec justesse et les épaisseurs déduites peuvent être tout autant imprécises.

Étant donné les observations provenant des images réelles, on peut considérer que le premier histogramme était effectivement le plus approprié. Il en résulte que malgré la présence de glaces sur des images complètes, la majorité des données ont pu être bien traitées et les distributions des épaisseurs obtenues des deux méthodes sont similaires. Il semble donc que les images acquises par temps ensoleillé offrent elles aussi la possibilité de déduire correctement les épaisseurs des glaces.

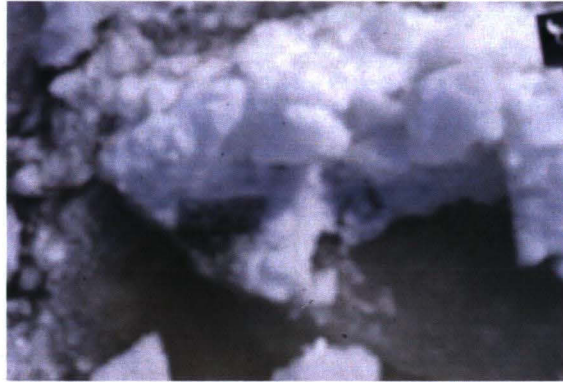


Figure 91 – Exemple d'image réelle acquise pour le 28 février 2009, avec la caméra Canon EOS 20D

4.2.1.7 Observations générales sur les données acquises au port et recommandations

En général, les températures et épaisseurs pouvant être calculées à partir de l'imagerie thermique sont limitées par le critère qui élimine les glaces dont une température de surface inférieure de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ à leur température génère une différence d'épaisseur de plus de 10 cm. Le critère en lien avec la forme de la courbe (glace plus épaisse ayant une température de surface plus chaude) est parfois observé, mais il est rarement le critère le plus limitatif. Par ailleurs, pour des glaces minces, étant donné le polynôme d'interpolation choisi, plusieurs valeurs négatives peuvent être obtenues. Ce polynôme d'interpolation a tout de même été conservé, car parmi les fonctions d'interpolation typique de MATLAB™, il s'est avéré être celui le plus approprié dans la majorité des cas. De plus, étant donné que des courbes d'épaisseurs en fonction des températures de surface ont été générées pour chacune des images analysées, et que cela résulte en des milliers de courbes, il aurait été fastidieux d'évaluer une à une la justesse des courbes interpolées. Il est donc recommandé, pour les

travaux futurs, d'utiliser une fonction d'interpolation ne permettant pas de passer sous la valeur zéro pour les épaisseurs.

Bien que non montrées dans les graphiques de la section 4.2.1, les températures limites sont généralement inférieures à la température de l'air de quelques dixièmes de degrés Celsius. Cette observation est celle attendue, étant donné les équations utilisées pour la modélisation thermique. Elle est aussi intuitive, car si l'eau sous une glace est à 0°C et que la température de l'air au-dessus d'elle est à une valeur de -5°C par exemple, il est impossible que la glace soit à une température inférieure à -5°C , à moins que la température de l'air ait changé brusquement.

4.2.1.8 Notes sur le positionnement des appareils

À plusieurs reprises, dans l'analyse des données, un décalage des mesures entre le IPS et les données thermiques a été noté et possiblement attribué à un décalage des données. En effet, le IPS a été déposé au fond de l'eau et des repères visuels ont été pris pour retrouver l'emplacement de la pyramide d'instrumentation. Il se peut toutefois, qu'avec la glace de fond et les courants, elle ait été déplacée au cours de l'hiver. Quant à la nacelle sur laquelle était positionnée la caméra thermique, elle était repositionnée à chaque acquisition d'un jeu de données, et le camion lui-même était déplacé chaque jour. Ainsi, malgré la tentative de toujours le placer au même endroit, il pouvait être légèrement décalé à chaque fois, surtout en présence d'opérateurs différents. De plus, la longueur de l'échelle de la nacelle étant de 11,5 m, il aurait été impossible de positionner la caméra plus loin du quai. Il en résulte donc que les instruments n'étaient probablement pas alignés. Pour des glaces de taille considérable, cela ne cause pas problème, puisqu'elles étaient alors vues par les deux appareils. Pour des glaces plus petites, il est possible que certains morceaux détectés par un appareil ne l'aient pas été par l'autre, ou qu'ils l'aient été avec un intervalle de temps. Ce décalage est malheureusement non quantifiable, étant donné la méconnaissance de la position relative exacte des appareils et leur variabilité. Il n'en demeure pas moins qu'une glace, bien que pouvant être d'épaisseur différente des glaces environnantes, risque d'avoir une épaisseur semblable et les comparaisons entre les épaisseurs du IPS et celles calculées avec les données thermiques demeurent valides, surtout lorsque l'ensemble des pixels est comparé dans les histogrammes.

4.2.1.9 Notes sur la correction des températures

Il faut noter que les images réelles qui ont été prises conjointement avec les images thermiques ne peuvent servir d'aide à la distinction des glaces, car elles sont souvent obscures puisque prises après la tombée du jour. L'analyse des images thermiques permet toutefois une bonne analyse, car les contrastes y sont évidents, à l'exception de certaines glaces potentiellement très minces comme montré à la figure 75.

Par ailleurs, la sélection de points d'eau, tel que montré à la figure 92, n'est pas toujours évidente. En effet, de l'image thermique, la couleur orangée laisse croire à la présence d'eau. De l'image réelle, il semble s'agir d'un mélange d'eau et de glace (« slush »). Un tel mélange peut être considéré à 0°C. Toutefois, la figure 92 met en évidence que de la « slush » ou de la glace mince qui aurait une température légèrement inférieure à 0°C dans certains cas pourrait être perçue comme de l'eau.

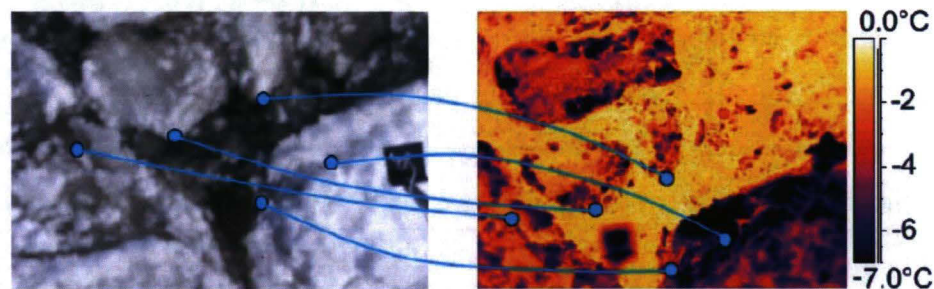


Figure 92. Exemple d'image réelle et thermique associée

4.2.2 Synthèse des données acquises au port

Des graphiques et histogrammes montrés pour les différents jeux de données, il est démontré que la thermographie infrarouge combinée à une modélisation thermique permet de calculer des épaisseurs de glaces qui semblent être valides et confirmées par les données acquises par le IPS. La limite de validité des données est aussi dépendante de la précision voulue : une erreur de 10 cm pour une différence de 0,1°C a été ici considérée. Il a aussi été démontré que l'utilisation du principe que l'eau est à une température de 0°C constitue la meilleure correction à appliquer sur les images thermiques afin d'ajuster les températures de surface apparentes mesurées par la caméra thermique. La correction d'images ne

présentant que de la glace est quant à elle incertaine, même en utilisant la correction des images précédentes.

En ce qui concerne les conditions météorologiques, il a été mis en évidence que des températures au-dessus de 0°C et la pluie amènent la température de surface des glaces à 0°C, ce qui ne permet pas d'en déduire une épaisseur. Le brouillard fausse complètement la mesure de température. La chute de neige, si elle n'est pas abondante, n'empêche pas la mesure de température de surface. Il pourrait toutefois en découler un traitement d'image plus complexe, et une modification de la température si un bon traitement n'est pas appliqué. En effet, la neige qui tombe serait à une température différente de celle des glaces. Dès que la neige commencera à s'accumuler à la surface des glaces, la température mesurée ne sera plus valide pour déterminer les épaisseurs. Les altérations en lien avec la présence de substances dans l'atmosphère (pluie, brouillard, neige) seront d'autant plus importantes que l'altitude de prise d'images sera grande.

Les données acquises la nuit ont souvent généré de meilleurs résultats, car la température de l'air était plus froide. Toutefois, les images acquises le jour, à moins que les conditions météorologiques mentionnées au paragraphe précédent ne soient présentes, ont aussi donné des résultats valides. L'angle d'incidence du rayonnement du soleil n'a pas altéré la qualité des images acquises.

Chapitre 5 - Recommandations

Lors de la discussion des différents résultats, certaines recommandations ont été émises. Elles sont ici regroupées et résumées dans le but de faciliter les recherches futures.

Émissivité

La valeur d'émissivité de la glace a été posée à 0,97 dans cette étude. Toutefois, cette valeur peut varier selon le type de glace et selon les longueurs d'onde. Une caractérisation des types de glaces pouvant être trouvés sur le fleuve St-Laurent et la détermination de leur émissivité dans la fenêtre de longueur d'onde choisie sont nécessaires pour déterminer l'erreur pouvant résulter de glaces de types différents. Selon la variabilité des émissivités, il sera possible de mieux quantifier l'erreur sur les épaisseurs pouvant être attribuée à l'utilisation d'une seule émissivité.

Distorsion

La distorsion des images n'a pas été considérée dans les traitements. La distorsion modifie le positionnement des pixels dans l'image, mais n'altère pas leur intensité. Les statistiques calculées ayant une composante spatiale ont donc une incertitude. L'erreur sur les distances mesurées sur l'image brute, évaluée à 6%, a été jugée acceptable pour cette recherche. Si une meilleure précision était nécessaire lors de recherches ultérieures, la correction de la distorsion serait inévitable. La méthodologie habituelle pour la correction de la distorsion implique la prise de photographies d'un quadrillé sur la superficie entière de l'image. Il faudrait donc adapter cette méthodologie au domaine thermique.

Interpolation de la courbe des épaisseurs selon la température de surface

À plusieurs reprises, il a été mentionné que le polynôme d'interpolation cubique Hermite par partie pouvait générer des valeurs négatives, autant pour les épaisseurs très minces que des grandes épaisseurs. Le milieu de la distribution est généralement bien ajusté. L'utilisation d'une courbe d'interpolation qui ne générerait d'erreur dans aucun cas serait évidemment plus appropriée.

Calibration de la caméra thermique

Il serait approprié d'effectuer une calibration de la caméra thermique dans des conditions s'approchant des conditions d'opération de la caméra.

Limites de validité

Divers critères ont été établis pour déterminer les limites de validité des courbes mettant en relation la température de surface. Selon l'application voulue des résultats et la précision acceptable, des limites différentes pourraient être posées.

