

SOCIÉTÉ D'HABITATION DU QUÉBEC

CONSTRUCTION D'HABITATIONS AU NUNAVIK

GUIDE DE **BONNES PRATIQUES**



DEUXIÈME ÉDITION – 2018

Construction d'habitations au Nunavik – Guide de bonnes pratiques
a été réalisé par la Société d'habitation du Québec.

Publié par la
Société d'habitation du Québec
Aile Jacques-Parizeau, 3^e étage
1054, rue Louis-Alexandre-Taschereau
Québec (Québec) G1R 5E7
Téléphone : 1 800 463-4315 (sans frais partout au Québec)
Télécopieur : 418 643-4560
Courriel : infoshq@shq.gouv.qc.ca



(SHQ)



SocietehabitationQuebec



HabitationSHQ

Photographies de couvertures

Xavier Dachez
Inukshuk : robcocquyt/Shutterstock.com

On peut télécharger ce document à partir
du site Web de la SHQ au www.habitation.gouv.qc.ca.
Sur demande, ce document peut être adapté,
en tout ou en partie, à certains médias substitués.

Deuxième édition, 2018
ISBN : 978-2-550-82414-5 (version en ligne)
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018

© Gouvernement du Québec, 2018

REMERCIEMENTS

Ce guide a été réalisé grâce à la participation de plusieurs personnes provenant de différents organismes et possédant des expertises complémentaires dans la conception en milieu nordique et la construction en milieu nordique. Nous tenons à remercier sincèrement tous ces collaborateurs, qu'ils aient directement ou indirectement contribué à l'élaboration du document :

Michel Allard,
Centre d'études nordiques (CEN)

Hélène Arsenault,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Marc Blouin,
architecte

Mathias Brandl,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Watson Fournier,
Office municipal d'habitation Kati-
vik (OMHK)

Diane Frappier,
Ministère des Affaires municipales
et de l'Occupation du territoire (MAMOT)

Frédéric Gagné,
Administration régionale Kativik (ARK)

Valérie Gratton,
Ministère des Affaires municipales
et de l'Occupation du territoire (MAMOT)

Jean-François Gravel,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Annie Grégoire,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Gilles Grondin,
LVM

Fatima-Zahra Karmouche,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Martin Lachapelle,
Quadrivium

Claude Lepage,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Emmanuel L'Hérault,
Centre d'études nordiques (CEN)

Katherine Mailloux,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Guy Robichaud,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Bertrand Roy,
Société d'habitation du Québec (SHQ)

Shun-Hui Yang,
Société Makivik

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. PROCÉDURES ET AUTORISATIONS LOCALES.....	3
1.1 Groupes et individus concernés.....	3
1.2 Types de travaux.....	3
1.3 Projets de construction	3
1.3.1 Organisation générale.....	3
1.3.2 Procédures administratives.....	4
1.4 Terres de catégorie I.....	5
1.5 Puvirnituk.....	7
1.6 Terres de catégorie II.....	7
1.7 Terres de catégorie III.....	8
1.8 Matériaux de construction naturels	8
1.9 Extraction dans les terres de catégorie I.....	8
1.10 Extraction dans les terres de catégories II et III	9
1.11 Autres considérations	9
1.11.1 Branchements aux réseaux électrique et téléphonique.....	9
1.11.2 Location d'équipement dans les communautés	9
1.11.3 Sites archéologiques.....	9
2. IMPLANTATION ET AMÉNAGEMENT EXTÉRIEUR	11
2.1 Implantation des bâtiments	11
2.2 Utilisation des infrastructures urbaines et des services	12
2.3 Aménagement extérieur	12
3. ARCHITECTURE	13
3.1 Réglementation et recommandation d'applicabilité	13
3.2 Opération et entretien – généralités	14
3.2.1 Équipements mécaniques et électriques	14
3.2.2 Matériaux et produits de finition	14
3.2.3 Planification des inspections et de l'entretien	14
3.2.4 Remplacement des matériaux et des produits.....	14
3.3 Volumétrie	15
3.3.1 Aérodynamisme de la volumétrie.....	15
3.3.2 Rationalisation de la volumétrie	16
3.4 Enveloppe du bâtiment	17
3.4.1 Étanchéité de l'enveloppe	17
3.4.2 Isolation de l'enveloppe.....	27
3.4.3 Revêtements extérieurs	34
3.4.4 Portes extérieures	36
3.4.5 Fenêtres	37
3.4.6 Tests d'infiltrométrie.....	42
3.5 Finition intérieure.....	43
3.5.1 Planchers.....	43
3.5.2 Cloisons	44
3.5.3 Portes intérieures	44
3.5.4 Plafonds.....	44

3.6 Aspects d'aménagement.....	44
3.6.1 Mobilier intégré et équipements	44
3.6.2 Vestibule.....	45
3.6.3 Cuisine	45
3.6.4 Salle de bain.....	45
3.6.5 Local technique	46
3.6.6 Rangements	46
4. MÉCANIQUE.....	47
4.1 Conception en fonction de l'entretien.....	47
4.2 Plomberie.....	47
4.2.1 Eau potable.....	47
4.2.2 Eau chaude domestique	50
4.2.3 Réseau sanitaire et réservoir de rétention.....	51
4.2.4 Sortie des événements à l'extérieur.....	53
4.3 Chauffage.....	54
4.3.1 Réservoir pour stockage de mazout	54
4.3.2 Alimentation en mazout.....	55
4.3.3 Air de combustion et de ventilation	58
4.3.4 Évacuation des produits de combustion	59
4.3.5 Capacité de chauffage	59
4.3.6 Appareils de production de chaleur	60
4.4 Ventilation.....	60
4.4.1 Généralités	60
4.4.2 Ventilation naturelle	60
4.4.3 Ventilation mécanique.....	61
4.5 Système de chauffage hydronique	64
4.5.1 Généralités	64
4.5.2 Fonctionnement.....	64
4.5.3 Composantes.....	65
4.6 Sécurité incendie.....	65
4.6.1 Avertisseurs de fumée.....	65
4.6.2 Extincteurs portatifs	66
4.6.3 Dispositifs d'obturation	66
4.7 Mise en service et entretien (plomberie – chauffage – ventilation).....	68
4.7.1 Pièces et équipement de remplacement.....	68
4.7.2 Essais et entretien	68
4.7.3 Accès	68
5. FONDATIONS SUR PERGÉLISOL.....	69
5.1 Notions de base sur le pergélisol.....	69
5.1.1 Introduction.....	69
5.1.2 Définitions.....	69
5.1.3 L'épaisseur du pergélisol.....	70
5.1.4 Les propriétés thermiques du sol	77
5.1.5 Les paramètres couramment utilisés pour caractériser le régime climatique local et son influence sur le pergélisol.....	78

5.1.6 Les types de glace dans le pergélisol.....	80
5.1.7 Les facteurs de contrôle de formation de la glace dans le pergélisol.....	85
5.1.8 Le pergélisol et les formations géologiques de surface.....	87
5.1.9 Principales formes de relief et sols structurés associés aux conditions de pergélisol.....	96
5.1.10 Synthèse et conclusion des notions de base.....	106
5.2 Les perturbations du pergélisol : causes, mécanismes, approche préventive en construction.....	108
5.2.1 Introduction.....	108
5.2.2 Les perturbations d'origine climatique.....	109
5.2.3 Les perturbations d'origine géomorphologique et écologique.....	112
5.2.4 Les perturbations d'origine anthropique indirecte.....	118
5.2.5 Les perturbations d'origine anthropique directe.....	122
5.2.6 Conclusion des notions sur le pergélisol.....	123
5.3 Considérations générales sur les fondations.....	124
5.3.1 L'action du gel et les fondations.....	124
5.3.2 Comportements mécaniques du pergélisol.....	127
5.3.3 Tassement et consolidation au dégel.....	129
5.3.4 Impacts thermiques des fondations sur le pergélisol.....	131
5.3.5 Impacts des changements climatiques sur le pergélisol.....	134
5.4 Conception de fondations sur pergélisol.....	137
5.4.1 L'approche de conception des fondations sur pergélisol.....	138
5.4.2 Définition du projet (considérations techniques et économiques).....	142
5.4.3 Reconnaissance du site (étude géotechnique).....	142
5.5. Type de fondation.....	158
5.5.1 Les remblais granulaires.....	159
5.5.2 Fondations superficielles avec ou sans remblai granulaire.....	164
5.5.3 Fondations profondes.....	175
5.5.4 Fondations avec système d'extraction de chaleur.....	182
5.6 Préparation du terrain et gestion de la construction.....	190
5.6.1 Planification saisonnière de la construction.....	190
5.6.2 Protection du terrain naturel.....	191
5.6.3 Disposition des bâtiments et des rues.....	192
5.6.4 Drainage du site.....	195
5.6.5 Construction sur sol organique.....	198
5.6.6 Construction à proximité des pentes.....	199
5.6.7 Gestion des granulats.....	199
5.7 Entretien, mise en place de techniques d'atténuation de la dégradation du pergélisol et suivi post-construction.....	201
5.8 Vision de la planification.....	204
BIBLIOGRAPHIE.....	205
ANNEXES.....	213

LEXIQUE

CÂBLES À THERMISTANCES :

Instrumentation en général insérée verticalement dans un trou de forage, comportant une série de senseurs de mesure de température (thermistances) distribués selon la profondeur et reliés à la surface pour en permettre la lecture. Les thermistances étant des résistances électriques qui varient en fonction des fluctuations de température, on peut les lire soit de façon manuelle, avec un voltmètre, soit de façon automatisée, avec un enregistreur de données (datalogger).

COIN DE GLACE :

Glace massive, généralement en forme de coin, dont la pointe est dirigée vers le bas. Elle résulte du gel de l'eau dans des fentes de contraction thermique. Le gel de l'eau au niveau du pergélisol permet la croissance du coin de glace.

COUCHE ACTIVE :

Couche de sol en surface, soumise au cycle annuel de gel et de dégel. Synonyme : mollisol.

CRYOFACIÈS :

Assemblage de cryostructures. Composition et structure du pergélisol constituée de sédiments et de glace.

CRYOSTRATIGRAPHIE :

Succession verticale d'une séquence de cryofaciès.

CRYOSTRUCTURE :

Patrons géométriques créés par l'assemblage tridimensionnel de glace se présentant sous diverses formes (lentilles et veines d'épaisseurs diverses, glace enrobant des cailloux, glace dans les interstices, etc.) et sédiments dans le pergélisol.

CRYOSUCCION :

Processus de succion survenant lors de la congélation du sol. L'eau interstitielle migre par capillarité vers le front de gel, où elle forme des lentilles de glace.

CRYOTURBATION :

Perturbation d'un sol, causée par la formation de la glace et les processus de gel et dégel.

DEGRÉS-JOURS :

Données ou unités servant au calcul de la chaleur accumulée (au-dessus de 0 °C) ou de la chaleur perdue (au-dessous de 0 °C). Par exemple, le cumul des degrés-jours au-dessus de 0 °C dans un été constitue l'indice de dégel. Cet indice est simplement la somme des températures moyennes journalières de tous les jours où la température est supérieure à 0 °C. La somme des degrés-jours inférieurs à 0 °C dans un hiver constitue l'indice de gel.

EAU INTERSTITIELLE :

Eau que l'on trouve dans les pores (vides) des particules (grains de silt ou de sable, cailloux, etc.) composant un sol.

FACTEUR N :

Rapport entre l'indice de gel ou de dégel à la surface du sol et l'indice de gel ou de dégel de l'air.

GÉLIF :

Sol dans lequel se forme de la glace de ségrégation (lentilles) causant des soulèvements lorsque les basses températures et l'apport d'eau sont suffisants et persistants.

GÉLIFLUXION :

Déplacement en masse d'un sol dégelé gorgé d'eau sur un sol gelé. Par exemple, la couche active qui dégèle en été flue par gravité sur les versants et sur le pergélisol sous-jacent. Il s'agit d'un mouvement relativement lent qui entraîne des déplacements de l'ordre de quelques centimètres par an et en vient à constituer des formes telles que des lobes ou des nappes de gélifluxion sur les versants.

GLACE INTERSTITIELLE :

Glace contenue dans les vides du sol.

GLACE DE SÉGRÉGATION :

Glace se formant en lentilles le long du front de gel à la suite de la migration de l'eau interstitielle par cryosuccion vers celui-ci.

GLACE RÉTICULÉE :

Glace sous forme de veines horizontales et verticales qui structurent un réseau tridimensionnel, rectangulaire ou carré.

GLACE D'AGGRADATION :

Glace qui se forme au contact de la couche active et du pergélisol et qui enrichit les couches supérieures de celui-ci.

PERGÉLISOL :

Sol (ou roche) qui demeure à une température inférieure à 0 °C pour une période d'au moins deux années consécutives.

PERGÉLISOL SYNGÉNÉTIQUE :

Pergélisol qui se forme par le gel des sédiments qui s'accumulent dans un environnement dynamique, par exemple dans des dépôts de versants, des alluvions de débordement de rivière, des sables éoliens ou des accumulations de tourbe. Le gel permanent s'installe dans le sol au fil des années, au fur et à mesure que la surface du terrain augmente sous l'effet de l'accumulation des dépôts.

PLAFOND DU PERGÉLISOL :

Limite supérieure du pergélisol, typiquement riche en glace.

SOL STRUCTURÉ :

Terme général pour désigner tout sol présentant en surface un patron morphologique ordonné plus ou moins symétrique (ex. : polygones à coins de glace, ostioles).

TALIK :

Couche ou partie de sol non gelée qui survient dans une zone de pergélisol en raison d'une anomalie locale dans les conditions thermiques, hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques.

THERMOKARST :

Processus aboutissant à la fonte du pergélisol et à la formation d'une topographie irrégulière, caractérisée par des dépressions et des affaissements de terrain dus à la perte de volume causée par la fonte de la glace. Cette fonte peut être généralisée et avoir une cause climatique (dégel dû à un réchauffement) ou bien anthropique (impact d'une construction, déforestation). Elle peut également être locale et due à la circulation d'eau sur un sol gelé. Le terme *thermokarst* peut aussi signifier un terrain chaotique résultant de la dégradation du pergélisol.



INUKJUAK (PHOTOGRAPHIE : XAVIER DACHEZ)

MISE EN CONTEXTE

La construction d'habitations au Nunavik est très différente de celle qui se fait ailleurs au Québec. Le *Guide de bonnes pratiques* a été rédigé pour illustrer ces différences et fournir des critères adaptés de performance aux architectes, aux ingénieurs, aux entrepreneurs, aux administrateurs locaux, ainsi qu'à tout autre intervenant qui s'implique dans la conception et la réalisation de ce type de projets. Nous les encourageons à proposer des solutions qui répondent le plus adéquatement possible à ces critères. Le guide ne doit en aucun cas agir comme un frein au développement d'innovations, innovations dont l'adéquation aux problèmes vécus en milieu nordique devra toutefois être démontrée (intégration au milieu naturel, amélioration de l'efficacité énergétique, diminution des coûts, etc.).

Les critères de performance énoncés ici n'ont pas pour rôle de remplacer les codes, les normes et les autres textes de la réglementation applicable, mais servent plutôt à apporter un complément d'information. Cette réglementation de base inclut le chapitre Bâtiment du Code de construction du Québec, bien qu'il n'ait pas été officiellement adopté par les instances municipales du Nunavik (les autorités compétentes et concernées).

Au fil du temps, un certain nombre de produits et de méthodes qui ont bien fonctionné ont été adoptés par les promoteurs immobiliers, les concepteurs et les constructeurs qui travaillent au Nunavik. Le *Guide de bonnes pratiques* revient sur les connaissances qu'ils ont accumulées au cours des 30 dernières années dans la construction d'habitations au Nunavik.

CLAUDE DE NON-RESPONSABILITÉ

La Société d'habitation du Québec (SHQ), le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire et les autres collaborateurs n'assument aucune responsabilité pour toute action, toute erreur ou omission, toute utilisation, toute mauvaise utilisation et toutes conséquences découlant de l'utilisation totale ou partielle du guide.

En conséquence, la Société d'habitation du Québec, le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire et les autres collaborateurs ne peuvent être tenus responsables envers tout utilisateur ou envers toute autre personne, de quelque dommage-intérêt que ce soit (direct, indirect, accessoire, spécial, exemplaire ou punitif) découlant directement ou indirectement de l'utilisation totale ou partielle du guide et de toute décision ou autre mesure prise par l'utilisateur ou par toute autre personne en considération de l'utilisation du guide ou sur la foi de l'information y étant contenue, de toute erreur ou omission du guide, ainsi que de toute utilisation ou reproduction non autorisée du guide. L'utilisateur assume seul tous les risques et périls qui découlent ou peuvent découler de l'utilisation du guide.

AVIS

Ce guide est issu d'un processus (actuellement en cours de définition) d'élaboration de concepts et de principes de développement durable, applicables lors des différentes phases de conception, de réalisation et d'exploitation des projets d'habitation au Nunavik. Ce processus comporte notamment des étapes pour réviser le contenu du document selon une approche d'évolution adaptative.

Il pourra ainsi répondre, au gré de son développement et de la parution des versions ultérieures, aux variations formulées et observées relativement aux besoins des occupants, aux impératifs de santé individuelle et collective, aux exigences découlant des changements environnementaux, aux contraintes financières et autres problèmes vécus. La Société d'habitation du Québec souhaite recevoir vos commentaires et vos suggestions pour l'aider à réviser et à améliorer les prochaines éditions du guide afin de le garder à jour et pertinent (voir à cet effet la fiche Proposition de révision en annexes).

INTRODUCTION

Les communautés du Nunavik se développent à un rythme qui s'accélère. Il y a de plus en plus de promoteurs et d'entrepreneurs en construction actifs dans le Grand Nord. De plus, le projet du gouvernement du Québec de développer le potentiel du Nord québécois amènera davantage d'activités dans cette région.

Toutefois, les règles et les règlements régissant l'industrie de la construction en milieu nordique ne sont pas toujours bien connus ni respectés. Le manque de procédures écrites normalisées a eu pour effet de causer inutilement des conflits entre les communautés, qui désirent que les règlements municipaux et les règles de construction soient respectés, et les promoteurs ou les entrepreneurs en construction, qui considèrent qu'ils ne sont pas bien informés des procédures à suivre et des autorisations qu'ils doivent obtenir.

De plus, le parc de logements du Nunavik est surpeuplé. On estime que 30 % des logements ont un nombre de pièces inférieur à la taille des ménages (en nombre de personnes) et qu'il manquait environ 1000 logements en 2015.

Le présent guide a été conçu pour :

- créer et mettre en place une marche à suivre normalisée à laquelle tous les projets de construction au Nunavik devraient être assujettis;
- faciliter le travail des entreprises qui souhaitent se lancer dans des projets de construction au Nunavik;
- faire connaître tous les intervenants qui doivent être informés des projets que l'on prévoit réaliser dans leur communauté;
- favoriser le respect des règles et des règlements (règlements municipaux, ordonnances, autorisation pour occuper des terres de catégorie I, etc.);
- faire connaître les particularités de la construction de logements au Nunavik.

Plus précisément, le guide donne un aperçu des procédures à suivre pour réaliser des projets de construction au Nunavik. Il explique, entre autres, les autorisations qu'il est nécessaire d'obtenir et auprès de quels organismes il faut en faire la demande. Il fournit les critères de conception à respecter à l'égard de l'implantation, de l'aménagement extérieur, de l'architecture, des fondations, de la mécanique du bâtiment et, dans une prochaine édition, de l'électricité, de l'environnement et du développement durable.



© Heiko Wittenborn

1. PROCÉDURES ET AUTORISATIONS LOCALES

1.1 GROUPES ET INDIVIDUS CONCERNÉS

Le présent guide est mis à la disposition de tous les organismes ou intervenants qui prévoient participer de près ou de loin à la réalisation d'un projet de construction d'habitation au Nunavik :

- les villages nordiques;
- les corporations foncières;
- les promoteurs de projets d'habitation;
- les entrepreneurs en construction;
- les firmes de concepteurs;
- les arpenteurs-géomètres;
- les fournisseurs de produits et de matériaux de construction;
- tout autre intervenant concerné par la construction d'habitations nordiques.

1.2 TYPES DE TRAVAUX

Ce guide donne des renseignements sur les procédures, les autorisations et les critères de performance applicables à tout projet de construction d'habitations au Nunavik. Cela comprend tous les type d'habitation, dont les maisons unifamiliales, les maisons jumelées et les bâtiments multifamiliaux, qu'il s'agisse de bâtiments neufs, d'agrandissement ou de modifications.

Pour plus de renseignements, communiquer avec les autorités municipales (le village nordique), la corporation foncière ou l'Administration régionale Kativik (ARK).

1.3 PROJETS DE CONSTRUCTION

1.3.1 Organisation générale

Au Nunavik, la saison de construction est plus courte que dans les régions situées plus au sud. S'ajoute à cette contrainte climatique l'absence de liens routiers avec le reste du Québec, qui rend les échéanciers de construction tributaires du transport maritime pour les matériaux et les équipements. En raison de son coût élevé et de l'espace restreint réservé au transport de marchandises, l'avion est généralement réservé au transport du personnel.

Le transport maritime vers les communautés du Nunavik est généralement assuré de la fin du mois de juin à la fin du mois d'octobre, selon l'état du couvert de glace. Les calendriers, les tarifs et les conditions (réservation, emballage, transport de matières dangereuses, etc.) peuvent être consultés sur le site Web des compagnies de transport.

En hiver, d'autres contraintes doivent être prises en considération. Les journées de travail raccourcissent et l'utilisation des matériaux granulaires devient presque impossible. De plus, l'exploitation de bancs d'emprunt pour extraire les matériaux servant à la construction des radiers granulaires est pratiquement inenvisageable, car le sol gelé est très difficile à excaver. En été, lorsque la couche de surface dégèle, on peut l'excaver et attendre que la chaleur pénètre dans la couche sous-jacente pour répéter l'opération.

Il incombe à l'entrepreneur de veiller à ce que le chantier de construction et le campement soient maintenus propres et exempts de débris et qu'ils ne présentent aucun risque d'accident, et ce, pendant toute la durée du projet de construction.

1.3.2 Procédures administratives

Les procédures et les autorisations à obtenir diffèrent légèrement selon la catégorie de terres sur laquelle le projet sera réalisé (voir les sections 1.4, 1.6 et 1.7). Il incombe au promoteur et à l'entrepreneur d'obtenir toutes les autorisations nécessaires avant le début des travaux. Le village nordique et la corporation foncière doivent, quant à eux, s'assurer que les exigences et les conditions des autorisations sont respectées.

Il faut toutefois prévoir un certain délai pour les obtenir. Les promoteurs doivent donc présenter leurs demandes le plus tôt possible et prévoir un délai d'au moins 90 jours avant le début des travaux de construction. Pour les projets de grande envergure, le délai peut être plus long.

Concernant les campements de construction, on recommande de communiquer avec le village nordique concerné (voir l'annexe I pour les coordonnées), car la majorité des villages possèdent leurs propres campements. Par ailleurs, avant de laisser de l'équipement ou des matériaux dans la communauté une fois la période de construction terminée, il faut obtenir l'autorisation du bureau municipal et de la corporation foncière (voir l'annexe I pour les coordonnées).

Les corporations foncières peuvent percevoir des frais pour l'entreposage d'équipement de construction dans la communauté.

Dans les communautés où de tels règlements sont en vigueur, les villages nordiques peuvent également percevoir des frais si des équipements ou des matériaux de construction sont laissés au dépôt municipal, et des sanctions pourraient être infligées si certains règlements municipaux ne sont pas respectés (par exemple, le tri du matériel ou l'endroit où les déchets doivent être laissés dans le dépôt). Il est important de planifier et d'organiser avec soin les projets de construction au Nunavik, car certains problèmes de logistique peuvent causer des retards importants.

Les diverses procédures à suivre pour chaque catégorie de terres du Nunavik sont décrites ci-après.

1.4 TERRES DE CATÉGORIE I

Le régime territorial de la Convention de la Baie-James et du Nord québécois (CBJNQ) définit trois catégories de terres, classées I, II et III. Les terres de catégorie I sont attribuées aux autochtones pour leur usage exclusif. Elles sont situées sur les lieux de vie habituels des populations autochtones et dans le voisinage. Elles sont désignées par les couleurs rouge (Cris), bleu (Inuit) et violet (Naskapis) sur la carte suivante :

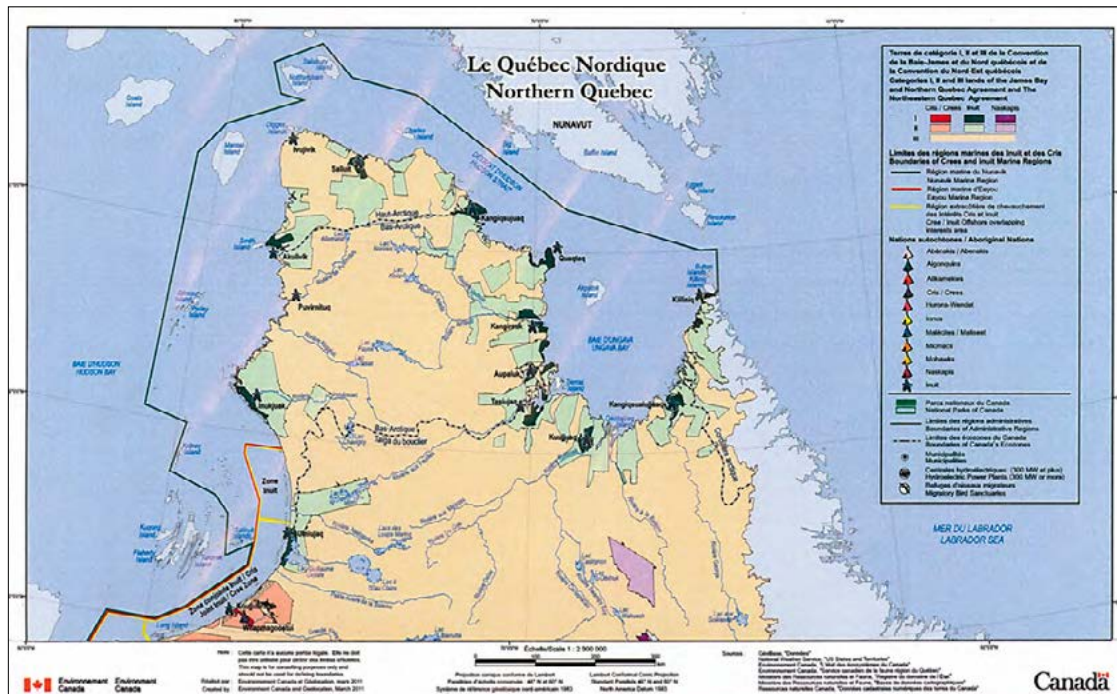


FIGURE 1.1 : CATÉGORIES DES TERRES / SOURCE : ENVIRONNEMENT CANADA, <http://www.ceaa.gc.ca>

Pour réaliser des projets de construction à l'intérieur des limites municipales ou sur les terres de catégorie I, il faut que la corporation foncière et le conseil municipal autorisent formellement le projet.

Voici la marche à suivre.

Première étape : Proposition du projet

Le promoteur doit présenter une demande au village nordique et à la corporation foncière locale au moins 90 jours avant le début des travaux de construction.

Il doit leur transmettre les documents suivants : le formulaire de demande de permis rempli et signé, les frais non remboursables pour la demande de permis et deux copies du plan d'implantation, du certificat de localisation, des élévations du bâtiment proposé et de ses plans d'étages. Le village nordique exige également qu'une copie électronique de ces documents soit envoyée à landuse@krg.ca.

Le formulaire qui doit être transmis au village nordique peut être obtenu au service de l'aménagement de l'Administration régionale Kativik (ARK) à l'adresse landuse@krg.ca et celui de la corporation foncière locale est disponible sur le site Web de l'Association des corporations foncières du Nunavik, à l'adresse www.nlhca.strata360.com.

Deuxième étape : Analyse de la proposition du projet

Le village nordique et la corporation foncière examinent le projet pour vérifier s'il est conforme au plan directeur de la municipalité, au règlement de zonage, à tout autre règlement municipal applicable de même qu'aux objectifs généraux de développement de la communauté.

C'est la corporation foncière qui autorise l'occupation d'une étendue de terrain. On recommande aux promoteurs de bien documenter le village nordique et la corporation foncière pendant l'élaboration du projet afin d'éviter des problèmes éventuels lors de la phase de construction.

Troisième étape : Décision

Le village nordique et la corporation foncière font parvenir leur décision par écrit au promoteur.

Si le projet est recevable, le village nordique délivre un permis d'aménagement et la corporation foncière adopte une résolution confirmant qu'elle autorise la réalisation du projet en remettant un certificat d'enregistrement au promoteur. Un bail foncier devrait par la suite être conclu entre celui-ci et la corporation foncière. Veuillez prendre note que le permis d'aménagement doit avoir été délivré et la résolution adoptée avant que les travaux de construction commencent.

Si le projet est irrecevable, le promoteur doit y apporter les modifications nécessaires ou l'abandonner.

Quatrième étape : Approbation du projet

Une fois le projet approuvé, le promoteur doit informer l'entrepreneur qui a été retenu pour réaliser le projet qu'il doit, d'une part, signer un protocole d'entente avec la corporation foncière concernant l'occupation et l'utilisation de l'étendue de terre pendant toute la durée du projet et, d'autre part, obtenir l'autorisation d'exploiter une carrière, une gravière, ou les deux, pour réaliser le projet. Dans les deux cas, il faut prévoir certains frais.

L'entrepreneur doit ensuite communiquer avec le village nordique et la corporation foncière afin de prendre les dispositions nécessaires à l'égard des aspects suivants :

- Village nordique : discuter des services municipaux qui seront requis pendant la réalisation du projet et des services que le village nordique peut offrir – ressources humaines, location de machinerie lourde – ainsi que des tarifs de location applicables.
- Corporation foncière : signer un protocole d'entente sur l'occupation et l'utilisation de l'étendue de terre pendant toute la durée du projet et obtenir les droits d'utilisation des matériaux de construction naturels (gravier et matière minérale). Certains frais sont applicables pour occuper et utiliser les terres de catégorie I; les tarifs varient selon qu'il s'agit de la saison de construction ou non. Des frais sont également perçus pour extraire des matériaux naturels. Après la signature du protocole d'entente, la corporation foncière transmet une dénonciation de contrat au promoteur.

Cinquième étape : Arpentage foncier

Le plan d'arpentage foncier doit être réalisé par un arpenteur-géomètre membre de l'ordre des arpenteurs-géomètres du Québec et déposé au Greffe de l'arpenteur général du Québec (GAGQ). À la suite du dépôt, le GAGQ fera parvenir une copie conforme du document à l'aménagiste de l'ARK et à la corporation foncière concernée. Le détenteur de permis a 12 mois pour fournir un plan d'arpentage du bâtiment et de son emplacement sur le lot à la corporation foncière, au village nordique, au service de l'aménagement de l'ARK ainsi qu'au ministre de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN).

L'arpenteur-géomètre mandaté pour le projet doit demander au GAGQ des instructions particulières d'arpentage, et ce, au moins 30 jours avant d'exécuter les travaux sur le terrain. Pour plus d'informations, des instructions supplémentaires sont fournies à l'annexe II de ce guide.

L'annexe IV présente un tableau récapitulatif des autorisations requises.

Exigences additionnelles :

En tout temps pendant la durée des travaux, le promoteur doit veiller à ce que les permis soient visibles à partir de la rue et, à la fin du contrat, il doit s'assurer que l'entrepreneur retire du territoire les fournitures, articles, équipements, matériaux, effets, etc. qui ont été nécessaires à la réalisation du projet.

Dans certaines communautés, le sol peut être instable et ne se prête pas toujours à la construction. Il est de la responsabilité du promoteur de s'assurer que toutes les études de sol nécessaires ont été réalisées. Le Centre d'études nordiques de l'Université Laval a produit des cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti dans les 13 communautés du Nunavik concernées. Ces cartes sont disponibles dans ces communautés et à l'ARK.

Enfin, certains projets de développement peuvent être assujettis au « processus d'évaluation et d'examen des répercussions sur l'environnement et le milieu social » prévu au chapitre 23 de la CBJNQ. On recommande au promoteur de vérifier si son projet est assujetti à ce processus auprès de la société Makivik ou de la Commission de la qualité de l'environnement Kativik (CQEK). Cette commission est chargée de l'administration et de la surveillance du processus d'évaluation des impacts environnementaux et sociaux au Nunavik. À titre d'information, l'annexe III donne une description des projets qui sont automatiquement assujettis à ce processus et de ceux qui y sont soustraits.

1.5 PUVIRNITUQ

Pour réaliser des projets de construction dans le village de Puvirnituk, où il n'y a pas de corporation foncière, le promoteur doit contacter la Direction générale du Nord-du-Québec afin d'obtenir les autorisations nécessaires relatives à un bail foncier. Il devra obtenir un permis d'aménagement du village nordique concerné et conclure un bail foncier avec le MERN et avec le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Les procédures à suivre pour obtenir le permis d'aménagement et les instructions particulières d'arpentage sont les mêmes que celles décrites dans la section 1.4.

1.6 TERRES DE CATÉGORIE II

Les terres de catégorie II, situées au Nunavik et relevant de la CBJNQ, sont des terres publiques provinciales soumises aux lois et règlements du Québec régissant les terres qui comportent des droits exclusifs de chasse, de pêche et de trappage pour les Inuits sans toutefois leur accorder de droit spécial d'occupation.

Pour réaliser des projets de construction sur les terres de catégorie II, il est nécessaire d'obtenir l'autorisation des organismes suivants :

- la corporation foncière, qui doit s'assurer que le projet n'entrave pas les droits d'exploitation des Inuits;
- l'ARK, qui doit délivrer un certificat d'autorisation confirmant que le projet respecte le plan directeur d'aménagement des terres de la région Kativik ou tout règlement ou toute ordonnance adopté par le conseil de l'ARK. À cet égard, il est requis de communiquer avec l'aménagiste de l'ARK;
- le MERN, afin de conclure un bail foncier;
- le MDDELCC, afin d'obtenir un certificat d'autorisation pour le traitement de l'eau potable et des eaux usées, de même que pour l'élimination des déchets;
- le GAGQ, afin d'obtenir les instructions particulières d'arpentage.

1.7 TERRES DE CATÉGORIE III

Finalement, les terres de catégorie III sont des terres publiques provinciales assujetties aux lois et règlements du Québec régissant de telles terres, mais où les autochtones peuvent poursuivre leurs activités traditionnelles à longueur d'année, en plus d'y avoir des droits exclusifs sur certaines espèces animales.

Au Nunavik, les terres de catégorie III sont toutes celles qui ne sont pas définies par les autres catégories.

Les autorisations requises pour faire des travaux de construction sur les terres de catégorie III sont les mêmes que celles qui sont nécessaires pour les terres de catégorie II (voir la section 1.6). Il n'est toutefois pas nécessaire d'obtenir une autorisation formelle de la corporation foncière.

1.8 MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION NATURELS

La plupart des projets de construction nécessitent du gravier ou d'autres matières minérales. Avant de se procurer tout minéral, il faut obtenir l'autorisation des organismes énumérés ci-après et payer les indemnités applicables.

1.9 EXTRACTION DANS LES TERRES DE CATÉGORIE I

La plupart des communautés exploitent déjà des carrières ou des bancs d'emprunt. Certains villages nordiques offrent des services d'extraction, de concassage et de criblage et la livraison du matériau. Le promoteur ou l'entrepreneur doit communiquer avec la corporation foncière et le bureau municipal pour obtenir de plus amples renseignements sur les services offerts et les tarifs applicables. En vertu de la CBJNQ, les corporations foncières peuvent réclamer des frais de compensation pour l'utilisation et l'extraction de matériau granulaire. La corporation foncière a la responsabilité de tenir un registre de tout le minéral extrait ou prélevé de la carrière. Ces renseignements peuvent être transmis au village nordique qui est chargé de transporter le matériau. Un tel registre doit être signé conjointement par l'entrepreneur, le village nordique et la corporation foncière concernée.

Le promoteur ou l'entrepreneur peut choisir d'extraire du minéral à partir d'un nouveau site. Avant d'entreprendre les travaux d'extraction, il doit obtenir l'autorisation écrite des organismes suivants :

- le village nordique, qui délivre le permis confirmant que les travaux ne contreviennent à aucun règlement municipal;
- la corporation foncière, qui donne l'autorisation d'obtenir et d'extraire du gravier ou des matières minérales;
- le MDDELCC, qui produit le certificat d'autorisation pour exploiter une carrière ou un banc d'emprunt.

Dans tous les cas, il incombe à l'entrepreneur de veiller à ce que le site choisi soit nettoyé et nivelé à la fin de la période de construction.

1.10 EXTRACTION DANS LES TERRES DE CATÉGORIES II ET III

Pour pouvoir extraire des matériaux naturels sur les terres de catégories II et III, il faut obtenir l'autorisation des organismes suivants :

- le MDDELCC, pour le certificat d'autorisation;
- l'ARK, pour le certificat d'autorisation;
- le MERN, pour les titres miniers et les permis d'exploration minière;
- le GAGQ, pour les instructions particulières d'arpentage;
- le MERN, pour conclure un bail foncier.

Les coordonnées de ces organismes sont fournies à l'annexe I.

1.11 AUTRES CONSIDÉRATIONS

1.11.1 Branchements aux réseaux électrique et téléphonique

Lorsqu'une nouvelle construction doit être raccordée aux réseaux électrique et téléphonique existants, le promoteur ou l'entrepreneur doit communiquer avec Hydro-Québec et Bell Canada pour leur fournir l'emplacement exact de la construction et la date à laquelle le raccordement est requis.

Le demandeur (promoteur ou propriétaire) peut avoir des frais à acquitter si la construction se trouve à l'extérieur des réseaux existants ou dans un endroit qui ne figure pas sur le plan directeur municipal ou sur le plan de zonage comme étant un secteur qui sera développé ultérieurement. En outre, si l'immeuble est construit à une distance qui nécessite l'installation de nouveaux poteaux spécialement conçus pour ce bâtiment, celle-ci sera facturée en conséquence.

Pour connaître les frais applicables ou pour obtenir de plus amples renseignements pour un branchement à Hydro-Québec, rendez-vous à l'adresse suivante :

<http://www.hydroquebec.com/affaires/moyen/raccordement.html>

Pour une nouvelle installation de ligne téléphonique, communiquez avec le service des nouvelles installations de Bell Canada au numéro 310-2355.

1.11.2 Location d'équipement dans les communautés

L'équipement et la machinerie lourde nécessaires aux travaux de construction sont de plus en plus souvent offerts localement. La plupart du temps, ils peuvent être loués auprès des administrateurs des villages nordiques, des corporations foncières ou de propriétaires privés. Lorsque c'est impossible, il faut prévoir leur transport par bateau.

La location d'équipement dans la communauté où se font les travaux de construction est encouragée. Communiquez avec le village nordique concerné pour obtenir des renseignements sur l'équipement disponible (description, fabricant, modèle), de même que sur le tarif horaire et hebdomadaire de location.

1.11.3 Sites archéologiques

Les sites archéologiques connus sont habituellement indiqués sur les plans régionaux et locaux d'affectation des terres. Des mesures de protection doivent être prises pendant les travaux de construction pour éviter de détruire ou d'endommager ces sites.

Si des reliques ou des artefacts sont découverts pendant la réalisation d'un projet, il faut suspendre tous les travaux en cours et communiquer avec le ministère de la Culture et des Communications du Québec et avec l'Institut culturel Avataq pour que des mesures de conservation appropriées soient prises avant la reprise des travaux.

2. IMPLANTATION ET AMÉNAGEMENT EXTÉRIEUR

2.1 IMPLANTATION DES BÂTIMENTS

Lorsque l'on veut construire un bâtiment au Nunavik, le choix du site est important et doit tenir compte de plusieurs facteurs.

Puisqu'il n'y a pas de réseau d'égout pluvial dans les villages, le drainage des eaux se fait en surface ou par percolation. Le site doit donc être naturellement bien drainé et situé à l'extérieur des zones d'inondation périodique. Par contre, la pente naturelle ne doit pas être trop forte et on doit avoir recours aux remblais et à la mise à niveau le moins souvent possible. Le site doit aussi être à une distance suffisante des sols instables tels que les berges des rivières ou le pied des falaises, propice aux éboulis et aux avalanches. Il faut évidemment que les dimensions du terrain soient suffisantes pour ériger le bâtiment et aménager les espaces nécessaires à la circulation des véhicules de service et au stationnement des véhicules des occupants. De plus, le choix du site ne doit pas déranger les habitudes et les activités de la communauté ni enclaver une propriété.

Les congères peuvent bloquer l'accès aux entrées et aux sorties des bâtiments, causer des surcharges sur les toits, obstruer les fenêtres et permettre à des personnes non autorisées d'accéder aux toits. Les bâtiments devraient donc être construits et orientés de manière à bien contrôler la répartition et la densité de la couverture de neige. On évite ainsi la formation de congères en périphérie des édifices, l'obstruction des entrées et des sorties, le réchauffement du sol et le dégel éventuel du pergélisol (voir à ce sujet le chapitre 3 – Architecture). Il existe des dispositifs relativement efficaces pour réduire ou éliminer ces accumulations en utilisant le vent pour balayer la neige, mais ils doivent être utilisés en dernier recours, car ils sont dispendieux.

Pour faciliter le déneigement des allées, des accès et des stationnements, il faut prévoir des espaces suffisamment grands pour entasser la neige loin des bâtiments. Ces espaces doivent être choisis en considérant que les amas de neige peuvent à leur tour produire des congères.

Il faut aussi tenir compte de l'accès des véhicules de service (de livraison d'eau potable et de mazout, de collecte d'eaux usées, etc.) et des véhicules personnels (voiture, camion, motoneige, tout-terrain, etc.) aux bâtiments. Les véhicules de service doivent pouvoir s'approcher suffisamment du bâtiment, ou des points de raccordement, pour faciliter le travail de l'opérateur et se trouver, autant que possible, en dehors de la voie publique.

Les bâtiments devraient être surélevés de manière à éviter le transfert de chaleur vers le sol. Cela permet de réduire l'accumulation de neige sous l'édifice ou à proximité de celui-ci durant l'hiver (grâce au passage et à l'accélération des vents entre le sol et le plancher des bâtiments) et de protéger le sol sous-jacent contre le rayonnement solaire direct, qui provoque le dégel du pergélisol durant l'été.

Les bâtiments devraient être orientés de manière à profiter de l'énergie solaire passive pour optimiser l'apport d'énergie et de lumière naturelle provenant du soleil. Le principe est simple : l'énergie solaire qui pénètre par rayonnement à l'intérieur des pièces à travers les fenêtres est absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis libérée sous forme de chaleur. Ce principe est encore plus efficace lorsque les matériaux et les objets qui reçoivent les rayons de lumière ont des propriétés de stockage thermique élevées.

2.2 UTILISATION DES INFRASTRUCTURES URBAINES ET DES SERVICES

Il est souhaitable d'optimiser l'utilisation du réseau routier existant et de limiter l'étalement urbain en optant pour une densification appropriée. On diminue ainsi le coût des infrastructures ainsi que celui des services d'égout et de livraison d'eau potable et de mazout, qui se font par camion-citerne dans les villages du Nunavik, exception faite du village de Kuujjuarapik, qui dispose d'installations d'aqueduc et d'égout.

La vision arrière étant parfois difficile en hiver, idéalement les routes doivent être conçues pour que les véhicules de service n'aient pas à reculer lors des livraisons. Les accès et les stationnements des véhicules utilisés dans la communauté, y compris des véhicules incendie, doivent être conçus en fonction de leur rayon de braquage.

2.3 AMÉNAGEMENT EXTÉRIEUR

Dans les aménagements extérieurs, il faut limiter les surfaces fortement minéralisées (asphalte et béton) et privilégier l'utilisation de matériaux pâles (ou à albédo élevé) qui absorbent peu l'énergie solaire afin d'éviter la formation d'îlots de chaleur et la transmission au sol de quantités importantes de chaleur pouvant contribuer au dégel du pergélisol.

Afin de limiter la quantité de boue et de saleté introduites dans les bâtiments par les habitants au printemps et à l'automne, des allées piétonnières devraient être aménagées. Il serait également souhaitable d'installer des bordures de séparation en bois ou en pierre entre le terrassement, les allées piétonnières et les stationnements, conçues pour résister à la machinerie lourde utilisée pour le déneigement.

L'emplacement des rampes et des escaliers qui donnent accès aux bâtiments devrait être optimisé pour faciliter le déneigement. Ceux-ci peuvent être en bois, mais il est préférable d'opter pour le caillebotis d'acier ou la fibre de verre, qui sont plus robustes. L'acier devrait être galvanisé.

Partout où il y a des raccordements pour les services domestiques (pour la livraison d'eau potable, la collecte d'eaux usées, la livraison de mazout, etc.), il doit y avoir un escalier et une plateforme à plus de 1,5 m du sol. Les échelles ne sont pas recommandées à cause des risques de blessures et de chutes en hiver.

Au Nunavik, la fonte de la neige et de la glace se produit soudainement. Il faut s'assurer que l'eau de fonte s'écoule loin des bâtiments et des terrains bâtis afin d'éviter les inondations qui pourraient provoquer des bris d'équipement ou une érosion importante et une perte de capacité portante du tablier granulaire d'assise des bâtiments.

La végétalisation des terrains doit être encouragée. En effet, dans la mesure où le climat le permet, il est reconnu qu'une plantation bien conçue peut jouer un rôle important dans la protection des sols contre l'érosion causée par le vent et le ruissellement de l'eau.

3. ARCHITECTURE

3.1 RÉGLEMENTATION ET RECOMMANDATION D'APPLICABILITÉ

Aucun règlement de construction proprement dit n'a été adopté par les autorités du Nunavik relativement à la conception et à la construction de petits bâtiments d'habitation¹ et d'aménagements sur le territoire. Dans ce contexte, la SHQ recommande le respect des dispositions réglementaires et techniques de la Régie du bâtiment du Québec (RBQ), mentionnées ci-après et visant à garantir l'atteinte des niveaux minimaux de performance et de qualité qui y sont prescrits :



- les **exigences** applicables du **Code de construction du Québec**², suivant la version la plus récente légalement en vigueur au Québec³;
- les **exigences** applicables du **Code de sécurité du Québec**, suivant la version la plus récente légalement en vigueur au Québec;
- les **exigences** applicables du **Règlement sur la qualification professionnelle des entrepreneurs et des constructeurs-propriétaires**.

Les textes réglementaires précités comprennent également tous les modificatifs publiés jusqu'à la date limite de réception des offres ou des soumissions. Les périodes transitoires prévues dans les projets de règlements lors de leur adoption doivent aussi être prises en compte. En cas de conflit ou de contradiction dans les textes réglementaires, ce sont les exigences les plus sévères et les critères les plus élevés qui s'appliquent.

En plus des normes de la RBQ, il existe d'autres prescriptions techniques de compétence québécoise que la SHQ juge pertinentes et recommandables pour toutes les catégories de la construction résidentielle au Québec, comme les **exigences techniques du programme Novoclimat**, volets « maison » et « petits bâtiments multi-logements », publiées par Transition énergétique Québec (TEQ), à titre de mesures incitatives en matière d'efficacité énergétique (voir l'annexe V). Quoique l'adhésion au programme Novoclimat demeure facultative au Québec, elle est fortement recommandée, surtout en milieu nordique, où les enjeux d'efficacité énergétique sont majeurs.

1. Le Code de construction adopté par la Régie du bâtiment du Québec contient toutefois des exigences auxquelles peuvent être assujettis les bâtiments d'habitation, notamment en plomberie, en électricité, en équipement pétrolier et en efficacité énergétique.

2. L'emploi du mot « Code » dans la Partie 3 ci-après désigne le Code de construction du Québec.

3. La nouvelle partie sur l'efficacité énergétique (partie 11) du chapitre Bâtiment du Code de construction du Québec ne s'applique qu'aux édifices abritant exclusivement des logements (usage principal : groupe C), d'une aire de bâtiment d'au plus 600 m² et d'une hauteur de bâtiment d'au plus trois étages.

3.2 OPÉRATION ET ENTRETIEN – GÉNÉRALITÉS

3.2.1 Équipements mécaniques et électriques

Des dégagements suffisants et des accès adéquats, en périphérie et à proximité des appareils et des équipements mécaniques et électriques, doivent être prévus pour permettre leur inspection, régulière ou sporadique, leur ajustement, leur approvisionnement, leur entretien, leur réparation et leur remplacement (voir aussi la section 4.1). Ces dégagements ne devront en aucun cas être inférieurs à ceux exigés par la réglementation québécoise (voir à ce sujet la section 3.1) et stipulés dans les recommandations des fabricants. La conception des aires de travail du personnel d'entretien doit aussi satisfaire aux exigences de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST).

3.2.2 Matériaux et produits de finition

Le choix des matériaux et des produits, principalement ceux qui sont utilisés pour la finition, devrait se faire en fonction de leur durabilité et de leur facilité d'entretien, de réparation ou de remplacement.

Le choix des matériaux et des produits devrait également être basé sur leur disponibilité, en fonction notamment des dates de transport prévues, afin d'éviter tous frais supplémentaires et tout retard dans la réalisation des travaux. Lorsque des retards sont prévisibles, il est préférable de recourir à des matériaux et à des produits de substitution.

Le choix de produits homologués est recommandé. Il faut s'assurer que les produits et les matériaux utilisés répondent aux normes minimales de qualité établies par les organismes de normalisation reconnus tels que Underwriters' Laboratories of Canada (ULC) et l'Association canadienne de normalisation (CSA).

L'uniformisation du matériel et des produits est également recommandée. Cela implique de limiter la variété de matériaux utilisés et le nombre de modèles de produits manufacturés pour l'ensemble des projets ou des bâtiments, de manière à réduire les stocks de matériaux et de produits de remplacement. Idéalement, les matériaux et les produits d'un même type devraient provenir d'un même fabricant. Cet objectif sera facilité si l'on tient compte des matériaux déjà utilisés dans les bâtiments d'un même parc immobilier, une approche qui devrait également permettre d'atteindre une certaine uniformité esthétique dans les ensembles bâtis.

3.2.3 Planification des inspections et de l'entretien

Afin d'optimiser la planification des opérations d'inspection et d'entretien de l'équipement, des matériaux et des produits mis en place, un « manuel de gestion du bâtiment » devrait toujours être fourni par l'entrepreneur lors de la livraison, en vertu d'une clause à cet effet dans les documents d'appel d'offres.

Ce type de manuel inclut habituellement tous les renseignements utiles sur les composants tels que les spécifications techniques des matériaux clés, des précisions sur le nettoyage et l'entretien et sur la fréquence à laquelle ils doivent être faits, la liste des pièces de rechange et des outils requis, les dates d'expiration ou de remplacement, la description des garanties applicables, la liste complète des noms, adresses postales et électroniques, numéros de téléphone et de télécopieur des fournisseurs et des fabricants. Le manuel contient également toute la méthodologie relative aux contrôles, aux essais, aux réglages et aux équilibrages de l'équipement mécanique, le tout sur support électronique, présenté dans un format accepté et approuvé par le représentant du propriétaire.

À la même rubrique dans les documents d'appel d'offres, des sessions de formation pour le personnel d'entretien de la bâtisse peuvent être requises.

3.2.4 Remplacement des matériaux et des produits

Sur la base de ses expériences ou de ses interventions antérieures en matière d'entretien et de réparation, le représentant du propriétaire devrait déterminer, en collaboration avec les chefs d'équipe du personnel d'entretien et avec les concepteurs, les matériaux et les équipements qui requièrent que des produits de remplacement soient fournis afin que des exigences précises soient incluses dans les

documents d'appel d'offres et dans le contrat de construction. Le représentant du propriétaire aura également à déterminer où ces produits doivent être livrés et entreposés.

Les matériaux de remplacement devraient normalement se rapporter aux composants suivants :

- matériaux et produits de finition intérieure pour le revêtement des planchers, des murs, des cloisons et des plafonds, incluant de la peinture pour chaque couleur utilisée;
- matériaux et produits de recouvrement extérieur des murs et de la toiture, incluant de la peinture pour chaque couleur utilisée;
- toutes les pièces de quincaillerie courantes jugées nécessaires pour les portes, les fenêtres et les pièces de mobilier intérieur;
- toutes les unités vitrées courantes jugées nécessaires pour les portes et les fenêtres.

Des quantités raisonnables de matériaux comme l'isolant devraient aussi être prévues.

3.3 VOLUMÉTRIE

3.3.1 Aérodynamisme de la volumétrie

Au Nunavik, des fondations robustes alliées à une architecture et à des matériaux conçus pour offrir une résistance élevée aux vents sont essentielles pour construire une habitation durable, les conditions climatiques extrêmes produisant souvent des rafales qui dépassent les 100 km/h.

Lorsqu'il y a de forts vents, les bâtiments surélevés par rapport au sol (d'environ 0,6 à 1,2 m) et les pentes de toit faibles, voire nulles (toit plat) présentent des qualités aérodynamiques qui permettent au vent de circuler librement en dessous et au-dessus d'eux, diminuant du coup la pression sur le volume construit et les vibrations durant les tempêtes.

Un bâtiment surélevé permet également de réduire les accumulations de neige autour des volumes construits, ce qui contribue au maintien du pergélisol.



FIGURE 3.1 : DÉGAGEMENT AU-DESSUS DU SOL DES MAISONS / SOURCE : SHQ

Les figures 3.2 et 3.3 illustrent les flux et les effets du vent au-dessus et en dessous d'une habitation typique construite sur des supports à vérins ajustables qui la dégagent du sol, et leur effet aérodynamique sur l'accumulation de neige au sol.

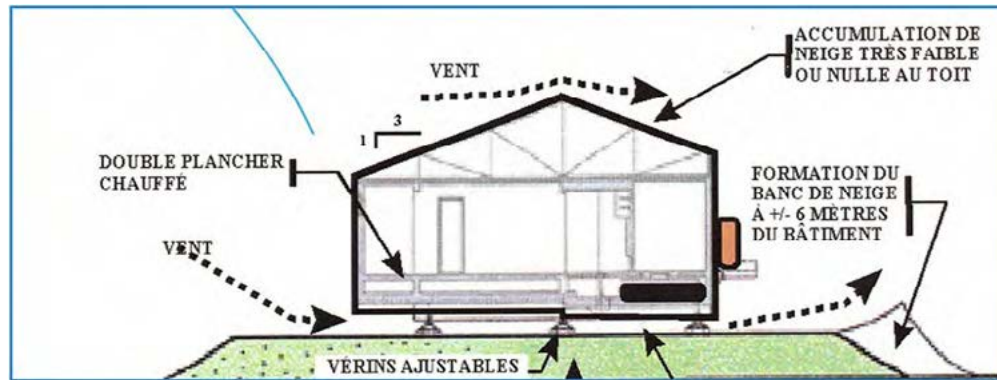


FIGURE 3.2 : AÉRODYNAMISME DES MAISONS POUR RÉDUIRE L'ACCUMULATION DE NEIGE
SOURCE : TOPOCLIMAT ET MICROCLIMATS DE LA VALLÉE DE SALLUIT (NUNAVIK), MÉMOIRE PRÉSENTÉ À LA FACULTÉ DES ÉTUDES SUPÉRIEURES DE L'UNIVERSITÉ LAVAL



FIGURE 3.3 : AÉRODYNAMISME DES MAISONS POUR RÉDUIRE L'ACCUMULATION DE NEIGE
SOURCE : CENTRE D'ÉTUDES NORDIQUES, UNIVERSITÉ LAVAL

3.3.2 Rationalisation de la volumétrie

Pour maximiser l'économie d'énergie pendant la saison froide, le concepteur d'un bâtiment devrait réduire autant que possible le ratio du périmètre de mur extérieur par rapport à la superficie de plancher intérieure afin de diminuer la surface des murs isolés et, en conséquence, leurs pertes thermiques. À cet égard, la configuration optimale est donc le carré. Cette rationalisation de la volumétrie entraînera des économies autant lors de la construction du bâtiment (en temps et en matériaux) que tout au long de son cycle de vie.

3.4 ENVELOPPE DU BÂTIMENT

L'enveloppe d'un bâtiment sert à séparer les conditions extérieures des conditions intérieures pour le bien-être de ses occupants. C'est une fonction que le Code de construction désigne par les termes « séparation des milieux différents ». L'enveloppe doit donc être conçue en tenant compte de paramètres environnementaux tels que le site, l'orientation, le climat et les particularités géotechniques locales.

Les recommandations présentées dans cette section visent une conception performante et durable de l'enveloppe en milieu nordique. Elles devraient également contribuer à clarifier ou à compléter les exigences du chapitre Bâtiment du Code, particulièrement celles de la partie 9, puisqu'elles sont conçues pour des bâtiments de petit gabarit. À cet égard, soulignons que la partie 9 fournit des prescriptions techniques éminemment pointues et pertinentes pour que les composants du bâtiment dont il est question dans le présent chapitre contribuent à la qualité de la construction.

Sur le plan normatif, mentionnons également que la partie 11 du chapitre Bâtiment du Code traite de l'efficacité énergétique de toutes les nouvelles constructions de trois étages et moins dont l'aire de bâtiment totalise au plus 600 m². Ses prescriptions portent sur l'isolation et l'étanchéité à l'air des murs, des toits et des planchers, sur le rendement des portes et des fenêtres et sur la ventilation mécanique intérieure. Inspirées du programme Novoclimat de Transition énergétique Québec, ces exigences relativement récentes devraient permettre d'améliorer de 20 à 25 % la performance énergétique des constructions neuves par rapport à la réglementation précédente, tout en assurant et même en accroissant le confort des occupants.

À noter que les présentations qui suivent comportent un préambule de nature didactique pour la plupart des concepts abordés, permettant de mettre en relief la nécessité d'une exécution rigoureuse et fiable des enveloppes de bâtiment dans un climat nordique.

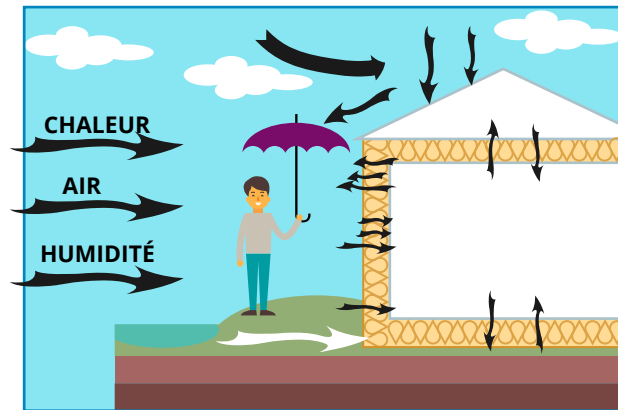


FIGURE 3.4 : MOUVEMENT DE LA CHALEUR, DE L'AIR ET DE L'HUMIDITÉ À PROXIMITÉ D'UN BÂTIMENT / SOURCE : SHQ

3.4.1 Étanchéité de l'enveloppe

Comme l'enveloppe des bâtiments doit permettre de séparer les conditions extérieures des conditions intérieures, elle doit être le plus étanche possible. Les passages incontrôlés d'air, d'humidité ou d'eau à travers l'enveloppe risquent en effet d'avoir des répercussions négatives (voir l'annexe VI). C'est pourquoi il convient d'aborder les solutions d'étanchéité selon les trois niveaux d'intervention suivants :

- l'étanchéité à l'air;
- l'étanchéité à la vapeur d'eau;
- l'étanchéité aux précipitations.

Notons que dans la partie 5 du chapitre Bâtiment du Code, les prescriptions sur la « séparation des milieux différents » traitent de l'étanchéité de l'enveloppe selon les trois mêmes angles d'analyse que ceux qui sont présentés ici.

3.4.1.1 Étanchéité à l'air

Généralités

L'ensemble des composantes architecturales devant assurer la résistance globale d'un bâtiment aux infiltrations et aux exfiltrations d'air s'appelle « système pare-air » ou « système d'étanchéité à l'air ». On le considère comme un système, car il englobe tous les plans isolés de l'enveloppe, soit les murs, les planchers, les plafonds isolés de même que les points de jonction entre ces différents plans. Le système peut être formé d'un seul matériau continu ou de différents matériaux se chevauchant (voir la figure 3.5).

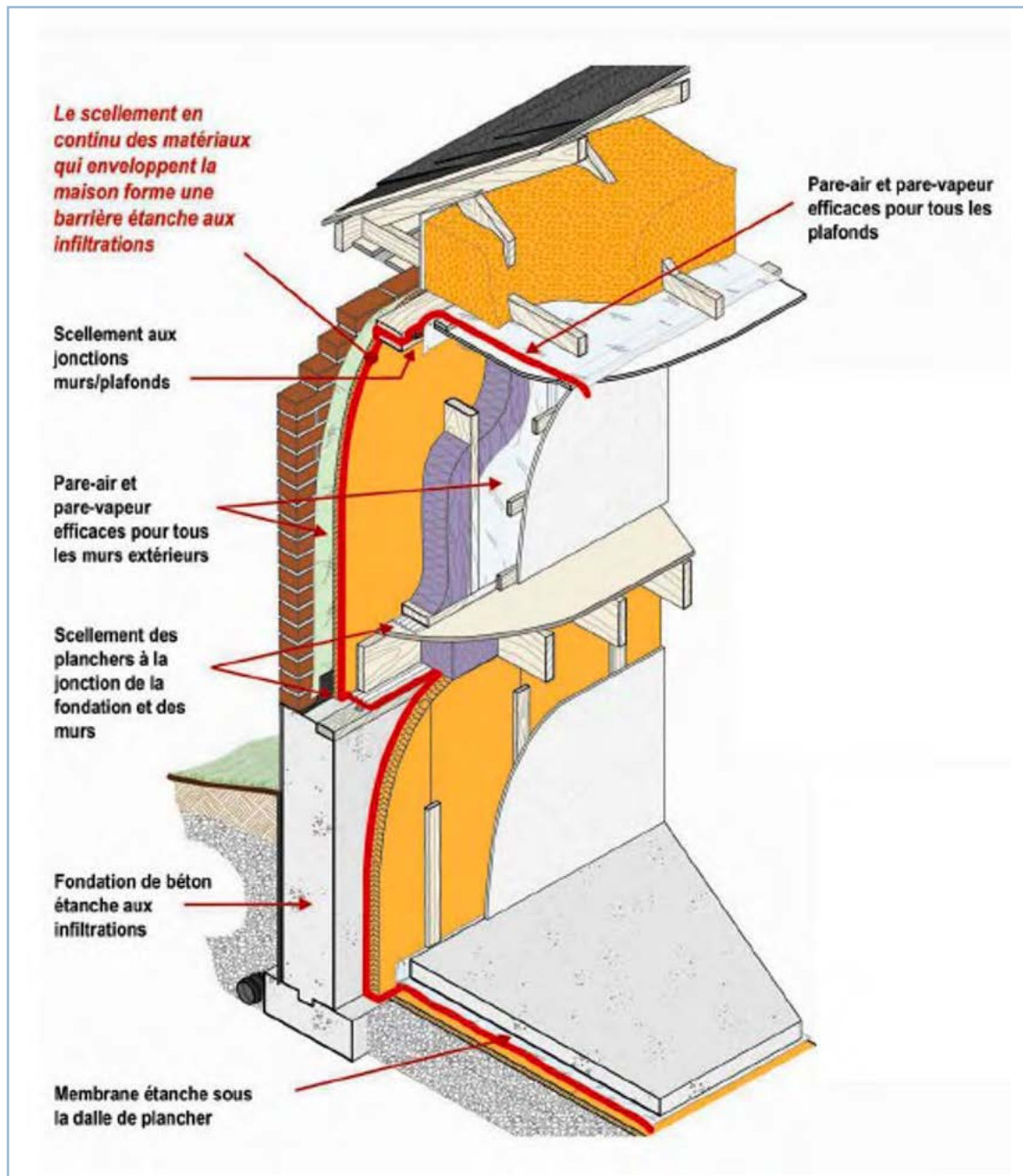


FIGURE 3.5 : ILLUSTRATION D'UN SYSTÈME PARE-AIR BASÉ SUR LA CONTINUITÉ (LIGNE ROUGE) DANS UN BÂTIMENT RÉSIDENTIEL STANDARD / SOURCE : MERN-NOVOCLIMAT

Pour que le système d'étanchéité à l'air remplisse efficacement sa fonction (voir l'annexe VII), on considère, sur la base des bonnes pratiques, qu'il doit minimalement présenter les propriétés suivantes :

- la continuité;
- la résistance structurale;
- une faible perméabilité à l'air;
- une perméance élevée à la vapeur d'eau;
- la durabilité.

