

Université de Montréal

**Utilisation de systèmes d'information géographique
pour l'évaluation des risques liés à la
dégradation du pergélisol.
Étude de cas : Tasiujaq, Nunavik, Québec**

par

Katerine Grandmont

Département de géographie

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de maîtrise
en géographie

Août 2013

© Katerine Grandmont, 2013

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

Utilisation de systèmes d'information géographique pour l'évaluation des risques liés à la
dégradation du pergélisol. Étude de cas : Tasiujaq, Nunavik, Québec

Présenté par :
Katerine Grandmont

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Kathryn Furlong, président rapporteur
Daniel Fortier, directeur de recherche
Jeffrey A. Cardille, codirecteur
Guy Doré, membre du jury

Résumé

Les régions nordiques à pergélisol seront largement affectées par l'augmentation prévue des températures. Un nombre croissant d'infrastructures qui étaient autrefois construites avec confiance sur des sols gelés en permanence commencent déjà à montrer des signes de détérioration. Les processus engendrés par la dégradation du pergélisol peuvent causer des dommages importants aux infrastructures et entraîner des coûts élevés de réparation. En conséquence, le contexte climatique actuel commande que la planification des projets dans les régions nordiques s'effectue en tenant compte des impacts potentiels de la dégradation du pergélisol. Ce mémoire porte sur l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) appliqués à l'évaluation du potentiel d'aménagement des territoires situés en milieu de pergélisol. En utilisant une approche SIG, l'objectif est d'élaborer une méthodologie permettant de produire des cartes d'évaluation des risques afin d'aider les collectivités nordiques à mieux planifier leur environnement bâti. Une analyse multi-échelle du paysage est nécessaire et doit inclure l'étude des dépôts de surface, la topographie, ainsi que les conditions du pergélisol, la végétation et les conditions de drainage. La complexité de l'ensemble des interactions qui façonnent le paysage est telle qu'il est pratiquement impossible de rendre compte de chacun d'eux ou de prévoir avec certitude la réponse du système suite à des perturbations. Ce mémoire présente aussi certaines limites liées à l'utilisation des SIG dans ce contexte spécifique et explore une méthode innovatrice permettant de quantifier l'incertitude dans les cartes d'évaluation des risques.

Mots-clés : Aménagement du territoire, pergélisol, systèmes d'information géographique (SIG), analyse multicritère, changements climatiques

Abstract

Northern regions underlain by permafrost will largely be affected by the projected increase in air temperature. A growing number of structures that were once built with great confidence on perennially frozen soils are already starting to show signs of deterioration. Processes caused by permafrost degradation can cause significant damages to infrastructure and require high costs of repair. The current climatic context therefore commands that the implementation of projects in permafrost regions follows a well-thought planning in order to account for the potential impacts of permafrost degradation. This thesis focuses on the use of geographic information systems (GIS) applied to the identification of the development potential of communities located in permafrost regions. Using a GIS approach, the goal is to develop a methodology to produce risk-assessment maps to help northern communities better plan their built environment. A multi-scale analysis of the landscape is necessary and should include the investigation of surficial deposits, topography, as well as permafrost, vegetation and drainage conditions. The complexity of all the interactions that shape the landscape is such that it is virtually impossible to account for all of them or to predict with certainty the response of the system following disturbances. This research also presents some of the limitations to the use of GIS in this specific context and explores an innovative method for quantifying uncertainty in risk-assessment maps.

Keywords : Land-planning, permafrost, geographic information system (GIS), multi-criteria analysis, climate change

Table des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA RECHERCHE	3
1.1 LE NORD DU QUÉBEC ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	3
1.2 DÉMOGRAPHIE NORDIQUE CROISSANTE.....	6
1.3 CONSTRUCTION EN MILIEU DE PERGÉLISOL.....	7
1.3.1 Exemples de défis en aménagement nordique.....	9
1.4 ANALYSE MULTICRITÈRE.....	10
1.4.1 Analytical Hierarchy Process	11
1.5 CLASSIFICATION INFORMATISÉE DU TERRITOIRE.....	14
CHAPITRE 2. OBJECTIFS, SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES.....	17
2.1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	17
2.2 TERRITOIRE À L'ÉTUDE.....	18
2.2.1 Vue d'ensemble	18
2.2.2 Climat	20
2.2.3 Végétation.....	21
2.2.4 Pergélisol	22
2.3 ORIGINE DES DONNÉES UTILISÉES	23
2.3.1 Travaux de terrain.....	23
2.3.2 Cartographie des facteurs à l'étude	24
CHAPITRE 3. ARTICLE 1.....	27
<i>Abstract</i>	29
<i>Résumé</i>	30
3.1 INTRODUCTION	31
3.2 MULTI-CRITERIA ANALYSIS.....	32
3.3 EVALUATING PERMAFROST SUITABILITY FOR VILLAGE DEVELOPMENT: A CASE STUDY	33
3.3.1 Study site and data.....	33
3.3.2 Methods: Producing a sensitivity map	35

3.4 DISCUSSION	39
3.5 CONCLUSION	42
<i>Acknowledgements</i>	42
CHAPITRE 4. ARTICLE 2	45
<i>Abstract</i>	47
<i>Résumé</i>	48
4.1 INTRODUCTION	49
4.2 STUDY AREA	52
4.3 MATERIAL AND METHODS	54
4.3.1 <i>Suitability factors</i>	54
4.3.2 <i>Developing a best estimate of vulnerability to thaw settlement</i>	57
4.3.3 <i>Estimating the effect of expert confidence on assessments of site vulnerability</i>	58
4.4 RESULTS.....	61
4.4.1 <i>A Single Multi-Criteria Analysis: the Base Map</i>	61
4.4.2 <i>Variability Map: Viewing Uncertainty</i>	62
4.4.3 <i>Combining the Base Map and Variability Map</i>	63
4.5 DISCUSSION	66
4.6 CONCLUSION AND FUTURE DEVELOPMENTS	67
<i>Acknowledgements</i>	69
CHAPITRE 5. DISCUSSION GÉNÉRALE	71
5.1 L'UTILISATION DES SIG EN CONTEXTE DE PERGÉLISOL	71
5.2 SÉLECTION DES PARAMÈTRES	72
5.3 REPRÉSENTATION DE L'INCERTITUDE	73
5.4 DÉVELOPPEMENTS FUTURS.....	74
<i>Comparaison et validation des résultats</i>	75
<i>Raffinement de la méthodologie</i>	75
CONCLUSION.....	77
BIBLIOGRAPHIE	79

Liste des tableaux

TABLEAU 1. EXEMPLE DE MATRICE DE COMPARAISON	13
TABLEAU 2. ÉCHELLE DE COMPARAISON BINAIRE	13
TABLE 3. FACTOR VALUES	37
TABLE 4. ESSENTIAL LIMITS TO REPRESENTING PROCESSES IN COMPUTER MAPPING SYSTEMS, AND THEIR IMPORTANCE IN RESIDENTIAL DEVELOPMENT IN PERMAFROST AREAS.....	41
TABLE 5. FACTOR VALUE RANGES AND THEIR STANDARDIZATION TO A 1:10 SCALE.....	56
TABLE 6. SCALE FOR COMPARING FACTORS IN THE ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS.....	57
TABLE 7. MATRIX FOR EXECUTING THE ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS.....	58
TABLE 8. COMBINING THE BASE MAP AND VARIABILITY MAP	65

Liste des figures

FIGURE 1. LOCALISATION DES DIFFÉRENTES COMMUNAUTÉS DU NUNAVIK ET DISTRIBUTION DU PERGÉLISOL	3
FIGURE 2. ANOMALIES DE LA TEMPÉRATURE PAR RAPPORT À LA NORMALE – ÉTÉ (JUIN, JUILLET, AOÛT) 2012	5
FIGURE 3. ANOMALIES MOYENNES DE TEMPÉRATURE ET TENDANCES LINÉAIRES DE 1948 À 2009 POUR LE CANADA ET LA RÉGION CLIMATIQUE DE LA TOUNDRA ARCTIQUE	6
FIGURE 4. A) BÂTIMENT UNIFAMILIAL NORDIQUE SURÉLEVÉ; B) VÉRIN À VIS AJUSTABLE REPOSANT SUR DES BLOCS DE BOIS ET SUPPORTANT LA STRUCTURE EN ACIER DU BÂTIMENT; C) BÂTIMENT REPOSANT SUR UN RADIER DE QUELQUES MÈTRES D'ÉPAISSEUR	9
FIGURE 5. LOCALISATION DE LA COMMUNAUTÉ INUIT DE TASIUJAO, NUNAVIK, QUÉBEC	19
FIGURE 6. VUE AÉRIENNE OBLIQUE DE LA COMMUNAUTÉ DE TASIUJAO, ORIENTÉE VERS LE NORD (JUILLET 2011)	20
FIGURE 7. ZONES DE VÉGÉTATION ET DOMAINES BIOCLIMATIQUES DU QUÉBEC	21
FIGURE 8. DISTRIBUTION DU PERGÉLISOL DE LA PÉNINSULE QUÉBEC-LABRADOR.....	22
FIGURE 9. STUDY SITE LOCATION	35
FIGURE 10. A) MAP OF THE SENSITIVITY LEVELS GIVEN TO THE SURFICIAL DEPOSITS; B) FINAL SENSITIVITY MAP RESULTING FROM THE MULTI-CRITERIA ANALYSIS	38
FIGURE 11. LOCALIZATION OF NUNAVIK AND THE STUDY SITE	52
FIGURE 12. MAPS FOR THE THREE FACTORS IMPORTANT TO THE THAW SETTLEMENT PROCESS	56
FIGURE 13. UNDERSTANDING THE UNCERTAINTY OF A VULNERABILITY MAP.....	63

Liste des sigles et abréviations

AHP	<i>Analytical hierarchy process</i> (méthode d'analyse multicritère)
CDPDJ	Commission des droits de la personne et des droits de la jeunesse
CEN	Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec
CLP	Combinaison linéaire pondérée
ESRI®	<i>Environmental Systems Research Institute</i> , fournisseur du logiciel de système d'information géographique ArcGIS.
GIS	<i>Geographical information system</i> (Équivalent anglais de « SIG »)
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISQ	Institut de la statistique du Québec
MNA	Modèle numérique d'altitude
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec
SIG	Système d'information géographique

Remerciements

Tout d'abord, un énorme merci à Daniel, mon directeur de recherche, pour m'avoir permis de découvrir cette magnifique région au nord du 55° parallèle et permis de cultiver ma nouvelle passion pour le Nord. Je te suis reconnaissante des opportunités que tu m'as permis de saisir lors de mon passage aux études supérieures. Ensuite, à Jeff, mon codirecteur, merci de m'avoir fait une place dans ton laboratoire, mais surtout, merci pour tes innombrables petits schémas et bouts de papier, ta patience et ta façon singulière de penser et de déconstruire tout problème de façon si simple et hors du commun. Enfin, merci d'avoir cru qu'il était possible de faire l'impossible, contre toutes attentes. Je vous suis tous deux reconnaissante d'avoir pris du temps pour m'encadrer et partager vos connaissances, malgré vos horaires chargés.

À mes collègues de mes deux labos. D'abord, la gente masculine du 440 qui a su rendre certains des moments les plus stressants de ce cheminement beaucoup plus légers et joyeux. Merci de m'avoir donné l'occasion de partager avec vous les joies, mais surtout les frustrations inévitables qui accompagnent l'utilisation d'ArcGIS. Kev, particulièrement, merci pour ta patience envers mes inépuisables questions et ton sens de l'humour absolument tordu. Puis, à tous mes passionnés collègues du Geocryolab, merci pour votre dynamisme, votre gentillesse et votre humour. Je suis ravie d'avoir partagé autant d'expériences de terrain, d'excursions et de conférences en votre merveilleuse compagnie. Votre présence a fait toute la différence!

Un précieux merci à tous ceux qui m'ont tenu compagnie virtuellement, alors que plus d'heures étaient passées devant l'écran que devant des humains. Vous m'avez sans doute sauvée d'une folie certaine.

Merci les Michels pour votre aide et support sur le terrain. Merci Chantal pour ta bonne humeur et ton humour, et surtout ton support infallible même encore aujourd'hui. À Kat,

ma moitié complice depuis le début de cette aventure, merci d'être toi avec tout ce que ça implique de folies. Merci d'être là. Et puis à vous deux, CL et KL, un géant merci pour votre solidarité, alors qu'au moment où l'on croyait que ça ne pouvait être pire, on nous a prouvé que tout était possible.

Finalement, merci à ma famille, à Franco et à mes proches amis pour votre support et votre patience, surtout alors que les mois avant le dépôt semblaient s'ajouter sans fin. Je pourrai finalement vous répondre que c'est terminé!

Introduction

Il y a quelques décennies dans le Nord québécois, les infrastructures de transport et domiciliaires ont été construites dans un contexte de stabilité du pergélisol. Toutefois, les changements du climat qui s'opèrent depuis les deux dernières décennies affectent cette stabilité et menacent l'intégrité des infrastructures. Prendre en compte le dégel potentiel du pergélisol engendré par le réchauffement du climat dans les plans d'aménagement du territoire est donc maintenant primordial. Par ailleurs, les populations du Nord connaissent actuellement une croissance démographique importante et rapide qui commande un vif besoin d'augmentation du nombre d'unités d'habitation.

Les régions à pergélisol sont très actives en termes de processus géomorphologiques et leur dynamique est très sensible aux modifications du climat (French, 2007). La dégradation du pergélisol peut conduire à des processus pouvant avoir un impact important sur la stabilité des sols et leur capacité de portance, tels des tassements au dégel, de la thermo-érosion et des mouvements de masse (Williams & Smith, 1989). Il importe donc de détenir une bonne compréhension des nombreux facteurs qui interagissent au sein du géosystème afin de mieux comprendre les changements qui pourraient potentiellement s'y opérer (Stephani *et al.*, 2013). Dans l'optique de guider les efforts de développement des communautés nordiques situées en milieu de pergélisol, ce mémoire démontre comment l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) peut contribuer à produire des outils d'aide à la décision pour la sélection de terres propices à la construction.

La présente recherche est élaborée autour de l'analyse de cas de la communauté inuit de Tasiujaq, située au Nunavik. Divisé en 5 chapitres, ce mémoire présente d'abord, au chapitre 1, un survol du contexte de la recherche. Au chapitre 2 sont exposés les objectifs et la problématique de la recherche, de même que les principales caractéristiques physiographiques du site à l'étude, et une description de l'origine des

données utilisées dans l'élaboration de ce travail. Les deux chapitres suivants sont présentés sous la forme d'articles scientifiques et constituent le corps de la recherche. Le chapitre 3 décrit la structure d'une analyse multicritère simple et souligne les points forts et les faiblesses reliés à l'utilisation des SIG pour ce genre d'analyse. Le chapitre 4 fait la démonstration du recours à une méthode populaire d'analyse multicritère et aborde la notion d'incertitude dans les résultats. Finalement, le chapitre 5 présente la discussion générale et effectue un retour sur les différents thèmes abordés dans ce travail de recherche.

Chapitre 1. Contexte général de la recherche

1.1 Le nord du Québec et les changements climatiques

La région du Nunavik, située au nord du 55^e parallèle dans la province de Québec, constitue un vaste territoire d'une superficie de 507 000 km² (Association touristique du Nunavik, 2010a). La majorité des communautés inuit installées le long des côtes dans cette région présente la particularité d'être située principalement en zone de pergélisol continu (Figure 1). Ainsi, les variations du climat que l'on constate depuis quelques années ont des répercussions importantes sur la dynamique du pergélisol et conséquemment sur la stabilité des sols.

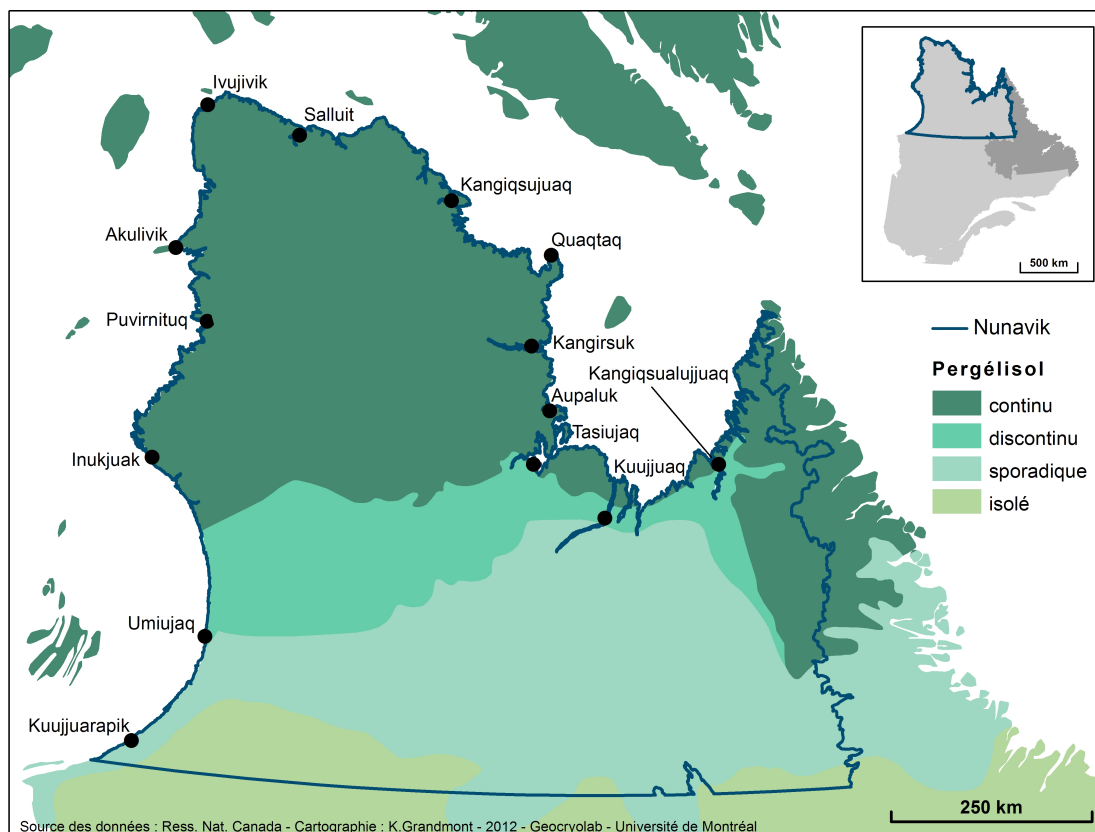


Figure 1. Localisation des différentes communautés du Nunavik et distribution du pergélisol.

Au cours des deux dernières décennies, le climat du Nunavik s'est réchauffé de façon considérable. En réponse à ce réchauffement atmosphérique, la température de la partie supérieure du pergélisol a augmenté d'environ 2°C depuis 1992 (Allard *et al.*, 2007a). Selon les modèles élaborés par Sushama *et al.* (2006), il est estimé que d'ici l'horizon 2050 la température du sol en surface dans la zone de pergélisol continu devrait augmenter de 3 à 6°C dans le nord-est du Canada.

Le pergélisol se définit comme un sol dont la température est égale ou inférieure à 0°C pour plus de deux années consécutives (French, 2007). C'est donc un phénomène thermique, et conséquemment, il est grandement influencé et régulé par les températures de surface. Ainsi, la hausse des températures prévues au cours des prochaines décennies aura un impact important sur la stabilité du pergélisol. Le dégel progressif de la portion habituellement gelée du sol pourrait entraîner des tassements, des problèmes de drainage, des risques accrus de glissements de terrain et une diminution de la capacité de portance des sols.