Mesures de calibration

La prise de mesure d'épaisseur par le IPS a ici été utilisée pour confirmer les épaisseurs obtenues de l'imagerie thermique. La méthodologie utilisée a toutefois découlé en de nombreuses incertitudes. Un même type de campagne, avec une localisation plus précise des appareils, pourrait être répétée. Une campagne différente serait aussi à privilégier. La mesure d'épaisseur sur des floes sur le fleuve St-Laurent, combinée à des prises d'images thermiques à l'aide d'un drone, survolant les floes à différentes altitudes, pourrait être envisagée.

Instrumentation à bord de l'avion

L'utilisation d'instruments permettant de mesurer le lacet, le tangage et le roulis de l'avion lors du survol est essentielle pour effectuer une géoréférence précise des images, et non pas un positionnement (et redressement en 2008) des images. Cela permettra de mieux positionner les données, et de diminuer l'erreur sur les statistiques surfaciques.

Présence de glaces uniquement dans les images

Lorsqu'il n'y a que des glaces dans l'image, la correction des températures, par l'affirmation que l'eau est à une température de 0°C, est impossible. La correction de ces images devrait donc être améliorée. Il est mentionné à la section 4.2.1.6 que certaines images ont fait l'objet d'une correction à partir de la matrice de correction de l'image précédente. Cette approche n'a pas été jugée fiable. Une approche du même type, mais utilisant une moyenne des corrections sur les images précédentes et suivantes, serait à étudier afin d'en améliorer la qualité. Cette approche pourrait être valide s'il n'y a pas de recalibration automatique de la caméra pendant ce cours laps de temps. Or, une approche de

ce type pourrait être insuffisante. Dans un tel cas, si les images ne montrant que des glaces doivent être utilisées, une correction plus poussée que celle utilisant les points d'eau devraient alors être développée, par exemple en calculant en détails les effets de la transmission de l'atmosphère.

Conditions météorologiques

Certaines conditions météorologiques ont été jugées non applicables pour la thermographie infrarouge. La chute de neige ou de pluie et la présence de brouillard en sont des exemples. Il n'a pas été prouvé que les conditions ensoleillées résultent en des résultats moins fiables, mais si possible, un survol de nuit serait tout de même recommandé. L'accumulation récente de neige empêcherait aussi toute mesure valide. Si des images sont acquises à une altitude élevée, par un satellite par exemple, la couverture nuageuse devrait être nulle. Bref, selon les conditions météorologiques et l'altitude d'acquisition des images, les effets de la transmission de l'atmosphère devrait être calculés d'une manière plus ou moins poussée. Dans certains cas (par exemple, une pluie ou une neige abondante), la thermographie infrarouge n'est tout simplement pas conseillée.

Traitement d'images

Le traitement d'images dans cette recherche a nécessité des interventions manuelles pour chacune des images, parfois à plusieurs étapes. Il en a découlé un long traitement des images. Le développement d'outils de traitement d'images plus poussés serait approprié si de larges jeux de données devaient être acquis. Sinon, il en résulterait des temps de traitement inacceptables, surtout si cette technologie devait être appliquée à des fins opérationnelles et non pas seulement à des fins de recherche scientifique.

Résolution spatiale

Le capteur utilisé, ayant une matrice de 320 x 240 pixels, a fourni une résolution spatiale adéquate pour les vols effectués à faible altitude et les données acquises au port. Il en est tout autrement pour les données acquises à plus grande altitude. De même, si des données satellitaires étaient utilisées, il faudrait s'assurer d'avoir une résolution spatiale suffisante, car plusieurs capteurs n'ont pas une échelle appropriée pour l'étude des glaces sur le St-Laurent pour la bande de longueur d'ondes utilisée (Rees, 2006).

Conclusion

La thermographie infrarouge s'est avérée appropriée pour l'étude des glaces sur le fleuve St-Laurent. À partir d'une caméra thermique installée à bord d'un avion, des images thermiques ont été acquises entre Montréal et Québec au cours des hivers 2008 et 2009, dans le chenal de navigation du fleuve St-Laurent. Les températures de surface des glaces ont ainsi été mesurées. En mars 2008, la température médiane de surface des glaces s'est située entre -2 et -0,5°C. Il a résulté de ces températures des épaisseurs médianes des glaces de 1 à 3 cm. Bien que faibles, ces épaisseurs sont en accord avec la tardiveté du survol dans la saison hivernale et les températures clémentes associées. La concentration des glaces le long du fleuve s'est avérée fortement variable d'un secteur à l'autre, allant de 0 à 100%, mais montrant des tendances sectorielles. Le nombre de floe par hectare, l'aire moyenne des floes et l'excentricité des floes ont aussi été déterminées. Il faut mentionner que les statistiques pouvant être extraites ne se limitent pas à celles présentées dans ce mémoire. Toute statistique, caractéristique ou combinaison de caractéristiques liée à la température de surface, à l'épaisseur des glaces et à l'aspect spatial (concentration, aires, distances, forme) peut être imaginée par l'utilisateur et calculée afin de répondre à ses besoins particuliers¹.

En février 2009, des conditions plus favorables ont été observées lors du survol. Des températures d'air plus froides lors du survol et au cours des jours précédents ont causé l'observation de températures médianes de surface inférieures à celle observées en 2008, de -6 à 0°C. Les épaisseurs associées se sont révélées entre 0 et 15 cm. La concentration des glaces a aussi varié grandement, mais en montrant certaines tendances sectorielles différentes à celles observées en 2008. Le nombre de floes par hectare, l'aire moyenne des floes et l'excentricité des floes ont varié par rapport aux valeurs de 2008.

Une campagne d'instrumentation fixe au port de Québec a aussi été réalisée, de la mi-février au début mars 2009, dans le but de valider les épaisseurs obtenues. Un Ice Profiling Sonar (IPS) a été installé sur le fond marin afin qu'il mesure les épaisseurs des glaces à la surface, dont la température de surface était mesurée simultanément par une caméra

¹ Par exemple : concentration de glace vs aire des floes, distance entre les floes, épaisseur vs forme des glaces, etc.

thermique. Malgré des limites de validité différentes pour les épaisseurs provenant du IPS et celles calculées à partir de l'imagerie thermique ainsi que certaines difficultés rencontrées sur le terrain, des distributions généralement similaires des épaisseurs ont été obtenues pour les deux instruments. Tel qu'observé lors des survols aériens, la plupart des glaces avaient une épaisseur inférieure à 10 cm. Certains floes plus épais ont aussi pu être observés. Les données du IPS tendent donc à confirmer les épaisseurs calculées à partir de l'imagerie thermique.

Ainsi, la détermination des épaisseurs, aspect principal de cette étude, a pu être réalisée. Une simple équation de diffusion de chaleur dans les glaces, modélisée par un modèle par éléments finis en une dimension, est utilisée pour faire le lien entre la température de surface d'une glace et son épaisseur. Cette modélisation a été faite pour divers historiques de conditions météorologiques observées lors des campagnes terrains, puisque le lien entre la température de surface et l'épaisseur est directement lié à cet historique. Il en ressort une variabilité temporelle et spatiale de ce lien. La relation mettant en lien la température de surface et les épaisseurs est par ailleurs non linéaire. Lorsque les températures s'approchent de la température de l'air, elles diffèrent moins d'une épaisseur à l'autre. Il en résulte une détermination moins précise des épaisseurs, voire impossible. Cette relation non linéaire et le fait que l'incertitude sur l'épaisseur dépend principalement de l'erreur sur la température de surface font en sorte que l'incertitude sur l'épaisseur varie en fonction de l'épaisseur. Cette incertitude est faible pour les glaces inférieures à 0,2 m, mais augmente par la suite. La valeur moyenne de l'incertitude pour une épaisseur de 0,2 m est d'environ $\pm 0,02$ m, décroissant lorsque l'épaisseur diminue.

Certaines limites d'application de la thermographie infrarouge ont toutefois été atteintes lors des campagnes de mesures. Par exemple, la présence de pluie, de neige ou de brouillard empêche la mesure de températures de surface valides ou modifie ces températures. La détermination des épaisseurs selon la température de surface est alors impossible. Malgré tout, l'imagerie thermique, le modèle choisi et les hypothèses ont permis d'évaluer des épaisseurs généralement entre 0 et 70 cm d'épaisseur. Ces limites diffèrent selon les conditions météorologiques. Elles ont été déterminées afin que les

hypothèses de calculs soient valides pour la gamme des épaisseurs déterminées et que l'incertitude sur la mesure soit acceptable.

Une série de recommandations a été formulée au chapitre 5. Plusieurs de ces recommandations font suite aux difficultés rencontrées ou aux hypothèses utilisées pour simplifier le problème. Elles visent à peaufiner la méthodologie utilisée dans ce projet et à mettre en évidence les conditions optimales d'utilisation.

Malgré toutes les recommandations émises au chapitre 5, l'étude présentée dans ce mémoire a fourni des résultats intéressants et de précision acceptable. Une étude de cette ampleur, des glaces sur le St-Laurent, n'avait pas été faite antérieurement. Si de tels survols étaient faits, à quelque reprise pendant l'hiver, chaque année, des données précises sur les glaces pourraient être obtenues. Un suivi des glaces, dans le contexte de changements climatiques, pourrait ainsi être fait. Cela pourrait mener à un outil plus efficace de suivi des glaces, pouvant même être appliqué dans un cadre opérationnel et non pas seulement de recherche. Certaines limites d'utilisation et d'épaisseur maximale pouvant être mesurée persistent avec la thermographie infrarouge, mais elle permet tout de même une caractérisation intéressante des glaces, avec un aspect visuel fort apprécié, et en intégrant et simplifiant plusieurs phénomènes en une simple mesure de température. Bref, l'imagerie thermique s'est avérée une bonne technologie pour faire le suivi des glaces, mais ayant ses limites comme toute autre méthode.