Comme la qualité du pare-air est l'une des clés du confort intérieur et de l'économie d'énergie dans les bâtiments construits sous un climat nordique, le choix d'un système de qualité supérieure sur le plan de l'étanchéité à l'air devrait être une priorité. Le système pare-air devrait être composé de matériaux dont les performances se situent davantage dans la moyenne des valeurs de test des produits courants du marché que dans les valeurs minimales imposées par la réglementation.

Il n'est pas aisé de prédire quelle sera finalement l'étanchéité à l'air d'un ensemble de construction précis. Les données disponibles sur les divers systèmes utilisés en construction sont rares et les essais en laboratoire impliquent des installations spécialisées qui sont très coûteuses. Pour ces raisons, un essai d'infiltrométrie sur le chantier est fortement recommandé pour toute construction réalisée au Nunavik (voir la section 3.4.6).

Conception générale

Sur le plan conceptuel, deux solutions courantes, applicables au milieu nordique, existent pour créer un pare-air :

- la membrane dite « externe », qui combine les fonctions de pare-air et de pare-pluie et qui est généralement placée du côté externe de l'isolant;
- la membrane dite « pare-air/pare-vapeur », qui combine ces deux fonctions et doit être obligatoirement placée du côté interne de l'isolant.

Comme la continuité parfaite est la qualité primordiale d'un système pare-air, le choix entre ces deux solutions sera notamment lié à l'obtention de la meilleure continuité possible dans les matériaux du système. Par exemple, le pare-air d'un comble ventilé sera nécessairement formé par la pellicule pare-vapeur située immédiatement derrière le fini intérieur, puisqu'il est difficile de poser une membrane du côté froid de l'isolant souple dans un comble encombré de pièces de charpente. Dans ce cas précis, il faut nécessairement opter pour le système pare-air/pare-vapeur.

Dans le reste du système pare-air du même bâtiment (dans les murs isolés par exemple), il est tout à fait envisageable de passer à un système de membrane pare-air externe, l'important étant de faire un raccordement continu et robuste entre le mur et le comble.

Pour que le système du bâtiment soit parfaitement intègre, il est indispensable de faire un raccordement scellé du pare-air mural avec les murs de fondation à la base du bâtiment ou, si le bâtiment est surélevé par rapport au sol, avec le pare-air du plancher isolé.

Conseils pratiques

Voici une série de conseils pratiques sur les matériaux et le design pour installer un système pare-air efficace et durable dans un bâtiment construit en milieu nordique :

1. La membrane pare-air utilisée doit être certifiée par le Centre canadien de matériaux de construction (CCMC) non seulement dans la catégorie « membrane de revêtement intermédiaire », mais aussi dans la catégorie « pare-air » : elle doit donc obtenir deux numéros d'homologation.
2. Indépendamment de la réglementation, la valeur de « perméabilité à l'air » de la membrane utilisée devrait être au maximum de 0,01 l/s/m² à 75 Pa.
3. Indépendamment de la réglementation, la valeur de « perméance à la vapeur d'eau » de la membrane pare-air devrait être au minimum de 12 US perm si elle sert aussi de membrane pare-pluie du côté externe.
4. La valeur de « résistance à la pénétration d'eau » de la membrane externe doit être la plus élevée possible pour éviter l'infiltration d'eau dans les murs durant la construction. On ne doit en aucun cas utiliser une membrane composée de polyéthylène microperforé.
5. La sélection d'une membrane externe devrait être basée sur ses qualités supérieures de résistance à la déchirure et à la délamination, contribuant à préserver son intégrité face aux conditions souvent extrêmes sur les chantiers de construction.
6. Pour garantir l'étanchéité de la membrane externe à la jonction des ouvertures brutes de portes et de fenêtres, il faut poser une membrane autocollante de renfort qui borde les quatre côtés de l'ouverture et qui est repliée vers l'intérieur et vers l'extérieur du mur, conformément à la norme CAN/CSA A440 sur l'installation des portes et fenêtres. Toute extrémité libre de membrane pare-air joignant ces ouvertures devrait être scellée au bord de l'ouverture dans un double cordon continu de scellant plastique écrasé.
7. L'étanchéité de la membrane externe à la rencontre de saillies architecturales ou d'éléments électromécaniques la traversant devrait être garantie avec du scellant plastique pour les petits fils et conduits, et avec de la membrane autocollante pour les plus gros éléments.
8. Les bandes de membrane externe devraient toujours être scellées entre elles avec un ruban gommé approprié et compatible, à une température de 5°C ou plus. L'application devrait se faire exclusivement dans l'axe des fourrures de parement, par pression et frottement pour optimiser l'effet de la colle.
9. La fixation mécanique – temporaire ou permanente – des membranes externes non auto-adhésives devrait se faire sous les fourrures de parement ou avec des rondelles vissées d'un diamètre minimal de 25 mm. L'usage du marteau-agrafeur devrait être limité au clouage dans l'axe des fourrures de parement.
10. Les membranes externes devraient être doublées d'une composante rigide, par exemple un panneau de sous-revêtement ou d'isolant, pour prévenir les vibrations potentiellement destructrices lors de vents violents.
11. Les nouvelles membranes externes de type autocollant sont un choix particulièrement intéressant parce qu'elles ne requièrent aucun ancrage mécanique ni panneau de doublage pour leur protection et qu'elles scellent hermétiquement les membranes d'une bande à l'autre.
12. Les membranes externes composées de fibres de polyoléfine ne doivent pas être laissées sur le chantier, exposées aux rayons UV, plus longtemps que le délai prescrit par leur fabricant, lequel est généralement de quatre mois.

13. Dans les murs de l'enveloppe extérieure, une simple pellicule pare-vapeur en polyéthylène ne devrait pas servir de système pare-air/pare-vapeur, car elle n'offre pas la résistance structurale requise pour résister aux vents latéraux auxquels l'enveloppe murale est exposée.
14. Le choix d'un système pare-air/pare-vapeur (installé du côté interne de l'isolant) s'avère valable à la condition que l'isolant de recouvrement le protège contre toute convection d'air qui le refroidirait, à défaut de quoi des points de condensation dommageables se formeront à l'intérieur du système.
15. Toute membrane autocollante utilisée comme matériau de jonction, de renfort ou de transition à l'intérieur d'un système pare-air devrait être de type « hiver » ou « lt » (pour « low temperature ») étant donné les risques de basse température sur le chantier pendant la construction. De plus, ces membranes devraient être utilisées exclusivement avec un apprêt compatible appliqué sur leurs supports.

3.4.1.2 Étanchéité à la vapeur d'eau

Les figures 3.6 illustrent l'intérieur d'un mur protégé avec un pare-vapeur en pellicule de polyéthylène.

Généralités

Rappelons que la fonction du pare-vapeur dans une paroi isolée est de contenir au maximum la migration et la diffusion de la vapeur d'eau intérieure ambiante vers les composants froids de l'enveloppe du bâtiment, où cette humidité se condenserait alors, risquant, à long terme, de mouiller et de détériorer les matériaux. Ce risque de condensation est accru dans un climat nordique, en raison des températures extérieures très basses auxquelles sont soumis les bâtiments, et de leur niveau d'humidité potentiellement plus élevé (surtout dans les habitations).

En plus d'être requise par les bonnes pratiques dans le climat nord-américain, la protection pare-vapeur est obligatoire pour toutes les surfaces de mur, de plafond et de plancher isolées en vertu du Code lequel prescrit une perméance à la vapeur d'eau maximale de 60 ng/Pa.s.m^2 (1,05 perm US) pour le matériau utilisé (voir l'annexe VIII).

Conception générale

On utilise généralement comme pare-vapeur des pellicules intérieures faites de matière plastique (polyéthylène de 0,15 mm d'épaisseur) ou formées d'un laminage de film d'aluminium sur du papier kraft ou sur une natte isolante mince. Les produits finis d'aluminium offrent le double avantage suivant : perméance très basse à la vapeur d'eau et effet isolant supplémentaire dû au pouvoir de l'aluminium de réfléchir les ondes de la chaleur vers l'intérieur du bâtiment.

Alternativement, si la composition de l'enveloppe le permet, le concepteur peut opter pour la solution du pare-air/pare-vapeur intégré dans une seule membrane, présentée précédemment dans la section 3.4.1.1.



FIGURES 3.6 : SYSTÈME PARE-VAPEUR À L'INTÉRIEUR D'UN MUR
SOURCE : SHQ

L'installation d'un pare-vapeur est soumise à des exigences de continuité et de durabilité identiques à celles détaillées pour le pare-air dans la section 3.4.1.1, une de leur fonction commune étant de former une barrière étanche. Ainsi conçu, le pare-vapeur devrait former un véritable « système » de protection couvrant murs, planchers isolés et plafonds isolés sans discontinuité, telle une coquille.

L'obtention d'une continuité acceptable passe par un scellement solide à tous les points de jonction du pare-vapeur, incluant la rencontre de toute saillie intérieure, de nature structurale (solives de plancher) ou électromécanique (fils, conduits, etc.).

Sauf s'il est conçu comme système pare-air/pare-vapeur, un pare-vapeur s'installe du côté intérieur de l'ossature du bâtiment. Le Code prescrit qu'il « [...] doit être posé suffisamment près du côté chaud de l'isolant pour empêcher la formation de condensation aux conditions de calcul ». Ce critère autorise une certaine latitude quant à sa position exacte par rapport à l'isolant : par exemple, il pourrait être intercalé entre une ossature isolée et un isolant rigide posé du côté intérieur. Une règle reconnue est de placer au minimum deux tiers de la valeur isolante du côté externe de la paroi (côté froid), le pare-vapeur devant être posé à l'intérieur du tiers interne.

Conseils pratiques

Voici une série de conseils pratiques sur les matériaux et le design à utiliser pour installer un système pare-vapeur efficace et durable dans un bâtiment construit en milieu nordique :

1. La membrane pare-vapeur utilisée devrait être très supérieure à la norme de 60 ng/Pa.s.m² sur la perméance minimale exigée : elle devrait être de type I. À noter que l'utilisation d'un simple panneau isolant rigide intérieur en mousse comme pare-vapeur ne permet pas d'atteindre la classe de type I, même avec des joints scellés.
2. Éviter de perforer le pare-vapeur en séparant les boîtes électriques et leur câblage du fini intérieur avec des fourrures de 38 mm d'épaisseur, de sorte que l'installation électrique se trouve entièrement à la surface de la membrane pare-vapeur.
3. La fixation mécanique de la membrane en feuilles devrait se limiter à quelques points d'attache temporaires, puisque la membrane sera ensuite maintenue en place par le système de finition intérieur.
4. La continuité du pare-vapeur devrait être assurée par un chevauchement de 100 mm entre les bandes contigües de la membrane ou les jonctions, et par l'application d'un joint de scellant continu dans le repli du chevauchement ainsi formé.
5. Le scellant en tube que l'on utilise préférentiellement comme composé de scellement des feuilles de pare-vapeur est le scellant acoustique, en raison de ses propriétés hautement adhésives et de sa souplesse permanente.
6. Les joints entre deux membranes devraient être fermés en surface par du ruban gommé, en plus d'être scellés dans le repli de leur chevauchement.
7. Le ruban gommé utilisé de préférence pour doubler le scellement des joints est le même que le ruban extérieur employé pour les pare-airs.
8. Du scellant acoustique devrait idéalement être placé sous chaque clou de fixation des fourrures de bois.
9. Lors de l'érection de la charpente du bâtiment, prévoir l'intégration de bandes de membrane en attente à tous les points d'intersection de l'enveloppe isolée où une continuité pare-vapeur est requise (ex. : un mur porteur ou une cloison simple rencontrant un mur extérieur ou un plafond isolé).
10. Lors de l'érection de la charpente du bâtiment, prévoir l'intégration de bandes de membrane dans les plafonds isolés pour permettre le raccordement futur du pare-vapeur de plafond au pare-air mural externe, afin d'en assurer la continuité.

11. À la rencontre de la membrane pare-vapeur et des ouvertures brutes de portes et de fenêtres, on recommande de prévoir, sur les quatre côtés, un raccordement continu avec la membrane pare-air qui borde habituellement l'encadrement de ces ouvertures. La méthode la plus efficace est de faire chevaucher la membrane pare-air par-dessus le pare-vapeur intérieur en la collant sur celui-ci.
12. À la rencontre des ouvertures brutes de portes et de fenêtres, une fois la jonction pare-air/pare-vapeur assurée, le système pare-vapeur et le cadre de porte ou de fenêtre doivent être solidement scellés sur les quatre côtés.
13. Éviter de tendre la membrane, en particulier dans les angles internes, pour ne pas qu'elle se déchire lorsque les éléments de menuiserie la coinceront contre l'ossature du mur ou du plafond.

3.4.1.3 Étanchéité aux précipitations

Généralités

La protection contre les précipitations est l'une des principales formes de « séparation des milieux différents » (entre l'intérieur et l'extérieur) exigées par le Code. Elle est présentée comme une fonction de base de l'enveloppe du bâtiment pour prévenir :

- l'infiltration d'eau ou de neige dans les espaces intérieurs;
- la détérioration prématurée des composants de l'enveloppe, en réduisant au minimum les infiltrations dans ses éléments externes (voir l'annexe IX).

Conception générale, murs

Au regard des deux objectifs de base énoncés ci-devant, à la section 9.27, Revêtement extérieur, le chapitre Bâtiment du Code présente une série de prescriptions et de choix de design fort complexes, parfois contraignants, adaptés à diverses conditions d'ordre climatique ou autre.



SOURCE : SHQ

Les bâtiments d'habitation de même que les bâtiments qui sont construits dans les régions humides et froides sont assujettis à des prescriptions concernant la résistance de leurs murs aux précipitations. Dans cette catégorie de bâtiments, le Code prescrit le recours à deux types de protection pour le revêtement extérieur : une première protection externe, formée par le parement mural, et une seconde protection, située immédiatement derrière, composée d'un ensemble de solins et d'un plan de drainage qui comporte un ou des matériaux dits « de revêtement intermédiaire » (panneau de revêtement intermédiaire ou membrane de revêtement intermédiaire) destinés à intercepter et à dissiper l'eau ou la neige qui aurait réussi à traverser la première protection.

En résumé, on peut considérer que les exigences du Code qui s'appliquent aux bâtiments à usage résidentiel du Nunavik permettent d'opter pour l'un ou l'autre des deux types de murs suivants : le type de mur « à protection dissimulée » ou celui « à écran pare-pluie » (voir l'annexe X).

Au-delà du Code, nous constatons que les défis spécifiques aux constructions érigées dans un climat comme celui du Nunavik résident dans leur résistance aux charges du vent, violentes et soutenues, qui projettent la pluie, la neige, le grésil, le sable et même la poussière dans les moindres interstices du parement extérieur des murs et de la toiture. À titre d'exemple, on a pu observer dans cette région la saleté généralisée des membranes pare-air dans des bâtiments en rénovation dont on a retiré le parement de bois 25 ans après sa pose, signe que les intempéries réussissent, à un moment ou à un autre, à traverser les joints du parement mural. Or, une telle malpropreté du pare-air est nuisible à sa bonne

perméance à l'humidité.

Dans des conditions d'exposition aussi sévères, le scellement adéquat de la paroi externe de l'enveloppe murale revêt une importance particulière, et ce, même dans le cas des murs ventilés de type « à écran pare-pluie ouvert ». L'importance d'assurer un drainage et une aération efficaces de la cavité derrière le revêtement demeure primordiale pour ces derniers.

Conception générale, toitures

Au Nunavik, il existe deux solutions architecturales dans le design des toitures de bâtiments résidentiels :

1. La toiture en pente à comble ventilé;
2. La toiture sandwich ventilée, de type « cathédrale ».

L'option d'une toiture plate drainée mécaniquement doit être écartée d'emblée. En effet, le drain ne pouvant, la plupart du temps, être raccordé à l'égout, vu l'absence d'un réseau d'égouts ou de fondations périphériques, l'eau gèlerait en traversant l'espace libre sous le bâtiment.

La toiture en pente étant ainsi privilégiée, il faut préciser que cette pente devrait être relativement faible pour réduire l'accumulation de neige pendant l'hiver, sur la base du principe aérodynamique selon lequel un profil de toiture aplati favorise l'autodéneigement. La force et la vitesse des vents dans les villages du Nunavik contribuent en effet à balayer la neige qui se dépose sur les toits ayant une faible pente (voir la figure 3.7). En revanche, les accumulations de neige et de glace sur les toits ayant une pente plus prononcée représentent un danger réel pour les personnes qui entrent ou sortent des maisons.

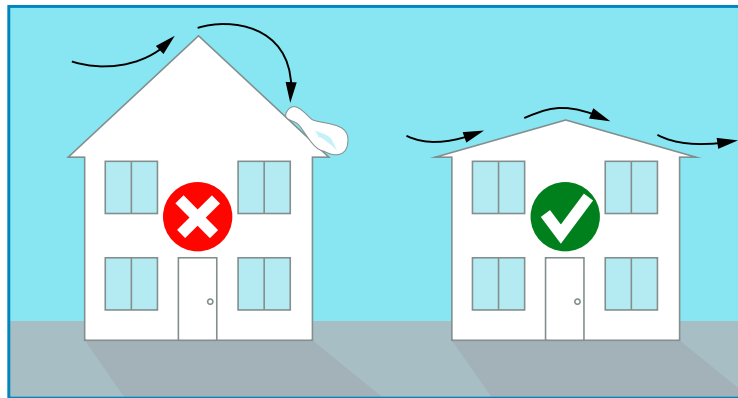


FIGURE 3.7 : ACCUMULATION DE NEIGE SELON L'INCLINAISON DE LA TOITURE
SOURCE : SHQ

La figure 3.7 illustre l'effet du vent sur un toit incliné où la neige s'accumule et l'effet du vent sur un toit à faible pente qui balaie la neige.

Entre les deux concepts de toiture mentionnés précédemment (à comble ventilé ou de type cathédrale), le premier devrait être préféré au Nunavik sur la base des deux considérations techniques suivantes, et ce, même si le second concept peut paraître plus intéressant d'un point de vue architectural :

- un plafond intérieur améliore le confort des occupants, le volume à chauffer pendant l'hiver étant moindre, un choix qui favorise également l'économie d'énergie;
- un comble accessible facilite l'inspection des matériaux et l'entretien, puisqu'un vide sous le toit demeure sujet à des avaries, souvent causées par de la condensation ou des infiltrations d'eau.

Que l'on opte pour un concept ou l'autre, il est bon de garder à l'esprit qu'au Nunavik, lorsqu'il y a des intempéries, les toitures ventilées courent un risque accru d'infiltration par des particules légères entraînées par le courant d'aération auquel les combles sont exposés. Deux particularités des régions nordiques se conjuguent ici : la force des vents et la finesse de la neige qui, sous certaines conditions météo, prend la forme d'un brouillard. L'aération des toitures ventilées doit être conçue pour contrôler ces risques supplémentaires.

Quant à l'exposition des toitures à la pluie, soulignons la violence des vents qui donne parfois aux précipitations une force et une orientation exceptionnelles, obligeant le concepteur à prendre des dispositions pour augmenter la résistance et l'étanchéité du toit, par exemple :

- en optant pour un revêtement particulièrement résistant aux intempéries et au cycle gel-dégel;
- en utilisant des fixations ultra-robustes;
- en s'assurant d'une double étanchéité.

Conseils pratiques, murs et toitures

Voici une série de conseils pratiques sur les matériaux et le design afin que l'enveloppe extérieure d'un bâtiment construit en milieu nordique offre une protection efficace contre les précipitations :

1. Privilégier le concept de mur extérieur «à écran pare-pluie de type ouvert», car il offre une barrière contre les violentes intempéries et le risque que de l'eau s'infilte plus profondément dans l'enveloppe murale sous une charge de vent élevée.
2. Il est avantageux de configurer la cavité ventilée des murs à écran pare-pluie de type ouvert avec les détails de conception suivants :
 - la compartimentation de la cavité en sections d'au plus 6 m de largeur et d'un étage de hauteur, fermées dans les coins du bâtiment, pour favoriser l'équilibre de la pression qui s'exerce devant et derrière le parement;
 - une disposition verticale plutôt qu'horizontale des fourrures de support du parement, pour assurer le drainage de l'eau qui pourrait s'infiltrer derrière celui-ci. Pour les parements nécessitant des supports horizontaux, une double rangée de fourrures croisées est requise;
 - l'installation d'un médium filtrant en haut et en bas de la cavité pour bloquer les particules de neige et de poussière;
 - l'utilisation d'une membrane de revêtement intermédiaire conforme à la norme CAN/CGSB-51.32 et dont la valeur de résistance à la pénétration d'eau s'établit à 200 cm minimum selon les tests normés de l'AATCC (Association of Textile, Apparel & Materials Professionals). Cette exigence de protection contre l'eau est généralement facilement remplie par la membrane pare-air requise dans la composition murale (voir la section 3.4.1.2);
 - la pose d'un solin en rejéteau intérieur dans le haut des ouvertures de portes et de fenêtres en conformité avec la norme CAN/CSA A440, pour le drainage rapide de l'eau qui pourrait s'infiltrer derrière le parement par le haut de ces ouvertures;
 - la pose d'un solin en rejéteau extérieur dans le bas des ouvertures de portes et de fenêtres, pour éloigner l'eau de ruissellement qui pourrait s'infiltrer sous le parement extérieur.
3. Toute couverture en pente devrait comporter un système d'étanchéité principal formé d'une membrane bitumineuse continue.

4. Pour l'aération des vides sous toit, il est essentiel de prévoir un chemin d'accès allongé entre le vide et la prise d'air, incluant un médium filtrant continu (ou filtre à particules) à l'entrée et à la sortie du circuit d'aération. On recommande de ne pas avoir recours aux soffites ventilés en usage sous nos latitudes et de promouvoir plutôt le concept de prise d'air murale horizontale continue intégrée dans le parement mural, à environ 1,5 m ou plus en bas du niveau de l'isolant du comble (voir la figure 3.8 ci-après).

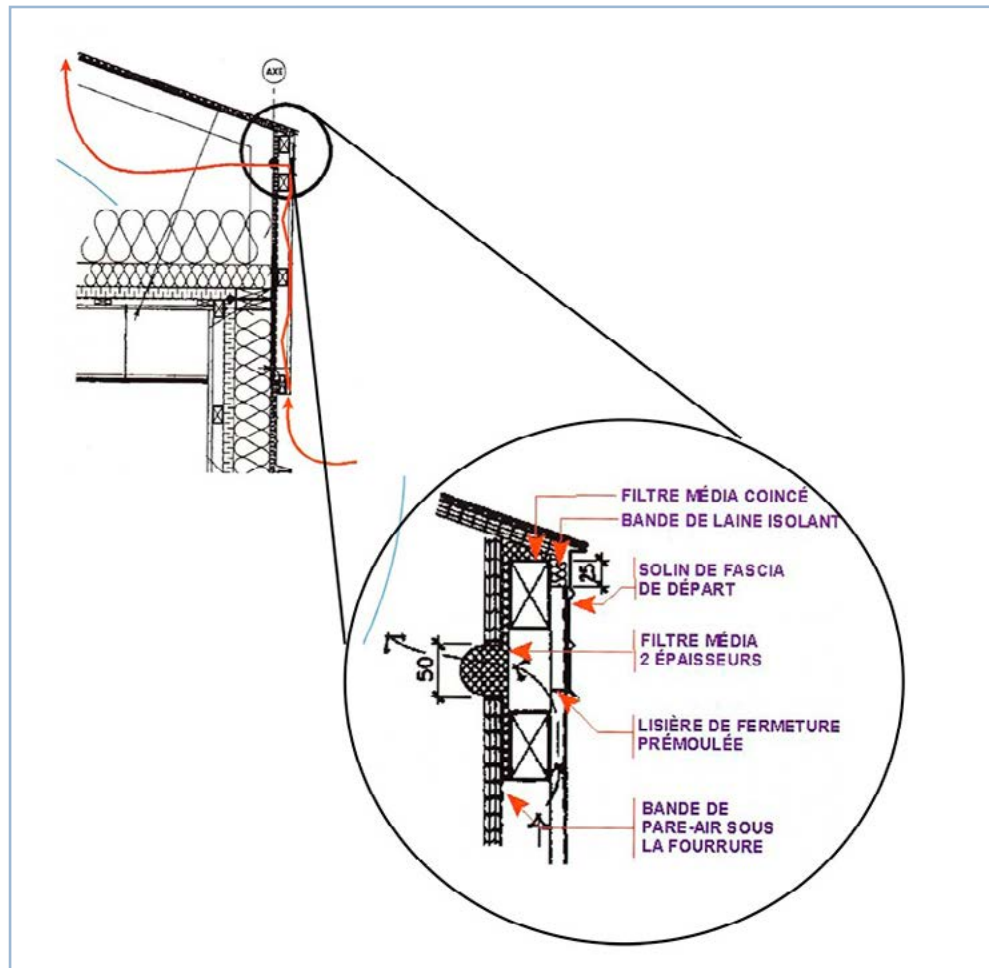


FIGURE 3.8 : VENTILATION D'UN VIDE SOUS TOIT / SOURCE : SHQ

La figure 3.8 illustre comment un vide sous toit peut être ventilé avec une protection supplémentaire contre l'infiltration : l'air entre derrière le parement extérieur, à la jonction de sa partie supérieure et de sa partie inférieure, et passe à travers un médium filtrant avant d'entrer dans le comble.

3.4.2 Isolation de l'enveloppe

L'isolation de la paroi murale, du plancher surélevé ou de la toiture d'un bâtiment construit sous un climat froid assure une résistance thermique à son enveloppe et limite les pertes de chaleur pendant la saison hivernale. C'est une préoccupation majeure dans la conception de bâtiments au Nunavik, où l'hiver est particulièrement froid et rigoureux.

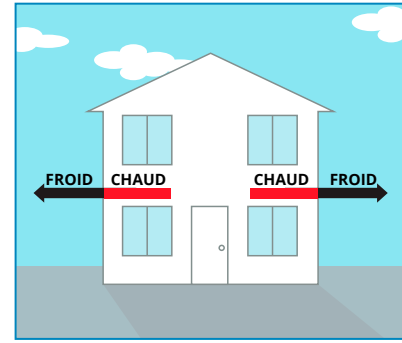
Les enjeux d'une isolation adéquate de l'enveloppe des bâtiments en région nordique sont multiples. Elle a pour but :

- d'atteindre un confort intérieur uniforme pour les occupants d'un bâtiment, peu importe la température extérieure, sur la base du principe suivant : mieux une paroi extérieure est isolée, plus le confort à l'intérieur du bâtiment sera uniforme. À l'inverse, une isolation insuffisante refroidit les surfaces intérieures en raison d'une perte excessive de chaleur par rayonnement thermique, rendant le bâtiment inconfortable;
- de réduire la consommation d'énergie, le mazout utilisé pour le chauffage étant relativement coûteux à cette latitude;
- de prolonger la durée de vie des composants de l'enveloppe des bâtiments, puisque l'isolation contribue directement à diminuer les risques de condensation dans les parois;
- de respecter les normes prévues dans la réglementation, lesquelles sont assez sévères sous des latitudes où les degrés-jours de chauffage peuvent atteindre 8000 à 9000 comme au Nunavik (voir l'annexe XI).

On trouve des prescriptions sur l'isolation dans deux différentes parties du chapitre Bâtiment du Code : la partie 9.25 d'application générale, et la partie 11, qui contient les exigences minimales d'isolation obligatoires pour les constructions neuves d'une hauteur d'au plus trois étages et dont l'aire de bâtiment est d'au plus 600 m².

Parce qu'elle vise une efficacité énergétique élevée pour tous les éléments de l'enveloppe, et qu'elle contient un tableau d'exigences propres aux régions plus froides où le chauffage représente 6000 degrés-jours et plus, la partie 11 du chapitre Bâtiment du Code constitue une référence très pertinente pour tous les bâtiments résidentiels construits au Nunavik. Les exigences les plus utiles sont des valeurs minimales d'isolation sous forme de coefficients de résistance thermique exprimés en unités RSI pour chacun des éléments de l'enveloppe du bâtiment, de même que des prescriptions sur le traitement des ponts thermiques en bois, en acier ou en béton (voir l'annexe XII).

Pour documenter les prescriptions réglementaires sur les parois isolées, le tableau 3.1 ci-après reproduit le tableau 11.2.2. 1 B du chapitre Bâtiment du Code avec les valeurs de résistance thermique « totale » minimales à attribuer aux principaux éléments extérieurs d'un bâtiment construit au Nunavik. « Résistance totale » signifie que la valeur isolante est celle exigée pour la composition totale de la paroi et non celle exigée strictement pour l'isolant, sans toutefois prendre en compte les ponts thermiques causés par la charpente.



SOURCE : SHQ

ÉLÉMENT DU BÂTIMENT	Résistance thermique totale (RSIT)
Toit ou plafond séparant un espace chauffé d'un espace non chauffé ou de l'air extérieur	9,00
Mur au-dessus du niveau du sol, autre qu'un mur de fondation, séparant un espace chauffé d'un espace non chauffé ou de l'air extérieur	5,11
Mur de fondation séparant un espace chauffé d'un espace non chauffé, de l'air extérieur ou du sol contigu <i>N. B. Un mur de fondation dont plus de 50 % de la surface est exposée à l'air extérieur, de même que la partie d'un mur de fondation à ossature de bois, doit avoir une résistance thermique totale égale à celle exigée pour un mur au-dessus du niveau du sol.</i>	2,99
Plancher séparant un espace chauffé d'un espace non chauffé, de l'air extérieur	5,20

TABLEAU 3.1 : RÉSISTANCE THERMIQUE TOTALE POUR LES BÂTIMENTS SITUÉS DANS UNE LOCALITÉ DONT LE NOMBRE DE DEGRÉS-JOURS SOUS 18°C EST DE 6000 ET PLUS (TABLEAU 11.2.2. 1 B TIRÉ DU CHAPITRE BÂTIMENT DU CODE DE CONSTRUCTION DU QUÉBEC)

Relativement aux dispositions réglementaires touchant les ponts thermiques des murs, la partie 11 du chapitre Bâtiment du Code stipule notamment que le « matériau isolant doit couvrir les éléments du bâtiment constituant un pont thermique par l'extérieur, par l'intérieur ou par une combinaison des deux ». Ainsi, l'ossature murale en bois ou en acier d'un espacement inférieur à 600 mm c/c, par exemple, devra être couverte par un matériau isolant ayant une résistance thermique minimale de RSI 0,7 pour le bois et de RSI 1,76 pour l'acier. Relativement aux ponts thermiques des planchers isolés, la partie 11 exige un recouvrement isolant d'une valeur minimale de RSI 1,32.

Il est important de noter que pour satisfaire l'exigence réglementaire de couper les ponts thermiques dans les constructions à ossature de bois, ce qui inclut la rive de plancher, il est hautement recommandé de le faire du côté extérieur de l'ossature pour que la solution soit efficace. Cette approche de design demande de rompre avec des façons de faire courantes au Nunavik où, pendant longtemps, on faisait la coupure des ponts thermiques du côté intérieur par l'ajout de panneaux isolants enrobant les murs et le plancher.

L'ajout d'isolation à l'extérieur de l'ossature des murs et des planchers, en vertu des prescriptions de la partie 11 du chapitre Bâtiment du Code sur les ponts thermiques, nous oblige à bien considérer les restrictions d'autres parties du même chapitre (section 9.25) sur la position des matériaux à faible perméance à l'air et à la vapeur d'eau dans l'enveloppe de bâtiment. En effet, des panneaux d'isolant rigide populaires, comme le polystyrène extrudé, ont été classés comme des pare-vapeurs : posé du côté chaud d'une charpente isolée, cet isolant n'occasionnera aucun risque de condensation, alors que posé du côté froid, il devra être suffisamment épais pour que le point de rosée de la paroi se situe dans ou du côté froid du panneau isolant surajouté. Cet aspect de design, d'une grande importance, implique un calcul qui demande de se référer à un tableau du chapitre Bâtiment du Code prenant notamment en compte le nombre de degrés-jours de chauffage de la région, qui se situe entre 8200 et 9200 dans les villages du Nunavik. Selon ce tableau, dans ces villages, pour poser le polystyrène extrudé du côté froid, il faut prévoir une valeur isolante s'établissant entre 50 et 55 % de celle de l'isolant que l'on pose du côté chaud.

Les trois sous-sections qui suivent proposent certaines mesures applicables aux planchers, aux murs et aux toitures pour une isolation adéquate.

3.4.2.1 Isolation des planchers

Au Nunavik, dans la plupart des cas, les bâtiments sont surélevés pour empêcher un transfert de chaleur vers le pergélisol sous-jacent. Le plancher du rez-de-chaussée fait alors partie de l'enveloppe extérieure du bâtiment. L'isolation d'un tel plancher prend une importance particulière, puisque de 20 à 30 % des pertes de chaleur sous un climat nordique sont réputées être causées par le rehaussement des bâtiments.

Dans le tableau 11.2.2.1 A, le chapitre Bâtiment du Code prescrit une résistance thermique totale de RSI 5,2 pour un plancher isolé surélevé du sol. Cette exigence inclut un matériau isolant de RSI 1,32 au minimum pour couper le pont thermique formé par la charpente. Comme énoncé précédemment, la rupture du pont thermique devrait idéalement se faire du côté extérieur de la charpente afin d'enrober la rive de plancher, la solution optimale pour obtenir une continuité dans l'isolation mur-plancher (voir figure 3.9).

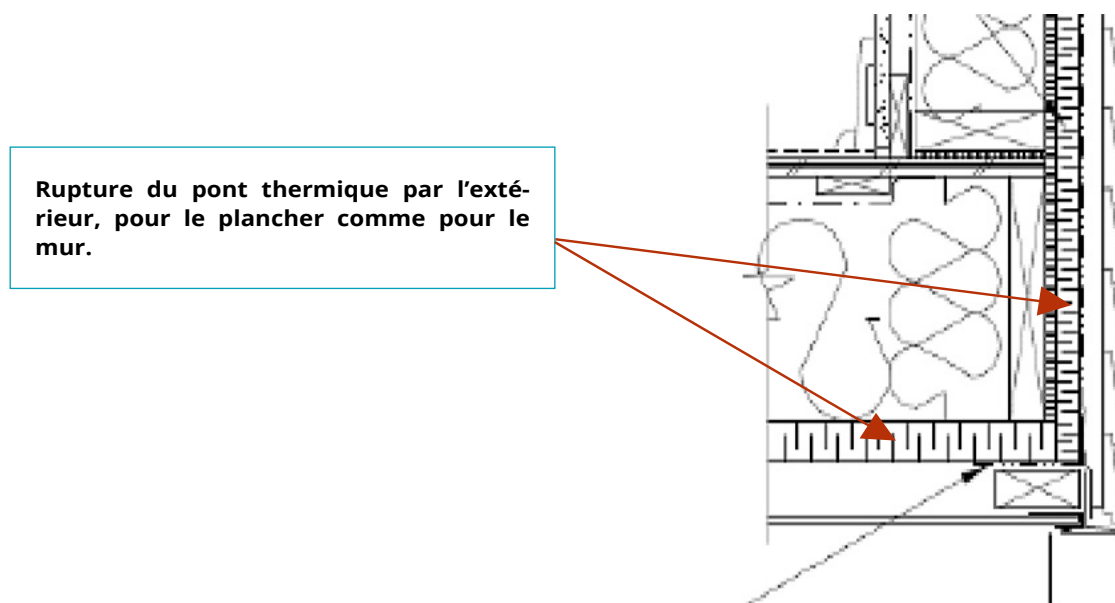


FIGURE 3.9 : DÉTAIL TYPIQUE DE LA JONCTION ENTRE UN MUR ET UN PLANCHER / SOURCE : SHQ

À noter que la face extérieure d'un plancher surélevé du sol étant entrecoupée par des appuis structuraux, lesquels sont habituellement des poutres d'acier, il faut également procéder à un enrobage minimal de ces poutres avec l'isolant externe pour que la coupure du pont thermique exigée soit complète.

Un concept de construction hautement recommandable pour le climat nordique est celui du plancher structural isolé sur sa pleine hauteur, rehaussé d'un faux-plancher dont la charpente vide est utilisée pour le passage des services du bâtiment. Un tel concept offre une excellente continuité de l'isolation, en plus de fournir un bris thermique supplémentaire.

Le recours à une charpente structurale formée de solives de bois ajourées, plutôt que de solives massives, isolée avec un matériau de remplissage en laine de verre soufflée, représente aussi un choix judicieux du fait qu'il réduit davantage les ponts thermiques dans le plancher.

Dans tous les cas, la protection de l'isolant extérieur sous le bâtiment par un panneau de revêtement résistant aux impacts est requise, le vide ouvert entre le sol et le plancher étant rarement exempt de tout usage.

3.4.2.2 Isolation des murs

L'isolation des murs extérieurs est avant tout tributaire des exigences du chapitre Bâtiment du Code, lequel prescrit une résistance thermique totale de RSI 5,11 pour les régions, comme le Nunavik, où le chauffage représente 6000 degrés-jours et plus.

Fait partie de cette exigence réglementaire la pose d'un matériau isolant comme bris thermique pour l'ossature murale formée des montants, lisses, sablières, linteaux et rives de plancher qui composent le mur extérieur. La résistance minimale du bris thermique variera entre RSI 0,53 et RSI 1,76 selon la nature de la charpente (bois ou acier) et selon l'espacement des montants. À cette rubrique, la partie 11 détaille les valeurs minimales RSI pour l'isolant de recouvrement comme suit :

- a. pour une ossature de bois, elle devra être :
 - i. d'au moins RSI 0,7 lorsque les éléments d'ossature sont espacés de moins de 600 mm c/c,
 - ii. d'au moins RSI 0,53 dans les autres cas;
- b. pour une ossature métallique, elle devra être :
 - iii. d'au moins RSI 1,76 lorsque les éléments d'ossature sont espacés de moins de 600 mm c/c,
 - iv. d'au moins RSI 1,32 dans les autres cas;
- c. pour une construction en béton, elle devra être :
 - v. d'au moins RSI 0,88 dans tous les cas.

Tout comme pour les planchers de bois, la rupture du pont thermique devrait se faire préférentiellement du côté extérieur d'une charpente de bois afin de permettre d'enrober la pièce de rive du plancher.

À cet égard, comme les panneaux de polystyrène extrudé (bleus ou roses) sont encore abondamment utilisés comme recouvrement extérieur des charpentes, il importe de se rappeler qu'ils représentent des matériaux pare-vapeur et que le Code régit leur épaisseur minimale quand on les installe du côté froid de la charpente. Ainsi, pour un mur de conception standard avec une charpente en 2 x 6 isolée avec de la laine de verre de 140 mm de RSI 3.34 (voir la figure 3.10), le calcul du point de rosée selon le Code nous indiquera que la valeur isolante du polystyrène devra minimalement être de RSI 1,76, ce qui représente un panneau d'au moins 50 mm d'épaisseur. On peut en conclure qu'un tel mur affichera une performance isolante totale de RSI 5,91, ce qui est supérieur à la norme de RSI 5,11 exigée.

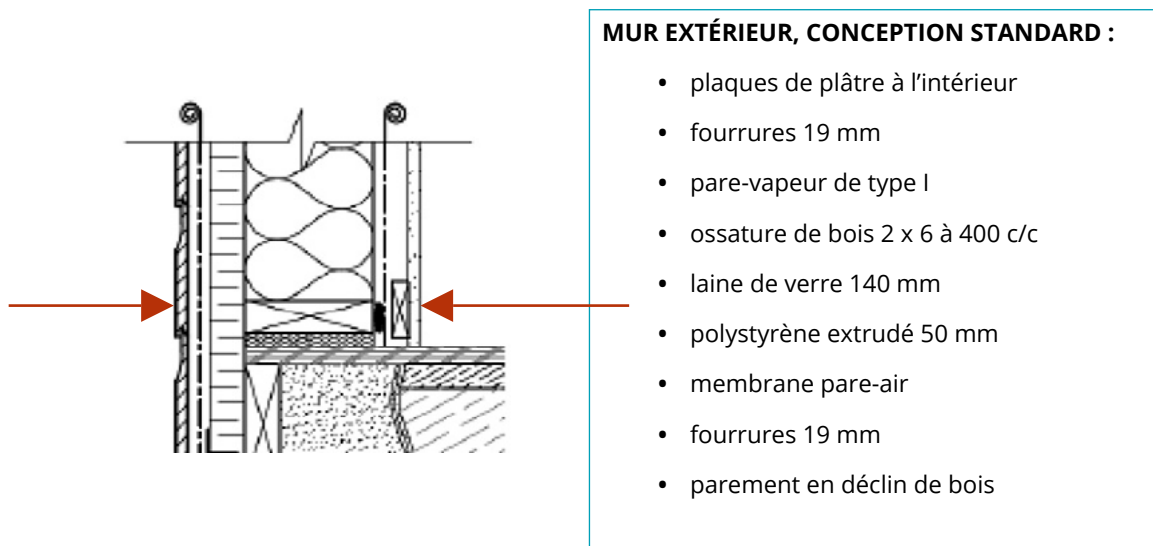


FIGURE 3.10 : COUPE DE MUR EXTÉRIEUR STANDARD / SOURCE : SHQ

Pour faire la rupture thermique requise dans la partie 11 du chapitre Bâtiment du Code par l'extérieur, la solution pour remplacer l'isolant pare-vapeur est évidemment un isolant qui ne fait pas office de pare-vapeur, en l'occurrence le polystyrène expansé : un matériau très efficace, vendu en panneau rigide de haute densité, à bords rainurés et avec ou sans pare-air laminé. Sa valeur isolante est de RSI 0,82 pour une épaisseur de 25 mm, ce qui satisfait à l'exigence minimale de RSI 0,7 du Code comme bris thermique d'une ossature de bois standard installée à 400 mm c/c d'entraxe.

Parmi les solutions pour obtenir une enveloppe murale parfaitement isolée en milieu nordique, dans certains villages du Nunavik on peut choisir du polyuréthane giclé sur place pour l'enrobage extérieur de l'ossature. Solution de remplacement aux panneaux extérieurs d'isolant rigide, la mousse giclée sur place comporte un effet pare-air sans failles dans sa composition. Des murs et des planchers isolés selon ce procédé offriront une enveloppe de bâtiment d'une étanchéité inégalable.

3.4.2.3 Isolation des toitures

La valeur d'isolation des toitures relève avant tout des exigences du Code. Comme illustrée dans le tableau 3.1, la résistance thermique totale requise par tout « toit ou plafond séparant un espace chauffé d'un espace non chauffé ou de l'air extérieur » est de RSI 9,0 pour les régions où le chauffage représente 6000 degrés-jours et plus, comme c'est le cas au Nunavik.

Pour une toiture avec un comble ventilé et un plafond standard isolé dont le fini est en panneaux de plâtre sur fourrures, RSI 9,0 correspond à une épaisseur de laine minérale en vrac soufflée entre les fermes de toiture de 460 mm, ce qui représente une hauteur substantielle.

Bien que le Code n'exige pas la rupture des ponts thermiques dans les plafonds isolés, l'ajout d'un isolant de recouvrement sur la face inférieure des fermes de toit constitue une contribution intéressante à l'efficacité énergétique sous un climat subarctique. Dès 1982, la SHQ a d'ailleurs introduit dans ses designs la pose d'un panneau de 38 mm de polystyrène extrudé du côté intérieur des plafonds isolés. Pour une performance totale de RSI 9,0 au plafond, cet ajout permet d'abaisser à 385 mm l'épaisseur de laine en vrac soufflée dans le comble.

Le Code précise que la résistance thermique totale de RSI 9,0, exigée pour le plafond isolé du comble, peut être réduite à proximité de l'avant-toit lorsque la pente du toit et les dégagements nécessaires à la ventilation l'exigent, à la condition toutefois de ne pas être inférieure à la valeur demandée pour le mur. Cette solution doit être combinée avec l'installation de déflecteurs près de l'avant-toit pour favoriser la libre entrée du flux d'aération, ceux-ci devant assurer un dégagement minimal de 25 mm du pontage de toit (voir la figure 3.11).

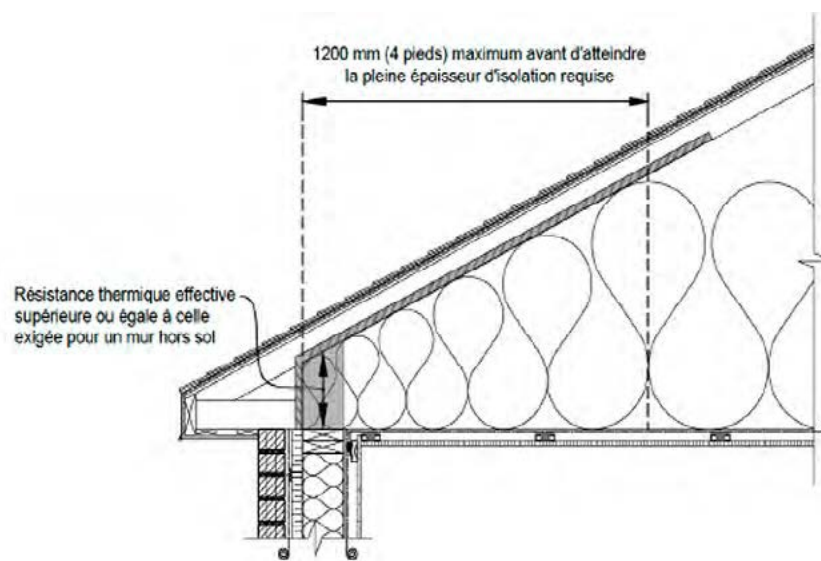


FIGURE 3.11 : DÉTAIL DE DÉBORD DE TOIT / SOURCE : SHQ

Un design de bord de toit dont la géométrie assure la pleine résistance thermique du plafond en périphérie – sans réduire la hauteur de l'isolant – représente la solution à privilégier. On trouve d'ailleurs ce design dans la totalité du parc de logements sociaux de la SHQ destinés à la communauté inuite (voir l'illustration 3.12).

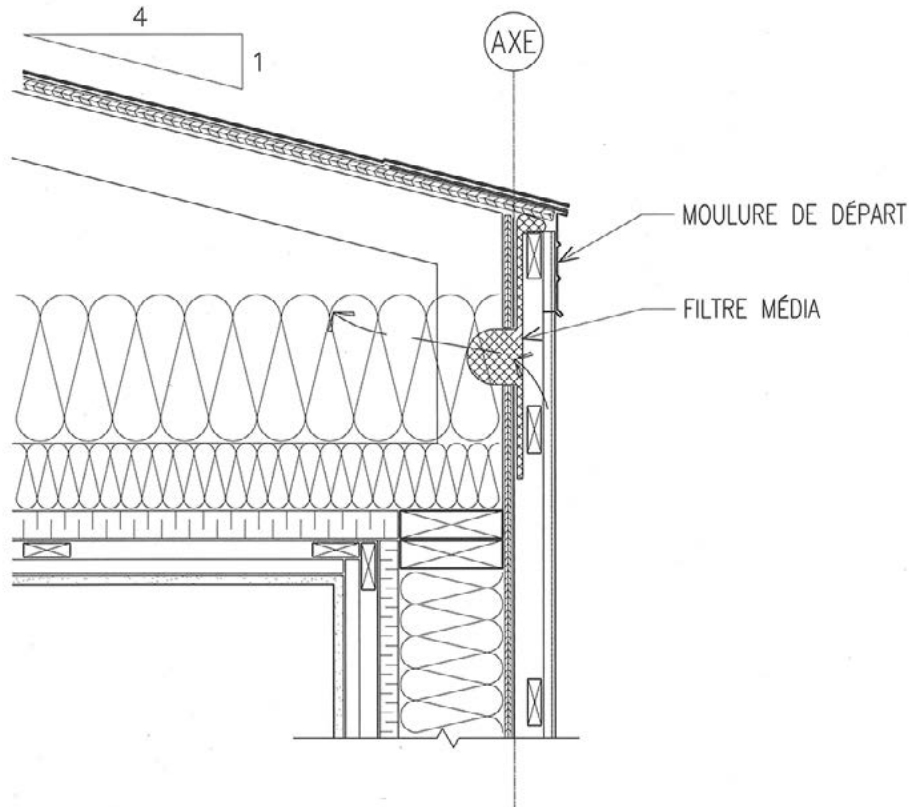


FIGURE 3.12 : DÉTAIL STANDARD DU DÉBORD DE TOIT TYPIQUE DES HLM DU NUNAVIK / SOURCE : SHQ

Le Code stipule qu'il doit y avoir un accès au comble isolé dans chaque unité de logement, sous forme de trappe d'accès intérieure, d'une dimension minimale de $0,32 \text{ m}^2$, dont un côté doit mesurer au moins 545 mm. La trappe doit être dotée d'un cadre isolé et d'un double coupe-froid et présenter une résistance thermique égale à celle du plafond isolé. Un design composé de deux trappes superposées, comme celles utilisées par la SHQ dans ses projets de rénovation majeure, représente une solution d'une efficacité supérieure (voir figure 3.13).

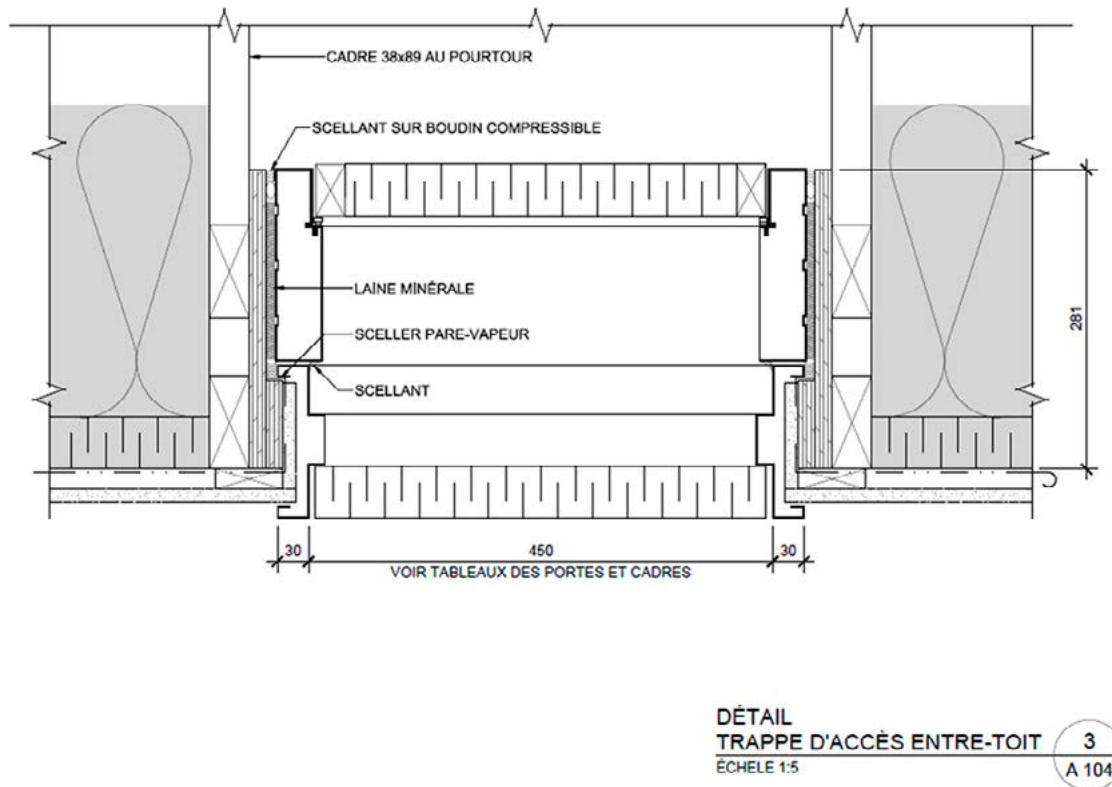


FIGURE 3.13 : DÉTAIL D'UNE TRAPPE D'ACCÈS AU COMBLE
SOURCE : SHQ

On ne peut aborder l'isolation des vides sous toit sans statuer sur la qualité de l'aération requise pour ces espaces. L'aération (ventilation) est obligatoire partout au-dessus de l'isolant de plafond, et elle est normée de façon stricte par le chapitre Bâtiment du Code dans la partie 9.19 :

- la surface libre de l'ensemble des orifices de ventilation doit être d'au moins 1/300 de la surface du plafond isolé (1/150 si la pente du toit est inférieure à 1 : 6);
- au moins 25 % du débit exigé doit se situer dans la partie inférieure du vide sous toit, sous forme d'entrée d'air répartie de façon à atteindre toutes les parties de l'isolant;
- au moins 25 % du débit exigé doit se situer dans la partie supérieure. À noter que les dispositifs d'aération du comble qui sont les plus efficaces sont les modèles de type maximum, qui doivent être disposés près du faîte de la toiture. Ces aérateurs doivent intégrer un médium filtrant anti-particules, de même qu'une panne d'assèchement à la base pour recueillir l'eau de condensation;
- le tout doit être réparti également entre les façades opposées du bâtiment.

Les plafonds isolés de type cathédral sont soumis aux mêmes exigences réglementaires en matière d'isolation et d'aération que le comble. Pour en favoriser l'application, l'idéal est d'opter pour une charpente avec des fermes de toit, car leur hauteur permet de loger facilement la quantité de laine minérale nécessaire en plus de conserver les 63 mm de dégagement minimal requis entre le dessus de l'isolant et la sous-face de la couverture.

3.4.3 Revêtements extérieurs

Comme on l'a vu, l'enveloppe des bâtiments au Nunavik étant exposée à des conditions climatiques extrêmes, les revêtements de mur et de couverture couramment utilisés dans la construction résidentielle sous un climat tempéré ne sont pas adaptés à cette région nordique. Leur durabilité ou leur performance sont nettement insuffisantes.

3.4.3.1 Revêtement mural

Les critères architecturaux pour le choix d'un revêtement mural extérieur au Nunavik ont précédemment été définis comme suit :

- résistance éprouvée aux impacts par temps très froid;
- coefficient de dilation peu élevé;
- absorption d'eau limitée et bonne résistance au cycle de gel-dégel;
- résistance à l'abrasion sous l'effet « jet de sable » créé par les vents extrêmes;
- modulation ou installation favorisant un drainage de surface efficace;
- format minimisant le nombre de joints de surface;
- durabilité du fini peint;
- facilité de réparation en cas de dommages.

Les matériaux de revêtement ci-dessous sont jugés moins appropriés en raison des désavantages qui leur sont attribués :

- les revêtements d'aluminium : ils sont extrêmement fragiles aux impacts, et sont également sujets à de grandes dilatations et contractions thermiques lors des changements de température;
- le déclin de vinyle : il se dilate et se contracte lors des changements de température et, comme il devient également cassant à basse température, il est sujet aux bris lors d'impacts;
- le déclin de bois aggloméré (ex. : planches en panneau dur ou « masonite ») : sous l'effet des fortes intempéries du Nunavik, il se décolore prématurément, perdant du coup sa protection hydrofuge;
- les parements de bois d'ingénierie préfinis, en planche ou en panneau : comme l'assèchement des matériaux exposés est moins favorisé sous le climat nordique, le bois d'ingénierie mouillé reste saturé d'eau, causant une délamination prématurée dans les rives des panneaux et le bout des planches de déclin;
- le stuc : il est facilement endommagé et difficilement réparable;
- les panneaux de fibrociment renforcé : ils deviennent cassants par temps froid;
- les revêtements de façades réfléchissants et de couleur pâle, principalement du côté sud : ils réfléchissent le rayonnement solaire, ce qui occasionne l'accumulation d'une quantité d'énergie (chaleur) non négligeable dans le sol autour des bâtiments, risquant de provoquer son dégel et des affaissements (voir la figure 3.14).

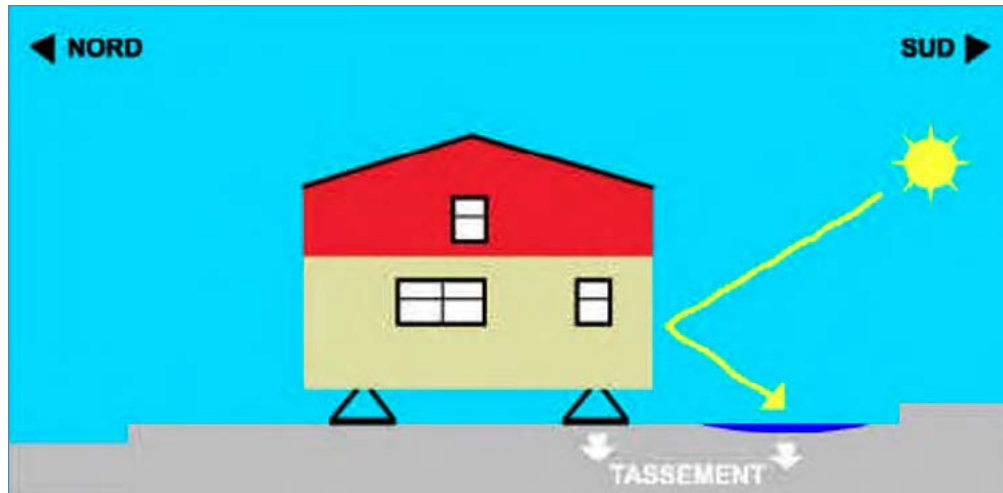


FIGURE 3.14 : EFFET RÉFLÉCHISSANT D'UN REVÊTEMENT EXTÉRIEUR DE COULEUR PÂLE SUR LE PERGÉLISOL
SOURCE : TOPOCLIMAT ET MICROCLIMATS DE LA VALLÉE DE SALLUIT (NUNAVIK), MÉMOIRE PRÉSENTÉ À LA FACULTÉ DES ÉTUDES SUPÉRIEURES DE L'UNIVERSITÉ LAVAL

En conclusion, les parements en bois massif ou en tôle nervurée préemaillée représentent les deux matériaux à privilégier dans un climat nordique :

Parement en bois massif

- Le déclin de bois massif est un type de revêtement à favoriser, car son module géométrique facilite grandement les réparations à la suite d'un bris.
- La pose à l'horizontale est préférable, car elle réduit le risque d'infiltration d'eau de part en part. De plus, un parement poreux comme le bois sèche plus rapidement quand les fourrures de support sont posées à la verticale.
- On recommande d'utiliser du pin, une essence reconnue pour sa grande stabilité. Pour la résistance à la pourriture, il faut utiliser soit un pin traité sous pression, soit un pin brut provenant de l'Ouest canadien, comme l'essence « Lodgepole » utilisée par le fabricant Goodfellow.
- Il est nécessaire de le peindre, à défaut de quoi l'apparence sombre du pin s'avère trop sinistre quand le parement de bois est mouillé. Un fini prépeint appliqué à l'usine offre une excellente protection, et une garantie pouvant atteindre 15 ans contre la décoloration.
- Les garnitures de finition peintes à l'usine sont également recommandées parce que leur peinture s'avère beaucoup plus durable que celle qui est appliquée sur place lors de la construction.

Parement en panneaux de tôle préemaillée

- Lorsqu'il est vendu avec un fini prépeint de qualité « industrielle », ce revêtement est d'une durabilité inégalable.
- On doit cependant éviter d'utiliser ce matériau sur les murs inférieurs du bâtiment, où il serait exposé aux impacts. Or, même lorsqu'ils sont de faible ampleur, ces impacts causent un bosselage irréversible.

La conception et l'installation des supports de revêtement mural dans un mur de type à écran pare-pluie (système de fourrures de bois) sont normées par le Code de la façon suivante :

- fixation obligatoire non seulement dans le panneau de revêtement intermédiaire, mais dans l'ossature murale;
- profil minimal de 19 x 64 mm ou de 19 x 89 mm, selon qu'ils sont fixés à un entraxe de 400 ou de 600 mm;
- espacement maximal de 600 mm d'entraxe.

Calfeutrage : tout joint ou toute intersection d'une paroi extérieure où l'eau est susceptible de s'infiltrer doit être scellé avec un composé de calfeutrage. Cela inclut les joints de rencontre avec les ouvertures de portes et de fenêtres, de même que l'intersection avec toute saillie à leur point de traversée des revêtements.

3.4.3.2 Revêtement de toiture

Au Nunavik, la pression extrême exercée par les vents sur les toitures justifie le choix du revêtement le plus robuste, soit un système d'étanchéité doté d'une membrane continue en bitume élastomère soudée ou d'une toiture en bardeaux d'asphalte avec membrane sous-jacente.

Pour les toits en pente, le revêtement en bardeaux d'asphalte représente la solution économique à privilégier. Toutefois, en raison de la force des vents, certaines précautions doivent être prises.

1. Une couverture en bardeaux devrait inclure une membrane de protection sous-jacente de type auto-adhésif couvrant la pleine surface de la toiture. Par temps froid, l'application préalable d'un apprêt sous la membrane est obligatoire.
2. Le bardeau utilisé doit être composé d'une armature non organique en fibre de verre, en raison de sa grande résistance au cycle de gel-dégel. Un produit ayant une garantie de 25 ans représente la norme de base.
3. Pour offrir une résistance adéquate à l'arrachement, chaque bardeau doit être fixé à deux li-sières de scellant continu, en plus d'être fixé mécaniquement à l'aide d'au moins six clous à toiture, dont deux par pureau.

3.4.4 Portes extérieures

Les portes extérieures d'un bâtiment, comme toute partie ouvrante de son enveloppe, sont considérées comme une source potentielle de fuites d'air et de pertes de chaleur. Parce qu'elle s'ouvre, une porte n'atteindra jamais la résistance thermique du mur auquel elle est intégrée. Certaines solutions existent toutefois pour maximiser l'efficacité des portes soumises aux contraintes climatiques du Nunavik.

Conception

Les portes extérieures devraient être faites de parois en acier et isolées avec une âme de polyuréthane, le tout conformément à la norme CAN/CGSB-82.5-M88 (composition en acier galvanisé, de calibre 16, avec un RSI minimum de 1,3). Si un vitrage est intégré dans la porte, il doit naturellement être en verre isolant, et si sa dimension est supérieure à 0,46 m², il devrait comporter les caractéristiques minimales suivantes : double vitrage scellé, gaz inerte entre les vitrages (ex. : argon ou krypton), verre à faible émissivité (low-E), intercalaire fait d'un matériau isolant. Une porte en acier isolée sera préférablement intégrée dans un cadre offrant un degré de bris thermique maximal, tel qu'un cadre de bois, et dotée d'un système performant de double coupe-froid périphérique, dont un de type compression prévu dans l'ingénierie de fabrication. L'ouverture devient alors un système porte et cadre intégré, comme celui d'une fenêtre. Les cadres en acier, même munis d'un bris thermique, ne sont pas un choix judicieux sur le plan de l'isolation, compte tenu des conditions climatiques du Nunavik.

