



# **Analyse de profils de chaussées : Effet du gel saisonnier et de la dégradation du pergélisol**

**Mémoire**

**Laurie-Anne Grégoire**

**Maîtrise en génie civil**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Laurie-Anne Grégoire, 2016

**Analyse de profils de chaussées :  
Effet du gel saisonnier et de la dégradation du  
pergélisol**

**Mémoire**

**Laurie-Anne Grégoire**

Sous la direction de :

Guy Doré, directeur de recherche

# Résumé

Des techniques adaptées aux contextes routiers sont nécessaires pour maintenir et réhabiliter des chaussées construites sur pergélisol ou en contexte de gel saisonnier. Plusieurs problématiques peuvent engendrer une augmentation des coûts de réparation et entretien, une diminution de la durée de vie des chaussées et des problèmes reliés à la sécurité des usagers de la route. L'objectif du projet consiste donc à élaborer un outil d'aide à la décision, qui contribuerait à localiser les zones sensibles au gel saisonnier et à la dégradation du pergélisol, à discerner les causes de dégradation des chaussées dues au gel saisonnier et à sélectionner les meilleures stratégies d'atténuation et de réfection à moindre coût. Le projet de recherche est divisé en deux volets distincts.

Le premier volet traite des problématiques de gel de chaussées en contexte de gel saisonnier. Actuellement, il existe des méthodes de diagnostic qui permettent de détecter les endroits où un problème de gélivité est susceptible d'être présent. Par contre, ces méthodes ne permettent pas de discerner si le problème de gel est en profondeur ou en surface de la chaussée; en d'autres mots si le problème est lié à un soulèvement différentiel du sol ou à un soulèvement de fissures. De plus, les méthodes utilisées ne sont pas adaptées aux chaussées en contexte municipal. Selon les problématiques connues de certains sites, il a été possible de développer un abaque permettant de différencier si la problématique de gel se situe en surface ou en profondeur dans une chaussée. Puis, une analyse d'imagerie 3D a été réalisée pour compléter l'abaque créé. À l'aide de cette technologie, une nouvelle méthode sera mise au point pour détecter des problématiques de gel grâce aux profils transversaux.

Le deuxième volet porte sur les chaussées construites sur pergélisol. Les méthodes actuelles de détection de la dégradation du pergélisol sous les chaussées manquent de précision et ont besoin d'être raffinées, surtout dans le contexte actuel de réchauffement climatique. Pour ce faire, trois sites d'essais ont été étudiés sur l'Alaska Highway au Yukon. En fonction de différentes analyses telles que des analyses de profils longitudinaux, de la densité spectrale et de longueurs d'onde, des tendances ont été décelées pour caractériser l'instabilité du pergélisol.

# Summary

## **Analysis of pavement profiles: Effect of seasonal frost and permafrost degradation**

Methods adapted to road condition are needed to maintain and rehabilitate roads built on permafrost or in context of seasonal frost. Several issues can lead to increase repair and maintenance costs, decrease the pavement's lifetime and increase problems related to the safety of road users. The project objective is to develop a profile analysis tool, which would help to locate thaw and frost sensitive zones, diagnose the causes of degradation and select proper mitigation strategies. The research project is divided into two parts.

The first section is related to frost heaves on pavements in context of seasonal frost. Currently, there are diagnosis methods for detecting areas where frost susceptibility is present. These methods do not allow to determine whether the freezing problem is under or at the surface of the road; in other words if the problem is related to differential heave or uplift cracks. Moreover, the methods used are not adapted to municipal roads. According to the known problems of some sites, it was possible to develop a chart used to differentiate if the frost problem is in surface layers or deep in the road subgrade. Then, a 3D analysis was done to complement the chart. Using this technology, a new method will be developed to detect freezing problems through the transverse profiles.

The second part focuses on the pavements built on permafrost. Current methods for detecting the degradation of permafrost under roads are unclear and need to be refined. Three test sites were studied on the Alaska Highway in Yukon. Depending on various analysis, such as analysis of longitudinal profiles, the spectral density and wavelength, trends analysis were found to characterize the instability of permafrost.

# Table des matières

<b>RÉSUMÉ</b>	<b>III</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>IV</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>XIII</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>XIV</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 MISE EN CONTEXTE	1
1.2 PROBLÉMATIQUE	2
1.2.1 LE GEL SAISONNIER	2
1.2.2 LE PERGÉLISOL	2
1.3 PRÉSENTATION DU MÉMOIRE	2
<b>CHAPITRE 2 : ÉTAT DES CONNAISSANCES</b>	<b>3</b>
2.1 LE GEL SAISONNIER	3
2.1.1 SITUATION DU TERRITOIRE QUÉBÉCOIS	3
2.1.2 ACTION DU GEL SUR LA CHAUSSÉE	3
2.1.3 CHAUSSÉES CONSTRUITES EN ZONE DE GEL SAISONNIER	7
2.2 LE PERGÉLISOL	12
2.2.1 DÉFINITION	12
2.2.2 TYPES DE PERGÉLISOL	13
2.2.3 DÉGRADATION DU PERGÉLISOL	16
2.2.4 CHAUSSÉES CONSTRUITES EN ZONE DE PERGÉLISOL	18
2.3 LA PROFILOMÉTRIE	21
2.3.1 L'UNI	22
2.3.2 L'IRI	23
2.3.3 MÉTHODES DE MESURE	24
2.4 LES MÉTHODES D'ANALYSE DES PROFILS	28
2.4.1 ANALYSE DE L'IRI	28
2.4.2 ANALYSE PAR LONGUEURS D'ONDE	29
2.4.3 ANALYSE PAR CALCUL D'ÉNERGIE	29
2.4.4 ANALYSE PAR DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE	30
2.4.5 ANALYSE PAR ONDELETTES	31

<b>CHAPITRE 3 : PERTINENCE DU PROJET DE RECHERCHE</b>	<b>33</b>
<b>3.1 OBJECTIFS</b>	<b>33</b>
<b>3.2 MÉTHODOLOGIE</b>	<b>34</b>
<b>3.3 STRUCTURE DU DOCUMENT</b>	<b>35</b>
<b>VOLET 1 : ÉTUDE EN CONTEXTE DE GEL SAISONNIER</b>	<b>36</b>
<b>CHAPITRE 4 : SITES D'OBSERVATION DU GEL SAISONNIER ET DONNÉES DE PROFILOMÉTRIE</b>	<b>37</b>
<b>4.1 SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER</b>	<b>37</b>
4.1.1 SITE DE STONEHAM	38
4.1.2 SITE DE LAC-DELAGE	41
4.1.3 SITE DE STE-CATHERINE-DE-LA-JACQUES-CARTIER	44
<b>4.2 SECTIONS D'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION HIVERNALE DE L'UNI</b>	<b>48</b>
4.2.1 ROUTE 369, SECTION 1 À SHANNON	49
4.2.2 ROUTE 369, SECTION 2 À FOSSAMBAULT	50
4.2.3 ROUTE 367, SECTION 1 À STE-CATHERINE-DE-LA-JACQUES-CARTIER	52
<b>CHAPITRE 5 : DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE EN CONTEXTE DE GEL SAISONNIER</b>	<b>55</b>
<b>5.1 ANALYSE PAR PROFILS LONGITUDINAUX</b>	<b>55</b>
5.1.1 ANALYSE DE L'IRI PAR DIFFÉRENCE DE PROFILS LONGITUDINAUX	55
5.1.2 ANALYSE LONGITUDINALE PAR RAPPORT D'IRI	59
5.1.3 ANALYSE LONGITUDINALE PAR DIFFÉRENCE D'IRI	62
5.1.4 MÉTHODE D'ANALYSE LONGITUDINALE CHOISIE	64
5.1.5 UTILISATION DE L'ABAQUE	68
<b>5.2 ANALYSE DE PROFILS TRANSVERSAUX</b>	<b>71</b>
5.2.1 ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE PAR PROFILS TRANSVERSAUX	71
5.2.2 COMPARAISON DE LA MÉTHODE	76
5.2.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	83
<b>5.3 CONCLUSION</b>	<b>83</b>
<b>VOLET 2 : ÉTUDE EN ZONE DE PERGÉLISOL</b>	<b>85</b>
<b>CHAPITRE 6 : SITES D'ESSAIS AU YUKON</b>	<b>86</b>
<b>6.1 HAINES JUNCTION (KM 1568)</b>	<b>88</b>
<b>6.2 SITE D'ÉTUDE DE DRAINAGE (KM 1894)</b>	<b>89</b>
<b>6.3 MIRROR CREEK (KM 1883)</b>	<b>90</b>
<b>CHAPITRE 7 : INTERPRÉTATION ET ANALYSE DES PROFILS SUR PERGÉLISOL</b>	<b>91</b>
<b>7.1 INTERPRÉTATION DES PROFILS SUR PERGÉLISOL</b>	<b>91</b>
7.1.1 COMPARAISON DES PROFILS LONGITUDINAUX SUR PERGÉLISOL STABLE ET INSTABLE	95

<b>7.2 ANALYSE DE L'IRI SUR PERGÉLISOL</b>	<b>97</b>
7.2.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DE L'IRI SUR PERGÉLISOL	98
7.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS DE L'IRI SUR PERGÉLISOL	102
7.2.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	103
<b>7.3 CONCLUSION</b>	<b>105</b>
<b>CHAPITRE 8 : DISCUSSION</b>	<b>106</b>
<b>8.1 CRITIQUE</b>	<b>106</b>
8.1.1 LE GEL SAISONNIER	106
8.1.2 LE PERGÉLISOL	107
<b>8.2 APPLICABILITÉ</b>	<b>108</b>
8.2.1 LE GEL SAISONNIER	108
8.2.2 LE PERGÉLISOL	109
<b>8.3 TRAVAUX ADDITIONNELS</b>	<b>109</b>
8.3.1 LE GEL SAISONNIER	109
8.3.2 LE PERGÉLISOL	110
<b>CHAPITRE 9 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>112</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>115</b>
<b>ANNEXE 1 : RÉSULTATS AUX 100 M DES ANALYSES DE L'IRI</b>	<b>116</b>
<b>ANNEXE 2 : COMPARAISON DE LA MÉTHODE D'ANALYSE DE PROFILS TRANSVERSAUX</b>	<b>119</b>
<b>ANNEXE 3 : SECTIONS VULNÉRABLES AU DÉGEL DU PERGÉLISOL SUR L'ALASKA HIGHWAY</b>	<b>123</b>
<b>ANNEXE 4 : MARGES D'ERREUR DES <math>\Delta</math>IRI AUX SITES SUR PERGÉLISOL</b>	<b>126</b>

# Liste des tableaux

TABLEAU 1 : SEUILS ADMISSIBLES DE SOULÈVEMENT AU GEL SELON LE MTQ POUR DES CHAUSSÉES SOUPLES (MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, 2016) .....	5
TABLEAU 2 : CRITÈRE DE GÉLIVITÉ RELIÉ AUX ΔIRI (ST-LAURENT, 2010).....	28
TABLEAU 3 : TROIS BANDES PASSANTES UTILISÉES POUR LE CALCUL D'ÉNERGIE .....	30
TABLEAU 4 : SOULÈVEMENTS AU GEL AU SITE DE STONEHAM .....	39
TABLEAU 5 : SOULÈVEMENTS AU GEL AU SITE DE LAC-DELAGE .....	42
TABLEAU 6 SOULÈVEMENTS AU GEL AU SITE DE STE-CATHERINE-DE-LA-JACQUES-CARTIER.....	45
TABLEAU 7 : RÉSULTATS DES DIFFÉRENTES ANALYSES DE L'IRI POUR LA SECTION 369-1 PAR ZONE DE GÉLIVITÉ.....	64
TABLEAU 8 : RÉSULTATS DES DIFFÉRENTES ANALYSES DE L'IRI POUR LA SECTION 369-2 PAR ZONE DE GÉLIVITÉ.....	65
TABLEAU 9 : RÉSULTATS DES DIFFÉRENTES ANALYSES DE L'IRI POUR LA SECTION 367-1 PAR ZONE DE GÉLIVITÉ.....	65
TABLEAU 10 : CATÉGORIES DE NIVEAU DE GÉLIVITÉ SUGGÉRÉES.....	83
TABLEAU 11 : RÉSULTATS AUX 100 M DES DIFFÉRENTES ANALYSES DE L'IRI POUR LA SECTION 369-1 .....	116
TABLEAU 12 : RÉSULTATS AUX 100 M DES DIFFÉRENTES ANALYSES DE L'IRI POUR LA SECTION 369-2 .....	117
TABLEAU 13 : RÉSULTATS AUX 100 M DES DIFFÉRENTES ANALYSES DE L'IRI POUR LA SECTION 367-1 .....	118

# Liste des figures

FIGURE 1 : DISTRIBUTION DE L'EAU NON GELÉE DANS UN SOL GELÉ (DORÉ & ZUBECK, 2008) .....	6
FIGURE 2 : PROFIL DE LA PRESSION DANS UN SOL GELÉ (DORÉ & ZUBECK, 2008) .....	6
FIGURE 3 : CONTRAINTE ET FISSURATION INDUITES PAR UN SOULÈVEMENT DIFFÉRENTIEL TRANSVERSAL (DORÉ & ZUBECK, 2008) .....	8
FIGURE 4 : NIVEAUX DE SÉVÉRITÉ DE FISSURES LONGITUDINALES (MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, 2007).....	8
FIGURE 5 : DIFFÉRENTES LONGUEURS D'ONDE ASSOCIÉES AUX CHAUSSÉES (DORÉ G. , DÉTÉRIORATION DES CHAUSSÉES EN CONDITIONS DE GEL : UNE NOUVELLE APPROCHE PRÉVISIONNELLE, 1997) .....	9
FIGURE 6 : UNI LONGITUDINAL D'UNE RUE PAVÉE À JOENSUU AU PRINTEMPS 1983 EN FONCTION DU SOULÈVEMENT AU GEL (THE FINNISH ROAD STRUCTURES RESEARCH PROGRAMME 1994-2001, 1998) .....	10
FIGURE 7 : FISSURATION LONGITUDINALE ET LÉZARDE D'UNE RUE PAVÉE À JOENSUU AU PRINTEMPS 1983 EN FONCTION DU SOULÈVEMENT AU GEL (THE FINNISH ROAD STRUCTURES RESEARCH PROGRAMME 1994-2001, 1998).....	11
FIGURE 8 : RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL (ROBITAILLE & ALLARD, 1996) .....	12
FIGURE 9 : TYPES DE PERGÉLISOL LES PLUS COURANTS. (CANADIAN GEOGRAPHIC) .....	13
FIGURE 10 : DISTRIBUTION DU PERGÉLISOL ALPIN DE PAYS EUROPÉENS. (GRUBER, 2014).....	14
FIGURE 11 : PRINCIPALES DISTRIBUTIONS DU PERGÉLISOL DANS L'HÉMISPHERE NORD. (FRENCH, 1996).....	15
FIGURE 12 : DISTRIBUTION DU PERGÉLISOL (A) AU CANADA (HEGINBOTTOM, 1995) (B) AU QUÉBEC (VOYER, 2009).....	15
FIGURE 13 : INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION SUR LA PROFONDEUR DE DÉGEL (LINELL, 1973) .....	17
FIGURE 14 : MODIFICATION DU RÉGIME THERMIQUE DANS LE SOL D'INFRASTRUCTURE (DORÉ & ZUBECK, 2008).....	18
FIGURE 15 : ONDULATIONS DE LA ROUTE DE L'ALASKA DUES À DES TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS (SAMSON, 2015).....	19
FIGURE 16 : AFFAISSEMENT D'UN REMBLAI ROUTIER DÛ À L'APPARITION D'UN THERMOKAST (UNIVERSITÉ DE L'IDAHO) .....	19
FIGURE 17 : DÉGRADATIONS ENGENDRÉES PAR LA GÉOMÉTRIE DU REMBLAI (GOERING, 2004).....	20
FIGURE 18 : REPRÉSENTATION DES DEUX TYPES DE PROFILS (SAYERS & KARAMIHAS, 1998).....	21
FIGURE 19 : CONSTRUCTION MATHÉMATIQUE D'UN PROFIL À PARTIR DE SINUSOÏDES (SAYERS & KARAMIHAS, 1998) .....	22
FIGURE 20 : CALCUL DE L'IRI À L'AIDE DU MODÈLE QUART DE VÉHICULE (SAYERS & KARAMIHAS, 1998) .....	23
FIGURE 21 : FONCTION DE TRANSFERT DU MODÈLE DE QUART DE VÉHICULE (VAILLANCOURT, PERRATON, DORCHIES, & DORÉ, 2003).....	24
FIGURE 22 : PROFILOMÈTRE INERTIEL ICC© .....	25
FIGURE 23 : PROFILOMÈTRE À BASSE VITESSE SURPRO© .....	26
FIGURE 24 : LCMS DE PAVEMETRICS© (PAVEMETICS, 2015).....	27
FIGURE 25 : CARTE DES SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	37
FIGURE 26 : DÉGRADATIONS SUR LA SECTION DE STONEHAM. HIVER 2015 .....	38
FIGURE 27 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE DE STONEHAM. ÉTÉ 2014 ET HIVER 2015. ....	40
FIGURE 28 : ΔIRI AUX 100 M AU SITE DE STONEHAM ET DU SEUIL DE GÉLIVITÉ ADMISSIBLE.....	41
FIGURE 29 : DÉGRADATIONS SUR LA SECTION DE LAC-DELAGE. ÉTÉ 2014 .....	41

FIGURE 30 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE DE LAC-DELAGE. ÉTÉ 2014 ET HIVER 2015.....	43
FIGURE 31 : ΔIRI AUX 100 M AU SITE DE LAC-DELAGE ET DU SEUIL DE GÉLIVITÉ ADMISSIBLE.....	44
FIGURE 32 : DÉGRADATIONS SUR LA SECTION DE STE-CATHERINE-DE-LA-JACQUES-CARTIER. ÉTÉ 2014 .....	45
FIGURE 33 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE DE STE-CATHERINE-DE-LA-JACQUES-CARTIER. ÉTÉ 2014 ET HIVER 2015. ....	46
FIGURE 34 : ΔIRI AUX 100 M AU SITE DE STE-CATHERINE-DE-LA-JACQUES-CARTIER ET DU SEUIL DE GÉLIVITÉ ADMISSIBLE .....	47
FIGURE 35 : CARTE DES SECTIONS D'ÉTUDE HIVERNALE DE L'UNI.....	48
FIGURE 36 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE 369-1. HIVER 2003 ET ÉTÉ 2003.....	49
FIGURE 37 : ΔIRI AUX 100 M AU SITE 369-1 .....	50
FIGURE 38 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE 369-2. HIVER 2003 ET ÉTÉ 2003.....	51
FIGURE 39 : ΔIRI AUX 100 M AU SITE 369-2 .....	52
FIGURE 40 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE 367-1. HIVER 2003 ET ÉTÉ 2003.....	53
FIGURE 41 : ΔIRI AUX 100 M AU SITE 367-1 .....	54
FIGURE 42 : Δ PROFIL FILTRÉ ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE 369-1 .....	56
FIGURE 43 : IRI PAR DIFFÉRENCE DE PROFILS LONGITUDINAUX POUR LA SECTION 369-1.....	57
FIGURE 44 : IRI PAR DIFFÉRENCE DE PROFILS LONGITUDINAUX POUR LA SECTION 369-2.....	58
FIGURE 45 : IRI PAR DIFFÉRENCE DE PROFILS LONGITUDINAUX POUR LA SECTION 367-1.....	58
FIGURE 46 : RAPPORTS D'IRI POUR LA SECTION 369-1 .....	60
FIGURE 47 : RAPPORTS D'IRI POUR LA SECTION 369-2 .....	60
FIGURE 48 : RAPPORTS D'IRI POUR LA SECTION 367-1 .....	61
FIGURE 49 : DIFFÉRENCES D'IRI POUR LA SECTION 369-1.....	62
FIGURE 50 : DIFFÉRENCES D'IRI POUR LA SECTION 369-2.....	63
FIGURE 51 : DIFFÉRENCES D'IRI POUR LA SECTION 367-1.....	63
FIGURE 52 : ABAQUE POUR DÉTERMINER LA PROBLÉMATIQUE DE GEL SUR UNE CHAUSSÉE GÉLIVE AUX 100 M.....	67
FIGURE 53 : SCHÉMA DES ÉTAPES À SUIVRE POUR L'UTILISATION DE L'ABAQUE .....	67
FIGURE 54 : ΔIRI AUX 100 M DU CHEMIN DU LAC-SUPÉRIEUR .....	68
FIGURE 55 : ΔIRI FILTRÉ AUX 100 M DU CHEMIN DU LAC-SUPÉRIEUR.....	69
FIGURE 56 : RAPPORTS D'IRI AUX 100 M DU CHEMIN DU LAC-SUPÉRIEUR .....	70
FIGURE 57 : PROFILS TRANSVERSAUX D'ÉTÉ ET D'HIVER D'UNE VOIE .....	72
FIGURE 58 : SECTION DE 10 M À STONEHAM NE PRÉSENTANT AUCUN SIGNE DE GÉLIVITÉ.....	74
FIGURE 59 : ISDT AUX MÈTRES POUR UNE SECTION DE 10 M À STONEHAM NE PRÉSENTANT AUCUN SIGNE DE GÉLIVITÉ.....	74
FIGURE 60 : SECTION DE 10 M AU LAC-DELAGE PRÉSENTANT DES SIGNES DE GÉLIVITÉ MAJEURE .....	75
FIGURE 61 : ISDT AUX MÈTRES POUR UNE SECTION DE 10 M AU LAC-DELAGE PRÉSENTANT DES SIGNES DE GÉLIVITÉ MAJEURE .....	75
FIGURE 62 : ISDT EN FONCTION DE L'IRI D'ÉTÉ AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	77
FIGURE 63 : ISDT EN FONCTION DU ΔIRI AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER.....	78

FIGURE 64 : SOULÈVEMENT EN FONCTION DE L'ISDT AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER.....	79
FIGURE 65 : TAUX DE FISSURATION LONGITUDINALE PONDÉRÉ EN FONCTION DE L'ISDT AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	81
FIGURE 66 : TYPE DE GÉLIVITÉ EN FONCTION DE L'ISDT AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	82
FIGURE 67 : L'ALASKA HIGHWAY (ZANASI, 2015).....	86
FIGURE 68 : CARTE DES SECTIONS SITUÉES SUR PERGÉLISOL AU YUKON.....	87
FIGURE 69 : SECTION SITUÉE À HAINES JUNCTION. AVRIL 2015 .....	88
FIGURE 70 : DÉGRADATION DU DEUXIÈME PONCEAU AU SITE D'ÉTUDE DE DRAINAGE. SEPTEMBRE 2015...	89
FIGURE 71 : DÉGRADATION AU SITE DE MIRROR CREEK. SEPTEMBRE 2015.....	90
FIGURE 72 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0,7 ET 45 M DU SITE D'HAINES JUNCTION. AVRIL ET SEPTEMBRE 2015.....	92
FIGURE 73 : PROFIL LONGITUDINAL NON FILTRÉ DU SITE D'ÉTUDE DE DRAINAGE. AVRIL 2015.....	93
FIGURE 74 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0.7 ET 45 M DU SITE D'ÉTUDE DE DRAINAGE. AVRIL ET SEPTEMBRE 2015 .....	93
FIGURE 75 : PROFIL LONGITUDINAL NON FILTRÉ DU SITE DE MIRROR CREEK. AVRIL 2015 .....	94
FIGURE 76 : PROFILS LONGITUDINAUX FILTRÉS ENTRE LES LONGUEURS D'ONDE DE 0.7 ET 45 M À MIRROR CREEK. AVRIL ET SEPTEMBRE 2015.....	95
FIGURE 77 : ANALYSE DE DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE POUR LES SECTIONS SUR PERGÉLISOL. SEPTEMBRE 2015.....	96
FIGURE 78 : COMPARAISON DE LA DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE POUR LA SECTION D'HAINES JUNCTION ET DU DÉBUT DU SITE DE MIRROR CREEK (0-350 M). SEPTEMBRE 2015.....	96
FIGURE 79 : GRAPHIQUE DU $\Delta$ IRI AUX 100 M À HAINES JUNCTION .....	98
FIGURE 80 : GRAPHIQUE DU $\Delta$ IRI AUX 100 M AU SITE D'ÉTUDE DE DRAINAGE .....	99
FIGURE 81 : GRAPHIQUE DU $\Delta$ IRI AUX 10 M AU SITE D'ÉTUDE DE DRAINAGE .....	100
FIGURE 82 : GRAPHIQUE DU $\Delta$ IRI AUX 100 M À MIRROR CREEK.....	101
FIGURE 83 : GRAPHIQUE DU $\Delta$ IRI AUX 10 M À MIRROR CREEK.....	101
FIGURE 84 : GRAPHIQUE DE LA SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DES PROBLÉMATIQUES RELIÉES À L'INSTABILITÉ DU PERGÉLISOL.....	104
FIGURE 85 : SOULÈVEMENT EN FONCTION DU $\Delta$ IRI AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER.....	119
FIGURE 86 : TAUX DE FISSURATION PONDÉRÉ EN FONCTION DU $\Delta$ IRI AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	120
FIGURE 87 : TYPE DE GÉLIVITÉ EN FONCTION DU $\Delta$ IRI AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	121
FIGURE 88 : TYPE DE GÉLIVITÉ EN FONCTION DE L'ISDT ET DE SON ÉCART TYPE AUX 10 M DES TROIS SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA MRC DE LA JACQUES-CARTIER .....	122
FIGURE 89 : CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ AU DÉGEL DU SITE D'ÉTUDE DU DRAINAGE (CALMELS & ROY, 2015).....	123
FIGURE 90 : CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ AU DÉGEL DE LA SECTION DE MIRROR CREEK (CALMELS & ROY, 2015).....	124
FIGURE 91 : CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ AU DÉGEL DE LA SECTION EXPÉRIMENTALE DE BEAVER CREEK (CALMELS & ROY, 2015) .....	125
FIGURE 92 : GRAPHIQUE DES MARGES D'ERREUR DU $\Delta$ IRI GLOBAL AUX 100 M À HAINES JUNCTION .....	126

FIGURE 93 : GRAPHIQUE DES MARGES D'ERREURS DU  $\Delta$ IRI GLOBAL AUX 100 M AU SITE D'ÉTUDE DE  
DRAINAGE..... 126

FIGURE 94 : GRAPHIQUE DES MARGES D'ERREUR DU  $\Delta$ IRI GLOBAL AUX 100 M À MIRROR CREEK ..... 127

# Liste des abréviations

Chaire i3c : Chaire de recherche industrielle sur l'interaction des chaussées, des charges lourdes et du climat

MTQ : Ministère des Transports du Québec

IRI : Indice de rugosité international

LCMS : *Laser Crack Measurement System*

DLC : Direction du Laboratoire des chaussées

$\Delta$ IRI : Différence de l'indice de rugosité international

DSP : Densité spectrale de puissance

CWT : *Continuous Wavelet Transform*

MRC : Municipalité régionale de comté

ISDT : Indice de soulèvement différentiel transversal

RMSE : *Root Mean Square Error* ou Erreur quadratique moyenne

# Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier toute l'équipe du groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval ainsi que tous mes collègues du service de gestion des chaussées d'Englobe pour leur patience, leur collaboration et leur encouragement. Plus précisément, je tiens à remercier certaines personnes qui ont fait de mon projet de maîtrise une expérience exceptionnelle.

Je remercie mon directeur de maîtrise, Guy Doré, qui m'a proposé un projet stimulant avec lequel j'ai pu me dépasser. Son expérience et ses connaissances pratiques dans le domaine de l'ingénierie des chaussées m'ont permis de produire une recherche d'une grande qualité.

Aussi, je tiens à remercier Nicolas Martel, mon superviseur en entreprise, qui a d'abord cru en mon projet de maîtrise en entreprise. Je le remercie de la confiance qu'il m'a portée durant la réalisation de ce projet. Il a toujours été disponible pour me conseiller et m'encadrer.

Je remercie les trois professionnels de recherche du groupe Arquluk et de la chaire i3c de l'Université Laval; Chantal Lemieux, ma complice de terrain nordique, pour ses conseils et sa disponibilité, Jean-Pascal Bilodeau pour sa patience et ses réponses à mes nombreuses questions techniques et Loriane Périer pour son écoute et ses recommandations.

Merci à mes collègues d'Englobe; Christine Paquet pour sa présence et son soutien particulièrement durant mes longs mois d'écriture ainsi que Dominic Trudel pour sa généreuse aide dans le traitement des données et dans tous les aspects informatiques de mon projet.

De plus, je suis très reconnaissante de tout le support que ma famille m'a apporté. Merci à mes parents et mon copain qui m'ont toujours encouragé dans mes études et soutenu dans les moments plus difficiles.

Finalement, ce projet a été accompli grâce au soutien financier du programme de bourse de recherche en milieu pratique du CRSNG et du FQRNT, de l'entreprise Englobe, de la chaire de recherche i3c et le programme de recherche Arquluk.

# Chapitre 1 : Introduction

## 1.1 Mise en contexte

La maintenance et la réhabilitation d'infrastructures routières nécessitent des techniques particulières adaptées aux conditions environnantes. En effet, il y a des différences entre les infrastructures construites sur pergélisol dans des régions nordiques et celles construites sur des sols gelés saisonnièrement. Le programme de recherche *Arquluk* de l'Université Laval cherche à développer des solutions techniques aux problèmes liés à la performance des infrastructures de transport bâties sur pergélisol instable. Aussi, la chaire de recherche industrielle sur l'interaction des chaussées, des charges lourdes et du climat (*Chaire i3C*) de l'Université Laval a pour objectif principal le développement de connaissances et d'outils permettant de mieux comprendre la performance structurale et fonctionnelle des chaussées dans le contexte climatique canadien. Ce projet de maîtrise s'insère aussi bien dans le programme *Arquluk* que dans la *Chaire i3C*.

L'étude rejoint le deuxième objectif du programme *Arquluk* qui concerne les techniques de détection et de caractérisation des sols et des remblais instables. La gestion des routes sur pergélisol est ardue, car la distribution du pergélisol riche en glace à de faibles profondeurs est difficile à prévoir. Trois autres projets sont réalisés suivant le même objectif au sein du programme de recherche. Le premier traite de méthodes géophysiques en utilisant la gravimétrie pour détecter la glace massive et le sol riche en glace en zone de pergélisol. Le second projet étudie le comportement mécanique des sols marginalement gelés. Puis le dernier projet a mené au développement d'un carottier permettant d'effectuer des essais de consolidation du sol directement sur le terrain.

Le projet s'insère également dans le thème 3 de la phase 2 de la Chaire i3C sur l'endommagement des chaussées en régions froides. Deux autres projets sont effectués sous ce thème. Le premier traite de la fissuration thermique, puis le deuxième projet analyse l'influence du soulèvement au gel sur la vie utile des chaussées.

## **1.2 Problématique**

### **1.2.1 Le gel saisonnier**

Actuellement, au Québec, il existe des méthodes de diagnostic qui permettent de détecter les endroits où il y a un problème de gélivité sur la chaussée. Par contre, ces méthodes ne permettent pas de discerner si le problème de gel est en profondeur ou en surface de la chaussée, c'est-à-dire s'il s'agit d'un problème de soulèvement différentiel du sol ou d'un problème de soulèvement de fissures. De plus, elles ne sont pas adaptées aux réalités des chaussées municipales. Il faut donc raffiner la méthode d'analyse actuelle pour pouvoir poser un diagnostic plus fiable.

### **1.2.2 Le pergélisol**

Plusieurs études ont été faites pour connaître les conditions des routes construites sur pergélisol. De plus, différents types de solutions ont été proposés et évalués dans le cadre de projets de recherches. Malgré ces développements, des outils de conception et de gestion sont nécessaires pour faciliter les processus décisionnels lors de construction et la réhabilitation de chaussées sur un pergélisol sensible au dégel. Les méthodes d'investigation existantes sont limitées compte tenu du manque de précision et du coût des essais.

## **1.3 Présentation du mémoire**

Ce mémoire propose une recherche en deux volets : une étude sur des profils mesurés en zone de gel saisonnier, puis une autre en zone de pergélisol instable. Dans un premier temps, une revue des connaissances complète est présentée pour se familiariser avec les concepts présentés. Subséquemment à la prise de données de profils de chaussées dans la région de Québec et sur l'Alaska Highway, l'analyse de ces profils a permis de développer, en outre, un abaque permettant de différencier la problématique de gel saisonnier en surface de celle en profondeur dans une chaussée, une nouvelle méthode pour détecter des problématiques de gel saisonnier grâce aux profils transversaux et une tendance décelant les problématiques reliées aux chaussées construites sur le pergélisol instable.

## Chapitre 2 : État des connaissances

Dans ce chapitre, il est question de revoir et synthétiser la littérature pertinente au projet. Les grands thèmes abordés sont le gel saisonnier, le pergélisol, la profilométrie et finalement, les différentes méthodes d'analyse de profils.

### 2.1 Le gel saisonnier

#### 2.1.1 Situation du territoire québécois

Le réseau routier québécois est recouvert en grande partie par des dépôts marins. Plus particulièrement, les zones densément peuplées se retrouvent près de la rive du fleuve St-Laurent, anciennement la mer de Champlain. Cette ancienne mer a eu pour effet de laisser des matériaux sédimentaires, majoritairement de l'argile sensible. Le silt est aussi un sol très présent sur le territoire québécois. Ces sédiments sont très variables, ce qui augmente leur complexité et leur imprévisibilité. Un autre problème encouru de l'argile et du silt est sans aucun doute sa gélivité qui accroît l'effet différentiel du comportement du gel.

Les conditions climatiques du Québec sont très rigoureuses et varient selon les régions. Il est possible d'observer des différences de températures allant jusqu'à 60 à 70 degrés Celsius entre l'hiver et l'été. De ce fait, un des principaux facteurs de la détérioration de la chaussée est le gel et le dégel de la chaussée.

#### 2.1.2 Action du gel sur la chaussée

Des problèmes sur la chaussée peuvent survenir lorsque la profondeur de gel pénètre dans un sol support gélif, ce qui entraîne un gonflement du sol et cause ainsi un soulèvement de la chaussée. Le soulèvement peut atteindre des valeurs de l'ordre de 200 mm, dans le contexte québécois, selon le type de sol et l'indice de gel. Il peut aussi y avoir un soulèvement différentiel du sol lorsque la profondeur de gel ou les caractéristiques de sensibilité au gel du sol d'infrastructure varient. De plus, lorsqu'une chaussée montre de la fissuration, l'eau et les sels de déglacages pénètrent dans les fissures par temps doux et gonflent par temps froid; ce qui occasionne des comportements différentiels. Il faut comprendre qu'un soulèvement au gel uniforme endommage peu la chaussée; c'est le soulèvement différentiel au gel qui est dommageable. (Doré & Zubeck, 2008)

#### *Profondeur de gel*

La profondeur de gel est définie par la mesure de pénétration du gel dans un sol liée à un phénomène de transfert de chaleur entre le revêtement de la chaussée et l'air. La conductivité thermique est donc un aspect important pour déterminer la profondeur de gel. La conductivité thermique d'un matériau est égale à la vitesse d'écoulement de chaleur ( $\partial Q / \partial t$ ) par unité de surface (A) divisée par le gradient thermique ( $\partial T / \partial x$ ).

Chaque matériau ou sol possède une conductivité thermique qui lui est propre et qui varie selon son état. Par exemple, la conductivité thermique d'un sol gelé est supérieure à celle d'un sol non gelé.

Plusieurs modèles mathématiques permettent de déterminer la profondeur de gel. L'équation de Stefan est la plus simple et est présentée à l'Équation 1.

**Équation 1 :**

$$X = \sqrt{\frac{2 * \lambda_f * T_s}{n * L_w}} * \sqrt{t}$$

Où :

- $\lambda_f$  est la conductivité thermique du sol gelé [W/°C m]
- $T_s$  est la température du sol [°C]
- $n$  est la porosité
- $L_w$  est la chaleur latente [W s/m<sup>3</sup>]
- $t$  est le temps [s]

#### *Indice de gel*

La pénétration au gel est directement liée à la racine carrée de l'indice de gel de surface. Plus cet indice est élevé, plus la profondeur de gel sera importante. L'indice de gel représente l'intensité du froid pour un hiver donné. Il est possible de le déterminer en additionnant les températures moyennes journalières inférieures à 0°C rencontrées au cours d'une année. L'Équation 2 permet aussi de déterminer l'indice de gel d'une autre façon, soit en calculant l'aire sous la courbe des température sous 0°C d'un graphique de la température en fonction du temps. (Ministère des Transports du Québec, 2007)

**Équation 2 :**

$$I_{gel} = \int_0^t T dt$$

Où :

- $t$  est le temps [s]
- $T$  est la température de l'air [°C]

En conception des chaussées, la méthode de dimensionnement selon AASHTO (Chaussée 2) utilise un indice de gel avec une période de récurrence égale à la moitié de la durée de vie de design. (St-Laurent, 2010)

#### *Soulèvement au gel admissible*

Lors d'un dimensionnement de chaussées, il faut respecter certaines règles pour avoir une chaussée durable au gel et une chaussée sécuritaire pour l'usager de la route. De ce fait, Transports Québec a établi des seuils

admissibles de soulèvement au gel que les ingénieurs utilisent lors de la conception de chaussées souples. (St-Laurent, 2010) Le Tableau 1 présente ces différents seuils.

**Tableau 1 : Seuils admissibles de soulèvement au gel selon le MTQ pour des chaussées souples (Ministère des Transports du Québec, 2016)**

	<b>Soulèvement admissible</b>
<b>Autoroute (100 km/h)</b>	< 50 mm
<b>Nationale (90 km/h)</b>	< 55 mm
<b>Régionale et collectrice (50 à 80 km/h)</b>	< 60 mm
<b>Locale (&lt; 50 km/h)</b>	< 70 mm

Pour le moment, il n'y a pas de relation entre les soulèvements au gel et la durée de vie des chaussées en années. Des recherches, au sein de la chaire de recherche i3c phase 2, sont présentement en cours pour tenter de développer un modèle d'endommagement des chaussées associant le soulèvement au gel et ses composantes à la performance à long terme en fonction de l'uni et de la fissuration au gel.

#### *Potentiel de ségrégation*

Pour simplifier la prédiction de l'effet du gel sur les sols, Konrad et Morgenstern ont introduit la notion de potentiel de ségrégation, une mesure physique de la gélivité d'un sol qui permet de déterminer le soulèvement d'une chaussée dû au gel (Konrad & Morgenstern, 1981). C'est un paramètre qui exprime la susceptibilité d'un sol à former les lentilles de glace. Lorsque le front de gel pénètre dans un sol fin, par exemple un sol d'infrastructure de la chaussée, une partie de l'eau présente dans le sol ne gèle pas à 0°C. En effet, dans un sol fin comme le silt ou l'argile, l'eau non gelée se retrouve sous la forme d'eau adsorbée et capillaire (Figure 1). L'eau adsorbée est le mince film d'eau à la surface du grain, tandis que l'eau capillaire est présente entre les grains. Il y a deux phénomènes qui alimentent la lentille de glace; la remontée capillaire naturelle de l'eau interstitielle et la remontée de l'eau par succion créée par la formation de glace et le gradient thermique. Plus la température diminue, plus la quantité d'eau non gelée diminue et plus les pressions dans le sol augmentent (Figure 2).

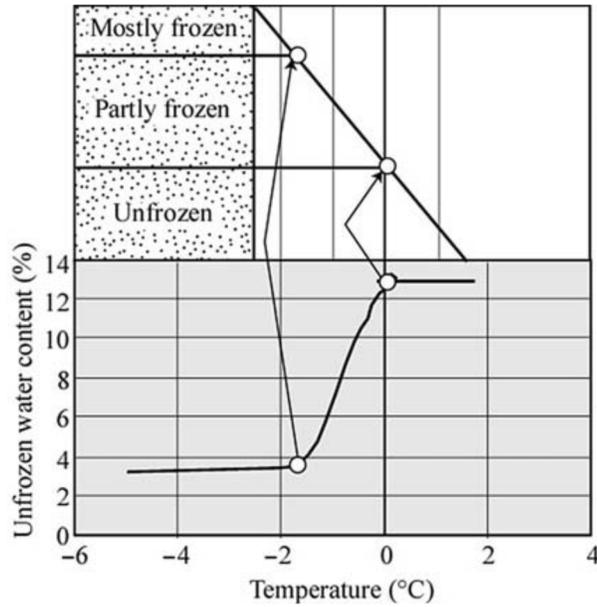


Figure 1 : Distribution de l'eau non gelée dans un sol gelé (Doré & Zubeck, 2008)

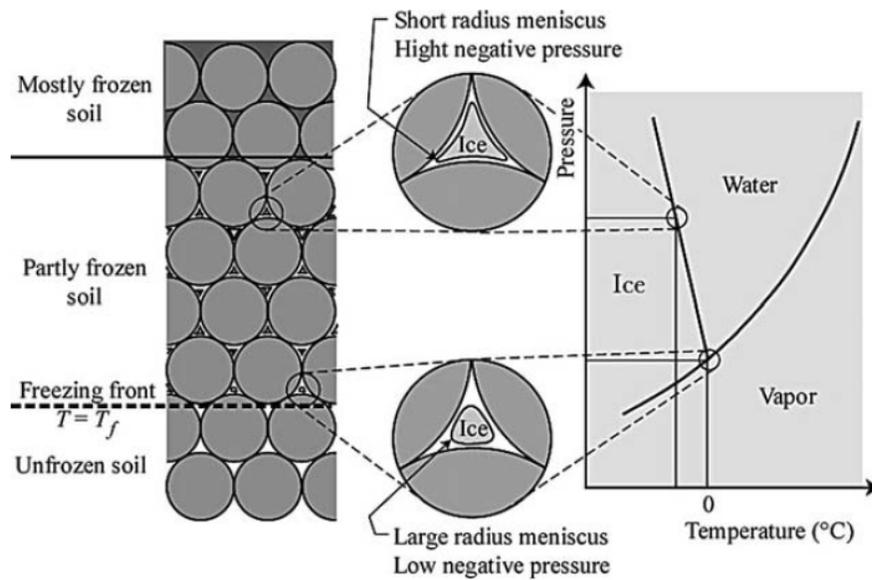


Figure 2 : Profil de la pression dans un sol gelé (Doré & Zubeck, 2008)

La perméabilité du sol et la grosseur des grains sont deux aspects à prendre en considération dans le concept du potentiel de ségrégation. Plus les grains sont fins, plus la capillarité est élevée. En outre, plus les grains sont fins, plus la perméabilité du sol est faible. Ces deux affirmations sont complémentaires. C'est pour cette raison que le silt est le matériau le plus susceptible au gel, car il combine à la fois une bonne capillarité et une bonne perméabilité. De ce fait, un sol fin, comme l'argile, a un potentiel de ségrégation moins élevé que le silt,

car il a une faible perméabilité. Quant aux sols plus grossiers comme le sable ou le gravier, ils ont une capillarité très faible, voire nulle, ce qui fait d'eux des sols habituellement non susceptibles au gel. L'Équation 3 présente la formule du potentiel de ségrégation (Konrad & Morgenstern, 1981).

**Équation 3 :**

$$SP = \frac{v}{grad(T)}$$

Où :

- SP est le potentiel de ségrégation [mm/°C h]
- v est la vitesse d'écoulement de l'eau vers la lentille de glace par capillarité [mm/h]
- Grad (T) est le gradient de température dans le sol gelé [°C/mm]

Il est alors possible de déterminer le soulèvement au gel issu des lentilles de glace de la chaussée à l'aide de l'Équation 4.

**Équation 4 :**

$$h = 1,09 * SP * grad(T) * D$$

Où :

- SP est le potentiel de ségrégation [mm/°C h]
- Grad (T) est le gradient de température dans le sol gelé [°C/mm]
- D est la durée du soulèvement.

### 2.1.3 Chaussées construites en zone de gel saisonnier

Comme discuté plus haut, plusieurs types de mécanismes de soulèvement peuvent survenir en zone de gel saisonnier sur la chaussée. Lorsqu'un sol a une susceptibilité au gel élevé, ou un potentiel de ségrégation élevé, de la glace s'accumule au front de ségrégation entraînant un gonflement du sol sous la structure de chaussée et causant ainsi un soulèvement de la chaussée.

Le premier mécanisme est un soulèvement différentiel dans l'axe transversal de la chaussée. La neige accumulée dans les accotements fait en sorte que le front de gel est plus profond au centre de la route, comme le montre la Figure 3. De ce fait, le soulèvement au gel se produit au centre de la route et des fissures, telles que des fissures de centre ou des lézardes, apparaissent au centre de la route. Le niveau de sévérité d'une fissure longitudinale ou lézardes peut être déterminé à l'aide du *Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples* (Ministère des Transports du Québec, 2007). La Figure 4 présente comment déterminer les différents niveaux de sévérité de fissures longitudinales d'une chaussée. Quant au

lézardes, les niveaux de sévérité sont différents : faible pour une lézarde ouverte entre 0 et 10 mm, moyen pour une ouverture entre 10 et 25 mm et majeur pour une lézarde ouverte de plus de 25 mm.

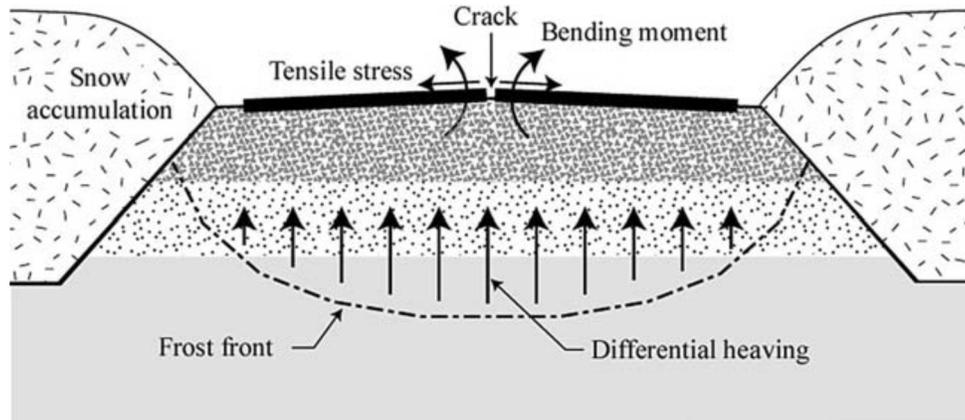


Figure 3 : Contrainte et fissuration induites par un soulèvement différentiel transversal (Doré & Zubeck, 2008)

#### Niveaux de sévérité

- Faible :** Fissure simple dont l'ouverture est inférieure à 5 mm. Les bords sont en général francs et bien définis.
- Moyen :** Fissure simple dont l'ouverture est  $\geq 5$  mm et  $\leq 20$  mm, ou fissures multiples dont l'ouverture  $\leq 20$  mm.
- Majeur :** Fissure simple dont l'ouverture est  $> 20$  mm, ou fissures multiples dont l'une des ramifications a une ouverture de plus de 20 mm, ou fissures transformées en mailles de plus de  $3 \times 3$  cases quelle que soit l'ouverture des fissures. Le niveau de sévérité d'une fissure simple dont les côtés sont érodés sera considéré comme majeur quelle que soit l'ouverture de la fissure.