Des variations à la hausse des températures sont maintenant communément observées à travers le territoire canadien. À titre d'exemple, à l'été 2012, le pays a enregistré une augmentation des températures de 1,9°C au-dessus des normales, lui conférant le rang d'été le plus chaud depuis 1948 (Environnement Canada, 2012), date de début des relevés nationaux. Au cours de cette saison estivale, la majorité des régions du Canada ont enregistré une hausse significative des températures. Dans le nord du Québec, cette hausse s'est traduite par une augmentation de 2 à 3°C au-dessus des normales saisonnières (Figure 2).

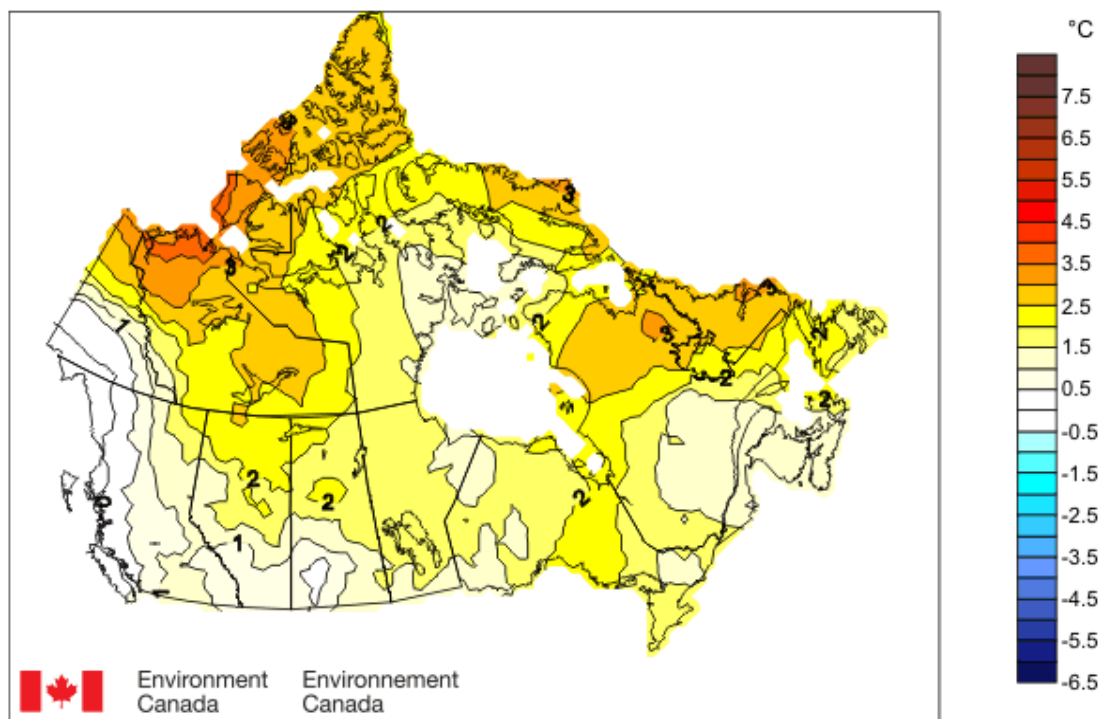


Figure 2. Anomalies de la température par rapport à la normale – Été (juin, juillet, août) 2012 (Environnement Canada, 2012).

Au niveau de la moyenne des températures annuelles, on remarque la même tendance à la hausse, autant pour le pays dans son ensemble, que pour la région climatique de la toundra arctique (Figure 3) qui englobe la majeure partie du Nunavik et du Nord canadien. De façon globale, entre 1948 et 2009, la tendance linéaire des anomalies de température moyennes annuelles révèle une hausse des températures moyennes de 1,4°C. De plus, les données montrent que ce sont les anomalies de réchauffement par rapport à la normale enregistrées au cours des saisons hivernales et printanières qui ont principalement influencé cette tendance à la hausse (Statistique Canada, 2012a).

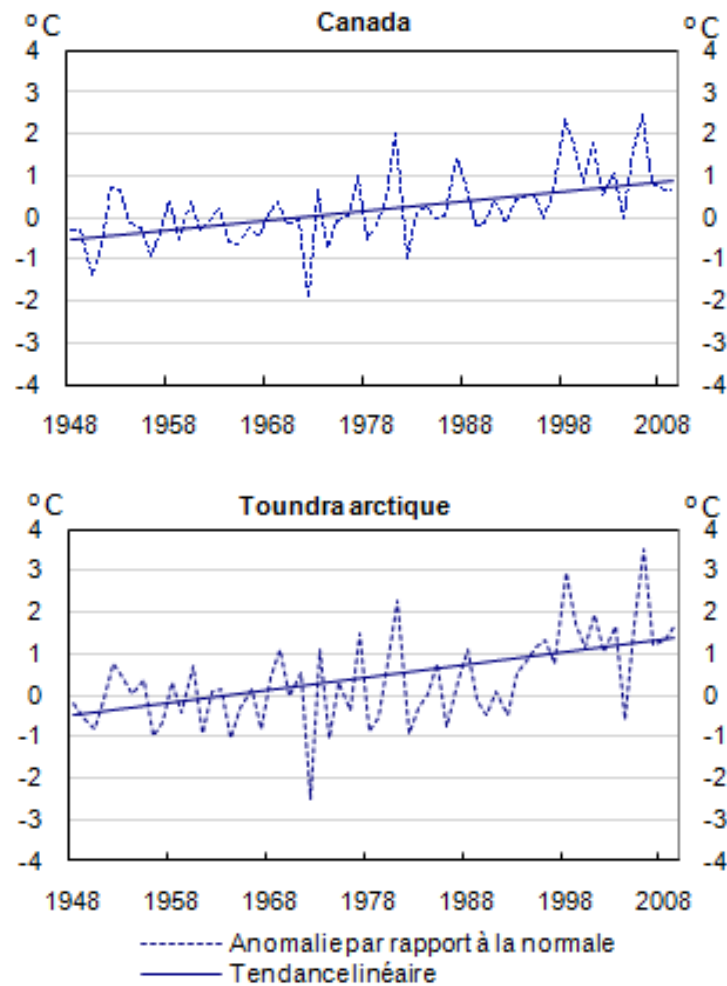


Figure 3. Anomalies moyennes de température (par rapport à la normale calculée pour la période allant de 1961 à 1990) et tendances linéaires de 1948 à 2009 pour le Canada et la région climatique de la toundra arctique. (Statistique Canada, 2012a).

1.2 Démographie nordique croissante

La population du Nunavik est répartie dans 14 villages établis le long des côtes de la Baie d'Hudson, du Détroit d'Hudson et de la Baie d'Ungava (Figure 1). En 2011, la région comptait près de 12 000 individus (ISQ, 2012). La population du Nunavik est particulièrement jeune : en 2011 près de 35% de la population était âgée de moins de 15 ans. Dans le reste de la province, cette catégorie d'âge correspondait à seulement 16% de la population. De même, la population de la région croît doublement plus rapidement

que celle du reste de la province, avec un taux d'accroissement moyen de 8% par opposition à 4% pour le reste du Québec (INSPQ, 2012). Au niveau du logement, on note qu'au cours de la décennie 1996-2006, près de 50% des Inuits de la région habitaient dans des logements surpeuplés, par opposition à 3% pour la population non autochtone du reste du Canada (Statistique Canada, 2009). Cette situation est préoccupante pour la région, puisque cette promiscuité tend à donner naissance à de nombreux conflits intergénérationnels (CDPDJ, 2007). Les besoins en matière de nouvelles habitations sont donc pressants.

1.3 Construction en milieu de pergélisol

L'augmentation des températures qui s'annoncent pour les prochaines décennies aura d'importantes conséquences pour les populations nordiques. Dans un avenir rapproché, les impacts du réchauffement seront particulièrement notables au niveau du régime thermique du pergélisol qui s'avère très vulnérable aux variations de température de l'air (Prowse *et al.*, 2009). Il est donc important de connaître les concepts entourant la dynamique du pergélisol afin de mieux comprendre l'ampleur des risques à considérer lors de la planification du territoire dans les régions nordiques.

En région de pergélisol, la partie du sol qui est gelée en permanence est surmontée de la couche active, qui constitue une couche de sol qui dégèle et regèle chaque année suivant les saisons. Avec l'augmentation des températures, la couche active est appelée à s'approfondir alors que la glace contenue dans le sol fondra progressivement et pourrait ne pas parvenir à regeler au cours de l'hiver suivant, ou encore pourra se reformer, mais présentera une structure différente d'avant son dégel. C'est en grande partie ce phénomène qui entrainera des problèmes au niveau de l'aménagement du territoire. En effet, ce qui confère au pergélisol sa stabilité ce sont les particules de sol gelées qui sont liées entre elles par la glace. Toutefois, dès que la glace fond, cette cohésion est perdue et la capacité de portance du sol diminue (French, 2007). De plus, en raison de la perte de volume de l'eau lors de son passage de la phase solide à la phase liquide, ainsi qu'à

l'expulsion de l'eau interstitielle lors de la consolidation, le dégel des sédiments peut entraîner des déformations du sol qui peuvent être significatives (Nelson *et al.*, 2002). Ce problème est particulièrement important dans les sols riches en glace, mais constitue néanmoins un facteur à prendre en compte même dans les sols non saturés. Par ailleurs, sur des terrains présentant de fortes pentes, le dégel de couches riches en glace peut provoquer des glissements pelliculaires importants et constituer un risque majeur pour l'implantation de bâtiments (Nelson *et al.*, 2002). Le taux et le type de déformation que connaissent les sols gelés sont étroitement liés aux types de dépôts, à la température et à la quantité d'eau et de glace contenues dans le sol. Il est donc nécessaire d'estimer au préalable la profondeur maximale que pourra atteindre la couche active afin d'évaluer le potentiel de déformation qui pourrait affecter le territoire (Instanes, 2003).

Quatre des principaux paramètres à considérer dans la conception des plans d'habitation sont donc la nature des dépôts de surface, la profondeur du dégel saisonnier, la température du pergélisol et la teneur en glace des sédiments. Ces paramètres contrôlent des processus cryogéniques importants tels le fluage, le tassement et le soulèvement gélival. Comme les propriétés physiques et mécaniques des sols gelés sont étroitement liées à la température, on remarque les changements les plus importants alors que la température se situe à 1 ou 2 degrés du point de fusion. De même, la résistance des sols gelés diminue de façon importante dès que la température du sol s'élève au-dessus de 0°C (Instanes, 2003).

Cette problématique représente un défi de taille pour les communautés nordiques dans le contexte climatique actuel. Afin de composer avec cette réalité, un des principaux concepts de construction en milieu de pergélisol consiste à conserver le sol à son état gelé. Parmi les techniques utilisées les moins coûteuses pour la construction résidentielle, on note le recours, sous les maisons, aux radiers composés de matériel non-gélif d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à quelques mètres et permettant de compenser le dégel que le bâtiment pourrait engendrer (Figure 4 C). De même, des

vérins à vis ajustables (Figure 4 A et B) permettant de surélever les bâtiments du sol sont couramment utilisés afin d'éviter que la chaleur du bâtiment ne soit transférée directement au sol et ne modifie le régime thermique du pergélisol sous-jacent (U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force, 2003).



Figure 4. A) Bâtiment unifamilial nordique surélevé; B) Vérin à vis ajustable reposant sur des blocs de bois et supportant la structure en acier du bâtiment; C) Bâtiment reposant sur un radier de quelques mètres d'épaisseur.

1.3.1 Exemples de défis en aménagement nordique

Quelques brefs exemples suffisent à attester de l'ampleur de la problématique de la construction en région de pergélisol dans le nord du Québec. La confrontation à des

événements fâcheux et des dommages importants est parfois l'élément déclencheur de la prise de conscience des conséquences possibles d'une mauvaise évaluation des caractéristiques du territoire ou des mauvaises techniques de construction utilisées. À Tasiujaq par exemple, l'ancien garage municipal construit à même le sol sur une dalle de béton a dû être abandonné suite à l'affaissement du plancher et à la déformation des portes, le rendant inutilisable (Allard *et al.*, 2007b). Sur de nombreuses structures, il est fréquent d'observer des signes de déformations sous forme de fissures. De même, des dépressions sur les routes asphaltées sont fréquentes, tout comme celles qui affectent certaines pistes d'atterrissage et qui doivent continuellement être remblayées par mesure de sécurité. Finalement, le cas du village de Salluit, communauté inuit située au nord du Nunavik, a pour sa part fait l'objet d'une étude approfondie (Allard *et al.*, 2004). Installé sur un sol composé d'argiles marines riches en glace et confiné à un territoire restreint entre deux collines rocheuses, une partie du village a dû être déménagée suite à un glissement de terrain pelliculaire en 1998. Cet exemple, tout particulièrement, démontre que des études approfondies sur la nature du territoire et des propriétés du pergélisol sont indispensables afin d'élaborer des plans d'aménagement cohérents prenant en compte la réalité du territoire dans le contexte des changements climatiques qui pourraient avoir un fort impact sur la fréquence d'événements similaires.

1.4 Analyse multicritère

Le recours à des analyses multicritères permet de prendre en compte de nombreuses variables afin d'aider à la prise de décision. Dans le contexte de l'aménagement du territoire, ces analyses sont couramment couplées à l'utilisation d'un SIG puisque ces systèmes possèdent des capacités d'analyse, de gestion et d'automatisation hautement performantes qui sont grandement utiles pour ce type de travail (Drobne et Lisec, 2009). Une approche couramment utilisée afin d'effectuer des analyses multicritères au moyen d'un SIG est la combinaison linéaire pondérée (CLP), qui standardise, compare, puis combine les critères choisis (Kêdowidé, 2010). Suite à l'attribution d'un poids pour

chacun de ces derniers en fonction de leur importance relative dans le problème étudié, les critères sont additionnés pour produire une carte de vulnérabilité ou de capacité d'accueil. La CLP permet d'obtenir un large éventail de nuances d'acceptabilité pour le territoire, par opposition à une décision binaire simple, plus rigide, qui partage l'espace en zones strictement bonnes ou mauvaises (Eastman *et al.*, 1995). Ainsi, comme tous les critères sont évalués en fonction de leur valeur relative, un faible résultat obtenu pour un critère peut être compensé par un résultat très fort pour un autre critère en fonction des poids qui leur sont accordés. La notion de compromis est donc intégrée à la classification, comparativement à l'obtention de résultats très absolus pouvant être obtenus par l'utilisation d'une méthode binaire (Kêdowidé, 2010).

1.4.1 *Analytical Hierarchy Process*

Une méthode très populaire dans la catégorie des CLP est l'*Analytical Hierarchy Process* (AHP) développée par T.L. Saaty à la fin des années 1970. Couramment utilisée pour de nombreux problèmes requérant une prise de décision, certains ont même souligné que cette méthode avait révolutionné la façon de résoudre des problèmes complexes (Saaty et Sodenkamp, 2010). D'inspiration simple, elle permet l'analyse de situations complexes en guidant l'utilisateur dans la décomposition du problème et l'identification des critères importants (Saaty, 1984). L'AHP permet d'obtenir les poids et de comparer des critères de nature différente (Store & Kangas, 2001). Elle offre la possibilité de mettre en relation des données autant qualitatives que quantitatives et de prendre en compte l'opinion de nombreux acteurs. Les résultats de chacune des analyses peuvent ensuite être comparés et menés à une évaluation des consensus si nécessaire (Higgs, 2006).

Le processus requiert d'abord de déterminer les critères à prendre en compte selon l'étude en cours. Puis, ces derniers doivent être classés en fonction de leur importance dans le problème étudié. Au moyen d'une matrice de comparaison (Tableau 1), les critères sont alors comparés deux à deux à l'aide de l'échelle des valeurs présentée au

Tableau 2.

Cette technique permet de mieux évaluer l'importance des critères par rapport aux autres en effectuant la comparaison envers un seul critère à la fois. Le calcul des vecteurs propres de chaque critère permet ensuite d'obtenir le poids qui doit leur être attribué et permet de détecter les erreurs de jugement lors de leur priorisation (Tudes & Yigiter, 2010). Des scripts disponibles en ligne ont été développés par Marinoni (2004) et par Boroushaki (ESRI, 2008) afin d'effectuer ces analyses de façon rapide et automatisée avec le logiciel ArcGIS®.

Pour chacun des pixels de la carte matricielle composant le territoire à l'étude, la valeur de chacun des critères est multipliée par son poids, et ce, pour toutes les alternatives étudiées. Puis, pour obtenir le résultat final de l'analyse qui permet de guider la prise de décision, la méthode généralement utilisée consiste à effectuer une sommation des résultats, comme le démontrent les études de Dai *et al.* (2001), Lamelas *et al.* (2009) et Tudes & Yigiter (2010).

Parallèlement, l'AHP permet aussi de tester les poids accordés aux critères en les faisant varier et en comparant ensuite les résultats obtenus (Store & Kangas, 2001). Chen *et al.* (2009 et 2010) ont poussé plus loin cet aspect en développant un outil pour le logiciel ArcGIS® permettant précisément d'évaluer la sensibilité des poids accordés aux critères. Il permet d'évaluer la sensibilité du modèle et d'obtenir une représentation spatiale des variations à l'échelle du territoire étudié. Selon les résultats, cette analyse peut inciter l'opérateur à réévaluer la distribution des priorités qu'il a accordées à ses critères.

Tableau 1. Exemple de matrice de comparaison (d'après Marinoni, 2004).

Critères	C1	C2	C3	Poids
C1	1	4	5	0,687
C2	0,25	1	0,5	0,127
C3	0,2	2	1	0,186

1

où *C1*, *C2* et *C3* représentent les critères évalués

Tableau 2. Échelle de comparaison binaire (d'après Saaty, 1984).

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
Réciproques	Si l'activité <i>i</i> se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'activité <i>j</i> , <i>j</i> a donc la valeur réciproque lorsqu'on la compare à <i>i</i>

Au compte des faiblesses de l'AHP, Drobne et Lisec (2009) soulignent un problème concernant la standardisation des critères. La procédure qui permet de comparer les facteurs sur une même base est relativement imprécise, en ce sens qu'elle dépend beaucoup de l'évaluation de l'analyste. Il soulève aussi un problème relativement à la grande plage de classification qu'il est possible d'obtenir par l'AHP. Il souligne le manque de seuil entre chacune de ces catégories, ce qui peut potentiellement mener à une mauvaise interprétation des résultats.

De très nombreuses études nécessitant le recours à des analyses multicritères ont été réalisées dans diverses régions du monde à l'aide de la méthode AHP. Les domaines d'études sont aussi très variés : Dai et al. (2001) ont utilisé l'AHP pour la planification de l'utilisation du territoire en Chine; Moffett *et al.* (2006) pour l'identification de zones de conservation en Namibie; Ying *et al.* (2007) l'ont quant à eux utilisée pour l'évaluation de la qualité de l'environnement en Chine; Yahaya (2008) afin d'identifier de zones vulnérables aux inondations; et Sharifi *et al.* (2009) pour la sélection de sites d'enfouissement de matières dangereuses en Iran. Quant aux études en milieu de pergélisol utilisant la méthode AHP, elles portent principalement sur la mise en place et le maintien des réseaux de transport (routes, voies ferrées, pipelines), par exemple Jin *et al.* (2008) qui ont évalué les conditions de pergélisol sur l'autoroute et chemin de fer Qinghai-Tibet en Chine.