Dans un climat nordique, un système de porte et cadre intégré devrait faire partie du concept architectural d'entrée pour former un sas et maximiser ainsi la protection contre le froid. L'effet de sas peut être atteint de deux manières : soit au moyen de portes doubles posées dans un même cadre (l'une ouvrant vers l'extérieur et l'autre, vers l'intérieur), soit en créant un vestibule desservi par une porte extérieure à un bout et par une porte intérieure à l'autre bout. Cette deuxième formule est optimale, car elle permet de réduire la quantité d'air froid qui entre dans le logement chaque fois que la porte s'ouvre. Le vestibule n'a pas nécessairement à être chauffé; il peut faire office de « porche froid », un concept largement répandu au Nunavik.

Par ailleurs, dans la partie 9.6 du chapitre Bâtiment du Code se trouvent des exigences sur la résistance à l'intrusion pour les portes d'entrée résidentielles qui sont pertinentes et qu'il convient d'appliquer lors de l'installation. En outre, pour les portes ouvrant vers l'extérieur qui sont de ce fait exposées à des vents d'une violence extrême, il est recommandé de prévoir une chaîne ou un autre dispositif de retenue solidement fixé, pour prévenir leur arrachement probable.

Normes d'efficacité énergétique

La partie 11 du chapitre Bâtiment du Code, qui porte sur l'efficacité énergétique, comprend une sous-section, Performance thermique des fenêtres, des portes et des lanterneaux, prescrivant des exigences minimales de fabrication par rapport à la norme CAN/CSA A440 sur les fenêtres (voir la section 3.4.5 ci-après). À noter toutefois qu'elles ne sont pas suffisantes dans un climat rude comme celui du Nunavik.

Il importe de savoir que les portes des habitations font partie des produits homologués par le programme d'efficacité énergétique nord-américain ENERGY STAR. Ce programme représente une référence très pertinente dans le choix des portes sous un climat nordique rigoureux. Dans ce programme, on doit sélectionner les performances à attribuer aux produits en fonction de la zone climatique où ils sont installés, la zone D étant spécifique aux conditions subarctiques (voir l'annexe XIII).

3.4.5 Fenêtres

Tout comme les portes, les fenêtres représentent des éléments plus faibles de l'enveloppe du bâtiment. Leur résistance thermique et leur résistance aux infiltrations d'air s'avèrent déterminantes pour l'économie d'énergie et le confort dans les bâtiments où elles sont installées.

Normes d'efficacité énergétique

Cet aspect concernant les fenêtres est normé par le chapitre Bâtiment du Code, qui prescrit une courte liste d'exigences de design dans la partie 11 sur l'efficacité énergétique.

- Les fenêtres et les lanterneaux de même que les vitrages intégrés aux portes doivent obtenir une cote d'étanchéité minimale A2 selon la section 10.2 de la norme CAN/CSA A440, Fenêtres.
- La superficie totale des ouvertures brutes pratiquées dans les éléments du bâtiment prévue pour y recevoir des fenêtres, des portes, des lanterneaux et d'autres éléments semblables, ne doit pas être supérieure à 30 % de la superficie des murs au-dessus du niveau du sol.
- Les caractéristiques thermiques des fenêtres, des portes et des lanterneaux doivent être déterminées conformément à la norme CAN/CSA A440.2, Rendement énergétique des systèmes de fenêtrage/guide d'utilisation, de la norme CSA A440.2-09, Rendement énergétique des systèmes de fenêtrage, et être conformes aux valeurs indiquées dans le tableau 3.2.

Le tableau 3.2 prescrit des valeurs U maximales et des valeurs RE minimales en fonction de deux zones géographiques au Québec : celle où le chauffage se situe sous les 6200 degrés-jours et celle où il se situe au-dessus.

ÉLÉMENT DU BÂTIMENT	bâtiment situé dans une municipalité dont le nombre de degrés-jours sous 18°C est d'au plus 6200	bâtiment situé dans une municipalité dont le nombre de degrés-jours sous 18°C est de plus de 6200
Coefficient de transmission thermique globale (U) maximal des portes sans vitrages	0,9	0,8
Coefficient de transmission thermique globale (U) maximal / Rendement énergétique (RE) minimal des fenêtres et des portes avec vitrages	2,0 / 21 ou 1,8 / 13	2,0 / 25 ou 1,6 / 17
Coefficient de transmission thermique globale (U) maximal des lanterneaux	2,85	2,7

TABLEAU 3.2 : COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE GLOBAL (U) MAXIMAL ET RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE (RE) MINIMAL DES FENÊTRES, DES PORTES ET DES LANTERNEAUX (TABLEAU 11.2.2. 4 A TIRÉ DU CODE DE CONSTRUCTION DU QUÉBEC)

Les exigences du Code sont moindres que celles du programme nord-américain ENERGY STAR, qui fournit une homologation pour les fenêtres sur la base d'un découpage territorial en quatre zones climatiques, dont la zone D correspond intégralement aux conditions du Nunavik (voir l'annexe XIII). L'exigence clé d'ENERGY STAR quant aux fenêtres homologuées par le programme est la valeur maximale de 1,2 comme facteur U (coefficient de transmission thermique global). Toutefois, il n'est pas nécessaire pour atteindre cette valeur d'utiliser du vitrage scellé triple, un élément très performant, mais épais, lourd et dispendieux.

Le programme québécois d'efficacité énergétique Novoclimat, qui traite des performances des fenêtres en construction résidentielle, renvoie toutefois aux exigences du programme ENERGY STAR. Par ailleurs, Novoclimat fournit en annexe un schéma fort pertinent illustrant les enjeux d'efficacité liés à une fenêtre dans un climat froid (voir la figure 3.15) en expliquant les bénéfices d'une conception basée sur les caractéristiques techniques suivantes :

- fabrication du cadre conforme à la norme CAN/CSA A440, Fenêtres;
- enduit à faible émissivité low-E intégré dans le verre scellé;
- intercalaire isolant au périmètre des deux vitres du verre scellé;
- gaz de remplissage à l'argon entre les deux vitres du verre scellé.

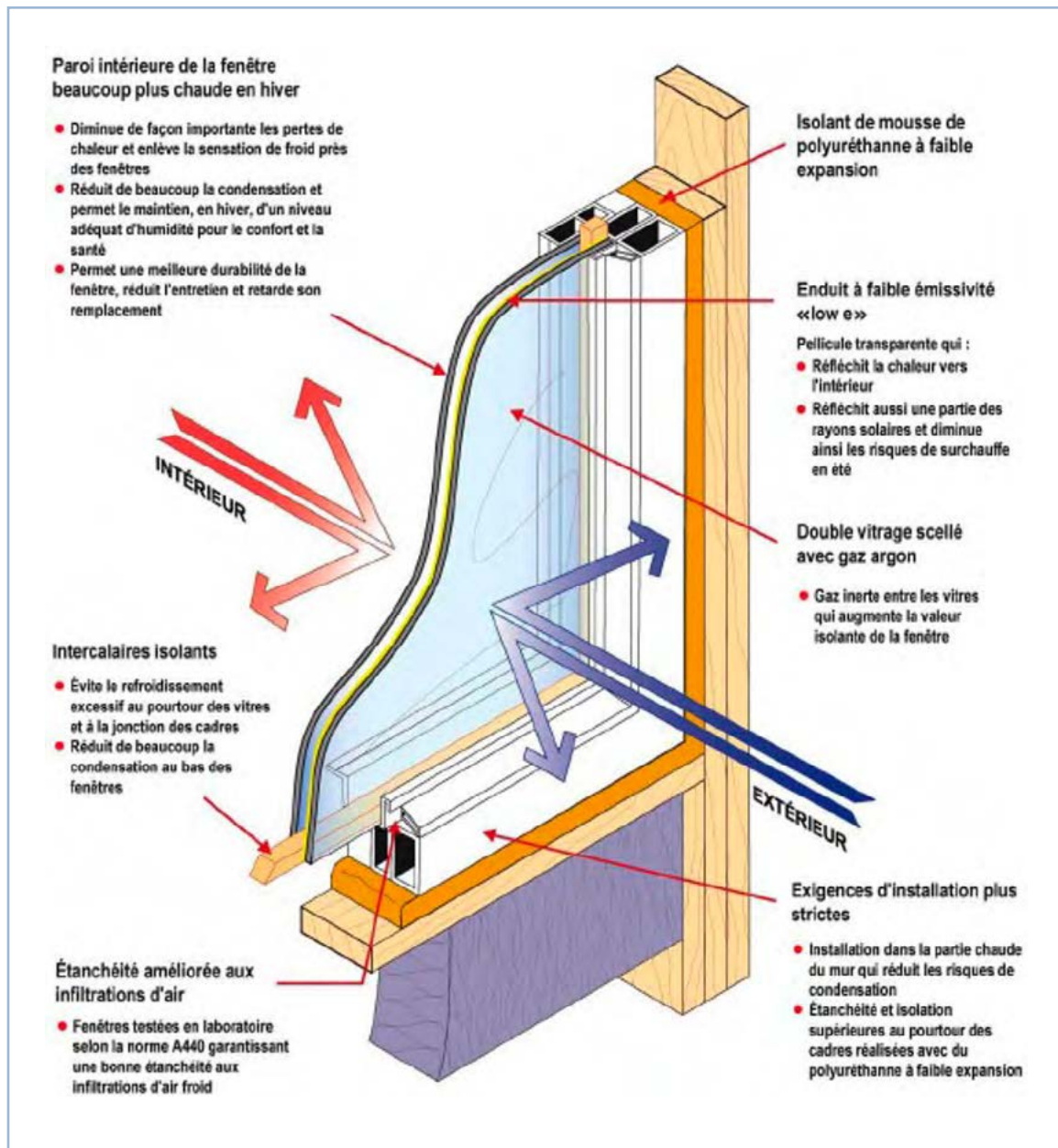


FIGURE 3.15 : ILLUSTRATION MONTRANT LES ÉLÉMENTS D'UNE FENÊTRE AUX CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES SUPÉRIEURES (CELLES DU PROGRAMME NOVOCLIMAT) / SOURCE : MERN-NOVOCLIMAT

Réglementation

En plus des exigences d'efficacité énergétique de la partie 11, le chapitre Bâtiment du Code énonce, dans la partie 9.7, d'autres prescriptions concernant divers aspects de conception qui doivent être prises en compte dans la sélection des fenêtres d'une construction résidentielle.

Sécurité et protection : une fenêtre de chambre à coucher doit permettre une évacuation d'urgence en offrant une ouverture libre minimale de 380 mm sur une surface libre d'un minimum de 0,35 m². En outre, une fenêtre dont l'appui est à moins de 900 mm du plancher doit être munie d'un dispositif pour limiter son entrebâillement à 100 mm et ainsi prévenir la chute d'un bambin. Enfin, des exigences de prévention de l'intrusion existent dans la norme A440 pour les fenêtres dont l'appui est à moins de 2 m du sol extérieur adjacent. Dans certaines conditions, un garde-corps peut être requis devant une fenêtre dans les aires communes à plusieurs logements.

Fabrication : toute fenêtre doit être conçue en conformité avec la norme CAN/CSA A440-00, qui établit des classes de performance pour les bâtiments en fonction de leur hauteur et de leur situation géographique. Ainsi, tout produit de fenêtre doit être conforme à cette norme dans une classe donnée, lors de tests de laboratoire.

Calcul du verre : le verre des fenêtres doit être calculé conformément à la norme CAN/CGSB-12.20-m, qui prescrit son épaisseur minimale selon le type de vitrage, sa superficie et la pression du vent d'exposition.

Aspects de conception

Mis à part les aspects de performance énergétique et de réglementation, le choix d'une fenêtre lors de la construction d'une habitation fait appel à certains autres critères de design appropriés pour le Nunavik, touchant principalement le matériau, le mode d'ouverture et la robustesse.

Matériau : les fenêtres peuvent être en fibre de verre, en bois, en aluminium, en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en matériaux composites.

- L'aluminium est un des matériaux qui devrait être privilégié au Nunavik, pour sa résistance aux impacts et sa grande robustesse. Lorsqu'il est utilisé avec un bariers thermique en PVC, ses propriétés isolantes sont positives, même sous un climat extrême. Toutefois, son coût est élevé. Pour des raisons de facilité d'étanchéisation, si on opte pour l'aluminium, on devrait opter pour un cadre de profil tubulaire fermé plutôt que pour un profilé ouvert.
- Le PVC représente un produit bien adapté au climat du Nunavik, parce que le fait d'être extrudé et évidé lui confère des propriétés isolantes intéressantes. En plus, le produit étant coloré dans la masse, il ne requiert absolument aucun entretien. Son assemblage à coins soudés est un gage d'étanchéité et son coût est très abordable pour un produit de cette robustesse. Le matériau choisi doit toutefois avoir une épaisseur minimale de 1 mm, les versions économiques moins épaisses étant aussi moins performantes.
- La fibre de verre utilisée dans la fabrication des fenêtres est aussi le matériau qui offre la meilleure qualité. C'est également le plus dispendieux. Il existe cependant une fenêtre hybride, composée de PVC-fibre de verre, où le PVC est co-extrudé du côté interne des profilés comme dispositif de renfort.
- Le bois brut, parce qu'il exige beaucoup d'entretien quand il est employé pour les fenêtres, est peu recommandé au Nunavik, en dépit de ses excellentes propriétés isolantes. Son utilisation comme produit composite avec recouvrement extérieur en PVC ou en aluminium est également discutable, étant donnée la faible épaisseur de ces finis, qui rend le produit final peu résistant aux impacts.

Mode d'ouverture : les différents modèles de fenêtres de série offerts sur le marché résidentiel se distinguent principalement par leur mode d'ouverture, qu'on peut catégoriser globalement ainsi : à battant (ouverture horizontale, vers l'extérieur), à auvent (ouverture verticale par le bas, vers l'extérieur), à soufflet (ouverture verticale par le haut, vers l'intérieur), à guillotine (coulissante verticalement), à ouverture oscillo-battante (offrant les deux modes d'ouverture « à battant » et « à soufflet ») et coulissante horizontale. Chacun de ces modèles présente des avantages et des inconvénients, qu'il est possible d'évaluer sommairement ainsi :

- **Modes à battant et à auvent :** ces deux formes d'ouverture sont les seules qui comportent un volet pivotant vers l'extérieur avec une moustiquaire du côté intérieur et qui sont équipées d'un mécanisme à manivelle permettant un degré d'ouverture variable à l'infini, ce qui présente de grands avantages. Toutefois, la quincaillerie de ces modèles est réputée fragile et vulnérable aux fausses manœuvres, ce qui se traduit généralement par des frais d'entretien élevés. De plus, l'ouverture des fenêtres vers l'extérieur présente un risque de blocage au Nunavik sous certaines conditions météo, en raison de la formation de neige durcie ou de glace.
- **Mode à soufflet :** le principal désavantage de ce modèle réside dans l'ouverture vers l'intérieur et l'encombrement qui s'ensuit. Il existe toutefois des limiteurs d'ouverture avec frein réglable pour contrôler l'entrebâillement. Les avantages tiennent beaucoup dans la facilité de manœuvre et dans le degré élevé d'étanchéité des volets, grâce à une quincaillerie de type multipoints qui garantit une pression uniforme de fermeture sur les quatre faces du volet. Cette quincaillerie est également considérée comme ultra-robuste.
- **Mode oscillo-battant :** ce modèle comporte une ouverture à battant vers l'intérieur, en plus du mode à soufflet, ce qui en fait une variante sophistiquée de ce dernier. Le handicap majeur pour son utilisation au Nunavik réside dans la manœuvre à battant vers l'intérieur qui expose le volet à « battre au vent », un dispositif de retenue d'ouverture n'étant pas disponible en mode battant.
- **Mode à guillotine et mode coulissant :** les fenêtres coulissantes n'ont pas de coupe-froid à compression sur les côtés latéraux des volets, mais un dispositif à friction de type à balai poilu, ce qui limite leur étanchéité lorsqu'il y a des vents violents. Pour cette raison, elles sont moins bien adaptées aux conditions climatiques du Nunavik. La fenêtre coulissante horizontale, fabriquée avec une double rangée de volets, offre toutefois l'avantage indéniable d'une ventilation indirecte et sécuritaire par l'ouverture alternée d'un volet intérieur et extérieur.

Robustesse : le degré de robustesse offert par une fenêtre se mesure en combinant ses qualités de résistance à l'usure de la quincaillerie et des coupe-froid, à la déformation, aux impacts et aux infiltrations d'air et d'eau. Il existe une fenêtre supérieure à toutes les autres pour un climat comme celui du Nunavik : c'est la fenêtre hybride PVC-fibre de verre, à ouverture à soufflet. Ce modèle fait d'ailleurs partie de la gamme restreinte pouvant prétendre, moyennant l'option d'un vitrage hautement énergétique, à la classe de matériaux de construction homologués Passivhaus.

Aspects d'installation

La présence de fenêtres dans une enveloppe de bâtiment représente une rupture potentielle de l'étanchéité à l'air et à l'eau, si l'installation ne respecte pas un protocole déterminé qui est notamment prescrit par la norme CAN/CSA A440, dont voici les principales recommandations :

1. Centrer le cadre dans l'axe de l'isolant du mur ou légèrement du côté intérieur mais pas du côté extérieur.
2. Installer le cadre d'aplomb, d'équerre et de niveau, avec des cales d'espacement dans le bas et sur les côtés.
3. Faire la pose dans une ouverture brute de mur préalablement bordée par une membrane d'étanchéité jointive à la fois avec le pare-air et avec le pare-vapeur, qu'on peut appeler « membrane de fond ».
4. Poser un scellant pare-air/pare-vapeur robuste et continu sur le périmètre complet de la fenêtre. Ce scellant sert à joindre le cadre et la « membrane de fond » avec un produit dissimulé hautement adhérent et durable, comme un cordon de scellant en tube sur boudin de mousse, ou une membrane élastomère autocollante, ou un ruban adhésif extra-épais vendu spécialement pour cet usage. Il est préférable de faire ce scellement du côté intérieur du mur isolé pour éviter d'emprisonner l'eau en cas de défaillance de la fenêtre.
5. Poser un calfeutrage isolant en mousse injectée ou en laine isolante dans l'espace libre autour du cadre.
6. Intégrer un solin métallique sous la membrane pare-air à la tête de l'ouverture pour drainer d'éventuelles infiltrations d'eau à cet endroit, et bien le sceller au pare-air.

3.4.6 Tests d'infiltrométrie

Le test d'étanchéité à l'air, appelé également test d'infiltrométrie, se révèle être un excellent outil pour assurer une bonne qualité de l'étanchéité de l'enveloppe d'un bâtiment. Ce test consiste à mesurer l'infiltration d'air, c'est-à-dire la quantité d'air entrant dans un bâtiment, et de localiser les fuites d'air.

Il peut être réalisé dans des bâtiments neufs ou existants. Dans un bâtiment neuf, il est fortement recommandé de procéder au test quand les éléments d'étanchéité ont été mis en place, avant l'étape de la finition intérieure, pour que les modifications puissent être apportées avant de fermer les murs. Il faut cependant que l'isolation des murs extérieurs, le coupe-vapeur, les cloisons intérieures, les plafonds, les prises et les interrupteurs électriques soient installés.

Pour une construction neuve au Nunavik, il est fortement recommandé de prévoir au moins une séance d'infiltrométrie sur le chantier pour vérifier la fiabilité des assemblages.

Une fois la construction terminée, le degré d'étanchéisation peut facilement être mesuré par un second test d'infiltrométrie, suivant un processus normalisé CAN/CSGB. Ce test peut être accompagné d'une analyse thermographique s'il est nécessaire de localiser précisément les anomalies (voir l'annexe XIV).

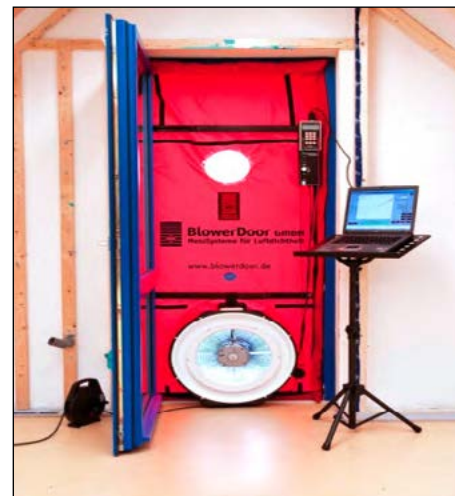


FIGURE 3.16 : APPAREILLAGE UTILISÉ POUR RÉALISER UN TEST D'INFILTROMÉTRIE
SOURCE : GOOGLE IMAGES

3.5 FINITION INTÉRIEURE

Au Nunavik, en raison de l'environnement et du mode de vie actif de la population locale, choisir des finis intérieurs résistants et faciles d'entretien s'avère indispensable pour que les constructions soient durables. La disponibilité à long terme des produits utilisés doit également faire partie des critères de sélection en prévision des réparations futures.

3.5.1 Planchers

Le revêtement de plancher doit être adapté à la fois au climat du Nunavik et à la fonction de la pièce où il est installé. Par exemple, pour la salle de mécanique un simple contreplaqué peinturé est jugé suffisant.

Une revue des couvre-sols courants d'usage résidentiel suit ci-après, avec les avantages et les inconvénients de chacun. Le type de construction choisi devrait influencer sur le choix du fini de plancher, puisqu'un bâtiment surélevé déposé sur un radier ne peut recevoir un fini de plancher rigide comme la tuile céramique ou le bois massif à cause des risques de déformation trop élevés; seul un couvre-sol souple est approprié.

3.5.1.1 Revêtements résilients

Les revêtements résilients, aussi appelés « couvre-sols souples », comprennent généralement des matériaux tels que le vinyle, le vinyle composite, le caoutchouc et le linoléum, vendus sous forme de tuiles ou en rouleau. Les tuiles présentent l'avantage de faciliter d'éventuelles réparations, l'inconvénient étant la contamination des joints si le couvre-plancher n'est pas rigoureusement entretenu. Pour les mêmes raisons, un revêtement résilient en rouleau devrait toujours être choisi dans un produit offrant une installation avec joints soudés.

Voici une évaluation des principaux revêtements de sol résilients recommandés.

- Linoléum : ce produit entièrement naturel n'est pas considéré comme le plus résistant des finis souples, mais il est approprié pour toutes les aires de séjour et de repos, avec une épaisseur minimale de 2,5 mm. À éviter dans les aires de circulation communes d'un édifice.
- Vinyle en rouleau : offre des propriétés très semblables au linoléum, quoique légèrement plus résistant.
- Caoutchouc en rouleau : allie résistance et caractéristiques antidérapantes aux propriétés du vinyle. Il est à privilégier dans les aires de circulation communes et dans les vestibules d'entrée et son épaisseur doit être de 1,8 ou de 2,5 mm. C'est le seul fini recommandable dans les espaces non chauffés comme les porches froids, où il peut s'apparenter à une membrane d'étanchéité si on l'utilise en format monopièce, scellé en périphérie.
- Carreau de vinyle : matériau non poreux, de résistance supérieure, facile d'entretien, mais qui ne convient pas aux espaces non chauffés.

3.5.1.2 Bois

Les planchers en bois dur sont peu recommandés au Nunavik, en raison du climat froid et sec et du danger de détérioration par l'eau, qui nuisent à la préservation des joints entre les planches.

3.5.1.3 Céramique

Les carreaux de céramique sont durables et résistants. Toutefois, leur usage devrait être limité aux bâtiments dont les fondations reposent sur le roc.

3.5.1.4 Moquette

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) recommande d'éviter les moquettes à l'intérieur des habitations, car elles accumulent la poussière et sont en partie responsables de la détérioration de la qualité de l'air intérieur. D'ailleurs, rares sont les résidents du Nunavik qui possèdent un aspirateur.

3.5.2 Cloisons

Les cloisons intérieures doivent être suffisamment robustes pour offrir une résistance supérieure aux impacts, ce qui est le cas des panneaux de plâtre renforcés. Le panneau de plâtre est d'ailleurs le fini recommandé pour toutes les cloisons des bâtiments au Nunavik.

Les murs non porteurs peuvent être à ossature de bois ou à ossature d'acier.

Les cloisons mitoyennes entre deux logements devraient être fortement insonorisées, et comporter, idéalement, une double rangée de montants qui se prolonge sous le plancher.

Si les pièces habitables sont contigües aux salles de mécanique, il importe de s'assurer que :

- les cloisons sont bien isolées sur le plan thermique et acoustique;
- l'isolation acoustique à travers le plancher est continue afin de limiter la transmission du son par la structure.

3.5.3 Portes intérieures

Les portes intérieures sont soumises à de grandes variations d'humidité dans l'air durant le passage de l'hiver à l'été, et à cause des activités intérieures souvent intenses dues au nombre élevé d'habitants dans les logements. L'usage de portes intérieures en bois à âme pleine est fortement recommandé dans de telles conditions pour une durabilité accrue. Le cadre de la porte intérieure peut être soit en bois, soit en métal de fort calibre.

3.5.4 Plafonds

Le panneau de plâtre est recommandé comme matériau de finition pour les plafonds en raison de sa résistance au feu et parce qu'il est facile à réparer.

Les finis de plafond texturés ne sont pas recommandés, car la poussière et la fumée les salissent et les décolorent.

3.6 ASPECTS D'AMÉNAGEMENT

3.6.1 Mobilier intégré et équipements

Les pièces de mobilier intégré (meuble-lavabo de salle de bain, comptoirs et armoires de cuisine, évier/lavabos et robinetterie, tablettes du vestibule et de la buanderie, etc.) ainsi que les équipements et les appareils fixes (enceintes de douche et robinetterie, pharmacie encastrée et miroir, distributeur de papier de toilette, etc.) inclus dans la construction doivent être robustes et résistants aux dommages, en plus d'être adaptés, lorsque requis, à la pratique des activités traditionnelles inuites (ex. : dessus de comptoir de cuisine fait d'un matériau permettant le dépeçage du petit gibier et la découpe du poisson). Éviter les dessus de comptoir de cuisine et de meuble-lavabo de salle de bain postformés, ces derniers étant souvent plus faciles à ébrécher, surtout aux nez et aux chants. L'ensemble des pièces de mobilier intégré devrait être préfabriqué afin d'en accélérer et d'en simplifier l'installation sur le site.

Pour des raisons de sécurité et d'entretien, il est préférable d'éviter l'utilisation de verre et de vitrage. Si ce type de matériau est impérativement requis, opter pour des matériaux résistants comme le verre trempé.

3.6.2 Vestibule

Chaque résidence autonome ou jumelée devrait comporter un vestibule d'entrée non chauffé, appelé « porche froid ». Cet espace devrait être assez grand pour permettre aux occupants d'y ranger l'équipement lourd (bottes, manteaux, équipements de pêche et de chasse, etc.) de façon sécuritaire, idéalement dans un placard muni de tablettes.

S'assurer que la dimension des crochets pour les parkas et les manteaux et l'espacement entre ceux-ci sont adéquats pour accrocher les vêtements d'hiver utilisés par les Inuits (recommandations : 25 mm de diamètre avec bouts arrondis et fixation mécanique).

3.6.3 Cuisine

Voici quelques recommandations pour la conception des cuisines, en lien avec la culture inuite :

- concevoir les dimensions de la pièce en fonction du nombre d'occupants du logis;
- doter la cuisine d'un comptoir central assez large pour permettre le découpage du gibier;
- installer de grands évier en acier inoxydable pour que les occupants puissent y préparer des aliments volumineux;
- adapter l'ergonomie des plans de travail aux coutumes inuites;
- prévoir beaucoup d'espaces de rangement;
- installer des fenêtres qui s'ouvrent et qui sont faciles à utiliser dans la cuisine;
- placer l'évier sous la fenêtre pour maximiser le contact avec l'extérieur lors des tâches culinaires;
- installer des robinets de cuisine à débit réduit, préférablement (écoulement de 8,3 l/min ou moins à une pression de 413 kPa).

3.6.4 Salle de bain

La salle de bain peut facilement présenter des problèmes s'il y a une mauvaise aération et un taux d'humidité élevé, ce qui implique qu'il faut y installer un bon système de ventilation et des accessoires et des finis particulièrement résistants. En raison du surpeuplement des logements au Nunavik, l'unique salle de bain est très utilisée.

Il est primordial de choisir des produits simples et durables lors de la conception. Par exemple, les douches et les contours de baignoire en fibre de verre, en polyéthylène, en acrylique renforcé ou en PVC préformé sont fortement recommandés, les carreaux de céramique étant peu fiables en raison des mouvements constants dans les bâtiments, habituellement surélevés du sol. Les finis préformés sont, par ailleurs, particulièrement durables et faciles à nettoyer.

Sur le plan de la plomberie, toutes les salles de bain devraient être munies d'accessoires sanitaires économeurs d'eau, tels que des toilettes utilisant 4,8 l d'eau ou moins par chasse, un robinet de lavabo à débit réduit de 8,3 l/min ou moins à une pression de 413 kPa, et une pomme de douche à faible débit utilisant 9,8 l/min ou moins à une pression de 551 kPa.

En raison de l'utilisation de la salle de bain par un grand nombre d'occupants, la buanderie devrait être aménagée hors de celle-ci, ce qui n'empêche pas de la placer dans un espace adjacent. Dans une perspective écoénergétique, il est d'ailleurs recommandé de placer les appareils de plomberie dans le même secteur du logement afin de raccourcir le parcours de la plomberie.

3.6.5 Local technique

Chaque habitation autonome doit être équipée d'un local technique regroupant l'appareil de chauffage central, le chauffe-eau, la réserve d'eau potable et son équipement de pompage, de même qu'un accès à la fosse de rétention. Les habitations jumelées et les édifices à logements multiples ont en général un seul local technique. Celui-ci doit être isolé et préféablement accessible uniquement à partir de l'extérieur. Les installations doivent être entretenues par du personnel qualifié et il faut éviter que les occupants y aient librement accès.

3.6.6 Rangements

L'aménagement de rangements nombreux, spacieux et de formes variées fait partie de l'offre à prévoir dans les habitations des Inuits. Ainsi, l'intégration des rangements spécialisés suivants s'avère incontournable : penderie dans chaque chambre; lingerie près de la salle de bain; garde-manger dans la cuisine; rangement d'usage général près de l'entrée du logement (d'une dimension de 3 m² au minimum).

4. MÉCANIQUE

4.1 CONCEPTION EN FONCTION DE L'ENTRETIEN

La conception des systèmes mécaniques doit tenir compte de l'entretien, des vérifications et des essais qui doivent être faits après la livraison du bâtiment. L'entretien des installations et des équipements doit être minimal et simple.

Tous les conduits de ventilation et les autres équipements mécaniques dissimulés au-dessus des plafonds ou sous les planchers devraient être accessibles pour en faciliter l'entretien.

Les salles de mécanique et les vides sanitaires devraient être suffisamment spacieux pour permettre au personnel qualifié d'entretenir et de remplacer les équipements.

4.2 PLOMBERIE

4.2.1 Eau potable

L'eau potable est transportée par camion et livrée dans tous les bâtiments (sauf à Kuujuarapik, où il y a un réseau d'aqueduc).

4.2.1.1 Système d'alimentation

À l'exception de Kuujuarapik, les bâtiments sont munis de réservoirs et de système d'alimentation en eau potable. Tous les équipements de plomberie doivent se trouver à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment.

Les conduites du système d'alimentation doivent avoir une pente vers un point bas. Et, à chaque point bas, une valve pour le drainage doit être installée.

Tous les équipements de plomberie doivent être munis d'une valve d'isolement facile d'accès pour l'entretien.

4.2.1.2 Réservoir

Le réservoir d'eau potable devrait être situé dans une pièce dont la température peut être maintenue entre 5 et 15°C pour diminuer les risques de prolifération de bactéries dans le réservoir.

La structure du bâtiment doit être conçue pour supporter la charge de l'eau contenue.

Puisqu'il n'y a habituellement pas de livraison d'eau potable la fin de semaine, la capacité du réservoir d'eau doit être basée sur une autonomie d'au moins trois jours.

Tout réservoir d'eau doit être construit avec un matériau non corrosif, muni d'un stabilisateur contre les rayons ultraviolets et conforme à une norme reconnue pour la conservation de l'eau potable.

Tout réservoir doit être muni d'un drain qui permet de le vider complètement par gravité. Il doit y avoir une ouverture pour le nettoyage et l'entretien d'au moins 500 mm de diamètre avec un couvercle étanche et sécuritaire. Un espace libre d'environ 1200 mm devrait être prévu au-dessus de l'accès au réservoir pour en faciliter l'entretien.

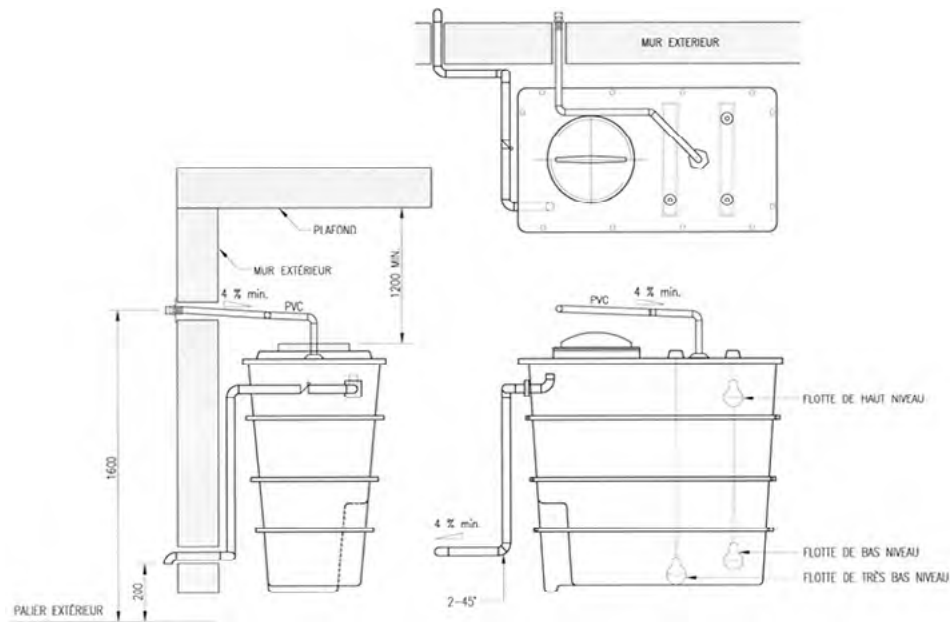


FIGURE 4.1 : RÉSERVOIR D'EAU POTABLE / SOURCE : SHQ

Un tuyau de trop-plein d'un diamètre de 75 mm doit être prévu et dirigé vers l'extérieur pour éviter les débordements à l'intérieur de la salle de mécanique. Un clapet antiretour doit être posé dans la partie supérieure de la tuyauterie du trop-plein afin d'éviter les infiltrations d'air froid dans le réservoir. Le réservoir d'eau potable doit être muni d'un tuyau de remplissage en PVC pour la partie à l'intérieur du bâtiment et être en cuivre ou en laiton pour la partie qui traverse le mur extérieur. Ce tuyau doit avoir une pente minimum de 4 % vers le réservoir pour éviter des déversements à l'extérieur. Le branchement extérieur du tuyau de remplissage doit être compatible avec l'adaptateur à branchement rapide de 38 mm du boyau de livraison utilisé dans le village.

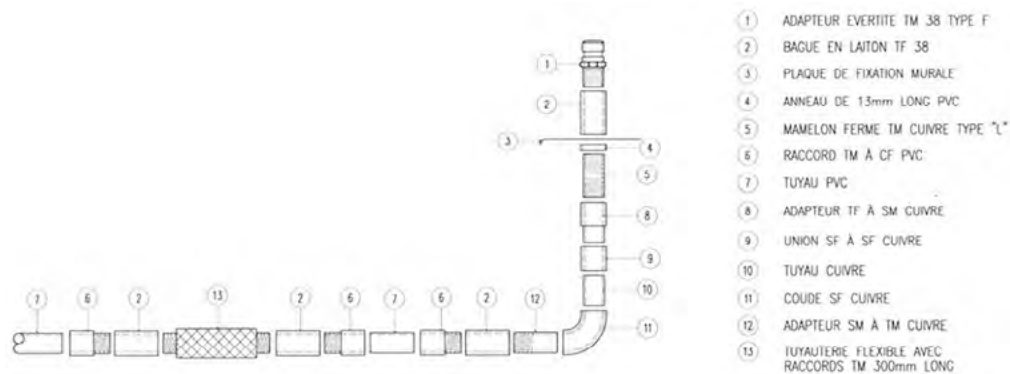


FIGURE 4.2 : TUYAU DE REMPLISSAGE DU RÉSERVOIR D'EAU POTABLE / SOURCE : SHQ

Afin d'éviter que l'équipement de livraison de l'eau potable traîne au sol à un endroit où il pourrait y avoir des contaminants, comme des eaux usées, le branchement extérieur de remplissage d'eau potable devrait être situé à au moins 1500 mm à l'horizontale et à au moins 1000 mm à la verticale du branchement de soutirage des eaux usées (voir la figure 4.3).

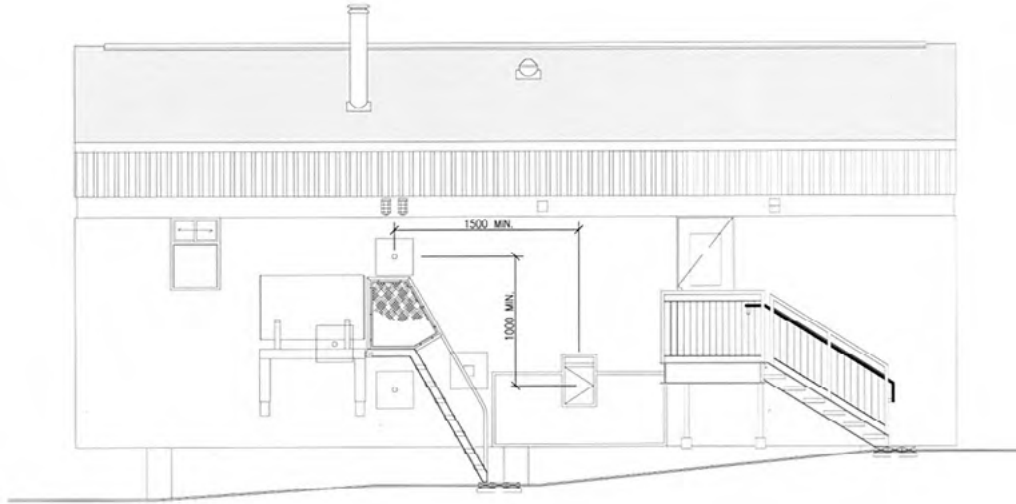


FIGURE 4.3 : BRANCHEMENT DU TUYAU DE REMPLISSAGE D'EAU POTABLE / SOURCE : SHQ

Le réservoir doit être équipé d'un système de flottes indicatrices de niveau et d'un système de contrôle électromécanique comprenant les éléments suivants :

- une flotte indicatrice de haut niveau qui active une lampe de couleur bleue à l'extérieur lorsque le niveau d'eau est à 25 mm sous le trop-plein du réservoir afin d'indiquer au livreur que le réservoir est plein;
- une flotte indicatrice de bas niveau qui active un témoin lumineux de couleur jaune à l'intérieur du logement lorsque le niveau d'eau est à 150 mm du fond du réservoir;
- une flotte indicatrice de très bas niveau qui arrête la pompe de pressurisation alimentant le réseau et qui active un témoin lumineux de couleur rouge à l'intérieur du logement lorsque le niveau du réservoir est à 25 mm du fond du réservoir.

4.2.1.3 Pompe de pressurisation

On recommande d'utiliser des pompes à jet en acier inoxydable pour réservoir peu profond. Chaque pompe doit être installée avec deux valves d'isolement pour permettre l'entretien ou le remplacement de la pompe sans avoir à vider le réservoir. Un manomètre devrait être installé à la sortie de la pompe.

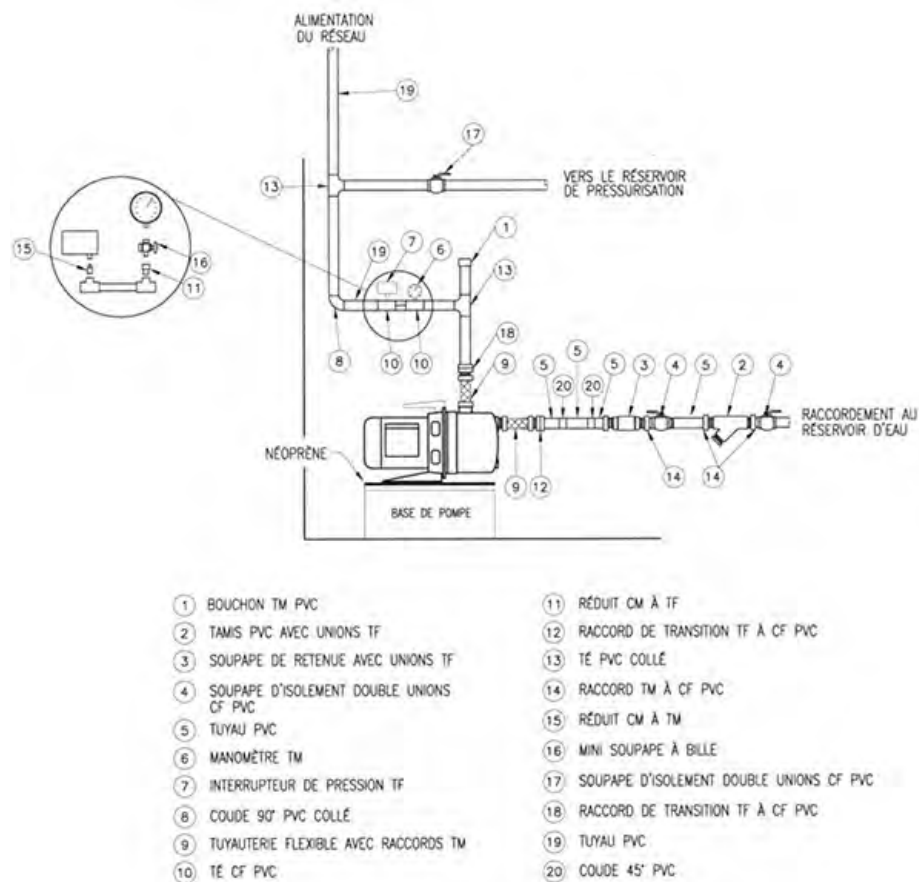


FIGURE 4.4 : POMPE DE PRESSURISATION / SOURCE : SHQ

Le système doit être muni d'un réservoir de pressurisation situé en aval de la pompe de pressurisation.

4.2.2 Eau chaude domestique

Le chauffage de l'eau domestique peut se faire à l'aide d'un chauffe-eau direct ou indirect. La source d'énergie utilisée est le mazout, puisque le tarif électrique devient très cher lorsqu'une habitation est chauffée à l'électricité. Ce n'est donc pas une solution recommandée au Nunavik. Un drain de plancher doit aussi être installé à proximité des chauffe-eau.

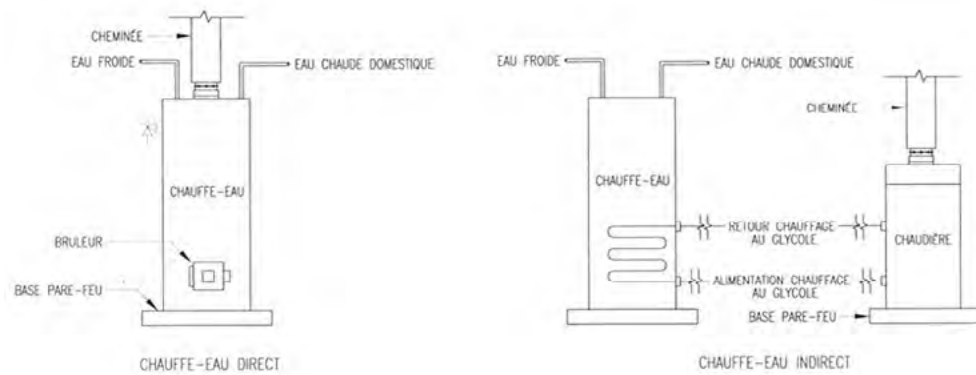


FIGURE 4.5 : CHAUFFE-EAU / SOURCE : SHQ

4.2.3 Réseau sanitaire et réservoir de rétention

Toutes les habitations sont munies d'un réservoir de rétention qui recueille les eaux usées. Ce réservoir doit être situé à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment à un endroit permettant l'écoulement des eaux usées par gravité. Ce réservoir peut être installé dans la partie basse du bâtiment et doit être facilement accessible pour vérifier son état ou pour le réparer. Les réservoirs enfouis sous terre ne sont pas recommandés pour plusieurs raisons :

- ils sont difficiles, voire impossibles à inspecter pour vérifier l'étanchéité de leurs parois extérieures;
- ils risquent de contaminer le sol si une fuite n'est pas détectée;
- ils peuvent causer le réchauffement du pergélisol en raison du dégagement de chaleur contenue dans les eaux usées;
- la tuyauterie extérieure reliant le réseau de drainage du bâtiment au réservoir extérieur doit être chauffée;
- la tuyauterie extérieure peut se fissurer ou casser en raison des cycles de gel et de dégel et des mouvements de sols associés.

Un accès extérieur doit permettre d'extraire le réservoir du bâtiment sans difficulté.

Le réservoir doit être en polyéthylène, en fibre de verre ou en PVC afin d'empêcher sa corrosion et avoir été conçu et fabriqué selon les normes CSA. Les réservoirs en béton ou en acier ne sont pas recommandés en raison des risques de fissures et de corrosion.

Le réservoir de rétention doit permettre une autonomie d'au moins trois jours. Pour cela, un volume d'une fois et demie la capacité du réservoir d'eau potable est généralement suffisant.

Tout réservoir doit être muni d'un accès minimum de 450 mm de diamètre et d'un couvercle étanche et sécuritaire pour l'inspection et la réparation. Il est important de s'assurer que tous les raccords et toutes les ouvertures sont hermétiques pour éviter les émanations de mauvaises odeurs.

La sortie de soutirage des eaux usées doit être éloignée des portes et des fenêtres. Le raccord doit être compatible avec les équipements des services de la communauté. Un adaptateur à raccord rapide de 75 mm de diamètre devrait être compatible avec les services de vidange, mais il est préférable de vérifier auprès de la municipalité. La conduite de soutirage doit être isolée à l'extérieur et sur les deux premiers mètres à l'intérieur.

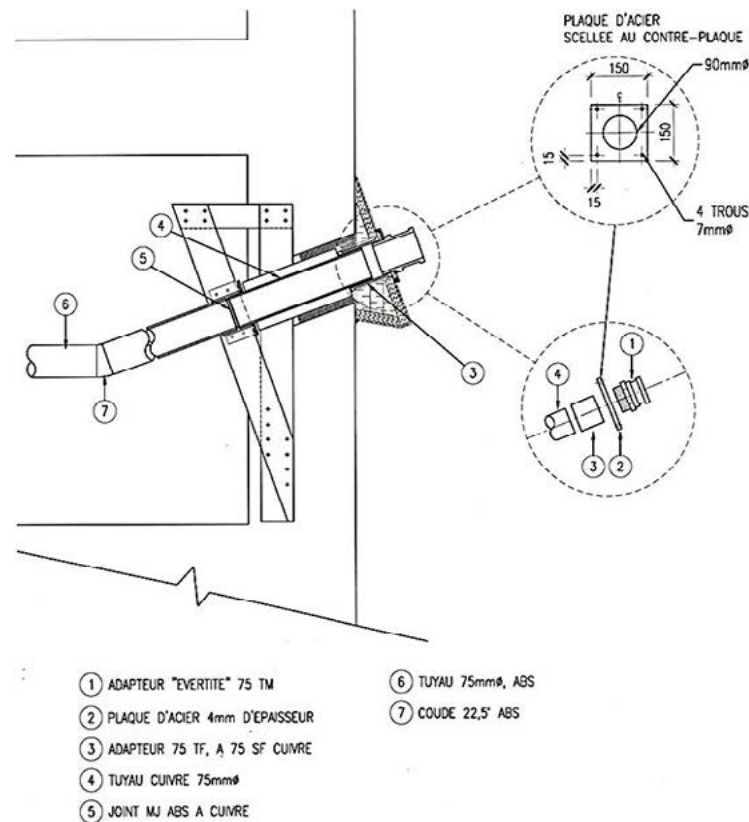


FIGURE 4.6 : RACCORD À LA SORTIE DE SOUTIRAGE / SOURCE : SHQ

Afin d'assurer l'étanchéité du réservoir de rétention, un essai de pression à l'air doit être fait.

1. L'essai à l'air doit être exécuté en fermant toutes les ouvertures du réservoir et en le remplissant d'air à une pression d'au moins 35 kPa.
2. L'essai est jugé satisfaisant quand la pression demeure stable pendant 15 minutes, sans ajouter d'air.
3. Le manomètre doit être gradué de 0 à 70 kPa.

Après l'installation de tous les appareils sanitaires et avant la mise en service de toute partie du réseau d'évacuation ou du réseau de ventilation, un essai de pression à l'eau est exigé.

1. L'eau doit s'élever à une hauteur d'au moins trois mètres au-dessus de toutes les parties de la section éprouvée.
2. L'essai à l'eau doit être fait en fermant toutes les ouvertures du système de drainage et de la section à vérifier, à l'exception de l'extrémité supérieure où l'eau est introduite jusqu'à ce que le réseau soit complètement rempli.
3. L'essai est jugé satisfaisant si le niveau d'eau demeure stable pendant 15 minutes.

Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir de rétention atteint 50 mm sous le niveau maximal, une flotte indicatrice de niveau envoie un signal électrique au système de contrôle électromécanique qui doit allumer une lumière à l'intérieur du logement pour indiquer aux occupants de demander une vidange du réservoir.

Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir de rétention atteint 25 mm sous le niveau maximal, une flotte indicatrice de niveau envoie un signal au système de contrôle électromécanique qui coupe l'alimentation électrique de la pompe de pressurisation en eau potable du bâtiment. Simultanément, un témoin lumineux extérieur de couleur rouge doit s'allumer pour indiquer que le réservoir de rétention doit être vidangé.

4.2.4 Sortie des événements à l'extérieur

Le tuyau d'événement du système de drainage au toit doit être isolé sur toute sa longueur lorsqu'il se trouve à l'extérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment. La sortie d'événement sur le toit doit également être chauffée pour éviter la formation de bouchons de glace.



FIGURE 4.7 : FORMATION DE GLACE À LA SORTIE DE L'ÉVENT
SOURCE : SHQ

La formation d'un bouchon de glace à la sortie de l'événement peut causer d'importants problèmes lorsque le camion-citerne aspire le contenu du réservoir de rétention. En effet, la pompe du camion est suffisamment puissante pour vider tous les siphons du système de plomberie du bâtiment et ainsi permettre aux gaz toxiques contenus dans le réservoir de rétention de s'échapper librement à l'intérieur du logement. L'utilisation de dispositifs chauffants à l'électricité (par exemple des câbles chauffants) est fortement déconseillée, considérant les coûts importants de production de l'énergie électrique au Nunavik.

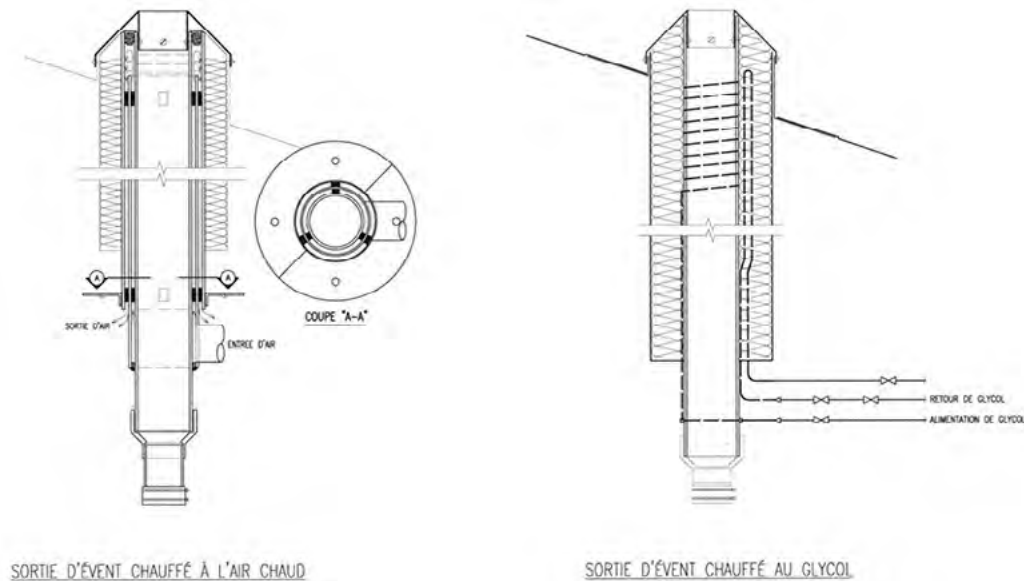


FIGURE 4.8 : SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES SORTIES D'ÉVENT / SOURCE : SHQ

4.3 CHAUFFAGE

Le mazout léger est la principale source d'énergie pour la production de chaleur (chauffage et eau chaude domestique) au Nunavik. Le nombre de degrés-jours de chauffage⁴ annuel sous 18°C peut atteindre environ 9000 à Salluit, comparativement à 4500 à Montréal.

4.3.1 Réservoir pour stockage de mazout

Chaque bâtiment d'habitation doit donc être muni d'un réservoir de mazout situé à l'extérieur et hors du sol. L'installation des réservoirs à mazout, de la tuyauterie et des accessoires doit respecter les exigences du chapitre Installation d'équipement pétrolier du Code de construction du Québec.

Puisque les exigences de ce chapitre applicables à ce type d'installation concernent essentiellement les normes de fabrication des réservoirs et de la tuyauterie utilisés dans les habitations au Nunavik, il est recommandé de se référer à la plus récente version de la norme CSA-B139, Code d'installation des appareils de combustion au mazout, pour les autres aspects des installations.

La capacité des réservoirs à mazout doit être calculée en fonction du volume nécessaire pour faire fonctionner le système de chauffage au maximum de sa capacité pendant au moins deux semaines.

Les réservoirs doivent être éloignés le plus possible des accès du bâtiment. Les supports du réservoir doivent être faits d'un matériau incombustible et une échelle ou un escalier sécuritaire doit être fourni pour permettre au livreur d'accéder au tuyau de remplissage situé sur le dessus du réservoir. Toute plateforme ou main courante ou tout garde-corps doit être fourni pour assurer la sécurité du livreur. Les échelles à un ou deux barreaux peuvent être utilisées, mais il faut éviter les échelles plus hautes pour faciliter le travail du livreur, qui doit monter avec le boyau de livraison. Tous les métaux ouvrés doivent être en acier galvanisé à chaud.

4. Le nombre de degrés-jours de chauffage correspond à l'addition de tous les écarts quotidiens dans une année entre la température moyenne journalière et 18°C, lorsque cette moyenne est inférieure à 18°C.

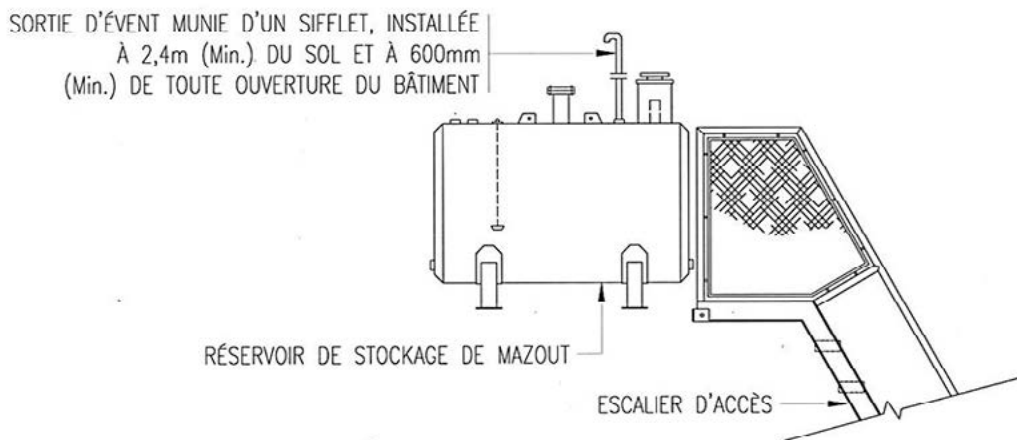


FIGURE 4.9 : RÉSERVOIR À MAZOUT / SOURCE : SHQ

4.3.2 Alimentation en mazout

Les réservoirs doivent être installés au-dessus du sol à l'extérieur des bâtiments à une hauteur permettant d'alimenter le ou les brûleurs par gravité sans nécessiter l'usage d'une pompe.

Tout l'équipement (tuyauterie, joint, valve, etc.) et tous les matériaux utilisés pour le mazout doivent être compatibles avec les produits pétroliers.

En cas de fuite mineure, un petit bac de récupération étanche en acier, fixé solidement au plancher, doit être placé sous chaque joint de tuyauterie (pour le brûleur, le filtre, etc.) à l'intérieur du bâtiment.

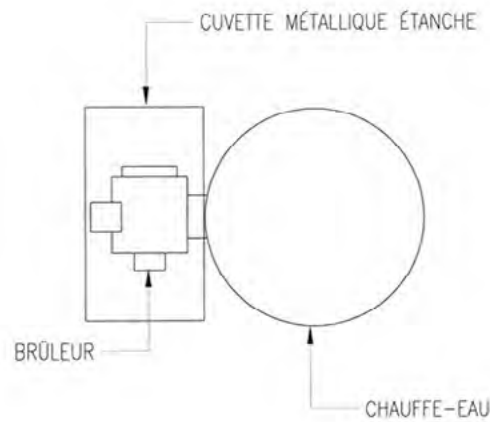


FIGURE 4.10 : CUVETTE MÉTALLIQUE ÉTANCHE / SOURCE : SHQ

4.3.2.1 Température du mazout

Le mazout froid ne brûle pas bien. Avant d'arriver au brûleur, il doit être préchauffé au moyen d'un petit réservoir auxiliaire, d'un tuyau de préchauffage de mazout ou d'une tuyauterie d'alimentation en serpentin à l'intérieur de la salle de mécanique près du brûleur.

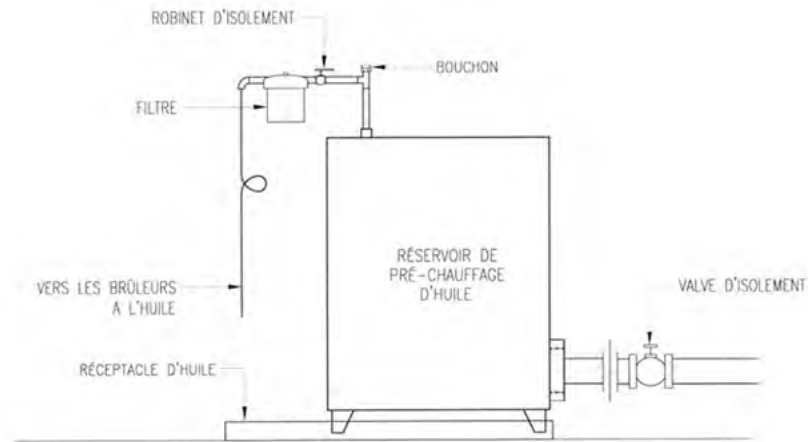


FIGURE 4.11 : RÉSERVOIR DE PRÉCHAUFFAGE DE MAZOUT / SOURCE : SHQ

4.3.2.2 Tuyauterie

Toute la tuyauterie extérieure doit être en acier galvanisé à chaud à joints vissés de série 40 et avoir 50 mm de diamètre au minimum.

La tuyauterie d'alimentation doit être munie d'une sortie d'égouttement près du réservoir pour retenir l'eau et les sédiments afin de les évacuer. Il doit donc y avoir une valve à la sortie du réservoir suivie d'un té dont un embranchement d'au moins 150 mm de long est orienté vers le bas et fermé par un bouchon à son extrémité.

Dans la figure 4.12, ce branchement de service est illustré tout près du réservoir, à l'extérieur du bâtiment; mais il pourrait aussi être installé à l'intérieur pour faciliter les interventions. Par contre, l'aménagement de la tuyauterie à l'intérieur ne permet pas toujours, au point bas de celle-ci, d'avoir un branchement de 150 mm de long vers le bas.

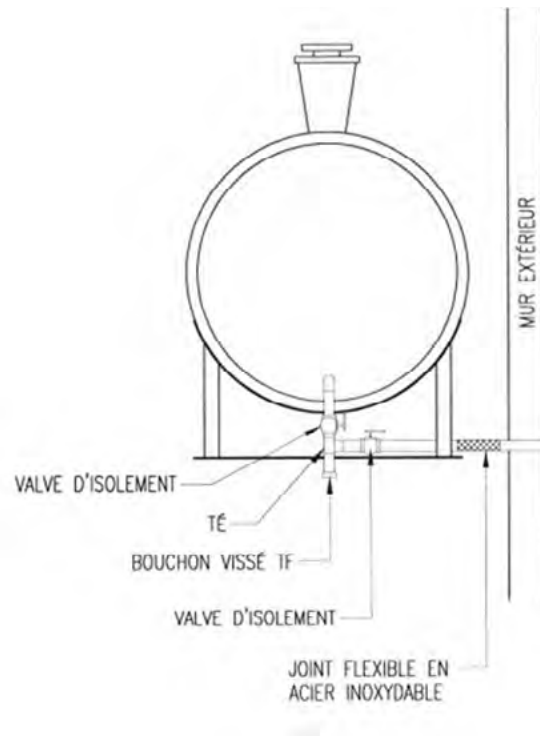


FIGURE 4.12 : TUYAUTERIE EXTÉRIEURE POUR L'ALIMENTATION EN MAZOUT / SOURCE : SHQ

La tuyauterie qui relie le réservoir extérieur au bâtiment doit être munie d'un joint flexible en acier inoxydable maillé d'au moins 600 mm de long ou d'un joint pivotant⁵ près du mur extérieur du bâtiment. Il est préférable d'utiliser un joint flexible, en particulier lorsque le réservoir et le bâtiment ont des assises différentes.

La sortie de l'évent doit être munie d'un sifflet et installée à au moins 2,4 m du sol et 600 mm de toute ouverture du bâtiment (voir la norme CSA-B139 pour plus de détails).

Le brûleur doit être raccordé à l'aide d'une tuyauterie flexible afin de faciliter son entretien et être muni d'une cuvette métallique étanche pour récupérer les pertes de mazout sous les raccords. On peut utiliser un conduit de cuivre de type K ou un joint flexible en acier maillé, préférable pour l'entretien.

4.3.2.3 Valves

Une valve d'isolement doit être installée le plus près possible du réservoir (cette valve peut être semblable à celle utilisée pour purger la sortie d'égouttement) et une autre, immédiatement à l'entrée du bâtiment. De plus, tout équipement installé sur la tuyauterie d'alimentation et qui a besoin d'entretien doit être muni d'une valve à l'entrée et à la sortie (voir la figure 4.12).

La tuyauterie d'alimentation de chaque équipement doit être munie d'une valve à fusible installée à moins d'un mètre du brûleur et qui se ferme en cas d'incendie.