Bibliographie

- Ashton G.D. 1986. *River and Lake Ice Engineering*, Littleton: Water Resources Publications, 485 p.
- Beltaos S. 2008. *River Ice Breakup*. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 462 p.
- Boué C., Cassagne F., Massoud C., Fournier D. 2007. Thermal imaging of a vein of the forearm: Analysis and thermal modelling. *Infrared Physics & Technology*. **51**: 13-20.
- Byrnes A.E. et Schott J.R. 1986. Correction of thermal imagery for atmospheric effects using aircraft measurement and atmospheric modeling techniques, *Applied Optics*. **25** (15): 2563-2570. DOI:10.1364/AO.25.002563.
- Callison R. D., Blake P., Anderson M . 1987. The quantitative use of Airborne Thematic Mapper thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*. **8**(1) : 113-126.
- Adachi Y. et Yukimoto S. 2006. Influence of Sea Ice Thickness on the Atmosphere in the Winter Arctic Region in an Atmospheric General Circulation Model. *SOLA*, **2**: 76-79.
- Djavadi D. et Anderson J. M. 1987. Atmospheric correction of thermal infrared data using multi-height data acquisition. *International Journal of Remote Sensing*. **8** (12) : 1879-1884.
- Drüe C. et Heinemann G. 2005. Accuracy assessment of sea-ice concentrations from MODIS using in-situ measurements. *Remote Sensing of Environment*. **95**: 139-149.
- Emond J., Morse B., Richard M., Stander E. , Viau A. A. 2010. Surface ice observations on the St. Lawrence River using infrared thermography. *River Research and Applications*, n/a. doi: 10.1002/rra.1445
- FLIR Systems. 2004. *Thermovision™ A40M Operator's Manual*.
- Garde côtière canadienne, Cartes de reconnaissance des glaces, <http://www.marinfo.gc.ca/fr/Glaces/TableauBord.asp>.
- Gaussorgues G. 1999. *La thermographie infrarouge: principes, technologies, applications*. 4^e éd. Paris : Éditions TEC&DOC, 587 p.
- Girard M.-C. et Girard C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. Paris : Dunod, Paris, 529 p.

- Gonzalez RC et Woods RE. 2008. *Digital Image Processing*. 3^e éd. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 954 p.
- Groves J.E. et Stringer W.J. 1991. The use of AVHRR Thermal Infrared Imagery to Determine Sea Ice Thickness within the Chuckchi Polynya. *Arctic*, **44** (supp. 1): 130-139.
- Hall D. K., Foster J.L., Chang A.T.C, Rango A. 1981. Freshwater Ice Thickness Observations Using Passive Microwave Sensors. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. **GE** (19): 4.
- Hausser R, Drouin M , Parkinson FE. 1986 *Thin Ice Formation on Warm Water*. IAHR Ice Symposium, Iowa City, IO.
- Hori M, Aoki T, Tanikawa T, Motoyoshi H, Hachikubo A., Sugiura K, Yasunari TJ, Eide H, Storvold R, Nakajima Y, Takahashi F. 2006. In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8-14 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment* **100** (4): 486-502. DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.001.
- Jasek M, Weber F, Hurley J. 2003. Ice Thickness and Roughness Analysis on the Peace River using RADARSAT-1 SAR Imagery. Proc. 12th Workshop on River Ice, Canadian Geophysical Union - Hydrology Section, Committee on River Ice Processes and the Environment, Edmonton, AB., 18–20 June 2003, pp. 50–68. <http://cripe.civil.ualberta.ca/proceedings/>
- Leppäranta M. et Lewis J. E. 2007. Observations of ice surface temperature and thickness in the Baltic Sea, *International Journal of Remote Sensing*. **28** (17): 3963-3977. DOI: 10.1080/01431160601075616.
- Li S., Zhou X., Morris K. 1999. Measurements of Snow and Sea Ice Surface Temperature and Emissivity in the Ross Sea." *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99*. **2**: 1034-1036.
- Loheide S.P.I. et Gorelick S.M. 2005. A local-scale, high-resolution evapotranspiration mapping algorithm (ETMA) with hydroecological applications at riparian meadow restoration sites. *Remote Sensing of Environment*. **98**: 182 - 200.
- MacHin G., Simpson R. and Broussely M. 2009. Calibration and validation of thermal imager, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. **6** (2): 133-147.
- Marcotte N. 1975. Heat transfer from open-water surfaces in winter. *National Research Council, Technical Memorandum*. **114**: 2-16.
- Maykut G.A. 1978. Energy Exchange Over Young Sea Ice in the Central Arctic. *Journal of Geophysical Research*. **83 C7**: 3646-3658.

- Morse B., Hessami M., Bourel C. 2003. Characteristics of ice in the St. Lawrence River. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **30** (4) : 766-774. DOI: 10.1139/103-030.
- Morse B. et Richard M. 2009. A field study of suspended frazil ice particles. *Cold Regions Science and Technology*. **55** (1): 86-102. DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.03.004.
- Open CV 2.1 Reference Manual. 2010. <http://opencv.willowgarage.com/documentation/cpp/index.html>
- Price J. C. 1983. Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared Data - A Simple Formulation for the Atmospheric Effect. *Remote Sensing of Environment*, **13** (4) : 353-61.
- Rees W. G. 2006. *Remote Sensing of Snow and Ice*, CRC Press, Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL.
- Rees W.G. James et S.P. 1992. Angular variation of the infrared emissivity of ice and water surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. **13** (15) : 2873-2886.
- Richard M. et Morse B., 2008. Multiple frazil ice blockages at a water intake in the St. Lawrence River. *Cold Regions Science and Technology*: **53** (2008):131-149. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.10.003
- Richard M., Morse B., Daly S. F., Emond J. 2010. Quantifying suspended frazil ice using multi-frequency underwater acoustic devices. *River Research and Applications*, n/a. doi: 10.1002/rra.1446
- Riek L., Crane R.K. et O'Neill, K. 1990. A Signal-Processing Algorithm for the Extraction of Thin Freshwater-Ice Thickness From Short Pulse Radar Data. *IEEE: Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **28**(1) : 137-145.
- Robert J.-L. 2006. MATMEFL 2.2.01 (Application MATLAB™ de résolution d'éléments finis).
- Rogers, E. 2010. Infrared sensor calibration system and method, The Boeing Company (Seal Beach, CA, US), Patent no: 20100051794. (<http://www.freepatentsonline.com/y2010/0051794.html>)
- Salisbury J.W et D'Aria D. M. 1992. Emissivity of Terrestrial Materials in the 8-14 μm Atmospheric Window. *Remote Sensing of Environment*. **42** (2) :83-106.
- Service canadien des glaces (Environnement Canada). 2005. *MANICE– Manuel des normes d'observation des glaces*, <http://www.ec.gc.ca/glaces-ice/default.asp?lang=Fr&n=4FF82CBD-1>
- Schowengerdt R.A. 2007. *Remote sensing, Models and Methods for Image Processing*, 3rd edition. Academic Press (Elsevier), 515 p.

- Siles J. 2001. Rapport sur le développement des modèles de production et d'évacuation de glace. Garde côtière Canadienne. Charlottetown, P.E.I.
- Stander, E., Carter, D., Morse, B. 2005. The Effect of Ship Transport on Fast Ice Stability. 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Hanover, NH. <http://cripe.civil.ualberta.ca/>
- Steffen K. 1986. Ice conditions of an arctic polynya: North Water in winter. *Journal of Glaciology* **32** (112) : 383-390.
- Steffen K. et Lewis J. E. 1988. Surface temperatures and sea ice typing for northern Baffin Bay. *International Journal of Remote Sensing*. **9** (3) : 409-422.
- Tonooka H. et Watanabe A. 2005. Applicability of thermal infrared surface emissivity ratio for snow/ice monitoring." *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. **5655** (Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II) : 282-290.
- Veihelmann B., Olesen F.S. et Kottmeier C. 2001. Sea ice surface temperature in the Weddell Sea (Antarctica), from drifting buoy and AVHRR data. *Cold Regions Science and Technology*. **33** : 19-27.
- Yu Y. et Rothrock D.A. 1996. Thin ice thickness from satellite thermal imagery. *Journal of Geophysical Research*. **101** (C10): 25753-25766.

Annexe 1 – Terminologie des glaces

La terminologie des glaces suivante est un extrait du manuel des glaces (MANICE) du Service canadien des glaces (2005). Les termes pouvant s'appliquer à la glace sur le fleuve sont présentés.

STADES DE FORMATION DE LA GLACE DE MER

Nouvelle glace : Toute glace flottant dans l'eau. Les principales sortes de glace flottante sont la glace de lac, la glace de rivière et la glace de mer, lesquelles se forment par congélation de l'eau en surface, et la glace de glacier formée sur la terre ferme ou provenant d'un plateau de glace. Ce terme comprend aussi la glace jetée en côte ou échouée.

Frasil : Fines aiguilles ou plaquettes de glace en suspension dans l'eau.

Sorbet : Stade de la congélation postérieur au frasil; les cristaux commencent à s'agglutiner pour former en surface une couche épaisse comme de la soupe. À ce stade, la mer réfléchit peu la lumière et prend une apparence mate.

Gadoue : Neige saturée et mélangée d'eau reposant sur la terre ou la glace ou masse visqueuse flottant sur l'eau après une forte chute de neige.

Shuga : Accumulation de morceaux de glace blanche et spongieuse ayant quelques centimètres de longueur; ils sont formés à partir de sorbet ou de gadoue et, quelquefois, de glace de fond remontant à la surface.

Nilas : Couche de glace mince et élastique, ondulant facilement sous les vagues et la houle et formant, sous la pression, des avancées en forme de « doigts » entrecroisés. Cette couche a une surface mate et peut atteindre 10 cm d'épaisseur. On distingue le nilas sombre et le nilas clair.

Nilas sombre : Nilas ayant moins de 5 cm d'épaisseur et une couleur très sombre.

Nilas clair : Nilas ayant plus de 5 cm d'épaisseur et de couleur plus claire que le nilas sombre.

Glace vitrée : Croûte de glace brillante et cassante formée sur la surface calme d'une eau habituellement peu saline, par congélation directe ou à partir

de sorbet. Son épaisseur peut atteindre environ 5 cm. Elle se casse facilement sous l'action du vent ou de la houle, le plus souvent en morceaux rectangulaires.

Jeune glace : Glace au stade de transition entre le nilas et la glace de première année, d'une épaisseur de 10 à 30 cm. Peut se diviser en glace grise et en glace blanchâtre.

Glace grise : Jeune glace de 10 à 15 cm d'épaisseur, moins souple que le nilas et se brisant sous l'effet de la houle. En général, les fragments se chevauchent sous l'effet de la pression.

Glace blanchâtre : Jeune glace de 15 à 30 cm d'épaisseur. Sous l'effet de la pression, elle aura plus tendance à faire des crêtes qu'à s'empiler.

FORMES DE GLACES

Glace en crêpes: Morceaux de glace plutôt circulaires, ayant de 30 cm à 3 m de diamètre et jusqu'à 10 cm d'épaisseur, avec des bords relevés du fait du frottement des morceaux les uns contre les autres. Ils peuvent se former par houle faible à partir de sorbet, de gadoue ou de shuga ou du fait de la fragmentation de glace vitrée ou de nilas, ou encore à partir de glace grise s'il y a une forte houle ou de grosses vagues. La glace en crêpes se forme aussi parfois en profondeur, à l'interface entre deux masses d'eau ayant des caractéristiques physiques différentes, d'où elle remonte en surface. Elle peut rapidement couvrir de grandes étendues d'eau.

Glaçon : Tout fragment relativement plat de glace ayant moins de 20 m d'extension linéaire.

Petit glaçon : Glaçon de moins de 2 m d'extension.