1.5 Classification informatisée du territoire

Bien que les études d'utilisation du territoire fassent de plus en plus usage de méthodes d'analyse assistées par ordinateur, encore peu d'études se sont penchées sur le développement d'une méthode informatisée de classification du territoire en milieu de pergélisol à des fins domiciliaires. La notion de pergélisol constituant une caractéristique distinctive majeure qu'il prévaut de tenir en compte dans la conception des plans d'aménagement, le recours à des méthodes élaborées en d'autres contextes s'avère insuffisant. Une des premières études à être élaborée dans ce contexte spécifique

a été réalisée par Solomon-Côté (2005) dans le cadre de ses travaux de maîtrise, alors qu'il a développé une méthode de classification du territoire en vue de l'aménagement du village de Salluit au Nunavik. Sa méthode consistait à évaluer la capacité d'accueil du territoire en fonction de trois facteurs limitatifs à la construction domiciliaire, soit les glissements de terrain, l'érosion thermique et les tassements du sol. Sa classification a été réalisée à l'aide du logiciel géomatique MapInfo™ et visait à déterminer si cette méthode permettait de produire une cartographie semblable à celle réalisée manuellement par des experts. Sa méthode est innovatrice, mais contient un biais arbitraire quant à l'attribution des valeurs et des poids. En effet, les valeurs attribuées aux critères ne correspondent pas à une même échelle préétablie et il est donc difficile de les comparer entre eux. De même, la méthode d'analyse multicritère utilisée pour ce projet se base sur une technique empruntée au domaine de l'hydrogéologie qui n'est que partiellement adaptée au contexte de pergélisol.

Une autre étude portant sur la même communauté inuit a été réalisée par une équipe du Centre d'études nordiques de l'Université Laval (CEN). Allard et L'Hérault (2010) ont travaillé, quelques années plus tard, à déterminer le potentiel d'aménagement de la communauté en fonction des conditions de pergélisol et des pentes. Ils ont développé une méthode de pondération permettant d'attribuer une valeur à chaque catégorie de dépôts de surface en fonction de leur seuil de pente critique respective, puis ont multiplié ces valeurs par les pentes. Pour compléter l'étude, des zones de contraintes sévères ont été ajoutées à l'analyse afin d'éliminer intégralement des zones devant être évitées avec certitude. Il en résulte une carte claire présentant le potentiel d'aménagement du territoire subdivisé en trois classes de potentiel de construction. Bien qu'efficace, cette méthode nécessite toutefois une connaissance approfondie des caractéristiques spécifiques du territoire étudié afin de permettre une évaluation adéquate des conditions de pergélisol à l'échelle de la zone à l'étude. Les travaux en régions nordiques étant souvent coûteux, ce critère est souvent difficile à satisfaire.

Néanmoins, ces deux méthodes de classification semi-informatisée sont novatrices dans le contexte du développement domiciliaire en milieu de pergélisol. Elles considèrent toutes deux non seulement la problématique de construction en milieu de pergélisol, mais intègrent aussi des facteurs multiples à leurs analyses. Elles s'avèrent donc être un excellent point de départ pour développer une analyse similaire appliquée au contexte de Tasiujaq.

Chapitre 2. Objectifs, site d'étude et données

2.1 Problématique et objectifs de la recherche

La situation sociale et climatique qui se dessine pour les prochaines décennies pour la région du Nunavik, et dont les impacts sont déjà visibles dans plusieurs communautés, complexifie considérablement l'aménagement du territoire. La nécessité de produire des outils d'aide à la décision pour les communautés locales est non seulement bien réelle, mais aussi pressante. Conséquemment, il apparaît nécessaire d'identifier les zones propices à la construction d'habitations et d'infrastructures en tenant compte des changements anticipés dans la stabilité du pergélisol. De façon générale, la construction de nouveaux bâtiments dans ces milieux climatiques particuliers est précédée d'une évaluation approfondie du territoire réalisée par des ingénieurs et des experts en pergélisol. Ces spécialistes se basent principalement sur leurs connaissances du milieu à l'étude, de même que sur différentes analyses réalisées sur le terrain et en laboratoire. Ces méthodes requièrent toutefois une quantité importante de données ou alors doivent se restreindre à la seule zone visée par le projet, ce qui, dans un cas comme dans l'autre, s'avère coûteux pour des études couvrant de grands territoires.

Dans cette optique, l'objectif principal de ce projet de recherche consiste à explorer l'utilisation de SIG afin de développer une méthode semi-informatisée de classification du territoire en milieu de pergélisol. Réalisée à l'aide d'un logiciel d'analyse spatiale, cette analyse vise à produire une carte permettant l'identification de zones qui même avec la hausse des températures resteront suffisamment stables pour supporter des infrastructures au moins jusqu'à l'horizon 2050. Loin de chercher à substituer au travail des experts, l'intérêt pour l'élaboration d'une telle méthode vise plutôt à définir un cadre de travail qui permette de réaliser des analyses de premier niveau. Ces dernières pourraient ensuite servir de guides pour une évaluation initiale des territoires considérés pour l'aménagement et ainsi constituer une base de travail pour les experts œuvrant à la

planification du territoire en milieu de pergélisol.

La présente recherche a fait partie d'un projet de plus grande envergure de stratégie d'adaptation aux changements climatiques pour le Nord canadien constituant une *Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale* (ICAR) de Ressources naturelles Canada. Ce projet de deux ans, entamé au printemps 2010, visait à soutenir l'adaptation des communautés nordiques aux changements climatiques, plus spécifiquement en caractérisant le pergélisol et le territoire de certaines communautés visées du Nunavik afin de les guider dans le développement de leur environnement bâti. Il s'est effectué en collaboration avec le CEN de l'Université Laval et a été financé par le Consortium Ouranos, ainsi que par l'Institut national de santé publique (INSPQ) via le Fonds vert.

2.2 Territoire à l'étude

2.2.1 Vue d'ensemble

Le territoire à l'étude est le village inuit de Tasiujaq situé sur la côte ouest de la baie d'Ungava, dans le nord de la province de Québec, au Nunavik (58°42'N, 69°56'O) (Figure 5 et Figure 6). Il est situé à une centaine de kilomètres au nord-ouest de Kuujuaq. Le nom de la localité signifie en inuktitut « qui ressemble à un lac » et désigne de ce fait l'ensemble du lac et de la baie aux Feuilles en marge desquels il est installé. Ancien lieu de postes de traite au début des années 1900, le village a été officiellement créé au milieu des années 1960, non loin des anciens postes. Il fut principalement construit afin d'accueillir des familles venant de Kuujuaq, alors que cette jeune communauté connaissait une popularité croissante qui eut vite fait de rendre insuffisante les ressources fauniques de la région (Association touristique du Nunavik, 2010b). La communauté de Tasiujaq compte aujourd'hui environ 300 habitants dont l'âge médian était, en 2011, d'un peu moins de 20 ans (Statistique Canada, 2012b). Le village est construit sur les rives de la baie Profonde, à l'embouchure de la rivière Bérard. L'amplitude des marées y est la plus importante au monde, alors qu'elles

dépassent régulièrement les 15 mètres, ce qui explique l'immense étendue de la zone d'estran parsemée de blocs de taille métrique à proximité du village (Vinet, 2008).

Tasiujaq 58°42'N - 69°56'O

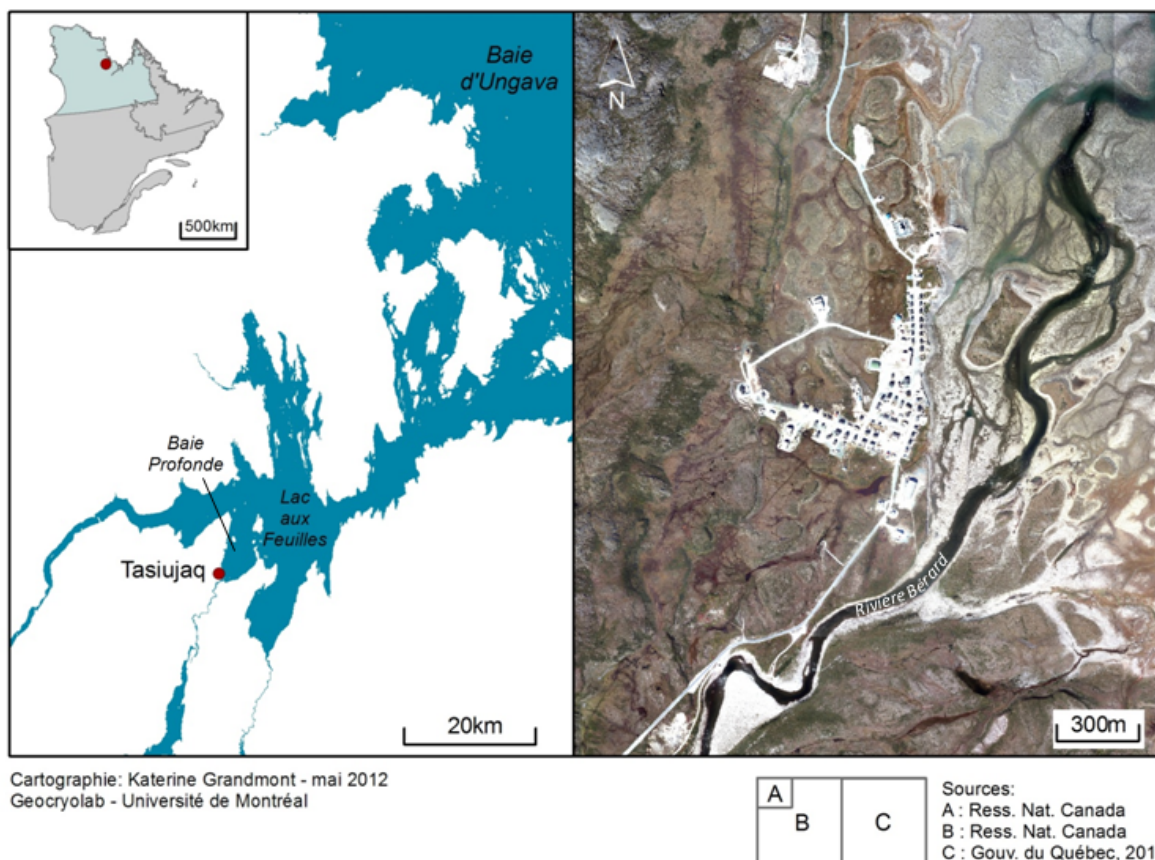


Figure 5. Localisation de la communauté inuit de Tasiujaq, Nunavik, Québec.

Le paysage entourant la communauté de Tasiujaq est caractérisé par une série de terrasses marines et fluviales formées dans des dépôts d'origine multiple (glaciaires, marins, fluvioglaciaires, littoraux, estuariens et fluviales) au cours de l'Holocène (Allard *et al.*, 2007a). De façon générale, la plaine où se situe le village est caractérisée par des dépôts intertidaux composés de silts, de sables, de lits de graviers et de blocs (Allard *et al.*, 2007b). Dans la zone à l'étude, peu de massifs rocheux émergent des dépôts meubles. Un seul en importance est situé à l'ouest du village bâti. Des travaux de

terrain effectués à l'été 2010 ont révélé la présence d'argiles en bordure de la rivière, de même qu'au sud du village, ce qui laisse supposer qu'une couche de dépôts fins argileux pourrait être présente sous une bonne partie du village (Fortier *et al.*, 2011). Ces travaux ont aussi permis de conclure que les dépôts recouvrant la zone occupée par le village sont spatialement hétérogènes et donc qu'ils présentent une complexité importante pour l'élaboration d'une cartographie des dépôts de surface.



Figure 6. Vue aérienne oblique de la communauté de Tasiujaq, orientée vers le nord (juillet 2011).

2.2.2 Climat

Selon les données des normales climatiques d'Environnement Canada (2011), la moyenne annuelle des températures de l'air à Kuujuaq, communauté la plus près où sont enregistrées les données, était de -5.7°C pour la période 1971-2000. Les températures les plus chaudes sont en juillet et août, et les plus froides durant les mois de janvier et février.

Une équipe du CEN effectue pour sa part un suivi des températures de l'air depuis 2002 à l'aéroport de Tasiujaq, à quelques kilomètres au sud du village. Selon les données recueillies entre 2002 et 2009 (Sarrazin *et al.*, 2010), c'est durant les mois d'hiver (décembre à mars) que la variabilité dans l'amplitude des températures est la plus importante. De façon générale, on constate que le mois d'octobre est un mois de transition où les températures oscillent au-dessus et en dessous du point de congélation. Le printemps débute généralement entre les mois de mai et juin, alors que le cumul des degrés-jour de dégel augmente progressivement.

2.2.3 Végétation

Le village de Tasiujaq se situe dans une zone de transition, à la frontière entre deux zones bioclimatiques. Selon la carte des *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec* (MRNF, 2003) (Figure 7), la communauté est située dans la zone de végétation arctique et le domaine de la toundra arctique arbustive, tout juste au nord de la limite de la zone de végétation boréale et du domaine de la toundra forestière.

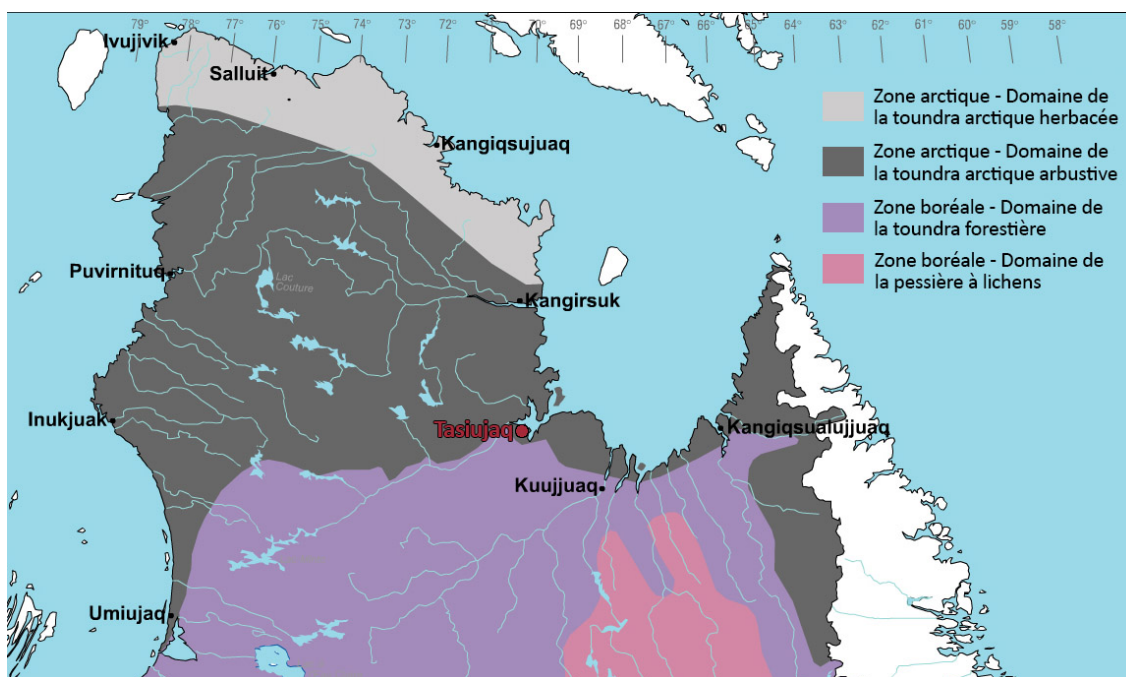


Figure 7. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec (adapté de MRNF, 2003).

La végétation observable dans les environs de la communauté inclut des saules et des bouleaux nains pouvant atteindre jusqu'à deux mètres de hauteur en quelques rares endroits, des plantes herbacées, de même que des mousses et des lichens.

2.2.4 Pergélisol

Tout comme la distribution de la végétation, la distribution du pergélisol est principalement contrôlée par les facteurs climatiques. Cette distribution est donc changeante en fonction des modifications à moyen et long terme du climat. La communauté est située à la frontière entre deux types de pergélisol (Figure 8), soit de type continu au nord et discontinu et répandu au sud.

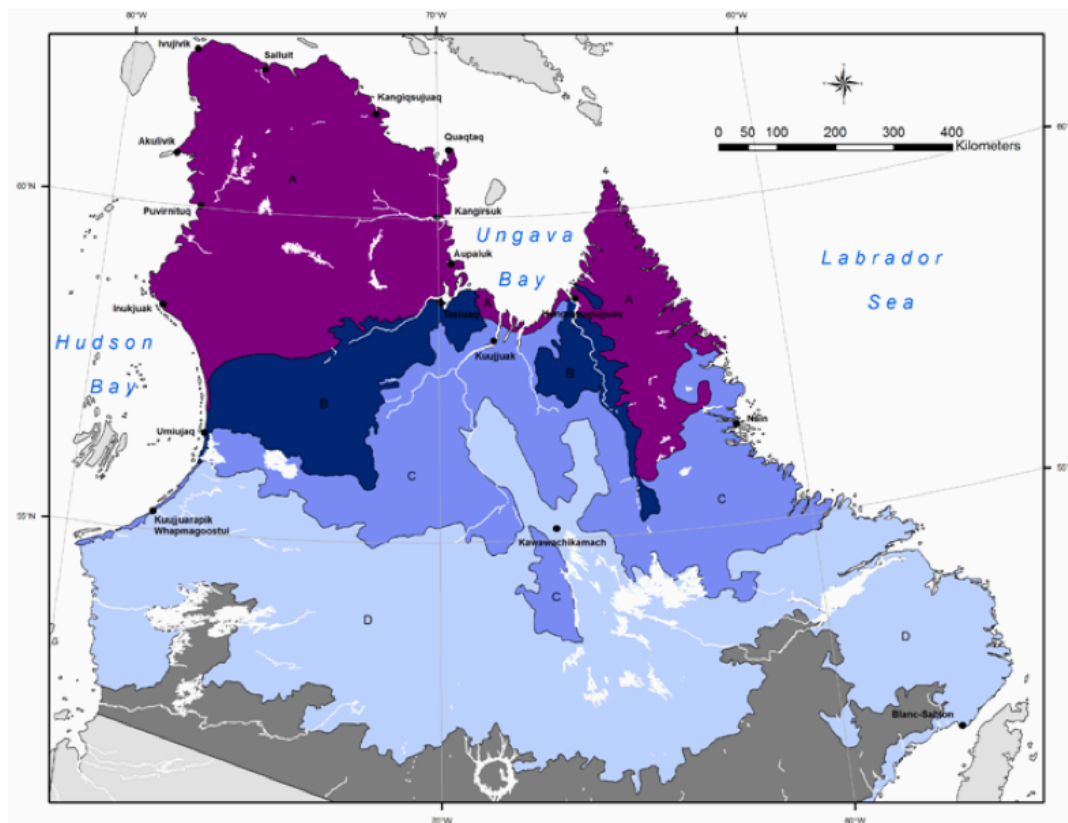


Figure 8. Distribution du pergélisol de la péninsule Québec-Labrador. A) Pergélisol continu; B) Pergélisol discontinu et répandu; C) Pergélisol discontinu et dispersé; D) Pergélisol sporadique; En gris foncé : îlots isolés de pergélisol. (tiré de Allard *et al.* 2012)

Les résultats des excavations réalisées en août 2010 montrent que la profondeur de la couche active est variable pour une même journée en différents endroits en périphérie du village. En bordure de la zone habitée, deux excavations présentaient une couche active de 145 cm d'épaisseur, alors qu'une autre au centre du village atteignait 170 cm. Près de l'aréna, en bordure de la rivière, la couche active était de 300 cm, alors que près de la descente de bateaux, plus au nord, le plafond du pergélisol n'a pas été atteint après une excavation de 450 cm de profondeur.