5. Un joint pivotant est constitué de deux coudes à 90°, séparés par un bout de tuyau.

4.3.3 Air de combustion et de ventilation

L'air nécessaire aux appareils de combustion au mazout doit entrer librement par un conduit spécialement prévu à cet effet. Le conduit d'admission de l'air de combustion devrait passer par le plancher de la salle de mécanique afin de prendre l'air sous le bâtiment. La section « air comburant et de ventilation » de la norme CSA-B139, Code d'installation des appareils de combustion au mazout, donne plus de détails sur ce sujet.

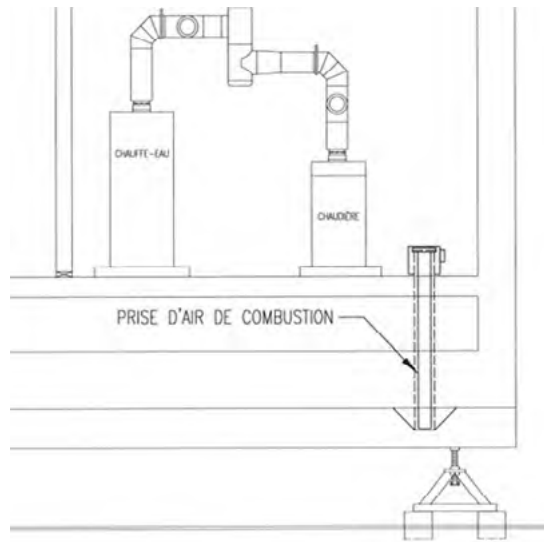


FIGURE 4.13 : ADMISSION D'AIR DE COMBUSTION / SOURCE : SHQ

Des volets motorisés à haute étanchéité doivent être installés sur les conduits d'air de combustion et de ventilation.

Le volet motorisé du conduit d'air de combustion doit être synchronisé avec l'appareil de combustion de façon à permettre son démarrage seulement lorsque le volet est en position complètement ouverte.

L'ouverture pour la ventilation de la salle de mécanique doit être située près du plafond. Le dimensionnement des entrées et des sorties d'air doit être calculé suivant la section 4 de la norme CSA-B139, Évacuation des produits de combustion et alimentation en air.

Le positionnement des entrées et des sorties d'air doit faire l'objet d'une attention particulière pour éviter le gel des installations dans la salle de mécanique (conduites et pompes à eau potable, conduites d'alimentation en mazout, etc.).

La régulation de la température de l'air dans la salle de mécanique doit être contrôlée par un thermostat. Un système de contrôle électromécanique doit permettre l'ouverture simultanée du volet motorisé de la prise d'air de combustion et du volet motorisé du système de ventilation de la salle.

Le ventilateur du système de ventilation de la salle doit être verrouillé avec le volet de la prise d'air de combustion, de façon à ce qu'il soit actionné uniquement lorsque les volets motorisés sont en position complètement ouverte. Ce devrait être un ventilateur d'évacuation pour laisser entrer l'air de façon naturelle par la prise d'air de combustion.

4.3.4 Évacuation des produits de combustion

L'installation doit être réalisée conformément à la section 4 de la version la plus récente de la norme CSA-B139, Évacuation des produits de combustion et alimentation en air.

Il est préférable d'installer une seule cheminée pour tous les appareils de combustion (chauffe-eau domestique, chaudière, etc.).

La cheminée doit être solidement ancrée à la structure du bâtiment (bride et support de toit, plaque d'ancrage, etc.).

Il faut respecter tous les dégagements relatifs à la sécurité incendie. Lorsque la cheminée traverse un plancher et un plafond, il faut installer des dispositifs coupe-feu radiants.

Lorsque des conduits d'évacuation horizontaux sont nécessaires, il faut les fixer solidement à la structure du bâtiment à l'aide d'une bride de suspension et de tiges filetées.

À la base de la cheminée, il faut prévoir un té isolé pour permettre l'évacuation des particules solides générées lors du ramonage.

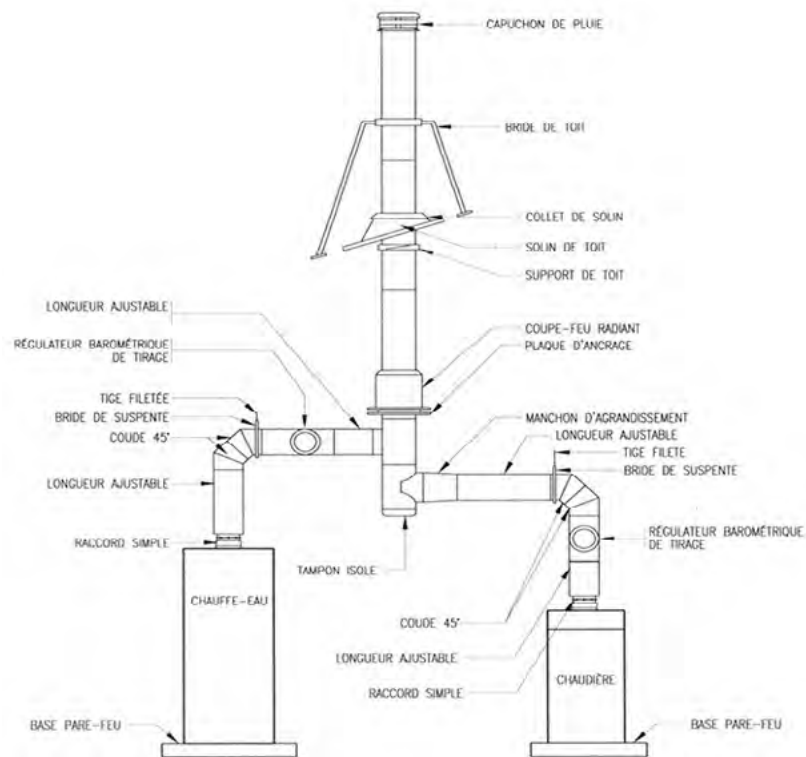


FIGURE 4.14 : CONDUITS D'ÉVACUATION ET CHEMINÉE POUR LES GAZ DE COMBUSTION / SOURCE : SHQ

4.3.5 Capacité de chauffage

Le système de chauffage devrait être conçu pour ne pas produire plus de 100 % de la demande maximale calculée en fonction des paramètres de conception applicables.

Les systèmes de chauffage donnent leur meilleur rendement lorsqu'ils fonctionnent en régime permanent (en continu). Les systèmes surdimensionnés provoquent le cyclage (arrêts et départs fréquents), ce qui accélère l'usure des équipements et augmente la consommation de carburant.

4.3.6 Appareils de production de chaleur

La cote de rendement énergétique annuelle (AFUE) de l'appareil de production de chaleur permet de déterminer quels sont les produits les plus performants.

Plus la cote AFUE est élevée, plus l'appareil est efficace.

Certains appareils affichent des cotes de 85 % et plus. La cote de rendement énergétique doit être certifiée par un organisme reconnu tel que CSA international.

Même si le fabricant ne l'exige pas, une base pare-feu faite de matériaux incombustibles doit être installée sous les appareils situés au-dessus d'un plancher combustible.

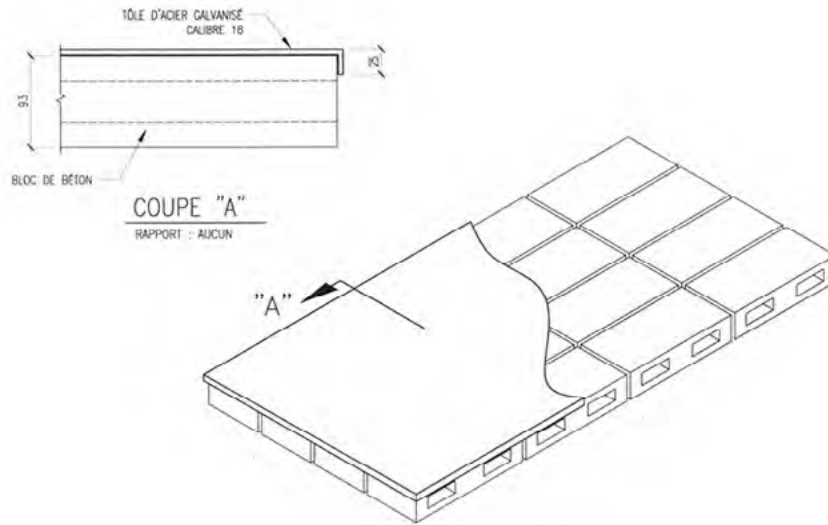


FIGURE 4.15 : BASE PARE-FEU / SOURCE : SHQ

4.4 VENTILATION

4.4.1 Généralités

La ventilation des bâtiments d'habitation fait principalement référence à l'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur, à la distribution de l'air entre les pièces ou à la circulation de l'air à l'intérieur d'une même pièce (Institut national de santé publique du Québec [INSPQ], 2006). L'introduction d'air frais à l'intérieur permet notamment la dilution des contaminants (White, 2003).

4.4.2 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle provient principalement des déplacements d'air s'effectuant par l'ouverture des portes et des fenêtres, par toutes les petites fissures et tous les orifices de l'enveloppe du bâtiment ainsi qu'au pourtour des portes et des fenêtres insuffisamment scellées (INSPQ, 2006).

La ventilation naturelle se produit soit par infiltration (passage de l'air de l'extérieur vers l'intérieur) ou par exfiltration (passage de l'air de l'intérieur vers l'extérieur). Dans une maison, le mouvement de l'air (infiltration et exfiltration) est généré par une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Cette différence de pression peut être causée par une différence de température (effet de cheminée) ou par l'action du vent.

Une maison est dite étanche à l'air lorsqu'elle subit très peu d'infiltrations et d'exfiltrations.

La ventilation naturelle est très aléatoire et difficile à contrôler puisqu'elle est conditionnée par divers facteurs comme l'étanchéité de l'enveloppe, la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur, la vitesse du vent, etc. (SCHL, 2004). Les habitations dont le taux d'infiltration naturelle est très élevé sont aussi sujettes à des dépenses énergétiques importantes (Efficiency and Renewable Energy Clearinghouse [EEREC], 2002).

4.4.3 Ventilation mécanique

L'étanchéité et l'isolation accrues des habitations ont contribué au développement de la ventilation mécanique (Environmental Protection Agency [EPA], South Dakota), qui est un moyen efficace de contrôler les échanges d'air et, ce faisant, d'améliorer la qualité de l'air et le confort dans les bâtiments sans sacrifier les avantages d'une enveloppe plus étanche (Reardon et autres, 1990).

La ventilation mécanique désigne tout dispositif motorisé permettant l'évacuation et l'alimentation d'air pour faciliter l'aération des pièces en évacuant l'air vicié et en renouvelant l'air frais provenant de l'extérieur (INSPQ, 2006). Les systèmes de ventilation mécanique sont classés en trois grandes catégories :

- **les systèmes à évacuation simple** : un ou plusieurs ventilateurs expulsent l'air, l'admission d'air de compensation se fait par les infiltrations;
- **les systèmes à alimentation simple** : un ou plusieurs ventilateurs introduisent de l'air extérieur à l'intérieur du bâtiment, l'extraction d'air se fait par les orifices de l'enveloppe;
- **les systèmes équilibrés** : un ou plusieurs ventilateurs expulsent l'air vicié et assurent l'alimentation en air neuf.

4.4.3.1 Système de ventilation principal

L'installation doit être faite conformément à la section 9.32, Ventilation, et à la partie 11, Efficacité énergétique, du chapitre 1, Bâtiment, du Code de construction du Québec (édition en vigueur).

Le système de ventilation principal doit :

- a. avoir une capacité d'extraction conforme au tableau suivant :

NOMBRE DE CHAMBRES DANS LE LOGEMENT	CAPACITÉ D'EXTRACTION EN RÉGIME NORMAL DU VENTILATEUR PRINCIPAL, EN L/S	
	MINIMUM	MAXIMUM
1	16	24
2	18	28
3	22	32
4	26	38
5	30	45
Plus de 5	L'installation doit être conforme à la norme CAN/CSA F326-M91	

TABEAU 4.1 : CAPACITÉ D'EXTRACTION

b. comprendre un ventilateur à récupération de chaleur (VRC) dont :

- l'efficacité de récupération sensible de chaleur (ERS) est certifiée par le Home Ventilating Institute (HVI) selon la norme CAN/CSA C439, Méthodes d'essai pour l'évaluation en laboratoire des performances des ventilateurs – récupérateurs de chaleur/énergie;
- l'efficacité de récupération sensible de chaleur (ERS) est d'au moins 60 % et déterminée à une température au thermomètre sec de - 25°C.

Chaque logement doit donc être muni d'un VRC qui lui est propre. Le VRC devrait être situé dans la salle de mécanique, afin d'en atténuer le bruit et d'en faciliter l'entretien par le personnel qualifié.

c. assurer un débit minimal d'air neuf qui soit égal à la somme des besoins de chacune des pièces selon le tableau suivant :

DESTINATION DU LOCAL	DÉBIT MINIMAL EN (L/S)
Chambre à coucher principale	10
Chambre à coucher simple	5
Séjour	5
Salle à manger	5
Salle familiale	5
Cuisine	5
Salle de bain	5
Buanderie	5

TABLEAU 4.2 : DÉBITS D'AIR NEUF REQUIS

NOTE : LES LOCAUX DESTINÉS AUX SEULES FINS D'ENTRÉE, DE SORTIE ET DE RANGEMENT, COMME LES VESTIBULES, LES HALLS, LES PALIERS, LES PLACARDS DE SERVICE ET LES CHAUFFERIES NE REQUIÈRENT PAS UN DÉBIT D'AIR NEUF.

d. permettre un taux de renouvellement d'air du logement de 0,3 renouvellement d'air à l'heure (SCHL – série technique 08-100);

e. comprendre un cycle de dégivrage par recirculation d'air afin d'éviter la dépressurisation du logement.

Le dispositif de commande du VRC devrait être facile à utiliser et situé dans le séjour. Le dispositif de commande devrait permettre les fonctions suivantes :

- i. l'arrêt du VRC;
- ii. le fonctionnement en continu du VRC en mode échange avec l'extérieur;
- iii. le fonctionnement du VRC en mode échange sur une base horaire (ex. : 20 minutes en mode échange et 40 minutes en mode recirculation);
- iv. le fonctionnement du VRC en mode échange lorsque le taux d'humidité relative dépasse le point de consigne.

Durant la période de chauffage, le taux d'humidité relative à l'intérieur du logement ne devrait pas dépasser 50 %. En période de très grand froid, le taux d'humidité relative devrait se situer près de 30 % pour prévenir la formation de condensation sur les fenêtres (SCHL, *L'air et l'humidité – Un guide pour comprendre et régler les problèmes d'humidité dans les habitations*).

4.4.3.2 Prise d'air frais du VRC

La prise d'air frais doit être conçue et installée de façon à ne pas être bloquée par l'aspiration de neige, au moyen d'un conduit orienté vers le bas. La distance entre l'entrée et le sol doit être d'au moins 600 mm. La section doit être suffisante pour obtenir une vitesse d'admission d'air inférieure à 1,5 m/s.

La bouche d'admission d'air frais doit être située dans un endroit où elle ne peut pas être bloquée par des accumulations de neige et située du côté opposé du bâtiment par rapport aux sources potentielles de contamination telles que les points de raccordement du soutirage d'eaux usées, de l'orifice de remplissage de mazout, etc. L'emplacement de l'admission d'air frais doit aussi tenir compte de certains éléments comme les vents dominants, les stationnements de voitures, de véhicules tout terrain, de motoneiges et autres. À défaut d'être située à l'opposé des sources de contamination, la prise d'air frais doit être à au moins deux mètres de ces points.

La prise d'air frais devrait être située sous le bâtiment. Si la neige réussit à s'accumuler dans le conduit d'admission d'air, l'eau créée par la fonte de la neige et de la glace pourra être évacuée par gravité directement à l'extérieur sans risquer de causer d'importants dommages à l'enveloppe thermique par infiltration.

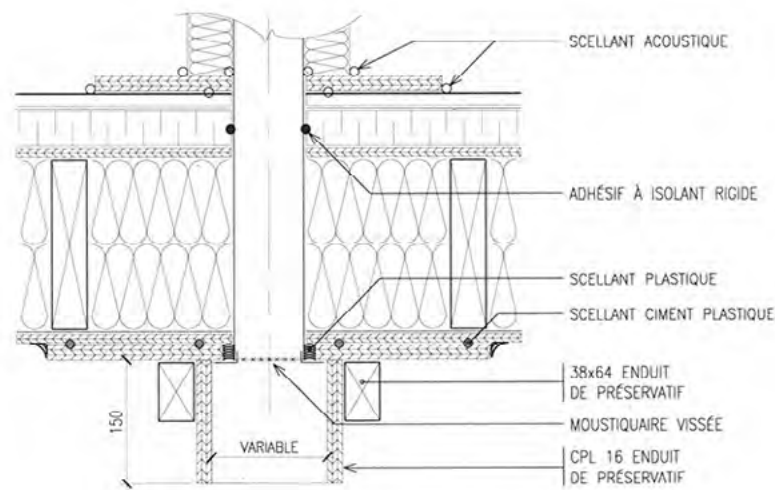


FIGURE 4.16 : PRISE D'AIR FRAIS / SOURCE : SHQ

Une moustiquaire amovible devrait empêcher l'aspiration des insectes en été et être retirée pendant l'hiver si l'admission d'air est sujette au blocage par la neige.

Lorsque le système de ventilation central du bâtiment est arrêté ou en recirculation, un dispositif à haute étanchéité doit empêcher l'air frais de s'introduire par infiltration dans le bâtiment.

4.4.3.3 Sortie d'air vicié du VRC

La sortie d'air extérieure du VRC ne doit pas être placée dans un endroit où il pourrait y avoir des accumulations de neige ni être orientée en direction des vents dominants.

L'accumulation de neige peut empêcher le système d'évacuer adéquatement l'air vicié du bâtiment.

4.4.3.4 Hotte de cuisine

La hotte de cuisine doit permettre d'évacuer l'air vicié directement à l'extérieur du bâtiment. Le ventilateur extracteur doit avoir une capacité nominale d'au moins 50 l/s.

La sortie d'évacuation de la hotte devrait être située sous le bâtiment afin de permettre à l'eau générée par la condensation d'être évacuée directement à l'extérieur.

Un clapet antiretour à gravité devrait être installé à l'extrémité d'un conduit horizontal en amont de la traversée verticale de l'enveloppe thermique.

L'installation du clapet antiretour dans la partie chaude du bâtiment permettra d'éviter les problèmes associés au blocage du clapet par la glace. Lorsque celui-ci est bloqué, la hotte ne peut pas évacuer correctement l'excès d'humidité généré par la cuisson des aliments.

4.4.3.5 Salle de bain

La prise d'air d'évacuation de la ventilation principale devrait être située dans la salle de bain. Le VRC pourra ainsi récupérer une partie importante de l'énergie contenue dans l'air, en plus de pouvoir alimenter le logement en air de compensation. Une commande manuelle, située dans la salle de bain, doit permettre de mettre le VRC en mode échange pour une durée limitée (par exemple 20 minutes), après quoi le VRC retournera à son mode d'opération normal. La capacité nominale d'extraction doit être d'au moins 25 l/s.

Si la prise d'air d'évacuation n'est pas située dans la salle de bain ou dans la salle de toilette, un dispositif d'extraction supplémentaire doit être installé. Le dispositif doit être contrôlé par un interrupteur mural et avoir une capacité nominale d'au moins 25 l/s.

4.5 SYSTÈME DE CHAUFFAGE HYDRONIQUE

4.5.1 Généralités

Les systèmes de chauffage hydronique utilisent un caloporteur liquide pour transporter la chaleur dans les différentes pièces de la maison.

4.5.2 Fonctionnement

Une chaudière munie d'un brûleur à l'huile chauffe le mélange eau-glycol (le caloporteur) et une pompe fait circuler ce mélange dans un réseau fermé de radiateurs dans les pièces de la maison pour ensuite revenir à la chaudière. Chaque radiateur (ou groupe de radiateurs) peut être contrôlé par une valve et un thermostat pour maintenir la température désirée dans une zone déterminée.

En d'autres mots, chaque zone de chauffage peut être contrôlée par un thermostat qui actionne des valves près des radiateurs pour chauffer cette zone.

En effet, les thermostats d'une zone actionnent l'ouverture ou la fermeture des valves des zones qu'ils contrôlent pour démarrer ou arrêter la circulation du mélange eau-glycol chaud dans les radiateurs.

Le brûleur est activé par un contrôleur qui maintient la température du mélange eau-glycol dans la chaudière à l'intérieur des points de consigne sélectionnés. Cette chaudière peut aussi servir à chauffer l'eau chaude domestique. Un circuit d'eau chaude séparé se rend au réservoir du chauffe-eau, circuit qui est contrôlé par le thermostat de ce réservoir.

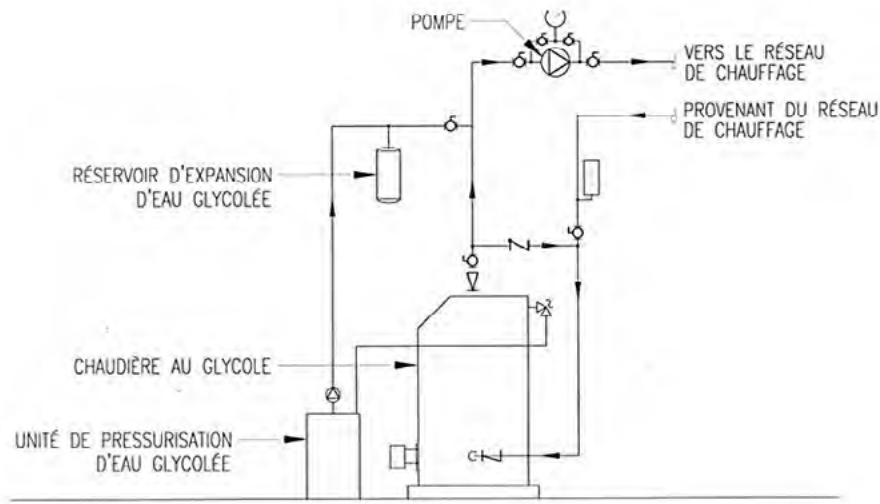


FIGURE 4.17 : SCHÉMA D'ÉCOULEMENT DU CIRCUIT DU CHAUFFAGE HYDRONIQUE / SOURCE : SHQ

4.5.3 Composantes

Le chauffage hydronique au Nunavik se fait au moyen d'un caloporteur composé d'une moitié d'eau et d'une moitié de propylène glycol (mesuré en volume). Le glycol sert à prévenir le gel et les dommages causés par un bris de conduit en cas de panne prolongée.

Le réservoir d'expansion permet d'absorber la dilatation du volume du liquide caloporteur. Il doit être d'une dimension suffisante pour le coefficient d'expansion du mélange.

La valve de sûreté de la chaudière doit être raccordée au réservoir de l'unité de pressurisation de façon à ce que le mélange eau-glycol puisse être récupéré advenant l'ouverture de la valve.

Une pompe fait circuler le mélange eau-glycol dans le réseau de tuyauterie pour transporter la chaleur aux radiateurs. Ce réseau doit être muni de robinets de vidange aux points bas et de purgeurs d'air aux points hauts du réseau.

4.6 SÉCURITÉ INCENDIE

4.6.1 Avertisseurs de fumée

Un des principes les plus importants en sécurité incendie est la rapidité de détection de l'incendie. Des avertisseurs de fumée doivent être installés dans tous les logements aux endroits suivants :

- à chaque étage;
- dans le corridor près des chambres;
- dans chaque chambre où quelqu'un dort la porte fermée;
- à proximité des escaliers.

L'objectif est de s'assurer que tous les occupants pourront entendre l'alarme, peu importe ce qu'ils font.

Par contre, il est déconseillé de les installer dans certains endroits, par exemple à proximité des portes qui donnent accès à la cuisine ou à la salle de bain, des sorties de conduits de ventilation, des rideaux, des faîtes de plafonds voûtés, des coins de mur, etc.

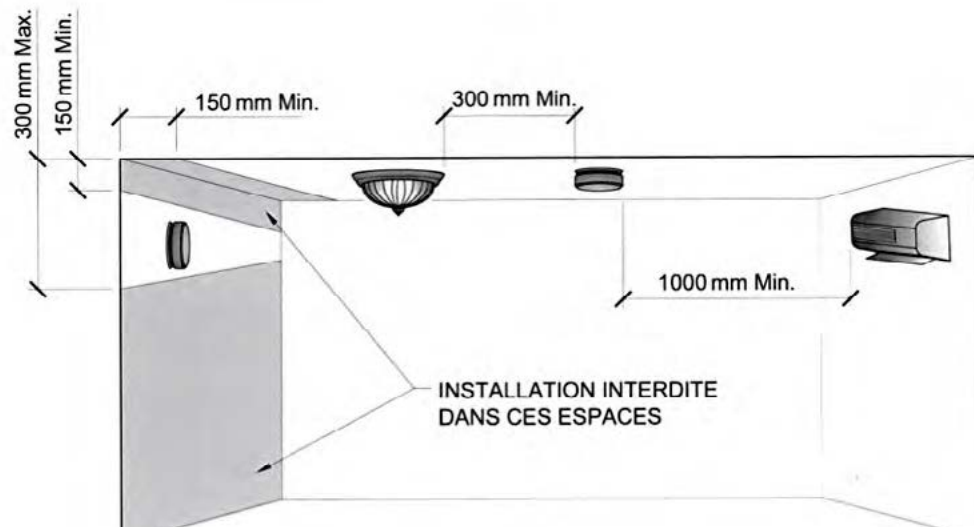


FIGURE 4.18 : EMBLACEMENT DES AVERTISSEURS DE FUMÉE / SOURCE : SHQ

4.6.2 Extincteurs portatifs

Les extincteurs portatifs peuvent être utilisés par les occupants, lorsque leur sécurité n'est pas compromise et que le feu est de petite taille, afin d'éviter de graves conséquences.

Les extincteurs de classes A, B et C approuvés par les Laboratoires des assureurs du Canada (ULC) sont recommandés. Les extincteurs doivent être conçus pour les conditions dans lesquelles ils seront conservés, en particulier lorsque la température est sous le point de congélation.

4.6.3 Dispositifs d'obturation

L'air contenu dans un bâtiment ne doit pas pouvoir traverser d'un logement à l'autre en passant par les conduits de ventilation, par les conduits de chauffage ou par la salle de mécanique commune.

Dans le cas d'un incendie, la fumée générée dans un logement ne doit pas se propager dans les autres logements.

Des registres coupe-feu devraient être installés dans les conduits de ventilation aux endroits où la fumée risque de se propager d'un logement à l'autre.

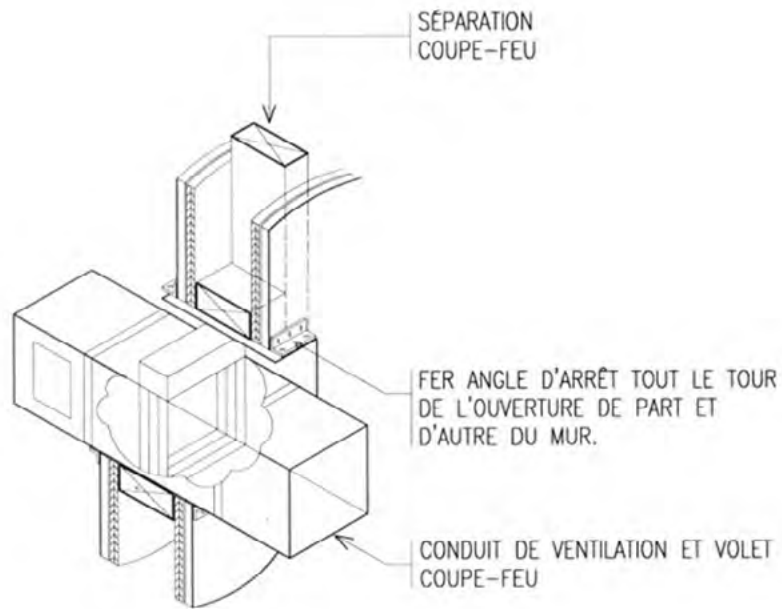


FIGURE 4.19 : REGISTRE COUPE-FEU / SOURCE : SHQ

Les registres coupe-feu doivent être accessibles, par une trappe ou un autre type d'ouverture, pour l'entretien, la vérification et le réarmement.

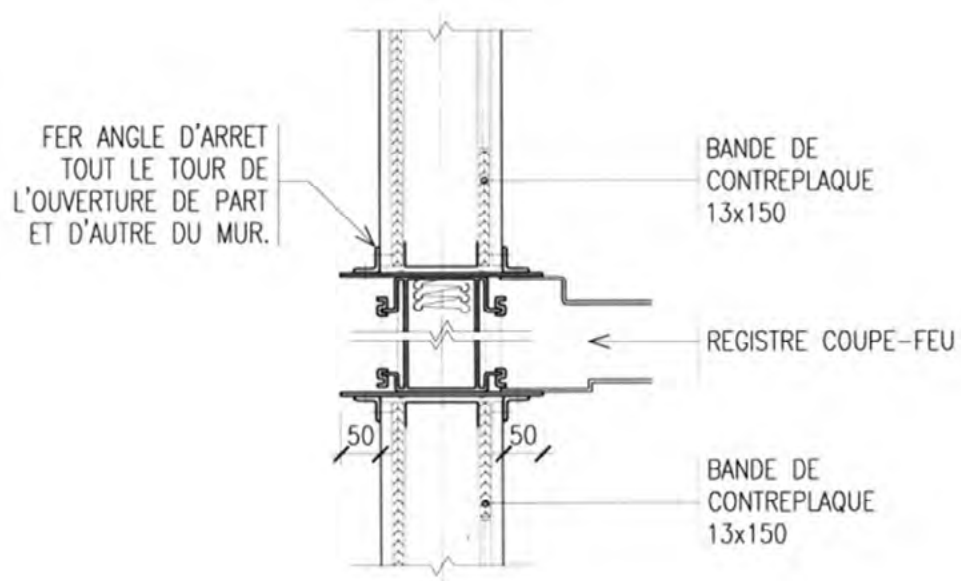


FIGURE 4.20 : REGISTRE COUPE-FEU / SOURCE : SHQ

4.7 MISE EN SERVICE ET ENTRETIEN (PLOMBERIE – CHAUFFAGE – VENTILATION)

4.7.1 Pièces et équipement de remplacement

Il est recommandé de conserver des pièces et de l'équipement de remplacement pour les éléments les plus importants (les pompes de pressurisation pour l'eau potable, les pompes de circulation de l'eau de chauffage, les brûleurs, les gicleurs des brûleurs, les fusibles, etc.) afin d'assurer la sécurité des occupants malgré le délai de livraison, qui peut être très long.

4.7.2 Essais et entretien

Des essais de fonctionnement et de mise en service des systèmes de chauffage et de plomberie doivent être faits pour s'assurer de leur bon fonctionnement.

Avant la livraison du bâtiment, il faut veiller à ce que :

- les conduits de ventilation et les filtres soient nettoyés et les registres coupe-feu soient testés;
- le réseau d'évacuation et de ventilation du système de drainage des eaux usées subisse un essai à l'air ou à l'eau pour s'assurer de son étanchéité;
- le réservoir de rétention des eaux usées soit mis à l'essai à l'extérieur avant d'être installé dans le bâtiment. Un essai à l'eau doit être fait une fois l'installation de la plomberie terminée;
- le réservoir d'eau potable et le système d'alimentation soient nettoyés et désinfectés avec une solution chlorée. La solution chlorée doit ensuite être vidangée. Le réservoir et le système doivent être rincés avec de l'eau potable. Tous les tamis doivent être nettoyés;
- tous les témoins lumineux (intérieurs et extérieurs) soient testés.

Essai de pression à l'air

1. L'essai à l'air doit être exécuté en fermant toutes les ouvertures d'un réseau ou toute partie du réseau qui doit être testée, en le remplissant d'air à une pression d'au moins 35 kPa.
2. L'essai est jugé satisfaisant si la pression demeure stable pendant 15 minutes, sans que l'on ait à ajouter d'air.
3. Le manomètre doit être gradué de 0 à 70 kPa.

Essai de pression à l'eau

1. L'eau doit être élevée à une hauteur d'au moins trois mètres au-dessus de toutes les parties de la section testée.
2. L'essai à l'eau doit être fait en fermant toutes les ouvertures du système de drainage et de la section à vérifier, à l'exception de l'extrémité supérieure où l'eau est introduite jusqu'à ce que le réseau soit complètement rempli.
3. L'essai est jugé satisfaisant si le niveau d'eau demeure stable pendant 15 minutes.

4.7.3 Accès

Il faut prévoir des accès assez grands pour l'entretien, le remplacement ou l'opération des volets (admission, retour et évacuation), des registres coupe-feu, des filtres, des échangeurs de chaleur, etc. Les échangeurs de chaleur, par exemple, doivent pouvoir être nettoyés de chaque côté pour être plus efficaces.

5. FONDATIONS SUR PERGÉLISOL

5.1 NOTIONS DE BASE SUR LE PERGÉLISOL

5.1.1 Introduction

La présence de pergélisol est une caractéristique des régions froides. Avant même de penser y construire un bâtiment ou une infrastructure quelconque, il est important de bien comprendre en quoi il consiste. En premier lieu, le pergélisol est un phénomène thermique. Sa capacité à supporter des infrastructures et des fondations dépend du maintien de sa température en dessous du point de congélation. En second lieu, il est indispensable de savoir que le pergélisol contient de la glace, souvent en très grande quantité. Le mélange de sol gelé et de glace constitue un substrat très solide. Toutefois, dès qu'il dégèle, le pergélisol se liquéfie souvent et perd toute consistance ainsi que sa capacité à supporter des bâtiments et des infrastructures. Dans le milieu naturel, le dégel du pergélisol peut provoquer des tassements à la surface du terrain; déstabiliser les pentes, affecter le drainage des sols et le réseau hydrographique, causer la formation de petits lacs et en drainer d'autres. En fait, l'écosystème est modifié par la dégradation du pergélisol, aussi appelée thermokarst⁶.

Cette section définit ce qu'est le pergélisol. Elle explique la répartition géographique du phénomène dans le Québec nordique. Elle explique également les éléments essentiels du régime thermique du pergélisol, lequel est intimement lié au climat. Une attention spéciale est portée à la mesure et au suivi thermique et aux façons de les représenter. Les principales formes sous lesquelles se présente la glace dans le pergélisol sont décrites et expliquées; elles sont ensuite associées aux dépôts de surface les plus abondants du Québec nordique. Les formes de terrain propres au pergélisol sont nommées, décrites et expliquées sommairement.

5.1.2 Définitions

Le pergélisol est défini comme ceci : « Sol (ou roche) qui se maintient à une température égale ou en dessous de 0 °C pendant au moins deux ans » (Comité associé de recherches géotechniques, Conseil national de recherches du Canada, 1988).

Cette définition se fonde uniquement sur le critère thermique, indépendamment de la lithologie, de la granulométrie ainsi que des teneurs en eau et en glace. Par exemple, un substrat rocheux ou un dépôt meuble dont la température est négative est considéré comme du pergélisol même s'il ne contient pas de glace dans ses pores ou dans sa structure.

Bien que la définition officielle fasse état d'une durée minimale de deux ans sous le point de congélation, le pergélisol est un phénomène qui dure dans les faits depuis des siècles. Au Nunavik, il existe sous la toundra depuis la déglaciation qui s'est terminée il y a 7000 à 8000 ans.

Au sud de la limite des arbres, dans la toundra forestière, il est plus récent et existe en bonne partie depuis la période froide, appelée le « Petit Âge glaciaire », qui a duré entre les années 1300 et 1900 après Jésus-Christ.

Les reconstitutions paléoclimatiques indiquent en effet des durées d'ordre séculaire et millénaire pour le pergélisol québécois (Allard et Séguin, 1987a; Chouinard et autres, 2007).

6. N.B. Le terme *thermokarst* réfère à la fois au processus de dégradation du pergélisol et au relief perturbé qui en résulte.

5.1.3 L'épaisseur du pergélisol

L'épaisseur du pergélisol varie selon les endroits. Elle peut être d'à peine quelques mètres à la limite sud de l'aire de distribution du pergélisol, mais dépasse souvent plusieurs centaines de mètres dans la zone continue. Par exemple, à la mine Raglan, au Nunavik, l'épaisseur du pergélisol atteint 630 mètres. De façon générale, plus le climat est froid, plus le pergélisol est épais. Mais dans une région à température équivalente, il est souvent beaucoup plus épais dans le roc que dans les dépôts meubles, car la conductivité thermique du roc (c'est-à-dire sa capacité à transmettre de la chaleur et à en perdre quand le climat est froid) est beaucoup plus grande que celle des sols meubles, qui contiennent davantage d'eau et dont les constituants (ex. : cailloux, grains de sable, grains microscopiques de silt et d'argile) sont moins densément compactés. L'épaisseur du pergélisol se situe entre son plafond et sa base. Le plafond du pergélisol se trouve à la base de la couche active, c'est-à-dire à partir de la profondeur maximale de la couche du terrain qui dégèle en surface l'été. Au plafond du pergélisol, la température moyenne annuelle est relativement proche de celle de l'air (avec certaines différences, expliquées plus loin). En descendant, la température en profondeur augmente progressivement. La base du pergélisol se trouve à la profondeur où la température redevient supérieure à 0 °C (Figure 5.1).

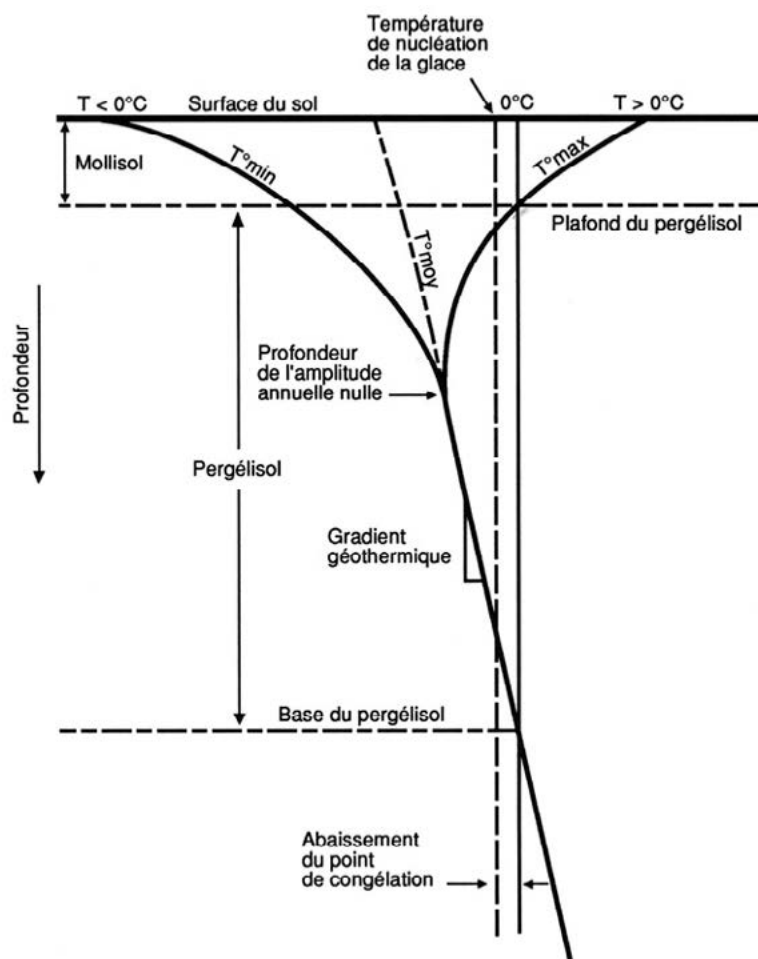


FIGURE 5.1 : PROFIL THERMIQUE GÉNÉRAL DANS LE PERGÉLISOL ET DÉFINITIONS.

5.1.3.1 La couche active

On appelle parfois mollisol la couche superficielle du terrain qui dégèle chaque été et regèle chaque hiver. Gelée en hiver, la surface du sol commence rapidement à dégeler dès le début de l'été. Au fil des jours et des semaines, la couche dégelée s'approfondit de la surface vers le bas. On dit que le front de dégel descend dans le sol. Généralement, le front de dégel correspond à l'isotherme (ligne de température égale) de 0 °C dans le sol. La profondeur maximale atteinte par le front de dégel à la fin de l'été définit l'épaisseur de la couche active. Les années où les étés sont plus chauds, la couche active est plus profonde, ou plus épaisse, et inversement. En fait, l'épaisseur de la couche active varie d'une année à l'autre (de quelques centimètres ou de quelques décimètres selon la nature du sol et l'amplitude des variations du climat). Dès que les températures atmosphériques redeviennent inférieures à 0 °C à la fin de l'été, le sol commence à regeler. Le gel progresse (isotherme de 0 °C) de la surface vers le bas; c'est la progression du front de gel. Cependant, dans les régions où le pergélisol est froid (par exemple lorsqu'il est à quelques degrés en dessous de 0 °C) un second front de gel se dirige vers le haut à partir de la base de la couche active. C'est le gel par le haut et le bas (*twosided freezing*) (Figure 5.2).

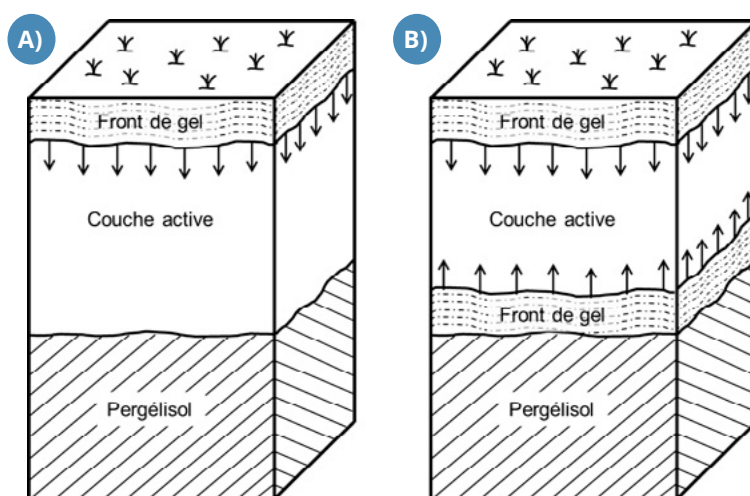


FIGURE 5.2 : CROQUIS ILLUSTRANT LE GEL ET LE DÉGEL DE LA COUCHE ACTIVE.
A) REGEL PAR LE HAUT, B) REGEL PAR LE HAUT ET LE BAS.

5.1.3.2 Le régime thermique du pergélisol

Partout sur le territoire, c'est l'ensemble des échanges de chaleur qui détermine le profil de température dans le pergélisol, ainsi que l'épaisseur et les variations de la couche active.

La condition essentielle pour que le pergélisol existe ou se maintienne est d'avoir une température moyenne annuelle à la surface du sol égale ou inférieure à 0 °C. En matière de construction, l'objectif est de maintenir le pergélisol sous le bâtiment ou l'infrastructure pour en assurer le support. La conception de la fondation doit donc respecter cette condition incontournable voulant que la température du terrain naturel sous le bâtiment ne soit jamais supérieure à 0 °C. Il n'est cependant pas nécessaire de garder le sol en dessous de 0 °C sous un bâtiment lorsqu'on est en présence de roc solide ou d'un dépôt de surface profond dont on est absolument sûr qu'il ne contient pas de glace excédentaire (voir plus bas).

En milieu naturel, la température de la surface du sol est déterminée par plusieurs facteurs. Certains de ces facteurs sont purement climatiques : la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et les précipitations. Cependant, la température de l'air est de loin la composante du climat qui contribue le plus au régime thermique du pergélisol. Comme le climat se manifeste de façon similaire sur de vastes espaces, c'est lui qui régit les conditions régionales du régime thermique du pergélisol. Cependant, des facteurs locaux importants régissent les échanges de chaleur entre l'atmosphère et la surface du terrain. Les plus importants sont : la couverture de neige au sol, la hauteur et la densité du couvert végétal, la présence d'humidité à la surface

du terrain et, finalement, la nature de la surface qui peut être minérale ou composée d'un horizon organique. Ces facteurs sont interdépendants; par exemple, une végétation arbustive dense retient la neige déplacée par le vent en hiver et, à cause de ses teintes sombres, absorbe davantage de rayonnement solaire en été (faible albédo). Ainsi, arbustes et couverture de neige agissent de concert pour amortir l'influence des températures de l'air sur le sol et réchauffer sa surface.

Les conditions du terrain, principalement la neige au sol et la végétation, peuvent faire en sorte que, sous un même climat, la température à la surface du sol ne soit pas uniforme dans le paysage d'une même région. Un couvert de neige suffisamment épais peut être à l'origine d'une température moyenne annuelle positive (c.-à-d. $> 0^{\circ}\text{C}$) à la surface du sol et de l'absence de pergélisol. Par exemple, la figure 5.3 présente deux graphiques qui mettent en relation l'épaisseur de la neige à la fin de l'hiver (mars-avril) et la température moyenne annuelle à la surface du sol, l'un à Salluit, l'autre à Tasiujaq. On y voit que le pergélisol n'est pas viable à Tasiujaq à des épaisseurs de neige supérieures à environ 80 cm; à Salluit, cette épaisseur critique avoisine un mètre. Mais, cette dernière varie aussi en fonction de la densité de la neige, laquelle est liée à sa compaction soit par le vent, soit par l'activité humaine (ex. : empilements liés aux opérations de déneigement).

La neige, la végétation, l'humidité de surface et la nature du sol font en sorte que, sous des températures de l'air moyennes négatives, mais moins froides, le sol n'a pas partout une température négative. La distribution variable de ces facteurs sur le terrain est la principale raison de l'existence de la zone de pergélisol discontinu.

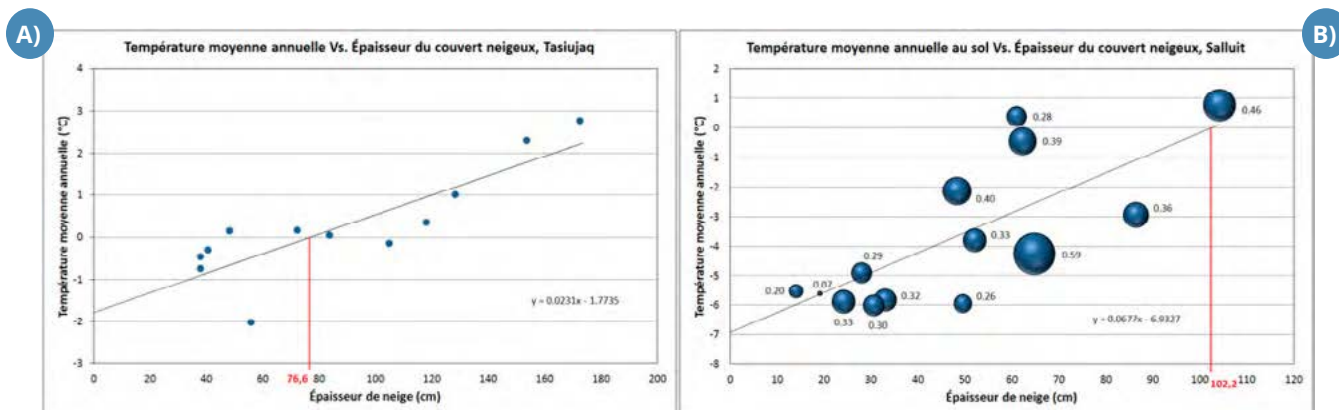


FIGURE 5.3 : RELATION ENTRE L'ÉPAISSEUR DE LA NEIGE AU SOL À LA FIN DE L'HIVER ET LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE À LA SURFACE DU SOL. A) TASIUJAQ, B) SALLUIT. LA TAILLE DES CERCLES EST PROPORTIONNELLE À LA DENSITÉ GLOBALE DU COUVERT DE NEIGE.

Les zones de pergélisol se définissent par la continuité de la distribution du pergélisol dans le paysage (Figure 5.4). Au Québec nordique, la zone dite de *pergélisol continu* s'étend grosso modo au-delà du 58^e parallèle nord de même que sur les hauts plateaux à l'est de la rivière George. En fait, on estime que, dans la zone continue, le pergélisol s'étend sous tous les types de roches et de terrain. Il est toutefois absent sous les lacs et les rivières, qui occupent de vastes superficies sur le territoire; en effet, le fond de tout plan d'eau dont la profondeur est supérieure à l'épaisseur de la glace en hiver ne peut atteindre de température négative, il ne peut donc pas y avoir de pergélisol sous son lit.

Pour les lacs suffisamment grands, cette zone non gelée, appelée *talik*, s'étend verticalement de part en part du pergélisol.

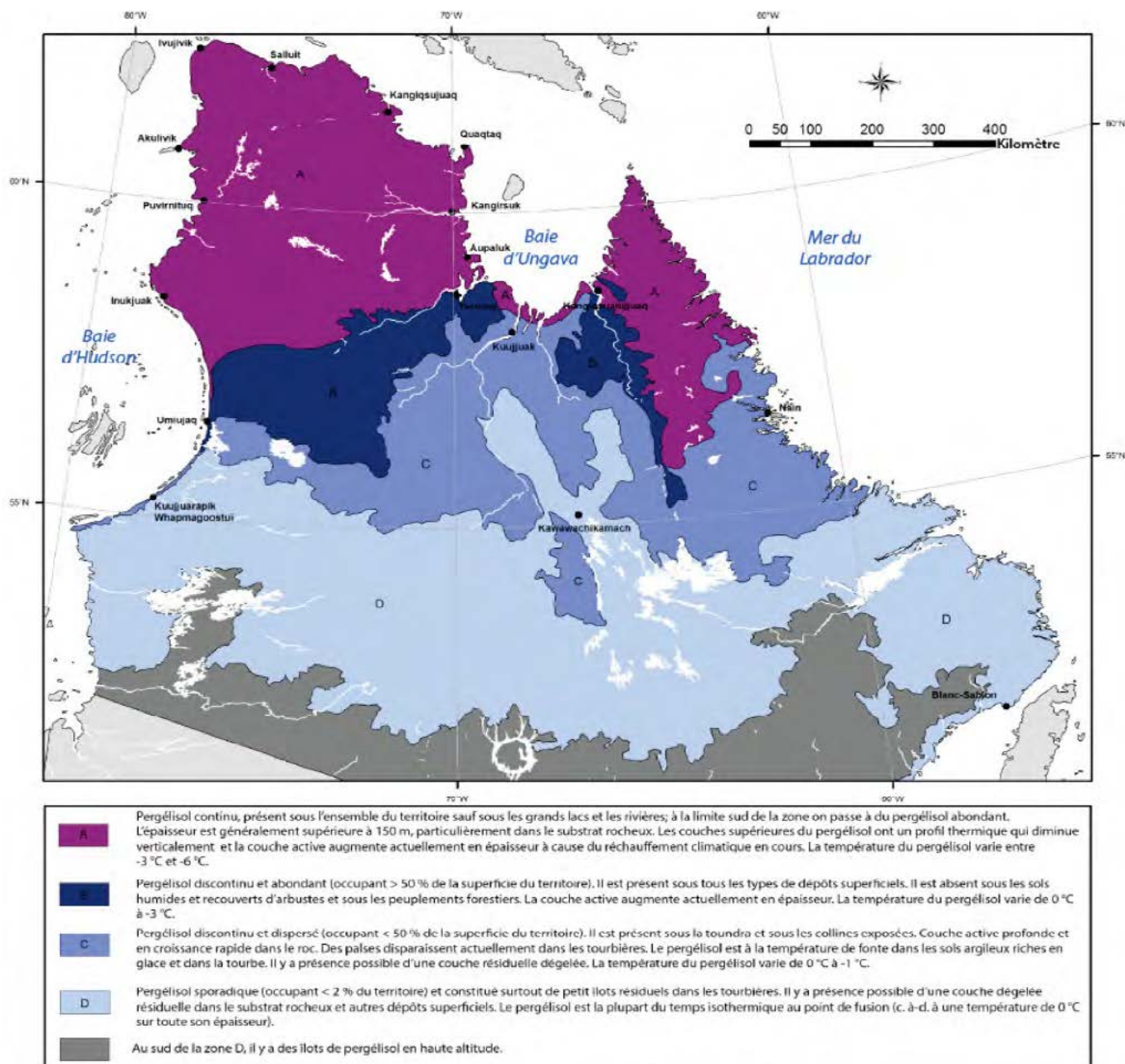


FIGURE 5.4 : DISTRIBUTION DU PERGÉLISOL AU QUÉBEC NORDIQUE.

Les températures moyennes de l'air dans la zone de pergélisol continu sont plus ou moins inférieures à 3 °C. L'épaisseur du pergélisol est substantielle; par exemple, elle atteint 630 mètres dans un trou de forage à la mine Raglan. La zone de pergélisol discontinu chevauche la limite des arbres. Généralement, elle s'étend au-delà de l'isotherme de la température moyenne annuelle de l'air qui est de 0 °C.

De façon très approximative, on subdivise la zone de pergélisol discontinu en deux sous-zones : la zone de pergélisol discontinu abondant, où plus de la moitié de la superficie du terrain est occupée par du pergélisol, et la zone de pergélisol discontinu dispersé, où le pergélisol occupe moins de la moitié de la superficie du terrain. La limite des arbres correspond presque exactement à la frontière entre les deux sous-zones. En effet, les nombreux îlots de forêt dans la toundra forestière sont des endroits enneigés et généralement humides, sans pergélisol, tandis que les sommets dénudés et couverts de toundra sont des milieux balayés par le vent en hiver, peu enneigés et favorables à la persistance du pergélisol.

Dans la partie sud du Québec septentrional se trouve la zone de pergélisol sporadique. Le pergélisol y est mince, très rare et sa durée de vie est souvent courte (quelques années). Il se trouve en petites plaques dans des tourbières et au sommet de collines élevées où le climat est plus froid.

Les communautés inuites de Kangiqsualujjuaq, Kuujjuaq et Umiujaq se trouvent dans la zone de pergélisol discontinu. Les autres communautés, à savoir Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Ivujivik, Salluit, Kangiqsujuaq, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq, sont dans la zone de pergélisol continu. Notons que Tasiujaq se trouve à quelques kilomètres à peine au nord de la frontière « discontinu-continu ». Il n'y a pas de pergélisol à Kuujjuarapik et Whapmagoostui.

5.1.3.3 La mesure de la température dans le pergélisol

Bien qu'il y ait différentes techniques pour mesurer la température du sol (ex. : thermomètres, thermocouples), l'instrument de loin le plus utilisé est la thermistance (*thermistor*). C'est une résistance électrique à peu près de la taille d'une tête d'allumette connectée à deux petits fils; lorsqu'on y fait circuler un courant électrique, la valeur de cette résistance varie en fonction de la température ambiante. Cette résistance peut être mesurée simplement avec un multimètre. La résistance électrique, convertie en température, peut être mesurée et enregistrée aussi grâce à un système d'acquisition automatique de données (*datalogger*) (voir schéma de la figure 5.5). La précision d'un thermistor correctement calibré peut être de 0,01 °C. Généralement, les thermistances sont installées le long de fils multibrins et distribuées verticalement à différentes profondeurs dans un trou de forage, ce qui permet de mesurer le profil vertical de la température.

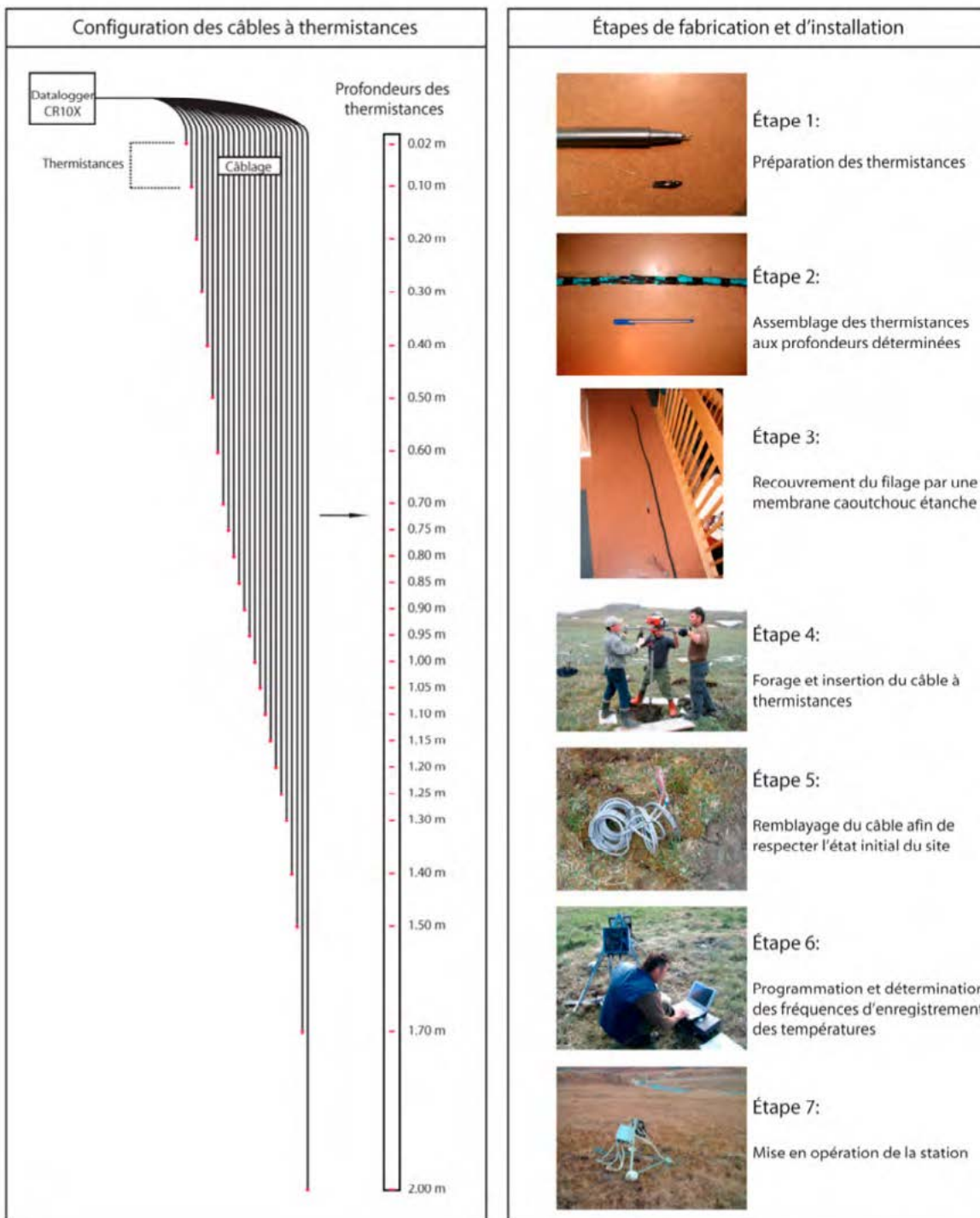


FIGURE 5.5 : DIAGRAMME MONTRANT LE PLAN D'INSTALLATION D'UNE SÉRIE DE THERMISTANCES (OU D'UN CÂBLE À THERMISTANCES DANS LE SOL) ET SÉRIE DE CLICHÉS MONTRANT LES ÉTAPES DE PRÉPARATION ET D'INSTALLATION. DANS CE CAS PRÉCIS, LES THERMISTANCES ONT ÉTÉ PLACÉES À DES PROFONDEURS RAPPROCHÉES, ENTRE 0,7 ET 1,3 M, POUR CAPTER AVEC UNE GRANDE PRÉCISION LA PROFONDEUR MAXIMALE DE DÉGEL AU CONTACT DE LA COUCHE ACTIVE/PERGÉLISOL. D'AUTRES ESPACEMENTS SONT POSSIBLES.

5.1.3.4 Les modes de représentation du régime thermique du pergélisol

Il existe deux principaux modes de représentation graphique des données thermiques mesurées avec des câbles à thermistances : 1- la représentation par une série de profils verticaux, appelée parfois « diagramme-trompette », 2- la représentation par des courbes d'évolution de la température dans le temps, à diverses profondeurs.

5.1.3.5 Les profils verticaux de température

Chaque profil tracé sur le diagramme-trompette représente la mesure du profil thermique à un moment quelconque, par exemple un jour donné. On peut aussi y représenter des profils de températures moyennes mensuelles ou saisonnières ou encore les températures maximales et minimales mesurées à différentes profondeurs. Lorsqu'on y trace les profils de température maximum et minimum, le « diagramme-trompette » permet de voir l'amplitude des variations de température à diverses profondeurs au cours d'une année. Le profil des températures maximales ou encore un profil en fin d'été (ex. : à la miseptembre) permet de déterminer l'épaisseur de la couche active au point où le profil croise la ligne de 0 °C (Figure 5.6).

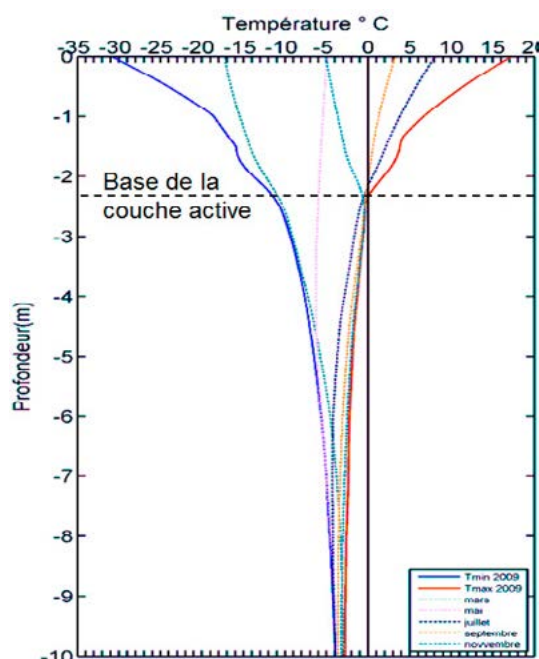


FIGURE 5.6 : DIAGRAMME-TROMPETTE AVEC PROFILS DE TEMPÉRATURES À DIFFÉRENTES DATES DANS UNE ANNÉE ET ENVELOPPE DES TEMPÉRATURES MINIMALES ET MAXIMALES. LE PROFIL DES TEMPÉRATURES MAXIMALES CROISE LE 0 °C À LA BASE DE LA COUCHE ACTIVE. EXEMPLE PROVENANT DU PERGÉLISOL SITUÉ DANS LE SABLE À QUAQTAQ.

Des profils mesurés dans des trous suffisamment profonds vont atteindre un niveau où la fluctuation annuelle (l'amplitude) est minime (inférieure à 0,1 °C). Plus en profondeur, la température tend à se réchauffer progressivement. La pente du profil (en mètres par degré) est le gradient géothermique (Figure 5.1).

Dans le cas d'un changement climatique d'une durée suffisamment longue, les infimes variations qui se propagent en profondeur avec le temps vont faire changer la pente du gradient thermique. De même, sous une infrastructure ou un bâtiment qui réchaufferait la surface du sol, le profil de température en profondeur va s'infléchir. Une instrumentation adéquate, par exemple des câbles à thermistances, peut ainsi permettre de suivre l'impact d'un changement thermique à la surface découlant soit d'un changement du climat, soit d'une infrastructure.