Floe : Tout fragment de glace relativement plat ayant 20 m ou plus d'extension horizontale. Selon leur extension horizontale, les floes sont subdivisés comme suit :

Petit : De 20 à 100 m d'extension

Moyen : De 100 à 500 m d'extension

Grand : De 500 à 2000 m d'extension

Immense : De 2 à 10 km d'extension

Géant : Plus de 10 km d'extension

Sarrasin (brash) : Accumulation de glaces flottantes composées de fragments qui n'ont pas plus de 2 m d'extension et qui proviennent de la destruction d'autres formes de glace.

Annexe 2 – Code de l'œuf des cartes de reconnaissance des glaces

Le code de l'œuf utilisé par le Service canadien des glaces est présenté sommairement. Les figures et tableaux ci-dessous sont des extraits du site internet du Service canadien des glaces (2005).

La figure 93 montre l'œuf présenté sur les cartes de reconnaissance des glaces. La première ligne présente la concentration totale des glaces (C_t). La seconde ligne présente les concentrations partielles selon les formes de glaces. La troisième ligne présente la forme de glace (tableau 5) associée à chaque concentration partielle. Si des sarrasins sont présents, un tiret est indiqué vis-à-vis S_a et les concentrations de sarrasins selon leur épaisseur sont détaillées aux lettres $VKMT$ (tableau 7). La quatrième ligne présente la dimension des floes pour chaque concentration partielle/forme de floe (tableau 6).

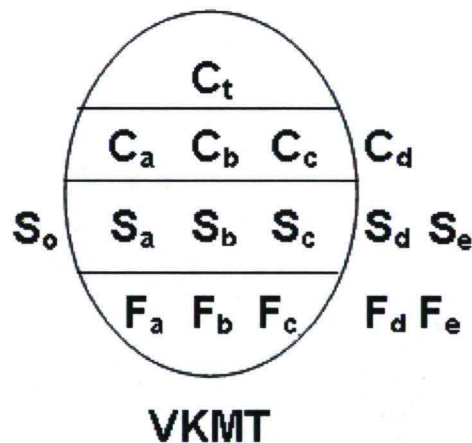


Figure 93 – Code de l'œuf pour les cartes de reconnaissance des glaces (Source : Service canadien des glaces, 2005)

Tableau 5 – Formes de glace et codes associés pour le code de l'œuf (Source : Service canadien des glaces, 2005)

Élément	Épaisseur	Code
Nouvelle glace	< 10 cm	1
Nilas, glace vitrée	< 10 cm	2
Jeune glace	10 - 30 cm	3
Glace grise	10 - 15 cm	4
Glace blanchâtre	15-30 cm	5
Glace de première année	>= 30 cm	6
Glace mince de première année	30 - 70 cm	7
Indéterminée ou inconnue	-	X

Tableau 6 – Taille des glaces et codes associés pour le code de l'œuf (Source : Service canadien des glaces, 2005)

Élément	Taille	Code
Glace en crêpes	-	0
Petits glaçons, sarrasins, sarrasins agglomérés	< 2m	1
Glaçons	2 - 20 m	2
Petits floes	20 - 100 m	3
Floes moyens	100 - 500 m	4
Grands floes	500 - 2000 m	5
Floes immenses	2 - 10 km	6
Floes géants	> 10 km	7
Banquise côtière	-	8
Indéterminé, inconnue ou sans forme	-	X

Tableau 7 – Codes pour les sarrasins (Source : Service canadien des glaces, 2005)

Élément	Épaisseur
Très épais (V)	> 4m
Épais (K)	> 2 - 4m
Moyen (M)	1 - 2m
Mince (T)	< 1m

Le lecteur peut se référer à se site (<http://ice-glaces.ec.gc.ca>) pour le code des couleurs des cartes. Les astérisques dénotent tant qu'à eux la présence de nouvelle glace.

Annexe 3 - Cartes de reconnaissance des glaces de la Garde côtière canadienne pour le 13 mars 2008

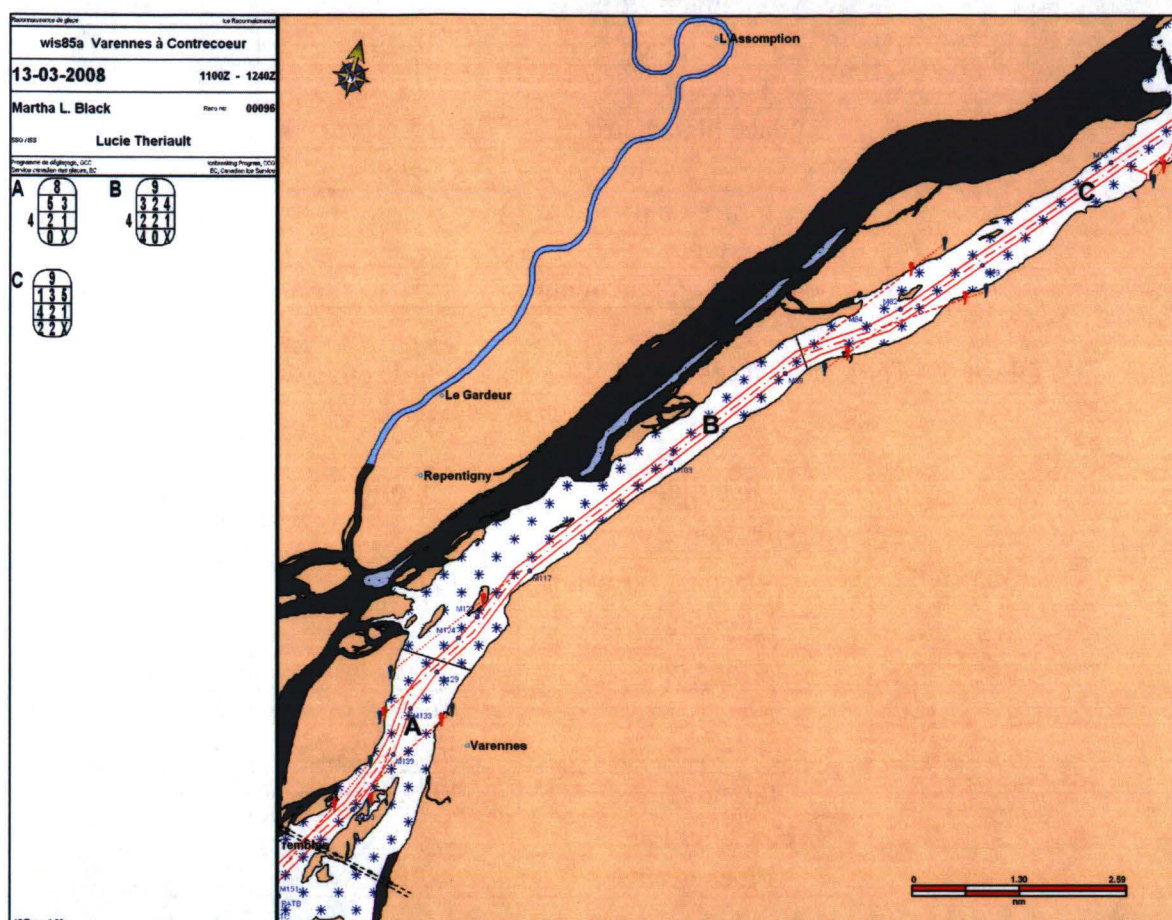


Figure 94 – Carte des glaces pour le secteur Varennes-Contrecoeur, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

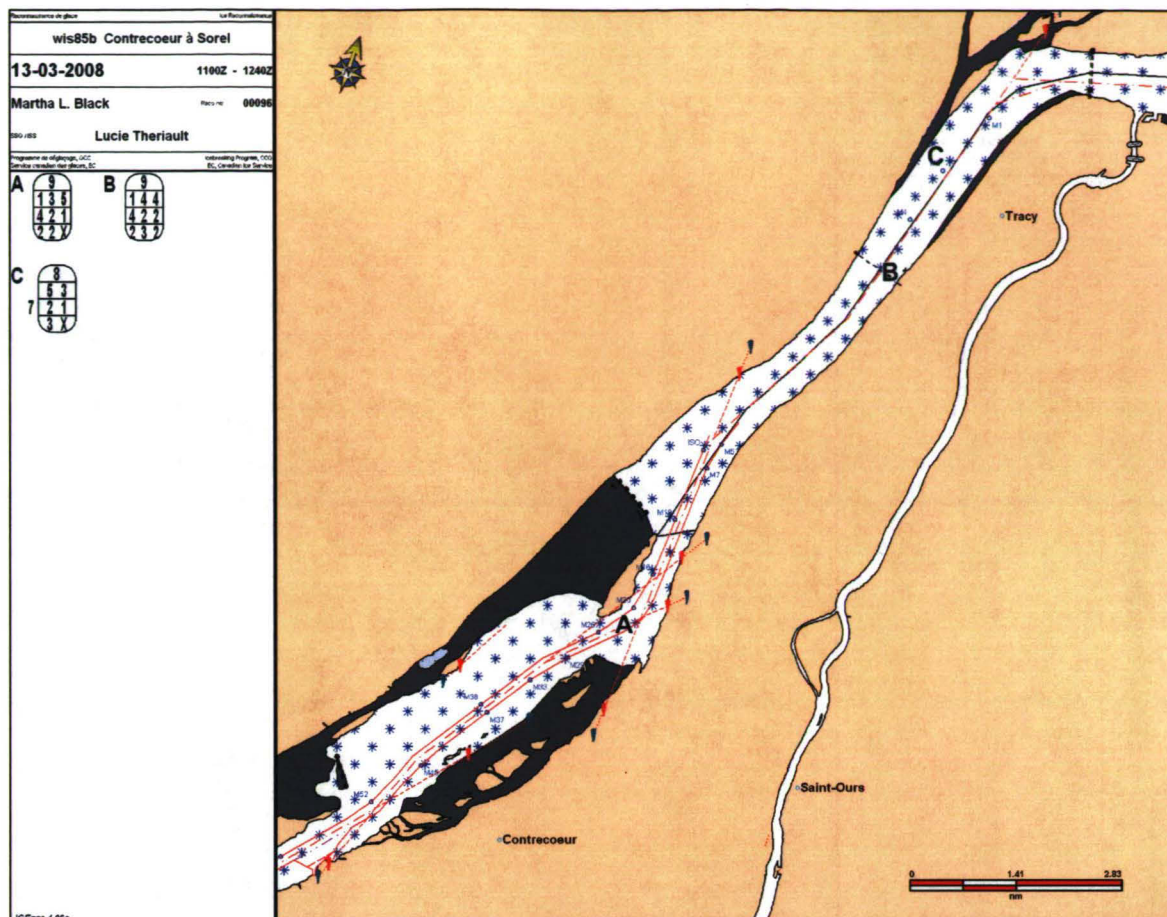


Figure 95 – Carte des glaces pour le secteur Contrecoeur-Sorel, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