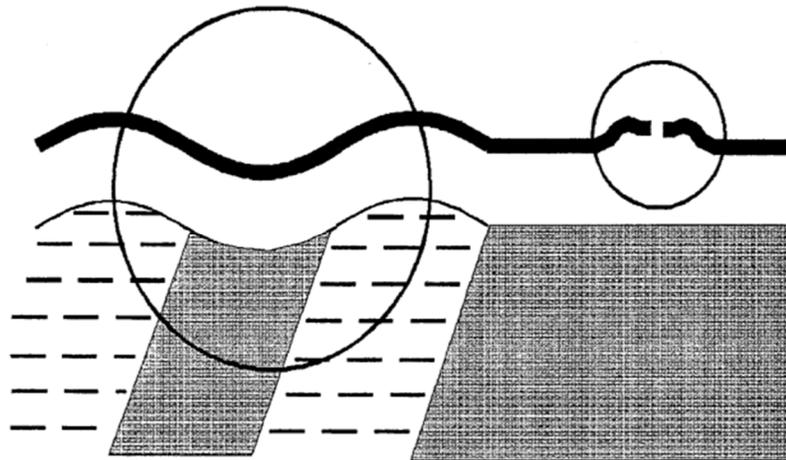
Figure 4 : Niveaux de sévérité de fissures longitudinales (Ministère des Transports du Québec, 2007)

Le deuxième mécanisme est un soulèvement différentiel longitudinal de la route. La variabilité dans les caractéristiques de sensibilité au gel des sols d'infrastructure crée des soulèvements différentiels dans l'axe longitudinal de la chaussée. Si la susceptibilité au gel du sol n'est pas la même tout au long d'une chaussée, il est évident que la chaussée ne réagira pas de la même manière au gel. Des soulèvements peuvent donc survenir à certains endroits alors qu'un peu plus loin, il n'y a aucun soulèvement de la chaussée.

Finalement, le dernier mécanisme de soulèvement est le soulèvement des fissures au gel. La présence de sel de déglçage sur les routes québécoises accroît considérablement la problématique de soulèvement de fissures. En effet, six facteurs affectent le soulèvement de fissures avec présence de sel de déglçage : la séquence météorologique (réchauffement accompagné de précipitations suivi d'un refroidissement marqué des températures), le degré de détérioration de la fissure et le refroidissement de la partie supérieure de la

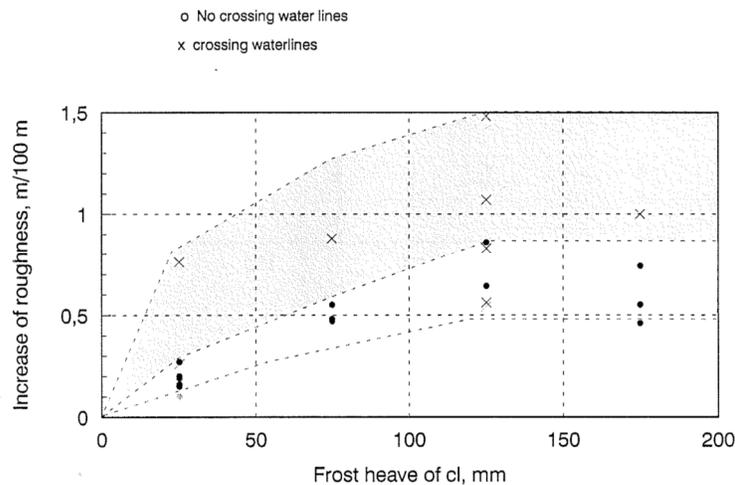
structure de chaussée, la minéralogie, la granulométrie et le gradient de salinité du matériau de fondation (Martel, 2001). Tous ces facteurs mis ensemble peuvent créer un soulèvement d'une hauteur pouvant atteindre 90 mm par rapport au profil normal de la chaussée. De plus, les fissures situées dans une chaussée en pente sont plus vulnérables au soulèvement puisqu'elles absorbent la saumure qui s'écoule sur la surface de la chaussée.

Pour faire un lien entre ces mécanismes de soulèvements, les déformations des couches profondes (sol d'infrastructure et sous-fondation) ont une répercussion de grandes longueurs d'onde à la surface tandis que de courtes longueurs d'onde sont reliées à des déformations se produisant dans les couches supérieures de la chaussée (Figure 5) (Doré G. , 1997).



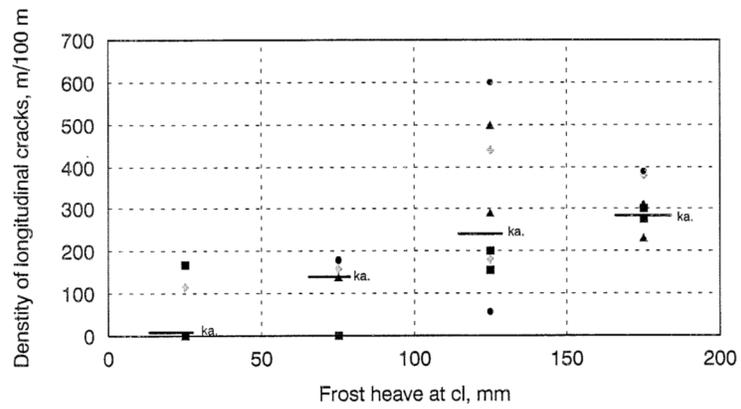
**Figure 5 : Différentes longueurs d'onde associées aux chaussées (Doré G. , Détérioration des chaussées en conditions de gel : une nouvelle approche prévisionnelle, 1997)**

Plusieurs recherches ont été faites pour étudier les dommages causés sur la chaussée par le soulèvement au gel. Quelques constats ont été observés en Finlande lors d'un programme d'étude sur les infrastructures routières finlandaises (The Finnish Road Structures Research Programme 1994-2001, 1998). D'abord, l'uni longitudinal (se référer à la section 2.3 de l'État des connaissances) d'une chaussée pavée a été analysé en fonction du soulèvement au gel. La Figure 6 montre l'augmentation de l'uni longitudinal en fonction de la hausse du soulèvement au gel au centre d'une route en Finlande.



**Figure 6 : Uni longitudinal d'une rue pavée à Joensuu au printemps 1983 en fonction du soulèvement au gel (The Finnish Road Structures Research Programme 1994-2001, 1998)**

De plus, le dommage des chaussées causé par la fissuration a été étudié. Comme expliqué un peu plus haut, le soulèvement au gel peut créer différents dommages sur la chaussée. La fissuration longitudinale et lézarde sont des conséquences importantes du soulèvement au gel. Les Finlandais ont observé l'augmentation de ces types de fissuration en fonction de l'accroissement du soulèvement au gel au centre de la route. La Figure 7 représente cette relation.



**Figure 7 : Fissuration longitudinale et lézarde d'une rue pavée à Joensuu au printemps 1983 en fonction du soulèvement au gel (The Finnish Road Structures Research Programme 1994-2001, 1998)**

Il y a donc une relation directe entre le soulèvement au gel de la chaussée et l'accroissement de l'uni et de la fissuration et lézarde.

## 2.2 Le pergélisol

### 2.2.1 Définition

Le pergélisol est un sol maintenu à une température égale ou inférieure à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant au moins deux années consécutives (Brown & Kupsch, 1974). Cette définition caractérise seulement l'aspect thermique et ne définit pas le pergélisol selon sa teneur en glace. Le profil thermique du pergélisol est présenté à la Figure 8 et permet de schématiser efficacement son comportement thermique.

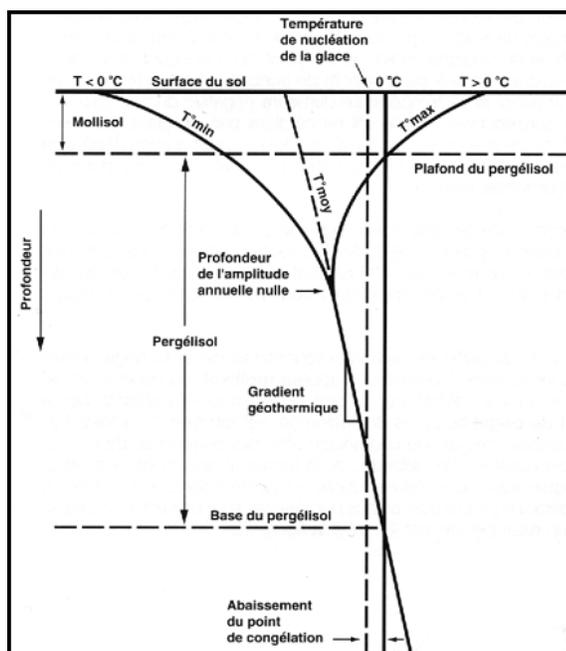


Figure 8 : Régime thermique du pergélisol (Robitaille & Allard, 1996)

Dans ce graphique, la température du sol est présentée en abscisse et la profondeur en ordonnée. Les valeurs extrêmes sont observées à la surface du sol et dépendent grandement de la température de l'air. La couche au-dessus du pergélisol est nommée couche active (ou mollisol). C'est la partie qui gèle et qui dégèle chaque année. Le profil thermique du pergélisol indique comment ce dernier réagira aux variations de température. Le pergélisol est caractérisé de « froid » lorsque sa température est inférieure à  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alors qu'il est chaud lorsque sa température se situe entre  $0$  et  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Smith & Burgess, 2004).

### 2.2.2 Types de pergélisol

Le pergélisol occupe presque le quart de la surface mondiale (French, 1996). Il existe plusieurs catégories de pergélisol qui les différencient par plusieurs facteurs situationnels. Les types de pergélisol les plus courants sont montrés à la Figure 9, soit le pergélisol continu, discontinu et sporadique.

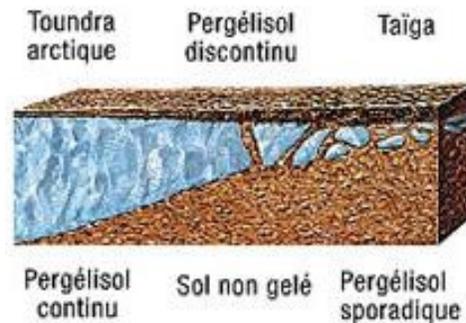


Figure 9 : Types de pergélisol les plus courants. (Canadian Geographic)

La zone continue est composée entre 90 % et 100 % de pergélisol. En effet, même en pergélisol continu, il peut avoir quelques endroits sans pergélisol, comme sous les lacs et les rivières où l'eau ne gèle pas en totalité l'hiver. De plus, les nouveaux sédiments de surface non consolidés ne sont pas totalement affectés par le climat qui modifie le régime thermique du sol, donc ils ne sont pas considérés comme du pergélisol (Transportation Research Board, 1996). En moyenne, ce type de pergélisol a une épaisseur de 150 m. À la limite sud de la zone continue, dans l'hémisphère Nord, la couche active est assez mince, soit entre 0,3 et 1 m d'épaisseur et le pergélisol possède une épaisseur entre 60 et 100 m. À cette même limite, la température moyenne annuelle du sol est d'environ  $-5^{\circ}\text{C}$  et celle de l'air est de  $-8^{\circ}\text{C}$ .

Dans la zone discontinue, il y a entre 50 et 90 % de pergélisol. Les zones non gelées représentent une grande partie du territoire de pergélisol discontinu. Le couvert végétal, comme une tourbière ou une forêt, les lacs et la présence de talik (couche de sol non gelée qui se trouve dans une zone de pergélisol) sont des aspects importants à prendre en considération lors de la détermination du type de pergélisol. Avec des photos aériennes du site, il est alors possible d'avoir une estimation de ces zones non gelées pour ensuite poser un diagnostic sur le type de pergélisol. En zone de pergélisol discontinu, la couche active peut être très épaisse. Elle varie de moins de 0,5 m dans les sols organiques végétalisés à plusieurs mètres dans les secteurs d'affleurements rocheux en fonction du climat et des conditions de surface du sol. (Smith S. , 2010) Ce type de pergélisol est très complexe et difficile à gérer surtout lorsque des infrastructures sont construites en ces zones discontinues.

Lorsqu'il est question de pergélisol sporadique, il y a présence de moins de 50 % de pergélisol. Le pergélisol est présent sous forme de plaques isolées selon la combinaison de facteurs locaux favorables à la formation et à la conservation du pergélisol (Nelson & Hinkel, 2003).

Le pergélisol sporadique se retrouve à quelques endroits propices, tout comme en zone discontinue. Il est possible de retrouver ce type de pergélisol à des latitudes relativement basses. Le pergélisol sporadique est présent dans les montagnes en zone perpétuellement gelée. Il est donc situé à de basses latitudes, mais à de grandes élévations. La Figure 10 montre la distribution du pergélisol alpin de certains pays européens, endroit où il est très présent en raison des nombreuses chaînes de montagnes. Les sections colorées en jaune montrent des endroits où il y a possibilité de présence de pergélisol localement. Les sections en violet présentent les emplacements de pergélisol existant sur toute la surface.

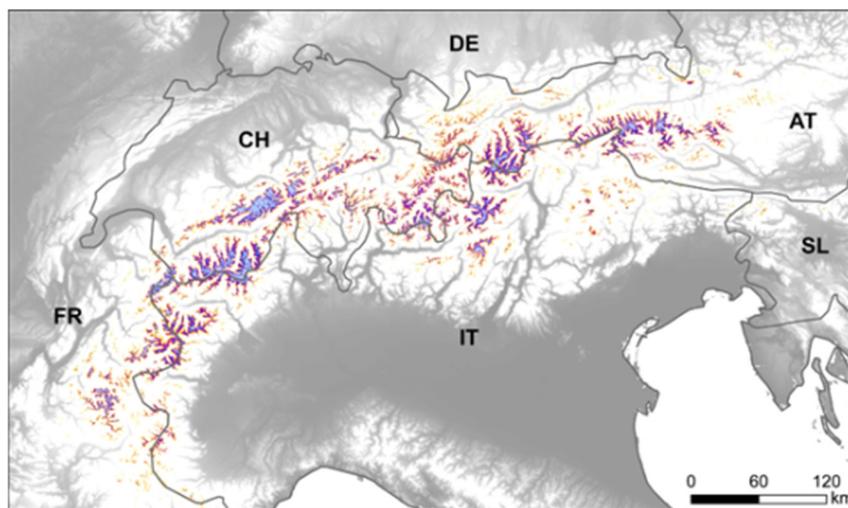


Figure 10 : Distribution du pergélisol alpin de pays européens. (Gruber, 2014)

Au niveau international, environ 24 % des terres mondiales sont occupées par le pergélisol (French, 1996). Habituellement, l'épaisseur de ce sol gelé en basse altitude augmente avec la latitude. Par contre, la distribution mondiale du pergélisol ne suit pas parfaitement le gradient latitudinal, car les courants comme le Gulf Stream influencent la répartition des régions de pergélisol. La Figure 11 indique les principales distributions du pergélisol dans l'hémisphère Nord.

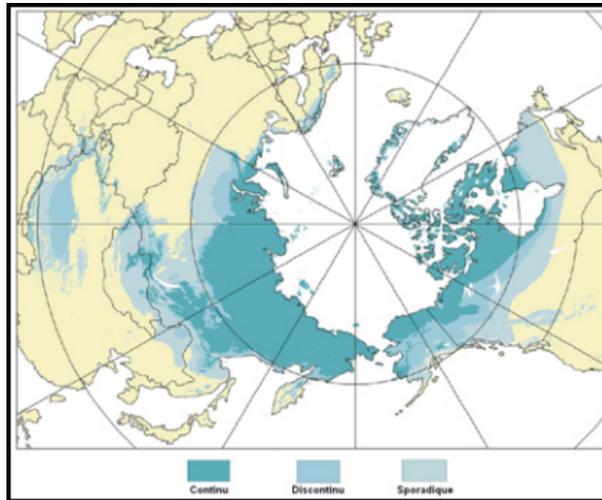
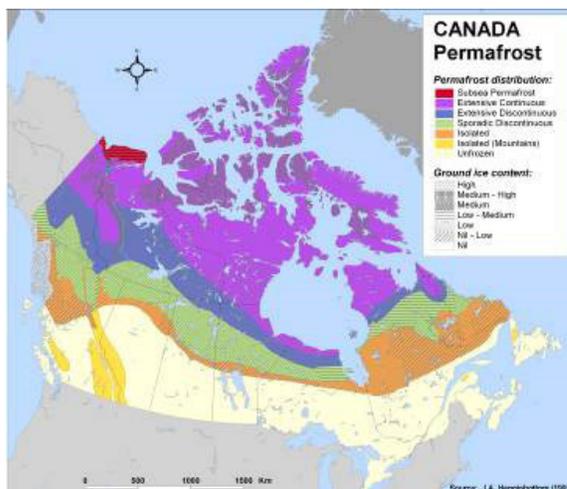


Figure 11 : Principales distributions du pergélisol dans l'hémisphère Nord. (French, 1996)

La distribution du pergélisol au Canada et au Québec est importante, soit d'environ 50 % de la surface (Ressources naturelles Canada, 2013). La Figure 12(a) montre la distribution des différents types de pergélisol au Canada et la Figure 12(b) caractérise plus précisément le pergélisol au Québec. La majorité du pergélisol au Québec se trouve sur le territoire du Nunavik, au Nord du Québec.



(a)



(b)

Figure 12 : Distribution du pergélisol (a) au Canada (Heginbottom, 1995) (b) au Québec (Voyer, 2009).

### 2.2.3 Dégradation du pergélisol

Le changement du régime thermique est le principal aspect qui affecte la dégradation du pergélisol. Sur plusieurs kilomètres carrés du territoire nordique, le plafond du pergélisol se trouve à une température près du point de fusion. De ce fait, le comportement et la stabilité des sols dans les régions froides sont grandement influencés par un léger changement de température (Ressources naturelles Canada, 2013). Plusieurs facteurs affectent le régime thermique du pergélisol, soit, principalement, la température de l'air, le couvert de neige, la végétation et la construction d'un remblai. Ces éléments influencent, par le fait même, la distribution du pergélisol et les propriétés du sol.

La température de l'air influence directement la température de surface. Lorsque la température de l'air augmente, la courbe trompette (Figure 8) se déplacera vers la droite, c'est-à-dire vers des températures plus chaudes. La conséquence principale est l'augmentation de l'épaisseur de la couche active. De plus, le réchauffement du sol peut éventuellement aller jusqu'à dégeler entièrement le pergélisol.

Le couvert de neige joue le rôle d'isolant durant l'hiver puisque la neige possède une très faible conductivité thermique. L'extraction de chaleur du sol est alors ralentie. De ce fait, le pergélisol ne se refroidit pas autant durant l'hiver, pouvant entraîner une diminution de la profondeur du pergélisol (Williams & Smith, 1991).

Le couvert végétal a des répercussions favorables sur le pergélisol, puisqu'il diminue sa température moyenne annuelle. En effet, les propriétés thermiques de la végétation varient en fonction des saisons et selon la quantité d'eau qu'il renferme. En hiver, l'extraction de chaleur est favorisée puisque la conductivité thermique est élevée, alors qu'en été, la conductivité thermique est faible ce qui contribue à diminuer l'absorption de chaleur. Aussi, la végétation permet l'extraction de la chaleur du sol par évaporation durant la période estivale. La courbe de température maximale se déplace alors vers la gauche, donc vers des températures plus froides, ayant pour effet de diminuer l'épaisseur de la couche active et d'augmenter celle du pergélisol. Par contre, lors de la construction d'infrastructures, le retrait de la végétation peut entraîner des dégradations importantes.

Une étude menée à Fairbanks en Alaska démontre l'effet perturbateur du retrait du couvert végétal. Trois sections ont été aménagées, soit une section naturelle contenant des arbres, de la tourbe et de l'herbe, une deuxième section où les arbres ont été retirés et une troisième section où le sol a été labouré, afin de retirer complètement toute végétation. L'évolution de la couche active a été surveillée pendant 26 ans. Sur la Figure 13, il est possible de comparer l'épaisseur de la couche active pour les trois sections à l'étude. Dans le cas de la première section, l'épaisseur de la couche active est restée constante, soit à 1,1 m. Par contre, les épaisseurs ont augmenté pour les deux autres sections, soit à 4,7 m et à 6,7 m à la fin de la période d'étude.

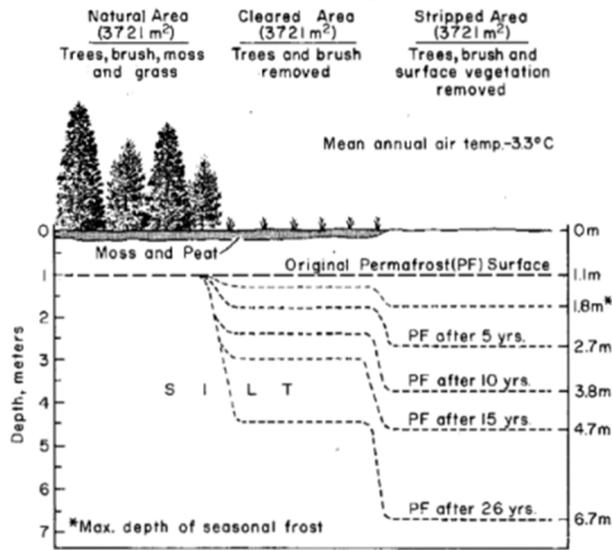


Figure 13 : Influence de la végétation sur la profondeur de dégel (Linell, 1973)

La construction d'un remblai routier influence également le régime thermique du sol, la modification subie est présentée à la Figure 14. Avant la construction, l'épaisseur de la couche active est stable alors que pendant la construction, une augmentation de la couche active est remarquée, due au retrait de la végétation, à la compaction du sol ou encore à la modification du réseau de drainage (a). Ensuite, lorsque la construction est terminée, une remontée du plafond du pergélisol dans la fondation granulaire au centre de la chaussée est observée (b). Les matériaux granulaires possèdent généralement une conductivité thermique plus grande que celle du sol autrefois en place; ce qui accentue ce phénomène. Également, avec le déneigement de la chaussée et la neige dirigée vers les côtés, l'épaisseur de la couche active augmentera au centre de la chaussée.

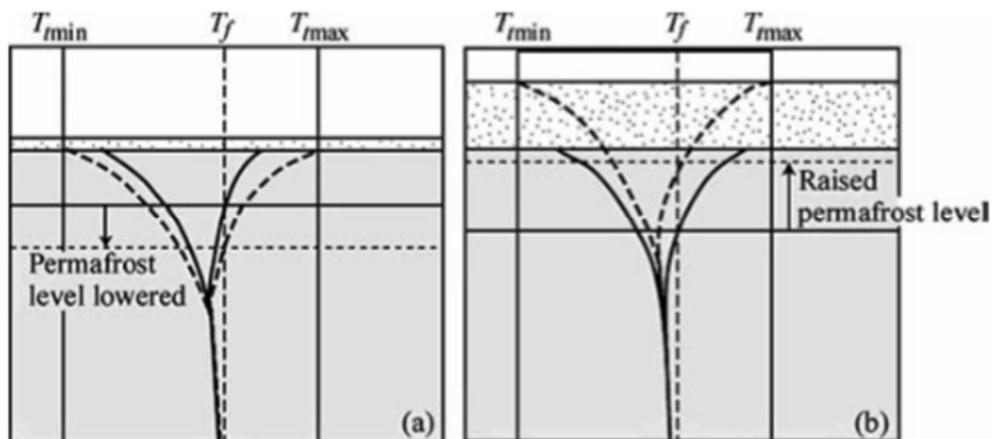


Figure 14 : Modification du régime thermique dans le sol d'infrastructure (Doré & Zubeck, 2008)

Un aspect important à prendre en considération dans le changement du régime thermique est l'impact des changements climatiques sur la dégradation du pergélisol. En effet, les régions nordiques sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique de par la fragilité de leur écosystème. Les projections laissent croire qu'une augmentation de 5 à 7°C des températures se fera ressentir pour le siècle prochain en régions arctiques (Ressources naturelles Canada, 2013). Il est évident que pour les zones où le pergélisol est continu, donc très épais, les effets surviendront moins rapidement que pour les zones discontinues où les effets seront plus importants et néfastes rapidement.

#### 2.2.4 Chaussées construites en zone de pergélisol

La plupart du temps, les chaussées construites sur pergélisol sont non revêtues. Par ailleurs, le *Yukon Highways and Public Works* a utilisé la technique de traitement de surface sur l'Alaska Highway. Le traitement de surface est un revêtement de chaussée composé de pierres concassées épanchées sur une émulsion de bitume et compactées à l'aide d'un rouleau compresseur. Un traitement de surface n'ajoute aucune capacité structurale. De ce fait, la structure granulaire de la chaussée doit être conçue pour supporter le trafic anticipé. Comparativement à une route de gravier, le traitement de surface élimine la poussière et augmente la qualité de roulement. De plus, le processus de mise en œuvre est rapide, les quantités de matériaux utilisées sont faibles et le coût d'entretien est moindre, ce qui rend cette technique économique par rapport à celle de la pose d'un enrobé (Direction du laboratoire des chaussées, 2004).

Deux principaux mécanismes de dégradation du pergélisol influencent les conditions routières nordiques, soit les dégradations induites par le remblai et, comme discutées auparavant, les dégradations résultant du réchauffement climatique (Doré & Beaulac, 2007). Un problème important lié à la dégradation du pergélisol est certainement le tassement. En effet, un tassement survient lors de la dégradation d'un dépôt riche en glace.

Ce tassement est d'autant plus dangereux lorsque la teneur en glace est variable dans les sols. Les tassements différentiels peuvent se traduire par des ondulations inégales de la route (Figure 15). Des tassements ponctuels, quant à eux, surviennent lors d'une dégradation de glaces massives localisées et de coins de glace. Les tassements localisés introduits par ces dégradations donnent souvent lieu à la création de lacs thermokastiques si l'eau de la fonte de la glace ne peut pas se drainer (Figure 16).



Figure 15 : Ondulations de la route de l'Alaska dues à des tassements différentiels (Samson, 2015)



Figure 16 : Affaissement d'un remblai routier dû à l'apparition d'un thermokast (Université de l'Idaho)

Pour ce qui est des dégradations engendrées par la géométrie du remblai, deux phénomènes sont associés à ce mécanisme de dégradation soit la rotation des épaulements du remblai et la formation de fissures longitudinales sur les accotements et sur la surface de roulement. En effet, durant l'hiver, l'accumulation de la neige aux abords des accotements du remblai isole et empêche la chaleur de sortir, ne favorisant pas la pénétration du gel dans le sol. De ce fait, le plafond du pergélisol s'abaisse sous les épaulements entraînant des tassements puis la dégradation du remblai, ce qui occasionne les défauts mentionnés auparavant.

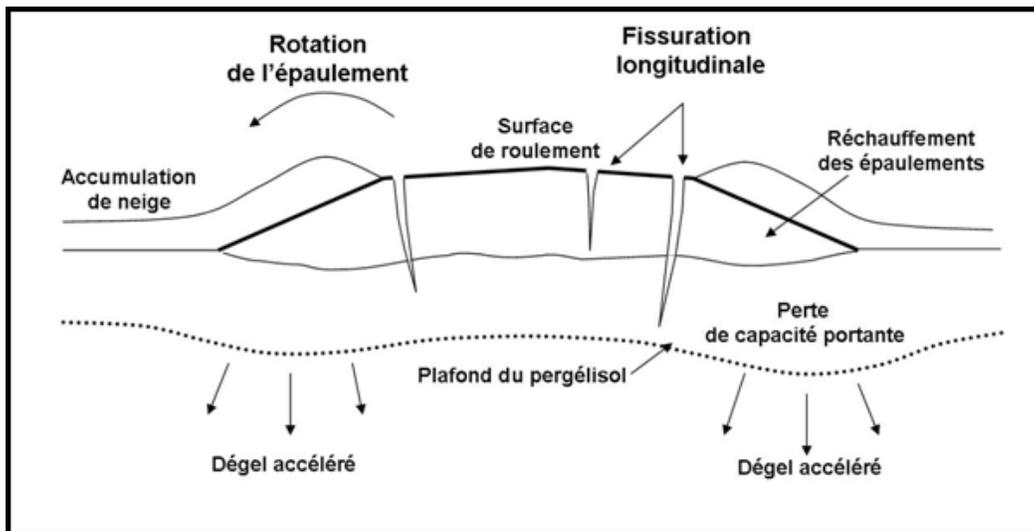


Figure 17 : Dégradations engendrées par la géométrie du remblai (Goering, 2004)

## 2.3 La profilométrie

La profilométrie consiste en l'étude des profils de chaussées. Un profil de chaussée est une représentation 2D de la surface de la route prise le long d'une ligne imaginaire (Sayers & Karamihas, 1998).

Un profil transversal (ou latéral) est pris perpendiculairement à la route. Cette dernière technique est utilisée, notamment, pour déterminer les ornières de la chaussée. Par contre, la plupart du temps en profilométrie, il est question de profils longitudinaux des chaussées, c'est-à-dire un profil mesuré parallèlement à la route. Les deux types de profils sont représentés à la Figure 18.

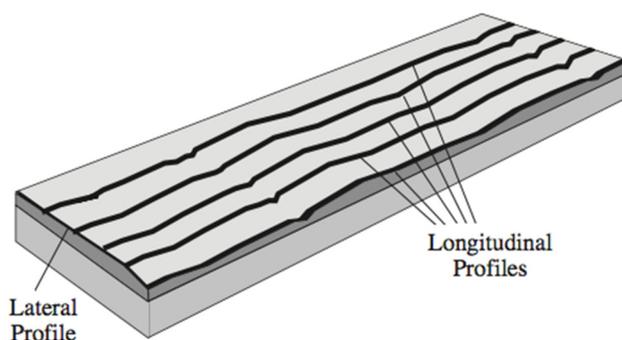


Figure 18 : Représentation des deux types de profils (Sayers & Karamihas, 1998)

Mathématiquement, un profil peut être construit à partir de séries de sinusoïdes avec différentes longueurs d'onde, amplitudes et phases. La Figure 19 représente quatre séries de sinusoïdes qui forment un profil. En réalité, il faudrait additionner plusieurs autres séries avec de petites longueurs d'onde pour former un profil de chaussée réaliste. La transformée de Fourier peut être utilisée pour évaluer les amplitudes des différentes sinusoïdes nécessaires à la construction d'un profil. Il est alors possible de connaître la distribution des différentes longueurs d'onde dans un même profil.

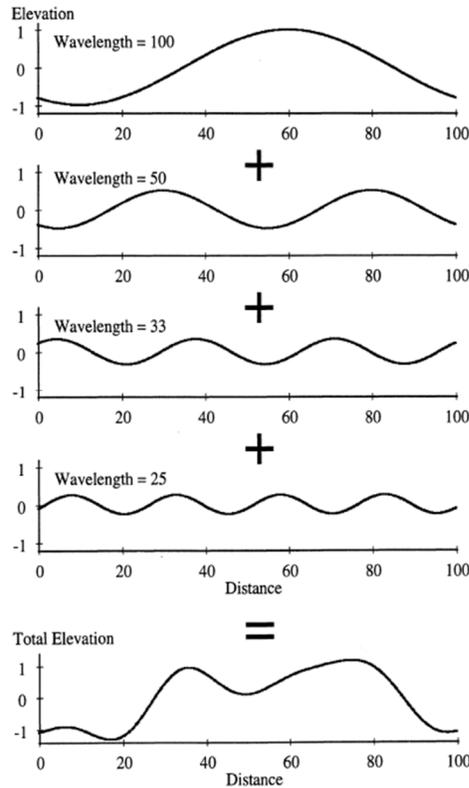


Figure 19 : Construction mathématique d'un profil à partir de sinusoïdes (Sayers & Karamihias, 1998)

### 2.3.1 L'uni

L'uni est le meilleur indicateur du confort au roulement et de la condition globale de la chaussée. Il caractérise l'état fonctionnel d'une chaussée relative aux déviations verticales par rapport au profil prévu (Association mondiale de la route, 2014). De ce fait, il a un effet important sur la qualité de service du réseau routier en affectant le confort et la sécurité des usagers de la route. En effet, les grandes longueurs d'onde causent des oscillations du véhicule tandis que les petites longueurs d'onde font vibrer les essieux et le volant du véhicule.

L'uni est aussi utilisé comme critère d'acceptation de travaux de revêtement neuf sous le terme de clause d'uni au Ministère des Transports du Québec. En détaillant l'uni, cela permet de cibler les actions à prendre pour corriger les non-conformités de ces clauses.

L'utilisation de l'uni comme critère de décision dans les programmes de réhabilitation des chaussées est très subjective. C'est pour cette raison que la Banque Mondiale a créé l'indice de rugosité internationale (IRI), afin de permettre une standardisation internationale des mesures d'uni (Banque Mondiale, 1984). L'interprétation des mesures de l'uni devient donc uniforme pour tous.

### 2.3.2 L'IRI

L'IRI est un indice d'uni proportionnel aux déplacements verticaux cumulés de l'axe de la roue par rapport aux châssis du véhicule. L'Institut de Recherche et Transport de l'Université du Michigan a créé un modèle mécanique qui calcule l'IRI que l'on nomme le modèle quart de véhicule (Sayers & Karamihas, 1996). C'est un modèle mathématique de la réaction d'un véhicule excité par les variations de l'élévation du profil de la chaussée. L'Équation 5 ainsi que la Figure 20 montrent le calcul de l'IRI à l'aide du modèle quart de véhicule. L'IRI est habituellement exprimé en mètres de déplacement vertical par kilomètre de distance parcourue (m/km). Un IRI de 0 m/km correspond à une route parfaitement lisse (théoriquement puisque dans la pratique c'est impossible). Un IRI élevé, par exemple de 20 m/km, représente une route presque impraticable. Le niveau d'IRI acceptable pour une route dépend de la vitesse permise. En effet, une autoroute aura une tolérance d'IRI plus sévère comparativement à une route régionale.

Équation 5 :

$$IRI = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n Z_s - Z_u$$

Où :

- n est le nombre de points
- L est la longueur [km]
- $Z_s$  est la position de la masse suspendue [m]
- $Z_u$  est la position de la masse non suspendue [m]

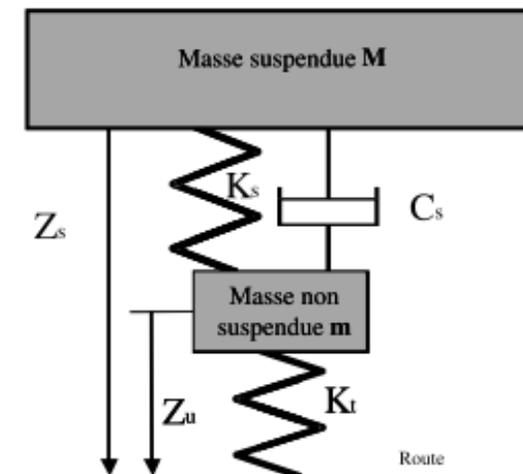


Figure 20 : Calcul de l'IRI à l'aide du modèle quart de véhicule (Sayers & Karamihas, 1998)

Lors du calcul de l'IRI, le modèle de quart de véhicule agit comme un filtre de profil, ce qui affecte le signal original. En effet, ce filtre amplifie certaines fréquences et en atténue d'autres. Cette altération du profil d'entrée est exprimée en termes de gain, autrement dit, d'accroissement. La Figure 21 montre la relation entre l'accroissement et la fréquence du signal original. En observant cette figure, il est possible de constater que les fréquences de 2,75 Hz et celles de 12,5 Hz sont amplifiées. Ces fréquences de résonance affectent respectivement la sécurité et le confort des usagers de la route et correspondent à des longueurs d'onde de 7,1 m et de 1,6 m pour une voiture roulant à une vitesse d'environ 70 km/h.

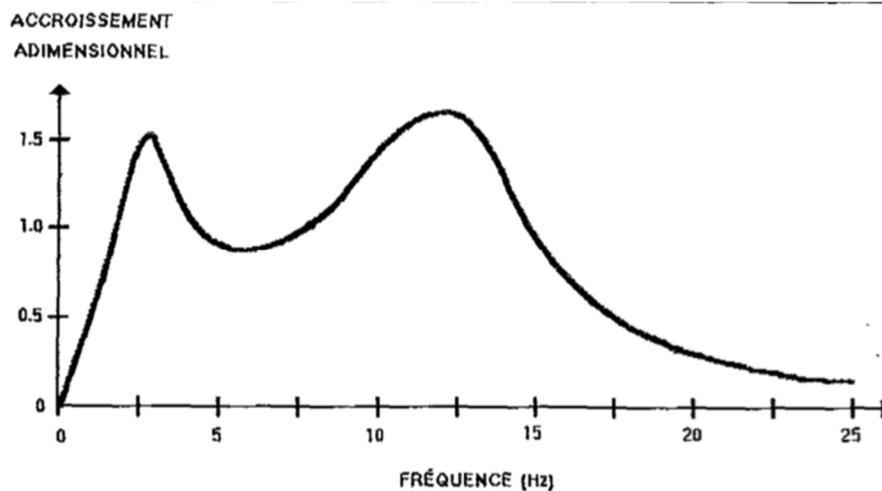


Figure 21 : Fonction de transfert du modèle de quart de véhicule (Vaillancourt, Perraton, Dorchies, & Doré, 2003)

### 2.3.3 Méthodes de mesure

Un profilomètre est un instrument utilisé pour produire une série de nombres qui décrivent un profil. Tous les points sont relatifs au point de référence au début du relevé, ce qui fait en sorte qu'un profilomètre n'est pas capable de tenir compte de toutes les longueurs d'onde. C'est pour cette raison qu'on appelle ce résultat un pseudo-profil. Un profilomètre inertiel prend sa référence avec un accéléromètre. Des algorithmes convertissent l'accélération verticale mesurée en une référence qui, avec l'aide de capteurs de hauteur, définit la hauteur instantanée de l'accéléromètre qui est dans le véhicule par rapport au sol, d'où le pseudo-profil. Dans le cadre de cette étude, trois appareils de mesure ont été utilisés pour mesurer des profils longitudinaux et transversaux de chaussées.

Le premier appareil est un profilomètre inertiel ICC© installé à l'avant d'un véhicule. Ce profilomètre mesure le profil longitudinal de la route à l'aide de deux capteurs laser situés dans les sentiers de roues. Il est alors

possible de collecter des données à une vitesse relativement rapide, soit de 70 km/h. La Figure 22 présente cet appareil.

Selon Sayers (Sayers & Karamihas, 1996), la source majeure de variation d'un profil est que d'un relevé à l'autre, la ligne de mesure longitudinale n'est pas la même. Chaque ligne possède un profil différent. Avec un profilomètre inertiel, la position latérale et longitudinale est très difficile à contrôler. Aussi, la vitesse, la texture de la chaussée, l'accéléromètre, le conducteur et le profilomètre peuvent causer des erreurs de mesure.



**Figure 22 : Profilomètre inertiel ICC©**

Le deuxième appareil est un profilomètre à basse vitesse de type SurPRO©. C'est un instrument manuel qui mesure un profil à une vitesse entre 1,5 km/h et 4 km/h. Normalement, les mesures de profils sont prises dans la piste de roue, pour bien représenter le profil longitudinal sous la roue d'une voiture. Par la suite, l'IRI est calculé le long de ce profil, mesuré entre un début et une fin, en assumant un parcours en ligne droite. La Figure 23 montre le SurPRO. L'appareil est très précis, par contre puisqu'il est manœuvré manuellement, plusieurs sources d'erreur contribuent à l'erreur de mesure telles que le louvoiement transversal (amplifié si le profil n'est pas marqué à la craie ou peinturé longitudinalement); l'étalonnage de l'odomètre (surtout si l'écart de température est important, car le pneu varie un peu en diamètre selon la température); la vitesse (avoir une vitesse constante et un début et une fin de relevé en douceur); la surface de la chaussée et plusieurs autres. Il n'est donc pas possible de quantifier une marge d'erreur sur la mesure de l'IRI. Cependant, comme l'appareil est qualifié selon les normes du Ministère des Transports du Québec, il est communément connu que l'erreur sur l'IRI ne dépasse pas 10 % des valeurs calculées. Cet appareil est un outil encore plus précis que le profilomètre inertiel présenté auparavant.



**Figure 23 : Profilomètre à basse vitesse SurPRO©**

Le troisième appareil est le LCMS (Laser Crack Measurement System). Il est utilisé principalement pour la détection automatique des fissures ainsi que l'évaluation des ornières, de la macrotexture et autres caractéristiques de la route. Les caméras à haute vitesse, les dispositifs optiques sur mesure et les projecteurs de raie laser permettent de représenter la surface de la chaussée en 3D. De plus, avec des accéléromètres en option, ce système permet la mesure de profils longitudinaux sur toute la largeur de la voie en 4000 points et non seulement dans les ornières comparativement au profilomètre inertiel. Aussi, le LCMS, couplé aux accéléromètres permet la mesure de profils transversaux. (Pavemetrics, 2015)

Le plus grand inconvénient des profilomètres inertiels à deux lasers (ex. : ICC) est que les données de profils proviennent uniquement des traces de roue, c'est-à-dire que les valeurs qui sont de part et d'autre des traces de roue sur la chaussée ne sont pas répertoriées. Une analyse en trois dimensions, incluant les profils transversaux et longitudinaux, est donc avantageuse pour couvrir l'ensemble de la chaussée et déterminer efficacement les dégradations associées aux profils. La Figure 24 présente le système LCMS de Pavemetrics©.



Figure 24 : LCMS de Pavemetrics© (Pavemetrics, 2015)

## 2.4 Les méthodes d'analyse des profils

### 2.4.1 Analyse de l'IRI

Dans la pratique, une méthode longue et coûteuse, bien qu'efficace, est utilisée pour détecter des problèmes de gélivité sur des chaussées existantes. La méthode préconisée par le Ministère des Transports du Québec (INFO DLC, 2010) est la suivante. D'abord, lors du relevé visuel, les emplacements de sondages et de gélmètres à installer sont déterminés. À l'aide des sondages, il est alors possible de caractériser les échantillons de sol (granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg, potentiel de ségrégation, profondeur de gel). Par la suite, des mesures d'arpentage avec mire et niveau et des relevés transversaux de profilométrie sont effectués pour mesurer les élévations de la surface en hiver et en été. Enfin, les résultats sont interprétés pour délimiter les secteurs ayant des problématiques de gélivité.

Pour sélectionner les sections gélives, l'IRI aux 100 m est calculé. La différence d'IRI ( $\Delta$ IRI) est calculée entre les valeurs d'IRI aux 100 m d'hiver et celles d'été. Par la suite, il est possible de déterminer la classe de gélivité à l'aide du Tableau 2 conçu par le MTQ (St-Laurent, 2010). Les seuils de gélivité varient selon le type de route puisque la sécurité est plus compromise sur des routes à grandes vitesses.

Tableau 2 : Critère de gélivité relié aux  $\Delta$ IRI (St-Laurent, 2010)

Classe de gélivité / $\Delta$ IRI <sub>100 m</sub>	Autoroute (100 km/h)	Nationale (90 km/h)	Régionale et collectrice (50 à 80 km/h)
Gélif	> 1.1 m/km	>1.25 m/km	> 1.5 m/km
Très gélif	> 1.75 m/km	> 2.0 m/km	> 2.25 m/km

Pour une étude plus approfondie, la méthode du calcul de l'IRI par sous-sections est fréquemment utilisée. La technique consiste à calculer l'IRI par tranche de 10 m de chaque kilomètre de données. Par la suite, un tableau est construit à partir des valeurs d'IRI estimées permettant de cibler rapidement les régions plus vulnérables. Donc, pour 100 m donné, il y aura 10 sous-sections avec des valeurs différentes d'IRI. La moyenne de ses sous-sections donne l'IRI calculé aux 100 m. Il est important de mentionner que cette méthode est utilisable seulement si le relevé d'été et celui d'hiver sont localisés exactement au même endroit, sinon, les résultats ne seront pas représentatifs.

### 2.4.2 Analyse par longueurs d'onde

Les ondes des profils des chaussées décrivent la qualité de l'uni. En effet, l'inconfort ressenti par l'utilisateur d'un véhicule varie avec la vitesse du véhicule dans une gamme de longueurs d'onde comprises entre 0.7 et 45 m (Organisation de coopération et de développement économiques, 1984). Les grandes longueurs d'onde (8-12 m) sont associées à des déformations des couches profondes (sol d'infrastructure et sous-fondation). En effet, pour des problématiques (soulèvement différentiel du sol d'infrastructure) se produisant entre 1 et 2 m dans le sol, la répercussion à la surface se traduit par des longueurs d'onde entre 8 et 12 m. Les courtes longueurs d'onde (1-3 m) sont reliées à des déformations se produisant dans les couches supérieures de la chaussée. De ce fait, la répercussion des problématiques de surface (soulèvement de fissures au gel) représente de plus petites longueurs d'onde. (Doré G. , 1997). L'hypothèse faite pour cette étude est que l'IRI calculé sur les pseudo-profil est proportionnel à la contribution de chaque classe de longueurs d'onde à l'état de la chaussée.