5.1.3.6 Les courbes de température vs le temps

Ce mode de représentation graphique permet de mettre en évidence les changements de température qui surviennent aux différentes profondeurs de mesure au fil des saisons. Souvent, on ajoute sur ce graphique les variations des températures dans l'air, ce qui permet d'analyser comment le sol réagit au climat (Figure 5.7). Ce mode permet aussi de détecter l'impact de facteurs particuliers sur le régime thermique comme une couverture de neige ou une subite infiltration d'eau dans le sol. Dans les situations de gel ou de dégel, à l'automne et au printemps, il permet aussi de détecter la présence d'eau dans le sol par l'effet de la période zéro (*zero curtain*) qui est une période durant laquelle la température reste stationnaire le temps de transformer l'eau en glace dans le sol ou, inversement, au dégel, le temps que la glace fonde dans le sol. Ce phénomène est causé par une des propriétés fondamentales de l'eau : la chaleur latente de fusion.

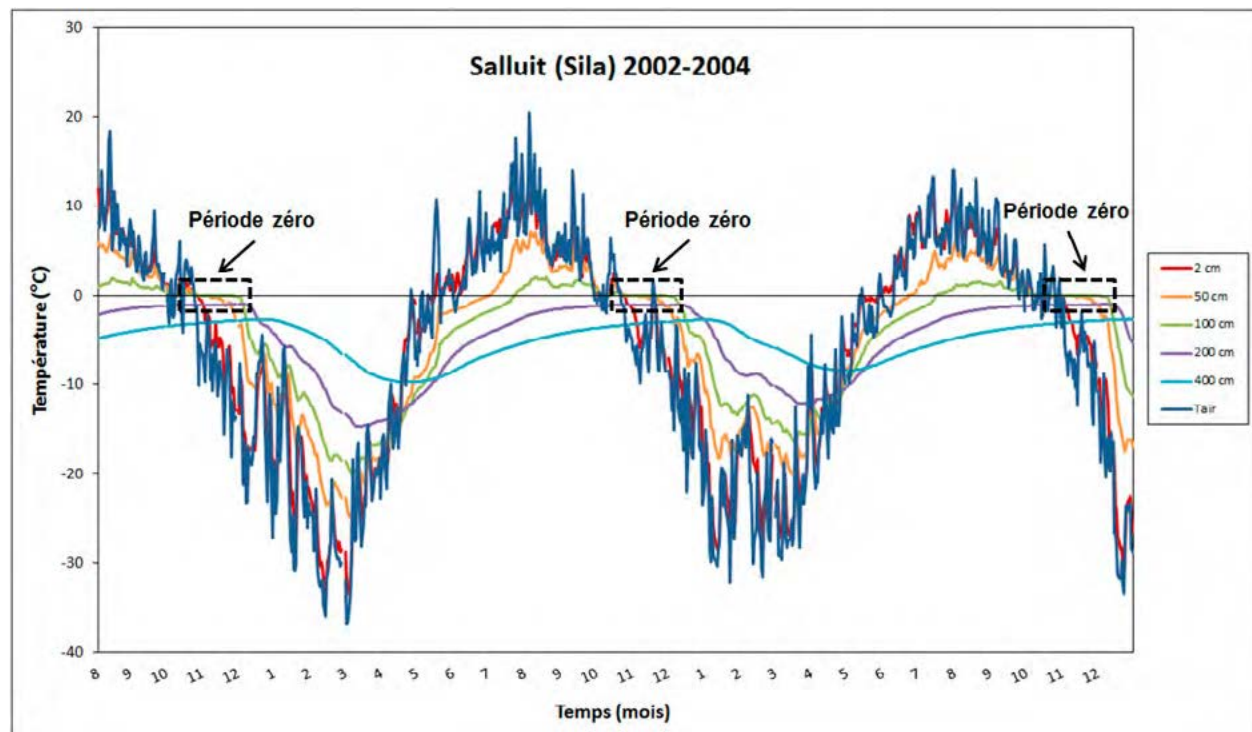


FIGURE 5.7 : DIAGRAMME DES TEMPÉRATURES EN FONCTION DU TEMPS. LA DIMINUTION DE L'AMPLITUDE DES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE DE LA SURFACE VERS LE BAS EST VISIBLE, DE MÊME QUE LE DÉPHASAGE DANS LE TEMPS. À 100 CM, LORS DU REDEL, LA TEMPÉRATURE RESTE STATIONNAIRE À ZÉRO PENDANT PLUSIEURS JOURS, LE TEMPS DE GELER L'EAU DANS LA COUCHE ACTIVE. C'EST LA « PÉRIODE ZÉRO ». LE SOL DE CE SITE EST UN TILL.

Ce genre de diagramme permet aussi de voir que les variations de température enregistrées en surface, notamment les températures saisonnières, se propagent dans le sol en diminuant à mesure que la profondeur (diminution d'amplitude) et le décalage dans le temps (déphasage) augmentent. Ce mode de représentation graphique permet de voir facilement que la « vague de froid » de l'hiver, plus ou moins atténuée en surface, se propage dans le sol avec une atténuation et un déphasage. Il en est de même de la « vague de chaleur » de l'été (Figure 5.7). Ce phénomène est lié à une autre propriété fondamentale du pergélisol : la diffusivité thermique.

5.1.4 Les propriétés thermiques du sol

Les taux de changement de température dans le sol, les amplitudes thermiques, les profondeurs atteintes par les variations depuis la surface, tous ces éléments du régime thermique dépendent de quatre propriétés de base : la conductivité thermique, la capacité calorifique (ou chaleur spécifique), la diffusivité thermique et la chaleur latente de fusion. Les définitions scientifiques apparaissent dans le tableau 5.1.

PROPRIÉTÉ THERMIQUE	SYMBOLE	DESCRIPTION
Conductivité thermique	k ou λ	Quantité de chaleur qui va traverser une unité de surface dans une unité de temps dans une unité de gradient thermique (W/m.K).
Capacité calorifique (~chaleur spécifique)	C	Quantité de chaleur requise pour élever la température d'une unité de masse (massique) (kJ/kg.K) ou de volume (volumique) (kJ/m ³ .K) d'un degré.
Diffusivité thermique	α	Indice représentant la facilité relative avec laquelle un matériel peut changer de température (mm ² /s); $\alpha = k/C$.
Chaleur latente de fusion	wL	Quantité de chaleur requise pour faire fondre (ou faire geler) l'eau dans un volume de sol. Cette quantité de chaleur s'accumule ou se perd sans changement de température (normalement à 0 °C) ($L = 334 \times 10^3$ Sn kJ/m ³) où S est la saturation du sol et n la porosité.

TABLEAU 5.1 : LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE BASE DU PERGÉLISOL.

5.1.5 Les paramètres couramment utilisés pour caractériser le régime climatique local et son influence sur le pergélisol

De façon simplifiée, il est possible d'expliquer le régime thermique du pergélisol dans un lieu donné à partir de quelques paramètres de base liés au climat et aux facteurs de surface du terrain. Ces paramètres sont la température moyenne annuelle de l'air, celle du pergélisol, l'indice de gel, l'indice de dégel ainsi que les facteurs-n de gel et de dégel.

Toutes les régions où la température moyenne annuelle de l'air est égale ou inférieure à 0 °C sont susceptibles de contenir du pergélisol. Sa présence dépend toutefois de facteurs locaux qui affectent le transfert de chaleur entre l'atmosphère et le sol, en l'occurrence, l'absence ou une épaisseur critique d'enneigement, une surface végétale de toundra ou qui comporte des arbres et des arbustes, des sols organiques ou à texture fine ou une combinaison de ces facteurs.

Les sols organiques et les sols à texture fine (silts et argiles) ont une faible conductivité thermique à l'état dégelé, de sorte que le dégel estival y progresse lentement; par contre, ils ont une conductivité élevée à l'état gelé. Il en résulte qu'ils perdent davantage de chaleur dans l'atmosphère en hiver qu'ils n'en gagnent en été, ce qui favorise un bilan négatif.

La température moyenne annuelle à la surface du sol n'est pas la même que celle de l'air; en fait, elle est pratiquement toujours plus chaude. Les facteurs qui font que la surface du sol est souvent moins froide que l'atmosphère sont principalement le couvert de neige qui isole en partie (ou totalement selon l'épaisseur et la densité) le sol en hiver, et la couverture végétale en été qui a un albédo (la fraction d'énergie solaire réfléchiée) relativement faible. À cela peuvent s'ajouter d'autres facteurs comme l'épaisseur des horizons organiques de surface (isolant et favorisant une température moyenne plus basse), la présence de flaques d'eau (qui captent la chaleur solaire et la transmettent au sol en dessous) et la couleur des surfaces (ex. : les surfaces asphaltées foncées).

L'indice de gel annuel (F_i = *Freezing index*) dans une saison froide est la somme des degrés-jours inférieurs à 0 °C. Pour le calculer, on additionne les températures moyennes quotidiennes de la saison froide. L'indice de dégel (T_i = *Thawing index*) se calcule de la même façon avec les jours d'été dont la moyenne est supérieure à 0 °C. Le tableau 5.2 donne les valeurs d'indices de gel et de dégel mesurés dans diverses communautés du Nunavik.

LOCALITÉ	PÉRIODE	TMA (°C)	Fi (GEL)	Ti (DÉGEL)
Akulivik	2007-2011	-5,71	3044	1013
Aupaluk	2007-2011	-5,19	2794	947
Inukjuak	2009-2012	-4,6	2738	1194
Kangirsuk	2007-2011	-5,87	2992	903
Kuujuaq	2008-2012	-3,34	2625	1433
Kuujuarapik	2008-2012	-1,9	2159	1523
Puvirnituq	2007-2011	-5,73	3189	1154
Salluit	2007-2011	-5,89	2866	902
Quaqtaq	2007-2011	-5,28	2581	704
Tasiujaq	2007-2011	-4,54	2824	1150

TABLEAU 5.2 : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES DE L'AIR (TMA), INDICES DE GEL (Fi) ET INDICES DE DÉGEL (Ti) DANS CERTAINES LOCALITÉS DU NUNAVIK (MOYENNES POUR LA PÉRIODE ENTRE 2007 ET 2012) (SOURCE : ENVIRONNEMENT CANADA ET RÉSEAU SILA).

Les facteurs-n de gel et de dégel sont des multiplicateurs qu'on applique aux indices atmosphériques pour obtenir une approximation de ces mêmes indices, mais à la surface du sol. Quelques facteurs-n typiques de différents types de surfaces non enneigées sont présentés dans le tableau 5.3.

TYPE DE SURFACE	FACTEUR-N (n_f)	FACTEUR-N (n_t)
Épinettes, arbustes, mousse sur sol tourbeux	0,29 (sous la neige)	0,37
Mousse sur sol tourbeux sans arbres ni arbustes	0,25 (sous la neige)	0,73
Tourbe	0,5	1,0
Neige	1,0	—
Revêtement (asphalte) sans neige ni glace	0,9	—
Sable et gravier	0,9	2,0
Surface de sol minéral	0,33	1,22
Gravier (valeurs probables dans des conditions nordiques)	0,6-1,0 (0,9-0,95)	1,3 - 2
Revêtement en asphalte (valeurs probables dans des conditions nordiques)	0,29 - 1,0 ou plus (0,9 - 0,95)	1,4 - 2,3
Revêtement en béton (valeurs probables dans des conditions nordiques)	0,25 - 0,95 (0,7 - 0,9)	1,3 - 2,1

TABLEAU 5.3 : FACTEURS-N PROPRES À DIFFÉRENTS TYPES DE SURFACES. n_f FACTEURS-N DE GEL, n_t FACTEURS N DE DÉGEL (TIRÉ DE JOHNSTON, 1981, ET D'ANDERSLAND ET LADANYI, 2004).

Avec de petits dataloggers relativement bon marché, il est possible de mesurer en continu la température à la surface du sol, par exemple sous un banc de neige, sous une surface de route, sous un édifice ou dans la nature. On peut ainsi calculer des indices de gel et de dégel en surface en faisant le rapport entre la température moyenne annuelle à la surface du sol et celle de l'air, mesurées avec ces petits systèmes simples de mesure thermique.

Lorsqu'on met dans un graphique les températures de l'air, de la surface et de différentes profondeurs en mode température vs mois de l'année, les surfaces entre la courbe de température et la température à 0 °C correspondent aux indices de gel et de dégel. Avec une station météorologique et un câble à thermistances doté d'un *datalogger*, il est possible de suivre les variations des indices de gel et de dégel et les températures correspondantes dans le sol au fil des ans. Attention! Pour être cohérent, le suivi doit prendre pour base les « années climatiques » et non civiles, c'est-à-dire qu'il doit être fait sur des périodes de 12 mois incluant des saisons de gel et de dégel complètes (par exemple, du début juin à la fin mai ou du début octobre à la fin septembre) (Figure 5.8).

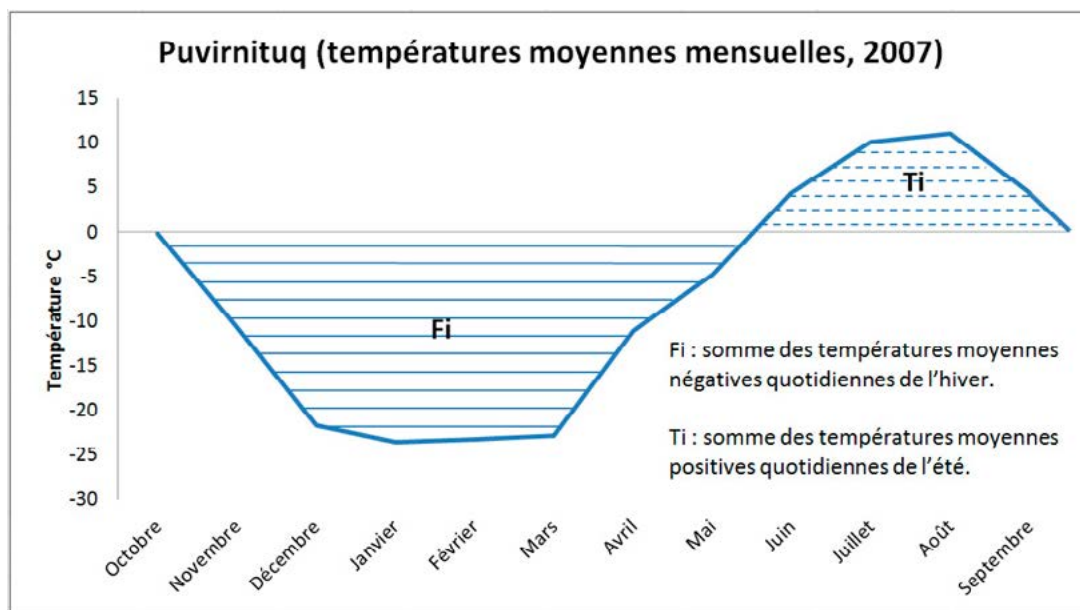


FIGURE 5.8 : REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'INDICE DE GEL ET DE L'INDICE DE DÉGEL.

5.1.6 Les types de glace dans le pergélisol

L'aspect que prend le pergélisol, sa dureté (sa résistance mécanique) et le type de glace qu'il contient découlent d'une série de facteurs qui sont principalement : la composition granulométrique du dépôt meuble, les structures sédimentaires d'origine du dépôt meuble, le régime thermique lors de la formation de la glace et la présence de tourbe en surface ou dans la séquence stratigraphique du sol. Au Nunavik, le pergélisol renferme plusieurs types de glace dont les principaux sont les coins de glace, la glace de ségrégation en lentilles et réticulée, la glace interstitielle et la glace intrusive. Il est aussi possible de trouver, dans certaines conditions, de la glace massive.

5.1.6.1 Les coins de glace

Lorsque la couche active est gelée en hiver et que les températures du sol sont déjà très froides (inférieures à environ -12 °C, le plus souvent -18 °C), le sol peut se fissurer par contraction thermique lors des vagues de froid (ex. : quand le thermomètre descend dans les -30 °C). Un réseau de fissures s'ouvre alors jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre entre sept et huit mètres dans le pergélisol. Au printemps, l'eau de fonte de la neige ne tarde pas à s'infiltrer dans les fissures ouvertes et à geler dans le pergélisol. Durant l'été, la veine de glace dans la couche active fond, mais celle du pergélisol subsiste. Au cours des ans, le sol se fissure périodiquement au même endroit et l'accumulation de veines de glace successives en vient à former un coin de glace (Figure 5.9). À la surface du terrain, les coins de glace dessinent des réseaux de polygones de toundra (Section 5.1.9.2).



FIGURE 5.9 : COIN DE GLACE À SALLUIT (DANS UN TILL).

5.1.6.2 La glace de ségrégation

Très abondant dans les sols à texture fine (silts, argiles, sables fins et très fins), ce type de glace se présente sous forme de lentilles variant en épaisseur de moins de 1 mm à plusieurs centimètres (Figure 5.10 A). Ces lentilles ou couches sont formées lorsque l'eau contenue dans les sédiments est aspirée vers un front de gel stationnaire, au moins pour un temps, à un niveau donné. Ce processus est appelé cryosuccion. D'ailleurs, les lentilles sont généralement parallèles à ce front de gel. Toutefois, il arrive très souvent que la glace apparaisse aussi dans des veines obliques ou verticales à la suite de la migration d'eau du sol dans les fissures lors du gel.

Le réseau de lentilles horizontales, de veines obliques, de veines verticales et de fractures qui les affectent (microfailles) constitue ce que nous appelons de la glace réticulée (Figure 5.10 B).

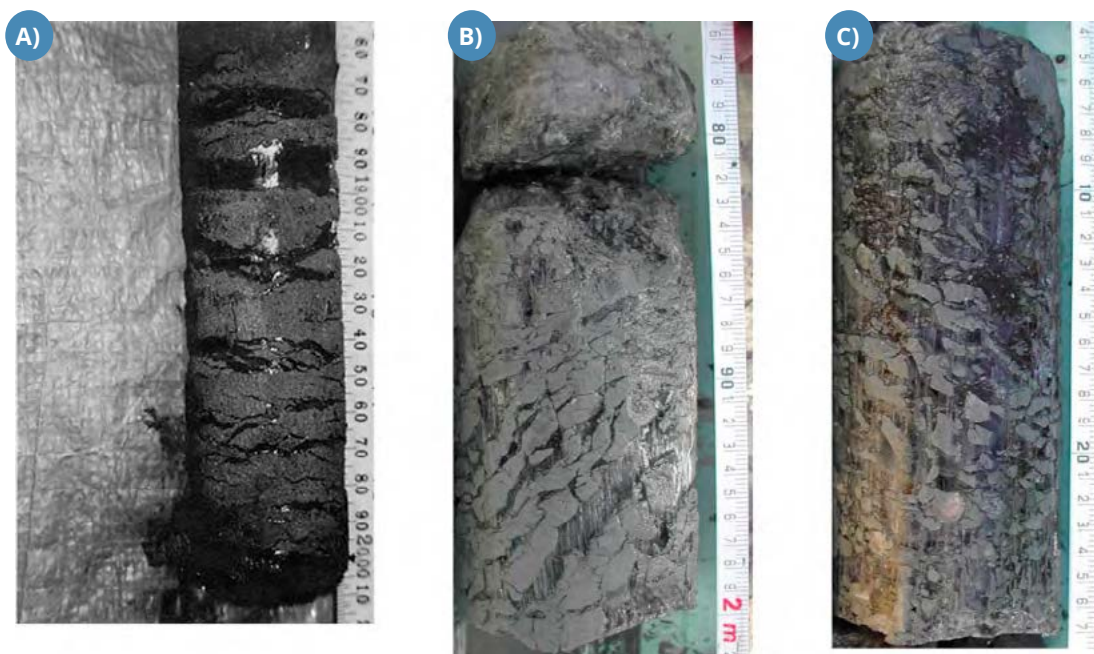


FIGURE 5.10 : DIFFÉRENTS TYPES DE GLACE DE SÉGRÉGATION : A) LENTILLES, B) GLACE RÉTICULÉE, C) GLACE D'AGGRADATION.

Lorsque la couche active est dégelée et qu'elle contient de l'eau, une fraction de celle-ci peut être aspirée dans le pergélisol partiellement dégelé en dessous, le long du gradient de température. Ceci crée un léger apport d'eau par succion, lequel entraîne un épaississement progressif des lentilles déjà existantes près du plafond du pergélisol. Il en résulte au fil du temps que les couches supérieures du pergélisol, dans les premiers décimètres sous la base de la couche active, sont souvent enrichies d'une glace dans laquelle les agrégats de sol apparaissent suspendus, avec des teneurs volumétriques pouvant dépasser 80 %. Cette glace ségrégée à l'interface couche active/pergélisol s'appelle aussi glace d'aggradation (Figure 5.10 C).

À cause de son processus de formation qui provoque un apport d'eau supplémentaire et la croissance de lentilles et de veines de glace, il arrive très fréquemment que la teneur en glace de ségrégation dans le pergélisol dépasse la porosité naturelle ou le volume des vides (ou saturation) du même sol non gelé. En pourcentage pondéral, les teneurs peuvent atteindre 300 et 400 %. La fraction au-delà de la valeur de saturation (généralement dans les 30 %) s'appelle glace excédentaire.

La formation de la glace de ségrégation dans le sol provoque une augmentation de volume qui se traduit par le soulèvement de la surface du terrain. C'est le soulèvement gélival. La formation saisonnière de lentilles de glace dans la couche active lorsqu'elle regèle provoque ce phénomène qui peut soulever et déformer (parce qu'il se produit inégalement dans l'espace) les infrastructures de transport et les bâtiments. Inversement, la fonte des lentilles de glace amène un tassement de la surface chaque été.

À long terme (quelques années), la fonte de la glace de ségrégation qui survient avec le dégel du pergélisol entraîne des tassements très importants et réduit la capacité portante du terrain, souvent au point de rendre les bâtiments et les infrastructures inutilisables.

5.1.6.3 La glace interstitielle

On peut définir la glace interstitielle comme étant la glace contenue dans les pores des sédiments et des roches. Cette glace ne se retrouve pas en excès dans le sol, car le volume de glace est inférieur ou égal au volume des vides du sol (Figure 5.11). Contrairement à la glace de ségrégation et à la glace intrusive, elle n'induit pas de soulèvement gélival et ne cause pas de tassements importants lors du dégel. Ce type de glace agit comme un ciment et augmente fortement la cohésion des dépôts meubles. On le trouve principalement dans les dépôts de gravier et de sable.



FIGURE 5.11 : GLACE INTERSTITIELLE DANS UN SOL COMPOSÉ DE SABLE ET DE GRAVIER. NOTEZ LES CAVITÉS GLACÉES LAISSÉES PAR LES CAILLOUX QUI VIENNENT DE TOMBER DE LA PAROI.

5.1.6.4 La glace intrusive

Il s'agit de glace formée à partir du gel d'eau injectée sous pression dans le pergélisol ou dans la couche active en hiver. L'eau provient généralement de sources qui, scellées par le gel de la surface du sol, deviennent des aquifères captifs dans lesquels s'accumulent de fortes pressions qui soulèvent le sol sous-jacent.

Des poches d'eau de ce type sont à l'origine des cœurs de glace intrusive qu'on trouve au centre des pingos du delta du Mackenzie. De telles formes n'existent pas au Québec. Néanmoins, on rencontre parfois des buttes à cœur de glace intrusive qui, pour la plupart, fondent en été, mais dont certaines durent parfois plus d'un été dans les années plus froides que la moyenne. La glace intrusive forme des bancs cristallins à structure en colonnes verticales (Figure 5.12).



FIGURE 5.12 : MASSE DE GLACE INTRUSIVE DANS UN DÉPÔT ORGANIQUE SUR SABLE À KANGIJSUALUJJUAQ. NOTEZ LA STRUCTURE COLONNAIRE DE LA GLACE. BUTTE SAISONNIÈRE À NOYAU DE GLACE.

5.1.6.5 La glace massive

L'origine de masses de glace relativement pures et de grand volume dans le pergélisol peut être diverse. Il peut s'agir, par exemple, de couches de glace formées par l'arrivée d'eau au contact d'un lit argileux disposé stratigraphiquement sur un lit de sable. Pendant que le front de gel reste stationnaire à l'interface, l'alimentation constante en eau contenue dans le sable favorise la formation d'une couche de glace très épaisse. Ce mode de croissance, possible en théorie sur le plan thermodynamique, n'a pas souvent été vérifié dans la nature; c'est la théorie de la ségrégation massive.

Une autre origine pour la glace massive, démontrée celle-là, est la persistance, dans les dépôts quaternaires, de glace des glaciers qui n'aurait jamais fondu. En 2010, des lits de glace massive ont été trouvés dans un dépôt fluvio-glaciaire près de la mine Raglan (Figure 5.13).

Une hypothèse, qui n'est toutefois pas scientifiquement validée, voudrait qu'il s'agisse de fragments de glace provenant du glacier du Wisconsinien, fondu il y a environ 7000 ans, puis enterrés dans un esker par la sédimentation fluvioglaciaire; cette glace ancienne n'aurait jamais fondu sous le climat froid qui a prévalu depuis la déglaciation. La possibilité de trouver ce type de glace dans la zone de pergélisol continu au Québec existe donc.



FIGURE 5.13 : COUCHE DE GLACE MASSIVE DANS UN DÉPÔT FLUVIO-GLACIAIRE SUR LE PLATEAU KATINNIK. IL S'AGIT PROBABLEMENT DE GLACE PROVENANT DE LA DERNIÈRE GLACIATION ENFOUIE ENTRE LES COUCHES DE GRAVIER D'UN ESKER.

5.1.7 Les facteurs de contrôle de formation de la glace dans le pergélisol

Quelques facteurs propres aux matériaux qui composent le sol affectent la formation de glace dans le pergélisol lorsqu'il se crée. Ces facteurs sont la granulométrie, les structures sédimentaires des dépôts meubles, notamment les stratifications, et la présence de couches riches en matière organique, comme la tourbe. Un autre facteur est le régime thermique qui prévaut durant la formation du pergélisol.

5.1.7.1 La granulométrie

Les sables grossiers et les graviers sont macroporeux et peu cohésifs; toutefois, le gel de l'eau interstitielle cimente solidement les grains et les cailloux ensemble. Dans ce type de matériaux, à moins d'être retenue par une couche imperméable, l'eau du sol est expulsée au-devant du front de gel lorsque le pergélisol se forme.

Ce phénomène est causé par une augmentation de volume d'environ 9 % qui se produit lorsque l'eau se transforme en glace. Ces 9 % d'eau supplémentaire se trouvent « poussés » ou expulsés devant le front de gel qui envahit le sol. Aussi, n'y a-t-il généralement pas de glace excédentaire ni de soulèvement découlant du gel, car le volume final de glace contenu dans le pergélisol ne dépasse pas le volume des vides. Par contre, les sables fins, les limons et les argiles sont microporeux; lorsque le front de gel y progresse, l'eau est attirée par succion capillaire. Il se crée alors des lentilles de glace qui font gonfler et soulever la couche de sol affectée par le gel (Figure 5.14) (Williams et Smith, 1989; Williams, 1986).

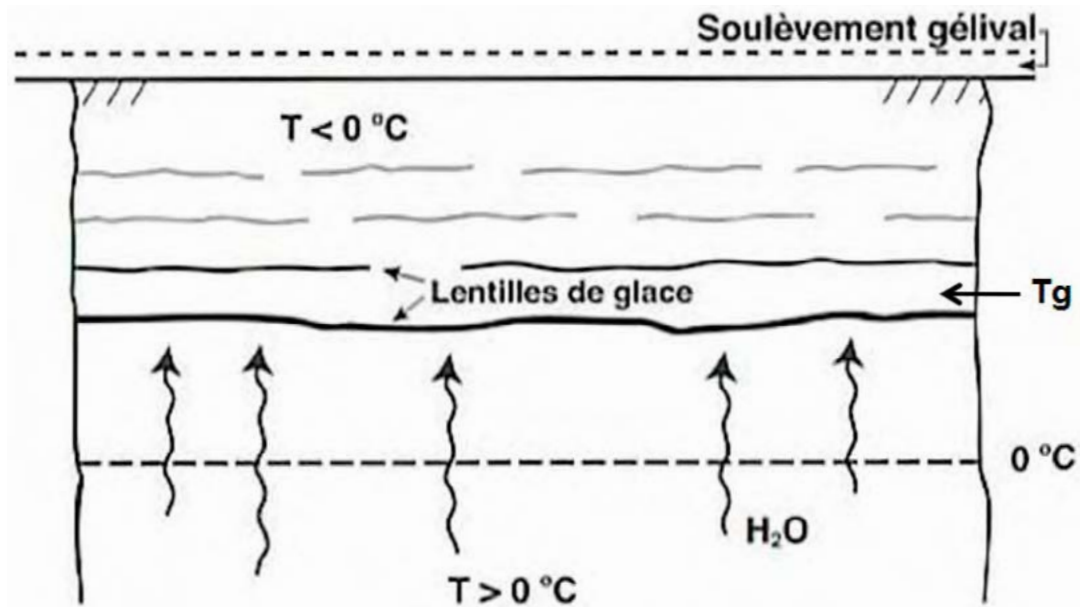


FIGURE 5.14 : PRINCIPE DE LA CRYOSUCCION DANS LES SÉDIMENTS FINS À L'ORIGINE DE LA FORMATION DE LENTILLES DE GLACE DE SÉGRÉGATION. LA PRESSION DANS LA « FRANGE GELANTE » ENTRE L'ISOTHERME À 0 °C ET LA TEMPÉRATURE DE FORMATION DE LA GLACE LÉGÈREMENT INFÉRIEURE À 0 °C (T_g) FAIT MIGRER L'EAU QUI SERT À LA FORMATION DES LENTILLES DE GLACE.

5.1.7.2 Les structures sédimentaires

Les stratifications dans lesquelles alternent les couches de sable et les couches de limons argileux créent des discontinuités granulométriques le long desquelles la ségrégation de lentilles de glace est favorisée. Cela accentue la formation de lentilles dans les limons marins et les autres dépôts fins stratifiés (Figure 5.15).



FIGURE 5.15 : LENTILLES DE GLACE ÉPAISSES FORMÉES AUX CONTACTS STRATIGRAPHIQUES ENTRE DES COUCHES DE SABLE ET DES COUCHES D'ARGILE À UMIUJAQ.

5.1.7.3 La tourbe et les horizons organiques

La tourbe et les horizons organiques épais affectent considérablement le régime thermique du terrain. Imbibés d'eau et gelés, ils possèdent une conductivité thermique élevée qui permet à la chaleur de s'échapper dans l'atmosphère froide en hiver (« pénétration » du froid dans le sol). En été cependant, la surface tourbeuse asséchée se transforme en un très bon isolant qui protège le sous-sol du dégel en limitant la pénétration de chaleur. Les sols minéraux pergélisolés en dessous de la tourbe gardent donc des températures plus froides et les gradients thermiques saisonniers près de la surface sont prononcés. Ces milieux, qui sont propices au développement de pergélisol, peuvent permettre la formation de nombreuses couches de glace de ségrégation à plusieurs mètres de profondeur, comme dans les palses (voir section 5.1.9.1).

5.1.7.4 Le régime thermique

Comme le montrent les figures 5.1 et 5.6, le gradient de température dans le sol ne change de sens avec les saisons qu'au-dessus de la profondeur d'amplitude thermique annuelle nulle. En hiver, le haut du profil est plus froid que le bas, alors qu'en été c'est l'inverse qui se produit. Dans le sol gelé, une certaine proportion d'eau (film microscopique enrobant les grains de sol) demeure liquide, souvent même jusqu'à des températures inférieures à -2 °C (Farouki, 1981). Cette eau a tendance à migrer le long du gradient thermique des zones les plus chaudes vers les zones plus froides (Williams, 1967). Il en résulte une migration vers le bas en été, c'est-à-dire de la couche active vers les couches sommitales du pergélisol, tandis qu'une partie de cette eau tend à remonter vers le plafond du pergélisol en hiver. Le résultat net à long terme est un plus grand contenu en glace dans les premiers mètres du pergélisol, juste en dessous de la couche active (voir section 5.1.6.2, glace d'aggradation).

Plus la granulométrie du sol est fine, plus la quantité d'eau adsorbée autour des grains est importante; cette eau retenue par une tension de surface très élevée ne s'associe avec la glace des pores qu'à de très basses températures (Burt et Williams, 1976; Anderson et Morgenstern, 1973; Nersesova et Tsytoich, 1963). Il en résulte qu'un sol fin, tel un silt argileux marin ou un till à matrice argileuse dont la température est comprise entre 0 et -2 °C, peut contenir une importante fraction d'eau non gelée, allant de 10 à 30 %. La proportion peut être encore plus grande si des sels minéraux sont dissous dans l'eau du sol et abaissent le point de congélation du milieu. Cette fraction d'eau non gelée confère au pergélisol une certaine plasticité qui peut présenter des problèmes de capacité portante et de fluage sous les charges imposées à la surface du terrain, en particulier à la base de pieux sous charge. Cette teneur en eau liquide dans le pergélisol varie au cours de l'année suivant les fluctuations de température.

5.1.8 Le pergélisol et les formations géologiques de surface

Trois des facteurs mentionnés dans la section précédente sont liés de très près à la composition et à la structure des roches et des dépôts meubles. En effet, la granulométrie et la structure (strates, fissures, etc.) sont héritées de l'histoire géologique qui est ainsi indirectement responsable des propriétés du pergélisol. Quant aux couvertures organiques, elles sont venues s'ajouter à la surface des sols après la déglaciation ou l'émersion des terres. Il est donc possible d'associer diverses propriétés du pergélisol avec les types de formations superficielles. Chaque type de formation de surface pergélisolée possède des propriétés mécaniques, géocryologiques et thermiques différentes; chacune est susceptible de poser des problèmes géotechniques et environnementaux distincts.

5.1.8.1 Le roc

À l'exception de certains sédiments précambriens de la fosse du Labrador et de la fosse de l'Ungava, les roches du Québec nordique sont généralement massives. La glace dans le pergélisol rocheux se trouve principalement dans les éléments structuraux, à savoir les plans de stratification, les joints et les fractures. Il en découle que la circulation d'eau y est presque nulle. Les secteurs très fissurés ou friables ont parfois un contenu en glace élevé. Tel qu'on a pu l'observer sur les chantiers de construction des aéroports nordiques, le pergélisol qui se trouve dans le roc ne pose pratiquement aucun problème de forage ou de dynamitage. Il faut cependant éviter de laisser les tiges de forage trop longtemps inactives et remplir les trous d'explosifs avant que l'eau s'y infiltre et gèle. Lorsque la disposition structurale le permet, des blocs délimités par des fissures sont soulevés à la surface du terrain à la suite du développement de fortes pressions hydrauliques et cryogéniques dans la couche active lors du regel hivernal (Michaud et Dyke, 1990; Michaud et Dionne, 1987; Dyke, 1984).

Les basaltes dans les cuestas du littoral hudsonien sont particulièrement sensibles à ce phénomène qui se produit aussi, mais plus sporadiquement, ailleurs au Nunavik (Figure 5.16), notamment dans les métasédiments de la région de Kangirsuk.

De plus, le soulèvement de quartiers rocheux peut endommager les constructions. Sur les sites où le roc est friable et où il y a des soulèvements gélivaux rocheux, un carottage d'une dizaine de mètres de profondeur devrait permettre de déceler la présence de couches de glace susceptibles d'affecter les ouvrages sus-jacents en s'accroissant ou en fondant.



FIGURE 5.16 : FORMES D'ÉJECTION ROCHEUSES.

5.1.8.2 Les tills

Ces dépôts glaciaires sont très répandus au Québec. Ils forment des couvertures morainiques d'épaisseur variable qui masquent le socle rocheux. Lorsque cimentés par la glace, ils constituent un conglomérat dur et cohérent. Les tills contiennent à la fois de la glace interstitielle lorsqu'ils sont sableux, et de la glace de ségrégation lorsque leur matrice est composée de sable fin, de silt et d'argile. On observe alors les lentilles de glace ondulantes entre les blocs et les cailloux contenus dans le dépôt.

Les meilleures observations de pergélisol dans le till ont été faites à Salluit en hiver, lors du dynamitage du pergélisol pour excaver un étang d'épuration (Figure 5.17). Des carottes de tills gelés ont aussi été prélevées aux aéroports de Salluit, d'Akulivik, de Quaqtak et de Kangirsuk. Dans tous ces sites, le contenu volumétrique en glace pouvait fluctuer entre 10 et 70 % selon les variations spatiales de la granulométrie du dépôt. Le dégel du till, observé sous des routes et des pistes d'atterrissage, entraîne des tassements importants. Le till pergélisolé est donc un matériau à considérer avec précaution dans l'aménagement des sites.



FIGURE 5.17 : TILL RICHE EN GLACE À SALLUIT.

Les tills posent de nombreux problèmes de forages à cause des innombrables pierres qu'ils contiennent. La perturbation thermique engendrée par la friction des couronnes diamantées ou au carbure déloge des pierres de la paroi et coince l'équipement. Pour forer dans ces sédiments, il faut généralement procéder à l'installation de tubage (caisson) et utiliser des foreuses munies d'un système réfrigérant.

Même avec le support d'un boteur ou d'une pelle hydraulique, l'excavation du till pergélisolé est problématique à cause de la cimentation des constituants solides par la glace. À Kangiqsualujjuaq, par exemple, le creusage d'un fossé dans du till à -1°C à la fin des années 1980 a posé des problèmes coûteux : difficile à excaver à la pelle mécanique, le till absorbait les ondes de choc du dynamitage et ne se fragmentait pas. L'entrepreneur a dû improviser une méthode qui consistait à munir l'excavatrice d'un marteau piqueur (Figure 5.18).

Par contre, dans les excavations non drainées, la matrice sableuse et limoneuse se transforme en bouillie fluide en dégelant et les terrains en pente deviennent très instables. Pour éviter le problème de fluidisation du till dans une excavation importante, une façon de faire consiste à excaver par dynamitage pendant l'hiver comme dans une carrière de roc.



FIGURE 5.18 : MARTEAU PIQUEUR, EXCAVATION DU PERGÉLISOL DANS UN TILL À KANGIQSUALUJUAQ.

Les déblais ne sont pas recommandés dans le till pergélisolé, car les talus de déblai deviennent instables lorsque le pergélisol est exposé (Figure 5.19). Au dégel, même lorsque les pentes sont relativement faibles, les tills subissent un phénomène de solifluxion en raison de leur forte teneur en glace et de leur faible perméabilité. Lorsqu'on ne peut les éviter, les déblais nécessitent des travaux, comme la création d'un tapis drainant en roc dynamité, pour prévenir l'instabilité causée par le dégel du pergélisol.



FIGURE 5.19 : VERSANT DÉSTABILISÉ DANS UN TILL À PUVIRNITUQ.

5.1.8.3 Les dépôts fluvio-glaciaires

Constitués de sables et de graviers, parfois de cailloux et de galets en strates plus ou moins épaisses, ces dépôts se retrouvent sous forme de plaines d'épandages, de deltas perchés et d'eskers. Généralement cimentés par le gel (par la glace interstitielle), ils posent les mêmes problèmes de sondage et de forage que les tills à cause des nombreuses pierres qu'ils contiennent. Par contre, ils sont peu sensibles au fluage ou au tassement, pourvu qu'aucune ségrégation naturelle ou artificielle de fines ne se fasse dans le matériau. Habituellement, la glace interstitielle ne fait que lier les pierres et le sable entre eux sans excéder la porosité naturelle (Figure 5.11). Toutefois, des couches de glace massive ont été observées dans un dépôt fluvio-glaciaire près de la mine Raglan (Figure 5.13) et dans une gravière à Iqaluit dans des conditions climatiques comparables. Il peut donc valoir la peine de procéder à un forage avec récupération de carottes si on prévoit construire un édifice sur un tel dépôt pour bien évaluer le risque. En général, c'est lorsque ces dépôts sont utilisés comme bancs d'emprunts que l'on découvre par inadvertance de telles masses de glace qui rendent l'exploitation difficile en raison de la difficulté d'excaver et de drainer les eaux de fonte dans la gravière.

5.1.8.4 Les dépôts marins

Les dépôts marins ont été mis en place lors des transgressions marines postglaciaires (mer de Tyrrell dans le bassin de la mer d'Hudson; mer d'Iberville le long du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava). Ils ont émergé à la suite du relèvement isostatique. Ces dépôts, sur lesquels sont construits la majorité des villages côtiers, se présentent selon des faciès très variables et sont susceptibles de poser de multiples problèmes aux constructions sus-jacentes, particulièrement si la nature de ces sols n'est pas bien identifiée et considérée lors de l'étude de fondation.

Les silts argileux et les sables fins silteux sont les dépôts les plus propices au développement de lentilles de glace de ségrégation. Dans le pergélisol, leur teneur en glace est souvent très forte, pouvant atteindre jusqu'à 80 % du volume total dans certains échantillons. Lorsqu'ils sont dégelés, leurs propriétés géotechniques sont comparables à celles des argiles marines de la vallée du Saint-Laurent. Les sols sont difficiles à drainer; ils se tassent et se liquéfient au dégel. De plus, la machinerie lourde qui circule sur le terrain argileux s'enlise dans la boue de la couche active, endommageant gravement le milieu naturel (Figure 5.20). Autant que possible, il est préférable d'éviter les travaux de construction sur ces sols. Ces dépôts fins, qui se sont posés dans les fonds marins ou dans des bras de mer calmes, font en général quelques dizaines de mètres d'épaisseur.



FIGURE 5.20 : ORNIÈRES CREUSÉES DANS DES SÉDIMENTS MARINS ARGILEUX DE LA COUCHE ACTIVE LORS DU PASSAGE DE LA MACHINERIE ET QUI SONT AFFECTÉES PAR LA THERMO-ÉROSION.

Lorsqu'ils ont une granulométrie fine, les sables marins bien triés, parfois stratifiés, contiennent de la glace de ségrégation. Les sables fins massifs sont pour leur part cimentés par de la glace interstitielle et forment une boue quasi liquide en dégelant. Dans ce genre de dépôts, les teneurs en glace varient beaucoup en fonction du contexte géomorphologique et stratigraphique. Par exemple, les sables peuvent contenir beaucoup de glace quand ils sont sus-jacents à une couche argileuse, l'imperméabilité de cette dernière ayant pour effet d'augmenter la quantité d'eau dans les matériaux granulaires.

Sur le pourtour de la mer postglaciaire d'Iberville (Figure 5.22), les marées étaient autrefois, tout comme de nos jours, de grande amplitude. Elles charriaient des glaces flottantes qui ont déposé, sur les estrans vaseux, de nombreux blocs et des amas de sable et de gravier. Le mélange de vase, de sable et de pierres de différentes dimensions constitue un diamicton glacio-marin. Dans les anciennes baies aujourd'hui soulevées, ces couches de diamictons silteux affleurent souvent à la surface du sol couvrant de grandes superficies. Fréquemment, on en trouve qui sont recouverts par une couche plus ou moins épaisse de sable ou de matière organique. Ces diamictons, très répandus, contiennent de la glace excédentaire. Par contre, il peut arriver que ces dépôts soient recouverts de sédiments plus récents; ainsi, une couche de diamicton intertidal recouverte de sables fluviatiles s'étend sous la piste d'atterrissage de Tasiujaq à une profondeur variable de 0,3 à 1,5 m (Figure 5.21). Dans un tel cas, des sondages et des excavations sont nécessaires pour détecter ce type de dépôt.



FIGURE 5.21 : GLACE DE SÉGRÉGATION DANS UN DIAMICTON INTERTIDAL HOLOCÈNE À TASIUJAQ (SOUS LA PISTE D'ATTERRISSAGE).

Les sables et les graviers de plage, épais et bien drainés, se comportent de la même façon que les dépôts fluvioglaciers. Lors d'une étude préliminaire dans les régions côtières, la limite marine (altitude maximale atteinte par les mers postglaciaires) marque le plus haut niveau où l'on peut trouver des sédiments marins. Généralement, les masses importantes de silts argileux se retrouvent dans le fond des vallées, bien en deçà de cette altitude. Il demeure par contre possible d'en trouver jusqu'à cette altitude.

La figure 5.22 montre l'étendue et l'altitude de la limite marine dans les régions pergélisolées du Québec.

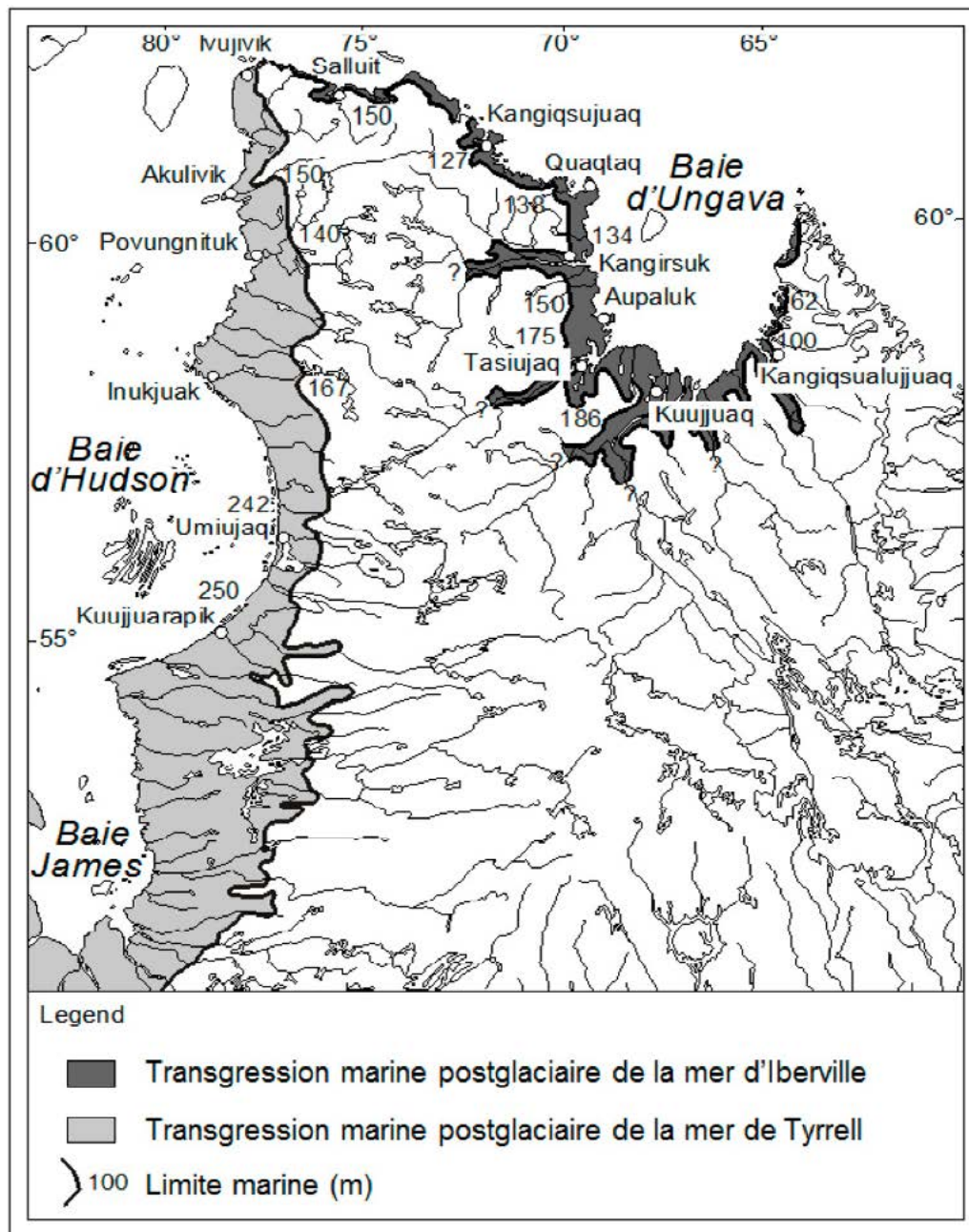


FIGURE 5.22 : TERRITOIRE DU QUÉBEC NORDIQUE RECOUVERT PAR LES MERS POSTGLACIAIRES OÙ SE TROUVENT DES SÉDIMENTS MARINS RICHES EN GLACE.

5.1.8.5 Les sables éoliens

Ces sables grossiers et très bien triés apparaissent sous forme de dunes et de creux de déflation, principalement sur les terrasses marines le long de la côte de la baie d'Hudson (Filion, 1983; Filion et Morisset, 1983). Ailleurs, ils sont peu abondants et forment surtout des placages minces de faible superficie, associés à des dépôts fluvio-glaciaires. Bien que nous ne disposions d'aucune observation sur le pergélisol présent dans ces sables, on peut déduire, compte tenu de leur porosité, qu'ils ne sont pratiquement jamais sursaturés en glace et qu'ils sont faiblement cimentés par le gel.

Souvent dénudés ou ne supportant qu'un couvert végétal très clairsemé, les sables éoliens subissent une pénétration rapide du dégel estival amenant la formation d'une couche active épaisse (>3 m). L'érosion éolienne et la mobilisation des sables sont des facteurs importants à considérer lors de travaux de génie. Il est primordial de maintenir intacte la surface naturelle pour éviter la déflation et le transport de sable durant les journées venteuses.

5.1.8.6 Les dépôts organiques

Les accumulations de tourbe au Québec nordique se sont produites au cours des cinq à six derniers millénaires sur des terrains plats et mal drainés. Les couvertures organiques de 30 à 40 cm d'épaisseur sont très abondantes dans la toundra. Quant aux tourbières, elles mesurent en général environ un mètre d'épaisseur quoique certaines d'entre elles puissent atteindre deux mètres.

Lorsqu'elle est imbibée d'eau, à l'automne et au début de l'hiver, la tourbe prend quelques semaines de plus à geler à cause de la chaleur latente associée à l'importante quantité d'eau qu'elle contient. Cependant, une fois gelée, sa conductivité thermique augmente considérablement et approche celle de la glace; le froid peut alors se propager rapidement en profondeur, particulièrement lorsque la couverture nivale est mince ou absente. L'été venu, la chaleur et l'ensoleillement prolongés, combinés au vent, ont pour effet de rendre à la tourbe ses propriétés isolantes en l'asséchant superficiellement. La progression du front de dégel est alors retardée et le sol sus-jacent demeure à des températures plus froides qu'à l'extérieur de la zone tourbeuse. Il s'ensuit que la couche active est plus mince dans ce type de matériaux, de l'ordre de 40 à 60 cm, que dans les sédiments graveleux et sableux.

Dans la zone de pergélisol discontinu, notamment sur les paises, la tourbe pergélisolée apparaît relativement pauvre en glace (Figure 5.23). Au contraire, dans la zone de pergélisol continu à Salluit, de très hautes teneurs en glace sont visibles (Figure 5.24). Cette différence est possiblement liée au mode de formation du pergélisol dans les dépôts organiques. Sur les paises de la zone discontinue, les tourbières se sont en effet formées avant l'apparition du pergélisol : elles ont donc gelé avec leur saturation originale, généralement dans une tourbe minérotrophe (pergélisol épigénétique).

Dans la zone de pergélisol continu, la mousse et les sphaignes (tourbe ombrotrophe) gorgées d'eau sur le pergélisol imperméable se sont accumulées au fil du temps favorisant la croissance de ce dernier (pergélisol syngénétique). De plus, dans cette zone, les tourbières gelées sont souvent affectées de réseaux de polygones de toundra sous lesquels il y a des coins de glace qui finissent par occuper un important volume de terrain. La tourbe gelée est généralement très difficile à excaver, son comportement et sa résistance s'apparentant à ceux de la glace. La dégradation de la glace lors du dégel du pergélisol rend le terrain impraticable. Tout ceci explique pourquoi, dans la mesure du possible, on devrait éviter les tourbières gelées lors des projets de construction.



FIGURE 5.23 : TOURBE MINÉROTROPHE (COMPOSÉE PRINCIPALEMENT DE RESTES DE CYPÉRACÉES) GELÉE, FORÉE SUR UNE PALSE PRÈS D'UMIUJAQ. PERGÉLISOL ÉPIGÉNÉTIQUE, FORMÉ APRÈS LE DÉPÔT DE LA TOURBE. DE FINES LENTILLES DE GLACE DE SÉGRÉGATION ONT PU SE FORMER DANS CETTE TOURBE TRÈS DÉCOMPOSÉE ET EN PARTIE MINÉRALISÉE.



FIGURE 5.24 : TOURBE OMBROTROPHE (COMPOSÉE DE MOUSSES ET DE SPHAIGNES) TRÈS RICHE EN GLACE. PERGÉLISOL SYNGÉNÉTIQUE, FORMÉ PENDANT L'ACCUMULATION DE LA TOURBE.

5.1.9 Principales formes de relief et sols structurés associés aux conditions de pergélisol

Plusieurs types de formes périglaciaires et différents types de sols structurés associés à la présence du pergélisol se retrouvent au Nunavik. Ces phénomènes, qui caractérisent la surface du terrain, peuvent servir d'indicateurs ou d'éléments symptomatiques de la composition texturale du sol, de même que du type et de la quantité de glace contenue dans le pergélisol sous-jacent. Ces formes sont observables sur le terrain de même que sur des photographies aériennes et des images satellitaires à haute résolution.

5.1.9.1 Les paises, plateaux palsiques, lithalses et plateaux de pergélisol

Ces formes se retrouvent seulement dans la zone discontinue où elles constituent souvent des îlots de pergélisol (Figures 5.25 à 5.28). Ce sont des buttes et de petits plateaux de quelques dizaines ou de quelques centaines de mètres carrés en superficie qui atteignent des hauteurs moyennes de deux à trois mètres et, parfois, des hauteurs maximales de six à sept mètres. Ces formes de relief se sont développées en raison de la croissance de lentilles de glace épaisses et nombreuses pendant l'aggradation du pergélisol dans les sols argileux durant les périodes froides de l'Holocène.

Cette aggradation de la glace de ségrégation dans le sol a provoqué le soulèvement de la surface du terrain. Il n'y a pas de pergélisol sous les taillis d'arbustes et sous les dépressions topographiques entre les buttes et les plateaux.



FIGURE 5.25 : PALSE, RÉGION D'UMIUAQ.



FIGURE 5.26 : LITHALSES ET MARES DE THERMOKARST DANS L'EST DE LA BAIE D'HUDSON.



FIGURE 5.27 : PLATEAUX PALSQUES DANS LA RÉGION DE LA RIVIÈRE BONIFACE.



FIGURE 5.28 : PLATEAUX DE PERGÉLISOL ET MARES DE THERMOKARST AUX ENVIRONS DE LA RIVIÈRE NASTAPOKA. NOTEZ LES NOMBREUX OSTIOLES À LA SURFACE DES PLATEAUX.

Les palses sont des buttes de formes diverses, souvent quasi circulaires ou allongées tandis que les plateaux palsiques sont plus vastes et ont un sommet relativement plat. Ces deux types de formes se caractérisent par la tourbe qui recouvre leur sommet et dans laquelle est confinée la couche active, peu épaisse dans ce matériau isolant (de l'ordre de 60 cm). L'épaisseur de la tourbe sur les palses et les plateaux palsiques atteint en moyenne 1,1 m, mais elle peut être moindre là où la tourbe a été érodée par le vent et la pluie.

Les lithalses sont des buttes dont les dimensions sont comparables à celles des palses. Comme ces dernières, elles se sont édifiées par l'aggradation de glace de ségrégation dans des sédiments silteux et argileux. À la différence des palses toutefois, elles ne portent pas de couverture de tourbe. Il en va de même pour les plateaux de pergélisol dont les formes sont comparables à celles des lithalses bien qu'ils occupent une plus grande superficie que ces dernières. La surface des lithalses et des plateaux de pergélisol est, la plupart du temps, ponctuée de multiples ostioles, des flaques de terre circulaires ou ovales disposées en champs (voir section 5.1.9.3).

Plusieurs relevés géophysiques (en résistivité électrique) et quelques forages dans les palses, lithalses, plateaux palsiques et plateaux de pergélisol ont montré que la hauteur de la butte ou du plateau représente généralement entre le quart et le tiers de l'épaisseur totale du pergélisol, laquelle fait donc entre 10 et 20 m en général. Au Québec, l'âge, la distribution géographique et la structure interne de ces formes à glace de ségrégation sont abondamment documentés (Allard et autres, 1987; Dever et autres, 1984; Dionne, 1984 et 1978; Lagarec, 1980; Séguin et Crépault, 1979; Payette et autres, 1976; Hamelin et Cailleux, 1969, ainsi que d'autres, plus récemment). De nombreux carottages ont mis en évidence la haute teneur en glace de ségrégation de ces buttes. Certaines couches contiennent jusqu'à 80 % de glace, même si une fois répartie sur l'ensemble de la butte, la glace compte en moyenne pour environ 30 % du volume global (Leroueil et autres, 1990; Séguin et Frydecki, 1990). Étant donné que ces buttes sont situées en zone de pergélisol discontinu, leur température interne, légèrement sous le point de congélation (entre 0 et -2 °C), rend ce type de pergélisol sensible au fluage lent.

À l'est de la baie d'Hudson, entre Umiujaq et Inukjuak, se situe l'une des plus grandes concentrations de palses et de lithalses au monde, dans les sédiments argileux déposés dans la mer postglaciaire de Tyrrell. On trouve aussi un bon nombre de palses et de lithalses dans la région de Kuujuaq et de Kangiqsualujuaq, au sud de la baie d'Ungava. (Allard et Séguin, 1987b; Séguin et Allard, 1984b; Lagarec, 1980; Payette et Séguin, 1979).

Plusieurs études récentes, basées sur la comparaison de photographies aériennes remontant aux années 1950 avec des images satellitaires et des observations de terrain, démontrent que ces formes connaissent actuellement une désintégration rapide qui peut être expliquée par le réchauffement climatique. Leur fusion donne généralement lieu à leur remplacement par de nombreux petits lacs, qu'on appelle lacs ou mares de thermokarst (Figure 5.26).

Le pergélisol des paises, lithales et formes apparentées est très riche en glace et extrêmement sensible aux perturbations. Il est préférable d'éviter toute construction sur ces formes. Au Québec, il n'existe pas encore de cas connu de perturbations anthropiques de telles buttes, car on n'en trouve guère en milieu construit, mais il est fort probable qu'une perturbation grave, causée par de la machinerie lourde par exemple, entraînerait un processus de dégradation irréversible.

5.1.9.2 Les polygones de toundra

Facilement visibles sur des photos aériennes, les polygones de toundra dessinent des figures géométriques ayant de quatre à sept côtés et dont le diamètre moyen peut varier entre 8-10 et 20-25 m. Le terrain peut apparaître relativement plat et être parcouru de sillons dans lesquels se trouvent des fissures (Figures 5.29 et 5.30). Les sillons sont disposés en réseaux polygonaux plus ou moins bien fermés ou organisés. Les polygones peuvent être « à centre concave » (*low center polygons*), c'est-à-dire que les côtés du polygone en bordure des sillons sont plus élevés que son centre déprimé et souvent humide. Dans certains cas, là où les coins de glace sous les sillons ont fondu, ceux-ci s'encaissent et se remplissent d'eau; le centre des polygones se trouve alors plus haut que les bords; ce sont des polygones à centre convexe (*high center polygons*).



FIGURE 5.29 : POLYGONES DE TOUNDRA SUR DES SOLS TOURBEUX À SALLUIT.



FIGURE 5.30 : SILLONS DE POLYGONES DANS UN SOL SABLEUX À AKULIVIK, EN BORDURE DE LA PISTE D'ATERRISSAGE.

Les sillons sont profonds de quelques décimètres (Figure 5.30); en dessous s'est formé un coin de glace au fil des ans. Les polygones à coins de glace sont très répandus dans l'extrême nord du Québec. On en trouve en abondance, entre autres, sur le territoire des communautés d'Akulivik, de Salluit, de Kangiqsujuaq, de Quaqtaq et d'Aupaluk.

Ils se forment aussi bien dans les sables et les graviers littoraux soulevés que sur les terrasses fluviales sableuses ou dans le till. Par exemple, on en trouve sur le sommet de nombreux drumlins dans les zones de toundra. Les champs de polygones affectent souvent les dépôts de tourbe recouvrant d'autres dépôts meubles. Quoique les coins de glace se concentrent dans la zone de pergélisol continu, ils sont présents ailleurs. On en trouve parfois dans des plateaux palsiques ou dans des paises (Lévesque, 1986; Payette et autres, 1986; Couillard et Payette, 1985; Dionne, 1983b) de la zone de pergélisol discontinu. Ces coins de glace peuvent cependant être des vestiges d'une période climatique plus froide qu'aujourd'hui.

À Salluit, certains coins mesurent jusqu'à deux mètres de largeur au plafond du pergélisol et atteignent quatre mètres de profondeur. À Akulivik et à Aupaluk, on a mesuré des coins de glace de 30 cm de largeur dans les sables et les graviers littoraux soulevés, situés à l'emplacement des pistes d'atterrissage.

Il existe deux principaux types de coins de glace. Les coins syngénétiques se forment simultanément à l'accumulation des sédiments qu'ils traversent; tandis que les coins épigénétiques sont postérieurs au dépôt (Mackay, 1990). Certains coins, hérités d'un climat plus froid, ne se fissurent plus sous les conditions climatiques actuelles; ils ne font que se conserver dans le pergélisol. Généralement, une façon très simple de savoir s'ils sont actifs consiste à vérifier s'il existe une fissure ouverte dans les sillons.

En hiver, une telle fissure se voit parfois sur la neige fraîche ou glacée déposée dans le sillon; en été, on peut souvent voir une mince fissure dans la mousse ou le lichen; il arrive que la fissure ne soit pas visible en surface; on peut alors en vérifier la présence en écartant la végétation avec les mains.

Au point de vue géotechnique, un réseau de coins de glace représente une importante quantité de glace disposée en réseau structuré dans le sol. Une perturbation qui ferait fondre cette glace est susceptible de créer un relief chaotique et de nombreux tassements différentiels. L'érosion thermique des coins de glace est particulièrement favorisée le long des excavations et des fossés qui, une fois creusés, drainent vers eux l'écoulement de surface qui emprunte le réseau de sillons du champ de polygones.

5.1.9.3 Les ostioles

Selon la classification des cryosols de Washburn (1979), les ostioles ou « *mudboils et frostboils* » (Shilts, 1978) font partie des cercles sans triage. Ils ont l'apparence de plaques de boue plus ou moins circulaires sur lesquelles il n'y a pas de couvert végétal. Leur diamètre est variable, mais il se situe généralement entre 0,5 et 2 m. Bien qu'il n'est pas rare de trouver des ostioles isolés, la plupart du temps ils sont regroupés en champs de façon assez dense. Ils parsèment notamment la surface des argiles marines affectées par le pergélisol et abondent sur les lithalses et les plateaux de pergélisol (Figure 5.31).



FIGURE 5.31 : OSTIOLES À CENTRE SOULEVÉ SUR DES ARGILES MARINES À SALLUIT.

Selon l'hypothèse la plus vraisemblable, leur formation serait due à la présence de sédiments fins sursaturés en eau et aux cycles gel-dégel qui provoqueraient le développement de cellules dans lesquelles se produiraient des mouvements convectifs. La durée d'un cycle complet (montée et redescende des sédiments dans la cellule) serait de plusieurs années (quelques décennies). La partie superficielle du sol est donc constamment transformée durant la période de dégel. L'activité des ostioles n'est cependant pas permanente. L'envahissement de la surface d'un ostiole par la végétation indique un ralentissement ou un arrêt des mouvements convectifs.

Compte tenu du fait que les ostioles se forment dans des sols contenant une proportion importante de sédiments fins, on les trouve seulement sur certaines catégories de dépôts meubles (dépôts glaciaires à matrice fine, dépôts marins, etc.). Les endroits propices à leur formation sont habituellement exposés aux vents, dépourvus d'arbres et d'arbustes et présentant une mince couverture nivale. Bien que les ostioles soient très répandus dans la zone de pergélisol, ce n'est pas le seul endroit où on en trouve. On en dénombre aussi dans les sites où le gel saisonnier est intense et où l'épaisseur des dépôts meubles sur le roc est inférieure à la profondeur du dégel annuel.