Une autre équipe du CEN a suivi les variations de température du sol naturel en bordure de la piste d'atterrissage de Tasiujaq entre 1993 et 2006 (Allard *et al.* 2007a). Les données montrent qu'à 11 mètres de profondeur, la température du sol a augmenté de 1,3°C au cours de cette période. En relation avec ce réchauffement, la profondeur de la couche active à cet endroit est passée de 0,4 à 0,7 mètres.

2.3 Origine des données utilisées

Plusieurs processus géomorphologiques ont une influence sur la stabilité des sols au dégel dans le contexte climatique actuel. Pour le présent projet, le potentiel de mouvements de masse et de tassement au dégel des sols ont été sélectionnés afin d'être évalués à l'aide des facteurs suivants : la nature des dépôts de surface, la teneur en glace du sol, les conditions de drainage et les pentes. Les données utilisées pour caractériser chacun de ces facteurs, afin de rendre possible leur intégration à l'analyse, proviennent de sources diverses.

2.3.1 Travaux de terrain

Deux campagnes de terrain ont été tenues, une à l'été 2010 et l'autre à l'été 2011, au cours desquelles des données de base ont été recueillies pour ce projet. Les travaux ont été concentrés principalement à proximité de l'environnement bâti de la communauté. Au cours de la première campagne, des forages superficiels à l'aide d'une pelle mécanique, ainsi que des sondages de surface à la pelle et à la tarière ont été effectués

afin d'identifier la nature des dépôts de surface et la profondeur du front de dégel. L'identification des affleurements rocheux et des mesures de l'épaisseur des dépôts jusqu'au roc ont aussi été effectuées. Les excavations à la pelle mécanique ont permis de récolter des échantillons de sol qui ont été analysés en laboratoire afin de déterminer la nature des dépôts, la quantité d'eau dans les dépôts et les propriétés géotechniques et géothermiques du pergélisol. De nombreuses observations de l'environnement ont aussi été colligées et géoréférencées, tel le type de végétation, la qualité du drainage, l'orientation et le degré des pentes ou encore les formes de terrain. Au cours de la seconde campagne, certains endroits ont été revisités afin de confirmer les informations récoltées l'année précédente. Sept forages sous le plafond du pergélisol, dans une zone de dépôt intertidal, ont été réalisés à l'aide d'une foreuse portative dans le but de préciser les données des excavations et des sondages superficiels réalisés à l'été 2010. Les données recueillies sur le terrain ont subséquentement été regroupées et organisées dans une table Excel® pour ensuite être importées dans le logiciel d'analyse spatiale ArcGIS®. Ces données ont permis d'obtenir une vue d'ensemble des unités de terrain du territoire à l'étude et de mieux comprendre l'organisation spatiale des dépôts de surface de même que leur mise en place. Ces informations sont cruciales dans la détermination des zones à risques et ont permis de rendre compte de la complexité de la zone à l'étude.

2.3.2 Cartographie des facteurs à l'étude

Les cartes thématiques présentant les facteurs étudiés ont été produites à l'aide du logiciel ArcGIS® et ArcMap® version 9.3 et 10.0 (par ESRI®). La zone de l'environnement bâti actuel a été exclue de l'analyse dû à l'impossibilité de recueillir des données précises à l'aide de forages et de sondages dans le milieu naturel situé sous les remblais du village. De plus, le principal intérêt consistait à orienter les travaux d'expansion du village actuel, donc dans les zones encore non-bâties.

Dépôts de surface et teneur en glace

Les données de base utilisées pour la cartographie des dépôts de surface proviennent des travaux de Allard *et al.* (2007b) réalisés dans le cadre d'un projet de cartographie des conditions de pergélisol des communautés du Nunavik. La cartographie des dépôts de surface utilisée pour ce projet a été élaborée en combinant cette cartographie morpho-sédimentologique de Tasiujaq aux informations recueillies sur le terrain, et en effectuant la photo-interprétation de photographies aériennes du site à l'étude.

Le manque de données portant sur la teneur en glace du sol dans la zone étudiée a nécessité la combinaison de ce facteur à celui des dépôts de surface. En effet, les quelques forages profonds qui ont été réalisés aux cours des campagnes de terrain étaient majoritairement situés dans le même type de dépôt. Cette association s'explique et se justifie par le fait que la granulométrie des dépôts de surface et leur teneur potentielle en glace sont relativement bien corrélées. Ainsi, une granulométrie fine (silt, argile) est hautement plus susceptible de contenir de la glace qu'un dépôt plus grossier (par exemple des graviers) (Andersland & Ladanyi, 2004).

Drainage

Les données initiales ayant trait au drainage sont issues d'une cartographie préliminaire des conditions de drainage réalisée par une étudiante au doctorat de l'Université Laval (Tania Gibéryen). Cette cartographie a été raffinée à l'aide de la photo-interprétation de photographies aériennes et des données d'observation du terrain tirées des campagnes de terrain.

Pentes

Finalement, la carte thématique des pentes a été dérivée d'un modèle numérique d'altitude (MNA) produit par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF, 2004). Ce MNA à l'échelle 1:2000 date de 2004 et présentait les données d'élévation les plus précises au moment de produire ce mémoire. Pour la zone à l'étude, les pentes présentaient des valeurs entre 0 et 38 degrés.

Chapitre 3. Article 1

Titre : *Multi-criteria analysis with geographic information systems in changing permafrost environments: Opportunities and limits*

Auteurs : Katerine Grandmont, Daniel Fortier et Jeffrey A. Cardille

Ce 1^{er} article a été publié dans le cadre de la *Quinzième conférence internationale sur l'ingénierie des régions froides* en août 2012. Il présente une approche basée sur l'utilisation d'un SIG appliqué à l'identification de la vulnérabilité du terrain au tassement au dégel pour la communauté de Tasiujaq. Il met aussi l'accent sur certains des défis propres à l'utilisation efficace des SIG pour la gestion résidentielle dans les régions à pergélisol, et souligne l'importance de comprendre et de quantifier les évaluations effectuées par les experts dans le cadre de ce type d'étude.

Cet article a conjointement été écrit par Katerine Grandmont, première auteure, par son directeur de maîtrise Daniel Fortier et son codirecteur Jeffrey A. Cardille. L'article a été publié dans le compte-rendu de la *Quinzième conférence internationale sur l'ingénierie des régions froides* (Août 2012, Québec, Canada).

Référence complète :

Grandmont, K., Fortier, D., Cardille, J.A. (2012) *Multi-criteria evaluation with geographic information systems in changing permafrost environments : Opportunities and limits*. Compte-rendu de la 15^e Conférence internationale sur l'ingénierie des régions froides. Québec, Canada : American Society of Civil Engineers, p. 666-675. Avec la permission de l'ASCE.

Multi-criteria analysis with geographic information systems in changing permafrost environments: Opportunities and limits



Katerine Grandmont^{1,2}, Daniel Fortier^{1,2} and Jeffrey A. Cardille¹

¹Département de Géographie, Université de Montréal, Québec, Canada

²Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Canada

Abstract

For northern regions underlain by permafrost, the projected increase in temperatures will greatly impact the physical properties of soils and their capacity to support infrastructure. In this context, the need to identify land parcels to build new housing in a safe and sustainable manner is pressing in Nunavik (northern Quebec, Canada). To guide residential development in these particular settings, this paper presents a GIS-based approach developed to identify terrain vulnerability to thaw-settlement, a geomorphological process responsible for costly readaptation or relocation of infrastructure. Land-suitability assessment for residential development in permafrost regions requires the consideration of many factors that may interact in complex ways. Combining factors to assess suitability presents a number of challenges that are especially important to resolve in permafrost-region studies to guide fine-scale decisions. This paper also emphasizes the uncertainties and errors that inevitably arise when multi-criteria analyses are carried out using geographical information systems (GIS) techniques. Because of the non-linearity of many natural processes (e.g. geomorphological thresholds, positive/negative feedbacks), uncertainties in the outputs are often greater than the cumulative uncertainties of the inputs. Using an example of a GIS system built for the village of Tasiujaq in Nunavik, this paper illustrates some of the specific challenges to the effective use of GIS for management in permafrost regions, and demonstrates how permafrost science can benefit from GIS technologies. This work further indicates the real-world importance of understanding and quantifying expert assessments, of the importance and action of each contributing factor and of how model-based uncertainty can impart on the results.

Keywords: Land-use planning, permafrost, geographical information systems, multi-criteria analysis

Résumé

Pour les régions nordiques situées en milieu de pergélisol, l'augmentation prévue des températures influencera grandement les propriétés physiques des sols et leur capacité à supporter des infrastructures. Dans ce contexte, la nécessité d'identifier des zones où construire de nouveaux logements de manière sûre et durable est pressante au Nunavik (nord du Québec, Canada). Pour guider le développement résidentiel dans ce contexte particulier, cet article présente une approche basée sur l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) développé afin d'identifier la vulnérabilité du terrain au tassement au dégel, un processus géomorphologique souvent responsable de coûteuses réparations ou du déménagement d'infrastructures. L'évaluation de la capacité d'accueil des terres pour le développement résidentiel dans les zones de pergélisol nécessite la prise en compte de nombreux facteurs qui peuvent interagir de façon complexe. La combinaison de facteurs permettant d'évaluer la capacité d'accueil du territoire présente un certain nombre de défis qui sont particulièrement importants à résoudre dans les régions à pergélisol afin d'orienter la prise de décision à des échelles fines. Cet article souligne les incertitudes et les erreurs qui surviennent inévitablement lorsque des analyses multicritères sont réalisées au moyen d'un SIG. En raison de la non-linéarité de nombreux processus naturels (par exemple, les seuils géomorphologiques, les rétroactions positives/négatives), les incertitudes liées aux résultats sont souvent plus importantes que les incertitudes cumulées des intrants. En prenant l'exemple d'un SIG développé pour le village de Tasiujaq au Nunavik, cet article illustre certains des défis propres à l'utilisation efficace des SIG pour la gestion résidentielle dans les régions à pergélisol, et montre comment les études en milieu de pergélisol peuvent bénéficier de ces technologies. Cet article présente en outre l'importance de comprendre et de quantifier les évaluations effectuées par les experts, de même que l'importance et l'influence de chaque facteur à l'étude

Mots-clés : Aménagement du territoire, pergélisol, systèmes d'information géographique, analyse multicritère

3.1 Introduction

Rising temperatures expected for the coming decades will have significant consequences for populations living in northern Quebec. In the near future, the impacts of this warming will be particularly notable on the thermal regime of the permafrost underlying most northern regions, because it is very vulnerable to changes in air temperature (Prowse *et al.*, 2009). Rapid population growth combined with important soil stability changes command for a thorough investigation of safe and sustainable areas to build new infrastructure in Nunavik, Quebec. This issue will be an important challenge for northern communities in the years to come.

Helping communities effectively plan their built environment requires consideration of the principal physical components interacting in permafrost environments. Because the permafrost regime is closely linked to climate and terrain factors, structures built on permafrost soils can have considerable impact on the permafrost regime by modifying its interactions with the environment (Stephani *et al.*, 2012). As a result, the terrain, the state of the permafrost and the type of structures to be built all have to be considered to better understand how these elements interact in this specific landscape (Stephani *et al.*, 2012). Such important physical factors may operate at different temporal and spatial scales: for example, higher temperatures impact permafrost conditions, yet these changes may be spatially heterogeneous because they can depend considerably on interactions among local environmental factors. Given this context, an assessment of the sensitivity of a specific area to warming requires a thorough understanding of the territory and its related components. But these changes also operate in three dimensions and as a result, such analyses are often performed without complete knowledge of the system. Although it is clear that the subsurface may be different than the surface and that some crucial information might remain unknown, this reality should not limit an attempt to realise a first-order assessment. Land-use planning in these changing environments must then rely on knowledge from different fields of expertise such as

geomorphology, geotechnical engineering and heat and mass transfers. To adequately and efficiently perform this analysis, the use of geographic information systems (GIS) has great potential; they are designed to manage a wide variety of spatial data and perform complex spatial analyses. Using a GIS framework developed for the Nunavik community of Tasiujaq, this paper presents and reflects on the development of an initial evaluation of susceptibility in a warming permafrost setting. The objectives of this paper are (1) to illustrate how GIS can benefit land-planning studies in permafrost areas and (2) to present some of the specific challenges to their effective use for management in permafrost regions.

3.2 Multi-criteria Analysis

Multi-criteria analysis (MCA) tools in GIS are designed to assist decision-making by accounting for varying effects of any number of relevant criteria. MCA tools are a key component of most GIS programs, and can greatly facilitate land-use assessments by aiding analysis, management and automation (Drobne & Lisec, 2009). Given a management need and clear criteria for weighing among factors, MCA typically uses a linear combination of factors, which are first standardized to a common numerical scale and given weights in accordance with each factor's importance (Kêdowidé, 2010). MCA has the potential to provide a wide range of estimated site quality values, which is often more realistic than a binary assessment space separating areas as strictly "good" or "bad" (Eastman *et al.*, 1995). By assigning weights to contributing factors for a given process, the notion of balance among different opinions or among influential factors is thus readily incorporated into the classification (Kêdowidé, 2010). Although this type of approach could clearly benefit land-planning in permafrost regions, similar work are still scarce; the works of Solomon-Côté (2005) and Allard & L'Hérault (2010) are among the very few to apply the use of the spatial analysis capacities of GIS to permafrost studies.

3.3 Evaluating permafrost suitability for village development: A case study

The study described here was conducted to distinguish suitability gradients between high-quality and potentially problematic areas for land development. To produce a comprehensive sensitivity map presenting the most suitable areas where to establish new homes around the existing village, a series of operations had to be performed. These different steps, including the selection and the standardization of the factors and the attribution of weights, are described in the following sections. Among the main parameters to be considered in land-planning designs in permafrost regions are the depth of seasonal thawing, permafrost temperature, sediment type, ground ice content, slope and drainage conditions (Canada Department of National Defence, 1949). These parameters control important processes such as bearing capacity of soils, cryogenic creep, mass movement, thaw-settlement and frost heaving. Because the physical and mechanical properties of frozen soils are closely related to temperature, the largest changes occur when the temperature is at 1-2 degrees of the melting point. Similarly, the resistance of frozen soils decreases significantly when the soil temperature approximates or rises above 0°C (Instanes *et al.*, 2005). Other parameters such as vegetation, precipitation, and snow cover, interact with the above-mentioned parameters and must be taken into account for fine-scale analysis of permafrost dynamics. The needs for this study demand an evaluation of soil sensitivity to thawing and mass movements, since under warming conditions these processes can greatly affect both building stability and the stability of the ground itself.

3.3.1 Study site and data

The community of Tasiujaq, located in Nunavik (Quebec), presents a challenging environment for new residential development due to its physiographic and cryostratigraphic context. Home to a few hundred people (Statistique Canada, 2012b), the village is built on “warm” permafrost (near 0°C) on the shores of Leaf Bay at the

mouth of the Bérard River (Figure 9). Despite their small size relative to other, more southerly settlements, Nunavik villages such as Tasiujaq are among the fastest growing in Canada (Statistique Canada, 2009). This rapid growth, and the uncertainty surrounding the optimal siting for future structures, requires a clear, understandable process to help guide land-use planning in this and other similar northern communities.

The mean (1971-2000) annual air temperature is -5.7°C (Environment Canada, 2011). The tidal range regularly exceeds 15 meters, which explains the vast extent of the foreshore area near the village. The village is located on a series of Holocene marine and fluvio-estuarine terraces (Vinet, 2008). Adjacent to the current Bérard River, the landscape is characterized by strips of fluvial gravel and boulder bars deposited before isostatic uplift of the area. Inland, the landscape is characterized by mounds of intertidal deposits composed of silts, sands, and beds of gravel and boulders (Allard *et al.*, 2007b). These mounds are often separated by intertidal channels or portions of flat intertidal terraces. This heterogeneity in the distribution of surficial deposits combined with the presence of thaw-sensitive sediments makes the assessment of ground stability an important challenge in this community.

Fieldwork was undertaken over two consecutive summers (2010-2011) to characterize the study area. Six boreholes (up to 5 meters deep) were drilled with a portable drill along with seven backhoe excavations (up to 4.5 meters deep), with cores and samples analyzed in laboratory for grain-size distribution, volumetric and gravimetric water content, Atterberg limit and soil bearing capacity tests (thaw-strain). Several hundred manual surface excavations and georeferenced observations of drainage conditions, geomorphological micro-forms and vegetation patterns were also performed and logged on-site. Following field data collection, the data was organised and integrated in a georeferenced database along with the laboratory results to allow their use for the multi-criteria analysis described below.

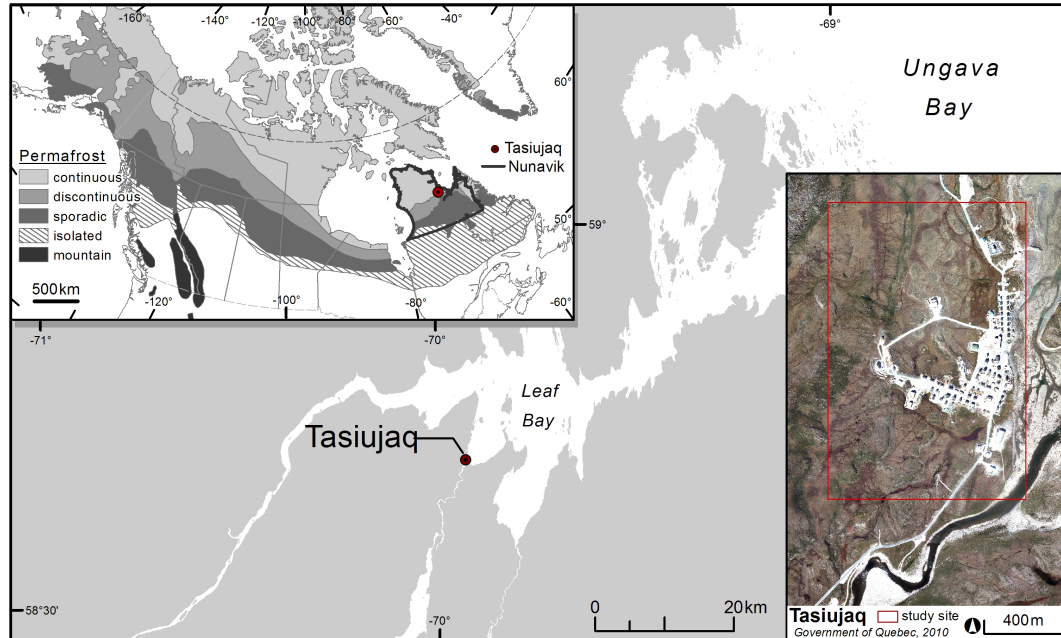


Figure 9. Study site location.

3.3.2 Methods: Producing a sensitivity map

Identification of factors

The multi-criteria analysis performed for the village of Tasiujaq assessed the terrain sensitivity to thaw-settlement and mass movements to identify the most appropriate areas for residential, commercial and recreational development outside the current village borders. Four factors were identified as having the most impact on these processes: slope, drainage conditions, surficial deposits and ground ice content. Slope and drainage are related factors: gentle slopes tend to limit drainage in areas with fine-grained sediment, which is inconvenient for residential use, while steeper slopes present mass-movement hazards. Whereas slope and drainage can be reasonably estimated through photointerpretation and on-site data gathering, ground ice content is considerably more challenging to estimate across large areas.