Pour déterminer l'incidence de longues et de courtes longueurs d'onde, il est utile de filtrer les profils par bandes passantes. Ce filtre coupe les fréquences demandées. Il est basé sur la méthode des transformées de Fourier. Par exemple, si un filtre passe-bas est utilisé, seulement les basses fréquences passeront le filtre, donc le profil obtenu représentera les longues longueurs d'onde. Ce filtre s'appelle aussi filtre de lissage. À l'inverse, si un filtre passe-haut ou anti-lissage est employé, le filtre permet uniquement le passage des hautes fréquences, soit les courtes longueurs d'onde. De plus, il existe des filtres passe-bandes qui laissent passer une bande de fréquences voulue.

### 2.4.3 Analyse par calcul d'énergie

Pour comprendre davantage la contribution des bandes d'ondes décrites plus haut, il est possible d'utiliser des notions d'énergie, approche utilisée par des chercheurs français, pour évaluer la qualité de l'uni (Corté, 1999). Le calcul s'effectue à l'aide d'un filtrage du profil selon trois bandes passantes allant des longueurs d'onde de 0,707 à 45,248 m, longueurs d'onde affectées par le confort et la sécurité des usagers de la route. Cette gamme de longueurs n'englobe donc pas les variations du profil résultant de la topographie du terrain (> 45,248 m) ou de la macrotecture du revêtement (< 0,707 m). Le Tableau 3 présente ces trois bandes passantes.

**Tableau 3 : Trois bandes passantes utilisées pour le calcul d'énergie**

	Terme abrégé	Gamme de longueurs d'onde (m)	Longueur des segments de calcul (m)
<b>Petites ondes</b>	PO	0,707 à 2,828	20
<b>Moyennes ondes</b>	MO	2,828 à 11,312	100
<b>Grandes ondes</b>	GO	11,312 à 45,248	200

L'énergie pour chaque gamme de longueurs d'onde est calculée selon l'Équation 6 (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2009).

**Équation 6 :**

$$E = \Delta x \sum_{i=1}^{i=N} A^2$$

Où :

- $\Delta x$  est le pas de mesure;
- N est  $\Delta x$  divisé par la longueur du segment de calcul (20, 100 ou 200 m);
- A est l'amplitude.

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a élaboré des liens entre les défauts des chaussées et les différentes gammes de longueurs d'onde (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2009). Par exemple, un joint de paveuse ou un arrêt prolongé d'une finisseuse peut faire apparaître un défaut ponctuel dans la chaussée perceptible sur un profil filtré dans le domaine des petites ondes (0,707 à 2,828 m). De plus, des défauts périodiques, tels qu'un défaut de compactage, sont aussi mis en évidence dans un profil filtré PO. Il est donc possible de conclure que les petites longueurs d'onde sont reliées à des défauts présents à la surface de la chaussée.

#### 2.4.4 Analyse par densité spectrale de puissance

La densité spectrale de puissance (DSP) est une représentation statistique de l'importance de différentes longueurs d'onde d'un profil. Étant donné qu'un profil de chaussée est un signal aléatoire, il est possible de le décomposer en plusieurs séries de sinusoïdes en utilisant la méthode de transformée de Fourier. En utilisant

le calcul de DSP du logiciel ProVal 3.5©, il est possible de déterminer la distribution de la variance pour chaque longueur d'onde. La variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon autour de sa moyenne et est présentée à l'Équation 7. Une variance de zéro indique que toutes les valeurs sont identiques.

**Équation 7 :**

$$Variance = \frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}$$

Où la variance s'exprime en m<sup>2</sup> m/cycle.

La notion de densité spectrale provient de la discipline du génie électrique. En effet, la variance du voltage est proportionnelle à la puissance de la résistance, donc la densité spectrale de puissance représente la distribution de la puissance électrique en fonction de la fréquence. (Vaillancourt, Perraton, Dorchies, & Doré, 2003) Il est possible de faire le parallèle avec l'analyse de profils de chaussées. Le voltage est remplacé par l'élévation ou la pente et la fréquence en cycles/secondes est remplacée par la fréquence en cycles/m. La variance peut être prise sur l'élévation du profil ou sur sa pente. Pour ce qui est des résultats, il faut porter attention aux fluctuations dans le graphique de la variance en fonction de la fréquence ou des longueurs d'onde. Ce type d'analyse renseigne sur l'importance relative des différentes fréquences qui contribuent au profil global et sur les emplacements des défauts (surface ou profondeur) d'une chaussée.

Selon Hesami (Hesami, 2009), deux chaussées peuvent avoir des valeurs similaires d'IRI sans avoir la même distribution de densité spectrale. C'est pourquoi il est pertinent d'analyser cette distribution pour pouvoir choisir la meilleure stratégie de réfection de la chaussée. Dans la majorité des cas, lorsqu'il y a une augmentation des grandes longueurs d'onde dans la distribution de la densité spectrale, il est attendu qu'il y a des mouvements dans le sol d'infrastructure. Par contre, s'il y a une augmentation des petites longueurs d'onde, une problématique de surface de la chaussée est à surveiller.

#### 2.4.5 Analyse par ondelettes

Cette méthode offre des informations supplémentaires sur les caractéristiques des profils. Elle se compare à l'analyse par série de Fourier. Par contre, la série de Fourier traite seulement des fréquences sans les positionner dans le temps. La transformée en ondelettes permet de représenter un signal simultanément de la fréquence et du temps (Wei, Fwa, & Zhe, 2005).

L'analyse par ondelettes peut se faire par la méthode de *continuous wavelet transform* (CWT) en intégrant le signal  $s(t)$  avec l'ondelette sélectionnée  $\psi(t)$  (Équation 8).

**Équation 8 :**

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\psi_{a,b}(t) dt$$

où  $W_{a,b}$  est un coefficient à l'échelle  $a$  et à la position  $b$ . Il est alors possible de générer une famille de coefficient en couvrant toutes les valeurs d'échelle et de position.

L'utilisation de la méthode CWT permet de montrer visuellement un graphique en trois dimensions du coefficient  $W$  en  $\text{mm}^3$  à plusieurs échelles et positions différentes. Il est alors possible de voir des changements à travers le temps sur ces graphiques.

Cette méthode est encore à ces premiers travaux dans le domaine des chaussées et n'est pas largement utilisée. Selon Wei (Wei, Fwa, & Zhe, 2005), en décomposant un profil en plusieurs échelles de fréquences, il est possible de caractériser ce profil. En effet, pour deux profils ayant le même IRI, il est possible que la distribution des échelles de fréquences soit différente. Par exemple, une dominance de l'échelle des grandes fréquences (petites longueurs d'onde) représente des problématiques à la surface de la chaussée.

## Chapitre 3 : Pertinence du projet de recherche

Ce projet répond à plusieurs besoins que ce soit dans le domaine du gel saisonnier ou dans celui du pergélisol.

Tout d'abord, dans la pratique actuelle, les méthodes utilisées pour caractériser une route gélive ne permettent pas de discerner les types de problématique reliés au gel saisonnier, soit le soulèvement différentiel du sol d'infrastructure et le soulèvement de fissures au gel, de manière simple, efficace et rigoureuse. À l'aide des techniques d'analyse décrite au chapitre précédent (se référer à la section 2.4 de l'État des connaissances), un outil efficace pourra être créé pour répondre à ce besoin. De plus, la méthode de profilométrie employée à l'heure actuelle n'est pas adaptée au contexte municipal. Effectivement, les chaussées municipales possèdent plusieurs obstacles qui viennent rendre difficile l'application de la méthode tels que des regards, des panneaux d'arrêts fréquents ou de petits tronçons de rue. L'utilisation d'une nouvelle technologie, comme le LCMS, permettrait de peaufiner la méthode courante en auscultant une largeur significative de la chaussée plutôt que seulement les traces de roue. Peu d'études présentent de lien entre la profilométrie et un diagnostic d'une problématique de gel de la chaussée. En effet, la plupart des études associent des gammes de longueurs d'onde à des problématiques de surface ou de profondeurs de la chaussée.

Deuxièmement, le projet cherchera à étudier des profils de chaussées sur pergélisol pour détecter des problématiques reliées à la fonte de celui-ci. Plusieurs études sont en cours présentement pour approfondir les connaissances des chaussées construites sur pergélisol. Par contre, peu de recherches ont été faites pour prévenir les dégradations des chaussées sur pergélisol instable (se référer à la section 2.2 de l'État des connaissances). De plus, peu d'études associent la profilométrie et les dégradations d'une chaussée construites sur pergélisol. En utilisant les notions discutées au chapitre précédent (se référer à la section 2.4 de l'État des connaissances), l'analyse de profils sur pergélisol pourra être explorée. L'exploration de cet aspect sera bénéfique pour les gestionnaires de chaussées nordiques.

### 3.1 Objectifs

Ce projet de recherche consiste à élaborer un outil d'analyse et d'aide à la décision en profilométrie à partir de profils longitudinaux et transversaux de chaussées. Dans un premier temps, pour le volet d'étude en contexte de gel saisonnier, l'outil créé permettra de discerner les causes de dégradations dues au gel saisonnier pour ainsi sélectionner les meilleures stratégies de réfection. Dans un deuxième temps, pour le volet en zone de pergélisol, l'approfondissement des connaissances sur les profils de chaussées sur pergélisol contribuera à

localiser les zones sensibles et à diagnostiquer les causes de dégradation. Plus précisément, les objectifs sont :

- Développer des techniques pour déterminer les causes de dégradation d'une chaussée en utilisant la profilométrie;
  - Développer un outil distinguant les différents mécanismes de soulèvement d'une chaussée en zone de gel saisonnier;
  - Quantifier le soulèvement transversal d'une chaussée;
  - Évaluer le potentiel d'une technique d'analyse de profils de chaussées construites en zone de pergélisol.

### **3.2 Méthodologie**

- 1) Prendre des mesures de profils de chaussées. Différentes techniques sont utilisées. Pour les données en zone de gel saisonnier, un profilomètre inertiel a mesuré des profils longitudinaux, tandis qu'un LCMS a mesuré des profils transversaux. Un SurPRO a été employé pour prendre des profils longitudinaux de chaussée construction en zone de pergélisol.
- 2) Relever les caractéristiques des sites d'étude. Lors des visites des sites d'étude, il est important d'observer les particularités caractérisant les sites. Par exemple, noter les dégradations visibles sur la chaussée ou dans les alentours, l'environnement du site, le climat, etc. De plus, avec les données de profils recueillies et le calcul de l'IRI, il est possible de déduire certaines propriétés de la chaussée telle que la gélivité.
- 3) Analyser les profils de chaussées. Plusieurs techniques d'analyses ont été utilisées; analyse par longueurs d'ondes, analyse par densité spectrale, analyse de profils transversaux avec l'erreur quadratique moyenne, etc.
- 4) Développer des outils ou des techniques de détection à l'aide des profils recueillis et des analyses accomplies.

### 3.3 Structure du document

Le mémoire est divisé en deux volets distincts. Le premier volet traite de l'étude de profils en contexte de gel saisonnier tandis que le deuxième volet explore les profils de chaussées en zone de pergélisol.

Le premier volet est divisé en deux chapitres. Le chapitre 4 présente les différents sites d'essais au Québec. La section 4.1 décrit les sections expérimentales dans la MRC de la Jacques-Cartier. Des mesures ont été prises dans le cadre de ce projet à l'été 2014 et à l'hiver 2015 à l'aide d'un véhicule multifonction muni d'un profilomètre inertiel et d'un système LCMS. Par la suite, la section 4.2 traite des sections d'études hivernales de l'uni, qui sont elles aussi dans la région de la MRC de la Jacques-Cartier. Ces sections sont bien documentées; ce qui fait en sorte que les problématiques reliées au gel sont connues. Le chapitre 5 expose les différentes analyses sur profils longitudinaux et transversaux. Un abaque d'aide à la décision est présenté pour discerner les problématiques reliées au gel saisonnier sur les chaussées telles que les soulèvements du sol d'infrastructure et les soulèvements de fissures au gel.

Le deuxième volet est, comme le premier, divisé en deux chapitres. Au chapitre 6, les sites d'essais de l'Alaska Highway sont détaillés. Le site d'Haines Junction représente la section de référence puisqu'à cet endroit, il n'y a pas de problématique d'instabilité du pergélisol. Les trois autres sections, soit celle du site d'étude de drainage, celle de Mirror Creek et celle de Beaver Creek, sont construites en zone de pergélisol instable. Ensuite, le chapitre 7 traite de l'analyse des données recueillies sur l'Alaska Highway les différents sites d'essais. Dans un premier temps, les observations sur les profils longitudinaux mesurés sont présentées. Par la suite l'IRI est calculé et comparé. À la fin de ce chapitre, une synthèse des résultats, relative aux différentes problématiques reliées à l'instabilité du pergélisol, est montrée en graphique.

Le chapitre 8 présente la discussion de la recherche. Dans un premier temps, un regard critique est porté sur le projet pour faire ressortir les sources d'erreur, les problèmes survenus et leurs impacts sur les données. Par la suite, l'applicabilité des résultats dans la pratique est discutée. Finalement, les travaux additionnels, notamment l'étude d'un plus grand nombre de sites d'essais sur pergélisol, sont mentionnés pour améliorer la recherche présentée dans ce document.

Le dernier chapitre, le chapitre 9, résume les grandes conclusions du projet et les recommandations associées à la recherche.

## **Volet 1 : Étude en contexte de gel saisonnier**

Ce premier volet discute de l'analyse de profils longitudinaux et transversaux en contexte de gel saisonnier pour discerner les problématiques reliées au gel-dégel sur les chaussées. Dans un premier temps, au chapitre 4, les sites d'essais dans la région de Québec seront présentés. Par la suite, au chapitre 5, trois méthodes d'analyse de profils longitudinaux sont décrites, puis la méthode la mieux adaptée est choisie. Finalement, à la fin de ce chapitre, l'utilisation de profils transversaux pour détecter les problématiques reliées au gel saisonnier est explorée.

## Chapitre 4 : Sites d'observation du gel saisonnier et données de profilométrie

Ce quatrième chapitre présente les sites d'étude pour le volet des chaussées construites en zone de gel saisonnier. Tous les sites se situent dans la région de la capitale nationale sur des chaussées provinciales et municipales.

### 4.1 Sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

Trois sections de la MRC de la Jacques-Cartier ont été choisies pour leur apparence gélive, c'est-à-dire des sections où des dégradations de surface dues au gel sont visibles sur la chaussée. Des repères d'arpentage ont été installés pour pouvoir déterminer le soulèvement au gel de la chaussée. De plus, des profils et des images 3D ont été recueillis durant été 2014 et au gel maximal en mars 2015 pour pouvoir discerner les causes de dégradation de la chaussée. La Figure 25 montre les emplacements des sites expérimentaux choisis.



Figure 25 : Carte des sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

Pour chacune des sections, l'image de la route, le soulèvement au gel, le profil longitudinal et le  $\Delta$ IRI sont présentés ci-après. L'analyse de profils de chaussées est une manière efficace d'étudier un profil. Par contre, il est difficile d'interpréter un profil sans le filtrer et éliminer certaines longueurs d'onde, car seulement l'effet de

la topographie est visible. Filtrer les longueurs d'onde entre 0,7 et 45 m permet d'obtenir uniquement les longueurs d'onde affectant le confort et la sécurité de l'utilisateur de la route (Organisation de coopération et de développement économiques, 1984). De plus, à l'aide des relevés de profilométrie, il est possible de définir la classe de gélivité en calculant le  $\Delta IRI$  aux 100 m et en se référant au Tableau 2 (se référer à la section 2.4 de l'État des connaissances). Lors du calcul du soulèvement au gel, il faut prendre en considération l'indice de gel pour pouvoir apprécier les soulèvements mesurés. Dans le cadre de cette campagne d'arpentage à l'hiver 2015, un indice de gel de 1500 °C jour a été calculé pour la grande région de Québec. Cet indice est supérieur à l'indice de gel moyen de Québec de 1200 °C jour.

#### 4.1.1 Site de Stoneham

La section de Stoneham est située sur la 1<sup>re</sup> Avenue. Ce secteur de 300 m est une réfection récente dans un secteur municipal et scolaire. Quelques dégradations sont visibles à la surface de la chaussée, telles que de petites lézardes et de faibles fissures au centre et en bordure de la chaussée. La Figure 26 montre un exemple de ces dégradations. Les accotements sont étroits et une bordure de trottoir vient délimiter la chaussée.



Figure 26 : Dégradations sur la section de Stoneham. Hiver 2015

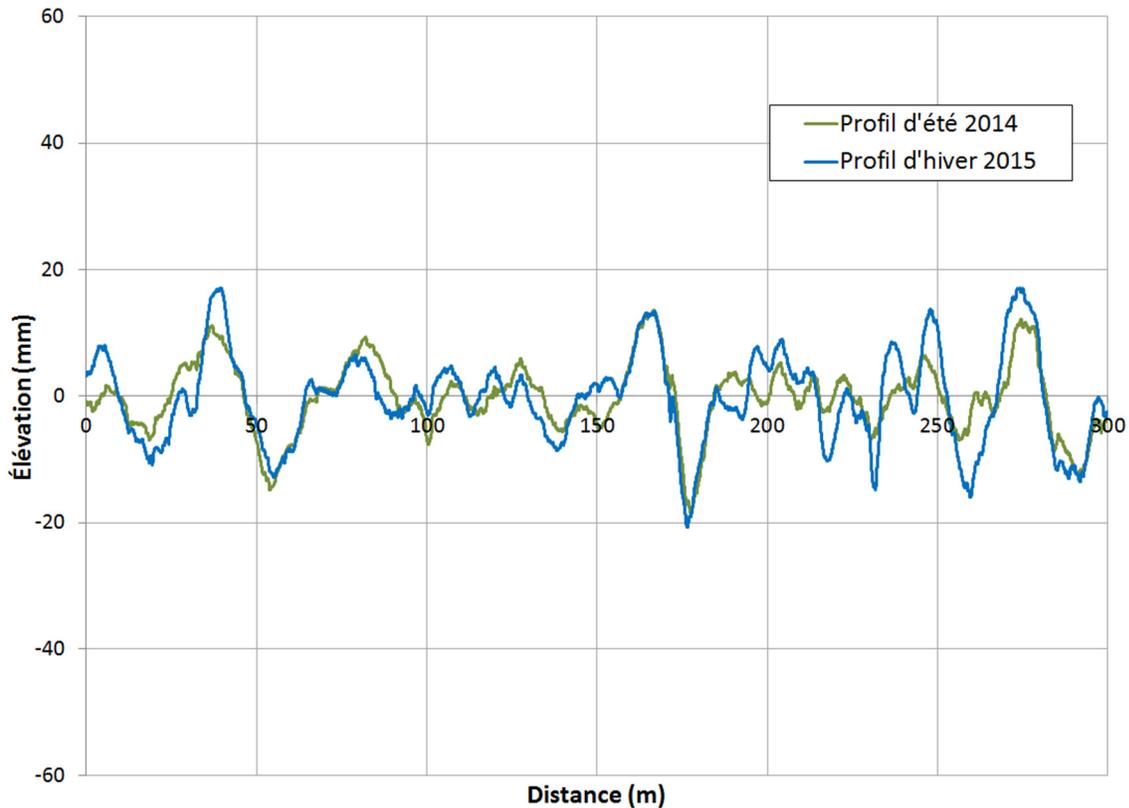
Neuf relevés d'arpentage à la mire et au niveau faits le long du site montrent que le soulèvement moyen de cette section est de 17 mm entre l'été 2014 et l'hiver 2015. Les soulèvements ont été mesurés aux 50 m à 100 m, la plupart du temps au centre de la voie. Des soulèvements plus importants sont répertoriés aux points #7 et #8 (à 240 m du début du site), soit de 30 et 31 mm. Il est aussi possible d'observer un soulèvement de

19 mm au point #2 (à 40 m du début de la section). En se fiant au Tableau 1 (se référer à la section 2.2 de l'État des connaissances), les soulèvements au gel obtenus au site de Stoneham ne sont pas critiques et se situent sous le seuil admissible de 70 mm pour une route locale. Les résultats détaillés des soulèvements sont montrés au Tableau 4.

**Tableau 4 : Soulèvements au gel au site de Stoneham**

<b>Point</b>	<b>Distance</b>	<b>Élévation Mars</b>	<b>Élévation Juin</b>	<b>Soulèvement</b>
	(m)	(m)	(m)	(mm)
<b>#1</b>	40	97.051	97.042	9
<b>#2</b>	50	97.071	97.052	19
<b>#5</b>	120	98.299	98.282	17
<b>#6</b>	200	100.003	99.992	11
<b>#7</b>	240	99.962	99.932	30
<b>#8</b>	240	99.953	99.922	31
<b>#9</b>	260	99.796	99.792	4
<b>#10</b>	280	98.879	98.867	12
<b>#11</b>	290	98.859	98.842	17
			Moyenne	17

La Figure 27 présente les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'été 2014 et à l'été 2015. Les variations d'élévations du profil sont assez faibles et sont comprises entre 18 mm et -20 mm. Le profil d'hiver 2015 montre, majoritairement, des élévations plus élevées comparativement à celles de l'été 2014. De plus, en observant les endroits où des mesures de soulèvements au gel sont plus élevée, soit aux distances 40 m et 240 m, il est possible d'observer de plus grandes variations des élévations entre les profils d'hiver et d'été.



**Figure 27 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site de Stoneham. Été 2014 et hiver 2015.**

Cette section est dans une route collectrice, ce qui implique un seuil de gélivité de 1,5 m/km. La Figure 28 présente les résultats de différences d'IRI aux 100 m du site d'étude de Stoneham. Il est possible de remarquer que les  $\Delta$ IRI se situent sous le seuil de gélivité, donc, selon le critère de gélivité de Transports Québec, cette route n'est pas gélive. Bien que la route soit dite non gélive selon ce critère, il se peut que la chaussée présente tout de même des signes de gélivité. Il faut aussi comprendre que ce critère n'est pas parfait. Étant donné que le calcul est évalué en fonction de valeurs longitudinales d'IRI provenant des pistes de roue, il ne prend pas en compte le soulèvement transversal, soulèvement fréquent en contexte municipal.

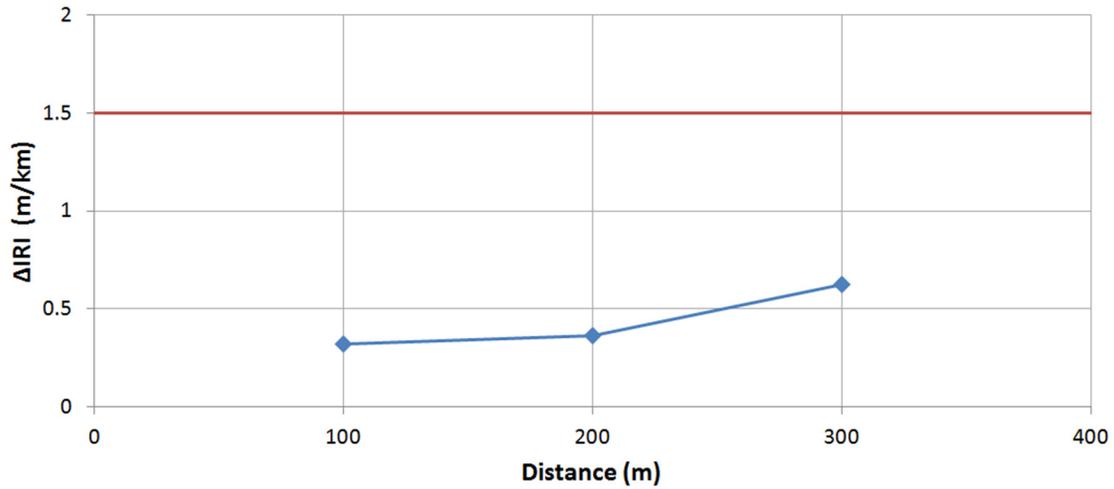


Figure 28 : ΔIRI aux 100 m au site de Stoneham et du seuil de gélivité admissible

#### 4.1.2 Site de Lac-Delage

La section de Lac-Delage est située sur le Chemin de la Grande Ligne. Elle est courte, soit d'une longueur de 200 m. Plusieurs lézardes de sévérité moyenne à majeure sont observées sur la chaussée. La Figure 29 montre quelques lézardes aperçues sur ce site. Les accotements sont étroits et des fossés profonds bordent les deux côtés de la chaussée.



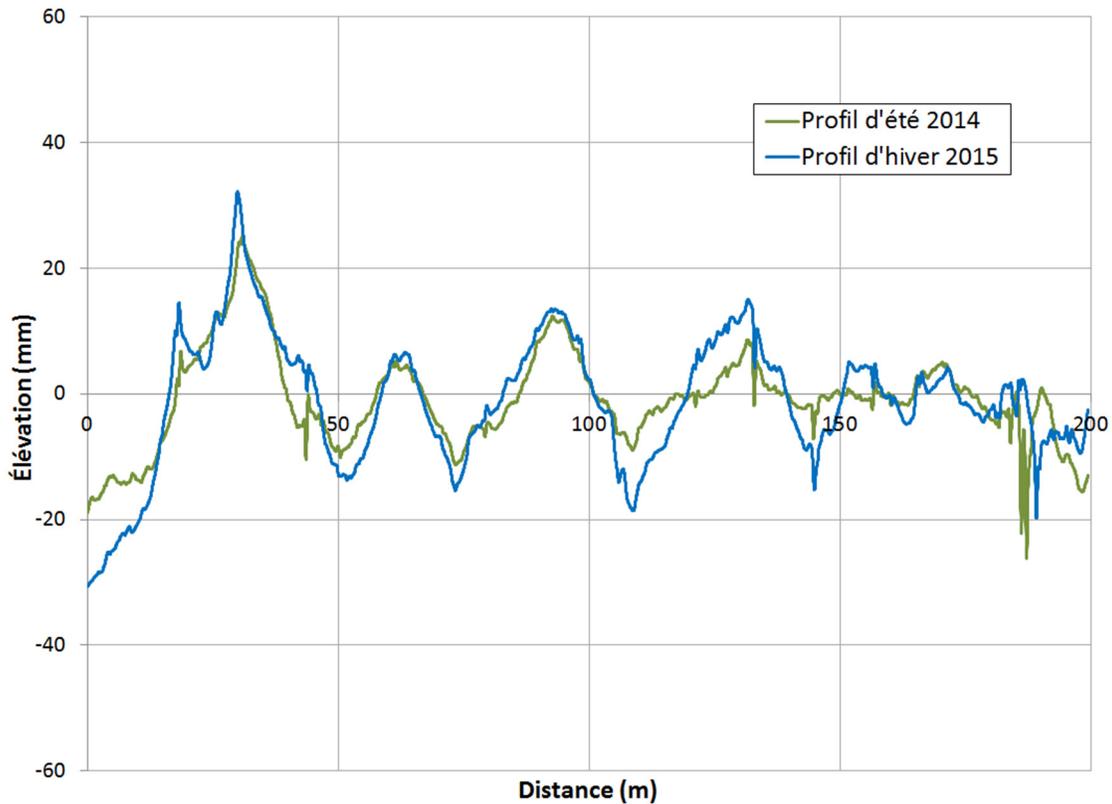
Figure 29 : Dégradations sur la section de Lac-Delage. Été 2014

Un soulèvement au gel moyen de 37 mm est présent sur cette section. Cinq soulèvements ont été mesurés entre 100 m et 150 m du début du site. Des soulèvements plus substantiels ont été calculés lors des relevés à la mire et au niveau aux points #4, #5 et #6 (entre 120 m et 150 m du début du site), respectivement de 46, 45 et 50 mm. Les résultats détaillés des relevés d'arpentage du site de Lac-Delage sont présentés au Tableau 5.

**Tableau 5 : Soulèvements au gel au site de Lac-Delage**

<b>Point</b>	<b>Distance</b>	<b>Élévation Mars</b>	<b>Élévation Juin</b>	<b>Soulèvement</b>
	(m)	(m)	(m)	(mm)
<b>#1</b>	110	99.578	99.560	18
<b>#2</b>	120	99.593	99.569	24
<b>#4</b>	130	99.641	99.595	46
<b>#5</b>	140	99.648	99.603	45
<b>#6</b>	150	99.640	99.590	50
			Moyenne	37

La Figure 30 présente les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'été 2014 et à l'été 2015. À première vue, les élévations sont plus grandes que celles du site de Stoneham présentées à la Figure 27. Les élévations du site de Lac-Delage varient entre 30 mm et -30 mm. En grande partie, le profil d'hiver possède des élévations plus élevées que celles de l'été. Aux endroits où de grands soulèvements au gel ont été constatés lors de la campagne d'arpentage (entre 120 m et 150 m du début du site), il est possible de remarquer de grandes différences au niveau des élévations d'hiver et d'été comparativement au reste du profil.



**Figure 30 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site de Lac-Delage. Été 2014 et hiver 2015.**

De la même manière qu'au site de Stoneham, les  $\Delta IRI$  sont calculés pour déterminer la classe de gélivité. La Figure 31 montre ces valeurs ainsi que le seuil de gélivité de 1,5 m/km. Au même titre que le site de Stoneham, la section n'est pas gélive. Par contre, visuellement, des signes majeurs de gélivité étaient décelables sur la chaussée. Étant donné l'étroitesse de la chaussée, il se pourrait que le soulèvement ne soit pas observable avec des relevés longitudinaux dans les pistes de roue, mais le serait à l'aide profils transversaux.

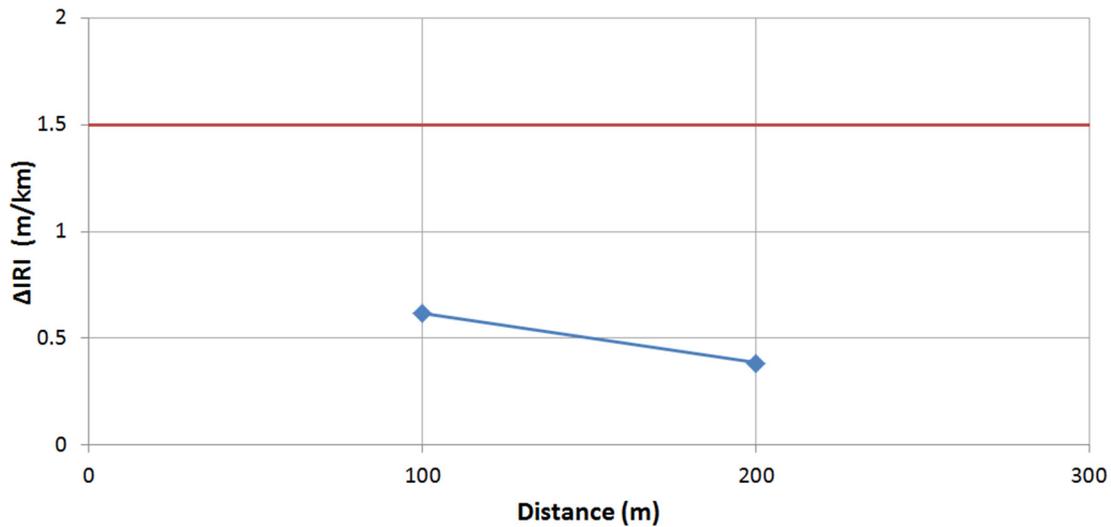


Figure 31 :  $\Delta IRI$  aux 100 m au site de Lac-Delage et du seuil de gélivité admissible

#### 4.1.3 Site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier

La section de 1000 m de la route des Érables à Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier présente plusieurs indices qui permettent de dire qu'il y a des problèmes de gélivité à cet endroit, comme il est possible de le remarquer à la Figure 32. Aucune intervention n'a eu lieu sur la chaussée entre les relevés d'été et d'hiver. Au début du site d'étude, soit environ les 600 premiers mètres, peu de dégradations reliées aux problématiques de gel sont présentes sur la chaussée. Par contre, les 400 derniers mètres où plusieurs dégradations sont apparentes telles que des lézardes, des ornières et des affaissements. Aussi, seuls des accotements de terre sont présents. De plus, des fossés profonds mal drainés longent la route, ce qui peut causer un mauvais drainage de l'infrastructure lors de la période de dégel.



Figure 32 : Dégradations sur la section de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier. Été 2014

Lors de la campagne d'arpentage de six relevés, un soulèvement au gel moyen de 133 mm a été constaté dans le dernier 300 m (entre 700 m et 1000 m du début du site). Ce soulèvement au gel dépasse largement le seuil admissible pour une route collectrice, soit 60 mm (se référer au Tableau 1 de la section 2.1 de l'État des connaissances). Certains endroits présentent des soulèvements encore plus importants soit de 155 mm aux points #10 et #11 (entre 930 m et 950 m du début du site). Les résultats détaillés des relevés d'arpentage du site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier sont présentés au Tableau 6.

Tableau 6 Soulèvements au gel au site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier

Point	Distance	Élévation Mars	Élévation Juin	Soulèvement
	(m)	(m)	(m)	(mm)
#4	750	99.015	98.900	115
#6	820	98.955	98.820	135
#7	860	98.858	98.739	119
#8	880	98.835	98.717	118
#10	940	98.395	98.240	155
#11	950	98.395	98.240	155
			Moyenne	133

La Figure 33 présente les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'été 2014 et à l'été 2015 du site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier. Pour ce site, les variations d'élévations sont très élevées, comparativement aux deux autres sites d'étude, et sont comprises entre 58 mm et -60 mm. Comme mentionné plus haut, le site peut être divisé en deux sections, soit une première section de 600 m, puis une autre de 400 m. Il est possible de remarquer une différence de ces deux sections dans le graphique de la Figure 33. En effet, les élévations du profil d'hiver 2015 semblent plus élevées que celles du profil d'été 2014 dans la première section, toutefois, elles sont plus faibles dans la deuxième section. Ces observations du graphique sont contradictoires aux constatations faites lors de l'analyse visuelle du site. Des analyses plus approfondies seraient nécessaires pour comprendre le phénomène. Il en sera question au chapitre 5.

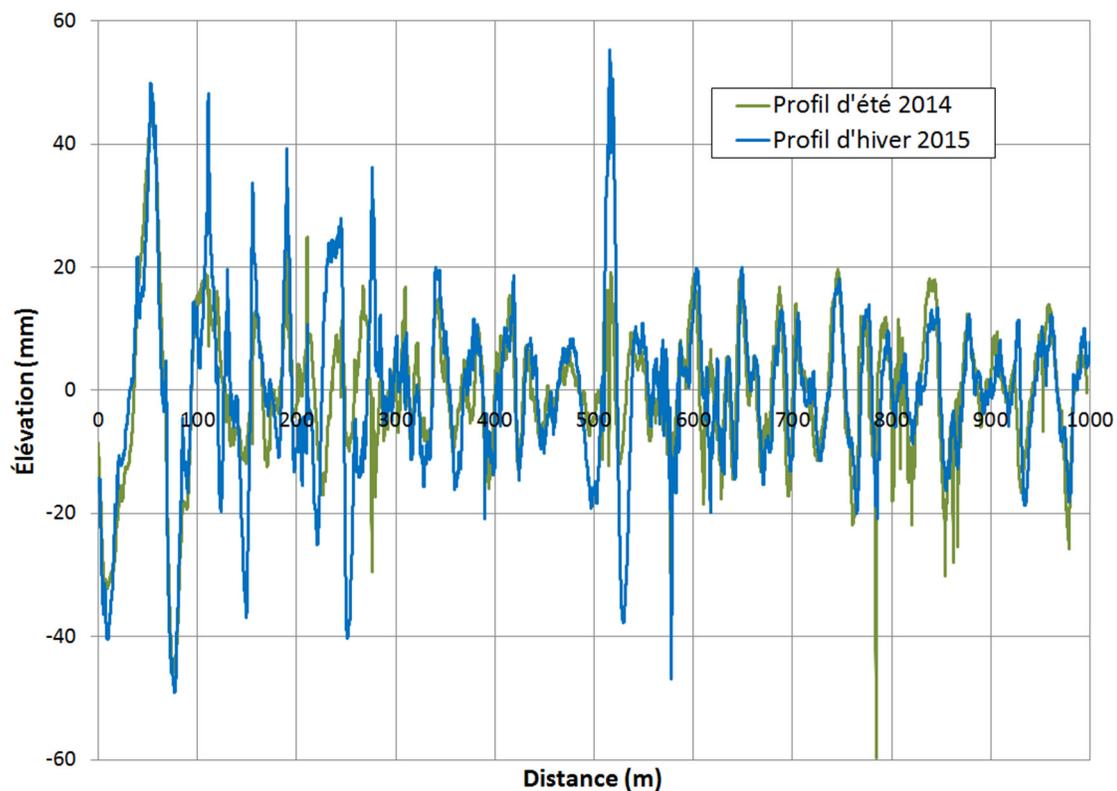


Figure 33 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier. Été 2014 et hiver 2015.

Également pour ce site, les  $\Delta IRI$  sont calculés pour déterminer la classe de gélivité. Les résultats sont présentés à la Figure 34. Des résultats inattendus ont été constatés. En effet, le dernier 400 m de la section montre, visuellement, plusieurs dégradations de la chaussée causées par le gel, en revanche, le graphique des  $\Delta IRI$  indique qu'il n'y a pas de problématique de gel, même que l'IRI est plus faible en hiver qu'en été. Ce

résultat insinue que la chaussée est en meilleure condition l'hiver que l'été, ce qui prouve que la méthode n'est pas toujours représentative d'un problème de gel. D'ailleurs, avec un soulèvement de 155 mm au dernier 100 m, il est étonnant que le  $\Delta IRI$  ne dépasse pas la valeur seuil de gélivité. Les déformations causées par le gel pourraient, dans ce cas, améliorer le confort au roulement en ramenant la chaussée plus stable. Par contre, il est possible d'observer que les 200 premiers mètres dépassent cette valeur seuil, ce qui signifie que la chaussée est très gélive à cet endroit.

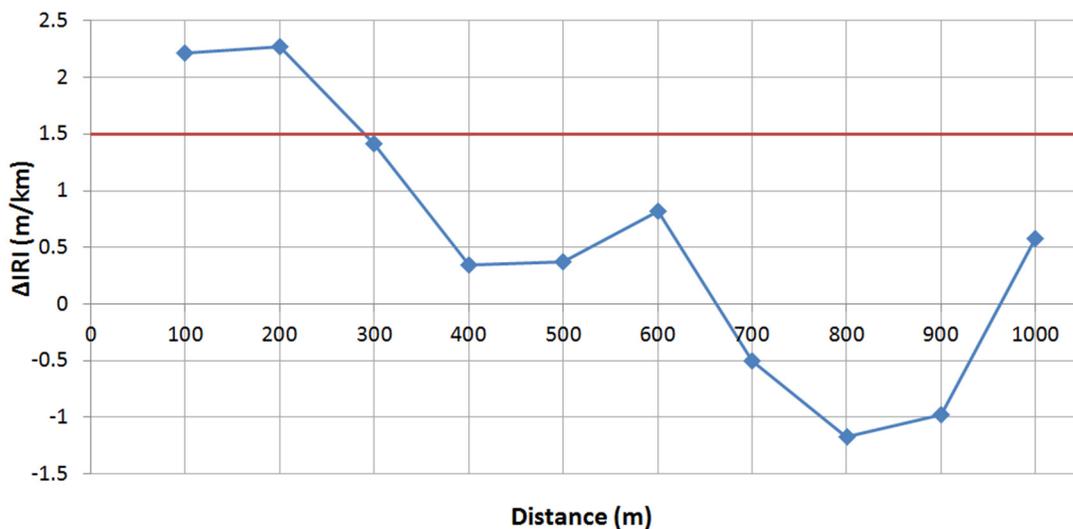


Figure 34 :  $\Delta IRI$  aux 100 m au site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier et du seuil de gélivité admissible

## 4.2 Sections d'étude de l'évolution hivernale de l'uni

Trois sections d'étude utilisées lors de recherches universitaires sur l'évolution hivernale de l'uni (Fradette et coll., 2005) ont été retenues dans le cadre de ce projet. Ces sections sont intéressantes puisque les problématiques de gel sont connues et des données profils d'hiver et d'été y sont disponibles. Elles sont situées dans la région de Québec et sont montrées à la Figure 35. Plusieurs relevés ont été faits à l'aide d'un profilomètre à basse vitesse en 2003.

Malheureusement, les routes ont été réhabilitées depuis la prise des données. Par contre, en se référant au document de l'étude hivernale de l'uni (Fradette et coll., 2005), il est possible de connaître toutes les caractéristiques qu'avaient ces sections auparavant. Dans le cadre de ce projet, les profils du 14 mars 2003 (gel maximum) et 26 juin 2003 seront comparés.



Figure 35 : Carte des sections d'étude hivernale de l'uni

#### 4.2.1 Route 369, section 1 à Shannon

Cette route locale est construite sur la terrasse alluviale de la rivière de la Jacques-Cartier près de Shannon. Le sol sous la chaussée est composé majoritairement de sable silteux et de sable. Sur la chaussée, lors des prises de données en 2003, des fissures longitudinales et transversales, du carrelage et de nombreuses dépressions avaient été observés. Selon l'analyse de l'IRI fait dans le rapport de Fradette (Fradette et coll., 2005), le soulèvement de fissures et le soulèvement différentiel du sol ont contribué à l'augmentation de l'IRI durant l'hiver. La variation des caractéristiques du sol, probablement causée par l'alternance de sable silteux et de dépôt granulaire de la rivière, influence les grandes longueurs d'onde (8-12 m) reliées aux problématiques de sol d'infrastructure (se référer à la section 2.2 de l'État des connaissances).

La Figure 36 présente les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'hiver et à l'été 2003. Les variations d'élévations des profils sont très grandes et sont comprises entre 80 mm et -80 mm. Les variations d'élévations du profil d'hiver semblent plus élevées que celles du profil d'été.

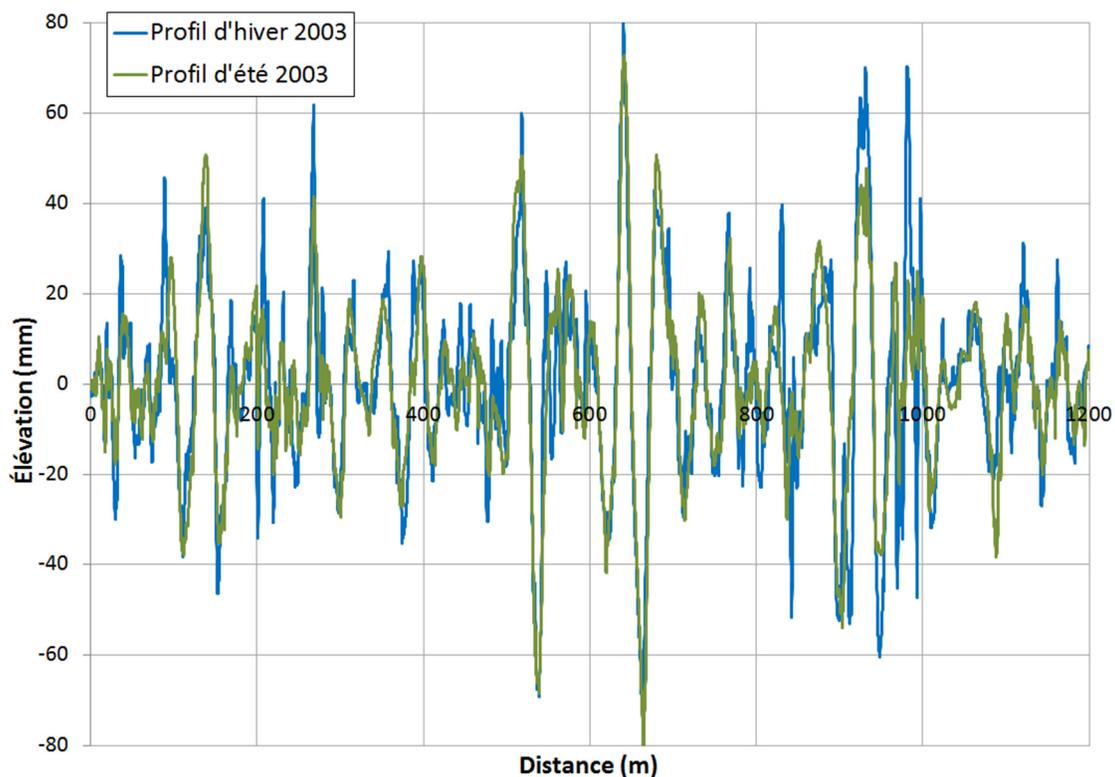


Figure 36 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site 369-1. Hiver 2003 et été 2003.

Le calcul du  $\Delta IRI$  aux 100 m permet de déterminer le niveau de gélivité en se référant au Tableau 2. La Figure 37 montre les valeurs de  $\Delta IRI$ , le seuil de gélivité et les deux zones de gélivité utilisées lors de l'analyse. Pour les analyses du projet, une zone correspond à une section de chaussée avec les mêmes caractéristiques de gel sur plus de 100 m consécutifs. Il est possible de remarquer que la majorité de la section est gélive puisque les  $\Delta IRI$  dépassent la valeur du seuil de gélivité qui est de 1,5 m/km.

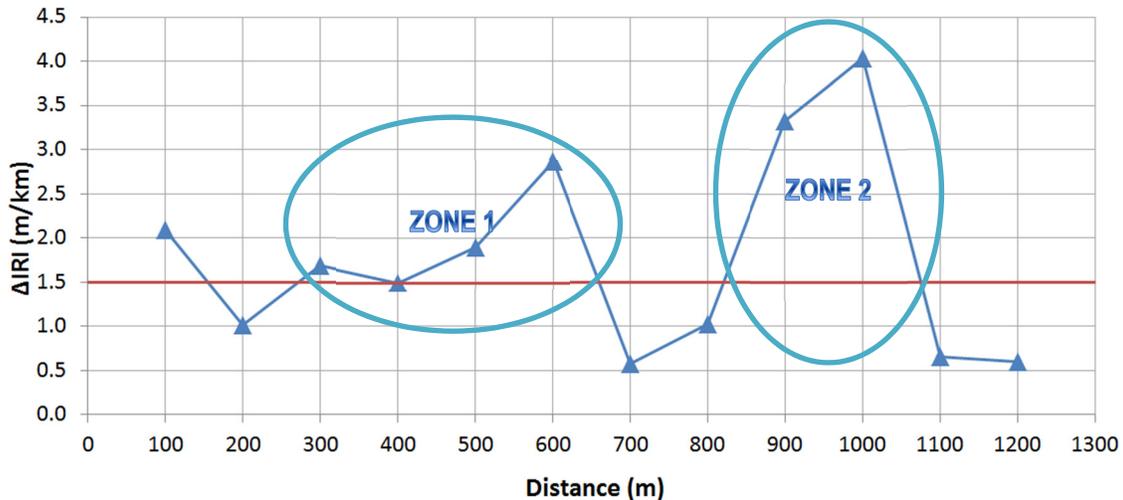


Figure 37 :  $\Delta IRI$  aux 100 m au site 369-1

#### 4.2.2 Route 369, section 2 à Fossambault

Cette section est construite le long de la rivière Jacques-Cartier sur des dépôts de rivières et des dépôts marins. La route a été resurfacée un an avant la prise des données. C'est pour cette raison que seulement quelques fissures ont été remarquées sur la section. Par contre, trois soulèvements significatifs, probablement causés par des contacts géologiques, ont été observés. Avec l'analyse de l'IRI effectuée, il est possible de constater que l'IRI d'hiver est influencé par le soulèvement différentiel du sol d'infrastructure. Même si la chaussée a été réhabilitée, le problème de gel du sol d'infrastructure n'a pas été réglé lors de l'intervention, car seulement la surface de la chaussée a été réhabilitée.