Au Québec nordique, les ostioles sont très abondants et les variétés morphologiques sont nombreuses. Les ostioles à centre soulevé (*raised-center mudboils*) et les ostioles à bourrelets (*low-center mudboils*) sont cependant les plus fréquents (Jetchick, 1988; Zoltai et Tarnocai, 1981). Les ostioles à centre soulevé se retrouvent de façon dominante sur les argiles marines; leur présence permet d'estimer la répartition des terrains très riches en glace de ségrégation.

Quant aux ostioles à bourrelets (Figure 5.32), on les observe avant tout sur les sols diamictiques comme les tills : là aussi, il s'agit de formes caractéristiques utiles pour la cartographie de ce genre de dépôts meubles. Il arrive souvent que des ostioles parsèment l'intérieur de polygones se trouvant sur des tills (Jetchick et Allard, 1990).



FIGURE 5.32 : OSTIOLES À BOURRELETS SUR UN TILL À AKULIVIK.

Des sédiments fins gorgés d'eau et des pentes faibles, combinés au dégel annuel, sont suffisants pour conduire à une gélifluxion des matériaux superficiels. Les ostioles migrent alors lentement vers le bas du versant et se déforment. Ils évoluent souvent en gradins étagés, parallèles aux courbes de niveau (Figure 5.33). Sur les pentes très faibles, ils s'étirent dans le sens de la pente, parfois sur des dizaines de mètres, et ressemblent à des traînées ou à des sols striés.



FIGURE 5.33 : OSTIOLES S'ÉTIRANT SUR UN VERSANT, DANS LE SENS DE LA PENTE.

De la présence des ostioles, on peut déduire la présence d'une importante fraction fine dans le sol, d'une nappe phréatique perchée à la base de la couche active en été et de grands volumes de glace dans le pergélisol. Il arrive parfois que l'on trouve des ostioles de texture fine qui « percent » à la surface d'un dépôt plus grossier (ex. : à travers un dépôt sableux en surface); la raison est alors que le dépôt grossier superficiel est mince et que le dégel de la couche active pénètre dans une couche de sédiments fins disposée stratigraphiquement en dessous, favorisant la remontée des fines à la surface par convection. Le sol fin en dessous est celui qui devrait être pris en considération pour concevoir les fondations de la construction.

5.1.9.4 Les coulées et les lobes de gélifluxion

La gélifluxion consiste en un écoulement, ou fluage, de la couche dégelée et saturée en eau à la surface du terrain sur le substrat gelé. Le sol mouillé doit avoir une certaine plasticité, laquelle lui est donnée par la présence d'une fraction fine dans la composition granulométrique. Ainsi, au Nunavik, la gélifluxion est observée le plus souvent sur les versants des moraines et les pentes couvertes de till, car ces dépôts contiennent généralement une fraction importante de silt et d'argile. La matière organique fournit elle aussi des particules fines (colloïdes) qui, mélangées au sol minéral, en augmentent la plasticité.

Au fil du temps, le fluage entraîne une certaine ségrégation des fines qui deviennent plus abondantes dans la partie frontale de la coulée. Il n'est pas rare, en creusant, de trouver dans les lobes de gélifluxion des sols anciens enfouis par le chevauchement des coulées et des nappes.

La gélifluxion constitue un des agents majeurs de mouvements, même faibles, sur les pentes. La présence d'une couche gelée en permanence (quasi imperméable) confine l'infiltration de l'eau de pluie et de fonte (neige et glace de sol) dans la couche active. Lors du dégel estival, les sédiments sursaturés perdent leur cohésion et le matériel se met à fluier. Les sols à matrice fine (silt et argile) dont la pente varie entre 5 et 20° sont les plus sensibles quoique l'on enregistre aussi des mouvements appréciables sur des pentes beaucoup plus faibles ($\approx 1^\circ$).

Sur les photographies aériennes et sur le terrain, les formes propres à la gélifluxion se distinguent facilement. De façon générale, on remarque un étirement et un alignement des sédiments ou des structures végétales basses parallèlement à la pente. Les formes les plus fréquentes sont les nappes ou les lobes de gélifluxion (Figures 5.34 à 5.36). Ils présentent une surface assez uniforme, d'inclinaison variable, et un front abrupt atteignant généralement entre 50 et 150 cm de hauteur.



FIGURE 5.34 : SOLS STRIÉS SUR UN VERSANT.



FIGURE 5.35 : LOBES (OU LANGUES) DE GÉLIFLUXION DANS LE TILL SUR DES VERSANTS DE VALLÉE À SALLUIT.



FIGURE 5.36 : HORIZONS ORGANIQUES DE SOL ENFOUIS DANS UN LOBE DE GÉLIFLUXION.

Au Nunavik, plusieurs de ces formes parallèles à la pente tirent selon toute apparence leur origine de la déformation de polygones ou d'ostioles qui s'étirent par écoulement sur un versant incliné. En effet, la transition d'un type de forme à un autre peut se voir sur le terrain. On distingue les sols striés, les ostioles étirés, les gradins, les lobes et les coulées (Figures 5.33 à 5.36).

Les dimensions sont variables, chaque bande de sol étirée peut faire jusqu'à environ un mètre de largeur et s'allonger sur plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres de longueur. Leur vitesse de déplacement vers le bas de la pente n'est pas uniforme; elle dépend de la granulométrie du matériel et de l'angle de la pente. Les sédiments fins semblent migrer plus rapidement que les sédiments grossiers. La vitesse de fluage est fonction des conditions particulières de chacun des sites; elle est de quelques centimètres par année et dépasse rarement 15 cm annuellement.

La présence de formes de gélifluxion est révélatrice d'un sol potentiellement riche en glace sous la surface. Comme elles apparaissent sur les versants, il y a eu peu (ou pas) de construction sur ces pentes jusqu'à maintenant. Mais, cela pourrait changer avec le développement de nouveaux secteurs et la construction de routes. Il est à prévoir que la gélifluxion pourrait créer des pressions sur les obstacles comme les remblais et les murs de soutènement. D'autre part, on peut penser qu'il est possible de l'arrêter en provoquant le dégel plus en profondeur de la couche active ou en faisant remonter le plafond du pergélisol dans un remblai construit par-dessus.

5.1.9.5 Les buttes gazonnées et les thufurs

Les buttes gazonnées ou *turf hummocks*, ou encore thufurs, de la terminologie islandaise, sont de petits monticules (de 0,2 à 0,5 m de hauteur et de 0,5 à 1 m de diamètre) constitués de sédiments fins recouverts d'une coiffe de tourbe et de plantes vivantes (Figure 5.37). Ce type de buttes est très fréquent dans les régions arctiques, subarctiques et alpines (Scotter et Zoltai, 1982). On les trouve habituellement sur des terrains humides et plats ou peu inclinés (1 à 10°). Elles sont formées par les cycles gel-dégel et par une accumulation différentielle du couvert végétal. Au Québec nordique, elles abondent sur les dépôts de tills mal drainés à pente faible, ainsi que sur d'autres sols diamictiques comme les anciens estrans soulevés par le relèvement isostatique. Les buttes gazonnées et les thufurs sont donc des indicateurs de la présence d'une nappe perchée dans la couche active en été.



FIGURE 5.37 : COUPE DANS UN THUFUR À KANGIQSUALUJUAQ.

5.1.10 Synthèse et conclusion des notions de base

Les formes et les cryosols liés au pergélisol sont présentés dans le tableau 5.4 où ils sont associés aux types de dépôts meubles avec lesquels on les trouve le plus souvent et, par association, à l'abondance probable de glace dans le pergélisol sous la surface.

L'étude de caractérisation du pergélisol pour un projet de construction devrait, en principe, débiter par une reconnaissance des formes périglaciaires et des cryosols conduisant à une cartographie des formations superficielles associées au contenu en glace. À tout le moins, les sols dans lesquels la glace est excédentaire devraient être recensés de façon préliminaire pour ensuite faire l'objet de forages afin d'augmenter la précision de la caractérisation. Le simple creusage d'une excavation dans la couche active, sans extraction d'échantillons dans le pergélisol sous-jacent, est dans la plupart des cas insuffisant pour déterminer la teneur et le type de glace contenue dans le pergélisol.

La détermination du régime thermique demande des mesures et des enregistrements de données avec des thermistances avant de pouvoir calculer des moyennes et des indices et assurer des suivis dans le temps. Toutefois, des données locales sont maintenant disponibles grâce au réseau de stations climatiques et de câbles à thermistances récemment installé par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET), le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT) et le Centre d'études nordiques.

FORME ET CRYOSOL	NATURE DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES DE SURFACE	TEXTURE	RÉGION DE PERGÉLISOL	TYPE DE GLACE DE SOL	PRÉSENCE PROBABLE DE GLACE EN EXCÈS
Buttes cryogéniques	Silts et argiles marins Sables (buttes plus basses)	Silts argileux Sables fins et moyens	Discontinu et répandu Discontinu et dispersé	Ségrégation	Oui
Paises	Tourbe Tourbe/silts et argiles Tourbe/sable ou till (rare)	Tourbe fibreuse ou humique sur sols généralement fins	Discontinu et répandu Discontinu et dispersé	Ségrégation	Oui, dans les sédiments minéraux sous la tourbe
Mares de thermokarst (accompagnent les paises et les buttes cryogéniques)	Toutes les formations; surtout fines et tourbeuses	Tourbe Silts argileux Sables	Discontinu et répandu Discontinu et dispersé Sporadique	Sans objet	Sans objet
Polygones à coins de glace	Tills Sables de terrasses fluviales Sables littoraux soulevés Tourbières à carex	Tourbe Sables fins à grossiers	Continu	Glace de coins Glace interstitielle dans les polygones	Oui, dans le réseau de coins
Polygones à coins de sol	Tills (sur crêtes et drumlins) Dépôts fluvio-glaciaires (plaines d'épandages et deltas)	Dépôts sablo-graveleux hétérométriques et grossiers	Continu Discontinu et répandu	Glace interstitielle	Non
Ostioles à bourrelets	Tills Diamictons (estrans soulevés) Souvent associés aux polygones à coins de sol et aux lobes de gélifluxion	Dépôts sablo-graveleux hétérométriques avec une fraction de sables très fins ou de silts	Continu Discontinu et répandu	Glace interstitielle Un peu de glace de ségrégation	Non
Ostioles à centre soulevé	Dépôts marins et lacustres (abondent sur les buttes cryogéniques)	Sables fins et silts argileux	Continu Discontinu et répandu Discontinu et dispersé	Ségrégation	Oui
Sols striés	Tills Dépôts de versants	Dépôts blocailleux avec matrice fine	Continu	Interstitielle	Non
Lobes et nappes de gélifluxion	Tills Sables marins Dépôts de versants	Dépôts hétérométriques avec matrice sableuse et/ou silteuse	Continu Discontinu et répandu Discontinu et dispersé Sporadique	Interstitielle	Non
Thufurs	Tills et diamictons sur terrains bas mal drainés	Dépôts hétérométriques avec matrice sableuse et/ou silteuse	Continu Discontinu et répandu	Interstitielle	Non
Buttes saisonnières à noyaux de glace et glaçages	Tous les types de dépôts	Toutes granulométries et tous sols organiques. Près des ruisseaux et à l'emplacement de sources	Continu Discontinu et répandu	Intrusive (gonflement important et rapide en hiver, affaissement en été)	Oui
Blocs ou monticules d'éjection	Roc (favorablement fissuré)		Continu Discontinu et répandu Discontinu et dispersé	Intrusive? Ségrégation?	?

TABLEAU 5.4 SYNTHÈSE : LIENS ENTRE LES DÉPÔTS MEUBLES, LES FORMES PÉRIGLACIAIRES ET LE CONTENU EN GLACE DANS LE PERGÉLISOL.

5.2 LES PERTURBATIONS DU PERGÉLISOL : CAUSES, MÉCANISMES, APPROCHE PRÉVENTIVE EN CONSTRUCTION

5.2.1 Introduction

Les causes d'instabilité géomorphologique, de perturbations topographiques et de dégradation du pergélisol qui ont un impact sur le terrain naturel ou sur l'intégrité des constructions humaines prennent racine dans un principe très simple. Comme le chapitre précédent le démontre, dans l'environnement naturel, le pergélisol est avant tout un phénomène climatique et sa stabilité dépend de son régime thermique. Étant en permanence en dessous de 0 °C, l'eau qu'il contient est gelée. Seule la couche active dégèle en été et regèle en hiver. Le mélange sol-glace que constitue le pergélisol est en principe un substrat très solide, capable de supporter de très fortes charges.

Tout changement survenant à la surface ou près de la surface du terrain est susceptible de changer le régime thermique au plafond du pergélisol (c.-à-d. au contact entre la couche active et le pergélisol). Par exemple, une augmentation de la température moyenne annuelle en surface, qu'elle soit concentrée sur une saison ou répartie sur toute l'année, provoquera un épaississement de la couche active aux dépens du dégel du pergélisol juste en dessous, donc de la fonte de la glace qu'il contient. Si une telle augmentation amène la température de la surface au-dessus de 0 °C de façon permanente, le pergélisol va nécessairement se dégrader, allant possiblement jusqu'à disparaître.

La transformation de la glace en eau lors de la fonte provoque le tassement de la surface du sol. Ce tassement variera en fonction de la teneur en glace et aussi du mode et de la vitesse de drainage de l'eau de fonte. Si le drainage est mauvais, ce qui est très souvent le cas, car le sous-sol encore gelé reste imperméable, la haute teneur en eau du sol, dépassant parfois la porosité naturelle, lui enlève sa capacité de support. Elle le rend boueux ou encore en augmente la pression interstitielle au point de dépasser sa résistance au cisaillement, allant parfois jusqu'à provoquer des glissements de terrain sur les pentes.

En somme, la dégradation du pergélisol débute toujours par une cause thermique. Les causes de perturbation thermique de la surface peuvent être d'origine :

- climatique;
- géomorphologique et écologique;
- anthropique indirecte;
- anthropique directe.

Les perturbations résultantes prendront des formes et se produiront différemment selon la nature des dépôts de surface qui dégèlent et la pente du terrain.

Enfin, il faut considérer que dans les milieux où se trouve du pergélisol, il existe des processus perturbateurs particulièrement dynamiques impliquant la circulation d'eau, qui est à la fois un véhicule de chaleur et un agent d'érosion. L'eau qui coule librement au contact du pergélisol lui transmet de la chaleur; dans une telle situation, le processus de fonte localisée (thermo-érosion) peut être très rapide.

D'autre part, l'eau qui suinte à la surface du sol, par exemple de la couche active non encore gelée au début de l'hiver ou depuis une poche de sol non gelé (appelée talik), gèle très rapidement au grand froid et provoque la formation de couches de glace pouvant être accompagnée de pressions importantes.

La prévention de la déstabilisation thermique du pergélisol dans le domaine de la construction repose en grande partie sur l'utilisation de concepts appropriés de remblais pour les infrastructures de transport et de fondations pour les bâtiments. Mais, compte tenu du fait que l'environnement nordique est un milieu très dynamique, les risques associés à l'apparition de processus actifs sur le terrain sont aussi à prendre en considération dans l'aménagement du territoire.

Les diverses perturbations du pergélisol sont donc passées en revue ici en fonction de leurs causes climatiques, écologiques et anthropiques. Les processus dynamiques associés à l'écoulement de l'eau dans le sol et en surface sont abordés. Finalement, les causes anthropiques liées à la construction d'infrastructures et de bâtiments sont commentées.

5.2.2 Les perturbations d'origine climatique

Quand le climat change, le régime thermique du pergélisol s'ajuste aux nouvelles conditions. L'épaisseur de la couche active diminue pendant les périodes de refroidissement et, inversement, augmente pendant les périodes de réchauffement. Le profil de température s'ajuste en conséquence. Avant le début du 20^e siècle, les changements climatiques étaient attribuables à des causes naturelles (ex. : variations dans l'activité solaire ou dans la circulation des courants océaniques). Entre la fin de la déglaciation au nord du Québec (environ 8000-7000 ans) et environ 3000 ans avant aujourd'hui, les indices paléoclimatiques obtenus des carottes de sédiments de lacs et des analyses stratigraphiques et polliniques dans les tourbières indiquent un climat relativement chaud. Par après, le climat a fluctué, tout en se refroidissant à long terme jusqu'à la période froide la plus récente, appelée le « Petit Âge glaciaire ». Cette période, qui fut probablement la plus froide des derniers millénaires, s'est étendue de façon générale du milieu du 14^e siècle jusqu'à la fin du 19^e siècle.

Durant cette période, les températures du pergélisol se sont refroidies, comme les géophysiciens peuvent le documenter par l'analyse numérique des profils thermiques profonds dans le roc (Chouinard et autres, 2007). C'est aussi durant cette période qu'un grand nombre de palses (voir section 5.1) se sont formées.

Au début du 20^e siècle, le climat a commencé à se réchauffer globalement, toujours avec des variations. Il est possible que ce réchauffement ait été en grande partie causé par l'activité industrielle planétaire, en raison notamment de l'usage croissant des hydrocarbures responsables de l'augmentation des gaz à effet de serre.

Les données climatiques des stations d'Environnement Canada au nord du Québec montrent que les températures se sont lentement abaissées depuis la fin des années 1940, avec, toutefois, des variations interannuelles jusqu'en 1992. Depuis cette date, le climat a totalement changé de régime alors que le territoire connaît un réchauffement sans précédent (Figure 5.38). Les figures 5.39 et 5.40 montrent l'épaississement de la couche active survenu au cours des années 2000 dans différents types de sols dans quelques communautés du Nunavik.

Le tableau 5.5 résume les changements connus du climat ayant eu des effets documentés sur le pergélisol depuis environ 3500 ans.

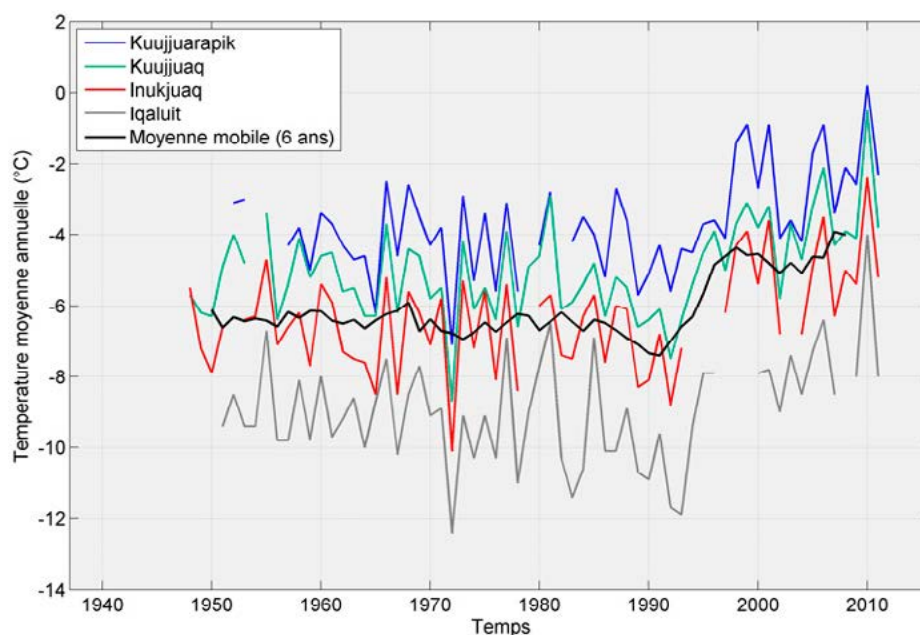


FIGURE 5.38 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU NUNAVIK ET À IQALUIT AU NUNAVUT ENTRE 1948 ET 2011 (SOURCE : ENVIRONNEMENT CANADA).

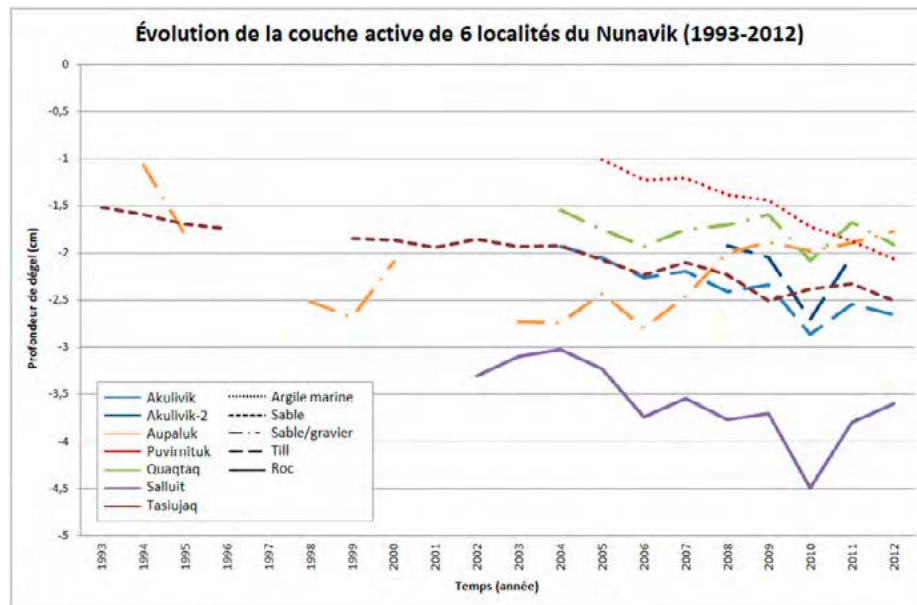


FIGURE 5.39 : ÉPAISSISSEMENT DE LA COUCHE ACTIVE SURVENU AU COURS DES ANNÉES 2000 DANS DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS DANS QUELQUES COMMUNAUTÉS DU NUNAVIK.

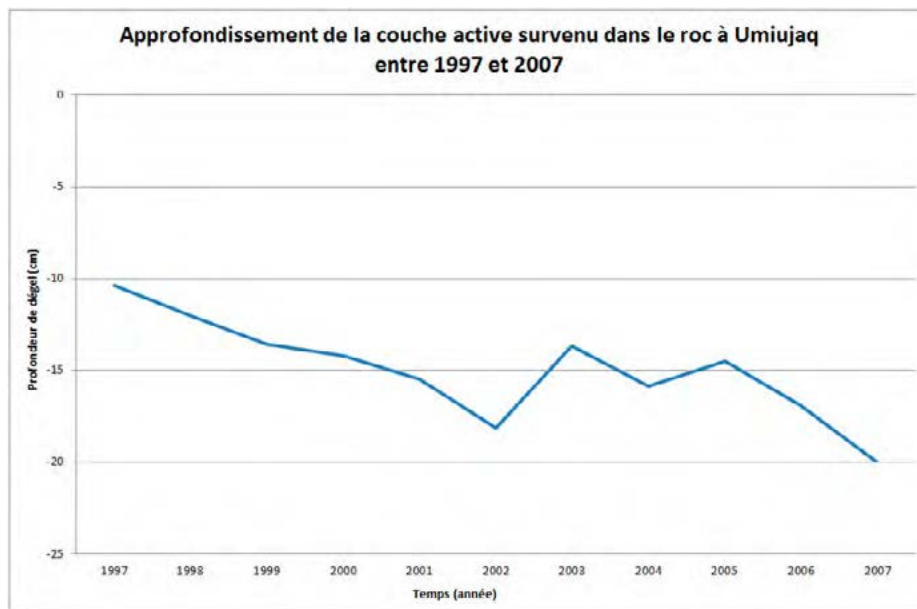


FIGURE 5.40 : ÉPAISSISSEMENT DE LA COUCHE ACTIVE SURVENU DANS LE ROC À UMIUJAQ ENTRE 1997 ET 2007.

PÉRIODE	CLIMAT	VÉGÉTATION	ACTIVITÉ DES COINS DE GLACE
1950 à 1992	Refroidissement	Cypéracée et mousse	Réactivation progressive des coins de glace
1900 à 1950	Chaud	Cypéracée et mousse	Cessation de l'activité
1500 à 1900	Froid	Mousse Activité éolienne Processus de pente	Activité intense
1030 à 1500	Refroidissement	Herbacé Activité éolienne Processus de pente	Augmentation générale de l'activité
140 à 1030	Généralement chaud et humide	Sphaigne	Diminution générale de l'activité Altération de l'activation et de la désactivation
-1400 à 140	Généralement froid et sec	Cypéracée Activité éolienne	Généralement actif Formation de polygones à bourrelets

TABEAU 5.5 : PÉRIODES CLIMATIQUES GÉNÉRALES DÉCELÉES AU MOYEN DE L'ACTIVITÉ DES COINS DE GLACE ET DES INTERPRÉTATIONS PALÉOÉCOLOGIQUES. L'ÉCHELLE DE TEMPS N'EST PAS LINÉAIRE (MODIFIÉ DE KASPER ET ALLARD, 2001).

Quelles perturbations pouvons-nous associer au réchauffement climatique récent sur le pergélisol au Nunavik? La cartographie comparative (avec des photographies aériennes anciennes et récentes) des pases, des lithalises et des lacs de thermokarst entre Kuujuarapik et Inukjuak révèle une disparition progressive du pergélisol dans la zone discontinue depuis la fin des années 1950, avec une vitesse de dégradation croissante depuis vingt ans.

Par ailleurs, des glissements de terrain, survenus ici et là dans la couche active, sont attribuables en partie au réchauffement. Ainsi, L'Hérault (2009) a montré que les glissements de type décrochement de couche active ont tendance à survenir à la fin des étés des années plus chaudes que la moyenne lorsque la couche active dégèle plus profondément que les années précédentes. Le dégel atteint alors les couches de glace de ségrégation particulièrement épaisses au plafond du pergélisol, ce qui a pour effet d'augmenter la pression interstitielle juste au front de dégel qui constitue alors un plan de glissement idéal (Lewkowicz et Harris, 2005).

Mais d'autres facteurs causaux peuvent entrer en jeu comme une teneur en eau accrue par l'accumulation de neige en bordure des routes. À tout le moins, le risque de glissement augmente avec l'accroissement de la couche active et il est plus prononcé lors des années plus chaudes.

La figure 5.41 montre les augmentations attendues de température au Québec nordique selon les sorties de modèles climatiques produites par le consortium Ouranos.

Ces augmentations vont se manifester par une diminution des indices de gel et un accroissement des indices de dégel. Dans le milieu naturel, la disparition progressive du pergélisol va se poursuivre dans la zone discontinue.

Dans la zone continue, l'épaisseur de la couche active va continuer d'augmenter, engendrant des tassements de la surface du terrain et les températures dans le pergélisol lui-même vont augmenter, se rapprochant ainsi du point de fusion.

Dans le milieu bâti, l'épaississement de la couche active va provoquer des tassements auxquels les bâtiments devront être préparés. Sinon, ils devront pouvoir être déménagés. Les risques de glissement de terrain dans les sols riches en glace comme les argiles marines vont augmenter même sur des pentes très faibles.

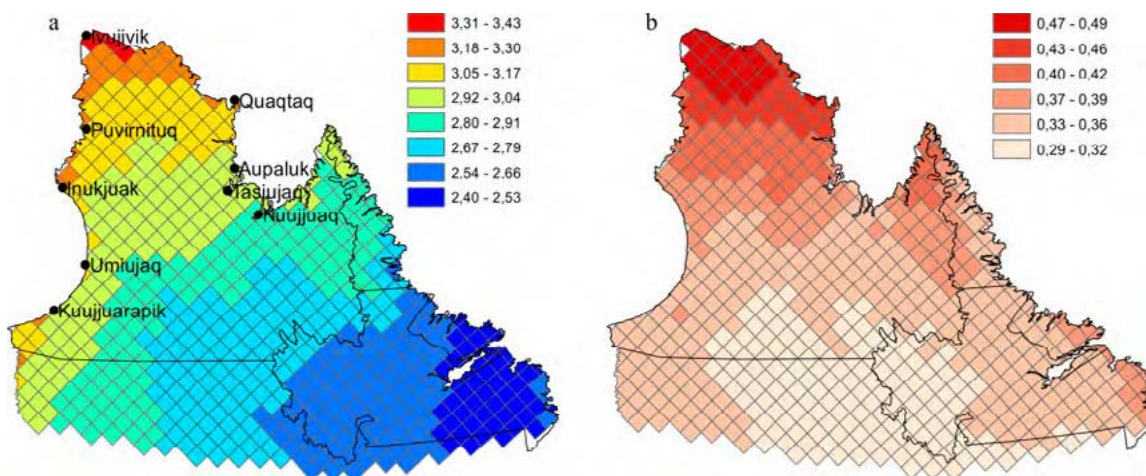


FIGURE 5.41 : A) CHANGEMENTS PROJÉTÉS DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE DE L'AIR (°C) À L'HORIZON 2050 À PARTIR DE SIX SORTIES DU MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DU CLIMAT (MRCC) ET B) LEURS ÉCARTS-TYPES (TIRÉ DE BROWN, R. ET AUTRES, 2012).

5.2.3 Les perturbations d'origine géomorphologique et écologique

Entrent dans cette catégorie les processus naturels qui se produisent sans nécessairement qu'un changement du climat soit en cause et sans qu'ils résultent de l'impact d'une activité humaine. Cependant, un événement météorologique comme une fonte nivale rapide, des pluies abondantes ou une vague de chaleur peut les déclencher. Il s'agit de processus qui peuvent être spontanés et très rapides, c'est-à-dire catastrophiques, ou de processus plus lents, auxquels participent notamment des changements dans la végétation. Notons principalement les types de perturbation suivants :

- les processus rapides :
 1. les glissements de terrain de type « décrochement de couche active »
 2. la thermo-érosion
 3. la formation et l'effondrement des glaçages (icings) et des buttes saisonnières à noyau de glace
 4. les avalanches humides
- les processus lents :
 5. la gélifluxion
 6. l'enneigement différentiel et l'arbustification
 7. la formation des mares de thermokarst

Les glissements de terrain de type « décrochement de couche active » (Figures 5.42 et 5.43) surviennent lorsque le front de dégel progresse rapidement dans la couche active et que celle-ci contient beaucoup de glace. Mais plus spécifiquement, ils ont tendance à survenir vers la fin d'un été particulièrement chaud alors que le dégel pénètre plus profondément que les années précédentes, faisant ainsi fondre des lentilles de glace antérieurement formées au plafond du pergélisol. Le mouvement est habituellement rapide, soit quelques minutes. Ce type de glissement part le plus souvent du haut du versant et fragmente (*bulldoze*) la couche active en glissant vers le bas de la pente sur le front de pergélisol très riche en glace. Le glissement peut se poursuivre encore un peu à la suite de l'affaissement des parois du cratère. Ces glissements surviennent sur des sols très riches en glace, par exemple les argiles marines ou les tills. Les facteurs combinés de déclenchement sont :

- L'abondance de glace à la base de la couche active ou dans la partie supérieure du pergélisol.
- L'angle de pente. Le risque augmente avec la pente, quoique ce genre de glissement puisse survenir sur des pentes aussi faibles que 2 à 4°.
- Une température du sol localement supérieure à celle des alentours, par exemple en raison de la présence d'une accumulation de neige plus importante.
- Une teneur en eau élevée de la couche active à la suite d'une concentration du ruissellement de surface.
- Un dégel rapide durant un été chaud en plus d'une vague de chaleur survenant à la fin de la saison.

En fait, les conditions de terrain sont déjà présentes dans le milieu. Le risque de déclenchement croît avec des températures estivales soutenues et plus élevées. En 1998, trois glissements de ce type sont survenus dans la vallée de Salluit, dont un qui s'est produit en bordure d'un quartier domiciliaire en construction (Figures 5.42 et 5.43).



FIGURE 5.42 : UN GLISSEMENT DE TYPE DÉCROCHEMENT DE LA COUCHE ACTIVE, SURVENU À SALLUIT EN 1998, A CONDUIT À L'ABANDON DU DÉVELOPPEMENT DU NOUVEAU QUARTIER RÉSIDENTIEL ET AU DÉPLACEMENT D'UNE VINGTAINE DE MAISONS FRAÎCHEMENT INSTALLÉES.



FIGURE 5.43 : GLISSEMENT DE TYPE DÉCROCHEMENT DE LA COUCHE ACTIVE SURVENU À SALLUIT LE 22 AOÛT 2010. ON VOIT LA NICHE DE DÉCROCHEMENT DANS LA COUCHE ACTIVE ET LE PERGÉLISOL RICHE EN GLACE NOUVELLEMENT EXPOSÉ. LE COUVERT VÉGÉTAL ET LA COUCHE ACTIVE ONT GLISSÉ VERS LE BAS DU VERSANT. À DROITE, LA LIGNE POINTILLÉE INDIQUE UNE NICHE DE DÉCROCHEMENT SIMILAIRE SURVENU EN 2005.

La thermo-érosion est un processus destructif qui peut être très rapide. Il s'agit du creusement de ravins ou de tunnels ou de l'érosion de berges provoqués par l'écoulement de l'eau libre directement sur le pergélisol exposé. L'exposition du pergélisol peut résulter d'une cause quelconque comme un glissement de terrain, le surcreusement d'un ruisseau lors d'une pluie abondante, une infiltration massive d'eau dans la fente de gel ouverte d'un coin de glace, la vidange soudaine d'un lac par un chenal d'érosion ou l'érosion du pergélisol le long de la berge d'une rivière. Parfois, lorsqu'elle affecte des coins de glace, la thermo-érosion crée des tunnels sous la surface du terrain.

Le processus survient donc de façon naturelle, là où le pergélisol est riche en glace et où existent des réseaux de polygones de toundra. Les périodes de l'année présentant le plus de risque sont lors de la fonte printanière, alors que d'importantes quantités d'eau coulent sur la surface de la toundra encore gelée, ainsi que durant les épisodes de pluie intense en été. Avec le changement climatique, de tels épisodes sont appelés à devenir plus fréquents.

Les glaçages ou dômes de glaçages (*naled*, *icings*, *aufeis*) sont des nappes de glace qui se forment soit en surface du sol, soit dans le lit d'un cours d'eau ou d'un lac. Ils sont le produit d'écoulements d'eau qui gèle à mesure qu'elle s'épanche à l'air libre en hiver. L'écoulement souterrain peut se faire dans la couche active ou encore à travers les taliks (zone non gelée) dans la zone de pergélisol discontinu. Les glaçages peuvent atteindre quelques mètres d'épaisseur et s'étendre sur plusieurs centaines de mètres carrés. Ces nappes de glace fondent tardivement en été. Elles forment des dômes lorsque la pression d'eau continue de s'accumuler sous une première carapace de glace déjà formée. Ces dômes se fissurent en raison des pressions et de nouvelles nappes d'eau s'épanchent en surface, contribuant à étendre et à épaissir le glaçage. Le processus survient souvent dans le lit de rivières qui conservent un léger débit sous leur lit en hiver.

Les buttes saisonnières à noyau de glace (*frost blisters*, *hydrolaccolithes*) se forment de manière très similaire, à la différence que l'eau qui circule dans le sol, généralement dans la couche active, se concentre dans un endroit précis et forme une lentille emprisonnée l'hiver sous la surface du sol gelé, coincée entre la surface de la couche active en train de regeler et le pergélisol. Ce sol gelé bombe et se fissure sous la pression hydraulique. Lorsque la lentille d'eau gèle, elle devient le cœur glacé de la butte. Ces apports d'eau qui se poursuivent durant une partie de l'hiver permettent la formation de couches de glace massive ou de méga-lentilles de glace pure (> 1 m). Cette glace intrusive se distingue par sa structure cristalline en prismes verticaux. Étant donné qu'elle se forme sous la surface, la glace est recouverte d'une couche minérale ou organique. Cette couche est fréquemment déchirée et la glace est directement visible au printemps dans les fissures et les nombreux petits effondrements de terrain. Normalement, toute cette glace fond au cours de la période estivale, mais il arrive parfois qu'elle subsiste plus d'une année. La formation rapide, en un seul hiver, des buttes saisonnières à noyau de glace, et les pressions hydrostatiques et cryostatiques qu'elles génèrent en croissant soulèvent d'épaisses couches de sol, lesquelles se brisent et se disloquent lors du dégel.

Les glaçages et les buttes saisonnières à noyau de glace se reforment à peu près au même endroit chaque année, dans des pieds de versant, des mouilles de cours d'eau et à l'emplacement de sources et de suintements en été.

Les avalanches ne sont pas des phénomènes associés au pergélisol. On en distingue sommairement deux types. Les avalanches de neige et les avalanches humides, qu'on pourrait aussi appeler avalanches de bouillie neigeuse (*slush*). Les pentes où des avalanches de neige pourraient se produire ont déjà été répertoriées sur le territoire des communautés inuites du Nunavik à la suite de l'avalanche mortelle qui s'est produite à Kangiqsualujuaq le 31 décembre 1998. C'est ainsi que le pied des versants de la vallée de Salluit a été zoné « à risque d'avalanche ».

Les avalanches de bouillie neigeuse surviennent généralement dans des ravins ou des corridors torrentiels qui dévalent des versants montagneux. Elles se produisent généralement lors d'une fonte printanière rapide et de pluies abondantes qui augmentent fortement la teneur en eau d'épaisses congères. Les congères peuvent parfois retenir en amont une eau de fonte abondante avant de céder de façon catastrophique. La coulée rapide qui en résulte se compose d'un mélange d'eau, de neige, de boue et de blocs rocheux ayant un fort pouvoir érosif. Une telle avalanche a emporté une portion de route à Baie Déception le 15 mai 2005 (Figure 5.44).



FIGURE 5.44 : AVALANCHE DE BOUILLIE NEIGEUSE AYANT EMPORTÉ UNE PORTION DE ROUTE À BAIE DÉCEPTION LE 15 MAI 2005.

En somme, une analyse géomorphologique du risque d'avalanche, poudreuse ou humide, doit être faite lors de la construction d'infrastructures ou de résidences dans les vallées et les régions à relief escarpé du Nunavik.

La gélifluxion consiste en une descente lente de la surface du sol sur les versants des milieux où le gel est actif. Il s'agit en fait du fluage, en été, de la partie superficielle dégélée du sol sur le sol encore gelé. La présence de gel sous la surface, qu'il s'agisse de la couche active non entièrement dégélée ou du pergélisol, empêche la percolation en profondeur de l'eau des précipitations et favorise la saturation en eau de la couche dégélée au point de la rendre plastique ou semi-fluide. Ainsi, lors du dégel estival, les sédiments sursaturés se mettent à fluer sur les pentes. Les sols à matrice fine (silt et argile) dont la pente varie entre 5 et 20° sont les plus sensibles, quoique l'on enregistre aussi des mouvements appréciables sur des pentes beaucoup plus faibles ($\approx 1^\circ$). La matière organique des horizons de surface du sol fournit aussi des colloïdes (particules fines organiques) qui favorisent la rétention d'eau et rendent le sol plastique. La vitesse de fluage sur les versants est fonction des conditions particulières à chacun des sites (pente, texture, vitesse de pénétration du front de dégel, variations de la teneur en eau du sol le long de la pente, etc.), mais habituellement elle est de l'ordre de trois à quatre centimètres par année et dépasse rarement les 15 cm. De façon générale, on remarque un étirement et un alignement des sols structurés comme les ostioles et du couvert végétal parallèlement à la pente en raison de leur étirement par gélifluxion.

Les formes les plus fréquentes sont les nappes ou les lobes de gélifluxion (voir figure 5.35, section 5.1.9.4). Ils présentent une surface assez uniforme, d'inclinaison variable, et un front abrupt atteignant généralement entre 50 et 150 cm de hauteur. Une coupe transversale dans le front d'une nappe met souvent à jour plusieurs paléosols superposés (voir figure 5.36, section 5.1.9.4). La présence de ces formes est donc le signe d'une instabilité lente, mais persistante du versant. À notre connaissance, il n'y a pas d'étude faisant état du risque pour les infrastructures ou des forces que la gélifluxion pourrait opposer à des bâtiments ou à des infrastructures.

L'enneigement différentiel et l'arbustification qui lui est associée constituent un processus écologique étroitement lié à la morphologie du terrain et aux tassements causés par la fonte de la glace du pergélisol. La neige joue en effet un rôle majeur dans l'évolution des milieux périglaciaires. Sous l'effet du vent, elle est redistribuée très inégalement à la surface du territoire. Les espaces plats ou à topographie convexe et sans structure végétale arbustive ou arborescente demeurent presque totalement dépourvus de neige parce qu'ils sont balayés par le vent qui érode et redistribue la neige au sol. Par contre, les sites abrités de la déflation (dépressions, versants, boisés) peuvent souvent recueillir plusieurs décimètres ou plusieurs mètres de neige. Or, ce couvert nival joue un rôle majeur dans le bilan thermique de la surface du sol (voir la section précédente). Par exemple, pratiquement partout au Nunavik, une accumulation de neige supérieure à un mètre, surtout si elle survient en début de saison, isole la surface du sol en hiver au point de rendre le bilan thermique annuel égal ou supérieur à 0 °C, entraînant la fonte de la glace dans le pergélisol. Sur les sols dont le contenu en glace est excédentaire, l'épaississement de la couche active, découlant du réchauffement causé par l'enneigement, provoque un tassement, donc la formation d'un terrain déprimé dans lequel une plus grande quantité de neige s'accumulera durant les hivers suivants, engendrant une boucle de rétroaction qui accélérera le processus.

L'impact du réchauffement climatique sur la végétation est un facteur accélérant supplémentaire. En effet, le couvert de neige plus épais dans la dépression protège les bourgeons des arbustes (saules, bouleaux glanduleux, aulnes, épinettes) du gel et de la dessiccation causée par le froid en hiver, tandis que les étés plus longs et plus chauds favorisent la croissance végétale. La végétation augmente en densité et croît en hauteur. Or, ces bosquets ralentissent la vitesse du vent et retiennent davantage de neige en hiver. Actuellement, l'enneigement différentiel et l'augmentation de la végétation arbustive ou même arborée contribuent de façon très importante à la dégradation du pergélisol dans la zone discontinue (Figure 5.45).

Une fois que le pergélisol a commencé à se dégrader ainsi, le drainage du terrain devient mauvais et le sol se sature d'eau. Cette eau, qui se trouve dans la couche active (laquelle s'épaissit entretemps), prend beaucoup plus de temps à regeler l'hiver à cause de son importante chaleur latente de fusion (voir section 5.1.4). Ce retard empêche le refroidissement du profil thermique dans le pergélisol qui se réchauffe alors en quelques années et s'approche du point de fusion.

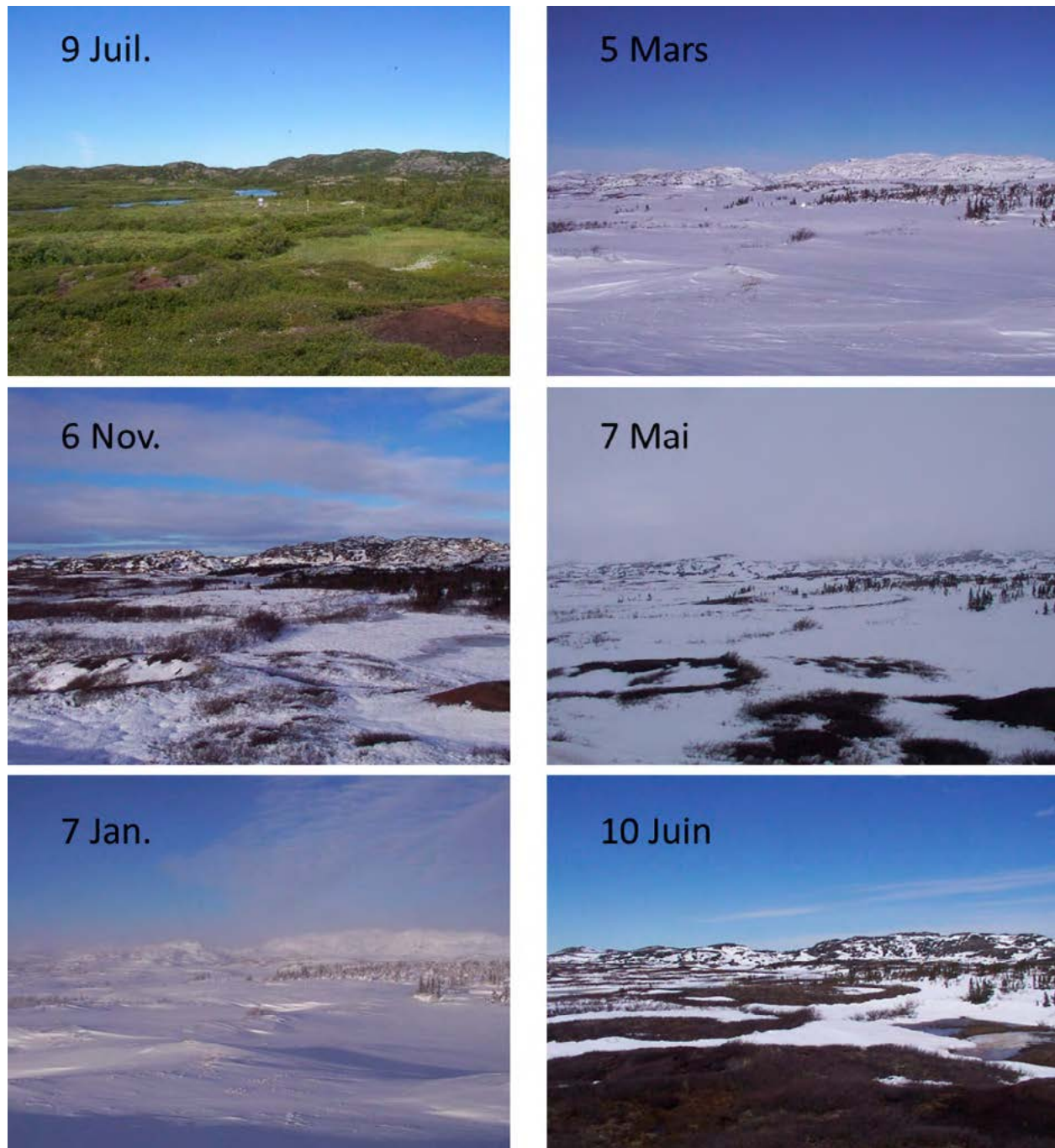


FIGURE 5.45 : SÉQUENCE DE SIX PHOTOS MONTRANT L'ENNEIGEMENT DIFFÉRENTIEL DANS UNE ZONE DE PERGÉLISOL DISCONTINU DE JUILLET 2003 À JUIN 2004. LE 9 JUILLET, UNE LITHALSE (PORTANT UNE STATION MÉTÉO) EST ENTOURÉE D'ARBUSTES ET DE TERRAIN HUMIDES SANS PERGÉLISOL. LE 6 NOVEMBRE, LES PREMIÈRES NEIGES RECOUVRENT LE PAYSAGE. DURANT L'HIVER, LES VENTS REDISTRIBUENT LA NEIGE (VISIBLE PAR LES CONGÈRES EN QUEUE DE COMÈTE) ET LES DÉPRESSIONS HUMIDES SONT REMPLIES DE NEIGE. LE 10 JUIN, LES SOMMETS DE LITHALSES SONT DÉGAGÉS PAR LA FONTE, MAIS LES CONGÈRES ÉPAISSSES FONDENT TARDIVEMENT DANS LES DÉPRESSIONS SANS PERGÉLISOL.

La formation des mares de thermokarst est la conséquence de l'enneigement différentiel dans la séquence de dégradation du pergélisol. Lorsque les dépressions provoquées par les tassements deviennent suffisamment profondes sur le terrain, elles se drainent de moins en moins bien et finissent par retenir de l'eau stagnante. En hiver, cette eau ralentit le regel du sol. En été, elle absorbe le rayonnement solaire au point, parfois, de devenir beaucoup plus chaude que l'atmosphère. Cette chaleur est transmise au pergélisol. En conséquence, celui-ci se dégrade, le tassement se poursuit, la mare s'approfondit et s'agrandit. Lorsqu'elle devient suffisamment profonde (ex. : plus de $\approx 1,5$ m), le fond ne gèle plus en hiver et la température de celui-ci devient alors bien supérieure à 0°C à longueur d'année. Un talik se développe en profondeur. Avec l'approfondissement de la mare de thermokarst, ses versants tout autour deviennent plus raides et sujets à des décrochements de couche active et de petits glissements de terrain. Continuant son agrandissement, la mare devient un petit lac dont les rives commencent à subir l'effet érosif des vagues. C'est suivant cette chaîne de processus géomorphologiques et thermiques qu'environ 50 % du pergélisol existant en 1950 dans la zone discontinue à l'est de la baie d'Hudson a maintenant disparu, remplacé par des centaines de mares et de lacs de thermokarst (voir figure 5.28, section 5.1.9.1).

5.2.4 Les perturbations d'origine anthropique indirecte

L'impact des interventions et de la construction d'infrastructures sur le territoire suit les mêmes principes relatifs au régime thermique et à la dégradation du pergélisol, que le milieu naturel. Le pergélisol est affecté par la construction et la présence d'infrastructures lorsque celles-ci créent :

- des conditions favorables aux glissements de terrain ou augmentent le risque de déclenchement;
- de nouvelles conditions favorables à la thermo-érosion;
- des conditions favorables à l'épanchement d'eau souterraine en surface ou favorisent le débordement de cours d'eau, même très petits;
- des conditions propices à l'enneigement différentiel et à l'arbustification pouvant ultimement conduire au thermokarst.

Par ailleurs, les aménagistes et les constructeurs doivent tenir compte des facteurs de risque comme les avalanches de bouillie neigeuse dans leur environnement. Ils doivent aussi apprendre à composer avec la gélifluxion sur les pentes qui en sont affectées.

5.2.4.1 Les glissements de terrain

Les interventions humaines susceptibles d'augmenter le risque de glissement de terrain sont celles qui déstabilisent le terrain par le creusement d'excavations ou de déblais dans les sols riches en glace en raison de la dégradation thermique du pergélisol exposé.

Sauf en cas de nécessité, ou pour des raisons incontournables, le déblai pour niveler le terrain doit toujours être évité dans les dépôts meubles pergélisolés. Avant de procéder à un déblai, il faut une excellente connaissance de la teneur en glace du pergélisol à excaver, car la stabilité du nouveau versant artificiellement créé va dépendre de ce facteur.

Par exemple, une coupe dans un dépôt de gravier ou de sable pauvre en glace peut être sans conséquences, mais dans une argile marine ou un till riche en glace, les travaux de stabilisation du versant peuvent s'avérer difficiles et surtout coûteux.

Dans les talus naturels, les facteurs contribuant au déclenchement de glissements de type « décrochement de couche active » sont : la pente, la limite de liquidité du matériel dégelé, la teneur en eau de la couche active et la pression interstitielle près de l'interface sol dégelé/gelé, ce qui revient à l'interface couche active/pergélisol en fin d'été. Les principales actions humaines indirectes qui augmentent le risque sont les suivantes :

- Un accroissement de la teneur en eau de la couche active. Par exemple, à la suite d'un détournement du drainage en amont, un écoulement à partir d'un ponceau ou une rétention par un effet de barrage, par exemple la construction d'un remblai de route sur un versant.
- Un accroissement de la teneur en eau et une augmentation de la profondeur de dégel de la couche active. L'accumulation excessive de neige est souvent le résultat soit de la construction d'une infrastructure (remblai ou bâtiment) qui provoque de l'enneigement différentiel, soit des opérations de déneigement.
- L'application d'une surcharge causée par un remblai ou un radier mis en place dans une pente. Cependant, tant que le pergélisol se maintient sous le radier ou le remblai et sous le pied du remblai, le terrain demeure solide. La surcharge commence à avoir un effet lorsque la couche active s'approfondit et se sature d'eau lors du dégel du pergélisol.
- La création d'une cavité ou d'un ravin par thermo-érosion, dont les versants ainsi déstabilisés vont ensuite continuer d'évoluer jusqu'à provoquer des glissements de terrain.

5.2.4.2 La thermo-érosion

La cause anthropique de thermo-érosion la plus fréquemment observée dans la toundra est l'orniérage causé par des véhicules ou de la machinerie. En effet, en présence de pergélisol, l'eau de surface s'écoule principalement sous forme de nappes minces et de minces filets d'eau. Parfois elle se concentre dans des « chenaux d'écoulement diffus » (notre traduction du terme anglais *watertrack*) dans lesquels l'eau s'écoule par suintement (*seepage*) dans la couche active pendant l'été et en surface, en particulier lors de la fonte printanière.

La végétation de toundra et la matière organique de la couche active absorbent facilement la faible énergie cinétique de cet écoulement de surface. Toutefois, aussitôt canalisés dans une ornière, les ruisselets concentrent leur énergie et érodent le sol gelé. Rapidement, un ou des ravins peuvent se creuser alors que la chaleur de l'eau en mouvement (chaleur apportée par convection) se transmet au pergélisol dont la glace fond très rapidement. Un réseau de ravins de thermo-érosion peut se développer de façon catastrophique en quelques heures à peine et avoir un effet destructeur sur le terrain.

Le cas peut être amplifié en présence d'un réseau de coins de glace dont la fonte peut rapidement donner lieu à une topographie chaotique. Il faut également surveiller, et disperser au besoin, l'énergie produite par l'eau qui s'écoule à la sortie des ponceaux sous les remblais des routes pour éviter la formation de « cavités de thermo-érosion » (*plunge-pool*) et le ravinement accéléré (Figure 5.46).



FIGURE 5.46 : THERMO-ÉROSION ET « PLUNGE POOL » DANS UNE ANCIENNE ORNIÈRE CREUSÉE PAR LE PASSAGE DE MACHINERIE DANS LA TOUNDRA.

5.2.4.3 Les glaçages et les buttes saisonnières à noyau de glace

Il convient de considérer les glaçages et la formation de grosses lentilles de glace intrusive dans le sol sous deux aspects. Premièrement, il faut les éviter lors de la planification de l'aménagement du territoire ou de la construction. Deuxièmement, il faut éviter d'en provoquer, car ce processus devient habituellement incontrôlable et cause des dommages importants aux routes et aux bâtiments.

La façon la plus simple de détecter les endroits affectés par les épanchements d'eau est d'observer le terrain en hiver ou, mieux, au début du printemps lorsque la neige a déjà beaucoup fondu en périphérie, mettant la glace en évidence.

Comme ces formes de glace réapparaissent sensiblement au même endroit d'un hiver à l'autre, elles laissent des traces en été : terrain boueux et saturé d'eau, petites buttes de végétation à moitié effondrées et recelant encore des restes de glace, fissures dans le couvert végétal, pierres délogées de leur place originale dans le sol.

C'est en taillant des coupes dans des versants que le risque de provoquer des glaçages est le plus grand. En effet, une telle opération peut mettre au jour des zones de suintements dans la couche active préalablement invisibles en surface.

Cela peut même se produire dans le roc où l'eau qui circule dans les joints et les diaclases entre la surface regelée et le plafond du pergélisol pourra ainsi être libérée. Cette eau peut même se retrouver sous une certaine pression artésienne dépendamment de la situation topographique. Une fois l'écoulement hivernal de l'eau et le glaçage commencés, par exemple sur une route, ils deviennent très difficiles à circonscrire et à contrôler en raison de la complexité des écoulements de sous-surface qui se font suivant les variations locales d'épaisseur de la couche active, le relief et la topographie du roc sous-jacent aux dépôts meubles.

5.2.4.4 L'enneigement différentiel

L'accumulation de neige contre le pied des remblais de routes et de pistes d'atterrissage, en marge des radiers, dans les fossés et sur le côté sous le vent des bâtiments est vraisemblablement le principal impact indirect des actions humaines sur la déstabilisation du pergélisol. La formation de congères est liée aux vents qui redistribuent la neige tombée au sol contre les obstacles topographiques, notamment les remblais de routes, dans les sections en déblai et sous le vent des bâtiments. Pour prendre un exemple parmi une multitude, la figure 5.47 montre l'effet de remblai de la piste de l'aéroport de Tasiujaq lors de sa construction en 1989 et une douzaine d'années plus tard.

Outre les dépressions contenant de l'eau en pied de remblai, la colonisation arbustive de la bande enneigée parallèle à la piste est manifeste. Lors de relevés de géophysique en 2004, puis de forages de validation en 2009, on a constaté que le pergélisol avait dégelé sur une épaisseur de sept à huit mètres sous la zone enneigée, entraînant des tassements majeurs des épaulements de la piste qui ont forcé la rénovation de l'ouvrage.

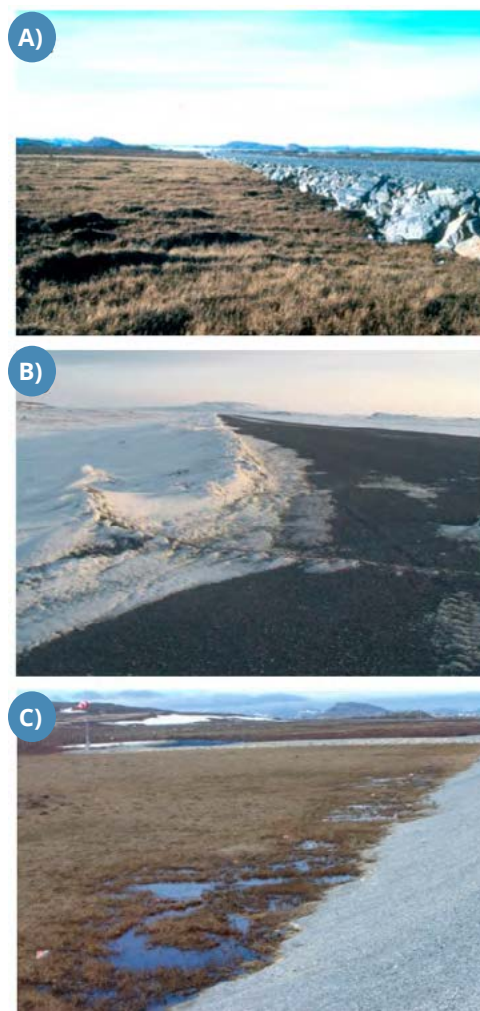


FIGURE 5.47 : IMPACT DE L'ENNEIGEMENT CONTRE LE REMBLAI DE LA PISTE DE TASIUJAQ. A) CONSTRUCTION DU REMBLAI SUR LA TOUNDRA EN 1989. B) ACCUMULATION DE NEIGE CONTRE LE REMBLAI (>2 M D'ÉPAISSEUR). C) MARES DE THERMOKARST ET DÉBUT DE COLONISATION PAR LES ARBUSTES EN 2004.

De même, dans les développements domiciliaires construits sur le pergélisol, l'avantage des bâtiments soulevés au-dessus du sol, sur chevalets ou sur pieux, va au-delà de leur stabilité immédiate. En effet, le passage du vent sous les bâtiments permet d'éviter les accumulations de neige dans le secteur, aidant ainsi à préserver la stabilité du pergélisol, prévenant les tassements, la création de dépressions et la formation de flaques d'eau.

L'autre cause d'enneigement différentiel dommageable au pergélisol est l'empilement localisé de neige découlant des opérations de déneigement, par exemple le long des routes (Figure 5.48) ou dans des dépotoirs à neige situés sur des sols sensibles au dégel. La neige empilée par la machinerie possède une masse volumique beaucoup plus élevée que celle de la neige fraîche, ce qui lui confère une conductivité thermique supérieure, on peut donc supposer que son rôle isolant est moins grand que celui des congères naturelles.

Certes, la grande quantité de neige habituellement empilée ne peut que réduire la perte de chaleur hivernale du sol en dessous. À cela, il faut ajouter l'importante quantité d'eau relâchée dans la couche active lors de la fonte de cette neige, ralentissant le regel aux hivers suivants, augmentant les risques de thermo-érosion et accroissant les risques de glissement de terrain.



FIGURE 5.48 : IMPORTANTE ACCUMULATION DE NEIGE CONTRE LE REMBLAI DE LA ROUTE DE L'AÉROPORT À SALLUIT EN MAI 2011. LA ROUTE A DÛ ÊTRE RECONSTRUITE EN 2012 POUR RÉPARER LES DOMMAGES CAUSÉS PAR LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL.

Comme cela a été mentionné en introduction, les problèmes de drainage, d'accumulation d'eau et de sols mous en bordure des infrastructures et des bâtiments sont, la plupart du temps, provoqués en amont par un réchauffement de la température du sol, donc par un impact thermique. Les tassements et le mauvais drainage qui témoignent de cet impact thermique prennent généralement quelques années à devenir évidents. La principale cause d'impact thermique à l'échelle locale est l'accumulation différentielle de neige.

5.2.5 Les perturbations d'origine anthropique directe

Les perturbations anthropiques directes sont celles où la chaleur produite par une construction ou une activité industrielle est directement transférée au pergélisol, avec pour résultat le dégel du pergélisol qui supporte la structure responsable de cette dégradation. Il peut s'agir d'activités industrielles, par exemple une opération minière dans le pergélisol ou le passage d'un pipeline souterrain dans lequel circule un fluide tiède. En construction, le principal impact direct est le transfert de chaleur d'un bâtiment chauffé au pergélisol sous-jacent.

Les tassements provoqués par le dégel du pergélisol, la plupart du temps différentiels, c'est-à-dire d'inégale amplitude dans l'espace, entraînent des dommages structuraux et une déformation des bâtiments qui vont parfois jusqu'à les rendre non fonctionnels, voire tout juste bons pour la démolition (Figure 5.49).



FIGURE 5.49 : GARAGE DES POMPIERS DE SALLUIT. CONSTRUIT EN 2003 SUR UNE DALLE DE BÉTON, IL A DÛ ÊTRE DÉMOLI APRÈS QUE LE PLANCHER SE SOIT AFFAÎSSÉ D'ENVIRON 0,50 M À LA SUITE DU DÉGEL DU PERGÉLISOL SOUS LA FONDATION.

C'est pourquoi il existe de nombreuses approches technologiques en matière de construction sur pergélisol, décrites dans les prochaines sections. Mais toutes ne visent finalement qu'un seul et même objectif : maintenir d'une façon ou d'une autre la température moyenne annuelle du sol en dessous de 0 °C. La seule autre solution est de ne construire que sur du roc solide ou sur des dépôts meubles dont on est sûr qu'ils ne contiennent pas de glace excédentaire et qu'ils se draineront bien en dégelant. Au regard du réchauffement climatique qui se poursuit, le meilleur choix est celui qui garantit la sécurité totale et la plus longue durée de vie des bâtiments.

5.2.6 Conclusion des notions sur le pergélisol

Lorsqu'il est question de construction de bâtiments, d'ensembles domiciliaires et d'infrastructures urbaines ou de transport, il importe avant tout de connaître adéquatement la nature du sol ou du dépôt meuble et ses propriétés géotechniques. Mais plus important encore, une connaissance adéquate de la teneur en glace et du régime thermique du pergélisol est requise. Une telle connaissance ne peut être obtenue par une simple excavation de la couche active. Un forage avec carottage est nécessaire. Il faut aussi mesurer la température du pergélisol. Dans le contexte du réchauffement climatique, cette information aidera à prendre des décisions qui assureront la stabilité des constructions le plus longtemps possible. Connaître le régime thermique et la teneur en glace est essentiel si on décide, avant de construire, de procéder à des calculs prédictifs et à des simulations numériques qui doivent être validés par des mesures.

Le premier principe consiste à ne pas provoquer, directement ou indirectement, un impact sur le régime thermique du pergélisol. Un impact direct, sous un bâtiment, se fera sentir par des dommages importants dans un laps de temps de deux à quatre ans.