Permafrost ice content can be obtained over relatively small areas by coring operations or inferred by geophysical surveys (e.g. electrical resistivity, ground penetrating radar). Yet, in permafrost soils, melting of excess ice results in thaw-strain, because it is

common to observe ice in excess of the porosity due to various ice segregation processes. Although ground ice quantity is difficult to estimate outside of sampled areas, there is usually a strong link between grain-size distribution of surficial deposits, ice content and the mechanical properties of soils upon thawing (Andersland & Ladanyi, 2004). When ground ice content is not available, it is reasonable to assume that coarse deposits such as sand and gravel will be ice-poor and that finer deposits such as fine sand, silt and clay will be ice-rich. Although exceptions exist where coarse deposits can contain a finer fraction that may be ice-rich and cause problems, this general correlation is a relatively good assumption to follow when no data is available. Considering the small number and spatial distribution of the boreholes that were drilled with close proximity to the existing village, this factor was combined with the surficial deposits factor under the assumption that ground ice is closely related to the nature of the deposits. As a result, the multi-criteria analysis was built from the careful, spatially continuous estimation of three factors that could be mapped at the village scale: slope, drainage, and surficial deposits.

The study area is 1 km by 1.5 km and comprises the existing village and its surroundings. Because the project focused on evaluating sensitivity of areas to new construction outside the village boundaries, the current constructed area was excluded from the analysis. A slope map was developed from a 1-meter resolution digital elevation model produced by the Quebec Government (MRNF, 2004). Slope values ranged from 0° to 37° . The map of drainage conditions was digitized using field data observations and aerial photograph interpretation and was classified in three categories: 1) well drained: areas located near the river or streams or presenting coarse grained sediment (mounds); 2) medium drainage: mesic areas; 3) poorly drained: areas with stagnant water or presenting diffuse drainage. The nature of surficial deposits was derived from information gathered from field observations as well as the analyses of cores and soil samples. Surficial deposits identified in the study area were highly heterogeneous. Intertidal mounds usually contained coarser sediments such as sand,

gravel and boulders, although layers and pockets of finer sediment were observed in the stratigraphy. The intertidal channels and terraces usually contained a significant amount of frost-susceptible/thaw-sensitive fine-grained sediments. South of the village and along the river, a layer of highly thaw-susceptible fine-grained sediments (silty clay, sandy silt) that could extend under much of the village has been identified (Fortier *et al.*, 2011). Rocky outcrops were also identified, with a major one located on the middle-left part of the study area. All three thematic maps of the studied factors were digitized using ArcGIS® and ArcMap version 10 (by ESRI® software).

Standardization and weighting of factors

Re-scaling the factors to the same common scale is a standard operation in multi-criteria analyses. It facilitates the comparison of factors that originally had values of different nature and range. For example, comparing the surficial deposits class “sand” to a slope given in degrees does not permit a straightforward analysis. The values of all three factors were standardized to a common numerical scale of 1-10 (Table 3) to enable proper comparisons. The lower values represent low-sensitivity classes, with values nearer to 10 indicating a higher contribution to the sensitivity of the terrain to thaw-settlement and mass movements.

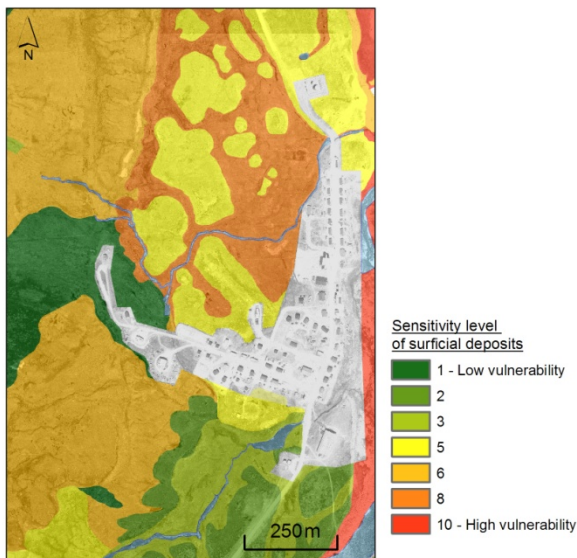
Table 3. Factor values.

Factors	Class values									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Surficial deposits	Rock	Boulders, gravel, sand	Gravel, sand		Cobbles, gravel, sand	Medium sand		Sand, silt, gravel		Fine sand, silt, clay
Drainage	Good				Medium				Poorly drained	
Slopes	0° - 2°		2° - 3°		3° - 5°		5° - 7°		7° - 9° > 9°	

A map of the surficial deposits in the area around Tasiujaq reveals the significant spatial heterogeneity of surface cover and its effect on overall site sensitivity (Figure 10 A, Table 3). Green areas in the map represent those places that are the least sensitive to thaw-settlement and mass movements. The contribution of that factor, however, is only

one of the drivers of overall site sensitivity, as described below. The deep green parcel, the least sensitive, represents a large rocky outcrop with surficial deposits that are very conducive to development. Most areas directly adjacent to the current village present a mild- to high- sensitivity, while the most sensitive areas are all located close to the river and constitute the foreshore.

A) Surficial deposits factor



B) Sensitivity map

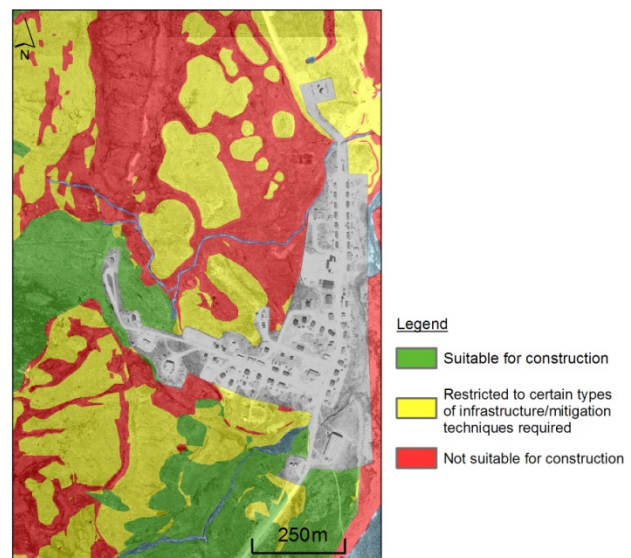


Figure 10. A) Map of the sensitivity levels given to the surficial deposits, a key factor in the thaw-settlement and mass movements processes in warming permafrost areas; B) Final sensitivity map resulting from the multi-criteria analysis.

Given the nature of thaw-settlement and mass movement processes, the contribution of each mapped factor is not equal. As a function of the importance of their specific implication in this physical process in the particular context of permafrost soils, each factor is assigned an estimated weight reflecting its importance to the processes (Heywood *et al.*, 2006). Because the studied processes are primarily driven by the melting of ice, especially ice in excess of the porosity, a heavy weight (70%) was attributed to the surficial deposits factor and the remaining percentage was divided evenly between the other two factors (drainage 15%; slope 15%). Although it is nearly

impossible to determine the contribution of each factor perfectly, this estimation is the closest that can be achieved based on the fact that there is widespread distribution of frost-susceptible/thaw-sensitive sediments.

Composite sensitivity map

To produce the final sensitivity estimate for the areas surrounding Tasiujaq, the values from each standardized factor map were multiplied by their associated weight and summed. On this resulting map (Figure 10 B), each pixel value presents the overall sensitivity of the territory to thaw-settlement and mass movements, with lower values corresponding to low sensitivity classes. Summed values were reclassified into three basic land-suitability classes that can be readily interpreted: 1) suitable for construction (green): very low risk of thaw-settlement and mass movements; 2) restricted to certain types of short-lived infrastructure/mitigation techniques required (yellow): reasonable risk of thaw-settlement and mass movements, but which can be likely controlled by ground cooling techniques, buildings on piles, insulation; 3) not suitable for construction (red): high thaw-settlement and mass movements risk, unlikely to be controlled through mitigation techniques.

3.4 Discussion

During the preparation and execution of this study, we encountered several basic challenges to the use of GIS in such rapidly changing permafrost environments. Even carefully planned, heavily ground-truthed studies ultimately face fundamental limits (Table 4). There are three basic categories of challenges when representing the world with GIS: temporal, existential and representational (Heywood *et al.*, 2006).

1. Temporal Limits. Change through time can be difficult to represent with static maps: permafrost landscapes in particular are spatially active and can change rapidly. Surficial geology, ground ice content, topography and drainage conditions may vary substantially over a small area and influence physical processes differently as climatic conditions

change. While the general framework developed in this paper can be kept, analyses of site-specific geomorphological processes and local climatic conditions are necessary. Each study in permafrost regions, regardless of site specifics, is likely limited by many of the same factors described here.

2. Existential Limits. Some limitations are related to the subjectivity inherent in the process of determination of the limits and boundaries of entities. Because there is seldom a clear demarcation between two types of surficial deposits, a surficial deposits map in permafrost environments can be defined only with limited certainty. Whether delineating terrain units on the ground or from aerial photographs, a decision must ultimately be made as to where the edges will be traced. Enhancing this limitation is the fact that, in remote areas, extensive field surveys can rapidly become costly, which causes land assessment studies to often rely on scarce and limited data. In this study, data originated from various sources and presented different degrees of precision and quality: e.g., relatively certain slope estimates, but highly uncertain estimates of ground ice content.

3. Representational Limits. Some of the inherent limits in a GIS study relate to the way an analyst chooses to represent a particular phenomenon. Among the many factors influencing the result of spatial analyses, the scale of representation is one of the most important choices made by analysts. In this study, three land-suitability classes were identified at the scale of the whole study area to aid a first-order assessment. In subsequently exploring the results, one could focus an intense study on the highly suitable parcels to find areas at a finer scale that are somewhat or substantially less suitable for development. In this way, an area deemed suitable at a coarse scale might contain areas of important finer-scale heterogeneity. Certain large structures (for example, a heated community center on a concrete slab) might be thus thought feasible using coarse-scale analysis but later found to be inappropriate only through fine-scale study. Yet a conflict between a coarse-scale and fine-scale analysis is not necessarily

incorrect. Smaller structures built on piles with a low thermal footprint might be ideal in areas having fine-scale variations in suitability. In effect, a large area containing places of low site suitability might, if enough structures could be built on high-quality areas, be correctly called highly suitable at the coarse scale.

Table 4. Essential limits to representing processes in computer mapping systems, and their importance in residential development in permafrost areas.

Limiting Factors in GIS Analyses	Representative Questions	Key issues for residential development in permafrost areas
Temporal	<p>When has it changed?</p> <p>Are changes cyclical or directional?</p>	<p>Need to detect warming within seasonal cycles.</p> <p>Short history of scientific study: difficult to compare to earlier periods</p> <p>Timing of crucial phase changes (e.g., freeze-thaw) difficult to predict without extremely fine-scale data</p> <p>Understanding rates of feedback effects on further warming is difficult</p> <p>Changes at a given time scale (e.g., daily warming and cooling) may not be relevant at another scale (e.g., decadal trends)</p>
Existential	Where are the boundaries?	<p>Spatial variation in site sensitivity is gradual, not categorical</p> <p>For large buildings, small sites of high quality might not be large enough</p> <p>Balance needed between land for large structures and for small structures</p> <p>Gathering fine-scale data is extremely costly</p> <p>Human urge for binary answers; important phenomena are continuous</p>
Representational	<p>What factors are important to model?</p> <p>How to best represent nature at various scales?</p>	<p>Important factors (e.g., surficial geology, topography and drainage conditions) can vary greatly at fine scales</p> <p>Data for studies is often sparse and presented at greatly different scales</p> <p>Unknown accuracy in existing data</p> <p>Difficult to know which factors affect a given process, and how strongly</p> <p>Interactions between factors may not have linear effects</p> <p>Factors can affect processes differently in different phases of water</p> <p>Processes occur in 3D and 4D; maps are generally made in 2D</p> <p>Representing uncertainty in individual processes is challenging</p> <p>Representing compounded errors is difficult</p> <p>Human ability to understand all factors influencing a process is limited</p> <p>Political and cultural influences are difficult to represent</p>

When approaching permafrost environments as geosystems, one can appreciate how an ever-changing environment can be addressed with the use of GIS (Stephani *et al.*, 2012). The analyses developed through GIS can be adjusted to the reality of the terrain as it is observed and understood at the moment it is performed. But, it can also be used to assess the impacts that could potentially be generated following environmental changes. For example, in the context of climate change we can expect that, as permafrost degrades, more liquid water will enter the system, thus requiring a modification of the drainage classes from previously designed analyses. This approach could then be used to anticipate future potential changes and their impacts, for example, on the localization of the potentially suitable lands to build on. Because environmental changes can only be estimated, using this approach has the benefits of providing tangible answers on which to base more extensive future investigations.

3.5 Conclusion

The GIS multi-criteria analysis developed for this study produced a comprehensible map of the territory that can be used as a valuable first-order assessment for land planning. Northern villages undergoing rapid development pressure can clearly benefit from the presented framework, both to guide site selection and to identify specific areas that would benefit further investigation. Relying on GIS techniques for land-planning studies in changing permafrost environments offers great benefits. Limited data and imperfect understanding of the complex interactions in the processes involved should not limit the attempts at producing a first-order assessment that nevertheless provides valuable and important information.

Acknowledgements

This work has been supported by the Ouranos consortium, the Quebec Ministry of Health and Social Services (Fonds vert – Quebec Action Plan on Climate Change), the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada and Natural Resources Canada. Student support was provided by the Indian and Northern Affairs (Government

of Canada), ESRI, and the Université de Montréal's Faculté des études supérieures. The authors also wish to acknowledge the community of Tasiujaq and the Kativik Regional Government.

Chapitre 4. Article 2

Titre : *Assessing land suitability for residential development in permafrost regions: A multi-criteria approach to land-use planning in northern Quebec, Canada*

Auteurs : Katerine Grandmont, Jeffrey A. Cardille, Daniel Fortier et Tania Gibéryen

Ce 2^e article a été publié dans la revue scientifique *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* en décembre 2011. Il démontre l'application innovatrice d'une populaire méthode d'analyse multicritère appelée *Analytical Hierarchy Process* à un cas d'aménagement du territoire à Tasiujaq, en milieu de pergélisol. L'article explore aussi la notion d'incertitude dans les résultats et propose une méthode permettant de représenter cet aspect de façon visuelle.

Cet article a conjointement été écrit par Katerine Grandmont, première auteure, par son directeur de maîtrise Daniel Fortier et son codirecteur Jeffrey A. Cardille. Tania Gibéryen a fourni certaines données utilisées pour cet article. L'article a été publié dans la revue scientifique *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*.

Référence complète :

Grandmont, K., Cardille, J.A., Fortier, D., Gibéryen, T. (2012) Assessing land suitability for residential development in permafrost regions: A multi-criteria approach to land-use planning in Northern Quebec, Canada. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 14(01), 73-79. Copyright © 2012, World Scientific Publishing Co.

Assessing land suitability for residential development in permafrost regions: A multi-criteria approach to land-use planning in northern Quebec, Canada

Katerine Grandmont^{1,2}, Jeffrey A. Cardille¹, Daniel Fortier^{1,2} and Tania Gibéryen^{2,3}

¹Département de Géographie, Université de Montréal, Québec, Canada

²Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Canada

³Département de Géographie, Université Laval, Québec, Canada

Abstract

Northern Quebec (Nunavik) presents an important intersection between population growth and climate change. The Inuit population of Nunavik has the fastest growth rate in any region of Canada. Land-use planning is an urgent and pressing need for northern communities built on permafrost, where there are considerable risks to development in areas where permafrost may thaw. As northern communities work to adapt to climate changes, they will be in great need of confident recommendations about locations of future development projects. This paper presents a case-study of the community of Tasiujaq and assesses the probability of thaw settlement of the surface, a process seriously affecting infrastructure stability. A method is developed for quantifying uncertainty in the resulting map, expressed as a function of judgment-based uncertainty in the various factors that can influence eventual map quality. The best estimate of vulnerability and of the confidence in that estimate can be expressed in a single, simple map that allows an analyst to convey both of these vital aspects of the assessment process.

Keywords: GIS; analytical hierarchy process; multi-criteria analysis; permafrost; sensitivity; Nunavik; Monte Carlo

Résumé

Le nord du Québec (Nunavik) est actuellement à une croisée importante entre croissance démographique et changement climatique. La population inuit du Nunavik présente le taux de croissance le plus rapide de toutes les régions du Canada. L'aménagement du territoire s'avère donc un besoin urgent pour les collectivités du Nord construites en région de pergélisol, où le développement présente des risques considérables en raison du dégel potentiel et de l'instabilité des sols. Alors que ces collectivités travaillent à s'adapter aux changements climatiques, elles auront un grand besoin de recommandations fiables quant à l'emplacement des futurs projets de développement. Cet article présente une étude de cas pour la communauté de Tasiujaq et évalue la probabilité de tassement dû au dégel de la surface, un processus affectant gravement la stabilité des infrastructures. Une méthode a été développée afin de quantifier l'incertitude présente dans la carte résultante, exprimée comme une fonction de l'incertitude basée sur le jugement des divers facteurs qui peuvent influencer sur la qualité de la carte finale. La meilleure estimation de la vulnérabilité et de la confiance dans cette estimation peut être exprimée en une seule carte simple qui permet à un analyste de communiquer efficacement ces deux aspects essentiels du processus d'évaluation.

Mots-clés : SIG; *analytical hierarchy process*; analyse multicritère; pergélisol; sensibilité; Nunavik; Monte Carlo

4.1 Introduction

Land-use planning is an urgent and pressing need in northern regions where there are considerable risks to development in areas where permafrost may thaw, including thaw settlement, thermal erosion, landslides, and other types of mass movements. In the past, the thermal state of the permafrost was nearly stable but climate change scenarios clearly indicate that the North will be more affected by the warming than anywhere else on the planet. As the climate is warming and communities grow, there is an urgent need to reliably find suitable land on which to safely and sustainably build infrastructure (IPCC, 2007). Sustainable development of the North requires that the current and future potential thawing of permafrost be considered for the design life of transport infrastructure and buildings (Canadian Standards Association, 2010). Geohazards related to permafrost degradation need to be evaluated prior to construction to ensure that adequate engineering techniques are applied to counteract the adverse impact of permafrost warming (Remchein *et al.*, 2009). To aid northern communities in their land management, geographic information system (GIS) techniques are applied to identify the potential risks of proposed development areas in four Inuit villages of Northern Quebec (Nunavik): Tasiujaq, Kangirsuk, Puvirnituk and Akulivik. For these villages, key geological, geomorphological and hydrological criteria implicated in the stability of soil and infrastructure in permafrost regions were mapped, including slope, drainage conditions, surface geology, ice content, and other geotechnical and geothermal properties of the permafrost (e.g. ground temperature, thermal conductivity, porosity, permeability).

Like many environmental evaluations using a GIS, a multi-criteria analysis was used to assess the study area based on a set of criteria. This work presents an example of permafrost terrain vulnerability to thaw settlement and subsidence. Potential risk related to thaw settlement process can be reasonably estimated by the analysis of three factors: the surficial deposits (implicitly the potential ice content), the quality of the drainage

and the slope of the terrain. Given the complexity of the process under consideration, the Analytical Hierarchy Process (AHP) was used to infer the weights among these factors that can influence this permafrost process and influence site vulnerability (Nelson *et al.*, 2002; Pullman *et al.*, 2007; Fortier & Bolduc, 2008). AHP, a common multi-criteria analysis method, uses one's judgment of the perceived importance of factors in relation to each other, producing a single set of factor weights that are typically used to produce a single map, carefully rendered and submitted to policymakers to support decision-making.

Uncertainties and errors in multi-criteria analysis can originate from many sources, including (1) a limited understanding of underlying processes, (2) poorly conceived models, (3) imprecise datasets, or (4) judgment of the relative importance of factors on a process. Each factor can introduce substantial uncertainty that can translate into weak or imprecise output results. In this paper, the focus is on quantifying and understanding the potential effects of uncertain or inaccurate judgment of the relative importance of factors to a given process.