La Figure 38 présente les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'hiver et à l'été 2003 pour le site 369-2. Il est possible de remarquer que les variations d'élévations semblent plus faibles que celles analysées à la Figure 36. En effet, les profils varient entre des élévations de 50 mm à -62 mm. Le profil d'hiver a des variations d'élévations plus importantes que le profil d'été.

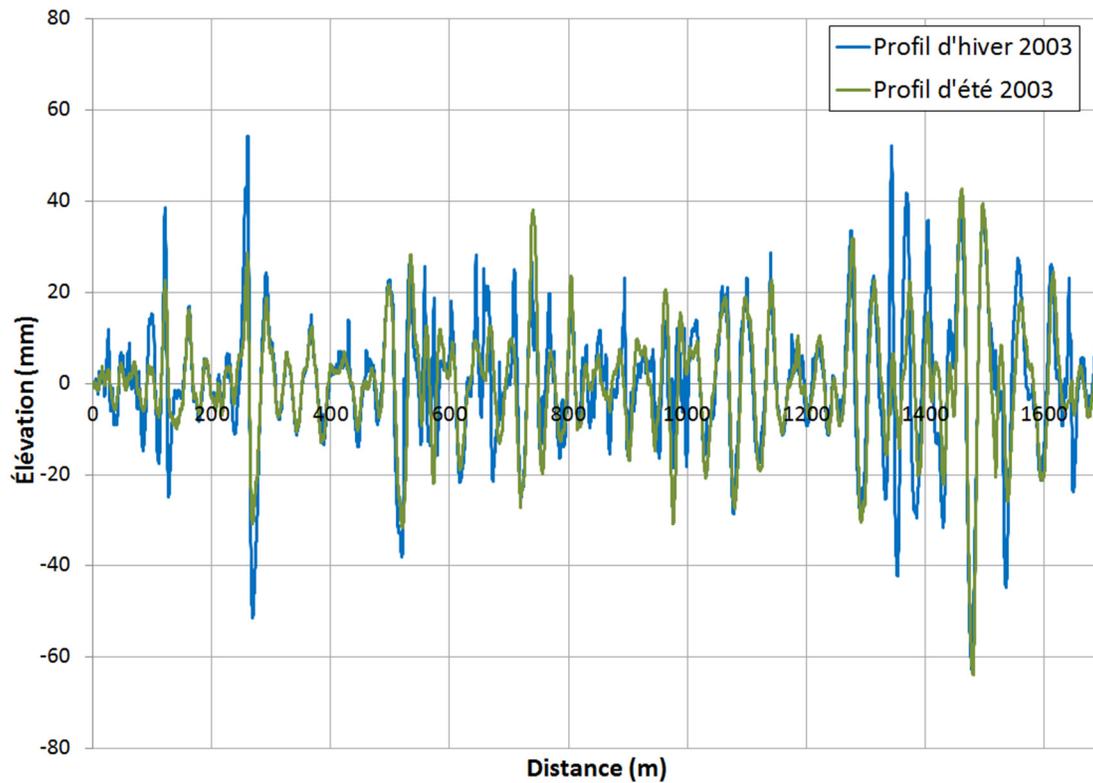


Figure 38 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site 369-2. Hiver 2003 et été 2003.

En se référant au Tableau 2, il est possible de déterminer les 100 m gélifs sur cette section. La Figure 39 montre les valeurs de  $\Delta IRI$ , le seuil de gélivité ainsi que la zone de gélivité créée pour faciliter l'analyse. Quelques valeurs de 100 m dépassent le seuil de gélivité.

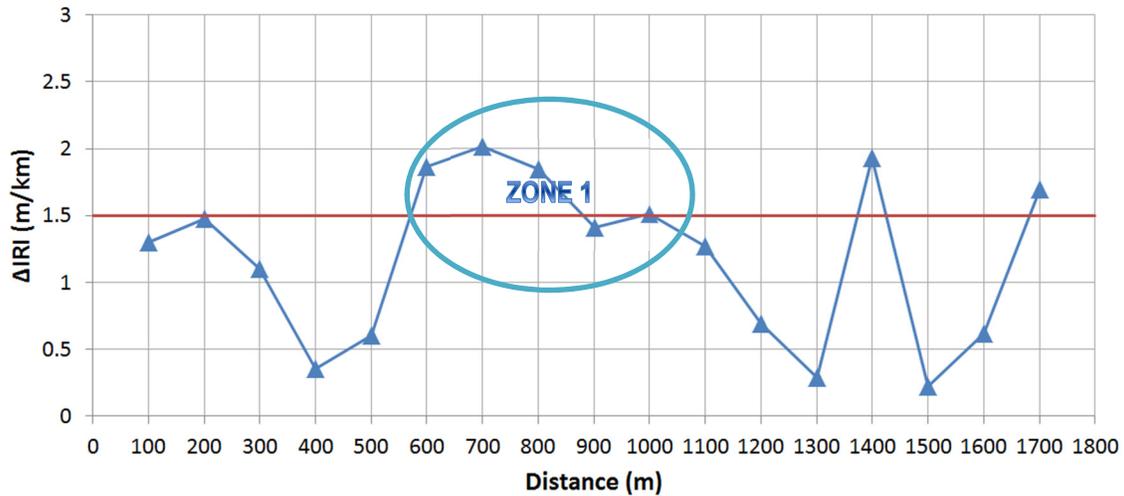


Figure 39 :  $\Delta IRI$  aux 100 m au site 369-2

#### 4.2.3 Route 367, section 1 à Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier

Cette section est construite sur un dépôt de till hétérogène dans la municipalité de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier. La route a été resurfacée deux ans avant la prise de données de profilométrie et est très affectée par le soulèvement de fissures au gel. Visuellement, il est possible d'observer plusieurs fissures transversales et des ornières. Il est à noter que cette route supporte un fort volume de trafic. Deux déformations significatives, probablement causées par un contact géologique, sont observées sur la section dans le premier 600 m. En effet, un contact entre du till glaciaire et du roc existe à cet endroit.

Plusieurs conclusions sont émises avec l'analyse de l'IRI. Premièrement, l'IRI est très élevé à l'hiver au niveau de ce contact. De plus, il est possible de constater que l'IRI a drastiquement diminué à la mi-mars sur le reste de la section, ce qui vient confirmer qu'il y a un problème de soulèvement de fissures au gel. En effet, la surface de la chaussée dégèle bien avant le sol d'infrastructure. De ce fait, les fissures soulevées durant l'hiver ne sont plus apparentes lors de l'analyse de l'IRI. Par contre, le soulèvement du sol, à cette période, aurait un impact important sur l'IRI.

La Figure 40 présente les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'hiver et à l'été 2003. Les élévations de ces deux profils varient moins que les quatre autres profils montrés à la Figure 36 et à la Figure 38, soit entre 39 mm et -48 mm. Encore une fois, le profil d'hiver a des variations d'élévations beaucoup plus marquées que celui d'été.

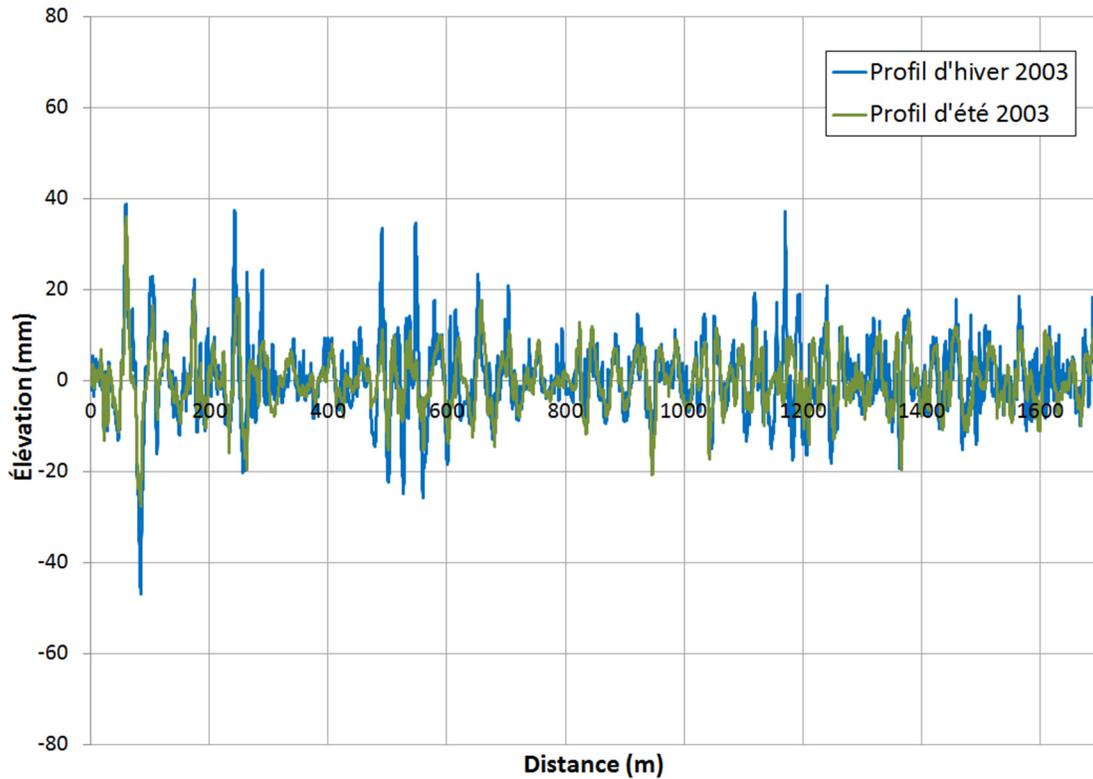


Figure 40 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site 367-1. Hiver 2003 et été 2003.

La gélivité de la chaussée a été déterminée en utilisant  $\Delta IRI$  aux 100 m et le Tableau 2. La Figure 41 montre les valeurs de  $\Delta IRI$ , le seuil de gélivité et les trois zones de gélivité créées pour simplifier la comparaison lors de l'analyse.

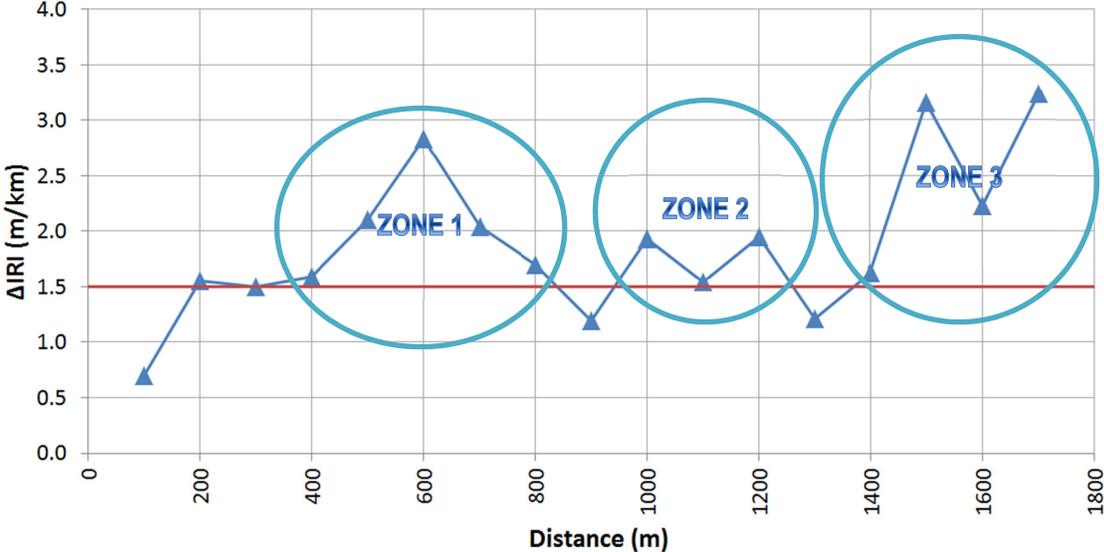


Figure 41 :  $\Delta IRI$  aux 100 m au site 367-1

## **Chapitre 5 : Développement d'une méthode d'analyse en contexte de gel saisonnier**

Dans le but d'élaborer un outil d'analyse par profils longitudinaux performant, trois méthodes d'analyse ont été testées à l'aide des sections d'étude de l'évolution hivernale de l'uni (présentées à la section 4.2), soit l'analyse de l'IRI par différence de profils longitudinaux, l'analyse longitudinale par rapport d'IRI et l'analyse longitudinale par différence d'IRI. Ces méthodes sont détaillées dans ce chapitre et la meilleure approche est choisie. De plus, une méthode d'analyse utilisant des profils transversaux d'une largeur de voie de chaussée a été étudiée pour les sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier (présentées à la section 4.1).

### **5.1 Analyse par profils longitudinaux**

#### **5.1.1 Analyse de l'IRI par différence de profils longitudinaux**

En soustrayant le profil d'été de celui d'hiver, il est possible d'obtenir, théoriquement, les soulèvements différentiels créés par l'hiver. En partant au même endroit l'été et l'hiver pour faire le relevé d'uni à l'aide du profilomètre inertiel, le point de référence de départ est le même, donc la différence des profils est nulle. Sans ce point de référence, les profils ne seraient pas comparables. La Figure 42 montre un exemple d'un profil longitudinal, nommé  $\Delta$  profil, créé en faisant la différence entre un profil d'hiver et d'été de la section 369-1. Les élévations de ce  $\Delta$  profil varient entre 60 mm et -70 mm. Les élévations sont comparables à celles déterminées à la Figure 36 montrant les profils longitudinaux filtrés mesurés à l'hiver et à l'été 2003 qui, elles, variaient entre 80 mm et -80 mm.

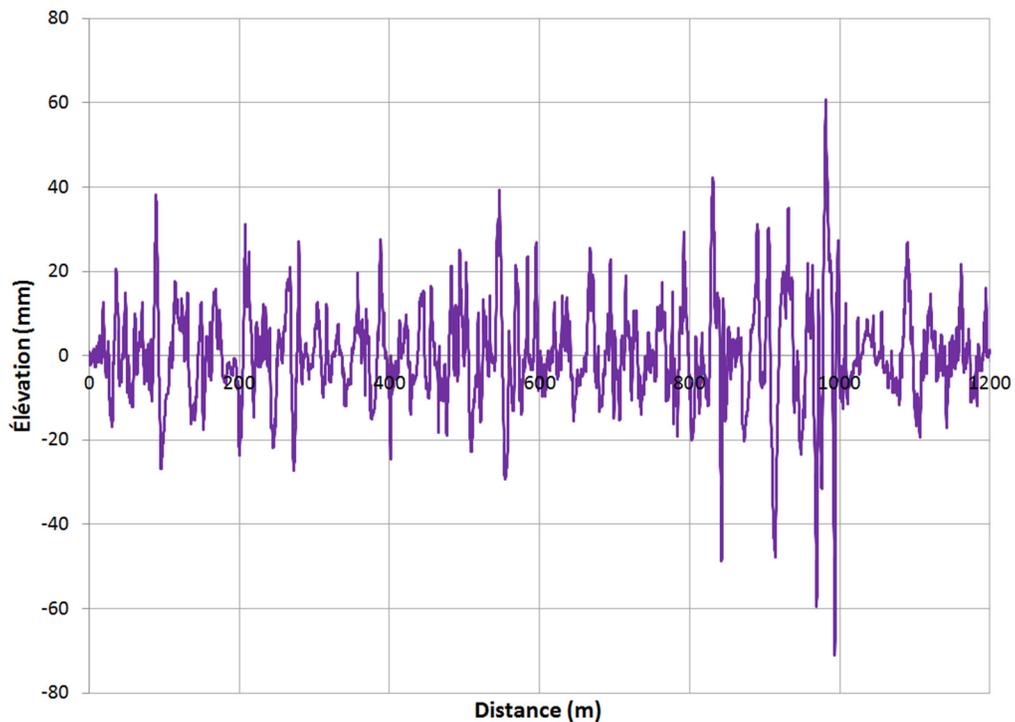


Figure 42 :  $\Delta$  profil filtré entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site 369-1

Pour les trois sites d'étude de l'évolution hivernale de l'uni, les IRI aux 100 m représentant les ondes courtes et les longues ont été calculés sur les  $\Delta$  profil résultant de la différence d'élévation des profils longitudinaux entre l'hiver et l'été. La Figure 43, la Figure 44 et la Figure 45 montrent ces résultats. Les courbes pointillées bleues représentent les profils filtrés entre 1 et 3 m, tandis que les courbes mauves représentent les profils filtrés entre 8 et 12 m. Tel que discuté dans la section 2.2 de l'État des connaissances, ces gammes de longueurs d'onde représentent respectivement des défauts en surface de la chaussée (soulèvement de fissures au gel) et des défauts en profondeur dans la chaussée (soulèvement du sol d'infrastructure au gel). Les rectangles rouges représentent les zones gélives présentées au chapitre précédent.

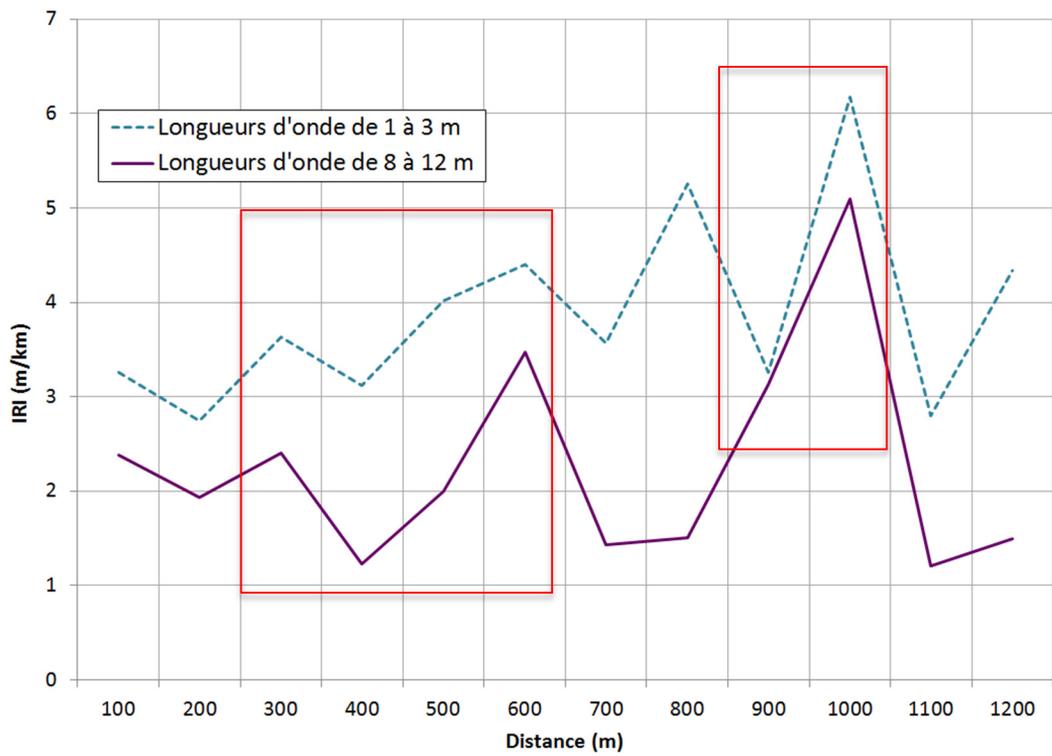


Figure 43 : IRI par différence de profils longitudinaux pour la section 369-1

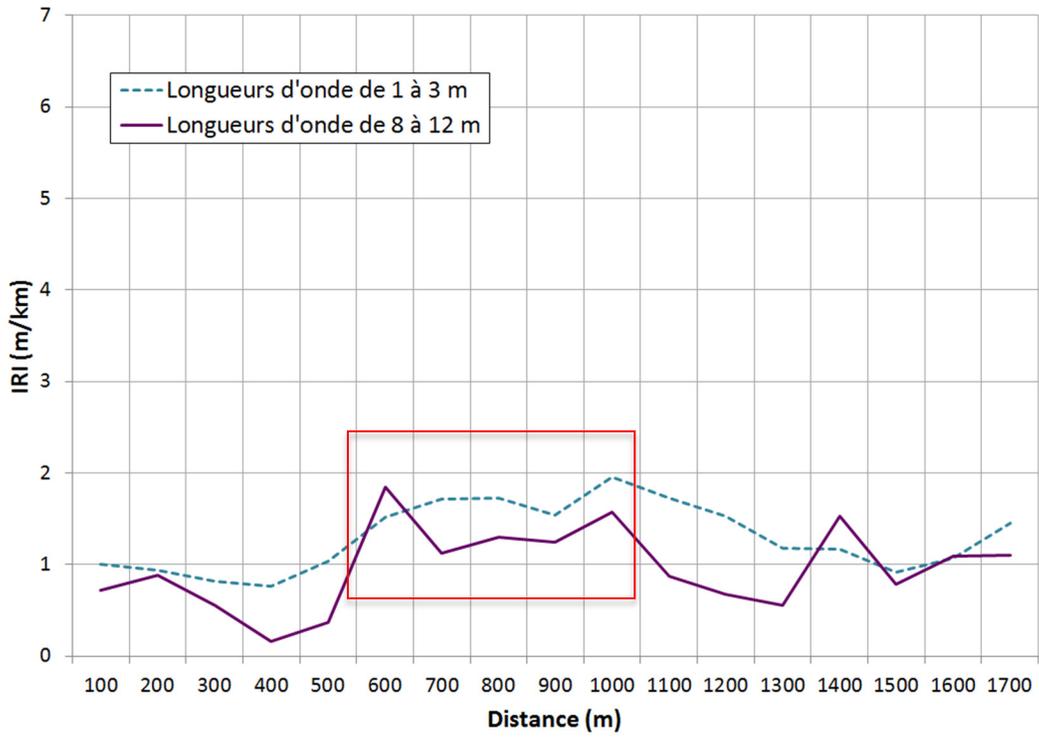


Figure 44 : IRI par différence de profils longitudinaux pour la section 369-2

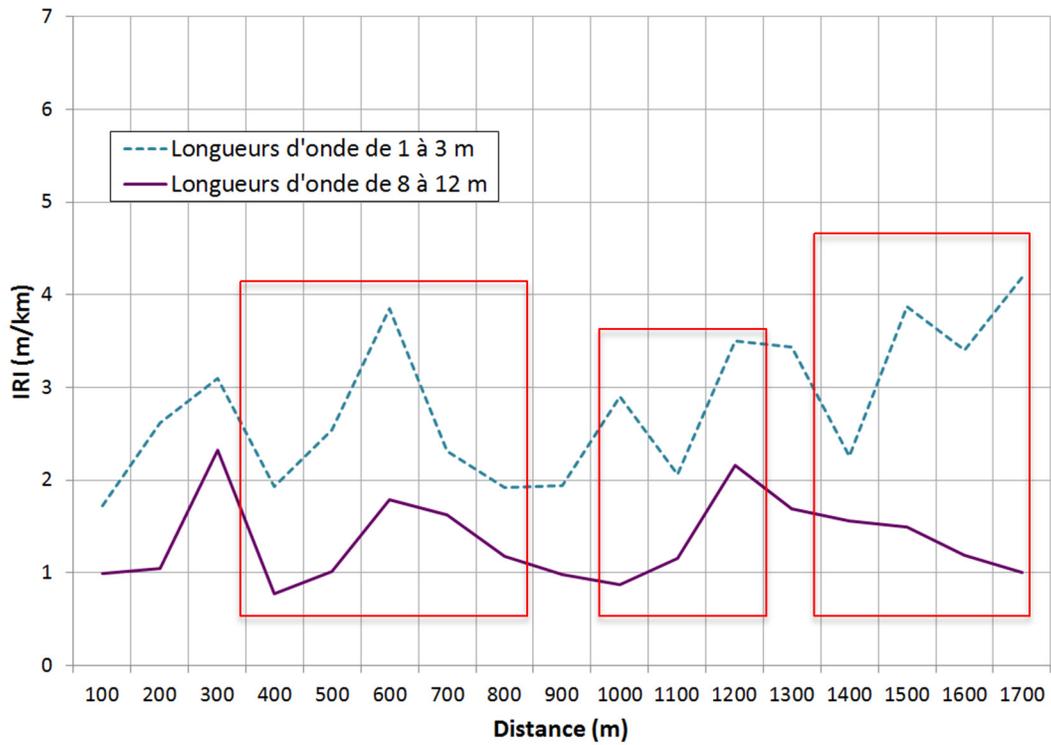


Figure 45 : IRI par différence de profils longitudinaux pour la section 367-1

Dans tous les cas, les IRI calculés sur les profils filtrés entre 1 et 3 m dominent sur ceux filtrés entre 8 et 12 m. Par contre, à la Figure 43 (section 369-1) et à la Figure 45 (section 367-1), il est possible de remarquer que l'importance relative des petites longueurs d'onde est nettement plus élevée qu'à la Figure 44 (section 369-2). En effet, les sections 369-1 et 367-1 sont affectées par un phénomène de soulèvement de fissures au gel, tandis que la section 369-2 est plutôt affectée par des soulèvements différentiels du sol d'infrastructure. Il faut aussi se rappeler que la section 369-1 est aussi affectée par une problématique en profondeur, qui est moins décelable avec ce type d'analyse.

Pour avoir des résultats optimaux, il faudrait que les deux relevés soient exactement au même endroit. Or, il est difficile de faire parfaitement le même relevé plusieurs fois. Les petites différences entre les élévations des profils peuvent avoir un impact considérable sur les petites ondes. En effet, les grandes longueurs d'onde détectable à la surface de la chaussée proviennent du sol d'infrastructure et se propagent sur un plus grand rayon que les petites longueurs d'onde. Ceci ferait en sorte que les grandes longueurs d'onde se ressembleraient dans une certaine zone, mais que les petites longueurs d'onde seraient différentes dans cette même zone. Bien qu'il y ait des tendances évidentes, il n'est pas possible de poser de conclusions claires quant à la problématique de gel.

### 5.1.2 Analyse longitudinale par rapport d'IRI

En faisant le rapport des IRI d'hiver sur ceux d'été, il est possible de voir l'impact de l'IRI d'hiver comparativement à celui d'été. Le rapport est présenté à l'Équation 9.

Équation 9 :

$$\frac{IRI_{hiver}}{IRI_{été}}$$

Donc, si le rapport est plus grand que 1, l'IRI d'hiver est plus élevé. Par contre, si le rapport se rapproche de 1, les deux valeurs d'IRI sont similaires. Pour les trois sites d'étude de l'évolution hivernale de l'uni, les rapports d'IRI aux 100 m de mars/juin représentant les ondes courtes (1 à 3 m) et les longues (8 à 12 m) ont été calculés en fonction de deux gammes de longueurs d'onde. La Figure 46, la Figure 47 et la Figure 48 montrent ces résultats. Les rectangles rouges représentent les zones gélives.

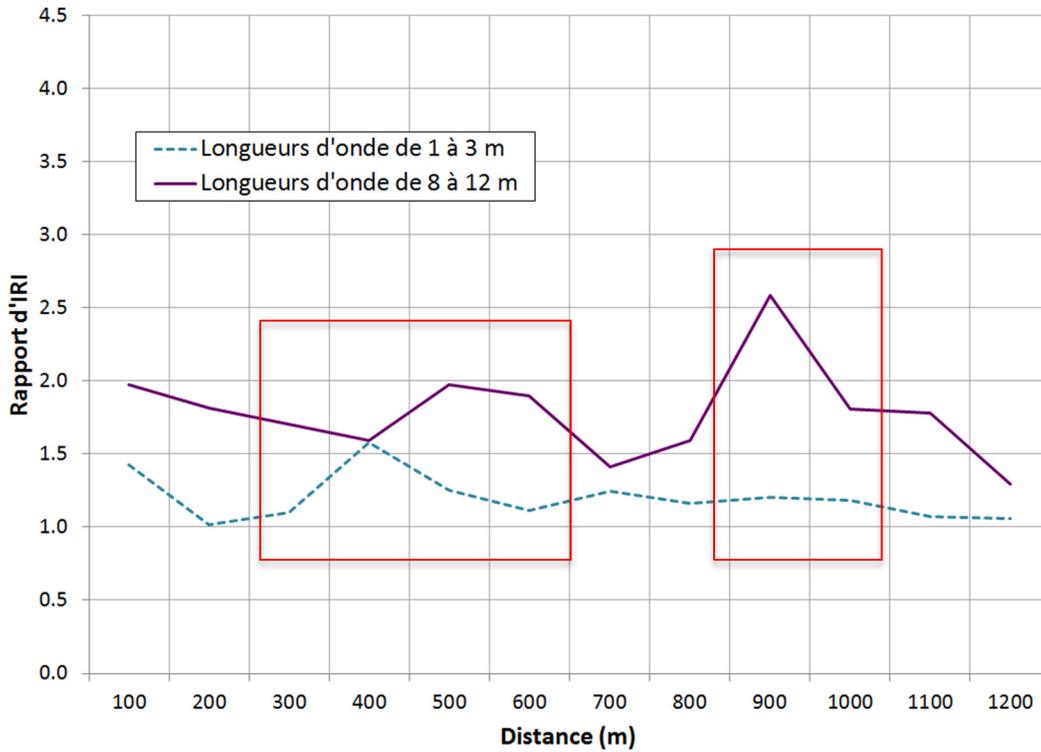


Figure 46 : Rapports d'IRI pour la section 369-1

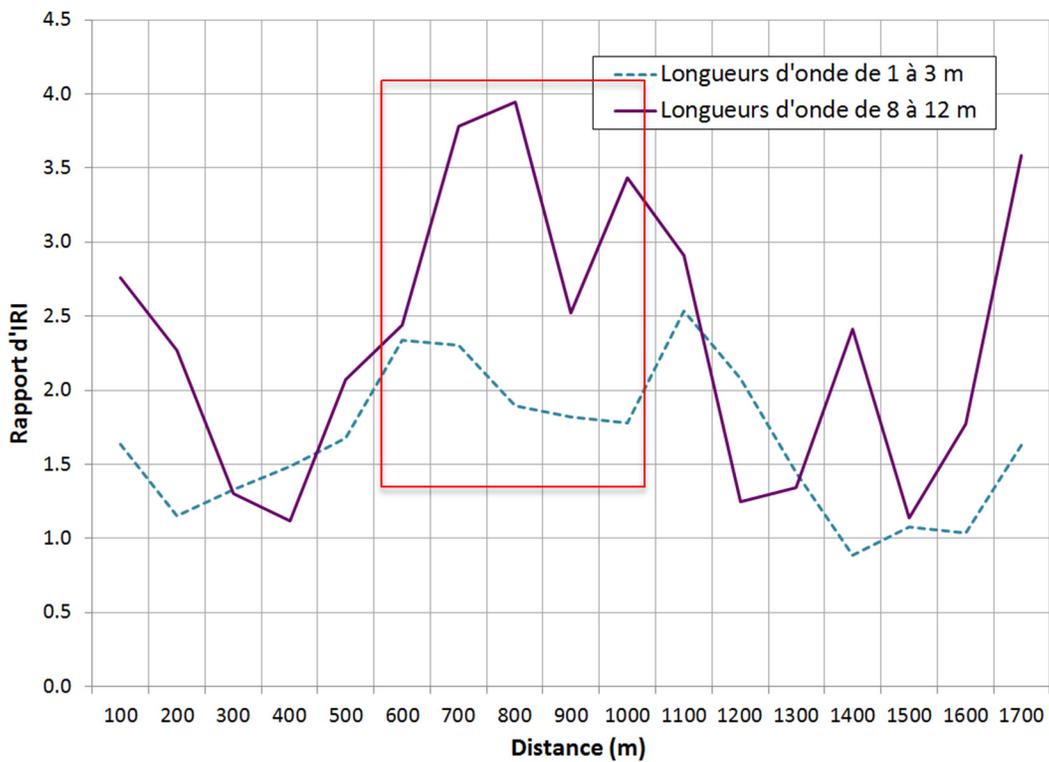


Figure 47 : Rapports d'IRI pour la section 369-2

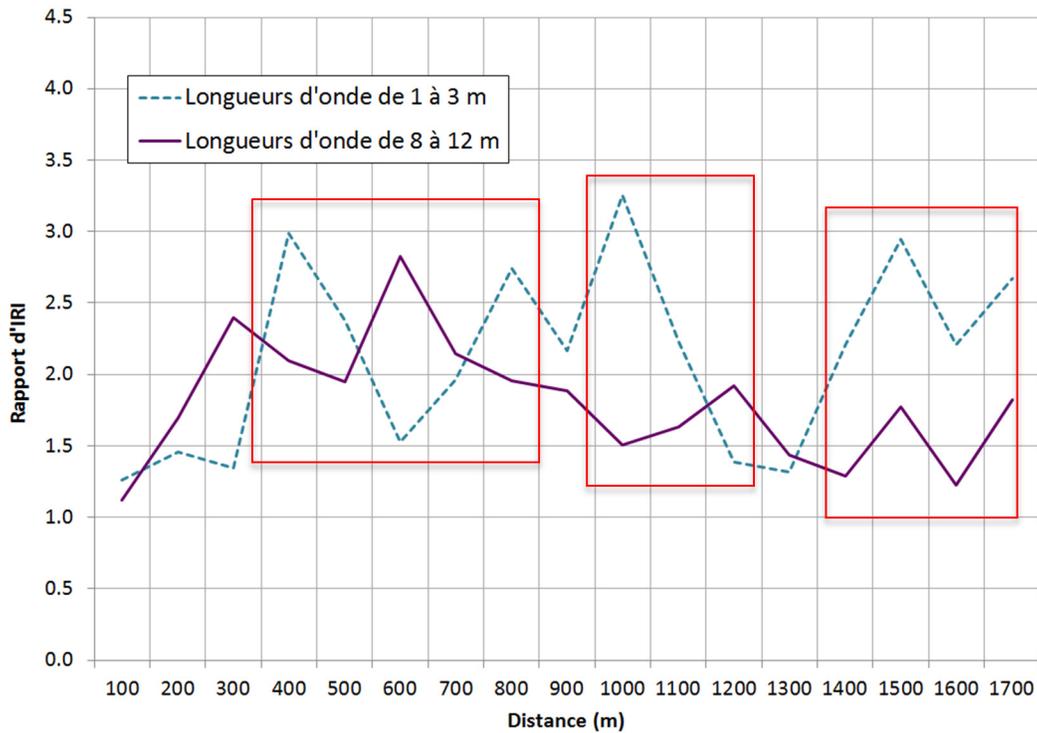


Figure 48 : Rapports d'IRI pour la section 367-1

À la Figure 46, il est possible de remarquer que les rapports d'IRI des profils filtrés entre 8 et 12 m (courbe mauve) sont supérieurs aux rapports d'IRI des ondes plus courtes (courbe pointillée bleue) sur toute la section. Des conclusions semblables sont observables à la Figure 47. Par contre, à la Figure 48, les résultats sont différents. Les rapports d'IRI des profils filtrés entre 1 et 3 m sont en majorité supérieurs aux rapports d'IRI des longueurs ondes plus longues. Ces résultats sont attendus, car les sections 369-1 et 369-2 représentées à la Figure 46 et à la Figure 47 ont des problématiques de soulèvements du sol d'infrastructure au gel, donc des problèmes liés aux ondes longues de 8 à 12 m, alors que la section 367-1 est affectée par des problèmes de soulèvement de fissures au gel, comme le laissent voir les résultats de la Figure 48.

### 5.1.3 Analyse longitudinale par différence d'IRI

La différence d'IRI entre l'hiver et l'été est la méthode qui représente le mieux l'effet de l'hiver sur la chaussée, car l'hiver est un facteur additif de dommage. Cette méthode est celle actuellement utilisée au MTQ. La différence d'IRI est présentée à l'Équation 10.

Équation 10 :

$$IRI_{hiver} - IRI_{été}$$

Si la différence entre l'IRI d'hiver et celui d'été est supérieure à 0 m/km, l'IRI d'hiver est supérieur, c'est-à-dire que le confort au roulement diminue durant l'hiver. Par contre, si la différence est inférieure à 0 m/km, l'IRI d'été est dominant. Pour les trois sites d'étude de l'évolution hivernale de l'uni, les différences d'IRI aux 100 m entre mars et juin représentant les ondes courtes (1 à 3 m) et les longues (8 à 12 m) ont été calculées après avoir filtrés les profils. La Figure 49, la Figure 50 et la Figure 51 montrent ces résultats. Les rectangles rouges représentent les zones gélives.

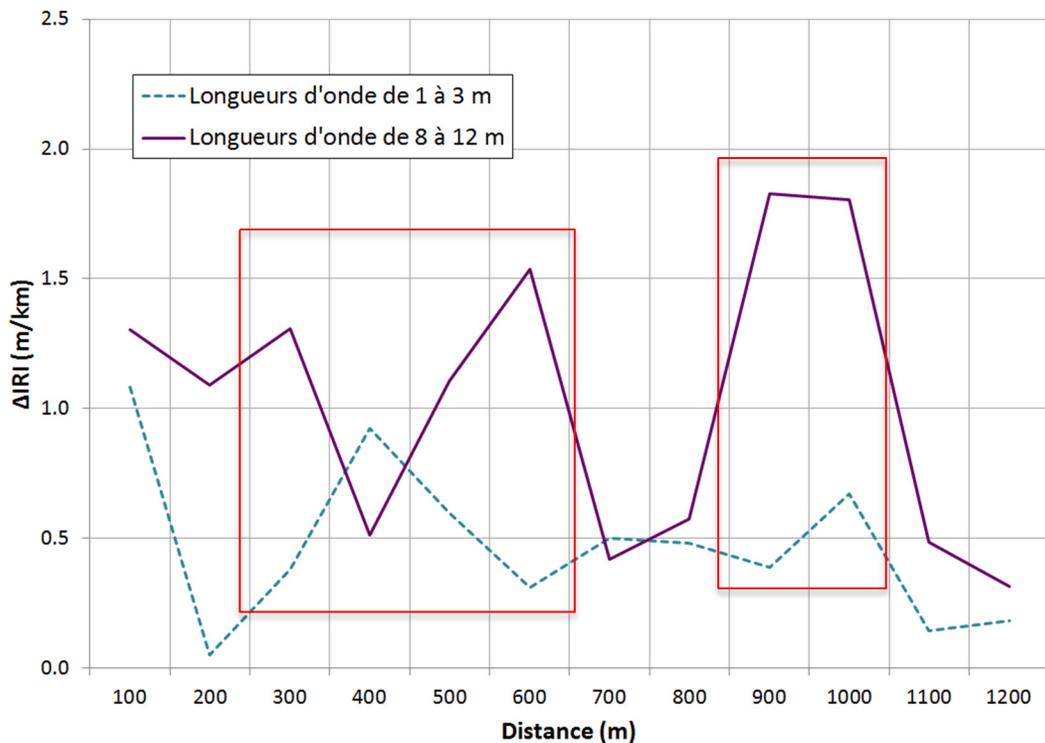


Figure 49 : Différences d'IRI pour la section 369-1

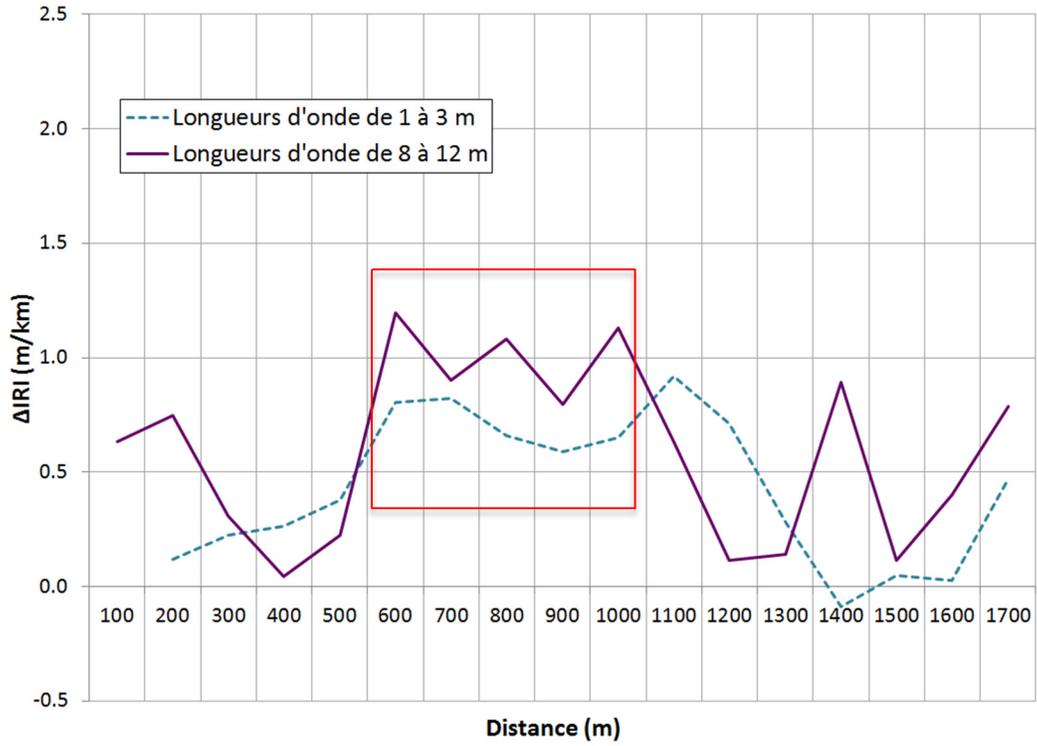


Figure 50 : Différences d'IRI pour la section 369-2

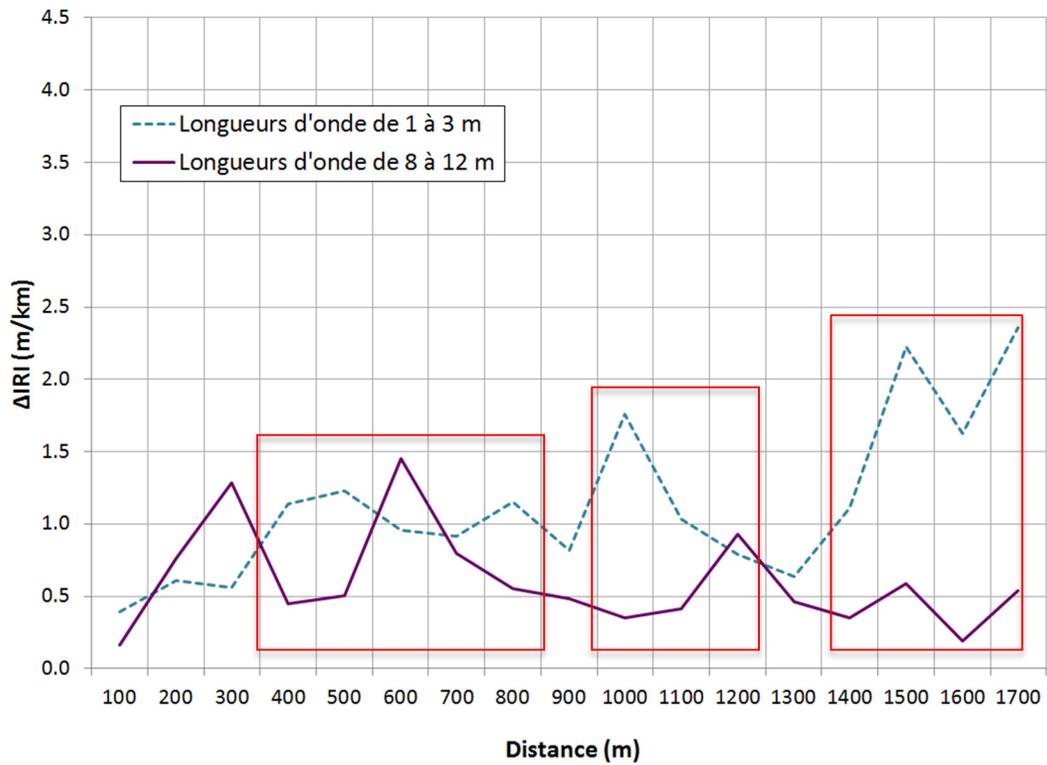


Figure 51 : Différences d'IRI pour la section 367-1

Les résultats des différences d'IRI sont semblables à ceux obtenus à l'analyse des rapports d'IRI. À la Figure 49 et à la Figure 50, les différences d'IRI des profils présentant les longueurs d'onde plus longues sont dominantes par rapport à celles des longueurs d'onde plus courtes. Ces résultats étaient attendus puisqu'aux sections 369-1 et 369-2, il y a des problématiques de soulèvement du sol d'infrastructure au gel, représentées par des longueurs d'onde entre 8 et 12 m. À la Figure 51, les différences d'IRI des profils filtrés entre 1 et 3 m sont supérieures aux différences des plus grandes longueurs d'onde. Cette conclusion était prévue puisqu'à cette section, il y a un problème de soulèvement de fissures au gel, donc d'ondes plus courtes.

#### 5.1.4 Méthode d'analyse longitudinale choisie

Après avoir analysé les trois méthodes, il faut déterminer laquelle est la plus adaptée pour répondre au but du projet qui consiste à discerner les deux problématiques de gel en contexte de gel saisonnier.