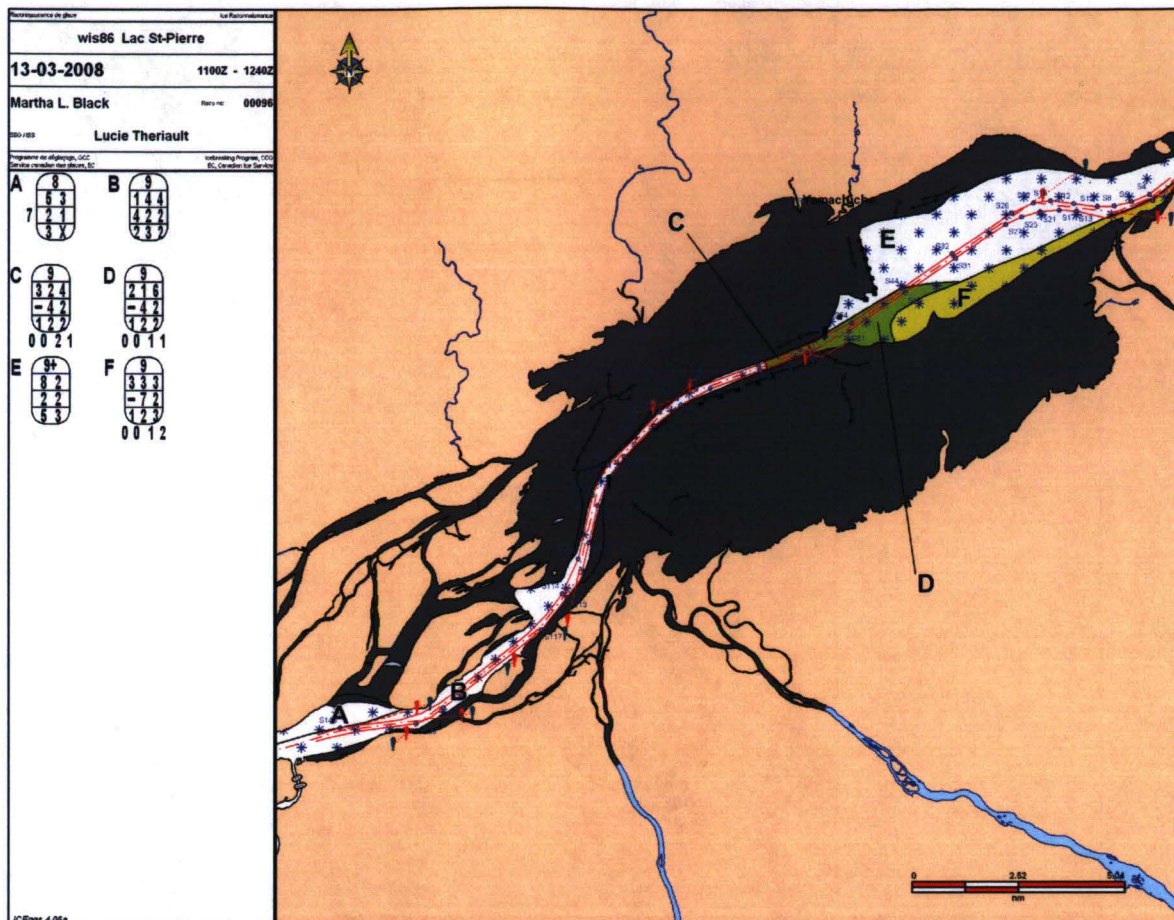


Figure 96 – Carte des glaces pour le Lac St-Pierre, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

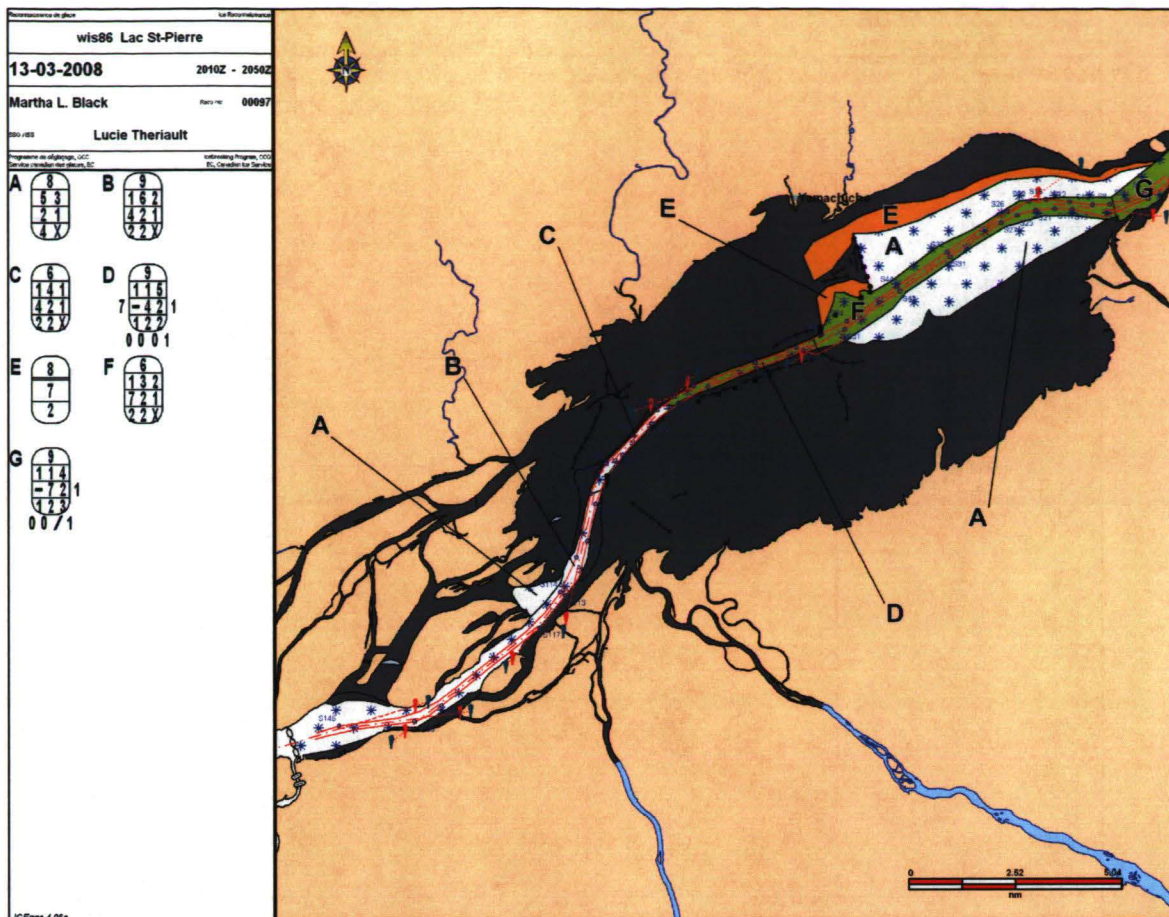


Figure 97 – Carte des glaces pour le Lac St-Pierre, le 13 mars 2008, entre 15h10 et 15h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

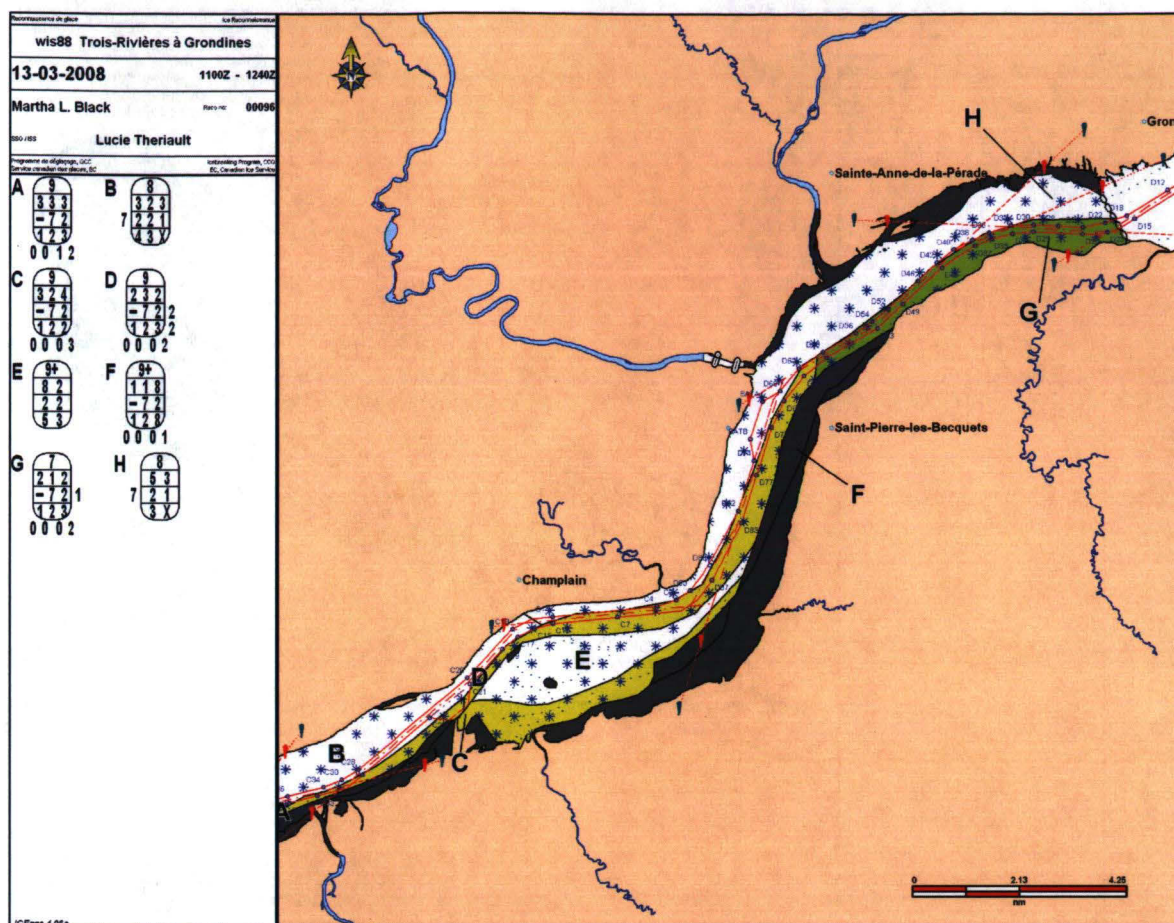


Figure 98 – Carte des glaces pour le secteur Trois-Rivières-Grondines, le 13 mars 2008, entre 6h00 et 7h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