For GIS to be successfully and reliably integrated into policy decisions, map outputs by analysts must be credible. But analysts are often faced with making difficult and somewhat arbitrary decisions during an analysis that can affect the final output. For example, does a decision to call the contribution of a given soil type or cover class "High" instead of "Very High" drastically influence the output? If so, is the effect the same everywhere, or are there pockets of influence throughout the study area? These questions are currently difficult to address, which is one major reason why map output for a given question is usually comprised of a single "best-estimate" map. Recent work with AHP has made first steps into understanding the sensitivity of this process to errors or uncertainties in the judgments used when filling the AHP matrix. Chen *et al.* (2009, 2010) developed a method and ArcGIS-compatible tool to perform a one-at-a-time sensitivity analysis of output results to variation in factor weights. That work shows

very useful first steps toward understanding the impact of uncertainty in individual input maps on resulting suitability maps. Here, that work is extended in three ways: a novel framework is developed for evaluating and displaying the results, allowing more than one factor to vary at once and allowing factors to be more or less uncertain. The net result is a much more flexible system that is easily understood by analysts and policymakers alike.

This paper illustrates the framework used to evaluate the quality of potential construction sites across an area surrounding the village of Tasiujaq in Nunavik. This multi-year project (2010–2012) involves several summers of sustained fieldwork, the creation of geodatabases and maps of both geophysical and social data, and the estimation of the risk of several geophysical processes (e.g. active layer detachment slide, thaw settlement and infrastructure subsidence, bearing capacity of the permafrost). Because many of these factors are beneath the visible surface, they can only be estimated across a large area with considerable field effort, followed by careful GIS analysis combining field data, aerial photograph and satellite image interpretation, and interpolation techniques.

Each of these parts has an unknowable but important uncertainty in the map, and these uncertainties may vary across the area depending on the factors in consideration. To begin to adequately express the judgment-based uncertainties inherent in this process, a method was needed to quantify the confidence, or lack thereof, in the understanding of the factors influencing a process, the potentially subtle interactions between them, and the basic confidence in the quality of the maps produced for analysis. The objectives of this paper are: (1) to illustrate the framework that was developed for addressing this very complex problem confronted by analysts in many settings where multiple criteria are to be evaluated; and (2) to devise a way, building from the AHP process, in which confidence values can be used to allow analysts both to generate weights for overlaying and to quantify the uncertainty in those weights due to incomplete understanding or

map quality. The results of this study should be of interest to others facing a large number of criteria of different importance and map qualities.

4.2 Study area

The Nunavik region (Figure 11), located north of the province of Quebec, is a vast territory encompassing more than 5×10^5 km² and inhabited almost entirely by Inuits (Association touristique du Nunavik, 2010a). Most of this region lies north of the 55th parallel, on continuous and discontinuous permafrost soils. Defined as soil at or below 0°C for more than two consecutive years (French, 2007), permafrost is greatly influenced and is primarily controlled by surface temperatures.

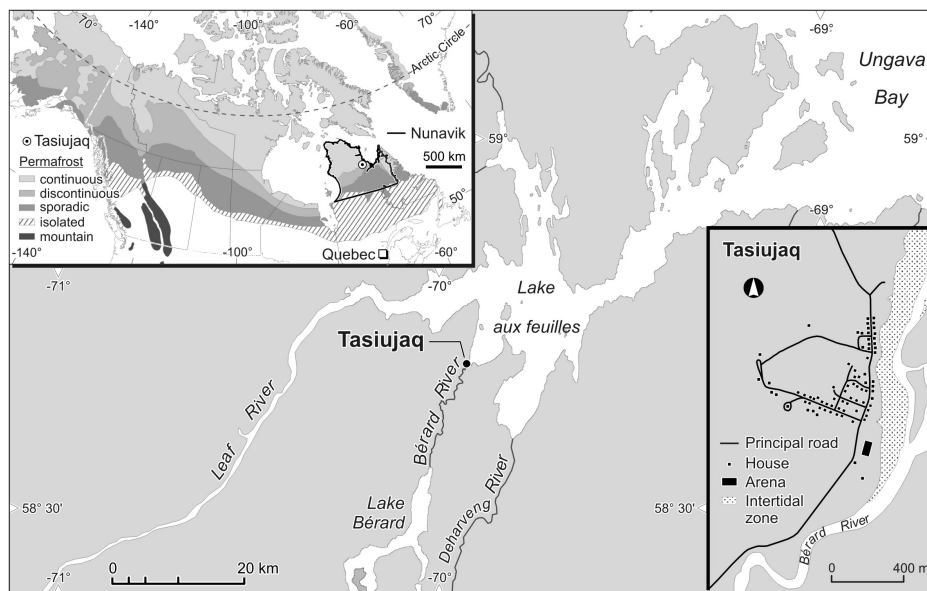


Figure 11. Localization of Nunavik and the study site.

The Inuit population of Nunavik is distributed in 14 villages located along the coast of Hudson Bay, Hudson Strait and Ungava Bay. In 2006, the region had a population of just over 9,500 individuals, an increase of 25% from ten years before: this was the fastest aboriginal growth rate in any region of Canada and one of the fastest in the world. During this same period, nearly 50% of Inuit in the region lived in housing that

is categorized as “crowded”, as opposed to a mere 3% for Canada’s non-aboriginal population (Statistique Canada, 2009). The need for new, physically stable housing is urgent and construction projects in villages are initiated regularly.

In recent decades, the climate of Nunavik has warmed considerably (Allard *et al.*, 2002, 2007; Smith *et al.*, 2010). Higher temperatures are already causing lifestyles to change in Nunavik (e.g. length of ice fishing and snowmobile seasons, road/airstrip damage due to degrading permafrost) and leaders of these communities are actively seeking and exploring both short-term and long-term adaptation strategies. Expected effects in coming decades include ground subsidence, increased risk of landslides, formation of sinkholes, thermal erosion due to surface run-off, a reduction in bearing capacity of soils and coastal erosion due to sea level rise and reduction in sea ice cover. Important parameters to be considered in the location of new construction development are thaw depth, permafrost temperature, drainage, the type of sediments to build on and the ice content of these sediments. These parameters strongly influence permafrost degradation processes. Because the physical and mechanical properties of frozen soil are closely related to temperature, the effects are greatest as soil approaches the thawing point (Instanes, 2003). Throughout much of settled Nunavik, leaders and citizens are searching for areas that, even with rising temperatures, will remain stable enough to support structures.

For this paper, a study site was chosen to illustrate the method used to assess the uncertainty related to the use of the AHP process. The study site is located in the village of Tasiujaq (58°42' N–69°56' W), a community of a few hundred people (Statistique Canada, 2007) built on warm permafrost (near zero degree Celsius), along the banks of the Baie aux Feuilles at the mouth of the Bérard river. The mean annual air temperature for Kuujjuaq, a village located at about 110 km south-east of Tasiujaq, was -5.7°C for the 1971–2000 period (Environment Canada, 2011). The tidal range is among the largest in the world, regularly exceeding 15 meters, which explains the widespread

occurrence of intertidal, fluvial and marine deposits in the village (Allard *et al.*, 2007b; Vinet, 2008). Fieldwork carried out in summer 2010 revealed the presence of fine-grained (fine sand, silt, clay) thaw-sensitive sediments (Fortier *et al.*, 2011). These surficial deposits are spatially heterogeneous and mapping the potential thaw-sensitivity risk becomes very complex. A 1×2 km area (with 1 m cells) was selected to illustrate the broad range of variation in terrain conditions within even a small area. The study site comprises a series of marine and fluvial terraces and cliffs, rock outcrops and a narrow coastal plain (where the current village is built) located along the riverbank. Considering the physiographic context and the thaw-susceptible nature of the deposits, areas for future development are very limited and special care must be taken for recommendations regarding land use.

4.3 Material and Methods

4.3.1 Suitability factors

Thaw settlement related to permafrost degradation can have a significant impact on infrastructure stability, potentially causing foundations to shift and drop and leading to floor and wall cracking. It can induce considerable damages to houses, resulting in high costs of repair or rendering buildings unusable. At the study site, a preliminary assessment of the thaw settlement and surface subsidence potential was conducted. In considering the influence of various factors that could be modeled, it is most important to estimate the volumetric ground ice content. In a soil containing excess ice, the settlement of the surface is driven by the compaction of the sediments that occurs as the water from the melting of the ice is expelled from the soil porosity due to the weight of the overlying sediments. In the absence of ground ice data (generated, for example, from drilling boreholes to check for ice), surficial deposits can be used as an indirect indicator of ground ice based on the fairly good correlation between the frost-susceptibility of soils and the grain-size distribution of sediments (Andersland & Ladanyi, 2004). The near subsurface stratigraphy (active layer and first meter of upper

permafrost) was assumed to be consistent with surficial deposits observations. The following factors for which data were available were considered: surficial deposits, slopes, and drainage quality.

For each factor, a thematic map was digitized with ArcGIS® and ArcMap version 9.3 (by ESRI® software). The slope factor (Figure 12a) was developed from a digital elevation model (DEM) developed by the Quebec Government (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune — MRNF) and having a 1-meter resolution. Slopes range from 0° to 38°, with the steepest slopes located along a cliff formed by the marine regression in response to isostatic uplift several thousand years ago. This cliff marks the limit of a narrow marine terrace that crosses the western side of the study site. Other steep slopes form the river bluff. The drainage layer (Figure 12b) was digitized from aerial photographs and field observations collected during summer 2010. Three main categories were identified: areas presenting good drainage (coarse grained sediments or terrain along stream/rivers), medium drainage (mesic) and poorly drained (stagnant water, diffuse drainage). For the surficial deposits (Figure 12c), the nature of the sediments was derived from interpretation of aerial photographs, from an extensive field campaign involving numerous shallow excavations in the active layer and from laboratory analysis.

To make the values of these contributing factors both numeric and intercomparable, they were standardized to a common scale of 1 to 10, a typical operation in multi-criteria analysis. Because vulnerability was being modeled, 1 was chosen as a value for a very low contribution to overall vulnerability, and 10 represented high-vulnerability classes (Table 5). For example, a pixel in the study area with a sand/gravel surface (3), moderately well drained (5), and with a slope between 5 and 7 degrees (7) would produce a vulnerability value of $3 + 5 + 7 = 12$, in a case in which all factors (i.e., surficial deposits, drainage, and slope) were equally important factors in influencing a site's vulnerability to thaw settlement. As the next section shows, however, expert

opinion about the process indicates that weightings among these three factors should not be equal. The subsequent section illustrates the approach used to treat uncertainty in the maps and in the factor weights that best represented the vulnerability to thaw-settlement in the study area.

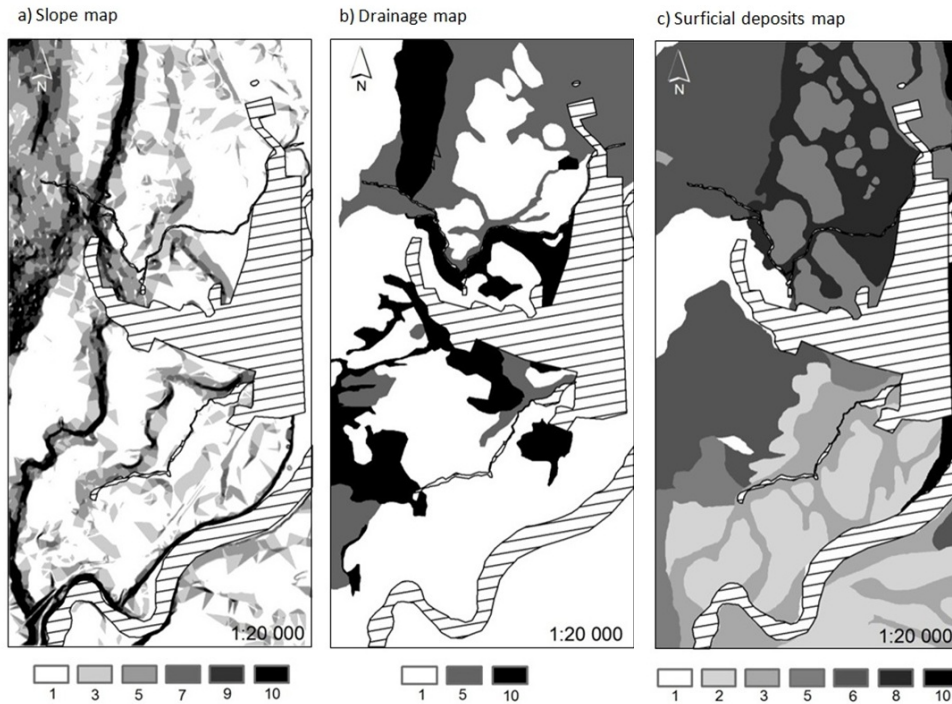


Figure 12. Maps for the three factors important to the thaw settlement process. Values are drawn with 1 being the least vulnerable and 10 the most vulnerable. See Table 5 for more details on the categories of each factor.

Table 5. Factor value ranges and their standardization to a 1:10 scale.

Factors	Class values										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Surficial deposits	Rock	Cobbles, sand, gravel	Sand, gravel		Blocks, gravel, sand	Sand		Sand, gavel, silt		Fine sand, silt	
Drainage	Good				Medium			Poorly drained			
Slope	0° - 2°		2° - 3°		3° - 5°		5° - 7°		7° - 9°		> 9°

4.3.2 Developing a best estimate of vulnerability to thaw settlement

The best estimate of the relationships among the three chosen factors according to their relative importance (Table 6) was identified using the AHP method (Saaty, 1977), which is capable of translating a large number of relative importance estimates among criteria into a clear, mathematically defensible set of weights for each factor.

Table 6. Scale for comparing factors in the Analytical Hierarchy Process (after Saaty & Vargas, 1991).

1	Equal importance
3	Moderate prevalence of one over another
5	Strong or essential prevalence
7	Very strong or demonstrated prevalence
9	Extremely high prevalence
2,4,6,8	Intermediate values
Reciprocals	For inverse comparison

Given a permafrost scientist's estimates of the relative importance of the factors to thaw settlement, the surficial deposits (factor 1) should be weighted the most heavily (71.4%; Table 7), whereas the drainage and the slopes accounted for less and were of equal importance (14.3% each). The last step in obtaining the final vulnerability map consisted in summing the three thematic maps with respect to their relative weight. The resulting map assesses the vulnerability of the territory to thaw settlement, and represents the usual final output of the multi-criteria analysis. This map serves as a reference for the subsequent steps of analysis and will be referred to as the base map.

Table 7. Matrix for executing the Analytical Hierarchy Process (left). Unlike in most AHP studies, in the present study a confidence value is modeled on each of the factor ratios. The ratio estimate of 5 for the ratio of Surficial deposits: Drainage has a low confidence, as described in the text. The weights that follow directly from the base AHP values are shown in the column marked “Weight”. The rightmost three columns indicate the outcome of the sensitivity analysis implied by the variance in AHP values shown on the left. Values and their meanings are described in the text.

Analytical Hierarchy Process				Sensitivity analysis			
Factors	Surficial deposits	Drainage	Slope	Weight	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
Surficial deposits		5 ± 3	5 ± 1.25	0.714	0.660	0.128	0.194
Drainage			1 ± 0.2	0.143	0.184	0.104	0.562
Slope				0.143	0.156	0.033	0.214

4.3.3 Estimating the effect of expert confidence on assessments of site vulnerability

As AHP and multi-criteria analysis are traditionally understood, one or more experts give opinions, weights among criteria are calculated, and the multiple criteria are evaluated to form a single, definitive map of the desired feature: in this case, vulnerability of building construction to future disturbances. Yet variation can be found among permafrost experts about which of 9 values to assign to each criteria (Table 6), but also in a single expert’s confidence that given criteria ratio (“5”, for example), was not a nearby value, such as 4.5, 5.5, 4, or 6. Each of these values can have some unknown but presumably important effect on the final results, with effects that could vary across the study area. Yet it is crucial to these communities to receive advice not only about where to build (the typical output of multi-criteria evaluations using AHP) but also about the effects of analyst confidence in that assessment, especially when dealing with geological hazards. The current conception of AHP does not readily support uncertainty, yet clearly this uncertainty could have a substantial impact on vulnerability estimates. In the spatial domain, an extension to the AHP process can help

to understand the impact of analyst judgment uncertainty on spatially explicit estimates of map confidence. This extension is described below.

To understand the impact of a geomorphologist experts' varied confidence in the quality of each factor map and of the inherent importance of each factor with respect to the others, a set of weights was developed summarizing the best estimate using expert opinion, as reflected through the AHP algorithm (Table 7). The weights were calculated based on the estimate and confidence bounds of experts' estimates in the importance of each factor—for example; an expert might say that the surficial deposits factor was 5 times more important than drainage in determining the outcome of the thaw settlement process. Pressed further, the expert might estimate that a standard deviation of 1.25 (i.e. 5 ± 1.25 , in lay terms) correctly expressed the confidence in this ratio. Other relative importance ratios, for example, between drainage and slope, might be lower or higher but more confidently so: for example, 1 ± 0.2 . Still others might reflect only weak certainty in relative importance of the two factors: for example, 4 ± 3 .

Uncertainty in the importance of each contributing factor is only one of several forms of uncertainty in the ultimate output of the multi-criteria analysis process. A second major factor influencing confidence in map output, and perhaps the most tangible for analysts, is the quality of a given map. Even if the weight of a factor should be high given a good map, an analyst might want to express more uncertainty in the final output due to limited available data or a poorly or quickly made map. Depending on the weight of a given factor and the spatial pattern in the maps of that factor, the impact of that uncertainty is not easily quantified. In this method, an analyst adjusts the uncertainty of a factor (e.g. 6 ± 2 instead of 6 ± 1) to reflect that values from that map might be right on average, but should be shown as part of the uncertainty in the process.

Although thaw subsidence is illustrated as a simple combination of three factors, there may be several sub-factors that contribute a factor in subtle or non-linear ways. For

example, the surficial deposits factor used here is estimated from values of two sub-factors: ice in the soil; and the nature of the deposits. In this setting, the assessment of these sub-factors generated polygons with nearly identical outlines due to their close relationship. As a result, analysts might choose to model the factors separately, or (as it is done here) to consider them as sub-factors that contribute, perhaps non-linearly, to values of a single grand factor. This can be especially attractive because the combination of sub-factors permits special cases of the subfactors to exert a stronger influence on the results —for example, a low value of ice content together with an unsuitable surficial deposit (e.g. clay) may be even more vulnerable than a linear combination of the two factors would indicate.

Sensitivity analysis to represent uncertainty

In a multi-factor environment, sensitivity analyses are difficult. As seen in Chen *et al.* (2009; 2010), both the construction and interpretation of maps in an uncertain setting can be challenging. Because the factor weights in a multi-criteria analysis must always sum to 1, a perturbation in one of the weights must be linked to a decline in one or more of the other factors. But which factor? The requirement that weights must sum to 1 means that a set of weights is not independent of each other, which complicates the representation and quantification of uncertainty.

The AHP process provides a framework to perform this sensitivity analysis, by varying the factor ratios (Table 6). But how would each of these estimates and their varied confidences influence the resulting vulnerability map and the assessment of its reliability? The study explored the effect of uncertainty in the three factor ratios that reflected uncertainty in their relative strengths. Scripts were developed to take 500 realizations of each of the three factor ratios and their uncertainties (Table 7) and were fed iteratively into the AHP calculation. Each uncertainty was modeled as being from a normal distribution, meaning that 5 ± 1.25 represented a normal value of 5 and a standard deviation of 1.25. In that case, this meant that about 68% of 500 iterations used

a value for this factor between 2 and 7. In this case, the relatively high uncertainty meant that an expert's best estimate was that one factor exerted a "strong" importance relative to the other, but that the true relationship might be "moderate" or "very strong" (Table 6).