##### *Comparaison des méthodes d'analyse*

Pour comparer les différentes techniques d'analyse, l'IRI, le rapport d'IRI et la différence d'IRI pour chaque zone de gélivité (identifiée à la section 4.2) ont été mis en tableau. Le Tableau 7, le Tableau 8 et le Tableau 9 présentent ces résultats. Pour une analyse plus en profondeur, les résultats des 100 m gélifs des trois sections à l'étude sont présentés au Tableau 11, au Tableau 12 et au Tableau 13 à l'annexe 1. Les résultats en gras dans les tableaux mettent en évidence la gamme de longueurs d'onde dominante lors de l'analyse.

**Tableau 7 : Résultats des différentes analyses de l'IRI pour la section 369-1 par zone de gélivité**

	$\Delta$ IRI (m/km)	Moyenne des résultats par zone de gélivité					
		Différence de profil (m/km)		Rapport d'IRI		Différence d'IRI (m/km)	
<b>Zone de gélivité/ Longueurs d'onde</b>		1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m
<b>Zone 1 (300 à 600 m)</b>	1,99	<b>3,79</b>	2,28	1,26	<b>1,79</b>	0,55	<b>1,12</b>
<b>Zone 2 (900 à 1000 m)</b>	3,69	<b>4,72</b>	4,12	1,19	<b>2,20</b>	0,53	<b>1,82</b>

Tableau 8 : Résultats des différentes analyses de l'IRI pour la section 369-2 par zone de gélivité

	$\Delta$ IRI (m/km)	Moyenne des résultats par zone de gélivité					
		Différence de profil (m/km)		Rapport d'IRI		Différence d'IRI (m/km)	
Zone de gélivité/ Longueurs d'onde		1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m
<b>Zone 1 (600 à 1000 m)</b>	1,73	<b>1,69</b>	1,42	2,03	<b>3,23</b>	0,7	<b>1,02</b>

Tableau 9 : Résultats des différentes analyses de l'IRI pour la section 367-1 par zone de gélivité

	$\Delta$ IRI (m/km)	Moyenne des résultats par zone de gélivité					
		Différence de profil (m/km)		Rapport d'IRI		Différence d'IRI (m/km)	
Zone de gélivité/ Longueurs d'onde		1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m
<b>Zone 1 (400 à 800 m)</b>	2,05	<b>2,51</b>	1,28	<b>2,32</b>	2,19	<b>1,08</b>	0,75
<b>Zone 2 (1000 à 1200 m)</b>	1,81	<b>2,82</b>	1,40	<b>2,29</b>	1,69	<b>1,20</b>	0,56
<b>Zone 3 (1400 à 1700 m)</b>	2,56	<b>3,43</b>	1,31	<b>2,51</b>	1,53	<b>1,83</b>	0,42

En se référant à la première méthode d'analyse, celle par différence de profils, il est possible de constater que les longueurs d'onde entre 1 et 3 m dominant, peu importe les sites d'essais. Cette méthode est donc éliminée, puisqu'il n'y a pas de dominance des longueurs d'onde correspondantes aux problématiques de chaque site. Par contre, il est plus difficile de faire un choix entre les deux autres méthodes proposées. En effet, les valeurs en gras dans les tableaux représentent bien les problématiques des sites d'étude. Les plus grandes longueurs d'onde sont dominantes pour les sites 369-1 et 369-2, tandis que ce sont les petites longueurs d'onde qui dominent au site 367-1.

Pour deux raisons simples, la méthode de différence d'IRI est choisie. Premièrement, dans la pratique, le  $\Delta$ IRI est déjà utilisé pour déterminer si une section de chaussée est gélive ou non gélive (se référer à la section 2.4 l'État des connaissances). Deuxièmement, théoriquement parlant, pour deux valeurs de  $\Delta$ IRI identiques, si les IRI sont faibles, le rapport sera élevé tandis que si les IRI sont élevés, le rapport sera plus faible. Il faut comprendre que les problèmes de soulèvement au gel sont un facteur additif au dommage de la chaussée et ne sont pas proportionnels à l'IRI. Le rapport d'IRI est donc moins adapté pour représenter et quantifier les problèmes de gel sur les chaussées.

### *Création d'un outil d'analyse en profilométrie*

À l'aide des résultats obtenus par différence d'IRI des trois sites d'étude hivernale de l'uni où les problématiques de gel étaient connues, un outil d'aide à la décision en profilométrie est proposé.

La première étape est de déterminer à l'aide du  $\Delta$ IRI si la chaussée montre une problématique de gel. Par la suite, les profils d'été et d'hiver sont filtrés selon les deux gammes de longueurs d'onde respectant les deux problématiques de gel recherchées, soit des longueurs d'onde entre 1 et 3 m, puis des longueurs d'onde entre 8 et 12 m. Pour comparer les différences d'IRI équitablement, un rapport adimensionnel est calculé pour les deux filtres de longueurs d'onde utilisés. Ce rapport est présenté à l'Équation 11.

**Équation 11 :**

$$\frac{(IRI_{hiver} - IRI_{été})_{filtré}}{(IRI_{hiver} - IRI_{été})_{total}}$$

Les différents rapports calculés pour chaque section de chaussée de 100 m ont été placés dans un graphique mettant en relation le rapport des plus grandes longueurs d'onde (problématiques de soulèvement du sol d'infrastructure) en fonction du rapport des plus petites longueurs d'onde (problématiques de soulèvement de fissures). La tendance observée permet de différencier les problématiques de gel sous forme d'abaque, tel que présenté à la Figure 52. Dans la partie en bleu, le rapport des ondes courtes est dominant par rapport à celui des ondes longues, ce qui signifie qu'il y a dominance de soulèvement de fissures au gel. Par contre, dans la partie en vert, le rapport des ondes longues est dominant, donc il y a un soulèvement au gel du sol d'infrastructure qui influence significativement la détérioration de l'uni en période hivernale.

Il est alors possible, à l'aide de cet outil, de déterminer la problématique de gel. La Figure 53 montre la marche à suivre pour utiliser l'abaque. La première étape est de vérifier si la section est gélive en calculant les  $\Delta$ IRI aux 100 m. Par la suite, après avoir sélectionné les sections gélives, il faut filtrer les profils d'été et d'hiver selon les deux gammes de longueurs d'onde représentant respectivement chaque problématique de gel. Ensuite, le  $\Delta$ IRI aux 100 m de ces profils filtrés peut être calculé. Finalement, les rapports sont calculés puis placés dans l'abaque de la Figure 52.

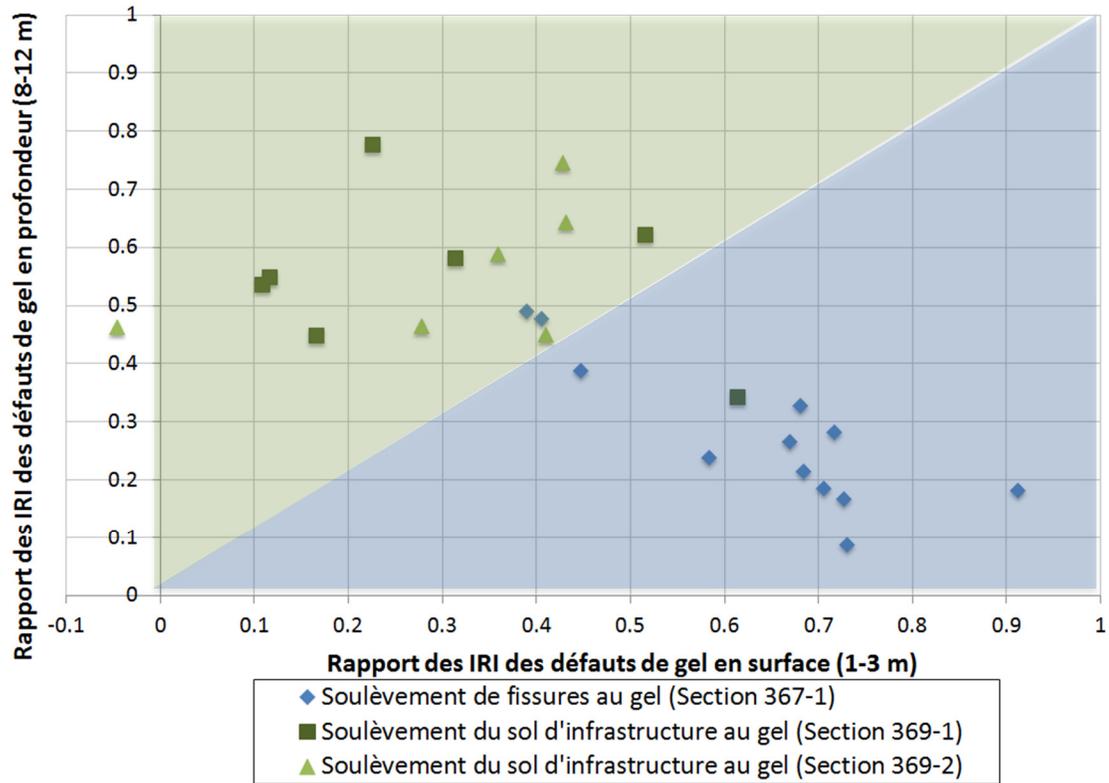


Figure 52 : Abaque pour déterminer la problématique de gel sur une chaussée gélive aux 100 m

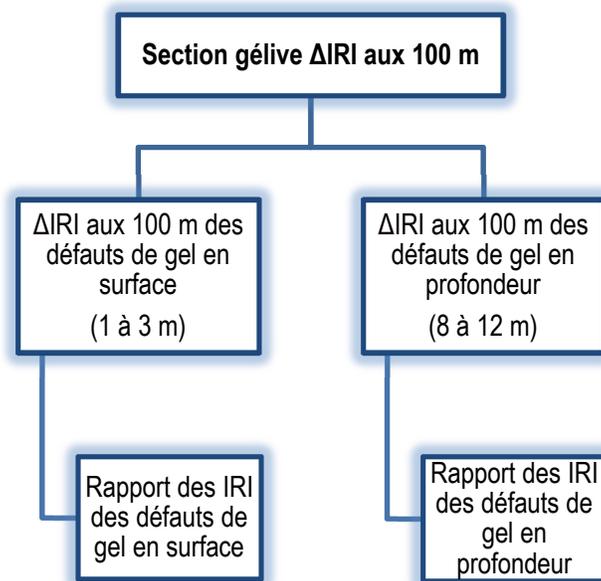


Figure 53 : Schéma des étapes à suivre pour l'utilisation de l'abaque

### 5.1.5 Utilisation de l'abaque

En guise d'exemple, une section de chaussée de la municipalité du Lac-Supérieur sera analysée étape par étape en suivant l'outil créé. Les profils recueillis proviennent d'une étude de cas du Ministère des Transports du Québec (Brillant, 2015). Des profils ont été mesurés sur le Chemin du Lac-Supérieur en septembre 2013 et mars 2014.

#### *Étape 1 : Déterminer les sections de 100 m gélives*

La première étape est de calculer le  $\Delta IRI$  aux 100 m, soit la différence entre l'IRI mesuré en mars et celui mesuré en septembre. Par la suite, cibler les sections de 100 m excédant la valeur seuil présentée au Tableau 2. La Figure 54 présente les résultats de cette première étape.

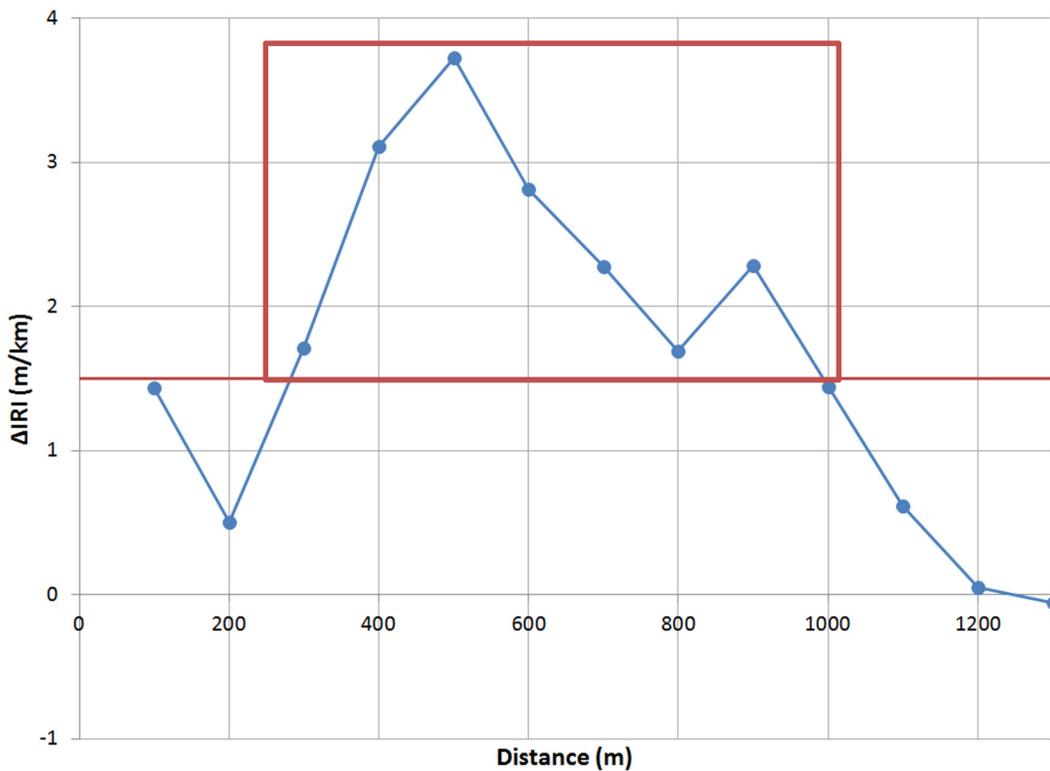


Figure 54 :  $\Delta IRI$  aux 100 m du Chemin du Lac-Supérieur

**Étape 2 : Filtrer les profils et calculer les  $\Delta IRI$  filtrés**

La deuxième étape est de filtrer les profils pour faire ressortir les problématiques recherchées. Un filtre entre 1 et 3 m représentant les problématiques de gel en surface de la chaussée ainsi qu'un filtre entre 8 et 12 m représentant des problématiques de gel en profondeur dans la chaussée sont utilisés. La Figure 55 montre la différence des IRI entre l'hiver et l'été des profils filtrés.

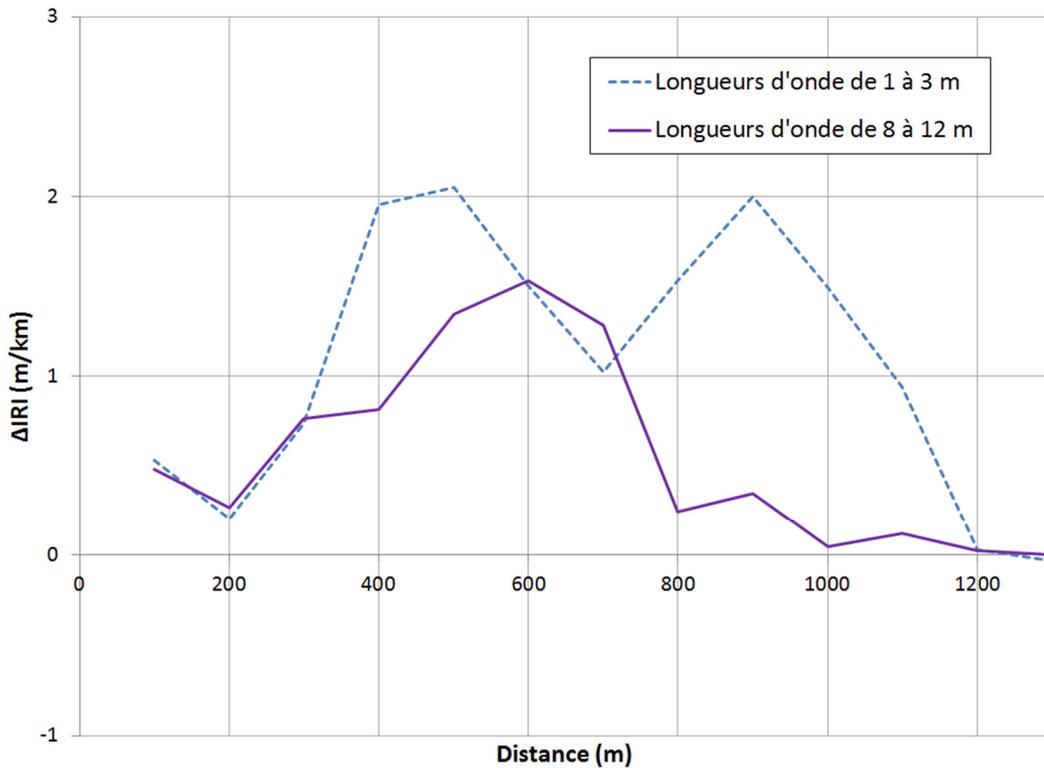


Figure 55 :  $\Delta IRI$  filtré aux 100 m du Chemin du Lac-Supérieur

### Étape 3 : Calculer les rapports d'IRI

La troisième étape est de calculer les rapports d'IRI des sections gélives à l'aide de l'Équation 11 aux 100 m. Par la suite, il faut intégrer les rapports calculés à l'abaque présenté à la Figure 52. La Figure 56 montre les rapports d'IRI placés dans l'abaque pour déterminer la problématique de gel.

Le graphique permet de conclure que la problématique de gel est majoritairement associée au comportement de la partie supérieure de la chaussée, soit une problématique de soulèvement de fissure au gel. Par contre, certains points se retrouvent sur la limite de la séparation des deux problématiques. Pour ces trois sections de 100 m, il serait pertinent de faire des vérifications supplémentaires telles que des vérifications visuelles pour valider la problématique déterminée avec l'abaque. Par exemple, si aucune fissure n'est visible sur la chaussée, le problème provient probablement du sol d'infrastructure.

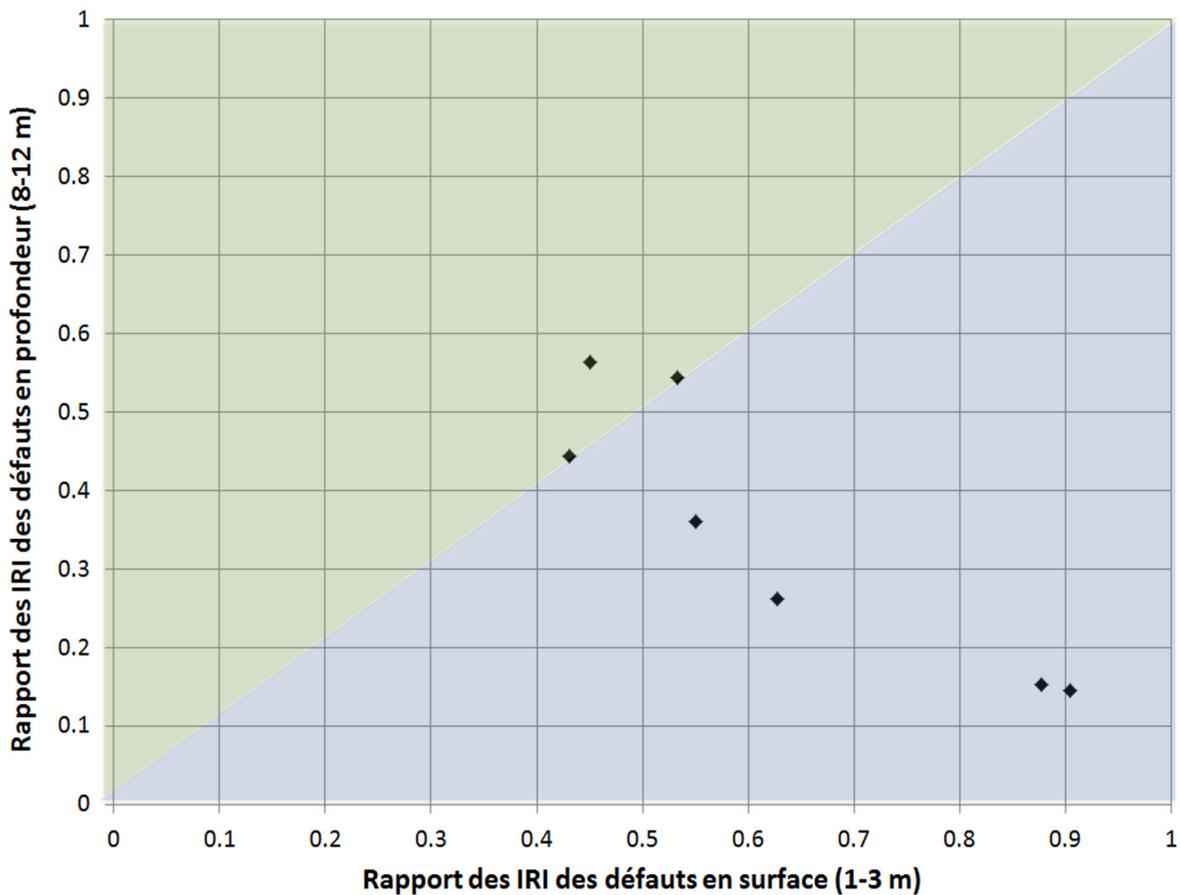


Figure 56 : Rapports d'IRI aux 100 m du Chemin du Lac-Supérieur

Certaines problématiques, telles que le soulèvement différentiel transversal ou le soulèvement de blocs, ne sont pas détectables avec cet abaque. En effet, ces problématiques ne se manifestent pas sur le plan longitudinal. C'est pour cette raison que la confirmation avec vérification visuelle est toujours recommandée pour valider la solution déterminée à l'aide de l'abaque.

Bien que seulement des 100 m gélifs sont utilisés dans l'abaque, il serait possible de l'utiliser avec des  $\Delta$ IRI plus faible pour pouvoir déceler des problématiques potentielles. De plus, pour avoir une vue d'ensemble, par exemple des relevés de niveau « réseau », il serait possible de prendre des sections de plus de 100 m. À l'inverse, pour une analyse de niveau « projet », des sections de 10 m pourraient être utilisées dans l'abaque.

## **5.2 Analyse de profils transversaux**

Bien que le  $\Delta$ IRI soit couramment utilisée en ingénierie des chaussées au Québec comme critère de gélivité, cette technique n'est pas infaillible. En effet, un IRI élevé mesuré dans le sens longitudinal de la chaussée démontre qu'il y a une problématique différentielle parallèle à la route. Par contre, si la problématique de gel dominante est transversale à la chaussée, il n'y aura pas nécessairement d'impact sur l'IRI puisqu'il est possible qu'il y ait peu de différentiel longitudinal. Par exemple, il est possible de constater des problématiques transversales lorsque les chaussées sont étroites ou il y a accumulation de neige sur les accotements. Il peut donc être envisagé d'utiliser une méthode qui permet de mesurer des profils transversaux au gel maximal et à l'été. Les lasers utilisés par le LCMS, couplés à l'utilisation d'accéléromètres, permettent, entre autres, de représenter un profil transversal. L'usage de cette nouvelle technologie pourrait s'ajouter à l'abaque déjà créé comme critère de décision de gélivité d'une chaussée pour créer un outil encore plus puissant.

Comme ce type d'analyse n'a jamais été considéré auparavant, plusieurs essais ont été faits pour pouvoir développer une méthode efficace. Bien qu'aucun outil n'ait été créé suite à cette recherche, plusieurs tendances ont été identifiées. Des profils transversaux ont été mesurés au gel maximal et à l'été sur les trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier. Par la suite, une méthode a été élaborée pour quantifier la comparaison de profils transversaux entre l'hiver et l'été. Puis, plusieurs comparaisons ont été faites pour apprécier la méthode établie.

### **5.2.1 Élaboration d'une méthode d'analyse par profils transversaux**

À l'aide du LCMS, des profils transversaux d'été et d'hiver au gel maximal ont été captés. À titre d'exemple, deux profils provenant de la section expérimentale du Lac-Delage sont présentés à la Figure 57, où la gauche représente le centre de la route et la droite l'accotement. Il est important de comprendre que le LCMS ne calcule pas d'élévation, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de connaître le soulèvement total causé par le gel durant l'hiver. Par contre, en rattachant les extrémités des deux profils vis-à-vis l'accotement par translation, il

est possible de prendre en considération seulement le soulèvement différentiel transversal. En effet, si un soulèvement est uniforme sur la chaussée, la sécurité des usagers de la route ne sera pas en danger et le soulèvement ne devrait pas endommager la chaussée. En revanche, si le soulèvement est irrégulier, que ce soit transversalement ou longitudinalement, la sécurité des usagers peut être compromise et les soulèvements différentiels peuvent entraîner la détérioration de l'uni et la fissuration de la chaussée. À la Figure 57, plus les courbes sont éloignées l'une de l'autre, plus le soulèvement différentiel transversal est important.

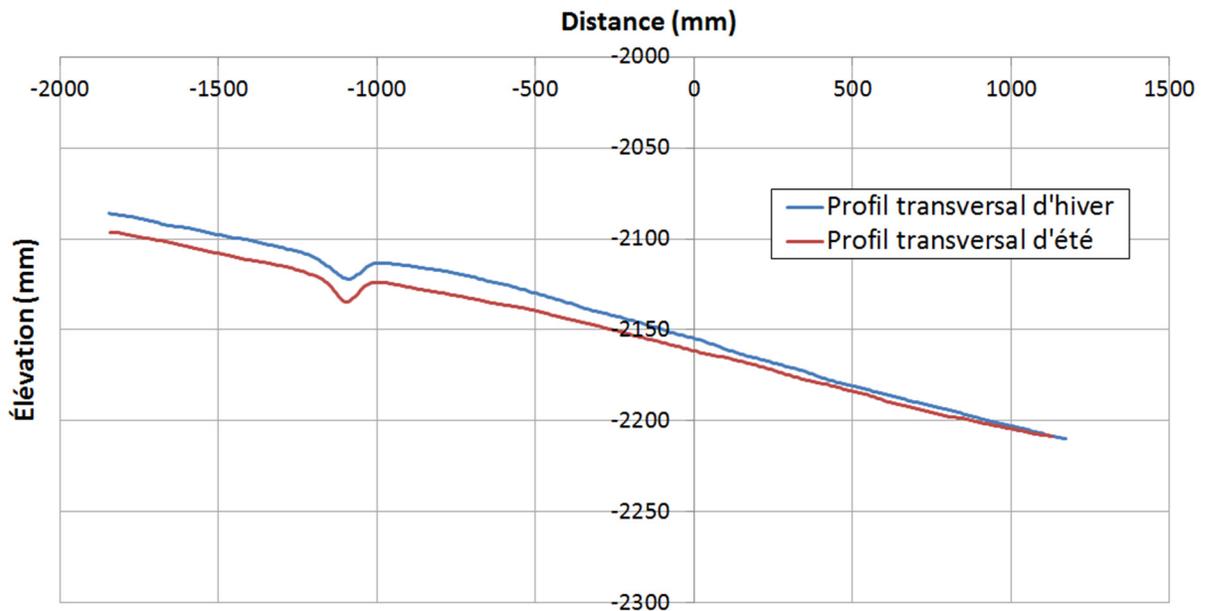


Figure 57 : Profils transversaux d'été et d'hiver d'une voie

Pour quantifier le soulèvement différentiel transversal, un indice statistique est utilisé. Cet indice est l'erreur quadratique moyenne (RMSE), utilisé pour comparer des données, notamment pour déterminer si l'une des données d'un groupe est biaisée. Dans ce cas-ci, il représente la différence entre deux courbes. La formule est montrée à l'Équation 12. Plus le chiffre est grand, plus les courbes sont éloignées. Plus le chiffre est petit, plus les courbes sont rapprochées. Dans le cadre de ce projet, le terme ISDT (indice de soulèvement différentiel transversal) est utilisé pour représenter ce chiffre.

Équation 12 :

$$\text{Erreur quadratique moyenne} = \text{RMSE} = \text{ISDT} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_{2i})^2}$$

Où n est le nombre de points transversaux;

$y_1$  est l'élévation d'hiver;

$y_2$  est l'élévation d'été.

Pour démontrer l'applicabilité de cet indice, deux sections de 10 m ayant deux niveaux de sévérité de gel, soit aucun signe de gélivité et des signes de gélivité majeure, ont été analysées. Des sections de 10 m sont utilisées puisque le LCMS reproduit et analyse des images aux 10 m. Dans le cadre de ce projet, un ISDT est calculé à tous les mètres de chaussée pour bien constater les variations de l'indice. Pour contrer les variabilités des mesures aux mètres, des valeurs moyennes d'ISDT aux 10 m seront préconisées pour avoir une meilleure vue d'ensemble de la problématique. À titre d'exemple, la Figure 59 et la Figure 61 montrent les ISDT aux mètres de l'analyse de deux sections de chaussée des sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier. La Figure 58 représente un 10 m de chaussée ne montrant aucune problématique de gélivité à la section de Stoneham et la Figure 59 montre les résultats des ISDT pour cette section. La Figure 60, quant à elle, montre une chaussée avec une sévérité de gélivité majeure à la section du Lac-Delage et la Figure 61 représente les résultats des ISDT pour cette section. En observant les deux graphiques, il est possible de constater que les ISDT sont supérieurs à la Figure 61 comparativement à la Figure 59. Les moyennes des ISDT sont de 3,5 mm pour la section sans gélivité, puis de 7,2 mm pour la section avec gélivité majeure.



Figure 58 : Section de 10 m à Stoneham ne présentant aucun signe de gélivité

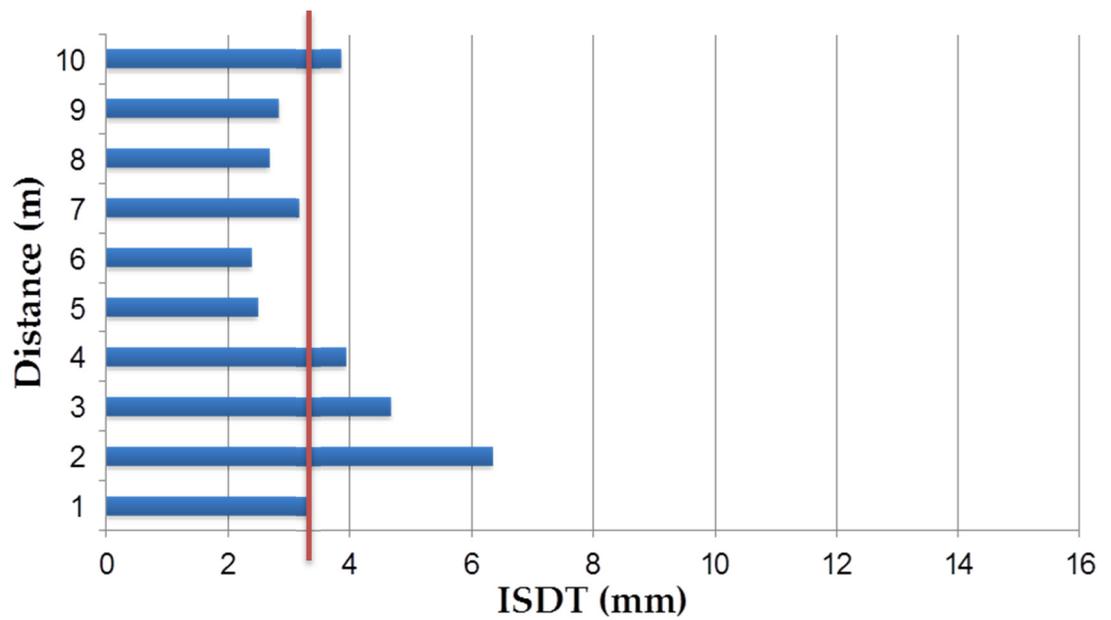


Figure 59 : ISDT aux mètres pour une section de 10 m à Stoneham ne présentant aucun signe de gélivité



Figure 60 : Section de 10 m au Lac-Delage présentant des signes de gélivité majeure

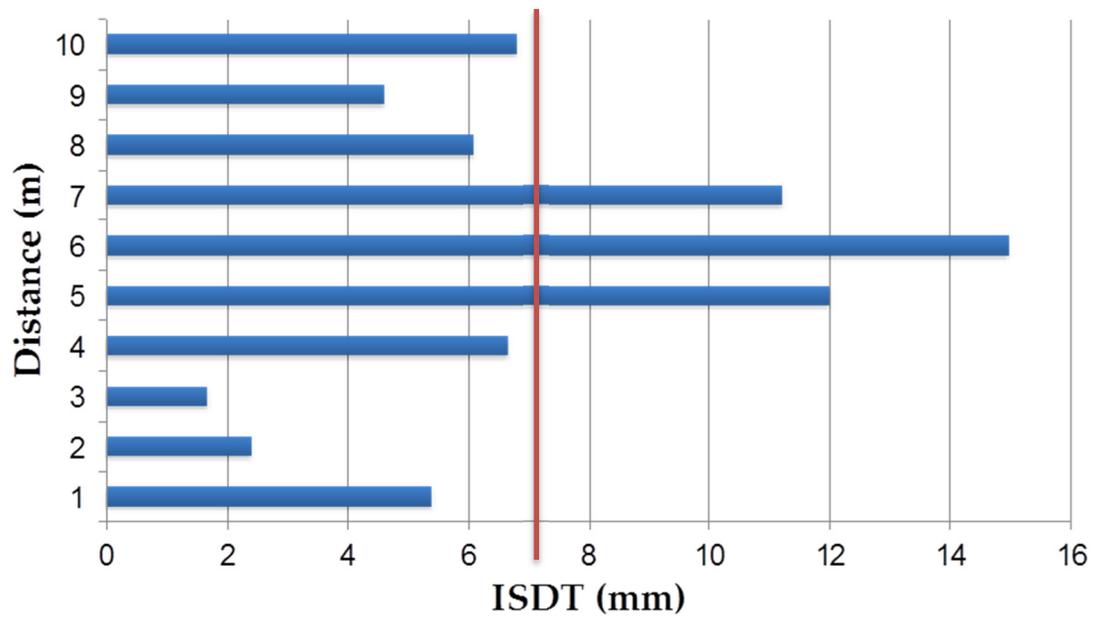


Figure 61 : ISDT aux mètres pour une section de 10 m au Lac-Delage présentant des signes de gélivité majeure

### 5.2.2 Comparaison de la méthode

Dans le cadre de ce projet, 36 sections de 10 m provenant des trois sites expérimentaux de la MRC de la Jacques-Cartier ont été considérées. Des ISDT ont été calculés à tous les mètres, c'est-à-dire 360 ISDT, pour ensuite dénombrer 36 valeurs moyennes avec chacun leur écart type décrivant la variabilité des 10 ISDT utilisés pour créer les moyennes. Pour apprécier l'efficacité de la méthode, plusieurs comparaisons ont été faites. Toutes les comparaisons sont représentées sous forme de graphique pour voir la relation entre les éléments. Dans un premier temps, les ISDT sont comparés avec les IRI et les  $\Delta$ IRI des sites expérimentaux. Par la suite, les ISDT et les  $\Delta$ IRI, puisqu'ils sont aussi utilisés pour déterminer la gélivité d'un secteur, sont comparés aux soulèvements mesurés, aux taux de fissuration et à l'aspect visuel de gélivité.

#### *IRI et $\Delta$ IRI*

La comparaison entre les IRI et les ISDT permet non seulement de vérifier la méthode d'analyse par profils transversaux, mais elle permet aussi de connaître la condition globale de la chaussée. La Figure 62 montre les résultats des valeurs d'ISDT en fonction de celles d'IRI d'été aux 10 m. Il est possible de remarquer que les trois sites expérimentaux ont des IRI bien différents. En effet, les points rouges, correspondant au site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, ont un grand éventail de valeurs d'IRI, soit entre 1,4 et 7,5 m/km. Ce site expérimental est en effet très dégradé, ce qui est confirmé par les valeurs d'IRI. Les points verts, représentant le site de Lac-Delage, possèdent des valeurs d'IRI un peu plus faibles soit entre 1,2 et 4,1 m/km. Bien que quelques fissures de gel majeures soient présentes sur la chaussée, il n'y a pas d'autres signes de dégradations qui influencent le confort au roulement et la condition globale de la chaussée. Enfin, les points bleus, correspondant au site de Stoneham où la chaussée a peu de dégradations de surface, possèdent des valeurs faibles d'IRI, soit entre 1,3 et 2,6 m/km.

L'aspect le plus évident du graphique de la Figure 62 est l'augmentation de l'ISDT avec l'augmentation de l'IRI. Il est indéniable que plus la chaussée démontre des problématiques de gel, plus sa condition de surface risque d'être détériorée, donc plus l'IRI sera élevé. Par contre, il faut garder en tête que l'augmentation de l'IRI n'est pas seulement due aux dégradations relatives au gel, mais peut, par exemple, provenir de problématiques liées à la mise en œuvre de la route ou à l'action des charges lourdes.

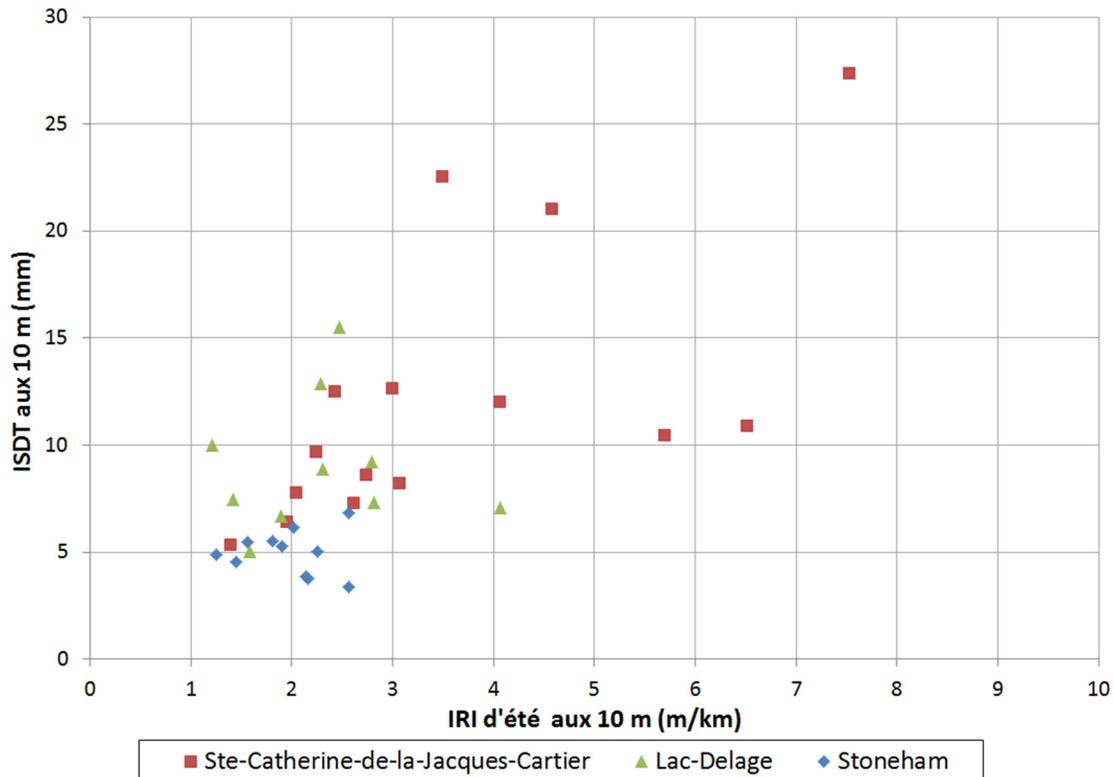


Figure 62 : ISDT en fonction de l'IRI d'été aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

Dans cette optique, la Figure 63 montre la relation entre l'ISDT et le  $\Delta$ IRI. Théoriquement, plus la section est gélive, plus son  $\Delta$ IRI et son ISDT aux 10 m seront élevés. Par contre, cette tendance n'est pas apparente. Les points semblent dispersés dans le graphique. En effet, plusieurs  $\Delta$ IRI sont négatifs bien que plusieurs indices de gélivité étaient présents sur la chaussée, ce qui prouve que seule la détection de la gélivité d'une chaussée à l'aide du  $\Delta$ IRI n'est pas recommandée. Par contre, il est possible que la chaussée soit plus abimée l'été que l'hiver et que le soulèvement au gel vienne «corriger» le profil de la chaussée en améliorant ainsi l'IRI. Les points rouges, représentant la section de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, sont les plus disparates, malgré le fait que la section de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier présente de nombreux signes de gélivité sévère. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que le  $\Delta$ IRI est calculé en fonction d'un différentiel longitudinal d'une chaussée entre l'été et l'hiver, tandis que l'ISDT prend en considération le différentiel transversal entre ces deux saisons. Comme ce site expérimental a de petits accotements remplis de neige en hiver, il est fort probable que la problématique de gélivité soit associée à du soulèvement transversal. Pour ce qui est des deux autres sites d'études, ceux du Lac-Delage et de Stoneham, représentés par les points verts et bleus, il est possible de percevoir une légère tendance. La correspondance entre l'ISDT et le  $\Delta$ IRI pourrait s'expliquer par une réponse de la chaussée à l'action du gel autant longitudinale que transversale. De plus, ces deux sites étaient beaucoup moins affectés par les effets du gel que la section de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, il est d'ailleurs possible de le remarquer par leurs plus faibles valeurs d'ISDT.

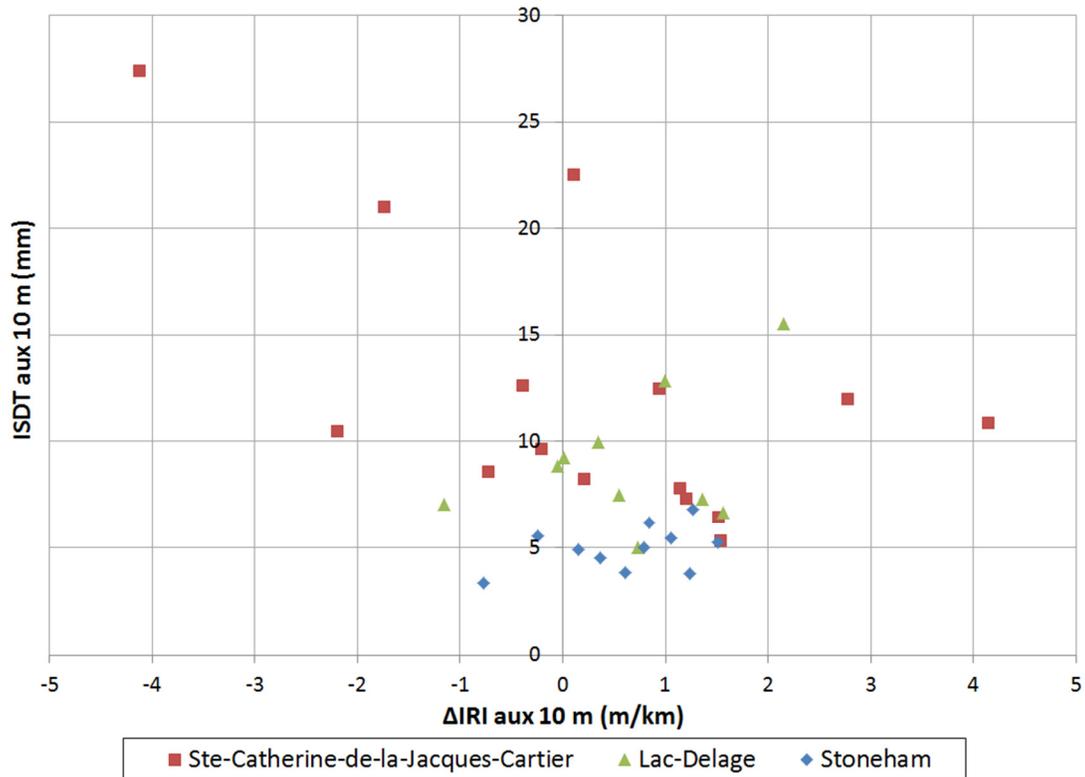


Figure 63 : ISDT en fonction du  $\Delta IRI$  aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

### Soulèvement au gel

Le soulèvement au gel est une autre manière de déterminer s'il y a une problématique reliée au gel sur la chaussée. Le Tableau 1 présente les seuils admissibles de soulèvement au gel lors d'une conception de chaussée. Pour les trois sites expérimentaux de la MRC de la Jacques-Cartier, le seuil admissible est de 60 mm puisque ce sont des routes régionales ou collectrices. Des élévations ont été mesurées lors de relevés d'arpentage l'hiver et l'été pour ainsi déterminer un soulèvement au gel pour plusieurs sections des sites expérimentaux. La comparaison entre les valeurs d'ISDT mesurées aux 10 m avec le soulèvement au gel permet de vérifier la méthode développée. Aussi, l'annexe 2 présente la même comparaison avec le  $\Delta IRI$ , à la Figure 85.

La Figure 64 présente 20 comparaisons de mesures de soulèvement en fonction des ISDT. Les marques rouges, correspondant au site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, possèdent des soulèvements bien supérieurs au seuil admissible de 60 mm, soit entre 115 mm et 155 mm. D'ailleurs, il est possible de remarquer que les valeurs d'ISDT sont aussi très élevées, allant jusqu'à 27,4 mm. Pour le secteur du Lac-Delage (points verts) les soulèvements ne dépassent pas le seuil admissible. La moyenne de soulèvement est

de 37,4 mm, ce qui pourrait laisser présager un problème de gélivité moyen. Les valeurs d'ISDT de cette section se situent entre 5 mm et 9 mm. Finalement, les points bleus de la section de Stoneham montrent des soulèvements au gel assez faibles d'une moyenne de 15,2 mm. Les ISDT vont dans le même sens avec une moyenne faible d'ISDT de 5,1 mm. Déjà, des catégories de niveaux de gélivité pourraient être imaginées à l'aide des ISDT. Par exemple, un 10 m de chaussée sans problématique de gel pourrait avoir un ISDT entre 0 et 5 mm. Par la suite, une chaussée avec des problématiques faibles à moyennes aurait un ISDT entre 5 mm et 10 mm. Puis, un ISDT de 10 mm et plus pourrait représenter une chaussée avec gélivité majeure.