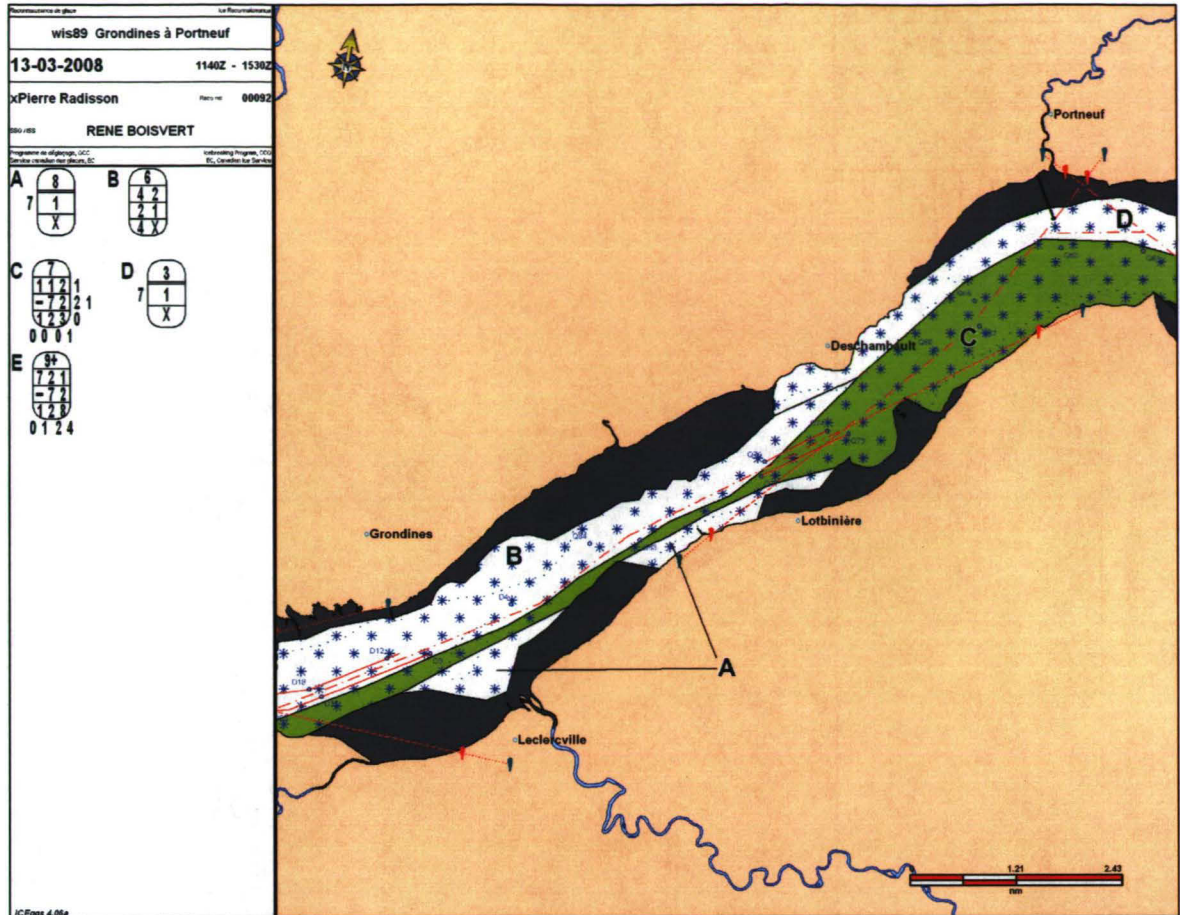


Figure 99 – Carte des glaces pour le secteur Grondines-Portneuf, le 13 mars 2008, entre 6h40 et 10h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

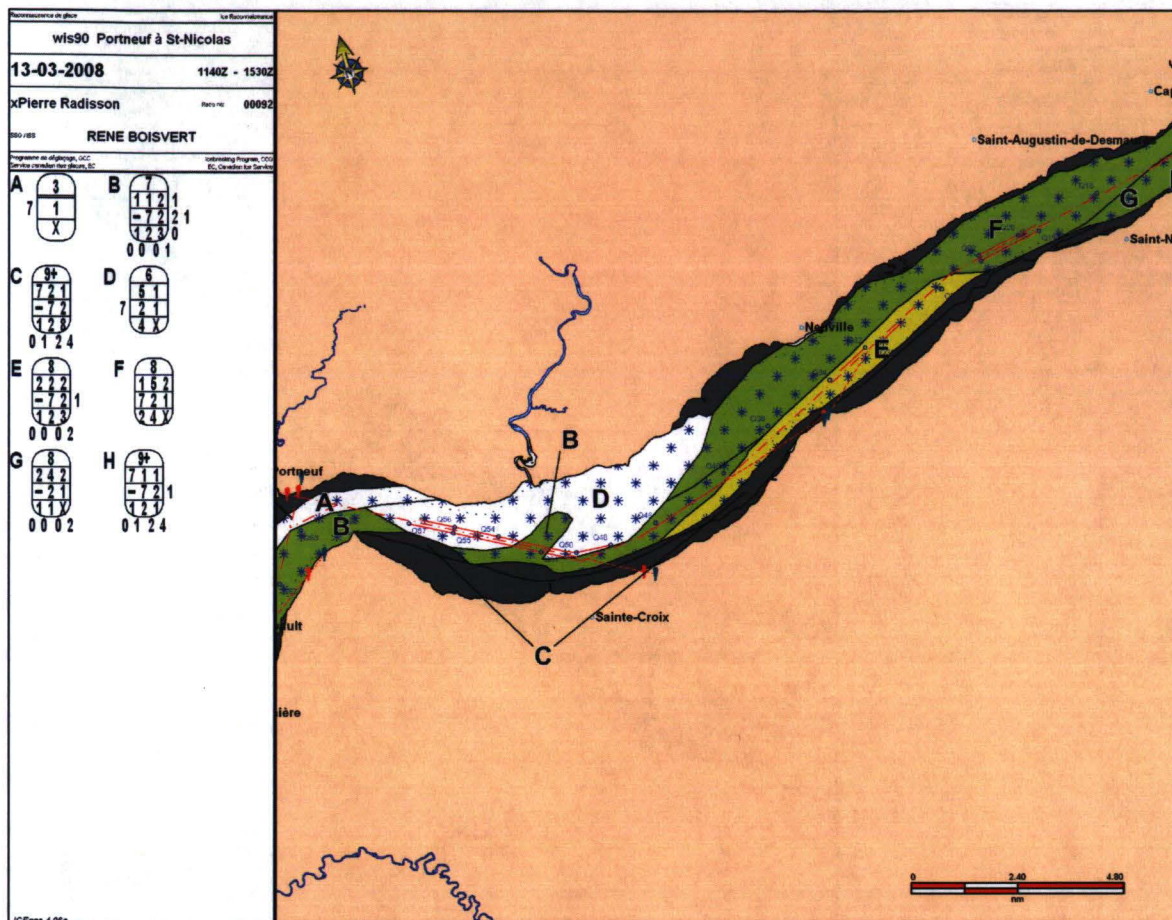


Figure 100 – Carte des glaces pour le secteur Portneuf St-Nicolas, le 13 mars 2008, entre 6h40 et 10h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

Annexe 4 - Cartes de reconnaissance des glaces de la Garde côtière canadienne pour le 24 février 2009

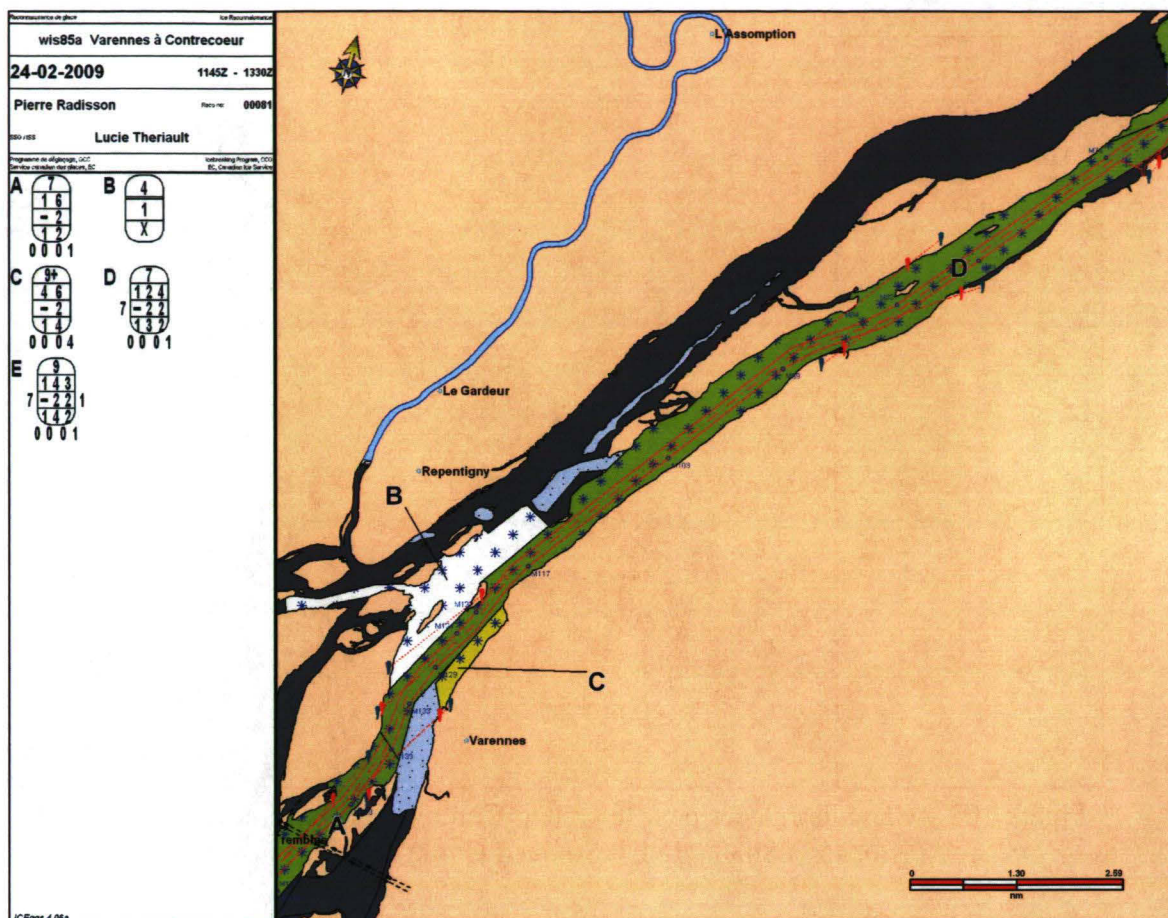


Figure 101 – Carte des glaces pour le secteur Varennes-Contrecoeur, le 24 février 2009, entre 6h45 et 8h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