Un impact indirect, par exemple par l'apparition de nouvelles congères, prendra plus de temps à se matérialiser en causant des dommages ou en entraînant des risques naturels, mais la multiplication de tels impacts dans l'espace pourrait compromettre, à la longue, la viabilité de la communauté à cet endroit. La construction et l'aménagement en présence de pergélisol, incluant le choix du type de fondation, doivent donc se faire dans un esprit de prévention à long terme.

5.3 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES FONDATIONS

Le rôle d'une fondation est de transférer et de distribuer les charges d'un bâtiment au sol et de maintenir la stabilité de la structure tout au long de sa durée de vie utile. Par le simple fait que la fondation repose sur le sol, une bonne connaissance des caractéristiques géotechniques de celui-ci est primordiale pour bien évaluer les propriétés mécaniques et les autres facteurs pouvant affecter sa résistance. La conception et la construction d'une fondation dans une zone de pergélisol constituent un défi de taille en raison du nombre de facteurs à considérer qui diffèrent, tant en nature qu'en intensité, de ceux des zones sans pergélisol (Johnston, 1981).

En zone de pergélisol, le sol est soumis, en surface, aux effets du gel saisonnier dont les changements de phase successifs réduisent la résistance du sol et qui sont à l'origine de plusieurs processus. Parmi ces processus se trouvent le soulèvement gélival et les tassements différentiels qui peuvent affecter la stabilité des fondations et causer des dommages importants à la structure (Phukan et Andersland, 1978). La simple conversion de l'eau interstitielle en glace lors du processus de gel induit une augmentation du volume du sol de 9 % dont près de la moitié se traduit en soulèvement vertical (Sanger et Sayles, 1979). Ce soulèvement devient d'autant plus important lorsque les caractéristiques du sol et les conditions hydrauliques et thermodynamiques favorisent la formation de lentilles de glace. Sous cette couche de sol superficielle, on trouve une couche de sol gelé en permanence (pergélisol), dont les caractéristiques mécaniques sont intimement liées à son état thermique. Les interactions entre les processus géologiques, géomorphologiques, hydrologiques et climatiques au sein d'un environnement périglaciaire définissent les caractéristiques géotechniques et cryostratigraphiques du pergélisol. Ainsi, le pergélisol consiste en un assemblage complexe de particules solides, d'air et de glace sous diverses formes (interstitielle, de ségrégation, intrusive et massive) qui reflètent les conditions particulières en vigueur lors de sa mise en place initiale (phase épigénétique) ainsi qu'au cours de son développement (phase syngénétique).

Au Nunavik, plusieurs problèmes concernant les fondations de bâtiments communautaires ont mené soit à la démolition du bâtiment, soit à son déplacement ou encore à la modification de son usage initial. Pour la plupart, ces fondations problématiques ont été construites sur un pergélisol riche en glace sans qu'une étude de reconnaissance préalable ait été faite. Une telle étude vise justement à identifier les sites problématiques et à recommander une approche technique acceptable pour assurer la stabilité et la pérennité de l'infrastructure. Les coûts engendrés par les enquêtes préliminaires, les reconnaissances de site approfondies ainsi que le suivi géotechnique pendant la construction ne représentent qu'une petite fraction de l'investissement nécessaire pour la construction de nouvelles habitations. Il est à noter que les coûts de construction, tout comme les coûts de la vie, sont beaucoup plus élevés au Nunavik que dans les zones tempérées du Québec en raison de la disponibilité limitée des ressources humaines et matérielles. En conséquence, les risques d'instabilité des fondations construites sur le pergélisol ne doivent pas être sous-estimés. Une bonne connaissance des caractéristiques physiques du milieu d'implantation d'un bâtiment en zone de pergélisol est primordiale pour concevoir des structures optimisées, adaptées aux conditions du site.

Les conditions mécaniques du pergélisol sont thermodépendantes, c'est-à-dire que la température du sol influence la capacité portante, les forces d'adhérences dues au gel et les taux de fluage. Les secteurs où le pergélisol est discontinu et chaud (température moyenne annuelle du sol supérieure à -2 °C) représentent des défis importants sur le plan de l'ingénierie des fondations en raison des résistances très faibles du sol, des taux de fluage élevés et de la résilience thermique limitée face aux modifications du terrain et du climat. Quoique tout aussi complexes, les secteurs où le pergélisol est continu et froid (température moyenne annuelle du sol inférieure à -2 °C) offrent des valeurs de résistance et de fluage plus appropriées, mais demeurent sensibles aux perturbations thermiques malgré une résilience thermique et mécanique supérieure.

5.3.1 L'action du gel et les fondations

L'effet du gel saisonnier à l'intérieur de la couche active peut soumettre les fondations, et toute autre structure, à des forces de soulèvement considérables et à des mouvements destructeurs, ce qui en fait une considération à prendre en compte dans la conception des fondations des bâtiments non chauffés ou légèrement surélevés, des ponts et des tours de transmission et de communication (Johnston, 1981).

Le soulèvement gélival consiste en l'expansion du sol par la formation de lentilles de glace lors du regel du sol au début de l'hiver. Dans une zone de pergélisol, le soulèvement gélival est restreint à la couche superficielle du sol qui est soumise au cycle annuel de gel et de dégel (couche active). L'amplitude du soulèvement gélival dépend

du type de sol et de la disponibilité en eau. De manière générale, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active accroît également le potentiel de soulèvement du sol par l'accroissement de la quantité d'eau et la durée du regel. Lorsque les conditions requises pour le soulèvement gélival sont optimales, c'est-à-dire en présence d'un sol sensible au gel non confiné, alimenté en eau et soumis à un refroidissement qui favorise le gel, il n'y a en théorie aucune limite au soulèvement gélival. Il est fréquent d'observer un soulèvement de la surface du sol qui peut atteindre quelques centimètres, voire une quinzaine au cours de la saison de gel. L'utilisation récente de techniques de télédétection qui captent des images radar d'un même secteur à des moments différents pour mesurer les mouvements différentiels de la surface du sol (DInSAR, InSAR) permet d'évaluer rapidement la gélivité des dépôts de surface. De telles mesures, prises récemment au Nunavik (May, 2011; Eppler et autres, 2015) et au Nunavut (Short et autres., 2012; Leblanc et autres, 2015) suggèrent des mouvements saisonniers pouvant atteindre une amplitude de plus d'une dizaine de centimètres par endroit selon le type de dépôt et les conditions de drainage locales.

Au moment du regel, les forces de soulèvement qui se développent dans le sol lors de la formation des lentilles de glace peuvent soulever les structures qui sont enfouies dans la couche active ou qui y reposent. Les forces de soulèvement dues au gel qui se développent à l'intérieur d'un sol gélif sont transmises aux fondations de deux manières : par une force basale, qui agit sous la base de la semelle lors de la formation de lentilles de glace, et par une force d'adhérence, qui agit plutôt sur les parois de la fondation (Johnston, 1981). L'amplitude des forces de soulèvement qui se développeront lors de la formation de lentilles de glace dans un sol gélif est difficile à évaluer en raison des nombreux paramètres à considérer tels que la surcharge, la charge de la fondation, le type de sol, la variation de la température du sol dans le temps et en profondeur, le taux de regel, la disponibilité en eau, le type de surface de la fondation, la méthode de mise en place de la fondation et le taux et la durée du chargement. Dès que les forces de soulèvement dues au gel surpassent la charge appliquée sur la fondation par le poids du bâtiment, il y a soulèvement. Dans des cas extrêmes, des forces de soulèvement de 1000 kPa peuvent se développer sous la semelle et des forces d'adhérence dues au gel de près de 500 kPa ont été mesurées le long de pieux d'acier (Penner et Goodrich, 1983). Au cours du dégel, une fonte rapide des lentilles qui se sont formées sous la fondation peut réduire considérablement la capacité portante du sol si l'eau libérée par la fonte ne peut être drainée efficacement. Dans de telles circonstances, la capacité portante du sol de fondation est fortement diminuée, ce qui favorise sa déformation sous la charge de l'infrastructure.

Le soulèvement gélival de la surface peut considérablement affecter l'intégrité d'une fondation telle que l'illustre la figure 5.50 A où la dalle sur sol d'un bâtiment non chauffé affiche un bombement central d'une trentaine de centimètres. Il est fréquent qu'une fois soulevée au cours de l'hiver la fondation ne puisse retrouver son emplacement initial lors du dégel et soit ainsi graduellement expulsée de la couche active au fil des années. L'un des exemples les plus évidents de l'effet du soulèvement gélival sur les fondations, et qui est régulièrement observé dans les zones où le pergélisol est présent, est l'expulsion graduelle des fondations qui supportent les tiges d'armature des clôtures lorsque celles-ci sont encastrées dans la couche active (Figure 5.50 B). Un exemple de basculement de fondations superficielles sur un radier composé d'un matériau gélif est présenté à la figure 5.50 C et D. Selon le rapport technique (Journeaux Assoc., 2014), l'enrichissement en glace du remblai partiellement gélif aurait été favorisé par la percolation des eaux de surface provenant des déversements sporadiques qui ont été faits lors du remplissage du réservoir d'eau potable et par l'absence de gouttières sur le toit.

Il a été démontré en laboratoire, et également sur le terrain, que l'amplitude du soulèvement gélival peut être réduite en augmentant la charge au sol (CRREL, 1974). Dans la conception de la fondation, l'effet réducteur du soulèvement gélival par l'ajout d'un radier composé d'un matériau non gélif permet d'une part d'ajouter une certaine charge sur le sol, mais également de limiter l'amplitude de la pénétration du gel dans le terrain naturel sous le radier. Il est à noter qu'en zone de pergélisol, l'ajout d'une couche de matériau sur la surface du terrain naturel engendre un réajustement du régime thermique du sol qui se traduit par une remontée du plafond du pergélisol. Cette remontée est proportionnelle à l'épaisseur de la couche de matériau ajoutée, mais doit avoir une épaisseur supérieure à un mètre en deçà de laquelle le changement des conditions de surface peut venir neutraliser la remontée du plafond du pergélisol, voire engendrer un approfondissement. Compte tenu de ce réajustement thermique, une partie ou la totalité de la couche active initiale deviendra du pergélisol syngénétique et, au cours de ce processus, la formation de lentilles de glace peut entraîner un soulèvement gélival. Pour cette raison, il est préférable de construire les radiers un an à l'avance afin de permettre au radier et au régime thermique de se stabiliser. Pour éviter la formation de lentilles de glace à l'intérieur d'un remblai par la percolation des eaux de surface dans le sol, il importe de prendre des précautions pour permettre le drainage efficace des fondations

et en éloigner l'eau le plus possible. Une gestion consciencieuse de la neige et l'ajout d'un dispositif antidébordement sur les boyaux de remplissage des réservoirs d'eau potable permettraient de réduire le risque de soulèvement gélival, particulièrement dans les remblais partiellement gélifs.

L'utilisation d'isolant permet aussi de réduire considérablement la pénétration du front de gel sous les infrastructures non chauffées et sous celles qui sont chauffées et surélevées avec un espace ventilé. L'épaisseur de l'isolant requis sera déterminée en fonction de l'indice de gel de la région. La protection contre le gel est plus efficace lorsque l'isolant est placé à une faible profondeur, généralement entre 20 et 30 cm sous une couche de sol. Selon le type de fondation utilisé, plusieurs précautions permettent de réduire l'effet du gel sur les fondations dont quelques-unes sont illustrées à la figure 5.51.

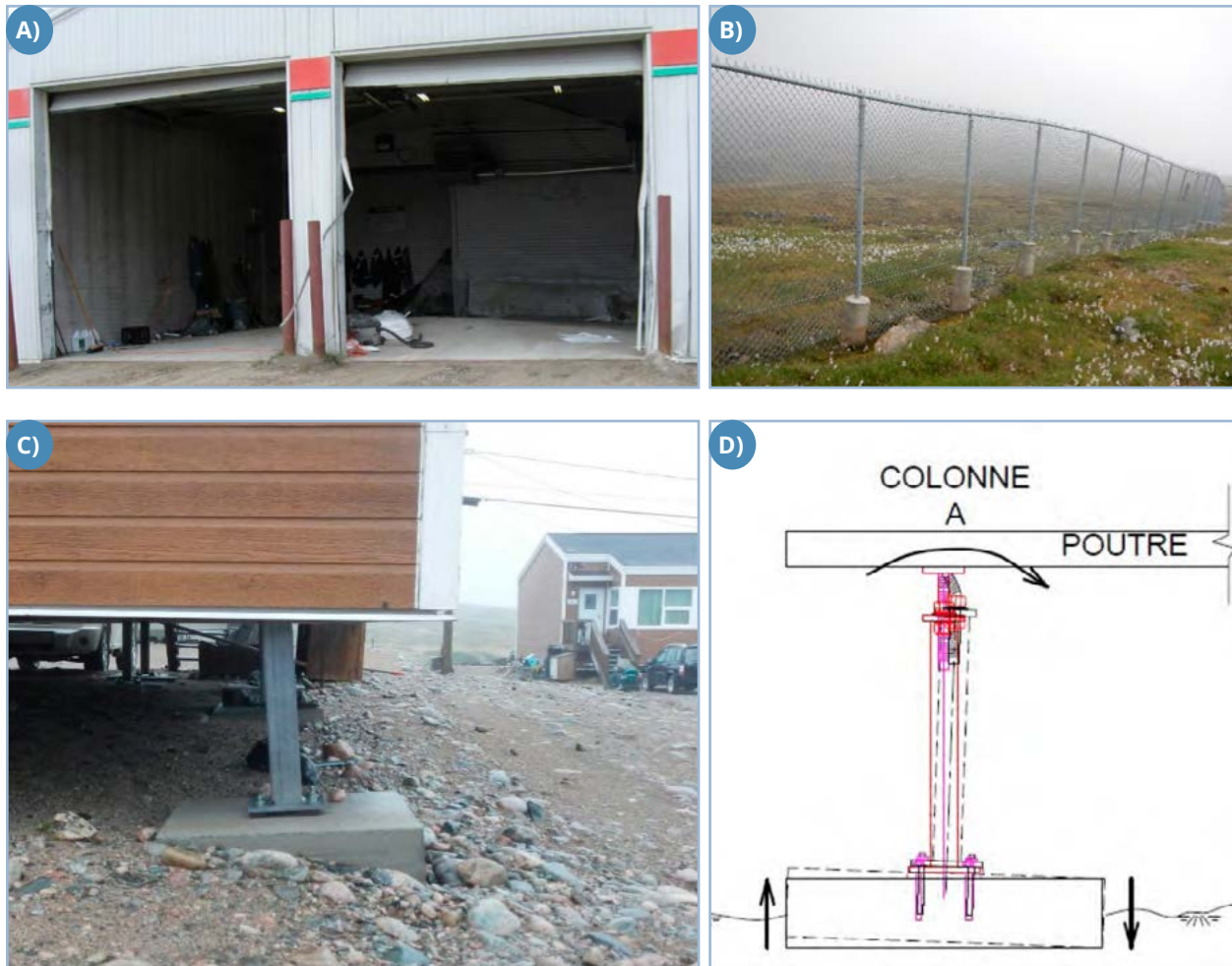


FIGURE 5.50 : A) SOULÈVEMENT GÉLIVAL DE LA DALLE SUR SOL D'UN BÂTIMENT NON CHAUFFÉ À LA SUITE DE LA FORMATION DE GLACE DE SÉGRÉGATION OU D'INJECTION À PANGNIRTUNG AU NUNAVUT. B) SOULÈVEMENT GÉLIVAL DES FONDATIONS QUI SUPPORTENT LES TIGES D'ARMATURE D'UNE CLÔTURE À PANGNIRTUNG AU NUNAVUT. C) ROTATION VERS L'INTÉRIEUR DES SEMELLES DE FONDATION CAUSÉE PAR LA SATURATION EN EAU D'UN REMBLAI PARTIELLEMENT GÉLIF COMBINÉE À L'EFFET DE GEL. D) MOTION TYPIQUE D'UNE ROTATION DES SEMELLES DE FONDATION (TIRÉE DE JOURNEAUX ASSOC., 2014).

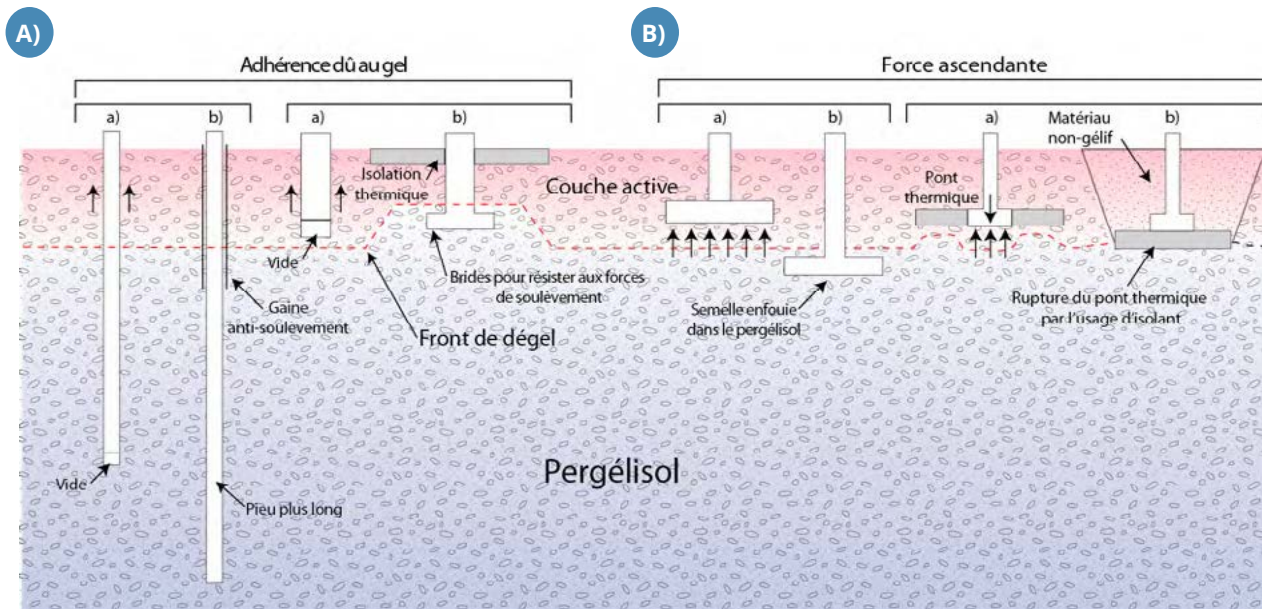


FIGURE 5.51 : A) EXEMPLES DE L'EFFET DU GEL SUR CERTAINS TYPES DE FONDATIONS ET B) LEURS MESURES DE PROTECTION.

5.3.2 Comportements mécaniques du pergélisol

Les sols pergélisolés consiste en un amalgame complexe de sol à texture variable, de glace sous différentes formes et de bulles d'air dont les propriétés mécaniques ne peuvent être facilement estimées. De manière générale, les sols gelés offrent un excellent support aux fondations en raison de la présence de glace dans les pores qui crée des liens entre les particules (Phukan et Andersland, 1978). Toutefois, dans les sols contenant de la glace en excès, la déformation du sol par fluage sous les assises de fondation ou l'accumulation d'eau en excès à la position du front de dégel peuvent causer de nombreuses difficultés. Lorsqu'un sol est soumis à une sollicitation, c'est-à-dire lorsqu'une charge est appliquée en surface, comme celle imposée par une structure ou un remblai, sa déformation verticale subséquente est appelée tassement. Dès qu'une fondation et sa charge sont déposées sur le sol, plusieurs phénomènes se produisent à court terme et d'autres commencent à se développer à plus long terme. Le tassement du sol est souvent déterminant dans un projet de fondation et se décompose en plusieurs types de déformations, certaines réversibles et d'autres non :

1. La déformation élastique instantanée qui correspond à la déformation du sol liée à la déformation élastique du squelette du sol, de la glace, de l'eau non gelée et des gaz (réversible).
2. Les déformations plastiques instantanées dues à l'effondrement de la structure d'un sol gelé non saturé sous une charge (irréversible).
3. La déformation lente par consolidation primaire provoquée par l'expulsion d'une partie de l'air et de l'eau non gelée contenue dans les pores sous un gradient de pression (irréversible).
4. La déformation lente par la consolidation secondaire (fluage) qui correspond aux déplacements des particules solides gouvernés par l'écoulement de la glace à l'intérieur des pores (irréversible). Se développe ultérieurement à la consolidation primaire.

Toutes ces sources de déformation vont contribuer au tassement du sol sous une contrainte donnée, et l'importance de chacune dépendra des caractéristiques du sol (granulométrie et compacité), de sa température et de la charge appliquée, variables qui définissent le comportement en résistance des sols gelés. Par exemple, la résistance au cisaillement d'un sol à grains grossiers bien compacté est déterminée par l'angle de frottement des particules entre elles et par sa dilatance. Lorsque le sol est gelé, sa résistance au cisaillement augmente grâce aux liaisons intergranulaires assurées par la glace interstitielle (cimentation des grains). Toutefois, cette augmentation de la résistance au cisaillement par la glace atteint son maximum à saturation du sol pour ensuite

diminuer lorsque celui-ci devient sursaturé de glace. Dans de telles conditions, les forces ne s'appliquent plus au squelette minéral (diminution du frottement interne), mais plutôt à la glace. Ainsi, les propriétés mécaniques de la glace détermineront la résistance au cisaillement du sol qui est habituellement réduite en raison de la propension au fluage de celle-ci. Sous une pression constante, le phénomène de fluage du sol induit une déformation étroitement liée à la durée du processus. Le taux du fluage sera quant à lui influencé par la teneur en glace, la température du sol et la charge appliquée. Sous une charge excessive et après une certaine période de temps, le sol peut se déformer à un rythme soutenu jusqu'à atteindre un point de rupture (Johnston, 1981).

Sous de faibles contraintes, les sols pauvres en glace, où un contact grain à grain est possible, tendent surtout vers un fluage primaire dont la déformation résultante cessera graduellement. Dans le cas d'un sol riche en glace, les contacts intergranulaires générateurs du frottement interne disparaissent, favorisant ainsi une déformation à un taux constant sous une charge faible ou modérée. Ce type de sol tend plus rapidement vers un fluage secondaire. Sous des contraintes élevées, ce type de sol passera rapidement à un fluage accéléré, sans phases primaire et secondaire bien distinctes, et se brisera après un temps très court. La contrainte sous laquelle il se produit une rupture de l'échantillon à l'intérieur d'une période de quelques minutes définit la valeur de résistance à court terme du matériau. La contrainte pour laquelle le taux de fluage décélère à zéro après un certain temps se nomme la résistance à long terme. Dans les sols gelés à haute teneur en glace, la résistance à long terme n'est possible que lorsqu'ils sont confinés. Sans confinement, ils continuent à se déformer indéfiniment.

Pour les sols gelés, l'effet de la température et du temps sur la résistance du sol et son comportement mécanique ajoute une autre dimension à la conception et demeure incontournable dans l'évaluation de la charge pouvant être appliquée sur la fondation. La température influence directement le comportement mécanique des sols gelés par ses conséquences sur la quantité d'eau non gelée et la force des liens assurés entre les particules par la glace interstitielle. De manière générale, un abaissement de la température accroît la résistance du sol (Figure 5.52). Toutefois, l'influence de la température sur la résistance des sols gelés n'est pas uniforme et dépend également du type de matériau. Par exemple, l'augmentation de la résistance d'un sable en fonction de l'abaissement des températures du sol se fera très rapidement et celle-ci plafonnera dès que l'eau non gelée sera gelée en totalité. Pour les silts et les argiles, la résistance du sol s'acquiert plus graduellement en raison de la proportion d'eau non gelée qui demeure malgré les températures froides. La consolidation des sols gelés par l'expulsion de l'eau non gelée peut être substantielle dans les zones où le pergélisol est chaud et le matériau susceptible de contenir une importante fraction d'eau non gelée (silt et argile). Outre la température et le type de matériau, la résistance des sols gelés sera également affectée par la salinité.

Le terme « capacité portante » réfère à la charge pouvant être supportée par le sol de fondation pour laquelle les déformations et les tassements seront limités et n'affecteront pas l'utilisation et la stabilité de la structure. Comme il a été mentionné précédemment, le pergélisol est plus ou moins sensible au fluage selon les caractéristiques du sol (granulométrie et compacité), sa température et la charge appliquée. Pour un pergélisol riche en glace, d'importantes déformations par fluage et tassements peuvent se produire, complexifiant l'exercice de conception d'une fondation au cours duquel le choix d'une solution durable peut s'avérer dispendieux, voire impossible. Ainsi, l'enjeu majeur dans la conception de fondations sur pergélisol réside dans le choix du site, en l'occurrence dans la caractérisation des conditions du pergélisol en place et dans l'évaluation de leurs comportements mécaniques thermodépendants qui sont transitoires et évolutifs.

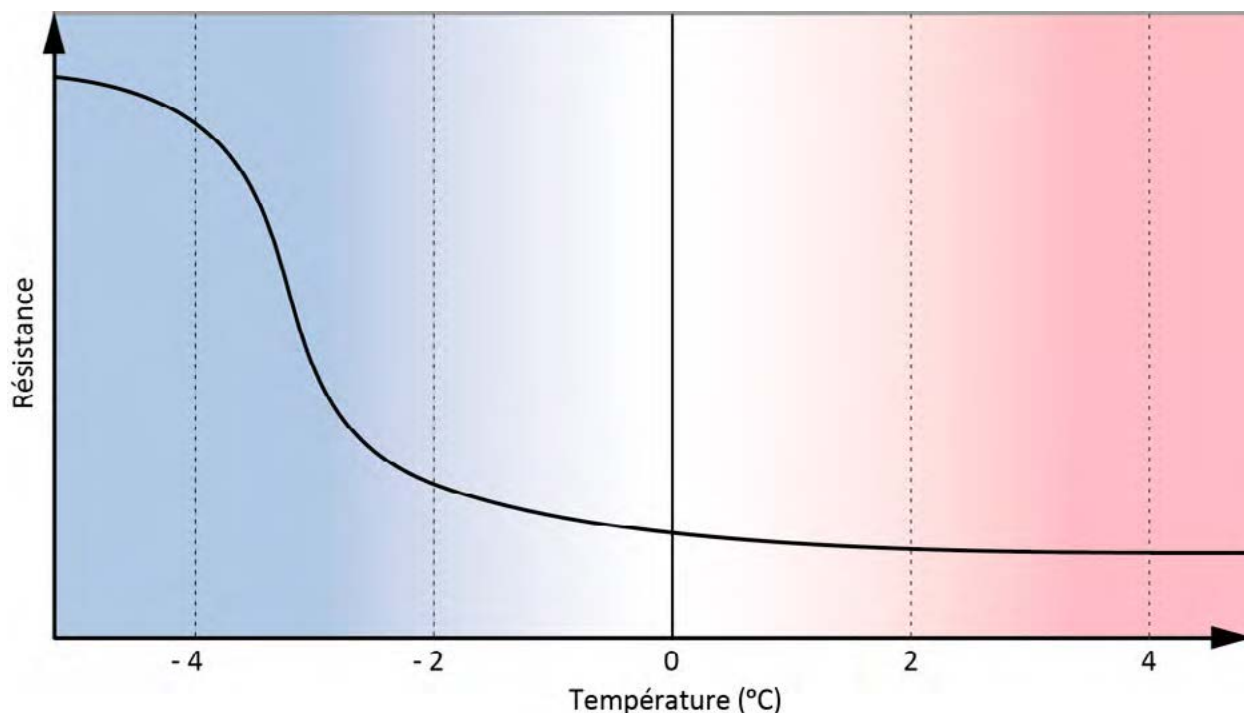


FIGURE 5.52 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA RÉSISTANCE DU PERGÉLISOL EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.

5.3.3 Tassement et consolidation au dégel

Lorsque le pergélisol fond, la fonte de la glace produit une quantité d'eau qui dépasse fréquemment la capacité d'absorption du squelette du sol. La conséquence directe de cette condition est une augmentation de la pression interstitielle qui réduit les contraintes effectives et inévitablement la résistance au cisaillement du sol. Le changement de phase de la glace ainsi que l'expulsion de l'eau en excès dans le sol provoqueront un changement de volume du sol qui s'exprime par une déformation verticale appelée tassement. La compétence du pergélisol à servir de sol de fondation dépendra de sa sensibilité au dégel, à savoir l'amplitude des tassements qui surviendront en cas de fonte, et de sa résistance à l'état gelé et non gelé. Le tassement et la consolidation au dégel des sols riches en glace peuvent entraîner une déformation importante du sol causant des dommages considérables aux structures. Au Nunavik et au Nunavut, plusieurs exemples de dommages aux structures causés par de telles déformations du sol ont été répertoriés. La fonte du pergélisol est provoquée par la structure elle-même (bâtiment chauffé), par la modification des variables environnementales locales (enneigement, accumulation d'eau, conditions de surface) ou par l'augmentation des températures de l'air. Les structures chauffées avec une fondation de type dalle sur sol qui reposent sur un pergélisol riche en glace sont particulièrement susceptibles de provoquer de telles déformations si aucune mesure particulière n'est prise pour atténuer l'impact thermique de l'infrastructure sur le sol (ex. : fondation avec thermosiphons) (Figure 5.53).

Lorsqu'un sol saturé gèle alors qu'il n'est pas drainé et que sa teneur en eau est constante, il gonflera d'un volume équivalent à celui associé au changement de phase de l'eau interstitielle contenue dans les pores, soit environ 9 %. Lors du dégel, le sol retournera à son volume initial et se consolidera davantage si les conditions permettent le drainage de l'eau. Cette situation s'applique essentiellement dans les sols grossiers où le processus de ségrégation de la glace est très limité. Pour les sols à grains fins, une pénétration lente et graduelle du front de dégel ainsi qu'une alimentation en eau constante favorisent la formation de glace de ségrégation. Dans de telles conditions, la teneur en eau du sol gelé excède fréquemment sa teneur en eau à l'état non gelé et normalement consolidé. Par conséquent, lorsque ce type de sol fond, des tassements importants, qui se décomposent essentiellement en trois parties, surviennent : 1) le tassement lié au changement de phase de la glace, 2) la consolidation du sol sous son propre poids et 3) la consolidation du sol sous la contrainte appliquée. De façon générale, le tassement prédomine lorsque la glace se présente sous forme ségrégée (lentilles) tandis que la consolidation primera en présence de glace interstitielle.

Dans les sols extrêmement riches en glace, où celle-ci se présente sous une forme lenticulaire ou massive, il est possible de faire une estimation grossière des valeurs de tassements par une évaluation visuelle de l'épaisseur des lentilles de glace ou de la couche de glace massive. Toutefois, il est préférable de faire une évaluation du tassement et de la consolidation au dégel d'un sol en laboratoire à partir d'un échantillon cylindrique non perturbé prélevé dans le pergélisol selon la norme ASTM D2435/D2435M. Un essai type de tassement et de consolidation au dégel est présenté à la figure 5.54. Le nombre d'échantillons et d'essais à réaliser pour bien évaluer les paramètres de tassements et de consolidation sera fonction de l'hétérogénéité du sol, de la distribution de la glace le long du profil de sol ainsi que de la dimension et de la fonction du bâtiment. L'objectif de ces essais est de déterminer des valeurs de tassement total pour le pergélisol sur lequel repose la structure, et d'évaluer au besoin l'amplitude des déformations du sol résultant de sa fonte.

Quelques essais de consolidation ont déjà été faits au Nunavik par des chercheurs de l'Université Laval (Leroueil et autres, 1991), mais ceux-ci se sont limités à un seul matériau (silt argileux) prélevé dans une seule communauté (Kangiqsualujuaq). Toutefois, au cours des dernières années, dans un effort de caractérisation géotechnique des conditions de pergélisol rencontrées au Nunavik, de nombreux essais de consolidation ont été menés sur un nombre considérable d'échantillons couvrant les principaux matériaux géologiques (gravier, sable et gravier, silt et argile), types de dépôt (sédiments glaciaires, glaciomarins, littoraux, alluviaux, colluviaux, organiques, etc.) et conditions de pergélisol (teneur en glace, cryostructure, température, etc.) (L'Hérault et autres, 2012; 2013, 2014; 2015). Ces résultats ont démontré que dans certaines communautés, la probabilité de devoir construire sur un sol riche en glace est très élevée. Les sédiments marins à grains fins, les colluvions et certains tills sont susceptibles de contenir d'importantes quantités de glace. À l'intérieur d'une même unité géologique de surface, ces teneurs en glace ont une grande variabilité spatiale, tant latéralement que verticalement, le long du profil de sol. De manière générale, les concentrations en glace sont plus élevées dans les secteurs déprimés mal drainés et sont stratigraphiquement concentrées dans les quelques mètres supérieurs du pergélisol. C'est également dans ces premiers mètres superficiels du pergélisol que les impacts thermiques causés par l'infrastructure ou les changements climatiques seront les plus marqués.



FIGURE 5.53 : DÉFORMATIONS ET DOMMAGES IMPORTANTS CAUSÉS AUX FONDATIONS DE TYPE DALLE SUR SOL À LA SUITE DU TASSEMENT ET DE LA CONSOLIDATION, AU MOMENT DU DÉGEL, D'UN PERGÉLISOL RICHE EN GLACE. A) ENTREPÔT CHAUFFÉ À PANGNIRTUNG AU NUNAVUT. B) DALLE DE L'ANCIENNE CASERNE DE POMPIERS DE LA MUNICIPALITÉ DE SALLUIT AU NUNAVIK. C) ANCIEN GARAGE MUNICIPAL DE LA MUNICIPALITÉ DE TASIUAQ AU NUNAVIK.



FIGURE 5.54 : ÉCHANTILLONS DE PERGÉLISOL A) PAUVRE EN GLACE ET B) RICHE EN GLACE SOUMIS À DES ESSAIS DE CONSOLIDATION AU DÉGEL (TIRÉ DE L'HÉRAULT ET AUTRES, 2015).

5.3.4 Impacts thermiques des fondations sur le pergélisol

Tel qu'il en a été fait mention antérieurement, les températures du sol ainsi que la présence ou l'absence de pergélisol sont le résultat de l'interaction d'une multitude de variables climatiques (température de l'air, radiation solaire), environnementales (végétation, drainage) et géologiques (propriétés thermiques des matériaux, flux géothermique). Pour un site donné, le régime thermique du sol reflète un état d'équilibre transitoire entre les conditions intrinsèques du milieu et les conditions climatiques. Cet état d'équilibre transitoire est certes fragile et peut basculer rapidement vers des conditions thermiques favorables ou défavorables au maintien, voire au développement du pergélisol. Parmi les éléments susceptibles de perturber l'équilibre thermique du pergélisol, l'aménagement d'un terrain destiné à la construction et la présence d'infrastructures sont certes à considérer. En effet, parce qu'ils modifient les conditions initiales des surfaces, des sols et de l'environnement, ces éléments provoquent une mutation thermique du pergélisol, paramètre incontournable dans l'évaluation des comportements mécaniques thermo-dépendants des sols gelés. Lors de la conception du système de fondation, il est donc primordial de s'assurer que l'empreinte thermique du bâtiment est réduite au maximum afin de préserver un régime thermique propice au maintien du pergélisol, surtout si celui-ci est instable au moment du dégel. Les tassements engendrés par la fonte du pergélisol peuvent avoir des conséquences catastrophiques sur l'intégrité du bâtiment.

L'amplitude de la perturbation thermique du pergélisol causée par une infrastructure va dépendre de la dimension de la structure, de la température à l'intérieur du bâtiment, de la présence et de l'épaisseur d'isolant au sol, de la présence ou non d'un espace ventilé, de l'ajout d'une couche de matériau sur le sol naturel et des propriétés thermiques du sol naturel sous-jacent (Figure 5.55). En général, le pergélisol dégel lorsqu'une quantité de chaleur suffisante est transmise au sol. Cette situation se présente régulièrement lorsqu'un bâtiment chauffé repose directement sur le sol. C'est d'ailleurs avec ce type de fondation qu'on dénombre le plus d'exemples de ruptures au Nunavik et ailleurs dans l'Arctique canadien. Sous ce type de fondation, le front de dégel va pénétrer dans le sol à un rythme soutenu, à moins que des précautions soient prises pour réduire ces transferts de chaleur en utilisant, par exemple, une fondation ventilée (naturelle ou forcée) ou un système de refroidissement (ex. : thermosiphons). Il est à noter que les réservoirs d'eau potable ou d'eaux usées qui reposent directement sur le sol risquent également de perturber l'équilibre thermique du sol en favorisant son réchauffement. En pratique, de tels réservoirs sont installés à l'intérieur de l'enveloppe thermique des bâtiments, mais ils pourraient également être posés sur du roc sain ou sur une structure surélevée.

Permettre, voire accroître l'évacuation de la chaleur (refroidissement) contenue dans les sols est un principe qui peut s'avérer nécessaire pour la construction ou la réhabilitation de certaines fondations reposant sur un pergélisol sensible au dégel. La façon la plus économique, la plus efficace et la plus répandue de limiter les transferts de chaleur entre le bâtiment et le sol consiste à surélever l'infrastructure de façon à créer un espace ventilé sous le bâtiment. L'écoulement de l'air permet d'extraire la chaleur tout en limitant les accumulations de neige. De plus, l'effet d'ombrage ainsi créé par le bâtiment protège la surface du sol de la radiation directe du soleil, ce qui s'avère bénéfique dans la préservation du pergélisol. Lorsqu'il est impossible de surélever le bâtiment,

il existe d'autres techniques pour évacuer la chaleur dont les thermosiphons et les conduites ventilées naturellement ou mécaniquement. L'expérience acquise au Nunavut, dans les Territoires du Nord-Ouest et au Nunavik démontre qu'il faut être extrêmement prudent lorsque l'efficacité des techniques utilisées repose sur des interventions humaines ou sur des éléments actionnés mécaniquement. En effet, ces mécanismes cruciaux pour la stabilité du bâtiment doivent être entretenus. Pour ces raisons, seules les technologies dites passives, reposant sur le principe du thermosiphon, sont recommandées lors de la construction d'un nouveau bâtiment. Cependant, elles ne sont que très rarement utilisées pour les petits bâtiments d'habitation en raison de leur coût assez élevé. Bien que reposant sur un principe dit passif, les thermosiphons nécessitent également des inspections périodiques. Il faut notamment faire le suivi des températures sous les fondations, en plus de vérifier les fuites potentielles de gaz dans le système. Ces technologies sont présentées plus en détail dans la section 5.5 portant sur les types de fondations.

L'utilisation d'isolant est fréquente au niveau de la structure afin de limiter les transferts thermiques entre le plancher de l'infrastructure et le sol de fondation, tout en permettant de réduire les coûts de chauffage et d'assurer le confort des occupants. Les matériaux isolants les plus fréquemment utilisés sont les panneaux de polystyrène extrudé ou le polyuréthane expansé. Le choix du matériau isolant dépendra des spécifications requises en matière de propriétés isolantes, de capacité portante sous une charge statique et dynamique et de durabilité. Il est à noter que l'ajout d'isolant diminue et retarde le transfert de chaleur du bâtiment au sol sans toutefois l'empêcher. Pour cette raison, la préservation du pergélisol sous un bâtiment chauffé ne peut pas dépendre uniquement de l'isolation. Lorsque le matériau isolant est enfoui sous la surface dans un environnement humide, il peut rapidement perdre ses propriétés isolantes en absorbant cette humidité et une partie de sa résistance par l'altération physique causée par les cycles répétés de gel et de dégel. Afin d'éviter de tels désagréments, le matériau isolant est souvent enfoui à l'intérieur d'un remblai granulaire non gélif et bien drainé, déposé à la surface du sol naturel (Figure 5.55).

La conception doit inclure une zone tampon où l'isolation s'étend au-delà du périmètre de l'infrastructure afin de limiter les impacts de l'effet de bordure sur la performance de la fondation associé à l'enneigement, au vent et à la radiation solaire (norme CAN/CSA-S500-14). En effet, un remblai est sujet à absorber une quantité substantielle de chaleur par rayonnement solaire, ce qui peut conduire à une dégradation thermique du pergélisol et provoquer des déformations dans le remblai. Cette dégradation thermique est particulièrement importante dans le talus du remblai où le matériau granulaire devient trop mince pour assurer une transition avec le terrain naturel. La dégradation est encore plus importante lorsqu'une épaisse couche de neige s'y accumule et isole la surface du sol en hiver (Figure 5.56). Une fois le processus de dégradation enclenché, le milieu se transforme et favorise une rétroaction positive. Il s'ensuit habituellement un épaississement de la couche active qui, à la suite d'un tassement dont l'ampleur dépendra du coefficient de consolidation du pergélisol dégelé, donnera naissance à une dépression favorisant l'accumulation d'eau dans le courant de l'été et au printemps lors de la fonte de la neige. L'eau captera ainsi plus de rayonnement solaire que la surface végétalisée d'origine, ce qui favorisera le réchauffement de la surface et du sol. L'hiver suivant, la dépression pourra recevoir une quantité plus importante de neige dont l'effet isolant sera amplifié en fonction du gain d'épaisseur de la couverture nivale et ainsi de suite. Au Nunavik, cette situation thermique précaire des pieds de remblai, engendrée par la modification des facteurs environnementaux locaux tels que l'enneigement et le drainage par la simple présence de l'infrastructure, est à l'origine de la majorité des déformations (tassement, fluage) recensées en bordure des remblais.

Lors de la conception, il s'avère donc nécessaire d'anticiper la dégradation possible du pergélisol en bordure des remblais. Une des précautions à prendre est de prévoir un radier suffisamment large autour de l'infrastructure de manière à ce qu'une dégradation du pergélisol en marge du remblai ne puisse affecter la stabilité de la structure. L'adoucissement de la pente des talus de remblai (1V:6H) et une bonne planification des fossés de drainage permet de réduire les impacts thermiques néfastes potentiels par l'accumulation de neige et d'eau en pied de remblai. En bref, un suivi régulier des conditions du terrain en marge du remblai est essentiel afin de venir rectifier rapidement les éléments pouvant favoriser une dégradation du pergélisol et ainsi éviter que la situation évolue jusqu'à compromettre la stabilité du pergélisol sous le remblai.

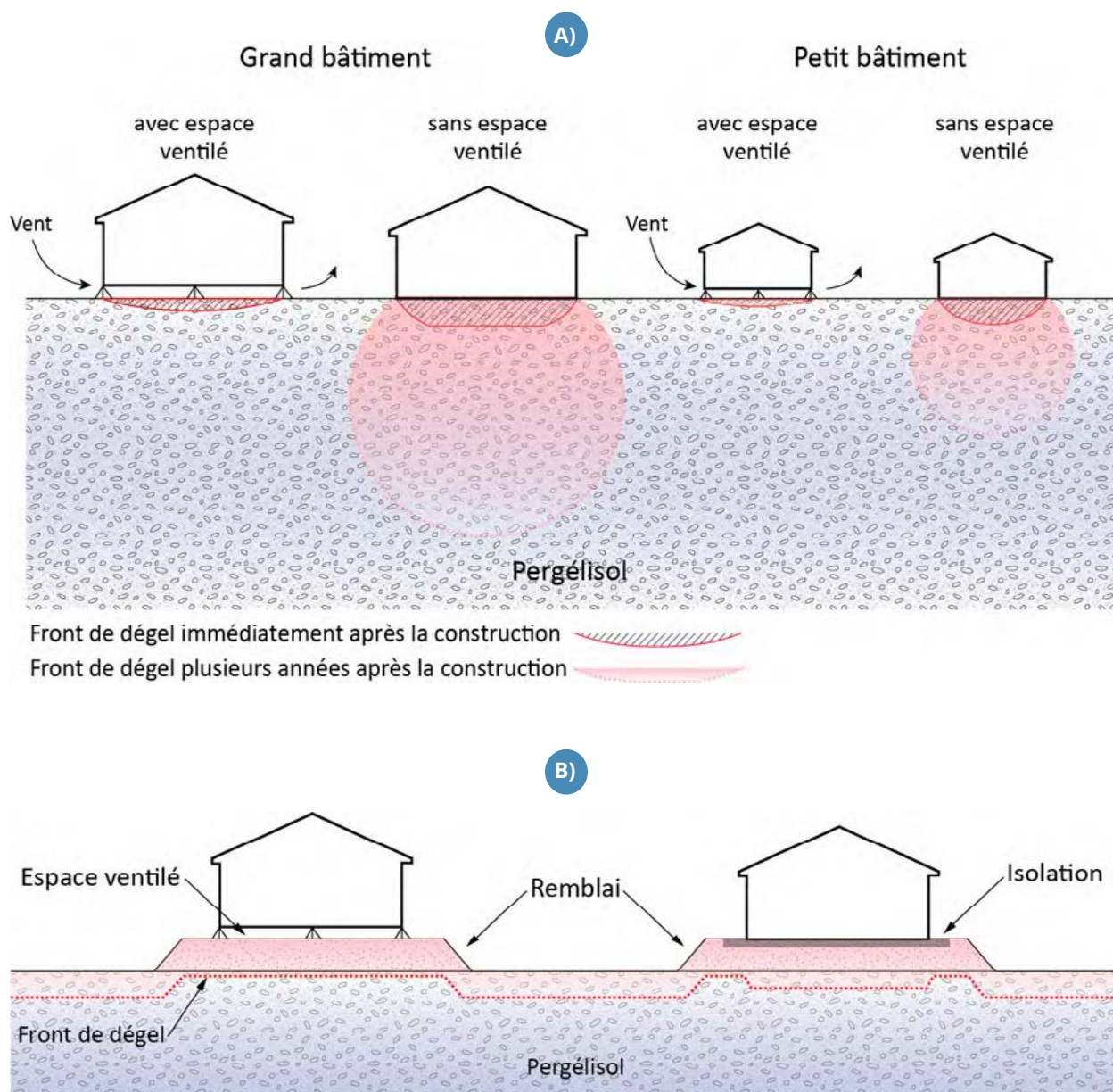


FIGURE 5.55 : A) POSITIONS DU FRONT DE DÉGEL SOUS DES BÂTIMENTS CHAUFFÉS EN FONCTION DE LEUR DIMENSION, DU TYPE DE FONDATION ET DU TEMPS. B) DEUX TYPES DE SYSTÈMES DE FONDATION QUI REPOSENT SUR UN REMBLAI GRANULAIRE.

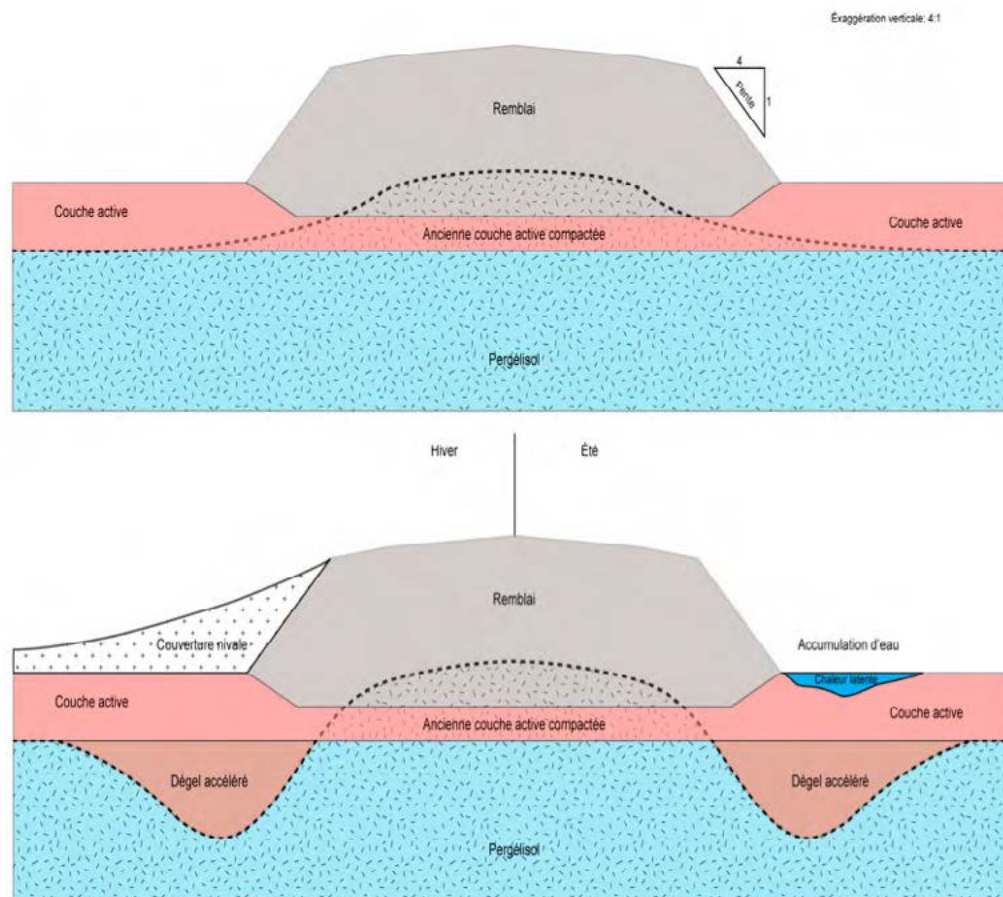


FIGURE 5.56 : RÉAJUSTEMENT THERMIQUE ANTICIPÉ DU PERGÉLISOL APRÈS LA CONSTRUCTION D'UN REMBLAI SANS ET AVEC DES ACCUMULATIONS DE NEIGE ET D'EAU EN MARGE DU REMBLAI (TIRÉ DE L'HÉRAULT ET AUTRES, 2012).

5.3.5 Impacts des changements climatiques sur le pergélisol

Étant donné la thermodépendance des propriétés mécaniques du pergélisol ainsi que l'occurrence, l'amplitude et le rythme de certains processus qui s'y développent (ex. : fluage), il est impératif, lors de la conception d'une fondation sur un sol sensible au dégel, de considérer l'évolution future du climat et son impact sur le régime thermique du sol. Une augmentation des températures à la surface du sol causée par la perturbation des conditions de surface ou par une modification du climat va nécessairement provoquer un réchauffement des températures du pergélisol. Dans les secteurs où les sols sont riches en glace, les fondations des bâtiments et des infrastructures seront alors soumises à des tassements plus importants et les terrains en pente raide, stables jusque-là, pourraient alors devenir instables.

De nombreuses études sur les changements climatiques dans les régions nordiques font état d'un réchauffement des températures de l'air et du sol survenu depuis une trentaine d'années dans l'ouest de l'Arctique et plus récemment au Nunavik (Osterkamp et Romanovsky, 1999; Chouinard et autres, 2007; Akerman et Johansson, 2008; Smith et autres, 2010). Les données météorologiques récemment compilées pour le Québec septentrional témoignent, depuis l'année charnière de 1994, d'une hausse des températures moyennes de l'air dans la plupart des communautés du Nunavik. Avec les augmentations des températures moyennes de l'air au Québec nordique, le régime thermique et la dynamique du pergélisol se sont modifiés (Smith et autres, 2012) et plusieurs études font déjà état des conséquences directes de ce réchauffement sur les communautés et les environnements nordiques (ACIA, 2007).

À long terme, l'augmentation des températures de l'air provoquera une diminution de l'épaisseur du pergélisol par le sommet et par la base. Quant à l'épaisseur de la couche active, elle augmentera de façon relativement synchrone avec le réchauffement des températures de l'air. Avec une propagation du front de dégel à des profondeurs plus importantes, des tassements différentiels liés à la fonte d'horizons riches en glace au sein du pergélisol, ainsi que des ruptures de la couche active aux endroits favorables, sont susceptibles de se produire. Il est important de mentionner que la réaction du pergélisol aux changements climatiques se produira à des vitesses différentes d'un site à l'autre en raison de la variabilité dans le temps et dans l'espace des propriétés thermiques des matériaux, des conditions environnementales locales et du climat. Chose certaine, le réchauffement du régime thermique du pergélisol apparaît inévitable. Les concepteurs doivent donc composer avec la présence d'un pergélisol en transition, susceptible de subir une perte de capacité portante et des risques d'instabilité en réponse au changement climatique.

Pour ce faire, des exercices de modélisation numérique peuvent être entrepris afin de simuler les mutations thermiques à venir dans le pergélisol (augmentation des températures dans le sol, épaississement de la couche active, formation de taliks, etc.) en réponse aux changements climatiques. Ce type d'exercices peut compter sur des hypothèses de changement climatique pour lesquelles des projections du climat futur sont générées à l'aide de modèles physiques complexes. Ces sorties de modèles sont des représentations plausibles de climats futurs qui sont cohérentes avec les hypothèses d'émission de gaz à effet de serre et les connaissances actuelles de leurs effets sur le climat (ACIA). Ces projections climatiques sont, depuis quelques années, utilisées comme intrants dans des modèles de simulations géothermiques ayant pour objectif de simuler l'évolution du régime thermique du pergélisol (Sazonova et Romanovsky, 2003; Zhang et autres, 2008; Alfaro et autres, 2009; L'Hérault et autres, 2012; 2014; 2015). Il est à noter que malgré leur capacité à simuler adéquatement la réponse thermique d'un sol à un phénomène d'ordre climatique, les modèles géothermiques demeurent une schématisation de la réalité où la stratigraphie et les propriétés thermiques des sols qui les définissent demeurent très simplifiées. Cette simplification de la réalité, où l'attribution des propriétés thermiques des sols est basée sur des mesures en laboratoire et des calculs théoriques et où l'intégration de la variabilité spatiale et temporelle des variables climatiques et environnementales locales (précipitations, écoulement d'eau, couverture nivale) est très limitée, ajoute de nombreuses incertitudes. Il est donc nécessaire de considérer avec prudence tous résultats de modélisation numérique. Malgré les incertitudes rattachées à de tels exercices, ceux-ci permettent néanmoins d'anticiper les réactions thermiques potentielles du pergélisol en réponse à la modification du climat et d'évaluer les impacts futurs possibles sur la stabilité de l'infrastructure au cours de sa vie utile.

Pour le Nunavik, six sorties de températures de l'air provenant du modèle régional canadien du climat (MRCC) sont disponibles pour mener à terme des exercices de modélisation numérique du pergélisol jusqu'à l'horizon 2050. Les résultats des scénarios optimiste (AEV) et pessimiste (AHA) du MRCC représentent approximativement les deux extrêmes climatiques pour l'ensemble des données disponibles. Les données climatiques qui alimentent les deux séries du MRCC retenues proviennent de deux modèles globaux différents. La série AEV, pilotée à ses limites latérales par le modèle CGCM3, présente les projections les plus froides et est considérée comme un scénario optimiste. À l'opposé, la série AHA, pilotée à ses limites par le modèle global ECHAM5 (Institut Max-Planck), constitue la sortie du MRCC la plus chaude (scénario pessimiste). La figure 57 présente un exemple des différentes sorties climatiques pour la région de Tasiujaq. Pour le Nunavik, l'ensemble des séries du MRCC utilisées pour forcer les modèles géothermiques projette une augmentation moyenne des températures de l'air d'environ 3 °C à l'horizon 2050 (Tableau 5.6). Toutefois, cette augmentation ne sera pas uniforme sur l'ensemble du territoire. Trois zones de changements de température ont été établies par Barrette et autres. (2013). Il s'agit de la zone nord (Quaqtaq, Ivujivik et Puvirnituq), du centre est du Nunavik (Tasiujaq, Aupaluk et Kuujuaq) et de la région de la baie d'Hudson (Kuujuarapik, Umiujaq et Inukjuak) pour lesquelles une augmentation des températures moyennes annuelles de l'air, respectivement d'environ 3,2 °C, 2,8 °C et 3 °C, est anticipée d'ici 2050. Pour chacune des 14 communautés du Nunavik, les changements moyens de la température moyenne annuelle de l'air projetés à l'horizon 2050 à partir de six simulations du MRCC (°C) sont présentés dans le tableau 5.6. Sur une base saisonnière, ce réchauffement des températures de l'air projeté se traduit par une augmentation plus marquée des températures en hiver (de 2,8 à 4,6 °C) qu'en été (de 1,5 à 2,1 °C). Il faut noter qu'avec les changements climatiques, la quantité de précipitation (pluie et neige) et le régime des vents risquent également d'être modifiés. Ces variables climatiques devront être évaluées et considérées au besoin lors de la conception d'un système de fondation.

Lorsque les sorties des modèles climatiques sont utilisées comme intrants dans des modèles géothermiques ou dans le dimensionnement des systèmes de fondation, il importe de demeurer prudent dans l'interprétation et l'évaluation de la portée des résultats. Il a été démontré que les données provenant du MRCC présentent un biais froid et doivent impérativement être corrigées. Comme il est très difficile d'évaluer le nombre de processus climatiques ayant cours dans l'Arctique en raison de la faible couverture des stations météorologiques et de leur fiabilité, il est difficile d'évaluer les raisons précises pouvant expliquer ce biais. À l'origine de celui-ci, on peut toutefois penser au manque de connaissances sur la climatologie des régions nordiques ainsi qu'à une prise en charge déficiente de certains processus physiques intrinsèques au modèle. Parmi les nombreuses méthodes permettant de supprimer ce biais des données, celle décrite par Salzman et autres. (2007a et b) a été utilisée avec succès dans plusieurs exercices de modélisation géothermique du pergélisol au Nunavik (Barrette, 2010, L'Hérault et autres, 2012; 2014 et 2015) et préférée à d'autres en raison de sa simplicité d'utilisation.

Le degré de sensibilité du pergélisol au réchauffement climatique anticipée est principalement déterminé par sa température et la quantité de glace qu'il contient. L'approche la plus sécuritaire pour construire et maintenir des infrastructures sur le pergélisol consiste sans contredit à choisir des secteurs où les conditions de pergélisol sont peu ou pas sensibles au dégel. La mauvaise conception d'une fondation, le fait de ne pas tenir compte des impacts d'une infrastructure sur les facteurs environnementaux locaux (enneigement et drainage) ou une évolution surprenante du réchauffement climatique en dehors du spectre établi par les scénarios climatiques auront ainsi des conséquences limitées. Si ce n'est pas possible, la norme CAN/CSA-PLUS-4011-10 présente une approche de gestion du risque intéressante, basée sur la sensibilité du pergélisol sur le site d'implantation (température, type de matériau, teneur en glace, etc.), la résilience du type de fondation et les conséquences d'une rupture potentielle du bâtiment sur la sécurité et la qualité de vie de la population, l'environnement et l'économie au sein d'une communauté. Ce type d'analyse du risque s'avère nécessaire dans la sélection du site d'implantation et la conception des fondations. Elle permet de déterminer le niveau de détails requis pour l'investigation géotechnique du site ainsi que la complexité du système de fondation nécessaire afin de garantir la stabilité structurale de l'infrastructure face à l'incertitude climatique. Au niveau d'une communauté, une telle analyse permet de planifier le développement des infrastructures en vue d'un aménagement harmonieux et durable sur le pergélisol dans un contexte de changement climatique. Pour le Nunavik, au cours des dernières années, des cartes de potentiels de construction en fonction des conditions du pergélisol et des pentes ont été réalisées pour chaque communauté (Allard et autres, 2010, L'Hérault et autres, 2012 et Carboneau et autres, 2015). Même si ces cartes ne remplacent pas les études géotechniques, elles demeurent un outil utile d'aide à la planification lors de la phase préliminaire d'avant-projet.

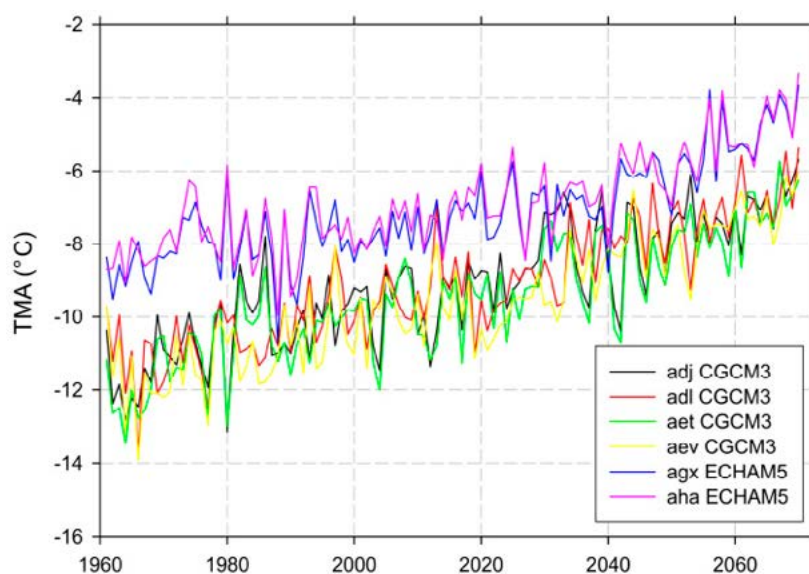


FIGURE 5.57 : LES SIX SORTIES DU MRCC DES TEMPÉRATURES DE L'AIR ENTRE 1961 ET 2070 POUR LA RÉGION DE TASIUJAQ.

AÉROPORT	MRCC (SORTIE AEV)	MRCC (SORTIE AHA)	MOYENNE DES SORTIES
Tasiujaq	+2,4 °C	+2,9 °C	+2,7 °C
Quaqtaq	+2,5 °C	+3,4 °C	+3,0 °C
Akulivik	+2,8 °C	+3,6 °C	+3,2 °C
Salluit	+2,7 °C	+3,7 °C	+3,2 °C
Puvirnituq	+2,7 °C	+3,5 °C	+3,1 °C
Kangirsuk	+2,5 °C	+3,4 °C	+2,9 °C
Inukjuak	+2,7 °C	+3,2 °C	+2,9 °C
Moyennes	+2,6 °C	+3,4 °C	+3,0 °C

TABLEAU 5.6 : CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE DE L'AIR PROJÉTÉS À L'HORIZON 2050 POUR DIFFÉRENTES COMMUNAUTÉS DU NUNAVIK.

5.4 CONCEPTION DE FONDATIONS SUR PERGÉLISOL

La construction de fondations de bâtiments dans les zones de pergélisol fait appel à des connaissances et à des techniques qui doivent être bien maîtrisées. Les techniques conventionnelles québécoises qui consistent à établir l'assise des fondations sous la couche superficielle de gel saisonnier ne peuvent être utilisées dans les dépôts meubles pergélisolés. Il devient en effet impraticable de s'appuyer sur un sol situé sous la base du gel lorsque celle-ci peut atteindre plusieurs centaines de mètres de profondeur. Lorsque le pergélisol est gelé, son assise est généralement stable. Toutefois, son dégel peut entraîner de graves problèmes de tassement et, par conséquent, d'importants dommages structuraux et architecturaux. Les tassements peuvent être substantiels, de l'ordre de plusieurs centaines de millimètres. Par exemple, un pergélisol riche en glace (disons 20 % au-delà de la porosité naturelle) peut subir un affaissement de l'ordre de 100 mm si son dégel s'étend sur seulement 500 mm de profondeur. La gravité de la situation lorsque le dégel est plus profond ou qu'il se produit dans un sol possédant une teneur en glace plus importante est facilement imaginable. Les coûts reliés à la construction de bâtiments au Nunavik sont très élevés. Il faut donc s'assurer que les fondations et les bâtiments restent fonctionnels pendant toute la vie utile anticipée. Plusieurs cas de détérioration importante de fondations y ont été répertoriés. La plupart du temps, les problèmes surviennent lorsque les fondations reposent directement sur un pergélisol riche en glace qui dégèle en raison du transfert de la chaleur du bâtiment dans le sol. D'autres éléments peuvent également contribuer au dégel du pergélisol et à l'épaississement de la couche active, notamment un mauvais drainage de surface, des conditions d'enneigement défavorables, une dénaturalisation de la couche de surface et l'augmentation des températures de l'air.