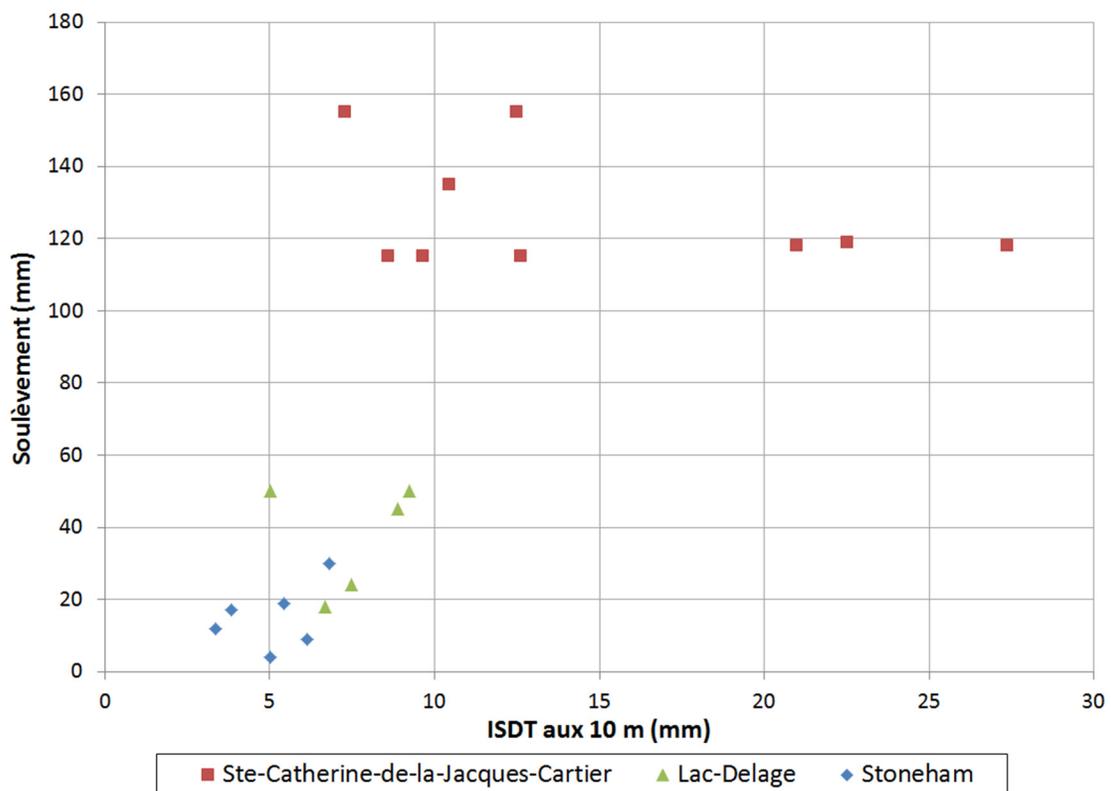


Figure 64 : Soulèvement en fonction de l'ISDT aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

### *Taux de fissuration*

Le taux de fissuration est une des manières de déterminer la condition de la chaussée. De plus, plusieurs fissures longitudinales sont associées aux conséquences du soulèvement au gel. Pour un segment de 10 m, le taux de fissuration est calculé ici en divisant les fissures longitudinales [m] par la superficie de la chaussée auscultée [m<sup>2</sup>]. Par la suite, le taux de fissuration est pondéré pour prendre en considération la sévérité des fissures. Par exemple, pour un même taux de fissuration, il se peut qu'il y ait beaucoup de fissures longitudinales faibles ou quelques fissures majeures. Une pondération différente est donc donnée à chaque niveau de sévérité différent. Dans le cadre de ce projet, les fissures sont relevées à l'aide du LCMS. La comparaison du taux de fissuration pondéré avec l'ISDT serait un moyen de confirmer la méthode élaborée. L'annexe 2 présente, à la Figure 86, la relation entre le taux de fissuration pondéré et le  $\Delta$ IRI.

La Figure 65 présente la relation entre le taux de fissuration longitudinale pondéré et l'ISDT aux 10 m pour les trois sites expérimentaux de la MRC de la Jacques-Cartier. Le site de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, désigné par des points rouges, présente en moyenne des taux de fissuration longitudinale supérieurs aux autres points du graphique. Par contre, 4 points rouges se démarquent par leur taux de fissuration faible. Ces points sont situés au début de la section où la chaussée montre peu de signes de gélivité. Aucun soulèvement n'avait été évalué à cet endroit. Les autres points rouges définissent des 10 m avec des problématiques de gel importantes. Les résultats du graphique montrent que plus le taux de fissuration longitudinale est élevé, plus l'ISDT est élevé. En ce qui concerne les points verts, correspondant au site du Lac-Delage, la tendance est plus subtile. Pour ce site expérimental, peu de fissures longitudinales étaient présentes, en revanche, les fissures mesurées étaient majeures. De ce fait, il serait donc possible que le taux de fissuration longitudinale soit faible avec une fissure de sévérité majeure et un ISDT élevé. Finalement, le site de Stoneham (points bleus) montre des résultats homogènes sur toute sa section d'étude. La moyenne du taux de fissuration longitudinale est de 0,18 m/m<sup>2</sup> et celle de l'ISDT est de 4,96 mm.

Les catégories de niveaux de gélivité présentées à la section précédente (Soulèvement au gel) représenteraient bien les cas reliés au taux de fissuration longitudinale présenté à la Figure 65. En effet, un 10 m de chaussée sans problématique de gel pourrait avoir un ISDT entre 0 et 5 mm, une chaussée avec des problématiques faibles à moyennes aurait un ISDT entre 5 mm et 10 mm et un ISDT de 10 mm et plus pourrait représenter une chaussée avec gélivité majeure.

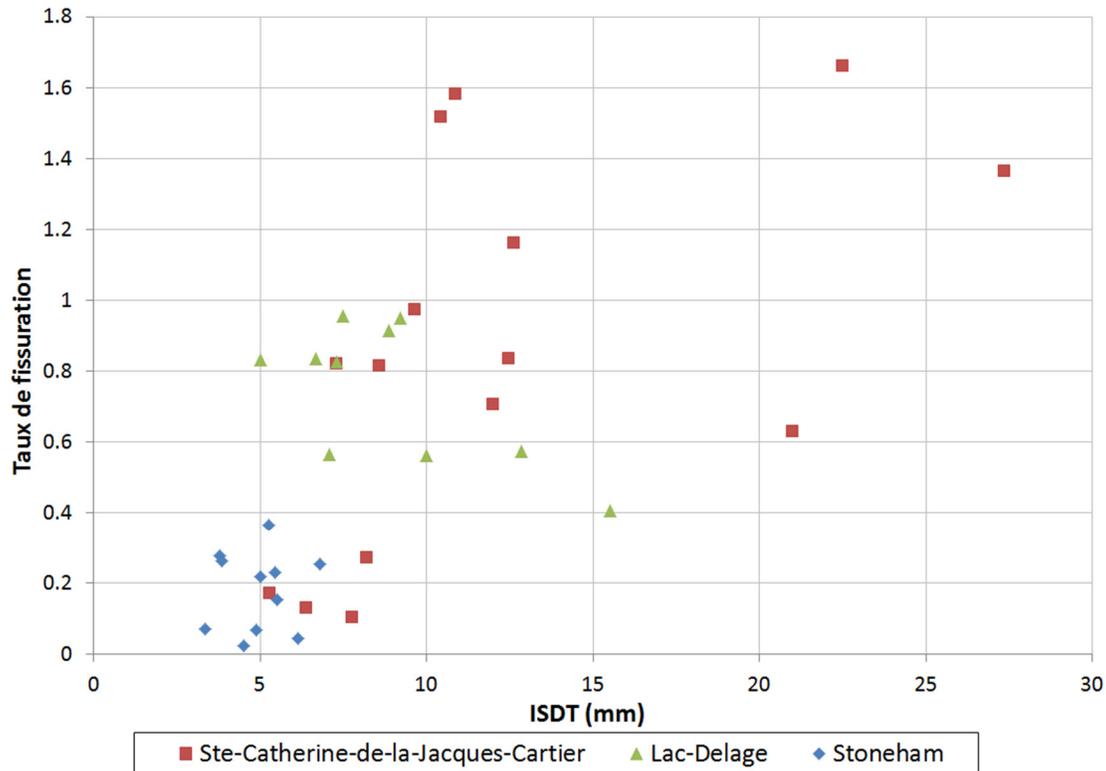


Figure 65 : Taux de fissuration longitudinale pondéré en fonction de l'ISDT aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

### Aspect visuel de gélivité

Comme dernière vérification de la méthode d'analyse de profils transversaux, l'apparence visuelle de la gélivité d'une chaussée est comparée avec l'ISDT aux 10 m. La gélivité d'une chaussée est déterminée à l'aide du Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples (Ministère des Transports du Québec, 2007). En se fiant à ce guide, il est possible d'établir la sévérité des fissures (se référer à la section 2.1 de l'État des connaissances) pour ensuite associer une sévérité de gel à la chaussée. Les 36 sections de 10 m provenant des sites expérimentaux de la MRC de la Jacques-Cartier ont donc été répertoriées selon quatre types de gélivité, soit aucune, faible, moyenne ou majeure. Et ce, par l'analyse des fissures de gel de type lézarde. En revanche, la description visuelle relative à la gélivité d'une chaussée est une méthode qualitative et elle n'est pas aussi précise qu'une mesure. La Figure 87 de l'annexe 2 présente la relation entre le type de gélivité et le  $\Delta$ IRI.

La Figure 66 illustre l'interaction entre le type de gélivité déterminé qualitativement sur la chaussée et l'ISDT aux 10 m. Dans ce type de comparaison, l'écart type pourrait jouer un rôle important pour explorer la ressemblance entre les catégories de gel définies par l'ISDT et celles définies par l'observation qualitative des

dégradations associées au gel. La Figure 88 présentée à l'annexe 2 montre, en plus des résultats indiqués à la Figure 66, les écarts type des ISDT aux 10 m calculés. À la Figure 66, il est possible de remarquer une certaine tendance : il y a une augmentation de l'ISDT avec l'augmentation de la sévérité de la gélivité. Par contre, les sévérités du graphique ne correspondent pas exactement à ceux déterminés aux sections précédentes (Soulèvement au gel et Taux de fissuration). En effet, selon l'aspect visuel de gélivité, les ISDT, incluant leur écart type, se situent entre 2,5 mm et 10,5 mm pour une chaussée avec aucun signe de gélivité, tandis que selon les autres comparaisons, cette catégorie comprenait les ISDT entre 0 et 5 mm. De plus, il avait été déterminé qu'une chaussée avec des problématiques faibles à moyennes aurait un ISDT entre 5 mm et 10 mm, alors que selon l'aspect visuel, elle aurait plutôt un ISDT entre 2 mm et 20,5 mm. Finalement, selon l'apparence de gélivité d'une chaussée, celle-ci aurait des problématiques majeures de gel si son ISDT est entre 3 mm et 30 mm. Alors qu'il avait été conclu auparavant qu'un ISDT de 10 mm et plus pourrait représenter une chaussée avec gélivité majeure. Cette comparaison est moins concluante du point de vue des seuils. Par contre, elle illustre que l'ISDT est un bon indicateur de la gélivité d'une chaussée.

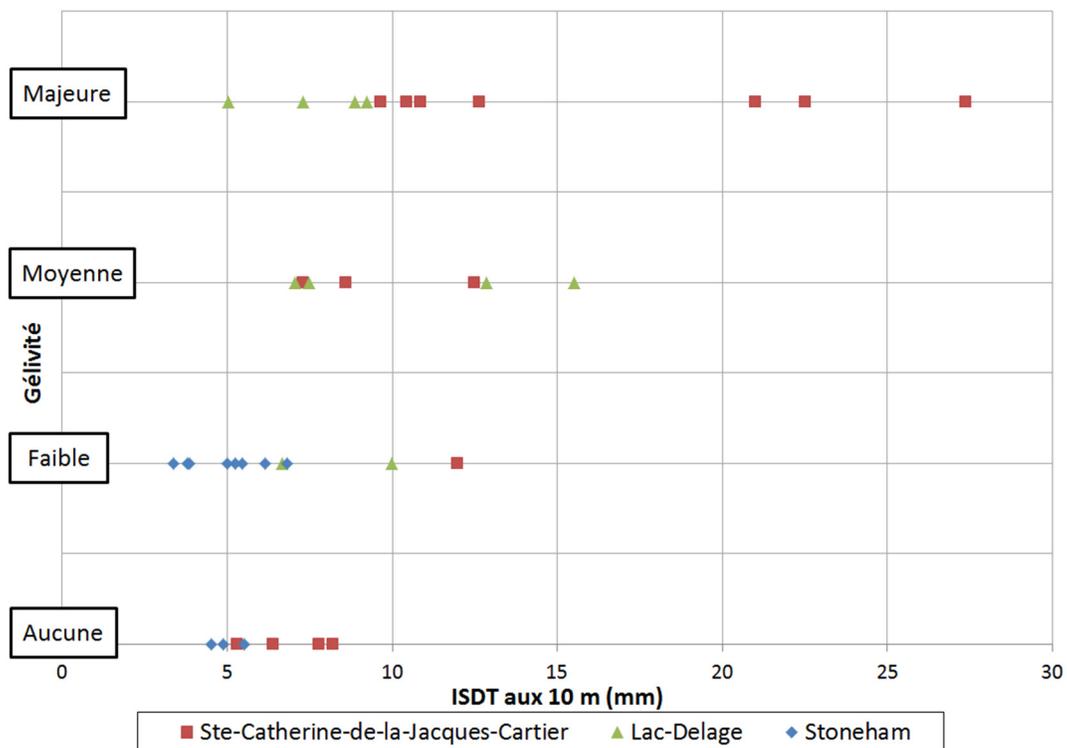


Figure 66 : Type de gélivité en fonction de l'ISDT aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

### 5.2.3 Synthèse des résultats

Comme discuté auparavant, des catégories de niveaux de gélivité ont été suggérées à l'aide de l'analyse des profils transversaux effectuée. En effet, un 10 m de chaussée sans problématique de gel pourrait avoir un ISDT entre 0 et 5 mm, une chaussée avec des problématiques faibles à moyennes aurait un ISDT entre 5 mm et 10 mm et un ISDT de 10 mm et plus pourrait représenter une chaussée avec gélivité majeure. Le Tableau 10 présente les catégories suggérées.

Tableau 10 : Catégories de niveau de gélivité suggérées

	Aucune problématique de gel	Problématiques de gel faibles à moyennes	Problématiques de gel majeures
ISDT (mm)	0 à 5	5 à 10	10 et plus

### 5.3 Conclusion

Suite à plusieurs analyses de profils longitudinaux, la méthode d'analyse longitudinale par différence d'IRI a été choisie, car elle représente le mieux les problèmes de gel affectant la chaussée. En effet, les problématiques de soulèvement au gel sont décrites par un facteur additif du dommage de la chaussée et elles ne sont pas proportionnelles à l'IRI, d'où le choix de la différence d'IRI par rapport au rapport d'IRI. Par la suite, un abaque pour différencier les problématiques de gel sur chaussées gélives a alors été conçu. Puis, un exemple pratique quant à l'utilisation de cet outil d'aide à la décision a été présenté afin d'expliquer et illustrer son utilisation par étape. Il est possible d'adapter l'abaque présenté selon nos besoins. Par exemple, pour une analyse de niveau « réseau », il serait possible de prendre des sections de plus de 100 m et pour une analyse de niveau « projet », des sections de 10 m pourraient être utilisées dans l'abaque

Concernant l'analyse de profils transversaux, une méthode efficace a été élaborée. Puisqu'il s'agit d'une piste analyse essentiellement inexploree, plusieurs comparaisons avec des indicateurs de gel tels que le delta IRI, le soulèvement au gel, le taux de fissuration et l'aspect visuel de gélivité ont été réalisées. De ces comparaisons, l'ISDT a été confirmé comme étant un indicateur représentatif de la gélivité et des catégories de niveaux de gélivité ont pu être suggérées à partir de ceux-ci. Premièrement, un 10 m de chaussée sans problématique de gel pourrait avoir un ISDT entre 0 et 5 mm, une chaussée avec des problématiques faibles à moyennes aurait un ISDT entre 5 mm et 10 mm et un ISDT de 10 mm et plus pourrait représenter une chaussée avec gélivité majeure. Bien que ce soit une analyse complexe, les résultats obtenus sont prometteurs.

La combinaison des méthodes par profils longitudinaux et transversaux permettrait d'obtenir un outil performant et complet. Pour ce faire, un plus grand nombre de sites expérimentaux serait nécessaire pour augmenter la représentativité et la fiabilité des approches suggérées.

## **Volet 2 : Étude en zone de pergélisol**

Ce deuxième volet explore les résultats d'analyse de profils longitudinaux en zone de pergélisol. Dans un premier temps, au chapitre 6, les sites d'essais de l'Alaska Highway sont présentés. Par la suite, au chapitre 7, les données de profils sur pergélisol sont interprétées et analysées. Finalement, à la fin de ce volet, une synthèse des résultats relative aux différentes problématiques liées à l'instabilité du pergélisol est présentée.

## Chapitre 6 : Sites d'essais au Yukon

Les sections d'essais sont situées sur l'Alaska Highway au Yukon. Cette route stratégique de 2451 km est localisée entre Dawson Creek en Colombie-Britannique et Fairbanks en Alaska. Elle a été construite en 1942 par l'armée des États-Unis (Zanasi, 2015). La ligne rouge de la Figure 67 illustre la trajectoire de l'Alaska Highway qui traverse la Colombie-Britannique, le Yukon et l'Alaska.



Figure 67 : L'Alaska Highway (Zanasi, 2015)

Trois sections ayant des caractéristiques différentes ont été sélectionnées pour faire partie de cette étude. Ces sections sur pergélisol se situent entre Whitehorse et la frontière de l'Alaska au Yukon. Au printemps et à l'automne 2015, des profils longitudinaux ont été pris sur plusieurs mètres à l'aide d'un profilomètre à basse vitesse. Les relevés ont été effectués dans le sentier de roue extérieur de la voie.

Le groupe de recherche *Arquluk* possède plusieurs données, telles que des températures de l'air et du sol, des hauteurs de neige, etc., sur le site expérimental de Beaver Creek. Ainsi, il aurait été adéquat de prendre

des données de profils longitudinaux à cet endroit. Malheureusement, ce site était en réfection au printemps 2015, il n'a donc pas été possible de prendre des données interprétables.

Deux sections situées près de la frontière de l'Alaska ayant une grande vulnérabilité au dégel du pergélisol, ont été choisies suivant le guide du Yukon Research Center « Vulnerability of the North Alaska Highway to Permafrost Thaw, a Field Guide and Data Analysis » (Calmels & Roy, 2015). Les figures les présentant sont disponibles à l'annexe 3 (Figure 89, Figure 90 et Figure 91). Une troisième section, près de Haines Jonction, a été choisie afin de représenter une chaussée stable. La Figure 68 illustre la carte du Yukon avec les points d'intérêt de cette étude.

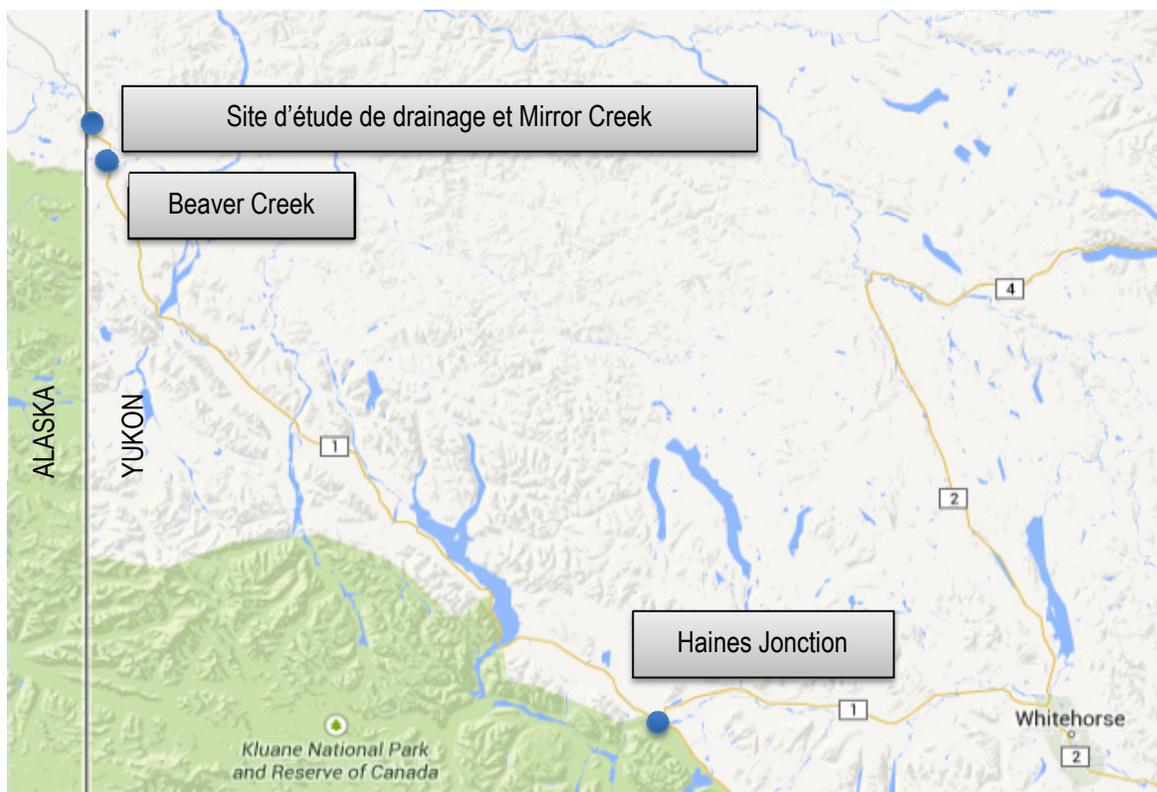


Figure 68 : Carte des sections situées sur pergélisol au Yukon

## 6.1 Haines Junction (km 1568)

Ce site de 1000 mètres de long est une section où la chaussée est stable. Il n'y a aucun signe de dégradation du pergélisol sur la chaussée ou aux alentours. La Figure 69 illustre le site au mois d'avril 2015. Étant donné que cette section est stable, elle fait office de référence.



Figure 69 : Section située à Haines Junction. Avril 2015

## 6.2 Site d'étude de drainage (km 1894)

Le site d'étude de drainage est situé près de la frontière des États-Unis sur l'Alaska Highway. La section mesure 550 m. Elle est située dans une vallée et est traversée par deux ponceaux. Cette section de route est localisée sur des dépôts fluviaux et organiques riches en glace, ce qui la rend très vulnérable au dégel. Selon des forages faits à cet endroit, il y a présence de pergélisol riche en glace et probablement de coins de glace jusqu'à des profondeurs de 20 à 30 m dans le sol (Calmels & Roy, 2015).

En avril 2015, peu de déformations étaient visibles. En effet, seulement de petites fissures et de légers affaissements aux endroits où les ponceaux traversent la route ont été décelés. En septembre 2015, une grande dépression était visible à l'endroit où le deuxième ponceau traverse la chaussée. Durant l'été 2015, le service d'entretien de l'Alaska Highway a été contraint de remblayer la dépression et d'apposer un rapiéçage à cet endroit. La Figure 70 présente la dégradation du deuxième ponceau au site d'étude du drainage en septembre 2015.



Figure 70 : Dégradation du deuxième ponceau au site d'étude de drainage. Septembre 2015

### 6.3 Mirror Creek (km 1883)

Le site de Mirror Creek mesure 1000 m et est situé au km 1883 sur l'Alaska Highway. Plusieurs dépressions et deux rapiécages ont été identifiés dans la première moitié de la section en avril et septembre 2015. En effet, vis-à-vis les premiers 350 m se trouve une tourbière à l'ouest et un thermokast<sup>1</sup> à l'est; ce qui rend la chaussée très vulnérable aux effets de la fonte du pergélisol. Une rotation d'épaulement a été remarquée en avril 2015 et s'est grandement dégradée durant l'été 2015. Pour ce qui est de la deuxième moitié de la section, elle semble plus stable. Ce site est très vulnérable au dégel puisqu'il est situé dans des dépôts fluviaux et organiques riches en glace. Il se trouve dans un environnement de sable silteux où un pourcentage maximal jusqu'à 85 % de contenu en glace pure peut être retrouvé. Selon des forages faits à cet endroit, il a été possible de détecter un pergélisol riche en glace jusqu'à des profondeurs de 15 m dans le sol (Calmels & Roy, 2015). La Figure 71 présente une photo d'une dégradation observée au site de Mirror Creek en septembre 2015.



Figure 71 : Dégradation au site de Mirror Creek. Septembre 2015

<sup>1</sup> Configuration de la surface du sol qui résulte de la fonte de la glace du sol en région de pergélisol (Encyclopedia Britannica, 2013)

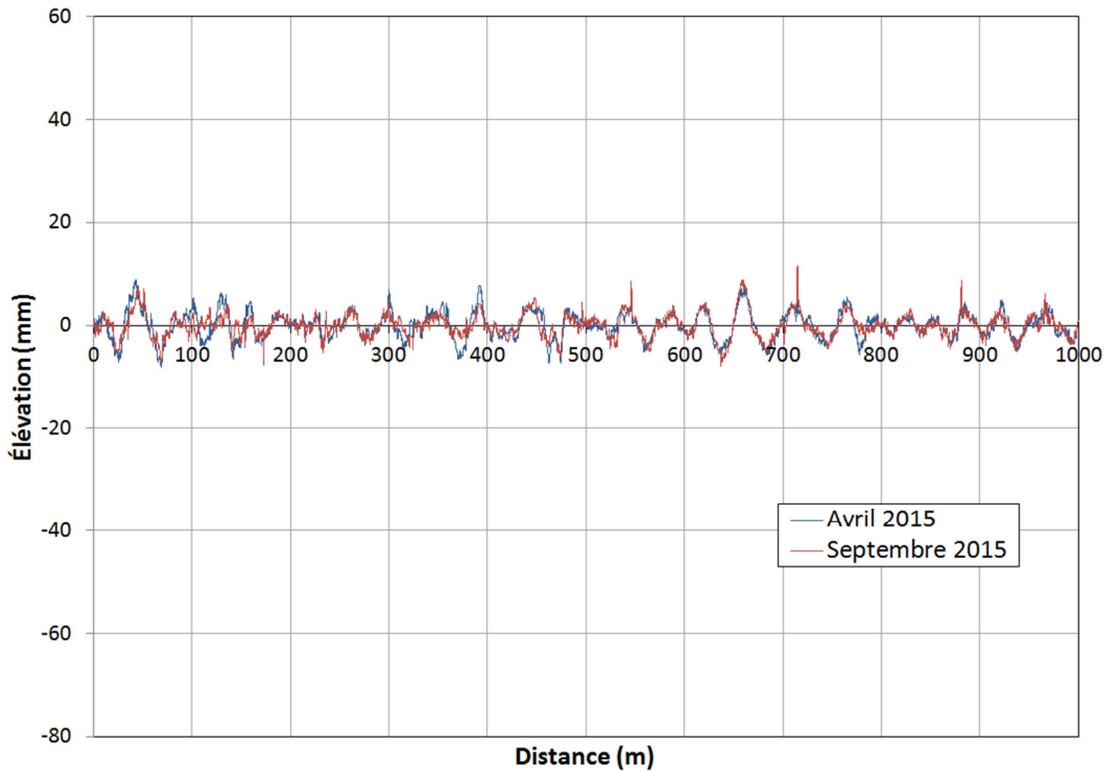
## **Chapitre 7 : Interprétation et analyse des profils sur pergélisol**

Ce chapitre traite de l'analyse des données recueillies sur l'Alaska Highway sur les sites d'essais présentés au chapitre précédent. Dans un premier temps, les observations des profils longitudinaux mesurées sont présentées. Par la suite l'IRI, pour les profils bruts et filtrés, est calculé et comparé. En conclusion, une synthèse des résultats est montrée en graphique.

### **7.1 Interprétation des profils sur pergélisol**

Pour chaque site, des profils longitudinaux ont été mesurés dans le sentier de roue extérieur de la voie. Il est difficile d'interpréter un profil sans le filtrer et éliminer certaines longueurs d'onde, car seulement l'effet de la topographie est visible. Filtrer les longueurs d'onde entre 0,7 et 45 m permet d'obtenir uniquement les longueurs d'onde affectant le confort et la sécurité de l'utilisateur de la route (Organisation de coopération et de développement économiques, 1984). L'interprétation des profils des trois sites est présentée puis une comparaison est montrée.

Comme la section de Haines Junction est stable, les variations d'élévations de ses profils filtrés sont très faibles. En effet, en analysant la Figure 72, qui représente les profils de chaussées mesurés en avril et en septembre 2015, il est possible de constater que les élévations des profils oscillent de façon constante entre 10 et -10 mm. En effet, sur tout le site, il n'y a pas d'endroit où les variations de profil paraissent plus dominantes. Finalement, les profils longitudinaux de printemps et d'automne sont très semblables.



**Figure 72 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0,7 et 45 m du site d'Haines Junction.  
Avril et septembre 2015**

Il est généralement pertinent d'étudier le profil longitudinal de la chaussée non filtré pour voir si les dégradations apparaissent dans la topographie du profil. Rappelons ici que les profils non filtrés ne mettent pas en évidence les longueurs d'onde affectant le confort et la sécurité de l'utilisateur sur la route. La Figure 73 montre le profil non filtré du site d'étude de drainage en avril 2015. Sur cette image, il est possible d'observer deux affaissements dans le profil correspondant à la traverse des deux ponceaux (113-126 m et 256-272 m).

La Figure 74 représente les profils filtrés entre les longueurs d'onde 0,7 et 45 m pour la totalité de la section. Sur ce graphique, aux endroits où les ponceaux traversent la route, des variations d'élévations plus élevées sont perceptibles, elles oscillent entre 20 et -30 mm pour le premier ponceau et entre 35 et -60 mm pour le deuxième. De plus, les élévations entre le printemps et l'automne sont semblables à l'exception des élévations vis-à-vis du deuxième ponceau. En effet, la chaussée s'est affaissée durant l'été, ce qui a créé une augmentation des élévations entre le mois d'avril et de septembre.

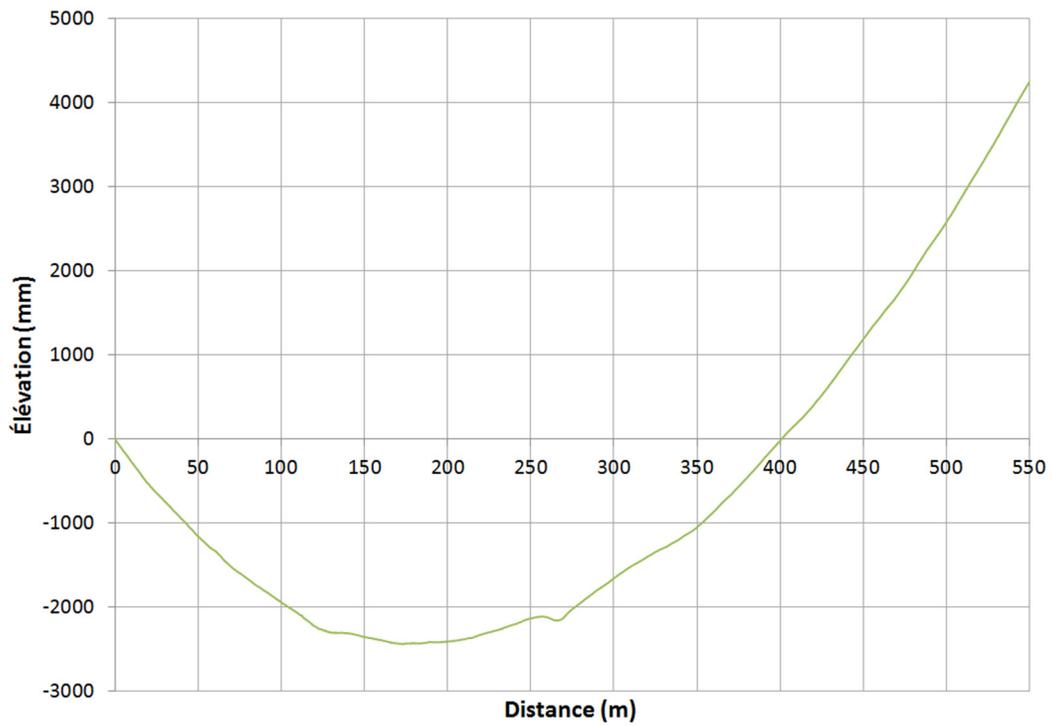


Figure 73 : Profil longitudinal non filtré du site d'étude de drainage. Avril 2015

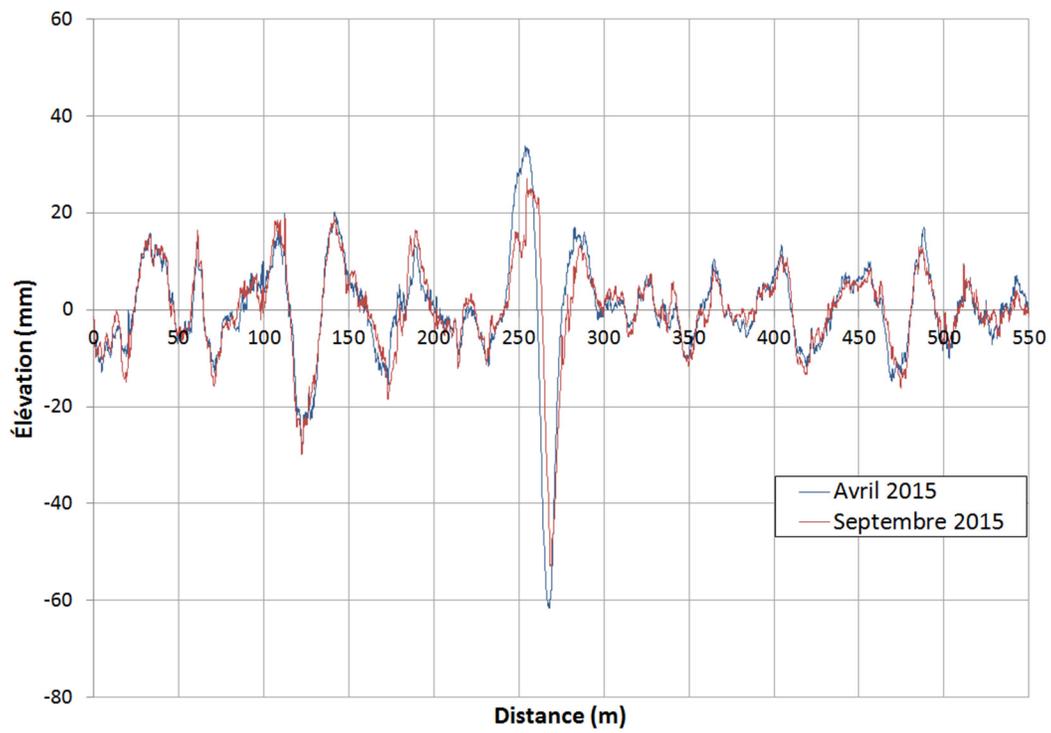


Figure 74 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0.7 et 45 m du site d'étude de drainage. Avril et septembre 2015

La Figure 75 montre le profil longitudinal non filtré du site de Mirror Creek. Une irrégularité du profil est visible jusqu'à une distance de 350 m. En effet, il y a plusieurs dépressions et deux rapiécages sur cette petite distance (182-188 m et 314-330 m). La Figure 76 illustre le profil filtré entre les longueurs d'onde 0.7 et 45 m du même site. Sur ce graphique, les rapiécages sont visibles aux endroits où les variations d'élévations sont plus élevées, soit des élévations qui varient entre 40 et -70 mm. La suite du profil de ce site possède des élévations variant entre 10 et -10 mm, tout comme le site de référence d'Haines Junction. Il est possible de voir de petites différences entre les élévations d'avril et de septembre. Vraisemblablement, les bosses sont plus définies et les dépressions plus profondes en septembre au début du profil. Ces changements sont causés par la dégradation du pergélisol advenue durant l'été 2015.

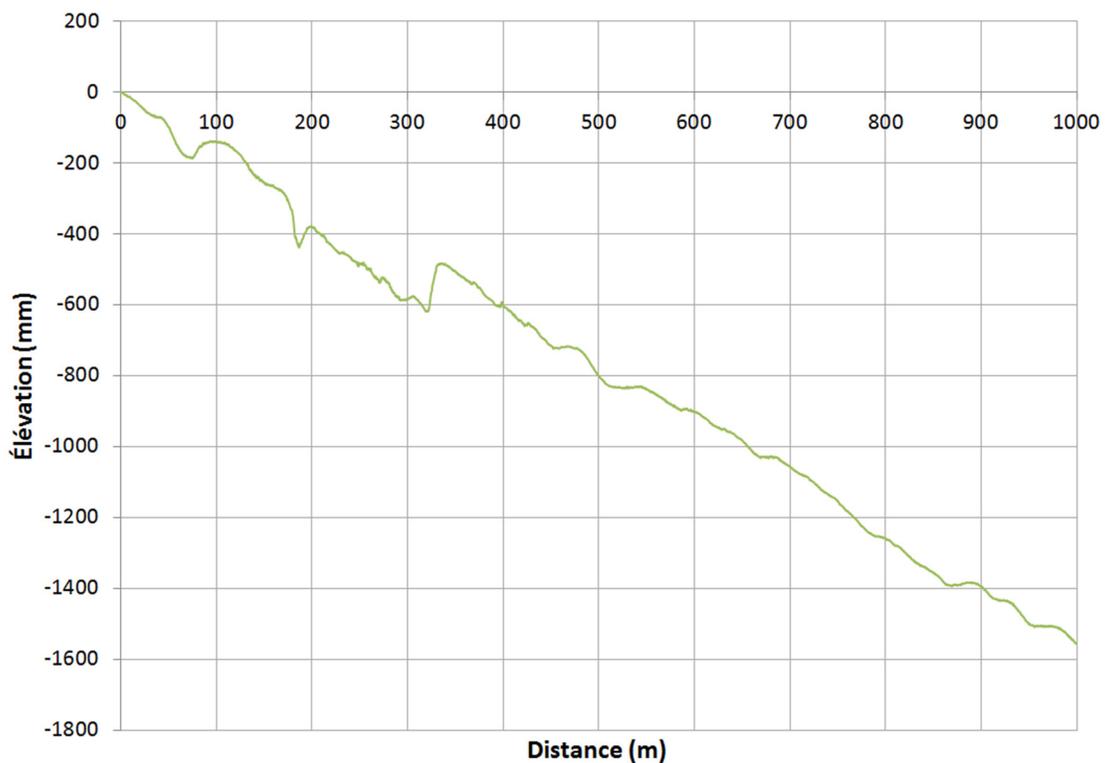


Figure 75 : Profil longitudinal non filtré du site de Mirror Creek. Avril 2015

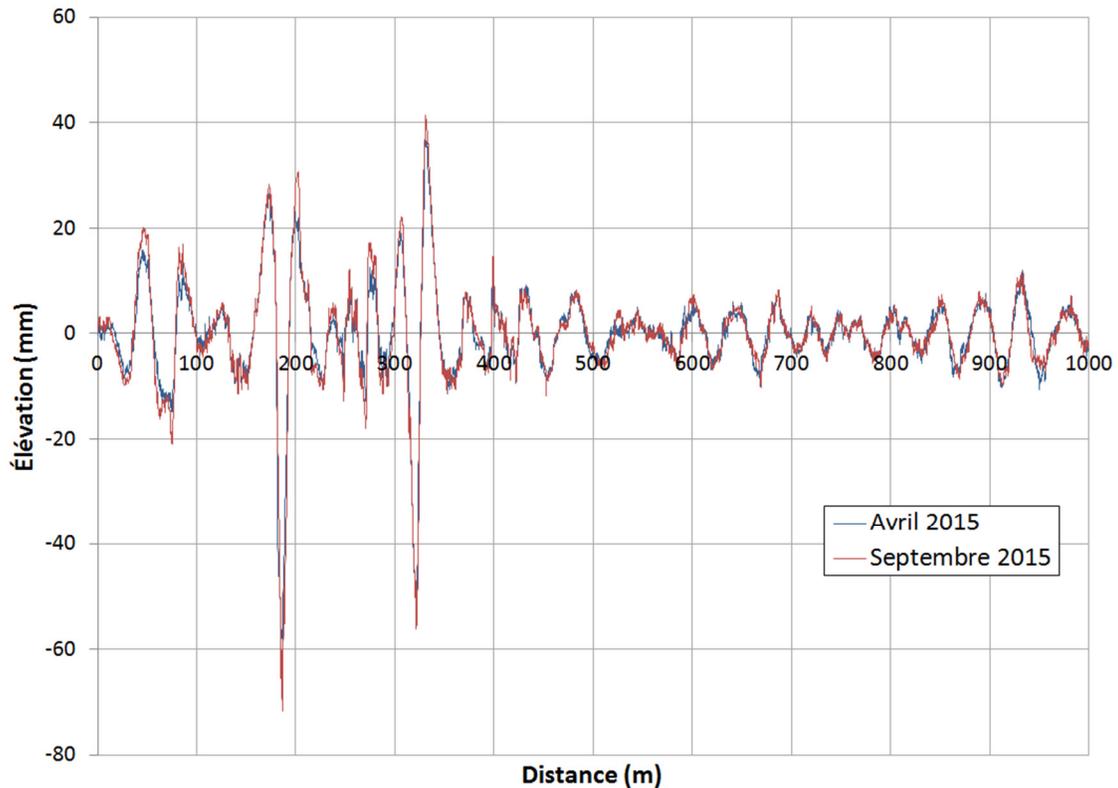


Figure 76 : Profils longitudinaux filtrés entre les longueurs d'onde de 0.7 et 45 m à Mirror Creek. Avril et septembre 2015

### 7.1.1 Comparaison des profils longitudinaux sur pergélisol stable et instable

Sachant que la section de Haines Junction est stable, il est possible de la comparer avec les deux sections sur pergélisol instable; soit le site d'étude de drainage et celui de Mirror Creek. L'analyse choisie est celle par densité spectrale de puissance (se référer à la section 2.4 de l'État des connaissances). La première comparaison, représentée à la Figure 77, est celle des trois sections en septembre 2015. Par la suite, pour bien voir l'impact du pergélisol sur la densité spectrale, une deuxième comparaison est présentée à la Figure 78 avec la portion du site de Mirror Creek ayant des problématiques de pergélisol instable et le site de référence à Haines Junction.

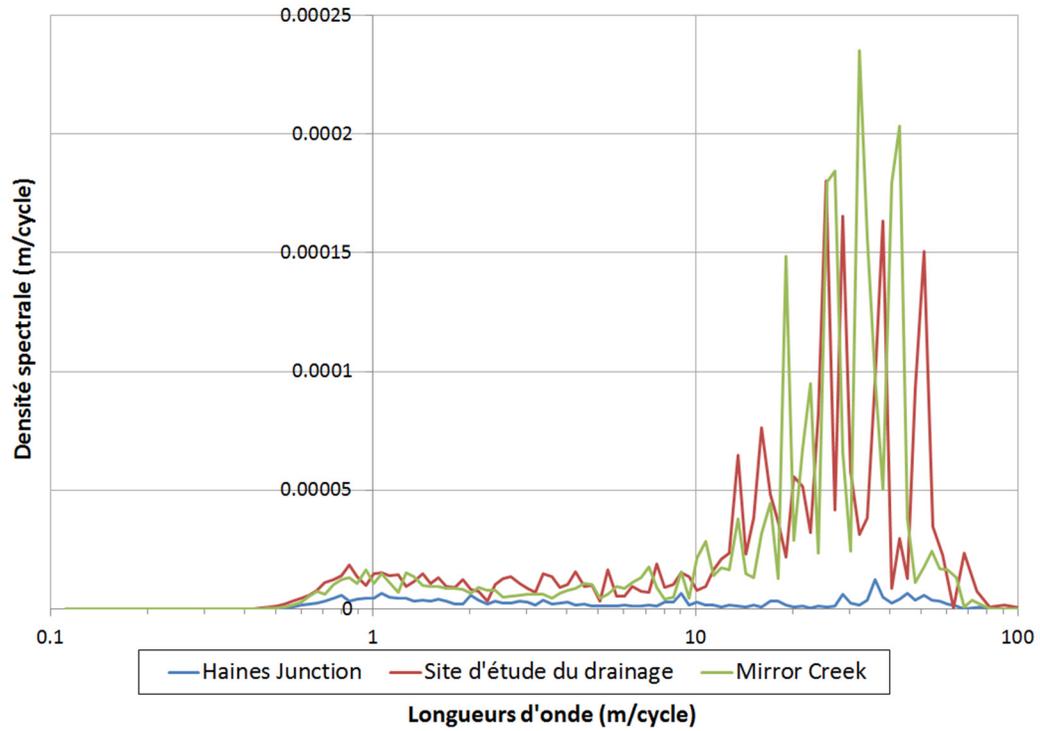


Figure 77 : Analyse de densité spectrale de puissance pour les sections sur pergélisol. Septembre 2015

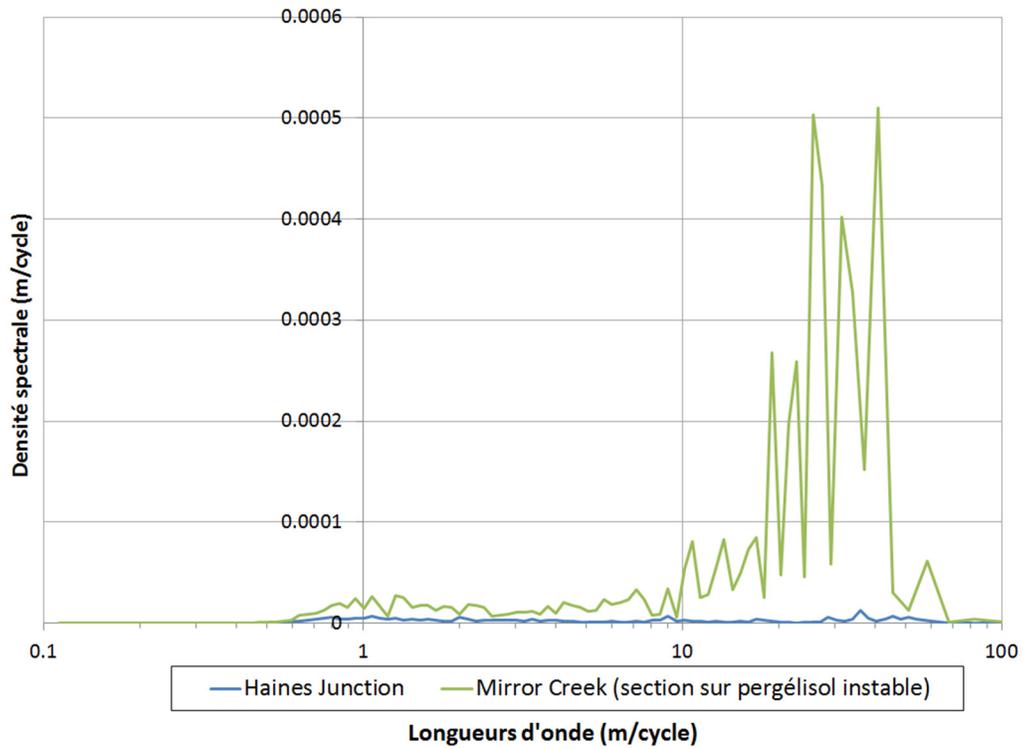


Figure 78 : Comparaison de la densité spectrale de puissance pour la section d'Haines Junction et du début du site de Mirror Creek (0-350 m). Septembre 2015

La Figure 77 et la Figure 78 présentent la densité spectrale de puissance en fonction des différentes longueurs d'onde en échelle semi-log de chacun des trois profils de chaussée en zone de pergélisol. Dans un premier temps, il est possible de conclure que la courbe de la section d'Haines Junction (courbe bleue) possède des densités spectrales plus faibles et plus constantes que les deux autres courbes. Cela signifie que la variance du profil est faible et qu'aucune longueur d'onde n'est dominante dans ce profil. En effet, comme le profil est construit à partir d'une série de sinusoïdes (se référer à la section 2.3 de l'État des connaissances), toutes les longueurs d'onde seraient représentées à parts égales. Pour ce qui est des deux autres sections, il y a une variance beaucoup plus élevée des élévations et une dominance de cette variance pour les grandes longueurs d'onde entre 25 et 40 m.