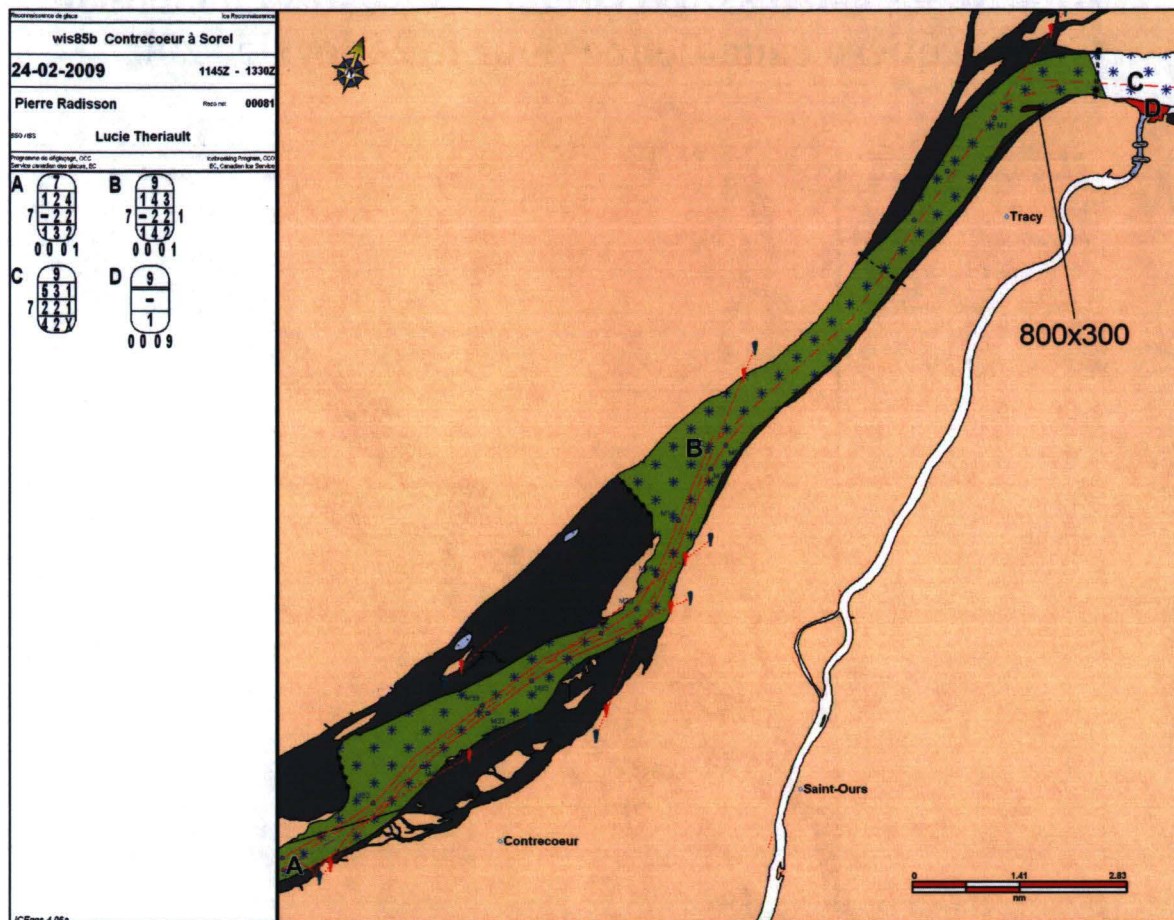


Figure 102 – Carte des glaces pour le secteur Contrecoeur-Sorel, le 24 février 2009, entre 6h45 et 8h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

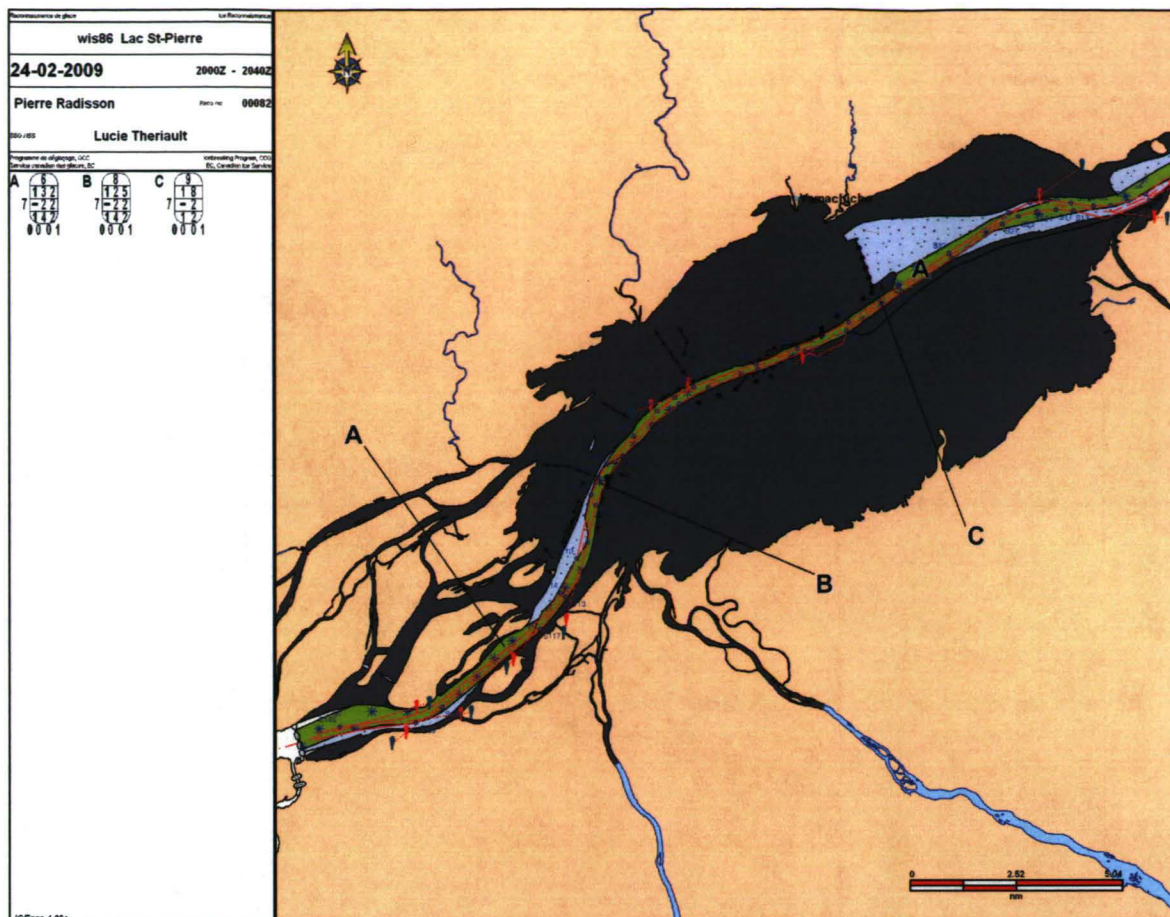


Figure 103 – Carte des glaces pour le Lac St-Pierre, le 24 février 2009, entre 15h00 et 15h40 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

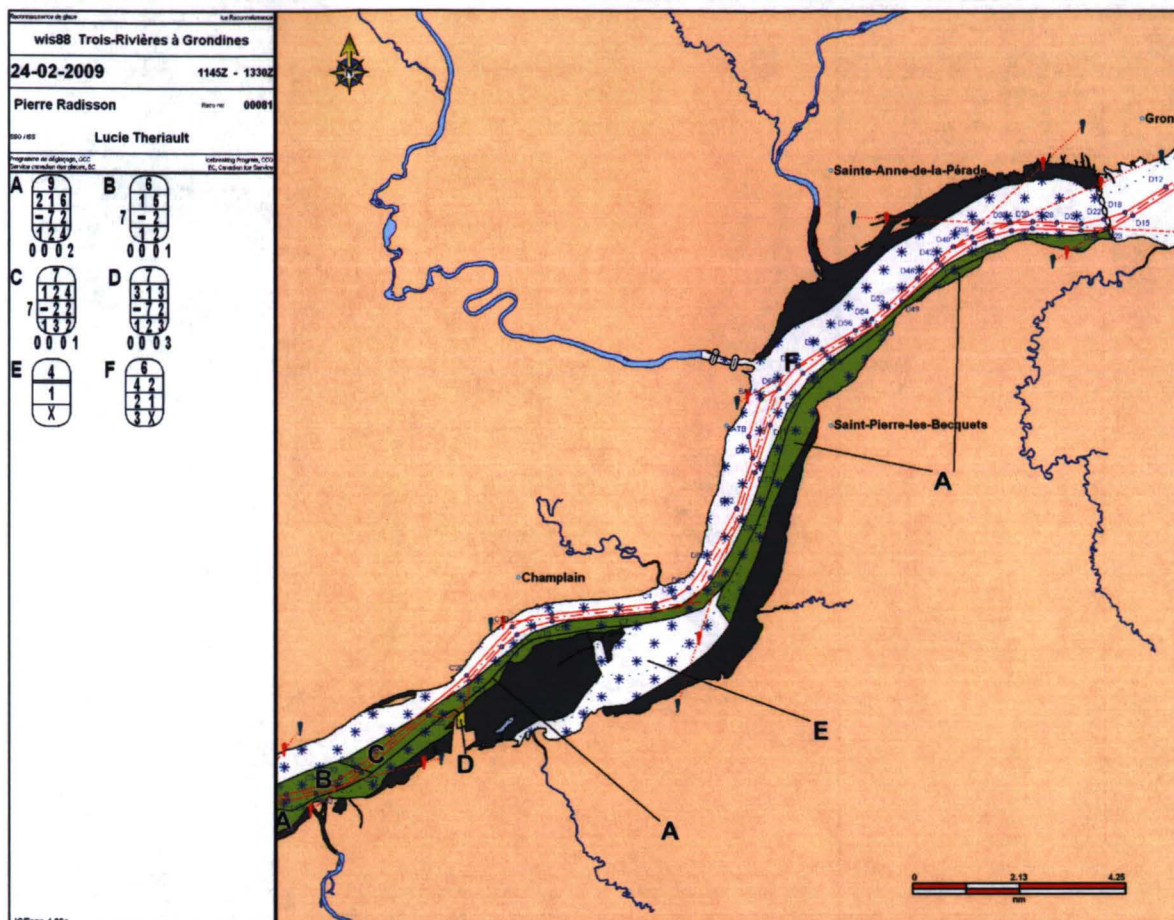


Figure 104 – Carte des glaces pour le secteur Trois-Rivières-Grondines, le 24 février 2009, entre 6h45 et 8h30 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