To generate weights with systematic variation that always summed to unity, values for the three ratio values in Table 7 were sampled according to their mean and standard deviation, and input to the AHP calculation. The effect was to generate 500 estimates of the three factor weights that reflected the uncertainty of the expert's judgment. The base run of AHP was built from the best estimates of each factor's importance (the values 5, 5, and 1 from Table 7) and gave layer weights 0.71, 0.14, and 0.14 (Table 7). The uncertainty among the weights (e.g. 5 ± 1.25) meant that one of the 500 iterations might have weights of, for example, 0.65, 0.17, and 0.18. Allowing these factor ratios to vary, it allowed for the exploration of the effect of judgment-based uncertainty on the layer weights and thus, to express the effect of this uncertainty on the map result. With the uncertainties described above, the 500 runs of AHP gave the following characteristics for the weights of each factor. Surficial deposits: expected value 0.66, coefficient of variation 0.2; Drainage: expected value 0.18, coefficient of variation 0.56; Slope: expected value 0.16, coefficient of variation 0.21. Thus, the estimate of the influence of drainage on thaw settlement was the least certain (as reflected in its high variation).

4.4 Results

4.4.1 A Single Multi-Criteria Analysis: the Base Map

Using the best estimate of weights on the three selected factors influencing thaw settlement (Table 7), a base map was produced (Figure 13 Panel a) through the multi-criteria analysis using values from Table 5, the column marked "Weights" in Table 7, and the spatial patterning of Figure 12. Areas of differing vulnerability to thaw settlement can be easily identified. The areas presenting the lowest vulnerability are

mainly located in the southern portion of the site (A1) as well as to the west of the site (A2) where a large rock outcrop is visible. The vulnerability is more varied and pronounced in the northern part of the study area, where many vulnerability classes are represented in close proximity to each other. It is also possible to identify the cliff that emerges in the west part of the site (B1 and B2), which, in combination with deposits that are of moderate- to high-susceptibility to thaw settlement and medium drainage conditions, makes this area moderately to highly vulnerable to development.

4.4.2 Variability Map: Viewing Uncertainty

The sensitivity analysis described above made it possible to express, for each pixel, a measure of the variability of that pixel's vulnerability value across the 500 sensitivity runs. For example, a pixel with vulnerability values having a mean of 5 and consistently between 4.8 and 5.2 would have a lower variability than a nearby pixel with a mean value of 5 but with individual values spread widely between 3 and 7. To account for the fact that larger means have larger variances, each pixel's standard deviation was divided by its mean to get the coefficient of variation (Figure 13 Panel b) of each pixel. (The map of the means of vulnerability estimates was mostly indistinguishable from that of the base run of Panel a). The coefficient of variation was used to compare the relative spread of high and low vulnerability values. The coefficient of variation is interpreted as an expression of the confidence, given the uncertainties specified above, of a pixel's calculated vulnerability value.

On average, areas of high vulnerability present a moderate to moderately-low variability over the 500 runs (Figure 13 Panel b, area C1 and C2). Locations that vary the most (D1, D2) are small in size. There are only few areas (E1, E2) showing very low variation across the sensitivity runs. The variability pattern does not exclusively follow the pattern shown in the base map. For example, area F on the variation map not only shows a general medium-low variation, but is also punctuated by some low-variation spots, whereas on the base map, the same area is characterized by a uniform class of

medium vulnerability. A more systematic analysis of the base and variation maps together is described in the next section.

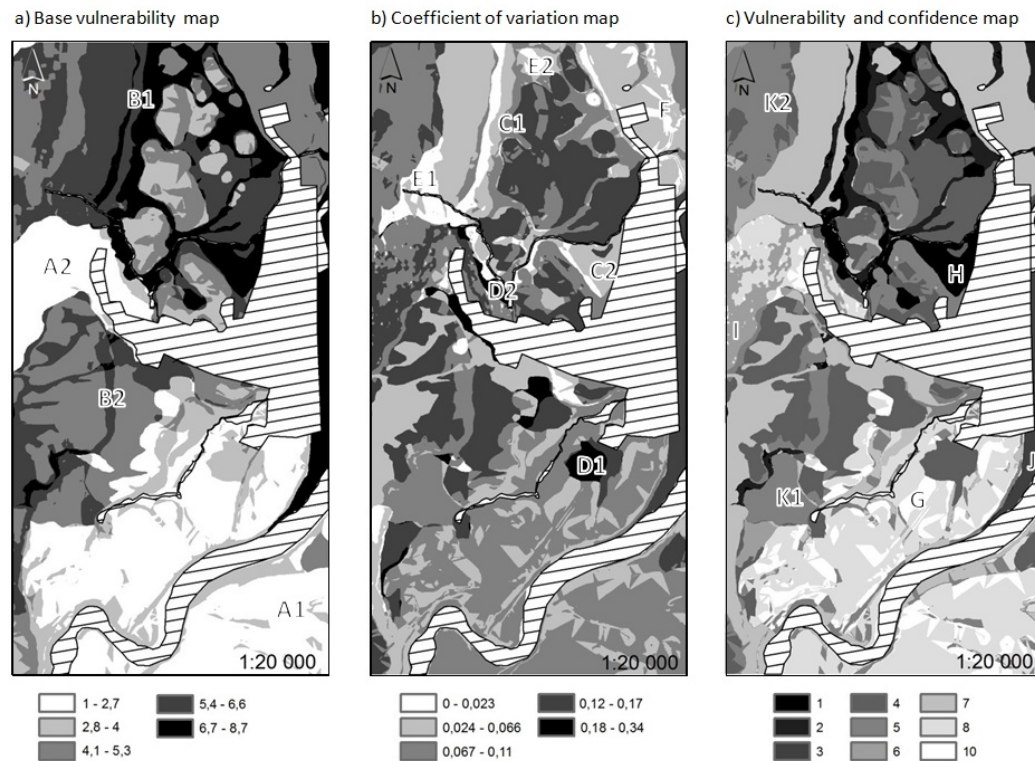


Figure 13. Understanding the uncertainty of a vulnerability map. Panel (a) shows the vulnerability map computed by multi-criteria analysis. Data are on a scale of 1 to 10, with lower numbers having less vulnerability to thaw settlement. Panel (b) shows the coefficient of variation in each pixel, calculated from a set of 500 runs with imprecision in factor ratios represented as in Table 7. Panel (c) shows the combination of these two aspects of the assessment of site vulnerability. Letters denote important features mentioned in the text.

4.4.3 Combining the Base Map and Variability Map

To obtain a visual representation of the vulnerability of the site and its associated confidence, the base vulnerability map (Figure 13 Panel a) and the map of the coefficient of variation (Figure 13 Panel b) were combined. After simplifying the continuous range of values of each map to be Low, Medium, and High, the nine

combinations could be easily calculated (Table 8). Using the combinations, it is possible, for example, to identify areas that are unsuitable, with the most certainty of this judgment (Figure 13 Panel c, area H).

The patches identified from class 10 (Figure 13 Panel c, area G) show areas where it can be concluded with great confidence that the vulnerability of the terrain to thaw settlement is low. They are very fragmented and scattered over the study site. Interestingly, they are all contained within moderately stable areas of low vulnerability. Areas indicating a high vulnerability and low variability (area H) can be understood with great confidence that they are vulnerable to the process of thaw settlement. In the base map, they were classified as highly vulnerable, and turned out to be relatively stable over the 500 runs, which suggests that these areas should definitely be avoided for construction. Areas that combine low vulnerability and high variability (area I) shows that even though an area can be classified as very low vulnerability on the base map, these patches should nonetheless be considered cautiously because the certainty of this assessment is low. There is one main spot (area J) where the combination of high risk with high variation is depicted and it is located at the far east of the map, in the foreshore section. Although the deposit map classified this region as highly vulnerable, it shows a large variability over the sensitivity runs, which suggests that more studies might be undertaken to confirm the actual vulnerability of the area.

Table 8. Combining the base map and variability map. This shows the pixel counts of the vulnerability estimate (Low, Medium, and High) versus the coefficient of variation (Low, Medium, and High) identified through the 500 sensitivity analysis runs. The first value in a given cell indicates the percentage of pixels in the study area having a given combination of vulnerability and confidence. For example, the best areas for construction, located in pixels with low estimated vulnerability and low variation in that result, comprised 6.4% of the study area. The second value in a cell shows a ranking of these combinations on a ten-star scale. Thus this combination, because it is the best place identified to build for which the confidence is high, gets 10 stars. See panel 13c for the map of these values.

		Calculated Vulnerability			Total
		Low	Medium	High	
Variation	Low	6.4% (10)	22.1% (7)	4.7% (1)	33.2%
	Medium	20.6% (8)	16.5% (5)	4.8% (2)	41.9%
	High	3.4% (6)	19.4% (4)	2.1% (3)	24.9%
	Total	30.4%	58.0%	11.6%	

There are important aspects to this step that are subject to control by the analyst. In this case, the objective was to have a large number of pixels reclassified as “Low Vulnerability”, and set the vulnerability break point accordingly. For other assessments, an analyst might want the “Low Vulnerability” class to be highly restrictive. For the present assessments, the focus is mostly on identifying areas that either present a high or low vulnerability or a high or low confidence. There are many patches scattered all over the site that present those intermediate characteristics. Areas of medium vulnerability and medium variation (Figure 13 Panel c, areas K1 and K2) do not provide clear indications as to whether future investigations should be carried out in those areas.

The analysis presented here allows for the identification of not only the vulnerability, but also the confidence in that vulnerability. A major advantage is that it allows an analyst to realize that not all pixels evaluated as vulnerable should be considered equally strongly. In this example, although a vulnerability assessment indicates that

30% of the study area can be considered low vulnerability, the analyst can be highly confident of only about one-fifth of those pixels. Overall, the coefficient of variation map and the vulnerability and confidence map allow an analyst to see beyond the results that were obtained by producing the base map. They add the dimension of the analyst's uncertainty to the vulnerability results and provide a better estimation of the areas that should be further investigated.

4.5 Discussion

As northern communities work to adapt to climate changes, they will be in great need of confident recommendations built on high-quality, high-resolution data. Yet such recommendations, even if created with the utmost care, carry uncertainties introduced during many steps of the analysis process. It is essential to be able to convey some sense of these uncertainties to stakeholders to give them a fair sense of the confidence of experts in the result. The method developed in this work allows for the quantification of uncertainty in the resulting map, expressed as a function of uncertainty in the various factors that can influence eventual map quality.

Although this method is intended to quantify some of the many effects of uncertainty on the assessment process, there are many sources of uncertainty that are not directly modeled here. This can include, for example, the fact that some values of a factor might be delineated more or less confidently than others. Bare rock, for example, can be very easily identified on aerial photos, whereas most surficial deposits are not as easily delineated. In this sense, further work should explore a way to quantify different levels of confidence in different values of a single factor, rather than assigning a single confidence value to a factor in its entirety. Although there are numerous ways that might be accomplished, it is outside the scope of the work presented here.

This project highlights the use of GIS techniques combined with the AHP process as a valuable tool for land-use planning. Some limitations, as well as strengths, of the AHP

process arose during the realization of this project. In many instances, the AHP's demand for an ordered evaluation of class categories did not adequately capture the importance of several key factors. In this instance, communities are well served if they are able to build upon solid rock. In all but the most extreme slopes, the suitability of rock sites is, for practical purposes, vastly better than any alternative. To treat this important fact implied by the structural geomorphology, the resulting map from the process described above could be taken and be marked with all the locations presenting visible rock as having maximum suitability, regardless of the weighting of value of those pixels for other factors. In effect, this would "burn in" a high suitability for certain land types, regardless of what its other factor values might have been. Such an approach would also be suitable for marking some areas "unsuitable" regardless of the suite of values, but instead driven only by the value of a certain layer. This would be useful for, for example, clayey soil where building is strongly discouraged in warm permafrost areas.

The process described here should not be misconstrued as an effort to replace the judgment necessary when providing an environmental assessment. It is intended to aid, not supplant, the important expertise that can best be gained from field effort. The goal is to give experts an added tool to express the inevitable uncertainty inherent in making estimates of geomorphological characteristics, their relative importance to a process of interest, and the delineation of these areas using maps, aerial and satellite photos, and fieldwork. Evaluating uncertainty for risk-assessment products is crucial due to the inherent large consequences to people related to triggering of geological hazards.

4.6 Conclusion and Future Developments

Northern communities built on permafrost will be increasingly affected by climate warming. Warming and thawing of ice-rich permafrost is already triggering several geomorphological processes such as thaw settlement of the surface, mass movements and thermal erosion that can significantly impact landscape and infrastructure stability.

These growing communities are facing unprecedented land-management and land-planning challenges, and GIS can be used as a living, interactive tool for land-use planning and crucial decision-making. This work demonstrated how GIS techniques were used to identify the potential risks of proposed development areas for the village of Tasiujaq in Nunavik. A base map was created in the usual manner of a multi-criteria analysis, using the AHP to determine the ranks and weights for the selected criteria. With a single, best-estimate calculation based on those weights, a single map was created, showing the best estimate of vulnerability to thaw settlement of the surface, a process seriously affecting infrastructure stability. A method of quantifying and incorporating uncertainty in the resulting map was developed to express these results to stakeholders of the communities in terms of level of confidence in risk assessment products. In this study, the base map was used in conjunction with the confidence map to indicate not only the analyst's estimate of vulnerability, but also the certainty of that estimate.

In remote locations like Nunavik, where reliable field data are scarce and gathering additional data is especially costly, environmental assessments must necessarily work in an environment where the best information will always contain considerable uncertainty. In such settings, the ability to convey one's confidence in a work product, which may vary around the study area, is extremely valuable. By highlighting the locations in the study area where the best estimate indicates that it is a good area for construction, but where the certainty of this estimate is only of low or moderate confidence, this approach can help target future field studies. By focusing precious field effort in such areas, one can identify locations in the study area where more information might best help to diminish the uncertainty in the estimate.

Future development will include technical efforts to refine these approaches, fieldwork to improve the quality of factor maps, and interactions with the community to incorporate human and social factors into final products. Additionally, work will be

done to incorporate at least several more factors influencing site vulnerability, as well as to incorporate processes in addition to thaw settlement that also strongly influence construction suitability.

Planning decisions in these communities are quite complex and have aspects that are spatial, social, and temporal. As an aid to the initial spatial planning of expansion of these communities in the near future, it was found that the ability to offer more than a single map aids the process immensely. The approach and case study developed here will hopefully aid others working to use spatial data and GIS as tools that can greatly advance environmental assessments.

Acknowledgements

This research was supported by the Consortium Ouranos, the Quebec Ministry of Health and Social Services (Fonds vert — Quebec Action Plan on Climate Change), the National Science and Engineering Research Council and Natural Resources Canada. Student support was provided by the Indian and Northern Affairs (Government of Canada), ESRI, and the Université de Montréal's Faculté des études supérieures. The authors also wish to acknowledge the following individuals and groups: Katryne Larrivée, Michel Paquette, Michel Sliger, Chantal Lemieux, and David Pelletier for field and laboratory assistance, Marc Girard for cartography work, Elena Bennett for writing advice, and the community of Tasiujaq and the Kativik Regional Government.

Chapitre 5. Discussion générale

5.1 L'utilisation des SIG en contexte de pergélisol

La méthodologie présentée dans ce travail démontre que l'utilisation des SIG est parfaitement adaptée à des études en milieu de pergélisol. Certaines limites inévitables ont toutefois été relevées, et il prévaut donc de bien comprendre le processus d'analyse afin de pouvoir interpréter adéquatement les résultats obtenus. Il a été démontré qu'au moyen d'une analyse multicritère il est possible de produire des cartes permettant de guider la sélection de sites appropriés pour la construction domiciliaire et d'identifier des zones qui gagneraient à être investiguées plus en profondeur lors de travaux de terrain futurs. Cette méthodologie permet aussi d'obtenir une représentation visuelle du niveau de confiance de l'analyste envers les résultats produits.

Un élément important brièvement abordé dans cette recherche est la notion d'échelle, paramètre qu'il est crucial de déterminer au préalable. Ainsi, une étude de premier ordre visant à effectuer un tri grossier entre les possibilités d'emplacement ne requière pas la même précision qu'une analyse approfondie d'un territoire restreint. Les besoins en terme de précisions sont en effet différents en fonction du territoire couvert, des objectifs de l'étude et des données disponibles.

Un grand bénéfice de l'utilisation d'un SIG réside dans le fait qu'une fois la méthodologie développée, il est simple d'ajuster les paramètres de l'analyse en fonction des besoins de l'étude. Ainsi, une fois la structure du modèle géospatial établie, il est possible de réaliser différents scénarios en modifiant certains paramètres, par exemple le nombre ou le type de critères, ou encore leur poids respectif. Cet aspect constitue un avantage très intéressant compte tenu du caractère dynamique et imprévisible des milieux à pergélisol dans le contexte climatique actuel.

5.2 Sélection des paramètres

La production de cartes de potentiel d'aménagement au moyen d'un SIG et d'une analyse multicritère a été démontrée dans cette recherche de façon relativement simple. En effet, seuls trois grands facteurs ont été considérés : le type de dépôt de surface, les conditions de drainage et les pentes. Toutefois, il est évident que de nombreux autres facteurs ont un impact sur les processus géomorphologiques influençant la stabilité des sols au dégel. Cette décision s'explique principalement par le manque de données disponibles couvrant de façon suffisamment dense et uniforme la zone à l'étude. Bien que plusieurs forages et excavations aient été réalisés dans les alentours du village, les données qui en ont résulté étaient insuffisantes pour effectuer une extrapolation pour l'étendue du site à l'étude. En effet, compte tenu de leur importante variabilité spatiale, des paramètres comme la profondeur de la couche active ou encore la distribution de la glace dans le sol requièrent un nombre important d'échantillons couvrant de façon relativement uniforme le site étudié afin de pouvoir être extrapolés pour donner une estimation assez juste pour tout le site. La caractérisation des territoires ne pourra donc jamais être plus précise que la quantité et la qualité des données utilisées. Le succès d'une analyse de ce type est donc inhérent au nombre, à la distribution spatiale et à la précision des données disponibles.

Cette restriction dans les données disponibles pour fin d'analyse a tout de même permis deux choses : d'une part, il a été possible de développer et tester une méthodologie simple, sans s'encombrer de nombreux facteurs et de leur inhérente complexité. D'autre part, c'est ce nombre restreint de paramètres qui a rendu possible le développement d'une méthodologie permettant de quantifier l'incertitude dans les résultats produits. Un nombre plus important de facteurs aurait rendu difficile la calibration de l'analyse. La carte de potentiel d'aménagement produite à l'aide de la méthodologie présentée se veut un outil de première instance permettant d'effectuer un premier repérage des endroits à

valoriser et ceux à éviter. Maintenant que les bases sont établies, il sera possible et surtout intéressant d'expérimenter avec plus de paramètres.

5.3 Représentation de l'incertitude

Le chapitre 4 introduit une réflexion sur le concept d'incertitude et soulève l'importance de cet aspect dans le travail d'analyse. Quantifier l'incertitude entourant les cartes produites permet de mieux évaluer la valeur des résultats qui sont présentés. Une carte résultante est généralement acceptée comme étant uniformément fiable dans son intégralité, alors que bon nombre d'éléments peuvent grandement en altérer l'exactitude en cours d'analyse. Certains aspects de l'analyse, de même que les données et les outils utilisés sont responsables de cette perte potentielle de confiance dans les résultats.