Bien qu'il ne soit pas possible de démontrer, avec les données récoltées, ce qui crée cette dominance de longueurs d'onde, quelques théories sont envisagées. Une comparaison avec les problématiques de soulèvements différentiels du sol d'infrastructure en zone de gel saisonnier permet de comprendre le phénomène sur pergélisol. En effet, si un problème de gel saisonnier se produisant entre 1 et 2 m de profondeur cause des défauts de 8 à 12 m en terme de longueurs d'onde, une dégradation du pergélisol se produisant entre 3 et 5 m de profondeur causerait des longueurs d'onde plus élevés.

Afin de voir plus précisément l'impact du pergélisol instable sur la représentation de la densité spectrale de puissance, la Figure 78 présente les dominances de longueurs d'onde du site à Haines Junction, où il n'y a pas de problématique reliée au pergélisol, et celles du début du site de Mirror Creek (0-350 m), où la présence de pergélisol instable est évidente. Le même constat qu'à la Figure 77 est observable : la courbe du site d'Haines Junction ne présente pas de dominance de longueurs d'onde tandis que celle du site de Mirror Creek possède une dominance des longueurs d'onde entre 25 et 40 m.

## **7.2 Analyse de l'IRI sur pergélisol**

Afin de bien représenter l'impact des dégradations de la chaussée sur le confort de roulement des usagers, le calcul de l'IRI est très utile. L'IRI est calculé à chaque point de mesure, aux 30 mm dans ce cas. Une moyenne est faite à un intervalle choisi, généralement 10 m ou 100 m (se référer à la section 2.4 de l'État des connaissances) pour avoir une vue d'ensemble de l'état de la chaussée. Pour toutes les sections sur pergélisol, l'IRI est calculé sur les profils filtrés avec des filtres différents de ceux utilisés pour le gel saisonnier. En effet, il a été démontré, à la section précédente, que les gammes de longueurs affectées par des problématiques de profondeur étaient plus élevées que celles utilisées dans le calcul des problématiques reliées au gel saisonnier. De ce fait, de petites ondes (0,7 à 2,8 m), de grandes ondes (11 à 45 m) et des ondes globales affectant le confort et la sécurité de l'utilisateur de la route (0,7 à 45 m) utilisées fréquemment dans le domaine de la profilométrie (se référer à la section 2.4 de l'État des connaissances).

Afin de comparer les données prises en avril (gel maximal) et septembre 2015 (dégel maximal), la différence des IRI ( $\Delta$ IRI) est calculée. Par la suite, il est possible de baser l'analyse sur le changement de la condition globale de la chaussée, l'uni, en fonction des différentes gammes de longueurs d'onde entre avril et septembre 2015. Dans le cadre de ce projet, le  $\Delta$ IRI représente la différence entre l'IRI aux 100 m de septembre 2015 et l'IRI aux 100 m d'avril 2015. Cet exercice a été fait pour les trois sites d'étude de l'Alaska Highway.

Contrairement à ce qui a été fait auparavant, le  $\Delta$ IRI, ici, caractérise le dégel de la chaussée durant l'été alors que pour le gel saisonnier, le  $\Delta$ IRI caractérise le gel de la chaussée durant l'hiver. Ce qui veut dire qu'un IRI négatif est très probable en zone de pergélisol instable, car la chaussée se dégraderait durant la période estivale.

### 7.2.1 Présentation des résultats de l'IRI sur pergélisol

Les graphiques suivants illustrent les résultats obtenus; la Figure 79 présente les différences d'IRI aux 100 m à Haines Junction, la Figure 80 et la Figure 81 montrent les  $\Delta$ IRI aux 100 m et aux 10 m pour le site d'étude de drainage, puis la Figure 82 et la Figure 83 désignent les  $\Delta$ IRI aux 100 m et aux 10 m à Mirror Creek.

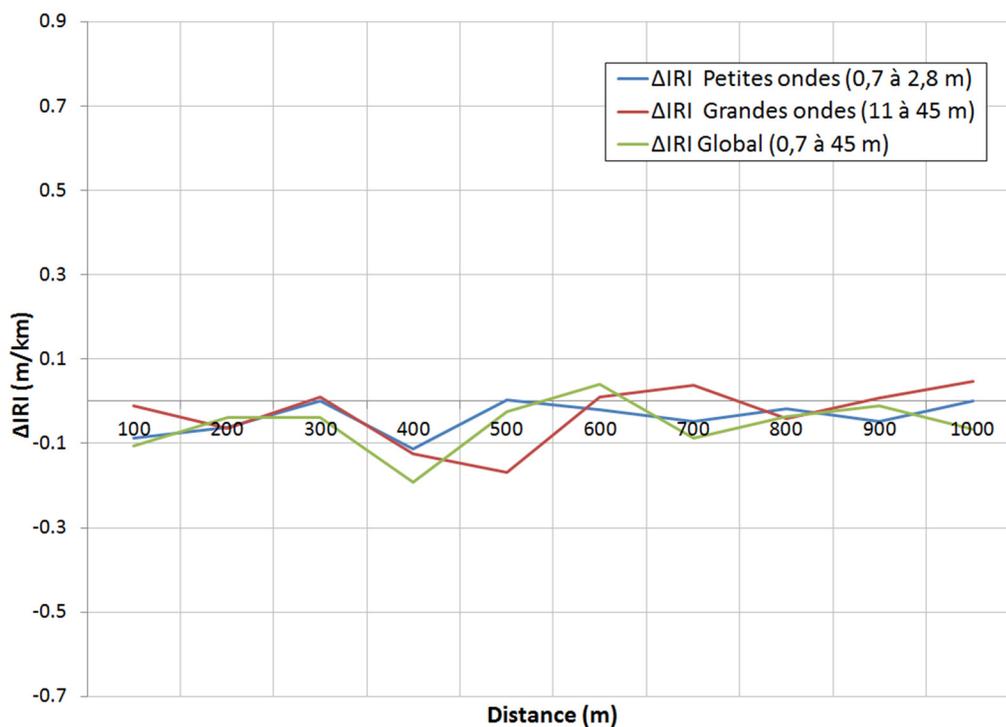


Figure 79 : Graphique du  $\Delta$ IRI aux 100 m à Haines Junction

À la Figure 79, il est possible de remarquer que les trois courbes ont le même ordre de grandeur, c'est-à-dire que toutes les valeurs oscillent entre des  $\Delta IRI$  de 0,05 m/km et -0,19 m/km. Par contre, la plupart des valeurs aux 100 m sont négatives, ce qui veut dire que la condition globale de la chaussée est meilleure en septembre 2015 qu'en avril 2015. Les différences d'IRI sont très faibles; de l'ordre de -0,06 pour ce qui est de la moyenne du  $\Delta IRI$  global. De plus, il n'y a pas de dominance des petites ou des grandes ondes.

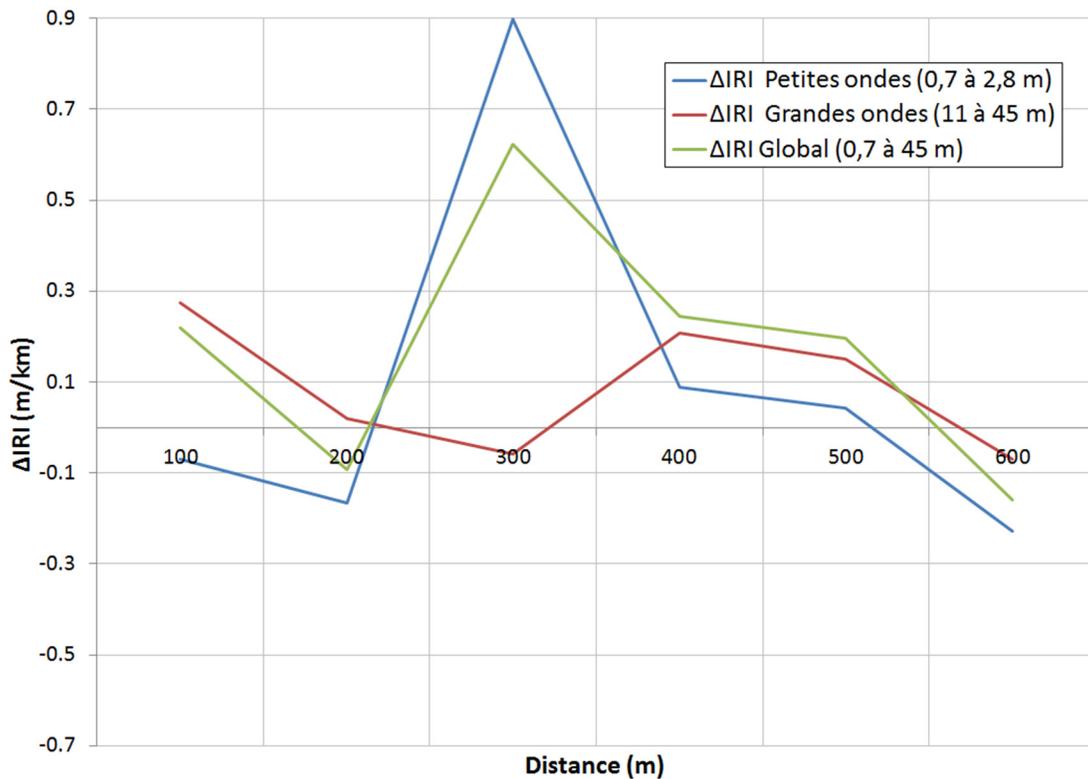


Figure 80 : Graphique du  $\Delta IRI$  aux 100 m au site d'étude de drainage

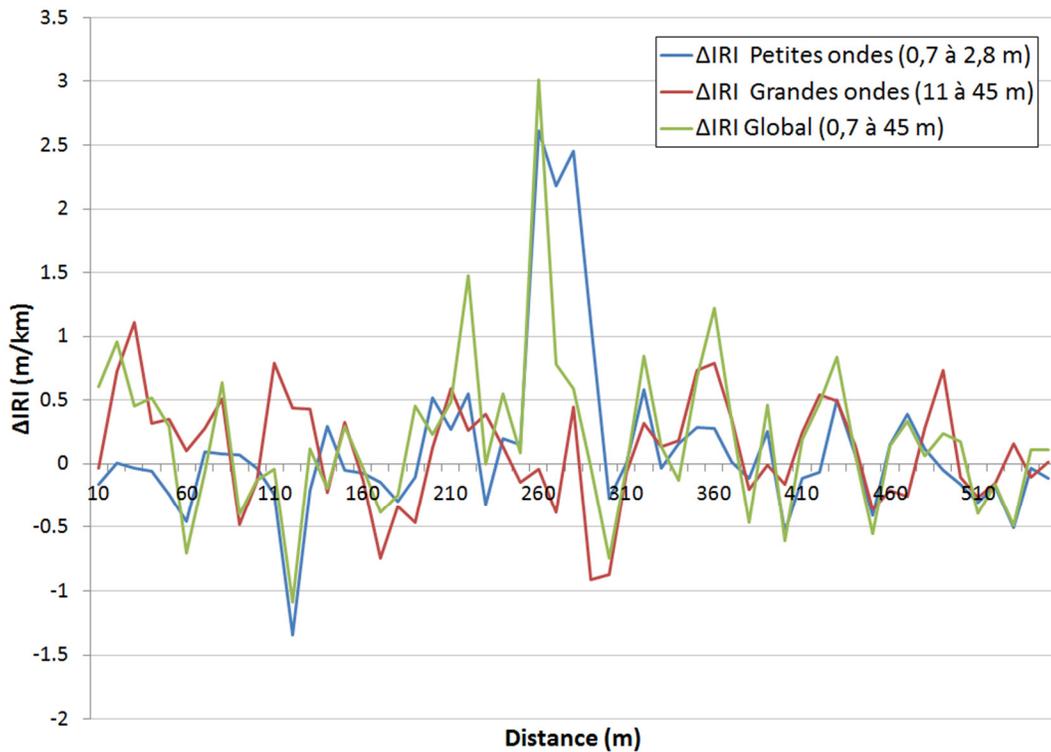


Figure 81 : Graphique du  $\Delta$ IRI aux 10 m au site d'étude de drainage

Pour le site d'étude de drainage, à la Figure 80, les  $\Delta$ IRI aux 100 m sont beaucoup plus élevées qu'au site de référence d'Haines Junction, soit entre 0,90 m/km et -0,23 m/km. La majorité des courbes se trouvent dans la partie positive du graphique, ce qui signifie que la chaussée est plus dégradée en septembre. Premièrement, en regardant la courbe des grandes ondes (courbe rouge), il est possible de remarquer que les  $\Delta$ IRI sont supérieurs à 0,1 m/km à l'exception des deux ponceaux (200 m et 300 m) et du dernier tronçon du site (600 m). Par la suite, en observant la courbe des petites ondes (courbe bleue), une valeur maximale est atteinte vis-à-vis du deuxième ponceau du site (300 m). Il est possible de poser des constats semblables sur la Figure 81. En effet, les  $\Delta$ IRI aux 10 m des grandes ondes (courbe rouge) sont majoritairement positifs et des valeurs maximales de  $\Delta$ IRI aux 10 m des petites ondes (courbe bleue) sont atteintes au deuxième ponceau. Pour ce qui est de la courbe globale (courbe verte), elle semble suivre la valeur moyenne entre les deux courbes. Par contre, il faut garder en tête que les longueurs d'onde dominantes sur la courbe globale peuvent être situées dans la portion des moyennes ondes (2,8 à 11 m) qui n'est pas présentée dans le cadre de ce projet. Pour cette raison, la courbe globale ne représente pas toujours la valeur moyenne des  $\Delta$ IRI entre les petites et les grandes longueurs d'onde, comme, par exemple, à la distance 400 m et 500 m du graphique de la Figure 80.

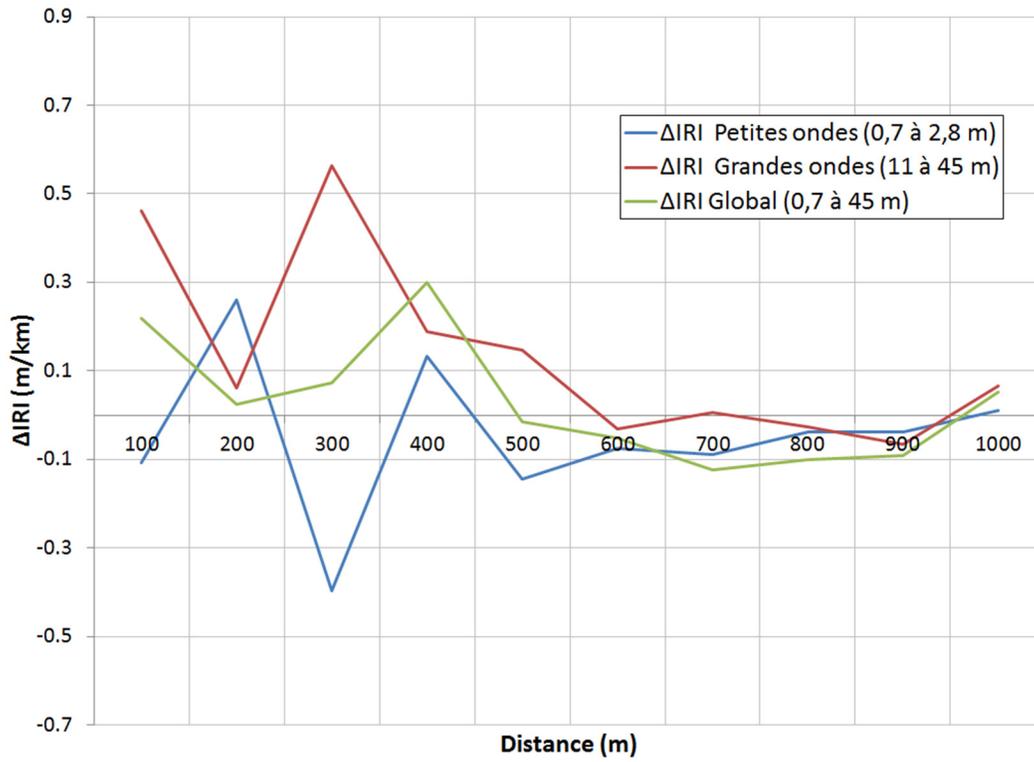


Figure 82 : Graphique du ΔIRI aux 100 m à Mirror Creek

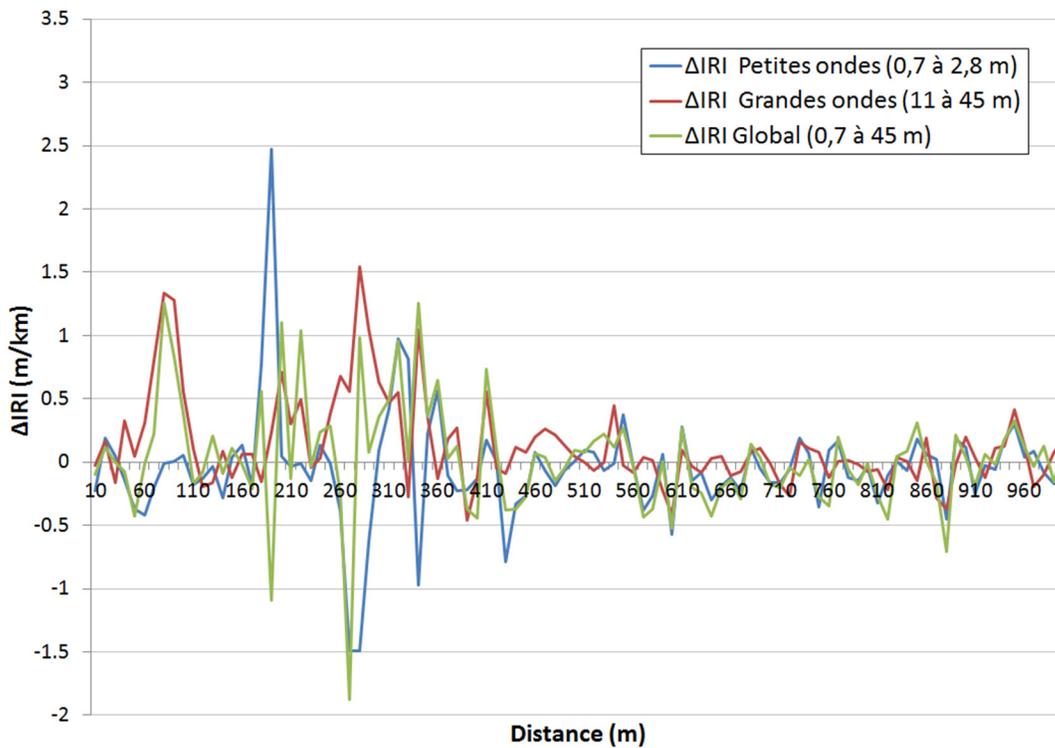


Figure 83 : Graphique du ΔIRI aux 10 m à Mirror Creek

Au site de Mirror Creek, à la Figure 82, les  $\Delta IRI$  oscillent entre 0,56 m/km et -0,40 m/km. La première section du site, soit jusqu'à 500 m, semble être affectée principalement par de grandes longueurs d'onde (courbe rouge). Par contre, deux pics (200 et 400 m) de petites ondes (courbe bleue) ressortent aux endroits où il y a des rapiécages sur la chaussée. Sur la seconde partie du graphique, de 600 m à la fin du site, les courbes ont toutes des valeurs de  $\Delta IRI$  négatives, à l'exception du dernier point, à l'arrivée du pont traversant le ruisseau « Mirror Creek ». À la Figure 83, pour les premiers 500 m, il est possible de remarquer que les valeurs de  $\Delta IRI$  aux 10 m de grandes longueurs d'onde sont majoritairement positives et que deux endroits sont affectés par de petites ondes (200 m et 280 m).

## 7.2.2 Analyse des résultats de l'IRI sur pergélisol

Les différences d'IRI négatives présentes à Haines Junction et à Mirror Creek peuvent être expliquées par le dégel en surface de la chaussée après l'hiver, car l'IRI est affecté à la hausse par le gel. En effet, en avril 2015, la période de dégel n'était pas terminée, ce qui a créé de légères différences des valeurs d'IRI entre le printemps et l'automne. Ce phénomène est aussi observé dans des régions moins nordiques. Dans les régions où le gel et dégel est présent, l'IRI est généralement plus élevé l'hiver que l'été, en raison de l'expansion de la chaussée au gel.

Au site d'étude de drainage, il est possible de conclure que le site est affecté majoritairement par de grandes longueurs d'onde, ce qui voudrait dire qu'il y aurait une problématique d'instabilité du pergélisol. De toute évidence, le premier ponceau (113-126 m) n'est pas affecté par la dégradation du pergélisol. En effet, à la Figure 80, les valeurs de  $\Delta IRI$  de l'intervalle (200 m) sont faibles. Il est aussi possible de voir, à la Figure 81, l'impact du ponceau sur les  $\Delta IRI$  aux intervalles 120 m et 130 m. Bien que les  $\Delta IRI$  des petites longueurs d'onde soient négatifs, ceux des grandes ondes sont assez élevés vis-à-vis du ponceau. Ceci suggère que les travaux d'excavation et de mise en place du ponceau et de l'isolant ont été bien exécutés, car aucun signe de dégradation n'est discernable à la surface de la route, alors qu'il y a présence de pergélisol instable aux environs. Le deuxième ponceau (256-272 m) est clairement affecté par de petites longueurs d'onde qui proviennent des rapiécages posés au courant de l'été pour combler les affaissements qui se sont produits pendant cette période. À l'intervalle 300 m de la Figure 80, le  $\Delta IRI$  des petites ondes atteint 0,90 m/km, tandis que celui des grandes ondes est négatif. Les résultats aux 10 m de la Figure 81 vont dans le même sens; aux intervalles 260 m, 270 m, et 280 m, les  $\Delta IRI$  des petites ondes sont très élevés. Les travaux pour ce ponceau, contrairement à ceux effectués au premier, semblent avoir perturbé le régime thermique du pergélisol. En effet, l'excavation du remblai a été réalisée à la fin de l'été et a forcément exposé le pergélisol riche en glace à la chaleur de l'air. De plus, la pose d'isolant autour du ponceau possiblement emprisonnée une partie de cette chaleur, accélérant ainsi le dégel du pergélisol sous le ponceau. D'ailleurs, des affaissements, résultant probablement de la fonte du pergélisol, sont apparus rapidement suite aux travaux. Même s'il est certain que

la chaussée au-dessus de ce ponceau est affectée par le pergélisol sous-jacent instable, la valeur de  $\Delta IRI$  négative de grandes ondes ne confirme pas cette observation. L'hypothèse de départ était de considérer que les grandes ondes traduisent des problèmes en profondeur sous la chaussée, comme, par exemple, des problématiques liées au pergélisol. Cependant, les valeurs de  $\Delta IRI$  des grandes ondes ne sont pas positives. Finalement, pour le dernier point de mesure (600 m) du graphique de la Figure 80, il n'est pas possible de le comparer aux autres points puisqu'il représente une moyenne des derniers 50 m de la section.

Des conclusions semblables ressortent de l'analyse du site de Mirror Creek. À la Figure 82, la première moitié du site est fortement affectée par des problématiques de pergélisol instable puisque les  $\Delta IRI$  des grandes ondes sont élevés, soit supérieurs à 0,1 m/km dans la plupart des cas. En fait, le  $\Delta IRI$  des grandes ondes est inférieur à 0,1 m/km seulement vis-à-vis de la première dégradation (200 m) où le  $\Delta IRI$  des petites ondes est dominant avec une valeur de 0,26 m/km. Une deuxième dégradation peut aussi être décelée à une distance de 400 m avec une valeur de  $\Delta IRI$  de petites ondes un peu plus faibles (0,13 m/km). En effet, des indices de dégradations causées par la fonte du pergélisol tels que des affaissements et des rapiécages sont visibles sur la chaussée à ces endroits (182-188 m et 314-330 m). L'impact de ces dégradations est aussi visible sur le graphique de la Figure 83 qui représente les  $\Delta IRI$  aux 10 m à Mirror Creek.

Puisque les  $\Delta IRI$  aux 100 m peuvent être faibles, c'est le cas pour la section de référence à Haines Junction (Figure 79), des marges d'erreur des  $\Delta IRI$  ont été calculées (se référer à la section 2.3 de l'État des connaissances). Les graphiques sont présentés à l'annexe 4, à la Figure 92, à la Figure 93 et à la Figure 94. Bien que les erreurs semblent significatives pour les  $\Delta IRI$  de la section à Haines Junction, les valeurs sont toutes du même ordre de grandeur. Il faut aussi prendre en considération que l'erreur calculée est vraiment très conservatrice, ce qui voudrait dire que les marges d'erreur réelles seraient probablement beaucoup plus petites.

### 7.2.3 Synthèse des résultats

Pour faire suite aux analyses de l'IRI, les résultats des différents sites d'étude sur pergélisol ont été synthétisés à la Figure 84. Ce graphique présente les trois cas observés sur le terrain, soit aucune problématique liée à l'instabilité du pergélisol, une problématique de dégradation en surface de la chaussée et une problématique de dégradation en profondeur dans la chaussée, autrement dit une problématique d'instabilité du pergélisol. L'axe des ordonnées représente le rapport entre le  $\Delta IRI$  aux 100 m des grandes longueurs d'onde et l'IRI global du mois de septembre. L'IRI du mois de septembre a été choisi comme base du rapport puisqu'il est certain que l'IRI est seulement affecté par l'effet du pergélisol et non par le gel. En effet, il se peut que les IRI collectés au mois d'avril aient été affectés par le gel. Un IRI plus élevé au mois de septembre qu'au mois d'avril signifie que la condition de la chaussée s'est dégradée durant l'été,

probablement causée par la dégradation du pergélisol. L'axe des abscisses désigne le rapport entre le  $\Delta IRI$  aux 100 m des petites longueurs d'onde et l'IRI global du mois de septembre. En conséquence, les deux rapports sont calculés pour chacun des 100 m des sites d'étude sur pergélisol. Puis, le point représentant la problématique est placé dans le graphique de synthèse des résultats.

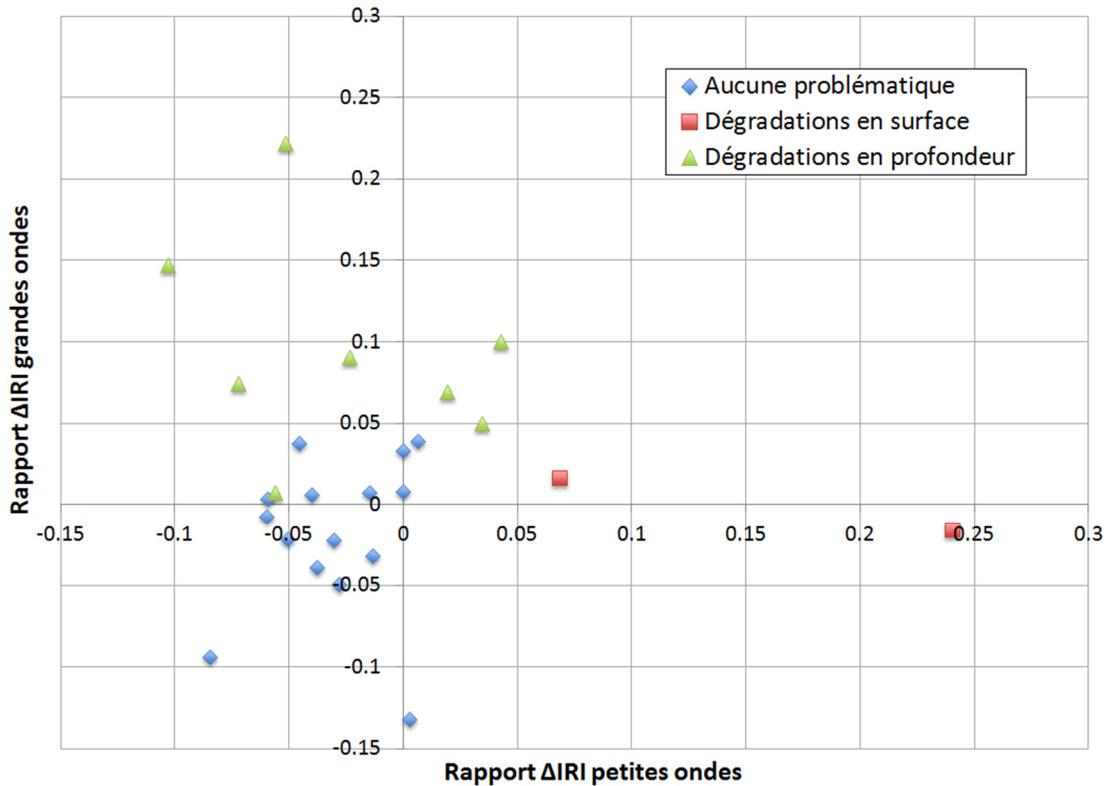


Figure 84 : Graphique de la synthèse des résultats des problématiques liées à l'instabilité du pergélisol

En observant le graphique de la Figure 84, il est possible de réaliser des regroupements des différentes problématiques liées à l'instabilité du pergélisol, donc des regroupements de couleur. Premièrement, en regardant les points ne représentant aucune problématique de pergélisol (points bleus), il est possible de constater qu'ils se situent près de rapports négatifs. Ces résultats sont attendus puisqu'il n'y a pas de problématique d'instabilité du pergélisol, donc le seul changement associé à l'IRI est le gel qu'il y avait probablement dans la chaussée au mois d'avril. De ce fait, les valeurs de  $\Delta IRI$  sont négatives et, par conséquent les rapports le sont aussi. Par la suite, les points désignant les dégradations en surface relatives à l'instabilité du pergélisol (points rouges) se rapprochent de l'axe des abscisses et du zéro de l'axe des ordonnées. Manifestement, ces deux points ont un rapport plus élevé de  $\Delta IRI$  de petites ondes

comparativement au rapport de  $\Delta IRI$  de grandes ondes. À ces endroits sur le terrain, des rapiécages ont été faits durant l'été pour contrer les affaissements de la chaussée survenus durant la saison de dégel. De ce fait, un différentiel positif de l'IRI, surtout celui des petites ondes, est observable. Il faut prendre en considération que les dégradations en surface peuvent ne pas être créées par l'instabilité du pergélisol, par exemple, elles peuvent être créées par l'usure normale de la route. Par contre, dans des secteurs où l'instabilité du pergélisol affecte grandement la condition de la chaussée, il est probable que la chaussée soit affectée par la dégradation du pergélisol avant d'être affectée par l'usure de la route. Finalement, il est possible de remarquer que les points décrivant les dégradations en profondeur sous la chaussée (points verts) tendent à se rapprocher de l'axe des ordonnées et du zéro de l'axe des abscisses. Effectivement, ces points ont des rapports d' $\Delta IRI$  de grandes ondes plus élevées que ceux de  $\Delta IRI$  de petites ondes. Ces résultats sont attendus puisque les grandes ondes représentent des défauts en profondeur.

### **7.3 Conclusion**

L'analyse de l'allure des profils et de la densité spectrale de puissance a permis de discerner si la chaussée était située dans une zone de pergélisol instable. Par la suite, l'analyse des valeurs de  $\Delta IRI$  selon différentes gammes de longueurs d'onde a permis de distinguer les différentes problématiques reliées à l'instabilité du pergélisol. Finalement, une synthèse des résultats a été réalisée pour déterminer la problématique dominante à un site.

Bien que les résultats respectent une tendance, aucun outil n'a été créé en ce qui a trait à la caractérisation des différentes problématiques de chaussées construites en zone de pergélisol. Il s'agit d'une étude préliminaire sur le sujet qui requiert d'être approfondie. La difficulté de recueillir des données en contexte de pergélisol n'a pas permis d'aller plus loin. Pour pouvoir créer un outil utilisable dans la pratique, un plus grand nombre de sites expérimentaux serait nécessaire.

## Chapitre 8 : Discussion

Ce chapitre porte, dans un premier temps, un regard critique sur l'ensemble du projet en discutant des sources d'erreur et des problèmes rencontrés lors du déroulement du projet. Ensuite, l'applicabilité des résultats obtenus dans la pratique est présentée. Enfin, les travaux additionnels qui pourraient parfaire le projet de recherche proposé seront énumérés.

### 8.1 Critique

La majeure partie de la recherche faite dans le cadre de ce projet est une exploration du sujet puisque l'utilisation de profils de chaussées pour caractériser l'effet du gel saisonnier et la dégradation du pergélisol est peu connue. Par conséquent, les résultats obtenus constituent une amorce d'analyse qui pourra être bonifiée dans le futur.

#### 8.1.1 Le gel saisonnier

La recherche et les résultats proposés, dans la section des chaussées en contexte de gel saisonnier, sont basés sur l'analyse de profils longitudinaux et transversaux de chaussées. Dans un premier temps, un abaque a été créé à l'aide d'analyses par longueurs d'onde de profils longitudinaux. L'outil peut être utilisé pour déterminer la problématique de gel pour une chaussée qui a préalablement été diagnostiquée gélive, et ce, à l'aide de seulement deux relevés, ce qui fait de lui un outil très efficace. Il est alors possible de choisir le meilleur moyen de réfection au meilleur coût. D'un autre côté, l'applicabilité n'est pas universelle. En effet, l'abaque n'est pas toujours adapté aux chaussées municipales étroites où les problématiques de gel peuvent se caractériser par des soulèvements transversaux de la chaussée. De plus, d'autres problématiques, telles que du soulèvement de blocs dans le sol d'infrastructure, ne sont pas bien détectées avec cet abaque. C'est pour cette raison que l'idée de l'étude des profils transversaux a été développée.

Comme l'utilisation de profils transversaux est une idée innovatrice et peu documentée, une méthode a été développée. Lors de l'élaboration de la méthode, plusieurs questionnements ont été soulevés sur la justesse des résultats. Le LCMS, étant un appareil très précis, fournit des profils transversaux difficiles à comparer d'une saison à une autre puisqu'il est extrêmement ardu de réussir à superposer deux profils relevés à plusieurs mois d'intervalle. La méthode préconisée lors de la prise des données est de s'appuyer sur les images prises par les caméras placées sur le véhicule pour se positionner au même endroit lors du deuxième relevé. Plusieurs variables telles que l'angle de la caméra sur le véhicule ou l'angle des capteurs du LCMS rendent la comparaison compliquée. Selon nous, une erreur de superposition de l'ordre de 50 mm peut être considérée comme acceptable. De plus, la méthode proposée pour l'analyse des profils transversaux précise d'utiliser une moyenne des résultats aux 10 m, ce qui fait diminuer la variabilité et rend la méthode plus fiable.

Un aspect important à prendre en considération en profilométrie est certainement le moment de la prise de données. Ainsi, il est conseillé de faire les relevés de profilomètre inertiel et de LCMS dans les conditions idéales et optimales suivantes.

- Relevés au gel maximal. Il est important de faire les relevés lorsque le gel est à son maximum dans la chaussée puisque c'est à ce moment que les problématiques de soulèvements au gel du sol d'infrastructure se produisent. Pour s'assurer que le gel soit à son maximum, des tubes de gel peuvent être utilisés. De plus, il est possible de fixer des dates (spécifiques aux régions) et d'aller faire les mesures à la fin février ou au début mars.
- Relevés dans des conditions climatiques optimales. La première condition porte sur la problématique de gel en profondeur dans la chaussée. La seconde doit donc porter sur la problématique de soulèvement de fissures au gel. Les conditions climatiques idéales pour bien faire ressortir la problématique sont une pluie suivie d'un redoux de température puis d'une période de gel intense. L'eau présente sur la chaussée en période de redoux s'introduira dans les fissures puis se transformera en glace lors de la période de gel, ce qui créera un soulèvement de fissures.
- Relevés dans des conditions adéquates de la chaussée. La chaussée doit être propre et sèche pour qu'aucun débris ou obstacle ne viennent interférer dans les relevés. De plus, la température minimale de l'air est de  $-5^{\circ}\text{C}$  pour permettre aux capteurs des appareils de mesure de fonctionner convenablement.

Tous les relevés dans le cadre du projet ont été faits dans les conditions énumérées ci-haut. Par conséquent, les résultats sont considérés fiables.

### 8.1.2 Le pergélisol

Les résultats obtenus lors de l'analyse de profils en région de pergélisol sont prometteurs.

Les profils mesurés avec le profilomètre à basse vitesse ont été faits dans la piste de roue extérieure de la chaussée. Comme cet appareil est manuel, la manipulation est une source d'erreur importante. L'utilisateur de l'appareil doit suivre une ligne droite à une vitesse constante et répéter le même relevé au printemps et à l'été. Pour diminuer les sources d'erreur, la même personne a été chargée de faire tous les relevés. De plus, pour s'assurer que les relevés se fassent en ligne droite, des points ont été marqués aux 5 m sur la chaussée. Ces points étaient visibles quelques mois plus tard lors de la deuxième série de relevés, ce qui, évidemment, diminue les risques d'erreur. Pour être conservateur, une erreur de 10 % sur les valeurs d'IRI calculées a été utilisée. Par contre, toutes les précautions employées lors des prises de données font en sorte que l'erreur de

10 % est probablement trop élevée et les marges d'erreur assumées des résultats obtenus sont trop grandes. Puisque les  $\Delta IRI$  sont faibles, des sites avec  $\Delta IRI$  plus élevés auraient aidé à compléter un abaque plus réaliste.

Pour ce qui a trait à l'analyse des résultats de l'IRI sur pergélisol, des intervalles de 100 m de  $\Delta IRI$  ont été choisis comme référence. Par contre, lorsqu'il est question de dégradations en surface de la chaussée, les longueurs d'onde affectées sont entre 0,7 et 2,8 m. De ce fait, s'il y a des défauts en surface de manière sporadique sur la chaussée, il se peut qu'ils ne se démarquent pas lors du calcul aux 100 m. Par contre, les défauts en profondeur dans la chaussée affectent les longueurs d'onde entre 11 et 45 m. Par conséquent, près de la moitié du 100 m est affectée par une problématique en profondeur de la chaussée, si problème il y a. En revanche, si une analyse de  $\Delta IRI$  aux 10 m était faite, le problème inverse surviendrait.

La synthèse des résultats des problématiques reliées à l'instabilité du pergélisol est sommaire et incomplète. D'abord, les dégradations en surface ne proviennent pas nécessairement de problématiques reliées à l'instabilité du pergélisol, par exemple, elles peuvent être créées par l'usure normale de la route. Par contre, dans des secteurs où l'instabilité du pergélisol affecte grandement la condition de la chaussée, il est probable que la surface de la chaussée soit affectée par la dégradation du pergélisol avant d'être affectée par l'usure de la route. Dans la même optique, si des rapiécages en surface ont lieu pour réparer la chaussée, car elle est affectée par des problématiques d'instabilité du pergélisol, les grandes longueurs d'onde devraient aussi dominer à ces endroits. Néanmoins, ce n'est pas ce qui a été observé lors de l'analyse. Une combinaison d'une analyse aux 10 m et aux 100 m pourrait corriger cette incohérence.

## **8.2 Applicabilité**

Il est toujours souhaité, lors de l'accomplissement d'un projet de maîtrise, que les résultats obtenus soient utilisables dans la pratique. Étant donné que ce projet a été accompli en collaboration avec une entreprise, soit la firme Englobe, il est évident que la recherche avait pour but d'être exploitable dans la pratique, dans ce cas-ci dans le domaine de la gestion des chaussées.

### **8.2.1 Le gel saisonnier**

L'abaque créé dans le cadre de ce projet est applicable au Québec ou dans toutes régions affectées par le gel saisonnier. Tout d'abord, le projet a été conçu à partir de données provenant de chaussées du Québec, donc dans des conditions adaptées aux problématiques québécoises. De plus, les équipements nécessaires à la prise de données sont déjà utilisés dans la pratique par le ministère des transports ainsi que par plusieurs firmes privées, ce qui facilite l'implantation de l'outil conçu dans le domaine de la gestion des chaussées. En

effet, le profilomètre inertiel est employé dans le cadre de clause d'uni et d'auscultation des chaussées pour déterminer la condition globale des routes. De plus, pour l'étude des profils transversaux, le LCMS est utilisé. Cet appareil est aussi employé pour la détection de fissures et d'ornières dans le cadre de mandat d'auscultation de chaussée.

### 8.2.2 Le pergélisol

Bien qu'aucun outil n'ait été créé, les conclusions obtenues peuvent aider à déterminer des problématiques reliées à l'instabilité du pergélisol en régions froides. De plus, comme le pergélisol est présent dans des territoires éloignés, il est nécessaire d'employer un appareil de mesure portatif tel que le profilomètre à basse vitesse. En effet, les analyses ont été faites avec des profils provenant de ce type d'appareil fréquemment utilisé pour prendre des profils sur chaussée ou dalle de béton.

## 8.3 Travaux additionnels

La majeure partie du travail de recherche portait sur l'étude et l'analyse de phénomènes reliés aux profils de chaussée, ce qui avait peu été exploré auparavant. Par conséquent, plusieurs tendances ont été décelées dans le cadre de ce projet, mais peu d'outils employables dans la pratique en sont ressortis. Plusieurs sites d'essais supplémentaires seraient nécessaires pour confirmer les tendances trouvées, pour ainsi créer des outils pratiques, robustes et efficaces.

### 8.3.1 Le gel saisonnier

Le volet gel saisonnier comporte deux réalisations majeures, soit l'analyse par profils longitudinaux et celle par profils transversaux. Pour ce qui est de la première analyse, un outil utile, sous forme d'abaque, a été créé pour différencier deux types de problématiques de gel, à savoir le soulèvement de fissures et le soulèvement du sol d'infrastructure. Bien que des sites supplémentaires puissent renforcer la méthode imaginée, l'abaque est fonctionnel. En revanche, pour l'analyse par profils transversaux, plusieurs travaux additionnels seraient nécessaires pour compléter les résultats. Malgré le fait qu'aucun outil n'a été créé, une méthode a été développée et plusieurs tendances ont été identifiées. Pour développer un outil maximisé à l'aide de profils transversaux, plusieurs sites d'étude supplémentaires seraient nécessaires. De plus, pour que l'outil soit utilisable dans plusieurs circonstances, l'utilisation de sites avec des caractéristiques différentes, par exemple des rues résidentielles, serait souhaitable. En jumelant les deux méthodes d'analyse de profils de chaussées, il serait alors possible de créer un outil polyvalent pour détecter plusieurs cas reliés au gel saisonnier.

### 8.3.2 Le pergélisol

Pour le deuxième volet du projet, celui de chaussées construites en zone de pergélisol instable, plusieurs développements intéressants ont été réalisés. Par contre, l'analyse d'autres sites serait essentielle pour la création d'un outil d'aide à la décision pour détecter la présence de pergélisol instable sous les chaussées. De plus, un suivi des sites expérimentaux dans le temps pourrait aider à déterminer un taux de dégradation du pergélisol. Alors, il serait possible de prévoir les problématiques des chaussées reliées à la dégradation du pergélisol avant qu'elles apparaissent sur la route. De même, des études plus approfondies des sites d'étude permettraient probablement de détecter plus précisément la problématique reliée au pergélisol, par exemple la présence de coins de glaces ou de glaces massives.

## Chapitre 9 : Conclusion et recommandations

Le projet de recherche était divisé en deux volets distincts, soit l'étude de profils longitudinaux et transversaux sur des chaussées affectées par le gel saisonnier, puis l'analyse de profils sur des chaussées construites en zone de pergélisol instable. Les recherches effectuées sont innovantes et font avancer les connaissances en auscultation des chaussées. Tous les objectifs énoncés ont été atteints.

Pour le premier volet, étude en contexte de gel saisonnier, un abaque pour différencier les problématiques de gel sur chaussées gélives a été conçu à l'aide de profils longitudinaux. En effet, grâce à cet abaque, il est possible de distinguer si la problématique de gel est en surface de la chaussée (soulèvement de fissures au gel) ou en profondeur sous la chaussée (soulèvement du sol d'infrastructure) à l'aide d'analyses par longueurs d'onde. De plus, des étapes claires quant à l'utilisation de cet outil d'aide à la décision ont été établies. Concernant l'analyse de profils transversaux, une méthode efficace a été élaborée pour caractériser le niveau de gélivité d'une chaussée. Cette dernière méthode n'est toutefois pas finalisée et un plus grand nombre de sites expérimentaux serait nécessaire. La combinaison des méthodes par profils longitudinaux et transversaux ferait inévitablement un outil performant. Il est pertinent d'ajouter que les moments de réalisation des relevés constituent un aspect très important pour l'utilisation des abaques. En effet, les relevés doivent être réalisés dans les mêmes conditions que ceux utilisées pour faire les abaques.