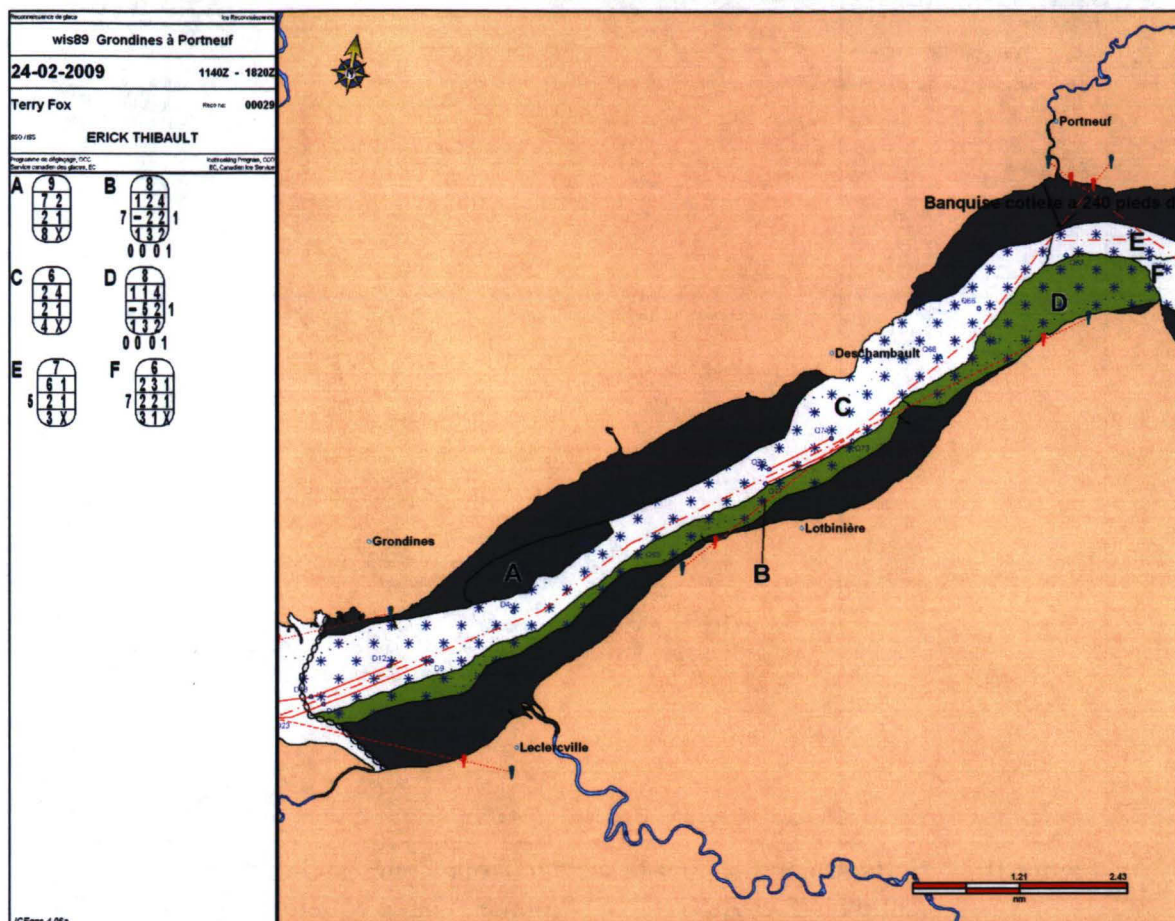


Figure 106 – Carte des glaces pour le secteur Grondines-Portneuf, le 24 février 2009, entre 6h40 et 13h20 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

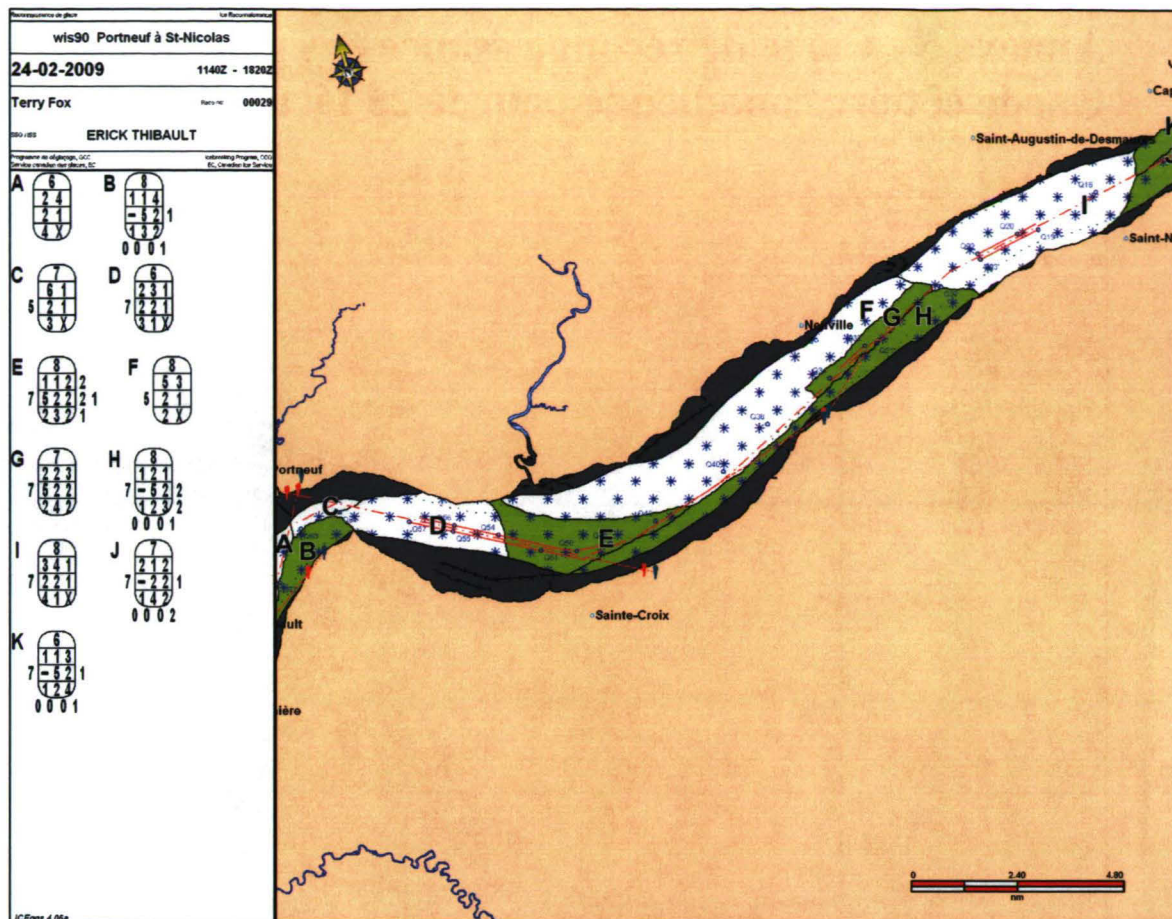


Figure 107 – Carte des glaces pour le secteur Portneuf St-Nicolas, le 24 février 2009, entre 6h40 et 13h20(HNE) (Source : Garde côtière canadienne)

Annexe 5 - Carte de reconnaissance des glaces de la Garde côtière canadienne pour le 25 février 2009

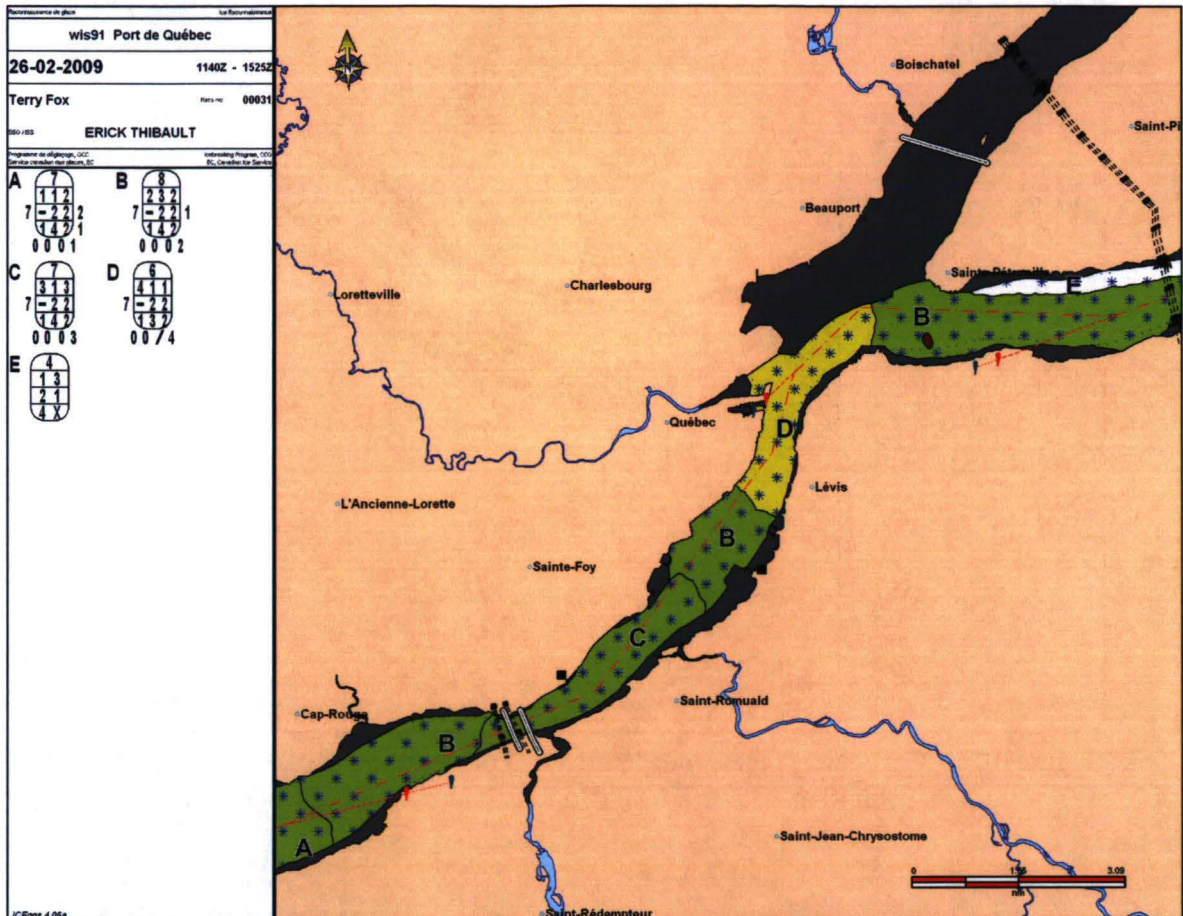


Figure 108 – Carte des glaces pour le secteur du port de Québec, le 26 février 2009, entre 6h40 et 10h25 (HNE) (Source : Garde côtière canadienne)