Le processus de cartographie des facteurs constitue un bon exemple d'étape où des incertitudes peuvent être générées. Par exemple, les cartes de pentes présentent une précision qui est dépendante de la précision des données spatiales utilisées. Ainsi, plus les données ont une bonne résolution, plus la carte des pentes sera précise, ce qui diminuera l'incertitude pouvant être reliée à ce facteur. Ceci est particulièrement important pour la détermination du sens de la pente qui détermine les chenaux d'écoulement de surface et de subsurface par exemple. Le principe est le même pour la cartographie des conditions de drainage qui elle relève d'une analyse visuelle du terrain par photo-interprétation corrélée par des notes de terrain. Ce processus est partiellement subjectif, et comme les conditions de drainage peuvent être variables dans le temps, il est fort probable que des écarts à la réalité soient engendrés. Il en va de même pour la caractérisation des dépôts de surface, processus qui peut aussi entraîner de nombreuses incertitudes et généralisations. Alors que cartographier des affleurements rocheux est relativement simple puisqu'ils sont facilement visibles et identifiables, il en est tout autre pour les divers dépôts de surface qui se sont successivement accumulés au fil des millénaires et qui sont aujourd'hui masqués par la végétation. La délimitation entre deux types de dépôts est rarement claire et précise, des superpositions et

chevauchements étant très courants, mais ultimement, il faut néanmoins faire un choix quant à la localisation du trait délimitant chaque type de dépôt. Bien que de nombreuses autres occurrences aient été notées en cours d'analyse, ces brefs exemples suffisent à démontrer comment une partie de l'incertitude véhiculée lors des analyses peut être générée, particulièrement au niveau de la bordure des zones de tout ordre, dans la carte résultante.

La représentation cartographique de l'incertitude constitue donc une innovation importante découlant de la méthode développée au cours de cette recherche. Il est ainsi possible de discerner non seulement la qualité des différentes zones composant le site d'étude en terme de potentiel d'aménagement, mais aussi de connaître le niveau de confiance de l'analyste associé à ces résultats. La représentation visuelle de cet aspect permet d'orienter plus efficacement les études de terrains dans les zones où l'incertitude est plus grande et donc où plus de données seraient requises.

La représentation de l'incertitude et du niveau de confiance dans les résultats sont des éléments importants qu'il prévaut de mettre de l'avant et d'approfondir dans le futur. Le cadre de travail proposé dans ce mémoire gagnera à être élaboré davantage afin de permettre une meilleure intégration de cet important aspect.

5.4 Développements futurs

Le type d'analyse développé dans ce travail commence tout juste à être appliqué en contexte d'aménagement en milieu de pergélisol, et donc les possibilités d'amélioration et d'expérimentation sont nombreuses. Deux grandes pistes de développements futurs sont principalement à envisager : la comparaison des résultats et le raffinement de l'analyse.

Comparaison et validation des résultats

Une étape importante visant à valider et à calibrer la méthodologie consistera à comparer les résultats obtenus à une autre carte de potentiel d'aménagement similaire, mais celle-ci subséquemment validée en profondeur par un expert en pergélisol. Cette étape était préalablement prévue dans le cadre de ce projet à l'aide des travaux de L'Hérault *et al.* (2013), mais ces derniers étaient toujours en cours d'élaboration lors de l'écriture de ce mémoire. Une telle comparaison permettra d'identifier les secteurs qui présentent des différences importantes, de même que les éléments à modifier afin de rectifier l'analyse au besoin. Il sera principalement intéressant d'évaluer dans quelle mesure les résultats produits par notre méthodologie se rapprochent d'une cartographie complètement révisée par un expert. Il sera donc possible de déterminer à quel point l'analyse est satisfaisante en tant qu'analyse de premier ordre.

Raffinement de la méthodologie

Dans le but de produire une cartographie plus précise et complète, il sera intéressant de continuer les travaux afin de raffiner la méthode et les analyses. Une avenue à considérer pourrait consister à ajouter des facteurs et augmenter le nombre de processus étudiés ayant un impact sur la stabilité des sols pergélisolés afin de produire une analyse plus complète et représentative de la réalité. Une amélioration de la qualité des données, par exemple l'utilisation de données Lidar très précises pour dériver la carte des pentes, pourrait aussi contribuer à maximiser le potentiel de la méthode. Aussi, un élément important qui pourrait être incorporé à l'analyse est un facteur social. Ce dernier pourrait permettre que soient considérées les préférences des communautés locales dans le processus d'analyse, par exemple la proximité des territoires de chasse ou de certains services, ou encore l'accès à l'eau pour la pêche.

Finalement, un autre aspect à envisager repose sur la possibilité de coupler le SIG découlant de la méthode développée à des modèles caractérisant différentes composantes d'un site à l'étude. Par exemple, le SIG pourrait être couplé à des modèles

thermiques tridimensionnels, de même qu'à des modèles mécaniques de transfert de masse. De cette façon, il s'avèrerait possible de modéliser l'évolution d'un site pergélisolé dans son ensemble, et ce, en fonction de scénarios climatiques de réchauffement, ce qui permettrait d'anticiper de façon plus précise de potentiels changements.

Conclusion

L'aménagement du territoire en milieu de pergélisol dans le contexte climatique actuel représente un défi important pour les autorités chargées de mettre en place des plans d'aménagement du territoire cohérents et durables. La construction en milieu de pergélisol ne peut maintenant plus s'effectuer sans une évaluation approfondie des conditions locales. Bien qu'encore peu exploités, le recours aux SIG et analyses multicritères appliqués à des projets d'aménagement du territoire en milieu de pergélisol offre un potentiel considérable. La méthodologie présentée dans ce travail de recherche a démontré que les SIG sont des outils indispensables dans la réalisation de ce type d'études.

L'évolution des environnements à pergélisol est imprévisible et complexe, ce qui souvent rend la planification territoriale laborieuse. Des outils d'aide à la décision sous forme de cartes claires et simples à interpréter comme ceux produits par la méthode présentée dans ce mémoire sont des éléments grandement utiles pour orienter la sélection des sites les plus adéquats pour la construction. Bien sûr, ces cartes doivent uniquement servir de guide, alors que des études géotechniques et des investigations plus poussées resteront nécessaires avant la sélection définitive des sites et le début des travaux de construction.

La méthodologie présentée dans ce mémoire constitue un premier pas dans le développement et l'élaboration d'un cadre de travail permettant de produire des outils pouvant aider à la planification du territoire au moyen de SIG. Certaines limites typiques de l'utilisation des SIG ont été présentées afin d'attirer l'attention sur leur importance et leur impact potentiel sur les analyses réalisées. En effet, prendre connaissance des erreurs qui peuvent se glisser ou s'accumuler en cours d'analyse et qui peuvent avoir un impact important sur les résultats en plus de modifier l'interprétation que l'on peut en faire, revêt une importance capitale. Comme exposé au cours de cette

recherche, certaines généralisations et simplifications de la réalité sont nécessaires, mais produisent néanmoins des résultats appréciables. Ce projet ouvre aussi la porte à des études plus approfondies, notamment du côté du rôle de la subjectivité et de la quantification de l'incertitude et surtout de leur impact sur les résultats.

Bibliographie

- Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E., Sarrazin, D., Bell, T., Doré, G. (2012) Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. Dans M. Allard et M. Lemay (dir.), *Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization* (p. 171-197). Québec, Canada : ArcticNet Inc.
- Allard M. & L'Hérault, E. (2010) *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik*. Rapport d'étape no 4 (février): Cartographie du potentiel de construction de la vallée de Salluit selon les conditions de pergélisol et les pentes. Réalisé pour le compte du ministère des affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire (MAMROT). Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P., Tarussov, A. (2007a) *L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik: caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes*. Rapport préparé pour le consortium Ouranos, Ressources naturelles Canada et Transports Québec. Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Allard, M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C., L'Hérault, E., Vinet, F. (2007b) *Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique*. Rapport préparé pour le Fonds d'adaptation aux impacts des changements climatiques de Ressources naturelles Canada et le consortium Ouranos. Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Allard, M., Fortier, R., Gagnon, O., Michaud, Y. (2004) *Salluit : Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique. Problématique du village de Salluit, Nunavik*. Rapport final. Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Allard, M., Fortier, R., Duguay, C., Barrette, N. (2002) *A Trend of fast climate warming in Northern Québec since 1993: Impacts on permafrost and man-made infrastructures*. Communication présentée à la 35^e rencontre annuelle de l'American Geophysical Union, San Francisco, California. Résumé #B11E-03, 83(47).

- Andersland, O.B. & Ladanyi, B. (2004) *Frozen ground engineering* (2e edition). American Society of Civil Engineers. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons.
- Association touristique du Nunavik (2010a) Une beauté éternelle.
URL : <http://www.nunavik-tourism.com/Accueil.aspx>
- Association touristique du Nunavik (2010b) Tasiujaq.
URL : http://www.nunavik-tourism.com/page.aspx?page_id=70
- Canada Department of National Defence, Directorate of Engineer Development (1949) *Permafrost: a digest of current information*. Technical Memorandum No. 49.
- Canadian Standards Association (2010) *Technical guide: Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation*. Mississauga, Ontario : CSA.
- Chen, Y., Yu, J., Khan, S. (2010) Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1582-1591.
- Chen, Y., Yu, J., Shahbaz, K., Xevi, E. (2009) *A GIS-based sensitivity analysis of multicriteria weights*. Communication présentée au 18^e congrès du World IMACS/MODSIM, Cairns, Australie.
- Commission des droits de la personne et des droits de la jeunesse (CDPDJ) (2007) *Enquête portant sur les services de protection de la jeunesse dans la baie d'Ungava et la baie d'Hudson – Nunavik*. Rapport, conclusions d'enquête et recommandations. Repéré à :
URL : http://www.cdpdj.qc.ca/fr/publications/docs/rapport_Nunavik_francais.pdf
- Dai, F.C., Lee, C.F., Zhang, X.H. (2001) GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. *Engineering Geology*, 61(4), 257-271.
- Drobne, S. & Liseč, A. (2009) Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, 33, 459-474.
- Eastman, J.R., Jin, W., Kyem, P.A.K., Toledano, J. (1995) Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(5), 539-547.
- Environnement Canada (2012) Bulletin des tendances et des variations climatiques – Été 2012.
URL : <http://www.ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=30EDCA67-1#a1>

- Environment Canada (2011) *Canadian Climate Normals, 1971–2000*. Kuujuaq. Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario.
URL : http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals
- ESRI® (Environmental Systems Research Institute) (2008) *AHP-OWA 2.0 – Multicriteria Evaluation*. Script Details.
URL : <http://arcscrippts.esri.com/details.asp?dbid=14894>
- Fortier, D., Larrivée, K., Grandmont, K., Lemieux, C., Allard, M. (2011) *Aménagement du territoire, Tasiujaq, Nunavik. Zones prévues pour la construction en 2011: synthèses et recommandations*. Rapport d'étape sur la production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour les communautés du Nunavik préparé pour le Gouvernement régional de Kativik, 31 janvier. Montréal, Canada : Laboratoire de géomorphologie et de géotechnique des régions froides (Geocryolab), Université de Montréal, et Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Fortier, R. & Bolduc, M. (2008) *Thaw settlement of degrading permafrost: A geohazard affecting the performance of man-made infrastructures at Umiujaq in Nunavik (Quebec)*. Communication présentée à la 4^e Conférence canadienne sur les géorisques, Québec, Canada.
- French, H.M. (2007) *The Periglacial Environment* (3^e éd.). Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons.
- Heywood, I., Cornelius, S., Carver, S. (2006) *An introduction to geographical information systems* (3e éd.). Harlow, England : Pearson Prentice Hall.
- Higgs, G. (2006) Integrating multi-criteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation. *Waste Management & Research*, 24(2), 105-117.
- Instanes, A. (2003) *Climate change and possible impact on Arctic infrastructure*. Communication présentée à la 8^e International Conference on Permafrost, Zürich, Suisse.
- Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrustalev, L.N., Ladanyi, B., Larsen, J.O. (2005) Infrastructure: Buildings, support systems, and industrial facilities. Dans L. Arris (dir.), *Arctic Climate Impact Assessment Report* (p. 907-944). Fairbanks : Cambridge University Press.

- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) (2012) Portrait de santé du Nunavik 2011 : conditions démographiques et socioéconomiques.
URL : http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1588_PortraitSanteNunavik2011_ConditionsDemoSocioecono.pdf
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2012) Estimation de la population des MRC et des territoires équivalents, 1^{er} juillet des années 1996, 2001 et 2006 à 2011.
URL : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons_regnl/regional/mrc_total.htm
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- Jin, H., Wei, Z., Wang, S., Yu, Q., Lü, L., Wu, Q., Ji, Y. (2008) Assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the Qinghai-Tiber highway and railway, China. *Engineering Geology*, 101(3-4), 96-109.
- Kêdowidé, C.M.G. (2010) Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. *VertigO – La revue en sciences de l'environnement*, 10(2), 1-20.
- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M-P., Ducharme, M-A., Larrivée, K., Grandmont, K., Lemieux, C. (2013) *Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés de Nunavik*. Rapport final préparé pour le Consortium Ouranos. Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Lamelas, M.T., Hoppe, A., de la Riva, J., Marinoni, O. (2009) Modelling environmental variables for geohazards and georesources assessment to support sustainable land-use decisions in Zaragoza (Spain). *Geomorphology*, 111(1-2), 88-103.
- Marinoni, O. (2004) Implementation of the Analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, 30(6), 637-646.
- Moffett, A., Dyer, J.S., Sarkar, S. (2006) Integrating biodiversity representation with multiple criteria in North-Central Namibia using non-dominated alternatives and a modified analytic hierarchy process. *Biological Conservation*, 129(2), 181-191.

- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) (2004) *Tasiujaq, Québec*. MNA - Modèles numériques d'altitude des villages nordiques, échelle 1:2000, feuille 24K12.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) (2003) *Zones de végétation et domaines bioclimatiques Québec*, Québec: Ressources naturelles et de la Faune, 2003-2013.
URL : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp#tundraArctiqueArb>
- Nelson, F.E., Anisimov, O.A., Shiklomanov, N.I. (2002) Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions. *Natural Hazards*, 26(3), 203-225.
- Pullman, E.R., Jorgenson, M.T., Shur, Y. (2007) Thaw Settlement in Soils of the Arctic Coastal Plain, Alaska. *Arctic, Antarctic, Alpine Research*, 39(3), 468-476.
- Prowse, T.D., Furgal, C., Chouinard, R., Melling, H., Milburn, D., Smith, S.L. (2009) Implications of climate change for economic development in northern Canada: Energy, resource, and transportation sectors. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(5), 272-281.
- Remchein, D., Fortier, D., Doré, G., Stanley, B., Walsh, R. (2009) *Cost and Constructability of Permafrost Test Sections Along the Alaska Highway, Yukon*. Compte-rendu de la conférence annuelle de l'Association canadienne des transports, Vancouver, Canada.
- Saaty, T.L. & Sodenkamp, M. (2010) The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes : The measurement of intangibles. Dans C. Zopounidis et P.M. Pardalos (dir.) *Handbook of Multicriteria Analysis* (p. 91-166), Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag.
- Saaty, T.L. & Vargas, L.G. (1991) *Prediction, projection, and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games and sports*. Boston : Kluwer Academic Publishers.
- Saaty, T.L. (1984) *Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision* (traduit par Lionel Dahan). Paris : Entreprise Moderne d'Édition.
- Saaty, T.L. (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.

- Sarrazin, D., Allard, M., L'Hérault, E. (2010) *Monitoring des thermistances – collecte et interprétation des données: aéroports de Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq, au Nunavik*. Rapport préparé pour le Ministère des Transports du Québec. Québec, Canada : Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Sharifi, M., Hadidi, M., Vessali, E., Mosstafakhani, P., Taheri, K., Shahoie, S., Khodamoradpour, M. (2009) Integrating multi-criteria decision analysis for a GIS-based hazardous waste landfill siting in Kurdistan Province, western Iran. *Waste Management*, 29(10), 2740-2758
- Smith, S.L., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Burn, C.R., Allard, M., Clow, G.D., Yoshikawa, K., Throop, J. (2010) Thermal state of the permafrost in North America: A contribution to the international polar year. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2), 117–135.
- Solomon-Côté, P. (2005) *Élaboration d'une classification de terrain en milieu de pergélisol, à l'aide d'un SIG, en vue de l'aménagement du territoire: Le cas de Salluit, au Nunavik* (Mémoire de maîtrise). Département de Géographie, Université Laval.
- Statistique Canada (2012a) *Tendances de la température au Canada*. Envirostas - Printemps 2011. Statistique Canada, Catalogue no. 16-002-XWF, vol. 6 no. 3, septembre, Ottawa.
URL : <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-002-x/2011001/part-partie2-fra.htm>
- Statistique Canada (2012b) *Tasiujaq, Québec (Code 2499100) et Nord-du-Québec, Québec (Code 2499)* (tableau). *Profil du recensement*, Recensement de 2011, produit n° 98-316-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. 24 oct. 2012.
URL : <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>
- Statistique Canada (2009) *Recensement de 2006 : Peuples autochtones du Canada en 2006: Inuits, Métis et Premières nations*, Recensement de 2006 : résultats, produit n° 97-558-XIF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa.
URL : <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/as-sa/97-558/index-fra.cfm>
- Statistique Canada (2007) *Tasiujaq, Québec (Code 2499100)* (tableau). *Profils des communautés de 2006*, Recensement de 2006, produit n° 92-591-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa.
URL : <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/dp-pd/prof/92-591/index.cfm?Lang=F>

- Stephani, E., Fortier, D., Shur, Y., Fortier, R., Doré, G., Walsh, R. (2013) A geosystem approach to permafrost investigations for engineering applications, an example from a road stabilization experiment, Beaver Creek, Yukon, Canada. *Cold Region Science and Technology*. (sous presse)
- Stephani, E., Fortier, D., Shur, Y., Fortier, R., Doré, G., Walsh, R. (2012*) A geosystem approach to permafrost investigations for engineering applications at a road stabilization experiment, Beaver Creek, Yukon, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*. (sous presse) - *Cette référence a été modifiée depuis la publication de l'article dans lequel elle apparaît. Voir Stephani et al., 2013.
- Store, R. & J. Kangas (2001) Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, 55(2), 79-93.
- Sushama, L. Laprise, R., Allard, M. (2006) Modeled current and future soil thermal regime for northeast Canada. *Journal of Geophysical Research*, 111(D18).
- U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force (2003) *Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure*. Special Report 01-03. Arlington, Virginie : U.S. Arctic Research Commission.
- Tudes, S. & N.D. Yigiter (2010) Preparation of land use planning model using GIS based on AHP: case study Adana-Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(2), 235-245.
- Vinet, F. (2008) *Géomorphologie, stratigraphie et évolution du niveau marin holocène d'une vallée soumise à des conditions macrotidales en régression forcée, région de Tasiujaq, Nunavik* (Mémoire de maîtrise). Département de Géographie, Université Laval.
- Williams, P.J. & Smith, M.W. (1989) *The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology*. New York : Cambridge University Press.
- Yahaya, S. (2008) *Multicriteria analysis for flood vulnerable areas in Hadejia-Jama'Are River basin, Nigeria*. Compte-rendu de la conférence annuelle de l'ASPRS, Portland, Orégon.
- Ying, X., Zeng, G.-M., Chen, G.-Q., Tang, L., Wang, K.-L. and Huang, D.-Y. (2007) Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality – A case study of Hunan Province, China. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 97-109