Pour le deuxième volet, étude en zone de pergélisol, plusieurs analyses liées aux profils longitudinaux des chaussées ont été réalisées telles que des analyses d'allure de profils, de la densité spectrale de puissance et des valeurs de  $\Delta IRI$  selon différentes gammes de longueurs d'onde. Une synthèse des résultats a donc été conçue pour permettre de distinguer les différentes problématiques liées à l'instabilité du pergélisol. Pour pouvoir créer un outil utilisable dans la pratique, un plus grand nombre de sites expérimentaux serait nécessaire.

# Bibliographie

- Andersland, & Ladanyi. (2004). *Frozen ground engineering Second edition*. John Wiley and sons.
- Association mondiale de la route. (2014). *Dictionnaire AIPCR de la route*.
- Banque Mondiale. (1984).
- Brillant, G. (2015, Janvier). Études de cas de sections gélives du MTQ.
- Brown, R. J., & Kupsch, W. O. (1974). *Permafrost Terminology*. Natl. Res. Coun. Can., Tech. Memo. 111.
- Calmels, F., & Roy, L.-P. (2015). *Vulnerability of the North Alaska Highway to Permafrost Thaw, a Field Guide and Data Analysis*. Whitehorse: Northern Climate Exchange, Yukon Research Center, Yukon College.
- Canadian Geographic. (n.d.). *Le grand Nord : Arctique et Taïga*. Retrieved 2015, from [http://www.canadiangeographic.ca/atlas/themes.aspx?id=artic&sub=artic\\_features\\_permafrost&lang=Fr](http://www.canadiangeographic.ca/atlas/themes.aspx?id=artic&sub=artic_features_permafrost&lang=Fr)
- Comité français pour les techniques routières. (2004). *Premier bilan de l'application des nouvelles circulaires de la direction des routes sur l'uni longitudinale et l'adhérence des chaussées*. Paris: Cfte-info.
- Comités techniques AIPCR. (2016). *Plan stratégique 2016-2019*.
- Corté, J.-F. (1999). *Exigences d'uni pour les chaussées : Évolution et conséquences*. Porto: Symposium international sur l'impact environnemental des défauts d'uni des routes, 22 au 23 mars 1999,.
- Direction du laboratoire des chaussées. (2004). *Traitement de surface sur route gravelée, Volume 9 Numéro 3*. Québec: Info DLC.
- Doré, & Zubeck. (2008). *Cold Region Pavement Engineering*. ASCE Press.
- Doré, G. (1997). *Détérioration des chaussées en conditions de gel : une nouvelle approche prévisionnelle*. Québec: Thèse Université Laval.
- Doré, G. (2011). *Note du cours Advanced course on permafrost engineering applied to transportation infrastructure*. Whitehorse.
- Doré, G., & Beaulac, I. (2007). *Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation*. Québec: Université Laval.
- Encyclopaedia Britannica. (2013, Juillet 21). *Thermokarst - Geology*. Retrieved Mai 28, 2015, from <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/591638/thermokarst>
- Flamand, M. (2000). *Prédiction de la détérioration hivernale de l'uni à partir de la variabilité du sol d'infrastructure*. Québec: Université Laval.
- Fradette, N., Doré, G., Pierre, P., & Hébert, S. (2005). Evolution of Pavement Winter Roughness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1913*, 137-147.
- Fradette, N., Doré, G., Pierre, P., & Hébert, S. (2005). Evolution of Pavement Winter Roughness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1913*, 137-147.
- French, H. (1996). *The periglacial environment* (2e édition ed.). Londres: Longman.
- Goering, D. J. (2004). *Arctic heat and mass transfer*. University of Alaska-Fairbanks, Departement of Mechanical engineering.
- Gruber, S. (2014). *Alpine Permafrost Index Map*. (U. d. Zurich, Producer) Retrieved from [http://www.geo.uzh.ch/microsite/cryodata/PF\\_map\\_explanation.html](http://www.geo.uzh.ch/microsite/cryodata/PF_map_explanation.html)
- Heginbottom, J. (1995). *Canada: Permafrost. National Atlas of Canada*. Ressources naturelles Canada.
- Hesami, R. (2009). *Signal Processing Approach to Road Roughness Analysis and Measurement*. Australia: Centre for Sustainable Infrastructure Swinburne University of Technology .
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design Second edition*. Lexington: Université du Kentucky.
- INFO DLC. (2010). *Étude de la gélivité sur chaussée existantes*. Québec: Transport Québec.

Konrad, J.-M., & Morgenstern, N. (1981). *The segregation potential of freezing soil*. Revue Canadienne de Géotechnique.

Laboratoire central des ponts et chaussées. (2000). *Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques*. Paris: LCPC.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (2009, Juillet). *Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques. Méthode d'essai des Ipc n°46*.

Linell, K. A. (1973). Long-term effects of vegetative cover on permafrost stability in an area of discontinuous permafrost. *Paper presented at the 2nd International Conference on Permafrost*. Yakutsk, USSR.

M. Harris, J., Roach, B., & Codur, A.-M. (2014). *L'économie du changement climatique mondial*. Medford, MA: Global Development and Environment Institute - Tufts University.

Martel, N. (2001). *Étude du soulèvement au gel des fissures routières en présence de sel de déglacage*. Université Laval. Québec: Mémoire de l'Université Laval.

McGregor, Doré, Hayley, Wilkins, Hoeve, Grozic, et al. (2010). *Guidelines for development and management of transportation infrastructure in permafrost regions*. Transportation Association of Canada.

Ministère des Transports du Québec. (2007). *Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples*. Transport Québec.

Ministère des Transports du Québec. (2016). *Tome II Normes du Ministère des Transports du Québec*.

Nelson, F., & Hinkel, K. (2003). *Methods for measuring active-layer thickness*. Université du Delaware.

Organisation de coopération et de développement économiques. (1984). *Caractéristiques de surface des revêtements routiers : leur interaction et leur optimisation*. Paris: Organisation de coopération et de développement économiques.

Osterkamp, T., & Burn, C. (2003). *Permafrost*. Université d'Alaska à Fairbanks et Université de Carleton à Ottawa.

Pavemetrics. (2015). Retrieved from <http://www.pavemetrics.com/fr/lcms.html>

Ressources naturelles Canada. (2013). *Pergélisol*. Retrieved from <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/sciences/pergelisol-glace-neige/pergelisol/10991>

Robitaille, A., & Allard, M. (1996). *Guide pratique d'identification des dépôts de surface aux Québec (notions élémentaires de géomorphologie)*. Québec: Les publications de Québec.

Samson, C. (2015). Yukon : Freiner la fonte du pergélisol le long de la route de l'Alaska. *Ici Radio-Canada*.

Sayers, & Karamihas. (1998). *The Little Book of Profiling*. Ann Harbor: Université du Michigan.

Sayers, M., & Karamihas, S. (1996). *Interpretation of Road Roughness Profile Data*. Ann Arbor: The University of Michigan Transportation Research Institute.

Smith, S. L., & Burgess, M. M. (2004). *Sensitivity of permafrost to climate warming in Canada*.

Smith, S. (2010). *Tendances relatives aux conditions du pergélisol et à l'écologie dans le Nord du Canada*. Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada.

St-Laurent, D. (2010). Dimensionnement des chaussées souples - Méthodes du MTQ. *Formation technique Bitume Québec*. Montréal.

The Finnish Road Structures Research Programme 1994-2001. (1998). *TPPT Symposium Proceeding*. Espoo.

Transportation Research Board. (1996). *Landslides investigations and mitigation*. National Research Council.

Vaillancourt, M. (2004). *Méthodologie de modélisation de l'uni des chaussées souples et impact des sols d'infrastructure*. Montréal: École de technologie supérieure.

Vaillancourt, Perraton, Dorchies, & Doré. (2003). *Décomposition du pseudo-profil et analyse de l'indice de rugosité international (IRI)*. Québec: CNRC Canada.

Voyer, É. (2009). *Expérimentation de méthodes de mitigation de la dégradation du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik, Nord du Québec*. Thèse Université Laval.

Wei, L., Fwa, T. F., & Zhe, Z. (2005, Février). Wavelet Analysis and Interpretation of Road Roughness. *Journal of Transportation Engineering*.

Williams, P. J., & Smith, M. W. (1991). *The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology*. Cambridge University Press.

Zanasi, L. (2015). *Wikimedia*. Retrieved 2015, from [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alaska\\_Highway1.png#/media/File:Alaska\\_Highway1.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alaska_Highway1.png#/media/File:Alaska_Highway1.png)

## Annexe

## Annexe 1 : Résultats aux 100 m des analyses de l'IRI

Tableau 11 : Résultats aux 100 m des différentes analyses de l'IRI pour la section 369-1

Segment/ Longueurs d'onde	Moyenne des résultats aux 100 m						
	$\Delta$ IRI (m/km)	Différence de profil (m/km)		Rapport d'IRI		Différence d'IRI (m/km)	
		1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m
100 m	2,10	3,26	2,39	1,43	1,98	1,08	1,30
200 m	1,02	2,75	1,93	1,02	1,82	0,05	1,09
300 m	<b>1,68</b>	<b>3,63</b>	<b>2,40</b>	<b>1,10</b>	<b>1,70</b>	<b>0,38</b>	<b>1,31</b>
400 m	<b>1,50</b>	<b>3,12</b>	<b>1,23</b>	<b>1,58</b>	<b>1,59</b>	<b>0,92</b>	<b>0,51</b>
500 m	<b>1,90</b>	<b>4,01</b>	<b>2,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,97</b>	<b>0,60</b>	<b>1,11</b>
600 m	<b>2,87</b>	<b>4,40</b>	<b>3,47</b>	<b>1,12</b>	<b>1,90</b>	<b>0,31</b>	<b>1,54</b>
700 m	0,57	3,57	1,43	1,24	1,41	0,50	0,42
800 m	1,02	5,26	1,50	1,17	1,59	0,48	0,57
900 m	<b>3,33</b>	<b>3,26</b>	<b>3,14</b>	<b>1,20</b>	<b>2,59</b>	<b>0,39</b>	<b>1,83</b>
1000 m	<b>4,04</b>	<b>6,17</b>	<b>5,10</b>	<b>1,18</b>	<b>1,81</b>	<b>0,67</b>	<b>1,81</b>
1100 m	0,66	2,80	1,21	1,07	1,78	0,14	0,48
1200 m	0,60	4,34	1,50	1,06	1,29	0,18	0,32

Tableau 12 : Résultats aux 100 m des différentes analyses de l'IRI pour la section 369-2

Segment/ Longueurs d'onde	Moyenne des résultats aux 100 m						
	$\Delta$ IRI (m/km)	Différence de profil (m/km)		Rapport d'IRI		Différence d'IRI (m/km)	
		1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m
100 m	1,30	1,01	0,72	1,64	2,76	0,42	0,63
200 m	1,47	0,94	0,89	1,15	2,27	0,12	0,75
300 m	1,10	0,82	0,56	1,33	1,30	0,22	0,31
400 m	0,35	0,76	0,16	1,48	1,12	0,26	0,04
500 m	0,60	1,04	0,37	1,68	2,07	0,38	0,22
600 m	<b>1,86</b>	<b>1,52</b>	<b>1,85</b>	<b>2,34</b>	<b>2,44</b>	<b>0,80</b>	<b>1,20</b>
700 m	<b>2,01</b>	<b>1,72</b>	<b>1,13</b>	<b>2,30</b>	<b>3,78</b>	<b>0,82</b>	<b>0,90</b>
800 m	<b>1,84</b>	<b>1,73</b>	<b>1,31</b>	<b>1,89</b>	<b>3,95</b>	<b>0,66</b>	<b>1,08</b>
900 m	<b>1,41</b>	<b>1,54</b>	<b>1,25</b>	<b>1,82</b>	<b>2,52</b>	<b>0,59</b>	<b>0,80</b>
1000 m	<b>1,51</b>	<b>1,96</b>	<b>1,58</b>	<b>1,78</b>	<b>3,44</b>	<b>0,65</b>	<b>1,13</b>
1100 m	1,27	1,73	0,87	2,54	2,91	0,92	0,63
1200 m	0,69	1,53	0,67	2,08	1,24	0,71	0,11
1300 m	0,29	1,18	0,56	1,45	1,35	0,28	0,14
1400 m	1,93	1,17	1,53	0,89	2,41	-0,09	0,89
1500 m	0,22	0,92	0,79	1,07	1,14	0,05	0,12
1600 m	0,62	1,08	1,09	1,03	1,77	0,03	0,40
1700 m	1,69	1,46	1,10	1,63	3,59	0,47	0,79

Tableau 13 : Résultats aux 100 m des différentes analyses de l'IRI pour la section 367-1

Segment/ Longueurs d'onde	Moyenne des résultats aux 100 m						
	$\Delta$ IRI (m/km)	Différence de profil (m/km)		Rapport d'IRI		Différence d'IRI (m/km)	
		1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m	1 à 3 m	8 à 12 m
100 m	0,70	1,73	0,99	1,26	1,12	0,39	0,16
200 m	1,56	2,62	1,05	1,46	1,70	0,61	0,76
300 m	1,50	3,10	2,33	1,35	2,40	0,56	1,28
400 m	1,59	1,93	0,78	2,99	2,10	1,14	0,45
500 m	2,11	2,54	1,02	2,38	1,95	1,23	0,50
600 m	2,83	3,86	1,79	1,53	2,82	0,96	1,45
700 m	2,04	2,31	1,62	1,96	2,14	0,91	0,79
800 m	1,69	1,92	1,17	2,74	1,96	1,15	0,56
900 m	1,19	1,94	0,98	2,16	1,89	0,82	0,48
1000 m	1,93	2,90	0,88	3,25	1,51	1,76	0,35
1100 m	1,55	2,06	1,15	2,23	1,64	1,04	0,41
1200 m	1,95	3,50	2,17	1,39	1,92	0,79	0,93
1300 m	1,21	3,43	1,69	1,32	1,44	0,64	0,46
1400 m	1,62	2,26	1,56	2,21	1,29	1,11	0,35
1500 m	3,16	3,87	1,49	2,94	1,77	2,23	0,58
1600 m	2,23	3,40	1,19	2,21	1,22	1,63	0,19
1700 m	3,24	4,19	1,00	2,67	1,82	2,35	0,54

## Annexe 2 : Comparaison de la méthode d'analyse de profils transversaux

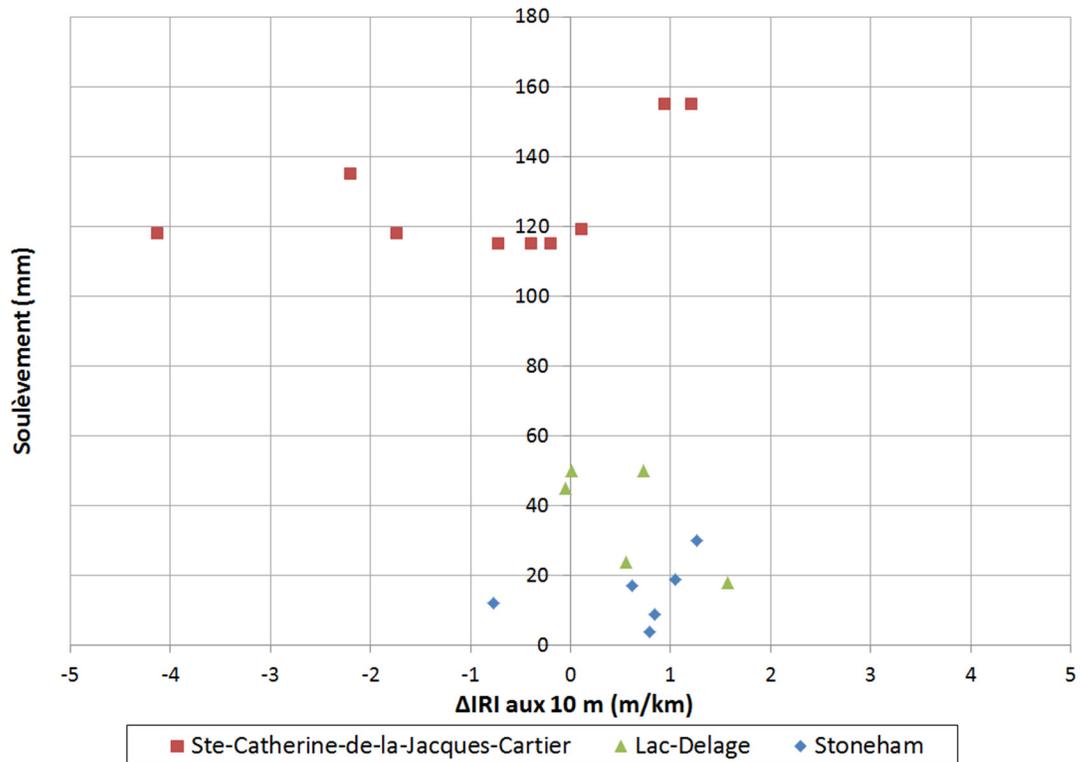


Figure 85 : Soutèvement en fonction du  $\Delta$ IRI aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

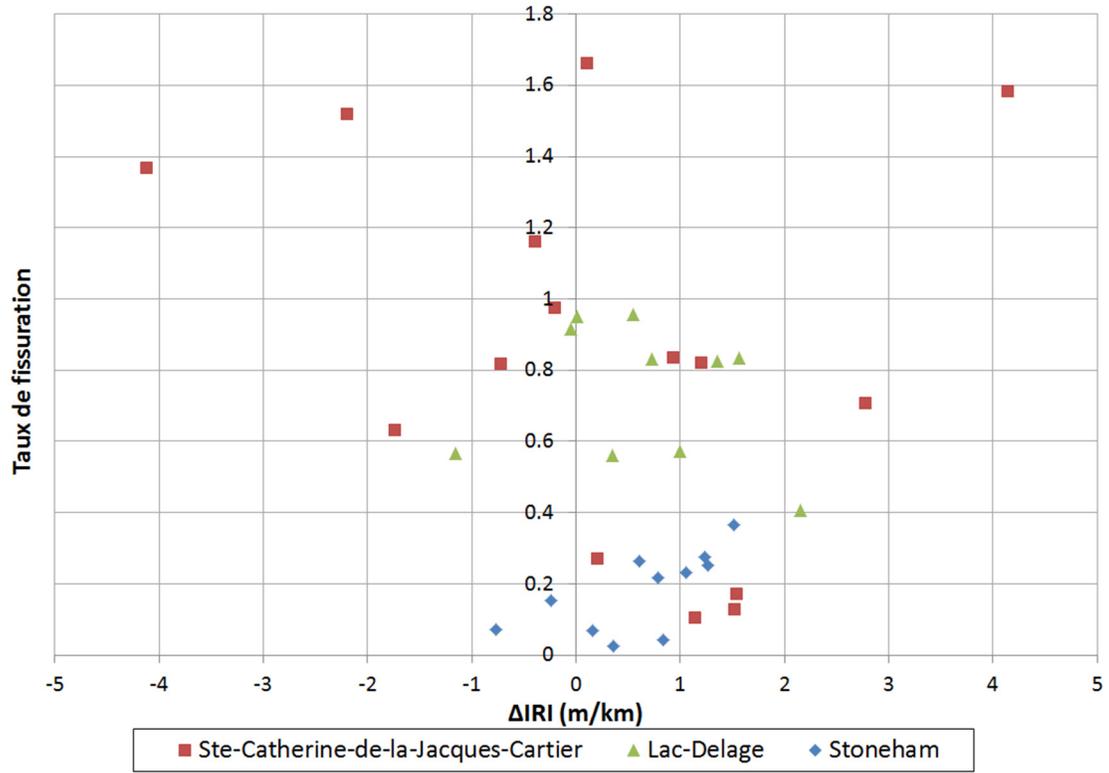


Figure 86 : Taux de fissuration pondéré en fonction du ΔIRI aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

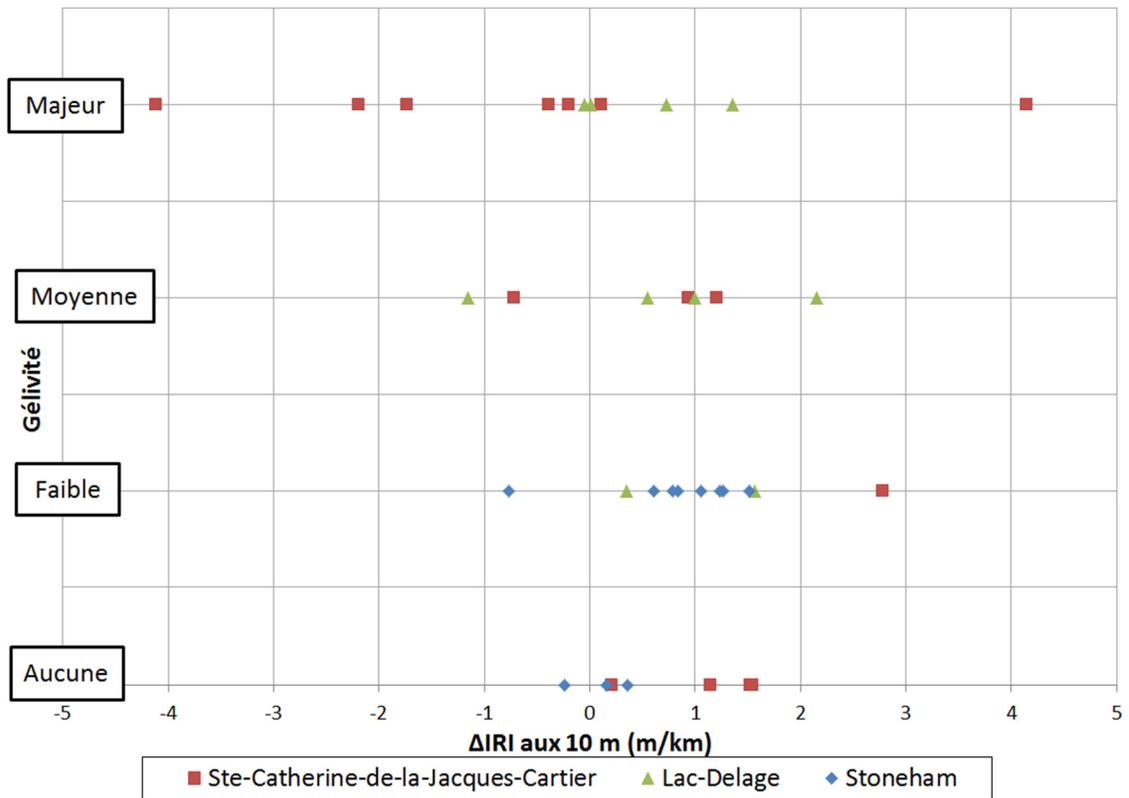


Figure 87 : Type de gélivité en fonction du  $\Delta$ IRI aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

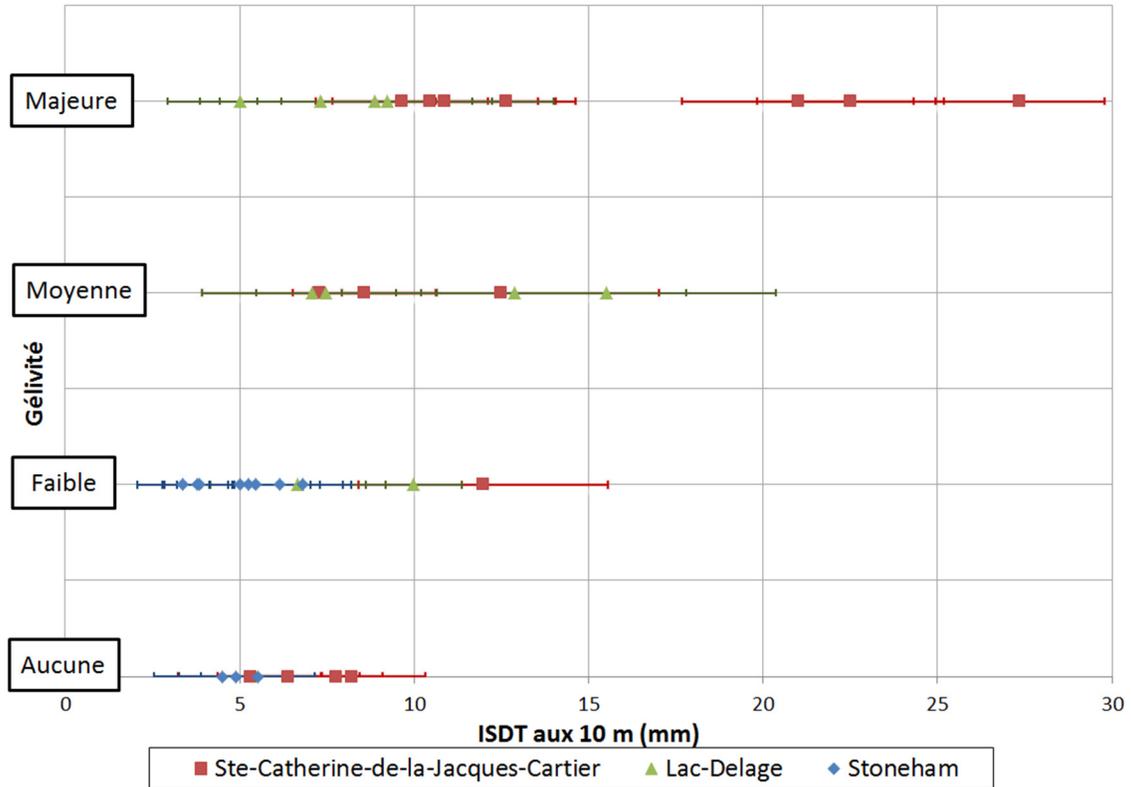


Figure 88 : Type de géivité en fonction de l'ISDT et de son écart type aux 10 m des trois sections expérimentales de la MRC de la Jacques-Cartier

### Annexe 3 : Sections vulnérables au dégel du pergélisol sur l'Alaska Highway

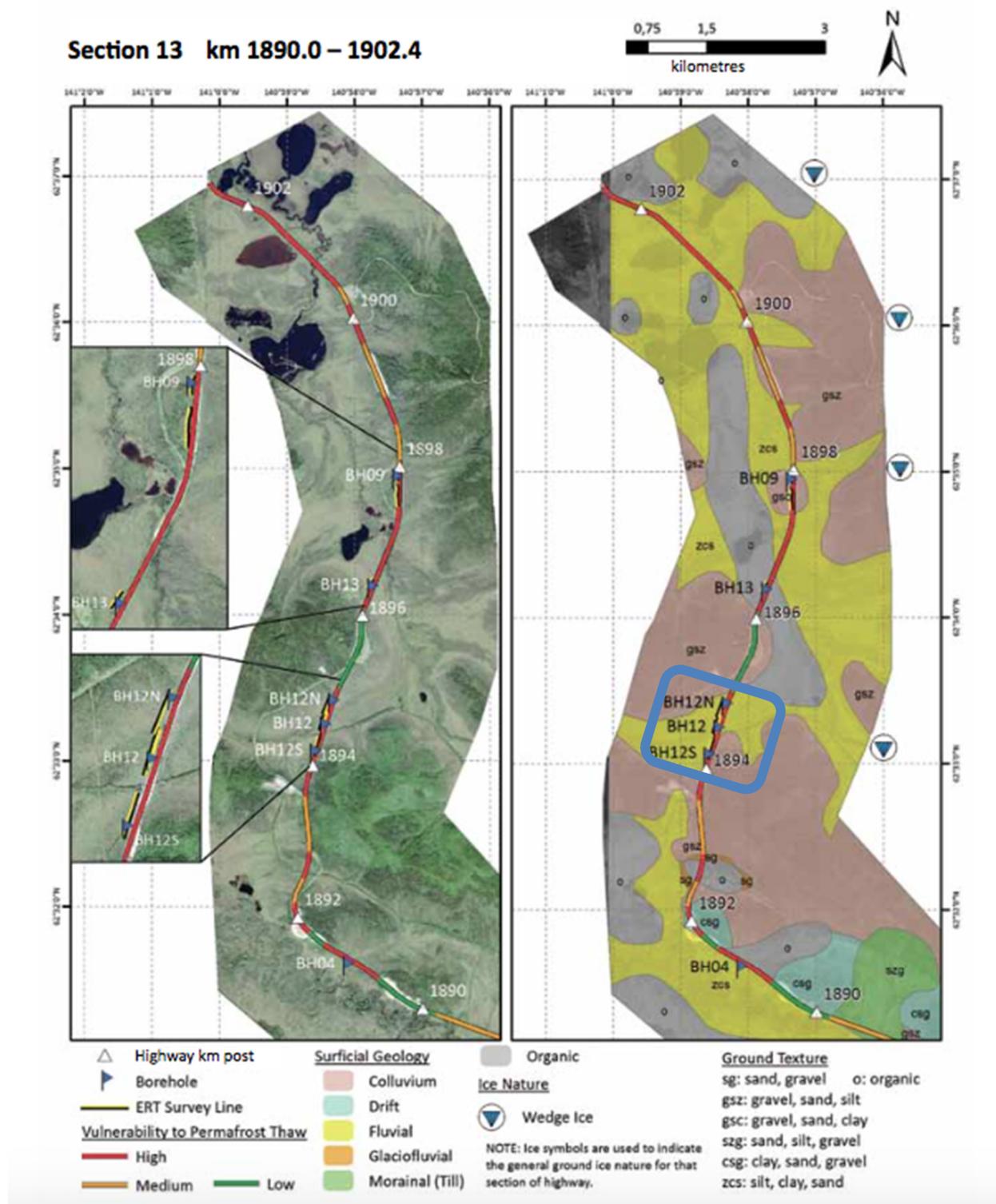


Figure 89 : Carte de la vulnérabilité au dégel du site d'étude du drainage (Calmels & Roy, 2015)

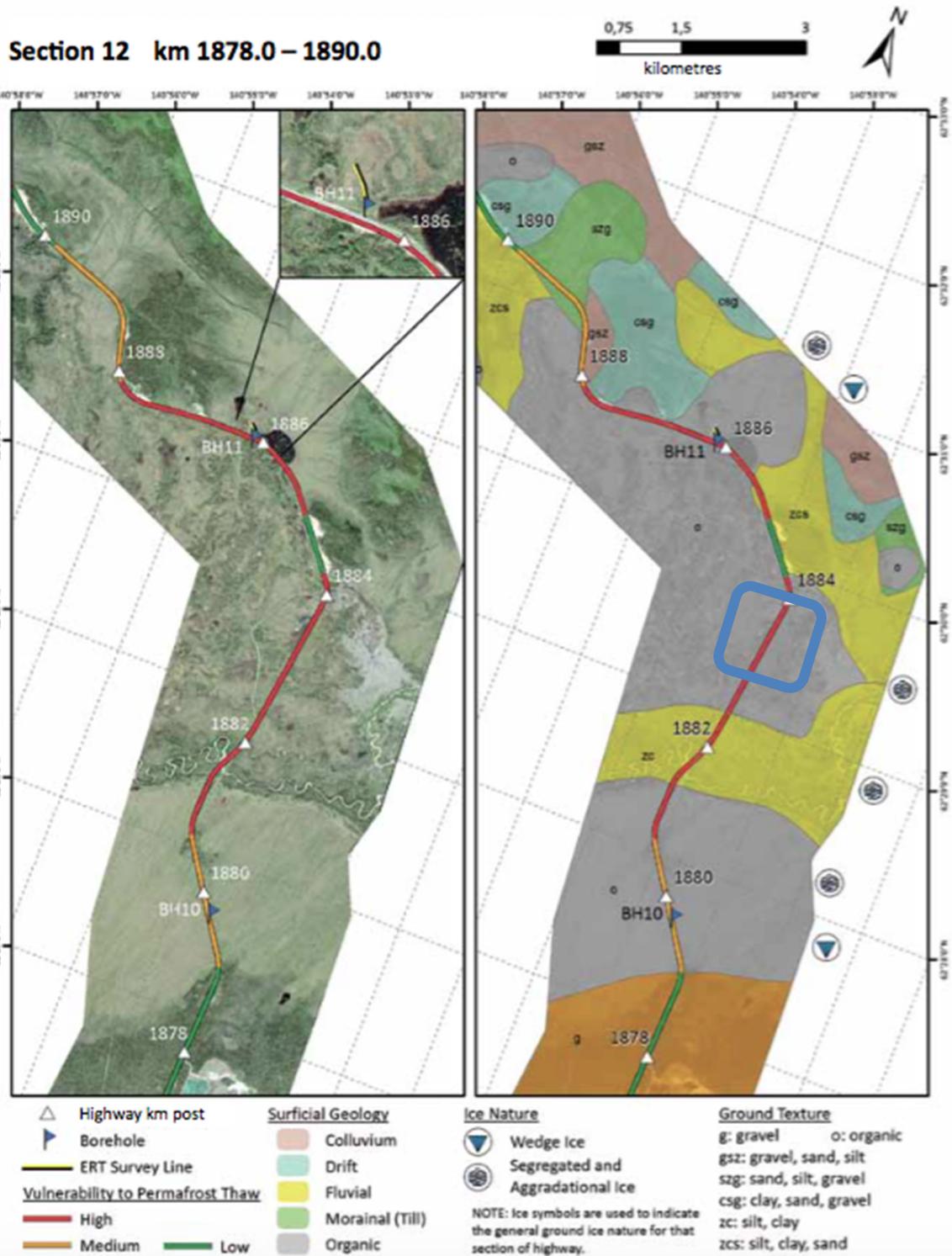
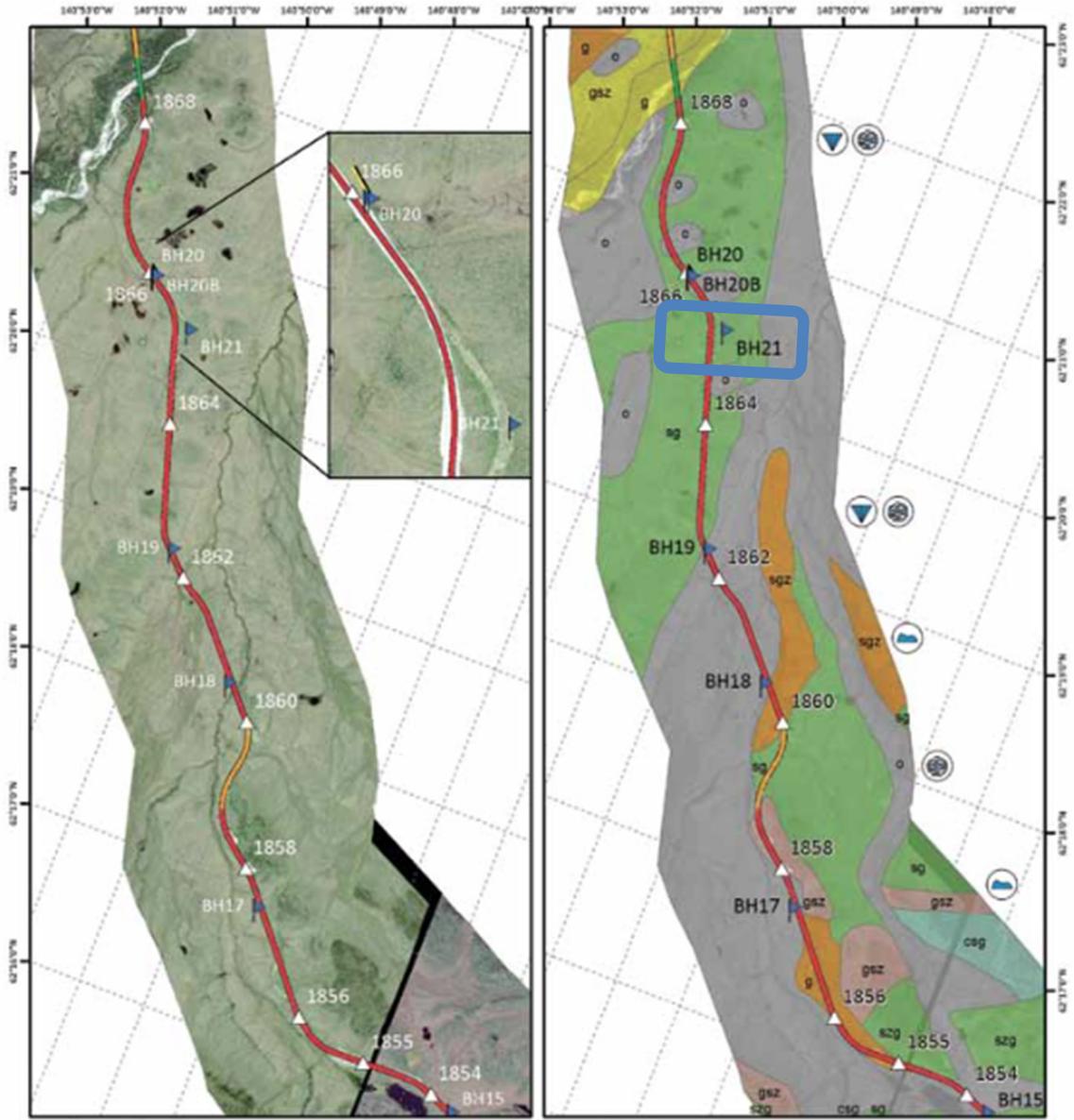
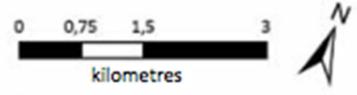


Figure 90 : Carte de la vulnérabilité au dégel de la section de Mirror Creek (Calmels & Roy, 2015)

Section 10 km 1855.0 – 1868.0



- |  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>△ Highway km post</li> <li>▬ Borehole</li> <li>— ERT Survey Line</li> <li><b>Vulnerability to Permafrost Thaw</b></li> <li>— High</li> <li>— Medium</li> <li>— Low</li> </ul> | <p><b>Surficial Geology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Colluvium</li> <li>Drift</li> <li>Fluvial</li> <li>Glaciofluvial</li> <li>Morainal (Till)</li> </ul> | <p><b>Ice Nature</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Wedge Ice</li> <li>Segregated and Aggradational Ice</li> <li>Buried Ice</li> </ul> | <p><b>Ground Texture</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>g: gravel</li> <li>sg: sand, gravel</li> <li>gsz: gravel, sand, silt</li> <li>szg: sand, silt, gravel</li> <li>sgz: sand, gravel, silt</li> <li>csg: clay, sand, gravel</li> </ul> |
|--|---|--|--|

NOTE: Ice symbols are used to indicate the general ground ice nature for that section of highway.

Figure 91 : Carte de la vulnérabilité au dégel de la section expérimentale de Beaver Creek (Calmels & Roy, 2015)

## Annexe 4 : Marges d'erreur des $\Delta$ IRI aux sites sur pergélisol

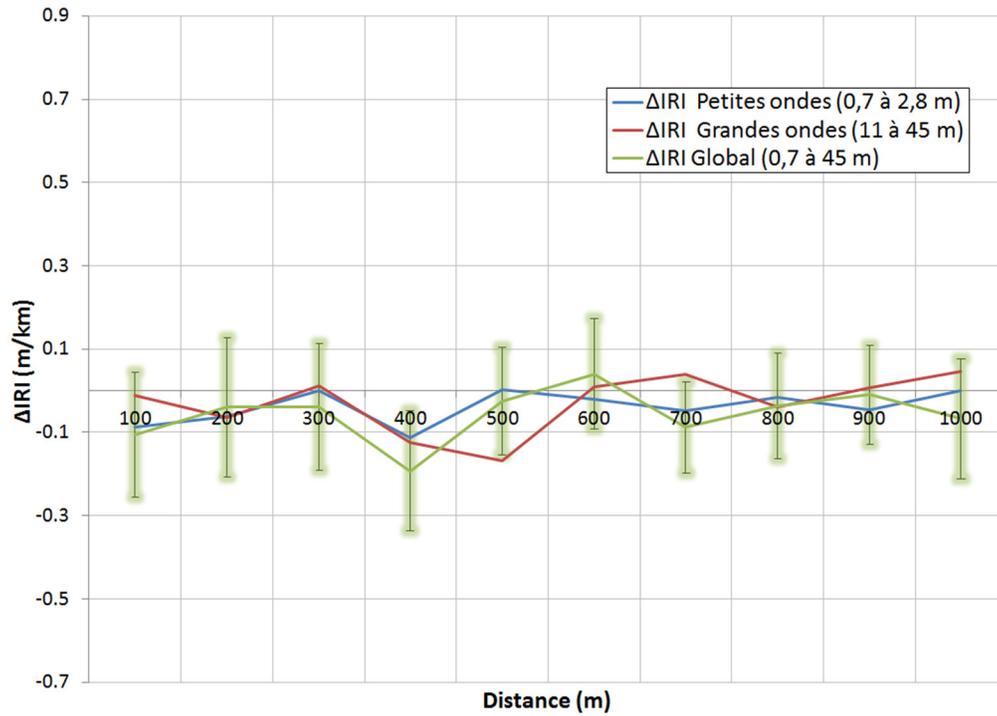


Figure 92 : Graphique des marges d'erreur du  $\Delta$ IRI Global aux 100 m à Haines Junction

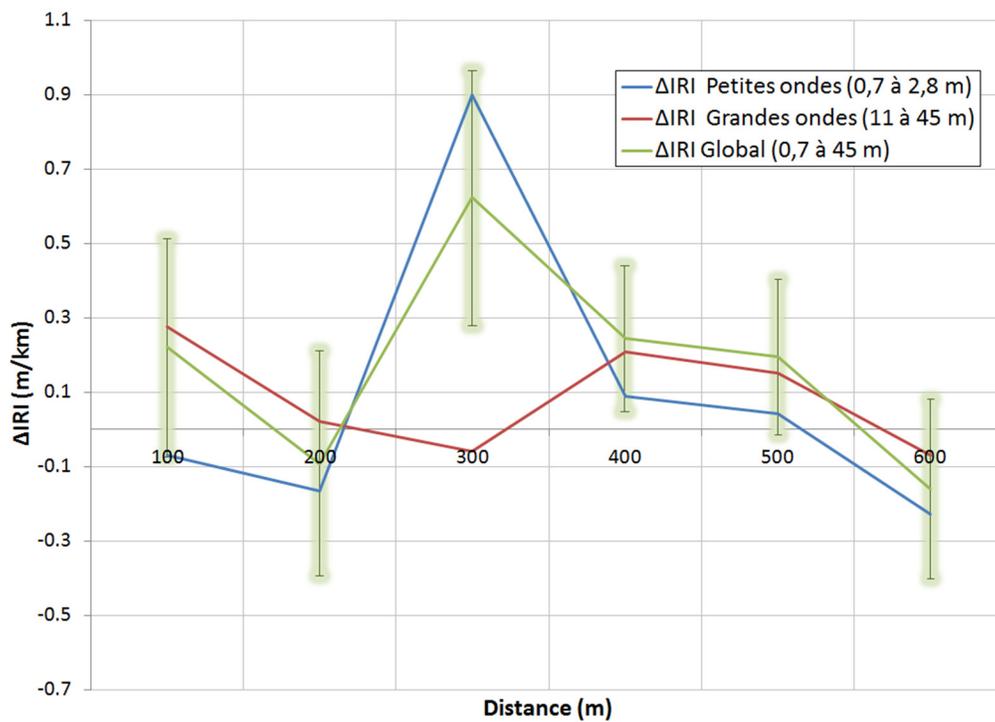


Figure 93 : Graphique des marges d'erreurs du  $\Delta$ IRI Global aux 100 m au site d'étude de drainage

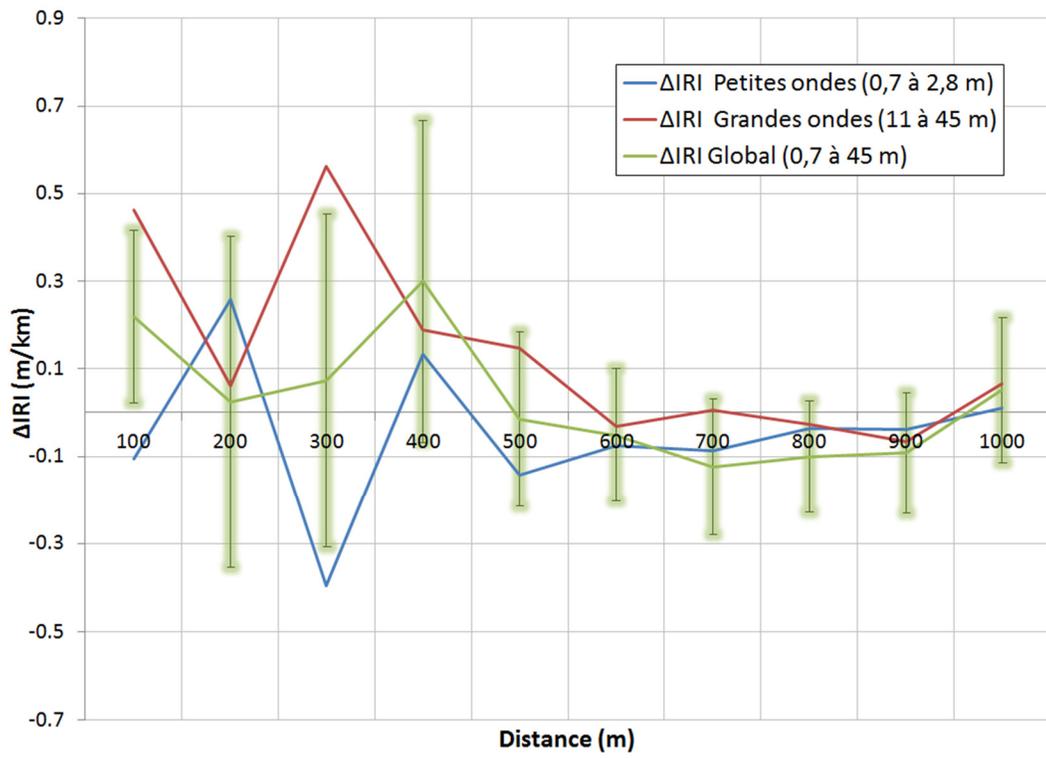


Figure 94 : Graphique des marges d'erreur du  $\Delta IRI$  Global aux 100 m à Mirror Creek