L'approche optimale à suivre lors de la conception et de la construction de fondations sur pergélisol sera dictée par le type de structure à construire, les contraintes logistiques, les conditions détaillées du site et l'impact potentiel de l'infrastructure sur son environnement (drainage, enneigement, température du sol, charge permanente, etc.). De manière générale, l'approche sera dictée par deux facteurs principaux, à savoir si le sol de fondation est stable ou instable au dégel. Dans le cas d'un sol de fondation stable au dégel, c'est-à-dire lorsque le sol est composé d'un matériau non gélif, bien drainé et ne contenant que très peu de glace, l'approche conventionnelle pour concevoir le système de fondation peut être utilisée telle qu'elle est décrite dans le Manuel canadien d'ingénierie des fondations (MCIF, 2013). Toutefois, malgré l'aspect stable du matériau, il importe de s'assurer que celui-ci ne contient pas de glace d'origine externe en excès telle que de la glace de glacier enfouie, de la glace d'injection ou de la glace en coin, qu'il ne se tassera pas de manière excessive en raison de sa compacité lâche et qu'il ne repose pas sur une couche de matériau sensible au dégel pouvant dégeler au cours de la durée de vie de la structure.

Aux endroits où le pergélisol pourrait être sensible au dégel, il est conseillé de concevoir la fondation de manière à préserver les conditions initiales du régime thermique du sol et de s'assurer de ne pas le perturber lors de la construction. À cette fin, il existe différents types de fondations selon la fonction du bâtiment, les caractéristiques thermiques et géotechniques du sol ainsi que les contraintes environnementales, techniques et logistiques.

Lors de la construction de la fondation, les bonnes pratiques préconisent le contrôle du drainage afin d'éviter toute accumulation d'eau ou tout ruissellement et de minimiser la perturbation du couvert végétal sur le chantier de construction et en périphérie. Advenant l'impossibilité d'exécuter les travaux pendant l'hiver, il est possible de préserver la végétation en la recouvrant d'une couche de matériau granulaire non gélif qui servira de surface de travail. Il est important de savoir qu'il est pratiquement impossible de restaurer les conditions de surface une fois qu'on a procédé au remblaiement, par conséquent, la surface de travail doit faire partie intégrante du concept en tant qu'élément permanent de ce dernier.

Dans l'impossibilité de préserver le régime thermique initial du sol, il est possible de dégeler et de consolider le sol ou d'excaver et de remplacer le sol inadéquat (gélif et riche en glace) par un matériau approprié. Il faut noter que ce type de procédure requiert du temps, une bonne planification, qu'il est plus coûteux et ne s'applique qu'à certains cas particuliers. Par exemple, cette procédure peut être envisagée dans la zone de pergélisol discontinu, lorsque celui-ci est de faible épaisseur, ou dans la zone de pergélisol continu, lorsque le dépôt riche en glace est mince, superficiel et repose sur un substrat stable au dégel. Si la perturbation du régime thermique est inévitable, mais que l'amplitude des tassements anticipés au cours de la durée de vie utile du bâtiment est jugée acceptable, l'utilisation de fondations ajustables ou monocoques assorties d'un plan de maintenance périodique de mise à niveau peut être envisagée, mais il demeure des cas spéciaux qui doivent être méticuleusement évalués. De manière générale, les conceptions qui permettent une dégradation thermique du pergélisol sont utilisées lorsque le pergélisol est composé de matériau stable au dégel, que l'amplitude des tassements anticipés est considérée dans la conception du type de fondation ou qu'il s'agit d'un bâtiment temporaire.

Le processus de conception qui sera décrit dans la section 5.4.1 ne s'applique qu'aux particularités des fondations construites sur pergélisol; il ne remplace pas le processus conventionnel du MCIF qui porte essentiellement sur la mécanique des sols et des roches, sans égard aux considérations techniques et logistiques qui s'appliquent au pergélisol et au contexte géographique particulier du Nunavik. Le processus proposé dans ce guide respecte, dans une certaine mesure, les principales étapes nécessaires à la conception de fondations dans un climat tempéré (MCIF, 2013), mais il a été adapté afin d'intégrer les spécificités des climats arctiques et subarctiques ainsi que celles du pergélisol. À ce titre, les ouvrages suivants, pour ne nommer que les principaux, portant sur l'ingénierie des régions froides, ont été consultés :

- *Geotechnical Engineering for Cold Regions* (Andersland et Anderson, 1978)
- *Permafrost : Engineering Design and Construction* (Johnston, 1981)
- *Arctic and Subarctic Construction Foundations for Structures* (U.S.A. Department of the Army and the Air Force, 1983)
- *Frozen Ground Engineering* 2nd Edition (Andersland et Ladanyi, 2004)
- *Manuel canadien d'ingénierie des fondations* 4^e édition (SCG, 2013)
- Les standards internationaux (ASTM, CSA, CAN/BNQ)

5.4.1 L'approche de conception des fondations sur pergélisol

Dans les zones de pergélisol, il est plus rare de faire face à des problématiques de capacité portante pour les petits bâtiments, car tant que le sol demeure gelé, il offre généralement une portance acceptable. Les problèmes surviennent généralement lors du dégel d'un sol riche en glace qui perd alors la presque totalité de sa capacité portante. Pour cette raison, lors de la conception d'une fondation sur pergélisol, il est essentiel de considérer les aspects rhéologiques, c'est-à-dire d'évaluer l'effet d'une charge sur le sol de fondation ainsi que les aspects thermiques, étant donné que le comportement mécanique d'un sol gelé est thermodépendant. Ainsi, la conception de fondation dans les régions froides requiert une bonne évaluation des caractéristiques géotechniques du sol de fondation et de l'amplitude des changements de température du sol en surface et en profondeur actuelles et futures afin de bien évaluer les déformations potentielles du sol sur une base saisonnière, interannuelle et pluriannuelle. Étant donné que le terme pergélisol réfère à un état d'équilibre thermique transitoire du sol avec le climat, les conditions de surface et les propriétés thermiques des matériaux en place, et que cet état thermique définit ses propriétés mécaniques, son évaluation nécessite une approche légèrement différente de celle normalement utilisée dans une zone non pergélisolée.

Lors de la planification de la construction, il importe de déterminer si le site étudié se trouve dans une zone de pergélisol sensible au dégel, d'étudier les conditions du sol de fondation et de tenir compte des éléments susceptibles de modifier l'équilibre thermique du site. Si le pergélisol du secteur étudié est riche en glace, il faudrait vérifier s'il est plus avantageux de choisir un autre secteur. Les fondations choisies doivent être robustes, adaptées aux conditions du site et planifiées avec des marges de sécurité suffisantes pour offrir le niveau de service escompté pour toute la durée de vie de l'ouvrage, en considérant l'impact du réchauffement climatique sur l'épaississement de la couche active et la température du pergélisol.

Une bonne planification de la construction est à la base de la réussite d'un projet qui se situe dans une zone de pergélisol. C'est au cours de ce processus que les performances escomptées et l'approche qu'il convient d'adopter sont définies, en tenant compte des différents facteurs susceptibles d'influencer le dimensionnement et la sélection du type de fondation le plus adéquat pour un site et un projet donné. Dans plusieurs situations, ce processus peut se décliner en fonction des besoins du projet, mais il se résume essentiellement en quatre phases : l'étude de faisabilité (définition du projet et évaluation préliminaire du site), la conception préliminaire, la conception finale et l'exécution (Figure 5.58).

L'étude de faisabilité est essentielle dans tout projet, mais elle l'est tout particulièrement lorsque le concepteur ne connaît pas bien le secteur, que celui-ci n'est pas développé ni documenté ou qu'il s'agit d'un projet d'envergure. L'objectif de cette phase consiste à évaluer globalement la distribution des matériaux géologiques et leurs caractéristiques géotechniques et de déceler la présence de conditions dangereuses ou de contraintes sévères qui pourraient compromettre la stabilité de l'infrastructure, la sécurité des usagers ou entraîner d'importants coûts pour rendre les conditions du site acceptables. À la suite d'une telle étude, il est possible que les sites à haut risque soient abandonnés, forçant les responsables du projet à chercher un site dont les conditions seront plus favorables. Pour les sites de piètre qualité, l'étude de faisabilité peut proposer une utilisation optimale du site pour éviter les secteurs les plus problématiques et ainsi réduire les coûts de construction. Selon la nature du projet, les sites qui ne sont pas favorables à la construction n'auront pas les mêmes caractéristiques. Ce sont également les informations recueillies concernant les caractéristiques du site (considérations environnementales rhéologiques, thermiques et climatiques) qui dicteront la nécessité de procéder à une étude approfondie et détaillée et les outils et les méthodes qui seront utilisés. Si à la suite de cette étude aucune contrainte sévère n'est révélée, une conception préliminaire, accompagnée d'une estimation des coûts, peut être réalisée.

La phase de conception préliminaire débute lorsque le site d'implantation, la dimension ainsi que la charge utile du bâtiment sont définis. Cette phase consiste à sélectionner l'option du type de fondation et de dimensionnement la plus économique fournissant un coefficient de sécurité raisonnable contre une rupture du sol sous la charge utile anticipée. Dans plusieurs projets, particulièrement pour les projets de plus faible envergure, il est fréquent de combiner la phase de faisabilité avec la phase de conception préliminaire.

Dans les secteurs plus problématiques, si la conception préliminaire conduit à des solutions trop coûteuses ou inacceptables du point de vue technique, des solutions de remplacement doivent être envisagées. Au cours de ce processus itératif, le concepteur peut devoir changer le type de fondation, son emplacement ou ses dimensions, modifier la structure ou le sol de la fondation ou prévoir des étapes de construction influençant favorablement le comportement du site en vue de diminuer les coûts tout en assurant la stabilité de l'infrastructure. Des informations supplémentaires sont souvent nécessaires afin d'améliorer les critères de conception, ce qui peut nécessiter une reconnaissance approfondie sur le site. Cette reconnaissance peut impliquer des forages avec récupération d'échantillons non perturbés, des levés géophysiques, des analyses en laboratoire, des simulations géothermiques afin d'évaluer les déformations liées à la fonte, au tassement et à la consolidation susceptibles de se développer sous la charge utile anticipée et au cours de la durée de vie de l'infrastructure. Advenant que les solutions de remplacement envisagées ne parviennent pas à satisfaire les exigences du projet, le site d'implantation préalablement choisi peut être ultimement abandonné. Dans ce cas, le nouveau site devra également faire l'objet d'une reconnaissance.

Lors de la phase d'exécution, particulièrement lors de la construction d'une fondation profonde, il est possible de rencontrer des conditions qui ont échappé à l'étude détaillée. Des analyses plus poussées du sol pourraient alors être requises afin d'apporter des informations pertinentes pour valider la conception finale qui pourrait devoir être changée à la lumière de ces nouvelles données. C'est également lors de cette phase que l'instrumentation sera installée afin de faire le suivi des paramètres jugés importants pour la performance et la stabilité de l'infrastructure. Ces capteurs peuvent servir de système d'alarme dans la prévention d'une éventuelle rupture de

la fondation. Il peut aussi s'agir de câbles à thermistances pour faire le suivi du régime thermique dans le sol et évaluer la performance d'un système de refroidissement ou de capteurs de pression, de mouvement du sol ou de niveau d'eau.

Il est important de mentionner que la conception de fondations demeure un processus itératif au cours duquel les paramètres de la fondation sont modifiés jusqu'à l'obtention d'un coefficient de sécurité satisfaisant. Ainsi, au fur et à mesure que la compréhension du comportement du site s'améliore, les critères de conception sont susceptibles de changer.

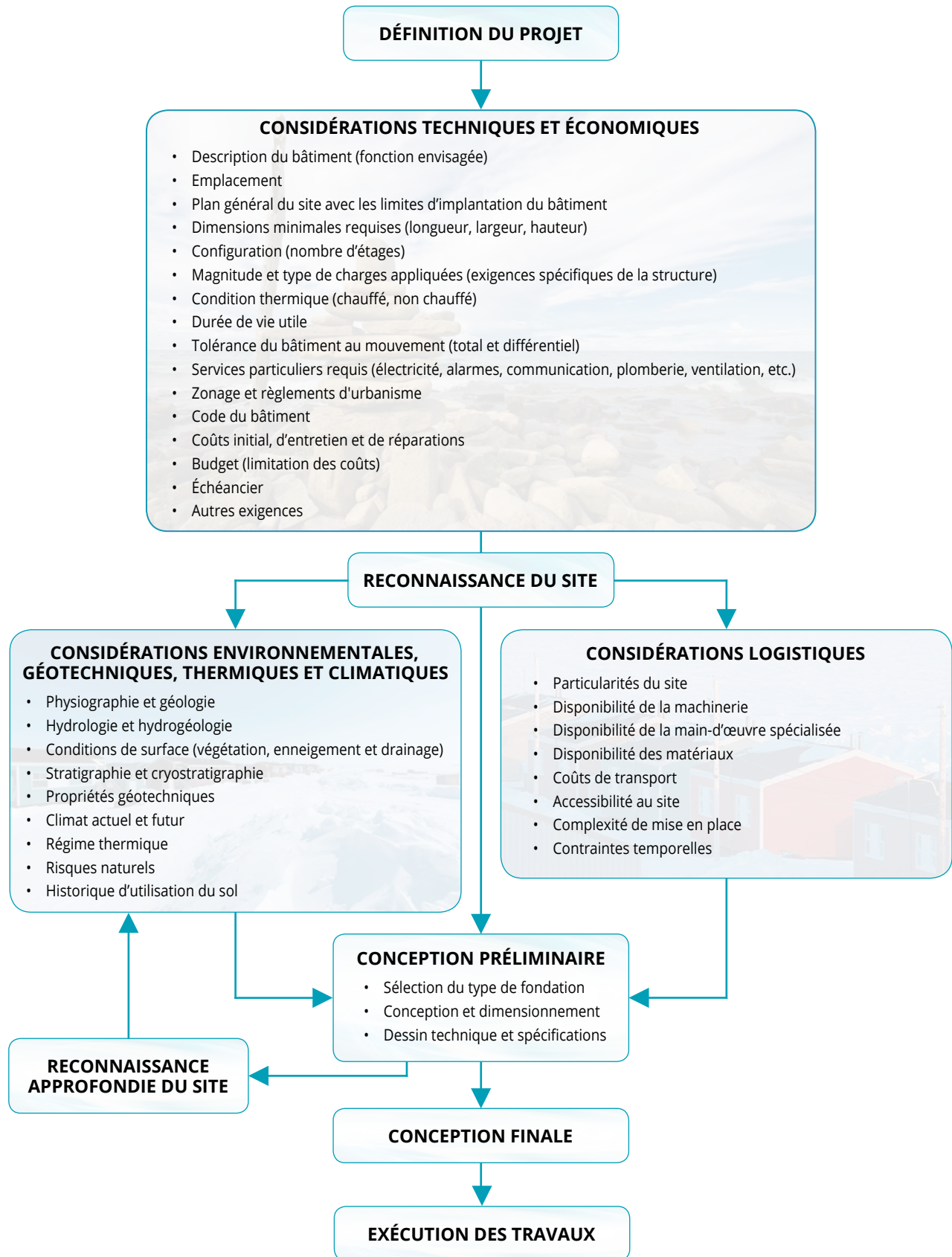


FIGURE 5.58 : APPROCHE DE CONCEPTION DES FONDATIONS SUR PERGÉLISOL.

5.4.2 Définition du projet (considérations techniques et économiques)

La première étape dans la conception d'un système de fondation sur pergélisol consiste à définir le projet et ses exigences (caractéristiques techniques) en fonction des besoins du client. À cette étape, les besoins du client en matière de fonction du bâtiment, de dimensions, de configuration et de localisation sont conceptualisés par un architecte et un ingénieur chargés de fournir les premières esquisses du bâtiment. Les informations techniques issues de ce processus permettront à l'ingénieur de relever les manques qui devront être comblés au point de vue géotechnique, une étape qui précède le choix du type de fondation et son dimensionnement. L'information nécessaire à la conception du système de fondation sera compilée lors d'une enquête préliminaire, et complétée au besoin lors d'une reconnaissance du site d'implantation, plus ou moins approfondie selon la quantité et la qualité de l'information disponible, la complexité de la structure à construire et les caractéristiques physiques du milieu (propriétés géotechniques, drainage, topographie, etc.). Afin de permettre à l'ingénieur de bien comprendre l'influence de la structure sur le milieu, les questions suivantes doivent être abordées et résolues au cours du processus de définition du projet :

- Description du bâtiment (fonction envisagée)
- Emplacement
- Plan général du site avec les limites d'implantation du bâtiment
- Dimensions minimales requises (longueur, largeur, hauteur)
- Configuration (nombre d'étages)
- Magnitude et type de charges appliquées (exigences spécifiques de la structure)
- Condition thermique (chauffé, non chauffé)
- Durée de vie utile
- Tolérance du bâtiment au mouvement (total et différentiel)
- Services particuliers requis (électricité, alarmes, communication, plomberie, ventilation, etc.)
- Zonage et règlements d'urbanisme
- Code du bâtiment
- Coûts initial, d'entretien et de réparations
- Budget (limitation des coûts)
- Échéancier
- Autres exigences

5.4.3 Reconnaissance du site (étude géotechnique)

Tôt dans le processus de conception, c'est-à-dire une fois que le projet a été défini et ses exigences déterminées, le promoteur doit entreprendre une reconnaissance du site d'implantation. L'objectif de cette étape est de rassembler les renseignements qui lui permettront de caractériser les conditions géotechniques, hydrologiques et environnementales du site. Cette étape est primordiale pour s'assurer que la conception, la construction et l'entretien du bâtiment tiendront compte des conditions qui lui sont propres. La reconnaissance du site doit être effectuée par des ingénieurs et des professionnels qui possèdent une solide expertise dans le domaine du pergélisol.

Généralement, la reconnaissance du site se fait en deux étapes : l'enquête préliminaire et l'exploration de terrain. L'enquête préliminaire consiste à recueillir et à revoir les informations disponibles concernant le site, alors que l'exploration de terrain sert à valider cette information et à la compléter au besoin en effectuant des travaux sur le terrain. Cette dernière étape implique une visite des lieux pour en évaluer les conditions géotechniques, ce qui peut nécessiter des sondages, des excavations, des forages avec ou sans échantillonnage et des levés géophysiques. C'est également au cours de cette visite sur le terrain que des informations sur le comportement des structures voisines du site ou des renseignements provenant de l'expérience locale pourront être compilés. L'étendue de la reconnaissance du site sera déterminée par la complexité de celui-ci (ex. : la variabilité des conditions souterraines et la sensibilité des sols au dégel), le type de projet (ex. : sa dimension, sa durée de vie utile, les charges utiles, sa tolérance au mouvement, etc.) et la quantité et la qualité de l'information recueillie lors de l'enquête préliminaire. Par conséquent, la nécessité de réaliser des forages et des levés géophysiques, le nombre, l'espacement et la profondeur de ceux-ci, le prélèvement d'échantillons, la réalisation d'essais in situ et d'analyses en laboratoire dépendent de la combinaison du projet et du site et des défis qui en découlent. C'est à un géotechnicien d'expérience de déterminer l'étendue de cette reconnaissance et de superviser le travail.

Il demeure important de mentionner que la conception d'une fondation est un processus itératif. L'enquête préliminaire permet de définir, avec certaines limitations, les principales caractéristiques du site, dont certaines pourraient entraîner la modification du concept de fondation préliminaire, voire l'abandon du site. En fonction du concept et de l'information recueillie, l'ingénieur en géotechnique est en mesure d'adapter le programme d'investigation pour orienter les travaux d'exploration de manière non pas à chercher une information déjà connue, mais plutôt à la compléter.

Les études de reconnaissance de site sont plus complexes dans une zone de pergélisol qu'en région tempérée. L'étude du régime thermique n'est qu'un exemple des particularités qui doivent être considérées par les concepteurs. La présence de glace dans le sol gelé ou dans le roc fracturé, combinée à l'effet du dégel et du gel, peut considérablement affecter les propriétés des matériaux et causer des tassements et des soulèvements qui vont bien au-delà de ce que peut tolérer un bâtiment conventionnel. Au moment de la rédaction de ce guide, une norme sur les études géotechniques pour les fondations de bâtiments construites dans une zone de pergélisol (CAN/BNQ 2501-500) était en cours d'élaboration. Les sections suivantes reprennent les points essentiels de ces études.

5.4.3.1 Enquête préliminaire

L'objectif de l'enquête préliminaire est de compiler l'information locale la plus récente sur les conditions environnementales (climat, drainage, topographie, végétation) et les caractéristiques et les propriétés physiques des sols afin de dresser le portrait le plus fidèle possible des conditions rencontrées sur le site d'implantation. L'enquête préliminaire permet d'établir les enjeux et les défis à relever pour réaliser le projet et d'évaluer les exigences et les besoins qui devront être considérés lors de la reconnaissance du site. À cette étape, il s'agit de bien définir les particularités du projet et du site, notamment en considérant le type de construction prévue, la période probable de construction, le comportement des structures avoisinantes, les renseignements provenant de l'expérience locale, de l'observation des bâtiments existants et de la nature visible du roc superficiel, ainsi que la revue des autres informations disponibles.

Tout d'abord, il convient de déterminer le plus rapidement possible si le secteur où doit se faire la construction se situe dans une zone de pergélisol riche en glace ou dans une zone stable, composée de roc ou de sols pauvres en glace. L'inclinaison des pentes, une condition favorable au développement de processus de versant (glissement de terrain, gélifluxion, avalanche, etc.), et la proximité de cours d'eau (risque d'érosion, de thermo-érosion et d'inondation) sont des facteurs qui doivent être considérés dans l'évaluation de l'emplacement d'un nouveau bâtiment.

L'enquête préliminaire doit porter sur les éléments suivants :

Considérations environnementales, rhéologiques, thermiques et climatiques (Section 5.4.3.3) :

- Conditions climatiques locales
 - o Température de l'air (température moyenne annuelle et mensuelle, indice de gel, indice de dégel, etc.)
 - o Précipitation (solide et liquide)
 - o Vent (vélocité et orientation)
- Conditions de surface
 - o Végétation
 - o Condition d'enneigement
 - o Drainage superficiel
- Physiographie et géologie
 - o Topographie, orientation et inclinaison du site
 - o Hydrologie
 - o Géomorphologie
 - o Géologie du socle rocheux
 - o Hydrogéologie
 - o Sismicité
- Pergélisol
 - o Températures du sol
 - o Description des sols gelés
- Historique d'utilisation du sol
- Projection climatique
 - o Température de l'air
 - o Précipitation
 - o Vent

Considérations logistiques (Section 5.4.3.4) :

- Particularités du site
- Disponibilité de la machinerie
- Disponibilité de la main-d'œuvre spécialisée
- Disponibilité des matériaux
- Coûts de transport
- Accessibilité au site
- Complexité de mise en place
- Contraintes temporelles

Pour permettre la réalisation de l'enquête préliminaire, une multitude de ressources sont actuellement disponibles. Parmi elles, des images satellites, des photographies aériennes, des levés lidar, des modèles numériques d'élévation, des cartes topographiques, des cartes de géologie et de géologie de surface, de risque d'avalanches et de mouvement de masse, des cartes sur les zones inondables, le pergélisol et la végétation, des relevés géophysiques, des documents techniques, des rapports géotechniques, des articles scientifiques, des plans de développement communautaire, des informations sur l'utilisation historique des terres existantes, des bases de données spatiales sur la température du sol et des données sur le climat et l'hydrologie. Divers organismes de partout au Canada recueillent des données sur la distribution, les caractéristiques et la température du pergélisol. Au Nunavik, les données liées au pergélisol sont plus détaillées pour les régions où de vastes études géotechniques ont été réalisées lors de grands projets, mais sont souvent fragmentaires et dispersées pour les régions où il y a eu peu de développement industriel et celles où il n'y en a jamais eu. Pour tout projet, les bases de données du gouvernement provincial et fédéral (MERN, MFFP, MTMDDET, MAMOT, MSP, MDDELCC, RNCAN, StatCan, CGC, etc.) constituent des sources appropriées. Beaucoup d'autres organismes qui recueillent, reçoivent ou gèrent des données liées au pergélisol peuvent également être contactés. Parmi ces organismes, on trouve l'Administration régionale Kativik, les instituts de recherche sur le Nord (Centre d'études nordiques), les universités, Ouranos et les firmes de génie-conseil en géotechnique.

5.3.4.2 Exploration de terrain

Une bonne connaissance des conditions du site d'implantation d'un bâtiment dans une zone de pergélisol est essentielle afin d'étayer le choix du concept et du dimensionnement de la fondation. Bien souvent, une étude documentaire méticuleuse de ces conditions est insuffisante. Il importe alors de procéder à une exploration de terrain afin de bien documenter les conditions géotechniques, rhéologiques et thermiques qui permettront d'assurer une performance satisfaisante de la structure tout au long de sa durée de vie utile.

L'objectif de l'exploration de terrain est de caractériser l'environnement géologique afin de déterminer la distribution spatiale et l'épaisseur des types de sols et de roches dans le secteur d'influence de la construction proposée, les conditions de drainage superficiel et souterrain avec leur variation saisonnière et les propriétés physiques et géotechniques des sols et des formations rocheuses. Il s'agit également d'évaluer les risques naturels, tels que l'instabilité des versants (glissement de terrain, éboulis, gélifluxion, avalanche, etc.), les failles actives ou potentiellement actives, la sismicité de la région, l'exposition à la submersion (inondation) ou à l'érosion, les mouvements de terrain (tassement, effondrement et soulèvement), ainsi que la réponse du sol lors d'un changement des conditions initiales (naturelles) provoqué par des travaux sur le terrain (surcharge, décharge, excavation) ou par une nouvelle construction et la qualité des matériaux qui seront utilisés (remblai, béton, etc.).

Lors de l'exploration de terrain, il est nécessaire de déterminer la zone d'influence latérale et verticale de l'infrastructure sur le sol ainsi que l'influence des facteurs environnementaux pouvant affecter l'infrastructure. Le champ d'investigation sera fonction de la taille du bâtiment, de sa charge, du type de fondation (superficielle ou profonde) et des conditions du sol. L'exploration de terrain peut inclure les tâches suivantes : une investigation du sous-sol par des forages, par excavation et par l'utilisation de méthodes géophysiques, un échantillonnage du sol ou de la roche, la réalisation d'essais in situ ou en laboratoire pour déterminer les propriétés géotechniques des matériaux et la mise en place d'une instrumentation pour la caractérisation et le suivi de certaines variables (température du sol, niveau d'eau, pression interstitielle, etc.). De manière générale, l'exploration de terrain doit inclure un minimum de trois forages d'une profondeur qui va bien au-delà de la couche active afin d'apporter des précisions sur les caractéristiques géotechniques du pergélisol. À partir de ces forages, il est possible de déterminer la stratigraphie des sols et de procéder à un échantillonnage de chacune des couches rencontrées afin de documenter les conditions de subsurface et les propriétés géotechniques qui y sont associées. La détermination des propriétés géotechniques telles que la granulométrie du sol, sa teneur en eau ou en glace, sa densité, sa consistance, sa résistance, sa conductivité thermique peut se faire en respectant les différentes normes en vigueur. Afin de compléter et d'étendre les observations de forage, l'exploration de terrain peut faire appel à des méthodes géophysiques (levés de résistivité, levés géoradar, prospections électromagnétiques, levés de sismique réflexion). L'utilisation exclusive de méthodes géophysiques pour déduire la stratigraphie et les conditions géotechniques n'est pas conseillée. Au cours de l'exploration de terrain, certains aspects peuvent devoir être documentés en vue de permettre une conception appropriée et optimisée du système de fondation. Ce sont, entre autres, les aspects suivants :

- Stratigraphie et cryostratigraphie
 - o Type et épaisseur des dépôts
 - o Cryostratigraphie (ASTM D4083)
 - o Profondeur du roc
 - o Nappe phréatique
 - o Profondeur maximale de dégel
- Régime thermique du sol
 - o Température du sol selon la profondeur (minimale, maximale, moyenne)
 - o Amplitude des températures selon la profondeur (minimale, maximale, moyenne)
 - o Épaisseur de la couche active
 - o Température de surface
- Propriétés géotechniques des matériaux
 - o Densité des sols in situ (CAN/BNQ 2501-058, CAN/BNQ 2501-060, ASTM D1556)
 - o Masse volumique apparente (ISO 17892-2, ASTM D7263)
 - o Densité des particules solides (CAN/BNQ 2501-070)
 - o Teneur en eau/glace (CAN/BNQ 2501-170, ASTM D2216)
 - o Salinité (ASTM D4542)
 - o Granulométrie (ASTM D6913)
 - o Plasticité (CAN/BNQ 2501-090, CAN/BNQ 2501-092, ASTM D4318)
 - o Classification des sols (ASTM D2487)
 - o Résistance (ASTM D7012., ASTM D7300, ASTM D5731)
 - o Force d'adhérence au gel (ASTM D5780)
 - o Qualité du roc (ISO 14689-1, ASTM D6032)
 - o Tassement et consolidation (ASTM D2435)
 - o Sensibilité au gel et au dégel (ASTM D5918.)
 - o Fluage (ASTM D5520)
 - o Propriétés thermiques (ASTM D4611, ASTM D5334)

5.4.3.3 Considérations environnementales, géotechniques, thermiques et climatiques

5.4.3.3.1 Géologie de surface, géomorphologie, stratigraphie, cryostratigraphie et propriétés géotechniques

La nature du sol est sans contredit l'un des facteurs les plus importants à considérer avant de construire une nouvelle fondation dans une zone de pergélisol. Une connaissance adéquate de la distribution spatiale et de l'épaisseur des dépôts meubles, de leurs caractéristiques géotechniques ainsi que de la profondeur qui les sépare du roc est essentielle afin d'évaluer le comportement futur de la fondation d'un bâtiment. Dans une zone de pergélisol, les unités géologiques de surface ne sont pas que de simples solides, mais des assemblages complexes de particules de compositions, de formes et de grosseurs variées contenant une proportion d'air et d'eau sous forme solide et liquide. Cet assemblage distinctif détermine les caractéristiques structurales et les propriétés géotechniques thermodépendantes du pergélisol. Que ce soit un dépôt d'argile marine, un till glaciaire,

un autre dépôt meuble ou même un roc fracturé, un pergélisol riche en glace peut être problématique pour des fondations. La perturbation thermique d'un pergélisol de cette nature, que ce soit par les activités de construction, le bâtiment en lui-même, la modification des conditions du site ou des facteurs environnementaux locaux (enneigement, drainage, etc.) et le réchauffement des températures de l'air peut provoquer des tassements considérables. De manière générale, on trouve deux principales classes de conditions de pergélisol, à savoir : les dépôts stables au dégel (roc et dépôts contenant très peu ou pas de glace) et les dépôts instables au dégel (dépôts quaternaires à granulométrie fine contenant beaucoup de glace). Lors de la reconnaissance du site (étude géotechnique), il importe de déterminer si le pergélisol du site prévu pour l'implantation d'un bâtiment est stable au dégel, car il s'agit ici d'un paramètre majeur qui influencera les critères de conception et la performance de la structure à long terme. Le repérage des zones riches en glace doit donc être abordé dès l'enquête préliminaire et poursuivi au besoin lors d'une phase exploratoire de terrain. C'est au moment de l'exploration de terrain qu'il est possible de préciser la stratigraphie et la cryostratigraphie des sols en place, en plus de déterminer certains paramètres géotechniques, par mesures in situ ou en laboratoire, qui sont jugés pertinents pour la conception du système de fondation.

Idéalement, le site choisi sera caractérisé par la présence d'un roc sain peu profond ou d'un dépôt à faible teneur en glace, souvent composé de sable et de gravier. Même lorsqu'il s'agit de roc, il est important de porter une attention particulière aux discontinuités ouvertes qui peuvent se gorger d'eau dans la couche active et soulever les blocs rocheux sous l'effet du gel. Dans le cas des sites renfermant des sols riches en glace, des précautions particulières devront être prises afin de maintenir le sol gelé advenant l'impossibilité de construire le bâtiment sur un site dont le dépôt n'est pas sensible au dégel. Toutefois, lorsque cela s'avère possible, c'est ce dernier qu'il convient de prioriser.

Au cours des cinq dernières années, des cartes exhaustives des conditions du pergélisol, développées pour les communautés du Nunavik, ont été produites par le Centre d'études nordiques (Allard et autres, 2010; L'Hérault et autres, 2013; Carboneau et autres, 2015). Les cartes disponibles couvrent les zones bâties, les zones prévues pour l'expansion et bien au-delà afin d'offrir une vision élargie du territoire aux preneurs de décision. Il est important de mentionner qu'en raison de la grande variabilité spatiale tant horizontale que verticale des teneurs en glace à l'intérieur d'une même unité géologique de surface, les cartes des conditions de pergélisol disponibles sont avant tout un outil d'aide à la planification et ne remplacent pas les études géotechniques d'avant-projet. De nombreuses études, qui portent plus particulièrement sur les infrastructures de transport construites sur pergélisol du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDÉ), contiennent également de nombreuses informations utiles concernant la géologie de surface, la géomorphologie, la stratigraphie, les conditions de pergélisol et les propriétés géotechniques observées dans les villages du Nunavik (Allard et autres, 2006; L'Hérault et autres, 2012; 2014; 2015).

5.4.3.3.2 Conditions climatiques locales actuelles et futures

Les données climatiques telles que la température de l'air vont fournir des informations importantes pour la conception des paramètres techniques du système de fondation, mais également des renseignements utiles pour la planification des travaux, à savoir la période la plus propice pour l'exécution de certains travaux de construction ou la mise en place des composants de la fondation. De manière générale, la température moyenne annuelle de l'air diminue avec la latitude ou l'élévation. Par exemple, la normale climatique pour la période de 1981 à 2010 est de $-5,4^{\circ}\text{C}$ pour Kuujuaq (N $58^{\circ}06'$) et de $-9,3^{\circ}\text{C}$ pour Iqaluit (N $63^{\circ}45'$) (Environnement Canada, 2015). Au Nunavik, les températures de l'air les plus froides sont mesurées au centre de la péninsule de l'Ungava, d'une part en raison de l'altitude de la région, mais également de la distance qui la sépare du littoral. L'effet topographique sur la température de l'air s'observe également à l'échelle d'une communauté. Par exemple, la température de l'air à l'aéroport de Salluit est en général plus froide d'un degré Celsius que celle mesurée dans la vallée, et ce, sur une distance d'à peine deux kilomètres.

De nombreux paramètres peuvent être calculés à partir d'une série continue de données des températures journalières de l'air (TMJA), notamment ceux-ci :

- températures moyennes annuelles de l'air, minimales et maximales;
- températures moyennes mensuelles de l'air, minimales et maximales;
- début, durée et fin de la saison de gel;
- début, durée et fin de la saison de dégel;
- degrés-jour de gel (indice de gel);
- degrés-jour de dégel (indice de dégel).

L'indice de gel de conception recommandé par l'American Society of Civil Engineers (ASCE) pour la conception des fondations est la moyenne des indices de gel des trois hivers les plus froids des trente dernières années répertoriées. Pour l'indice de dégel servant à la conception, on applique le même principe, en utilisant la moyenne des indices de dégel pour les trois étés les plus chauds. Lorsque les données sont disponibles que pour une plus courte période, le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis (United States Army Corps of Engineers) suggère la méthode décrite par Linell et autres (1973), qui utilise aussi l'hiver le plus froid des dix dernières années.

Outre les données sur les températures, celles sur les précipitations apportent également certaines précisions au sujet du climat local qui sont pertinentes dans la conception du système de fondation. Les accumulations et la distribution de la neige sur un site représentent des paramètres qui doivent être considérés dans la conception, car ils peuvent affecter, directement ou indirectement, la performance du système de fondation en imposant une surcharge sur la structure et en modifiant le régime thermique du pergélisol. Au Nunavik, les accumulations de neige formées par le vent peuvent vite devenir problématiques et même désastreuses pour les fondations des bâtiments. En raison de leurs propriétés isolantes, les accumulations hâtives de neige en début de saison hivernale entravent le regel de la couche active à proximité des fondations et sont susceptibles d'entraîner un réchauffement des températures du pergélisol. La dynamique d'enneigement du site peut également avoir des conséquences sur la fonctionnalité du bâtiment et les opérations de maintenance.

Afin de bien évaluer la dynamique d'enneigement sur le site d'implantation, il est recommandé, lors de l'enquête préliminaire, de consulter des photographies aériennes du site au printemps et de procéder à des entrevues avec des membres du personnel du département de travaux publics de la communauté qui s'occupe des opérations de déneigement ou avec toute autre personne pouvant apporter des précisions à ce sujet. Pour les secteurs où l'enneigement est considéré comme un paramètre critique et pour lesquels il y a peu d'informations disponibles, la phase de reconnaissance approfondie du site devra inclure une visite sur le terrain au printemps afin de délimiter les patrons de distribution saisonnière de la neige. Et pour tenir compte de l'effet de la charge de la neige sur la structure, le concepteur peut se référer à la norme canadienne CAN/CSA-S502-14, intitulée « Gestion des risques liés aux charges neigeuses sur les infrastructures du Grand Nord canadien ». Pour la planification du drainage, le concepteur peut se référer à la norme canadienne CAN/CSA-S503-15, intitulée « Planification, conception et maintenance de systèmes de drainage dans les communautés du Nord ».

Le régime des vents doit être considéré non seulement en fonction de son incidence sur la structure, mais également sur la distribution de la neige au sol. En effet, les longues périodes de vent continu et les saisons hivernales prolongées sont des éléments qui contribuent à augmenter la quantité de neige accumulée sous le vent des bâtiments, c'est-à-dire du côté opposé à la face exposé au vent (Figure 5.59 A). Le diagramme de fréquence des vents est un outil graphique qui permet de présenter la direction et la force moyenne du vent à un endroit donné (Figure 5.59 B). La direction peut être fortement influencée par la topographie du site et par la présence d'obstacles environnants. Au Nunavik, il faut anticiper des vents pouvant atteindre une vitesse considérable. Par exemple, les épisodes de vents violents au cours desquels les vitesses mesurées atteignent plus de 100 km/h sont fréquents à Salluit (Allard et autres, 2010). La pression qu'exerce le vent sur les bâtiments doit être prise en compte dans la conception des fondations. Pour des pieux, par exemple, il importe de prévoir un contreventement de la partie exposée afin d'assurer une rigidité latérale suffisante. Pour les fondations superficielles sur radier, il peut être nécessaire de fixer le bâtiment au système de fondation, voire de l'ancrer au sol à l'aide d'attaches incorporées au remblai granulaire.

Le concepteur devra faire preuve de jugement dans la sélection des indices de conception, surtout lorsque la période de données disponibles est courte. Pour la majorité des communautés du Nunavik, les séries de données climatiques sont discontinues ou trop courtes pour permettre de calculer des normales climatiques. Il faut par conséquent être prudent lorsque des données moyennes sont utilisées, car dans la pratique, une bonne représentativité statistique du climat nécessite une trentaine d'années d'observation. Malgré ces données fragmentaires, il est possible d'obtenir des données climatiques reconstituées issues de réanalyses (NARR et CFSR), qui fournissent une estimation acceptable des paramètres du climat à l'échelle du globe dont la résolution spatiale maximale est de 38 km x 38 km. Même si les réanalyses intègrent des données observées et qu'elles offrent un portrait assez réaliste, il peut exister des différences importantes entre les paramètres mesurés et ceux qui ont été reconstitués, bref des incertitudes inhérentes à la représentation du climat actuel. Malgré ces incertitudes, les réanalyses sont un outil indispensable à l'étude du climat dans les secteurs où les mesures fragmentaires ne permettent pas de préciser certains paramètres climatiques.

Les changements climatiques anticipés au Nunavik se traduiront par une augmentation de la température de l'air et des précipitations, mais affecteront également la durée des saisons de gel et de dégel et la fréquence et l'intensité des épisodes climatiques extrêmes (orage, pluie abondante, tempête de vent, blizzard, etc.). Quoiqu'incertains et imprévisibles, ces changements climatiques anticipés doivent être considérés dans la conception des fondations. À ce sujet, le concepteur peut se référer aux données de projections climatiques proposées dans le modèle régional canadien du climat (MRCC) (Ouranos). Le guide technique canadien *Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation* (CAN/CSA-PLUS-4011-10) offre un cadre intéressant, illustré à la figure 5.60, qui permet de tenir compte des changements climatiques dans le processus de conception d'infrastructures sur pergélisol.

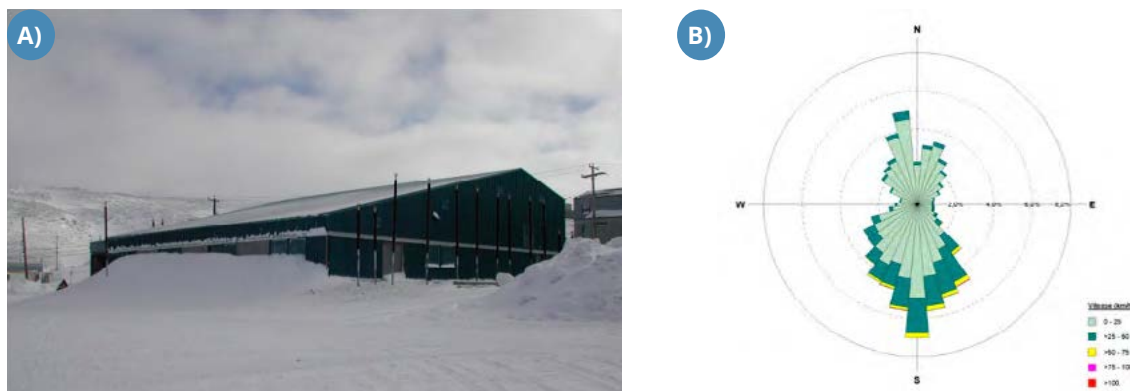


FIGURE 5.59 : A) ACCUMULATION IMPORTANTE DE NEIGE À PROXIMITÉ D'UN BÂTIMENT. B) DIAGRAMME DE VENT DE LA STATION SILA DANS LA VALLÉE DE SALLUIT (TIRÉ DE ALLARD ET AUTRES, 2010).

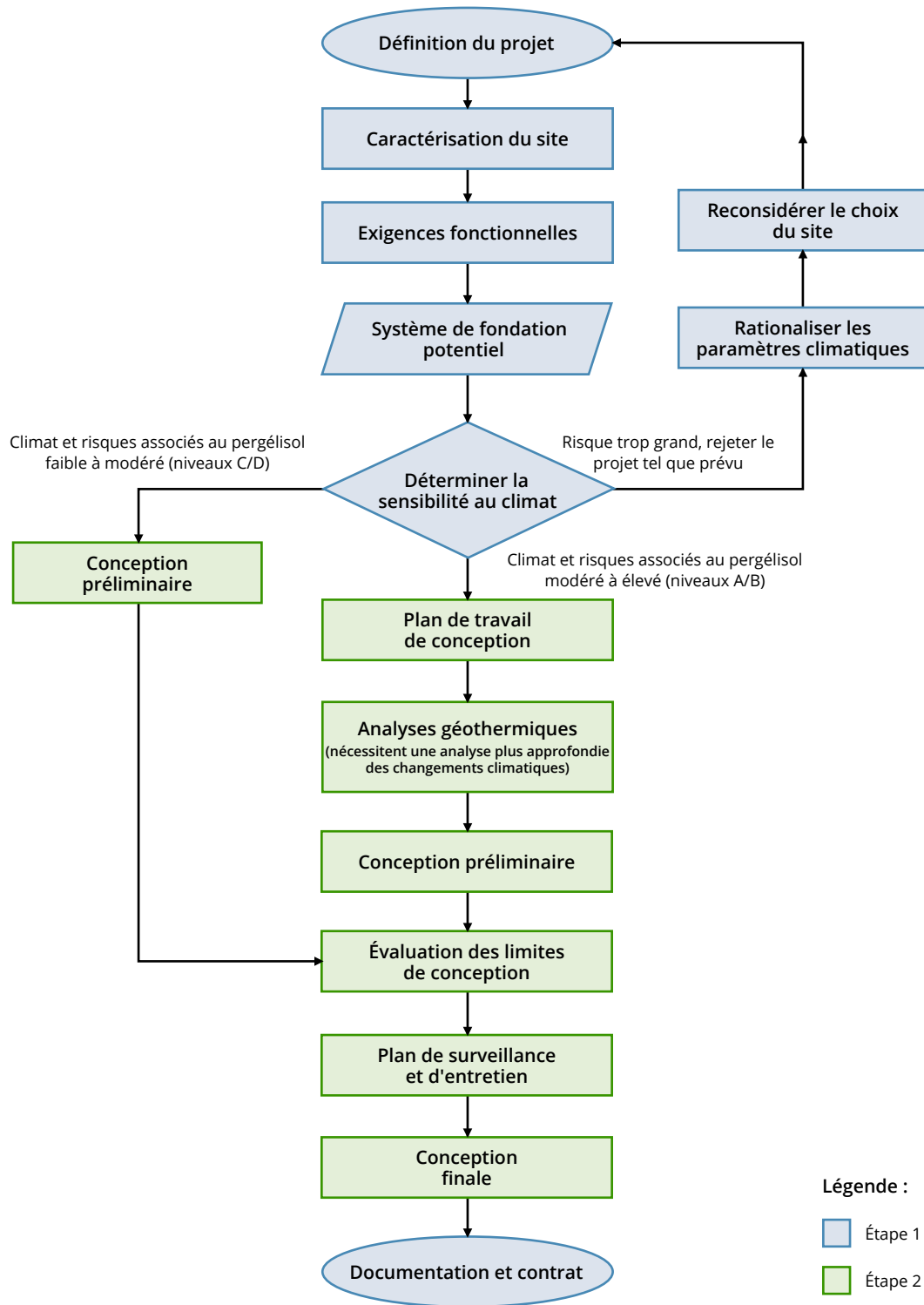


FIGURE 5.60 : ORGANIGRAMME POUR LA CONCEPTION D'INFRASTRUCTURES SUR PERGÉLISOL EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (TIRÉ DU GUIDE TECHNIQUE CAN/CSA-PLUS-4011-10 ET TRADUIT, « *TECHNICAL GUIDE : INFRASTRUCTURE IN PERMAFROST : A GUIDELINE FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION* », 6/01/2010. ISBN (S) : 9781554914081, NBR P. 112, CODE DE PRODUIT : 2420571).

5.4.3.3.3 Le pergélisol et le régime thermique des sols

La distribution du pergélisol est influencée par divers facteurs principalement d'ordre climatique, mais également géologique et environnemental. Au Nunavik, le pergélisol se divise en différentes zones en fonction de sa distribution, soit le pergélisol continu, discontinu abondant ($\geq 50\%$), discontinu et dispersé ($< 50\%$) et sporadique. Cette distribution respecte un gradient sud-nord le long duquel le pergélisol se présente sous sa forme sporadique dans les villages les plus au sud (ex. : Kuujjuarapik) pour graduellement occuper l'ensemble du territoire à l'exception des zones sous les plans d'eau et les rivières importantes. Par conséquent, à l'exception du village de Kuujjuarapik où le pergélisol se présente sous sa forme sporadique, la probabilité de devoir construire sur du pergélisol au Nunavik est très élevée. La carte de distribution du pergélisol produite par Allard et autres (2013) procure une information générale qui doit être validée par des études de reconnaissance sur le terrain avant de procéder à la construction de nouveaux bâtiments.

La présence du pergélisol est étroitement liée à la température de l'air. En théorie, une température moyenne annuelle de l'air égale ou inférieure au point de congélation ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) est l'une des conditions requises pour qu'il y ait présence de pergélisol. Toutefois, en pratique, ceci est rarement le cas en raison de l'influence des conditions de surface sur la température à la surface du sol, c'est-à-dire au sommet du pergélisol. Par exemple, la température de l'air qui est mesurée à environ 1,5 m du sol est généralement plus froide que celle mesurée à la surface du sol, particulièrement en hiver en raison de l'effet isolant de la neige. Pour cette raison, il est préférable de se baser sur les températures de surface pour évaluer sommairement la possibilité d'occurrence du pergélisol, son épaisseur et sa température.

L'utilisation de la température à la surface du sol, de préférence à celle de l'air, permet de tenir compte de l'influence de différents facteurs tels que la radiation nette, la végétation, le couvert nival, le relief et les propriétés thermiques du sol, sur la transmission de la chaleur entre l'atmosphère et la surface du sol. Selon les conditions de surface, la différence entre la température de l'air et celle à la surface du sol est parfois très importante. Cette différence justifie la détermination et l'intégration de ces conditions dites « limites » dans les exercices de modélisation du régime thermique du pergélisol. La schématisation et l'intégration de ces conditions représentent un défi considérable en raison de leur variabilité spatiale et temporelle ainsi que du peu de mesures in situ disponibles (type de végétation et épaisseur de l'enneigement). Néanmoins, à des fins de conception ou de simulations numériques, les températures de surface sont couramment estimées par un coefficient empirique nommé « facteur-n » (Johnston, 1981), défini comme le ratio des températures de surface sur les températures de l'air. L'utilisation d'un tel coefficient simplifie les transferts complexes de chaleur entre l'air et la surface du sol. Par exemple, plus ce coefficient se rapproche de 0, plus les conditions de surface atténuent les échanges thermiques entre l'atmosphère et la surface du sol. À l'inverse, si ce facteur est supérieur à l'unité, les conditions de surface amplifient ces échanges.

Pour un site donné, les facteurs-n sont généralement calculés sur une base saisonnière afin d'obtenir un facteur-n pour la saison de gel (n_g) et pour la saison de dégel (n_d). Pour déterminer la valeur des facteurs-n saisonniers, il est nécessaire de mesurer simultanément la température de l'air et la température à la surface du sol durant plusieurs cycles hivernaux et estivaux. Pour les sites où de telles mesures ne sont pas disponibles, des facteurs-n tirés de la littérature (Andersland et Ladanyi, 2004) peuvent être utilisés (tableau 5.7). Il est également possible d'estimer grossièrement la température de surface à l'aide d'une relation approximative suggérée par Smith et Burgess (2000) qui indique que la température moyenne annuelle à la surface du sol (TMAS) est généralement plus chaude d'environ $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ que la température moyenne annuelle de l'air (TMAA). Néanmoins, ces valeurs ainsi estimées doivent être utilisées avec prudence, car en raison des incertitudes qui y sont associées, elles peuvent conduire à surdimensionner le système de fondation, ou l'inverse.

CONDITIONS DE SURFACE	FACTEUR-N (n_f)	FACTEUR-N (n_d)
Neige (en surface)	1,0	s. o.
Revêtement sans neige ni glace	0,9	s. o.
Sable et gravier	0,9	2,0
Tourbe	0,5	1,0
Surface de sol minéral	0,33	1,22
Gravier (valeurs probables dans des conditions nordiques)	0,6-1,0 0,9 - 0,95	1,3 - 2
Revêtement en asphalte (valeurs probables dans des conditions nordiques)	0,29 - 1,0 ou plus 0,9 - 0,95	1,4 - 2,3
Revêtement en béton (valeurs probables dans des conditions nordiques)	0,25 - 0,95 0,7 - 0,9	1,3 - 2,1

TABEAU 5.7 : VALEURS DE FACTEUR-N EN SAISON DE GEL (n_f) ET DE DÉGEL (n_d) SELON LES CONDITIONS DE SURFACE (TIRÉ DE ANDERSLAND ET LADANYI, 2004).

Les diagrammes de type trompette permettent une excellente représentation graphique du profil thermique des sols en fonction de la profondeur. L'illustration et les caractéristiques de ce diagramme sont présentées dans la section 5.1.3 du présent chapitre. Ce type de diagramme est particulièrement utile au concepteur de fondations. Il permet notamment de présenter graphiquement les caractéristiques thermiques du pergélisol à l'état naturel (amplitude des températures, épaisseur de la couche active, épaisseur du pergélisol, etc.). Puis, suivant les calculs du régime thermique, il permet de présenter le profil de la température des sols à la fin de la vie utile du bâtiment et, si requis, pendant les phases transitoires. Cet outil devrait être utilisé le plus souvent possible.

Il est généralement accepté que les sols sont gelés dès que la température descend sous la barre de 0 °C. Cependant, il faut être particulièrement prudent lorsque les températures du sol avoisinent cette valeur. Dans le cas des argiles marines, lorsque la salinité est importante, il faut parfois que la température atteigne -2 °C pour que le sol gèle. Un pergélisol dont la température se situe près de 0 °C doit être étudié avec prudence, car un très léger réchauffement peut affecter considérablement ses propriétés mécaniques. La figure 5.22 présentée à la section 5.1.8.4 montre l'étendue et l'altitude de l'invasion marine dans les régions pergélisolées du Québec nordique et délimite la zone côtière où l'on trouve fréquemment des dépôts marins à granulométrie fine. Dans le voisinage du point de congélation, il faut aussi être prudent avec la précision des appareils de mesures utilisés. Il est recommandé d'opter pour des capteurs dont la précision est de l'ordre de 0,1 °C.

5.4.3.3.4 Végétation

La végétation et l'état de la surface jouent également un rôle considérable sur le régime thermique du pergélisol ainsi que sur l'épaisseur de la couche active. La présence de sol organique sec agit comme isolant en modérant de façon importante le transfert de chaleur entre les sols et l'air. Dégelé et sec, le sol organique peut présenter une valeur isolante comparable à celle d'un isolant en ballot (fibre de verre). La présence et l'épaisseur de ces matériaux influencent donc directement l'épaisseur de la couche active et les températures du sol. Par exemple, dans la limite sud de la zone de pergélisol discontinu, le pergélisol n'est généralement présent qu'aux endroits où l'on trouve des tourbes ou des sols organiques en surface ou dans un terrain à haute altitude.

Une perturbation du couvert de végétation provoque bien souvent une dégradation thermique du pergélisol (réchauffement du profil thermique et augmentation de la couche active). De nombreux travaux, dont ceux de Linell (1973) et de Douglas, Jorgenson et autres (2008), illustrent clairement la perturbation thermique du pergélisol en réponse à l'enlèvement de la couverture de sol organique superficielle.

5.4.3.3.5 Topographie

La topographie demeure, pour des raisons techniques, logistiques et géotechniques, un facteur important à considérer dans la conception. L'accessibilité au site, fortement dépendante de la topographie, peut restreindre le choix du type de fondation en limitant l'utilisation de la machinerie nécessaire à la mobilisation des matériaux et à la mise en place des composants du système de fondation. De plus, les types de fondations n'ont pas tous les mêmes capacités à s'ajuster à une topographie accidentée. Par exemple, sur un terrain dont la pente est abrupte, la quantité de gravier nécessaire à la confection du remblai granulaire requis pour certains types de fondations peut être considérable, ce qui risque d'augmenter les coûts de construction, de retarder l'échéancier et d'épuiser les réserves locales de granulats. Pour les secteurs en pente caractérisés par un pergélisol riche en glace, l'instabilité des pentes au dégel et les possibilités limitées de procéder au terrassement du terrain sans perturber le pergélisol constituent également des facteurs limitatifs qui doivent être bien évalués dans le processus de conception. Dans une zone de pergélisol, les fonds plats des vallées sont habituellement mal drainés et riches en glace. Ces secteurs, qui paraissent intéressants sur le plan technique et logistique, doivent faire l'objet d'une étude géotechnique approfondie afin de s'assurer que les conditions de drainage et les géotechniques ne compromettent pas la stabilité de l'infrastructure.

À noter que les facteurs topographiques, tels que l'orientation et l'inclinaison des versants, jouent un rôle important dans la dynamique climatique de certaines régions. Ces facteurs ont un effet thermique (modification du bilan radiatif) et dynamique (modification de l'écoulement de l'air) (Choisnel, 1987). L'intensité du rayonnement solaire direct reçu sur une surface est inversement proportionnelle à l'angle d'incidence du rayonnement solaire par rapport à cette surface. L'intensité de ce rayonnement est donc maximale s'il arrive perpendiculairement à la surface et minimal lorsqu'il lui est parallèle. Par conséquent, l'orientation et l'inclinaison des versants jouent un rôle important dans la dynamique climatique en milieu montagneux à différentes heures de la journée et à différentes saisons de l'année. En modifiant certains paramètres climatiques, la topographie influence les conditions du pergélisol au niveau local. Par exemple, l'épaisseur de la couche active est généralement plus importante pour une surface exposée au sud que pour une surface exposée au nord. Cet effet varie selon la latitude du lieu et le moment de l'année et de la journée. L'effet thermique bénéfique sur le pergélisol des ombres portées par les sommets des alentours est également à considérer.

L'interaction des vents dominants avec la topographie joue également un rôle déterminant dans les patrons de distribution de la neige. Par exemple, au Nunavik, la neige tend à s'accumuler aux endroits où l'énergie de transport est atténuée, comme c'est le cas dans les fractures peu profondes du socle rocheux, les dépressions, les faibles irrégularités du relief et les zones de déblai. En raison des propriétés isolantes de la neige, la formation de ces congères influence le régime thermique du pergélisol qui y est beaucoup plus chaud qu'un site exempt de neige ou recouvert d'une mince couverture nivale. Par conséquent, une conception basée sur des températures du sol mesurées en dehors du site, dans un secteur ne présentant pas les mêmes caractéristiques topographiques (orientation, inclinaison), ou sans considérer l'influence de la topographie sur l'exposition à la radiation solaire et sur l'enneigement peut porter le concepteur à sous-estimer les températures du sol et ainsi compromettre la stabilité du design.

5.4.3.3.6 Drainage

Dans la conception, une attention particulière doit être portée au drainage de surface afin d'assurer un bon comportement des fondations. Un drainage déficient et la présence d'accumulations d'eau sont à l'origine de plusieurs problèmes de mauvais comportement de fondations observés au Nunavik. L'accumulation d'eau et son infiltration dans les sols sous-jacents aux fondations accentuent la profondeur du dégel. Lorsque le sol ainsi dégelé est riche en glace, les tassements peuvent rapidement s'avérer importants et diminuer sensiblement la portance. De telles problématiques ont été constatées dans divers types de fondations, notamment pour des bâtiments s'appuyant sur une dalle sur sol, sur des pieux ayant une capacité par adhérence dans le sol gelé et même pour des fondations construites sur des trépiéds conventionnels ou des piliers sur semelles prenant appui sur un remblai granulaire.

Généralement, il y a très peu de ravins en présence de pergélisol. Au moment de la fonte printanière et d'épisodes pluvieux importants, l'eau s'écoule en nappe mince à la surface de la toundra. Sur les versants, l'écoulement se produit dans des chenaux parallèles, mais diffus, dans lesquels l'humidité du sol est concentrée et où l'eau migre lentement en partie en surface, en partie à travers les horizons supérieurs de la couche active.

L'eau de ces chenaux humides véhicule de la chaleur par convection de sorte que lorsqu'une infrastructure (ex. : un remblai) est construite dessus, c'est en général au moment du passage de l'eau qu'il y aura des affaissements. La gestion de ce drainage de surface diffus et des chenaux humides requiert d'éviter autant que possible de les recouper avec des infrastructures linéaires comme des routes. Lorsqu'on doit les enjamber, une planification minutieuse de l'emplacement, du gabarit et de la forme des ponceaux est primordiale. Il faut aussi éviter autant que possible de creuser des fossés dans le terrain naturel pour canaliser l'eau qui, concentrée et animée d'énergie cinétique, augmente de façon importante les risques de provoquer de la thermo-érosion.

Quelle qu'en soit la source, l'accumulation d'eau à proximité des fondations constitue un risque important de perturbation de leurs comportements futurs. La conductivité thermique de l'eau est environ 16 fois supérieure à celle de l'air. Pour une température équivalente à celle de l'air, l'eau est donc en mesure de dégeler beaucoup plus rapidement le pergélisol, raison pour laquelle il faut absolument éviter sa présence à proximité des fondations. La saturation du remblai granulaire causée par un mauvais drainage peut également réduire de façon radicale la portance de ces sols et provoquer un basculement des assises de la fondation (Figure 5.50 C).

Des accumulations d'eau à l'intérieur de bâtiments avec dalle sur sol peuvent très bien accélérer le tassement du sol sous-jacent. Dans le cas du garage chauffé qui abritait les camions d'eaux usées à Salluit, l'eau provenant de la fonte de la neige collée aux camions était évacuée par un drain de plancher. Cette eau, tempérée par la pièce chauffée, a provoqué le dégel accéléré du pergélisol riche en glace sous la dalle du bâtiment et a même causé une accumulation d'eau sur la dalle de plancher. Une contrepenne importante et nuisible s'est développée dans la conduite de drainage dans l'année qui a suivi la construction du bâtiment et la couche de sol granulaire sous la dalle a été saturée d'une eau à haute énergie calorifique à la source du dégel rapide observé. Un affaissement atteignant 800 mm s'est alors créé au centre du bâtiment (N. Journeaux).

La présence de déversements d'eau potable ou d'eaux usées est aussi à l'origine de certaines problématiques. Dans l'exemple du biodisque de Salluit, les camions-citernes installés devant le bâtiment pompaient les eaux usées dans le bassin intérieur du bâtiment abritant le système de traitement des eaux usées. Ces activités de pompage occasionnaient des déversements d'eaux tièdes et salines sur le sol. Les eaux s'écoulaient en surface pour s'infiltrer le long des pieux qui offraient leur résistance par adhérence dans un sol salin et « tiède » riche en glace. Le dégel de ce sol a occasionné un tassement de l'ordre de 80 mm.

5.4.3.3.7 Aléas naturels

Le Nunavik est le lieu de processus actifs tels que les crues fluviales, les submersions côtières, les embâcles, les débâcles, les inondations, les mouvements de versants (éboulements, glissements de terrain, gélifluxion, avalanche, etc.), les processus périglaciaires et les phénomènes climatiques extrêmes (tempête de vent, blizzard, etc.). Ces processus représentent des aléas naturels dont l'occurrence passée et le risque de récurrence sur le site d'implantation doivent être évalués.

Par exemple, dans les secteurs en pente où le pergélisol est riche en glace, une pénétration rapide du front de dégel à des profondeurs supérieures à celles des années précédentes entraîne la fonte de la glace dans le sol, relâchant ainsi une importante quantité d'eau susceptible d'accroître les pressions interstitielles à l'interface entre le sol dégelé et le sol gelé (L'Hérault, 2009). Les conditions climatiques particulières rencontrées au cours des années 1998, 2005 et 2010 ont augmenté l'instabilité de la couche active et favorisé l'occurrence de ce type de mouvements de masse dans la vallée de Salluit, et ce, sur des pentes aussi faibles que quatre degrés (Figure 5.61 A). La gélifluxion, mouvement de versant graduel, voire imperceptible lié aux cycles de gel-dégel, est fréquente sur les versants recouverts de till (Figure 5.61 B). Sur les versants rocheux, l'altération mécanique de la roche par la gélifraction favorise les éboulis.

La formation de buttes saisonnières à noyau de glace (*frost blister*) est un phénomène qui se manifeste exclusivement dans les zones de pergélisol et qui est assez commun dans les villages du Nunavik et ailleurs en Arctique. Par exemple, à Kangiqsualujuaq, deux buttes saisonnières à noyau de glace se sont développées récemment en bordure de la route d'accès à l'aéroport et l'une d'elles a causé des dommages à un poteau électrique longeant la route (Figure 5.61 C). À Kangiqsujuaq, le contexte hydrologique favorise la formation récurrente de buttes saisonnières à noyau de glace dans les dépôts sableux au sud du village et le long de la paroi rocheuse (Figure 5.61 D) (Carbonneau et autres, 2015). Quoique moins fréquente, la formation de glaçage (*aufeis*) à la surface du sol par le gel successif d'une résurgence d'eau souterraine pendant l'hiver est également une manifestation propre au milieu subarctique et arctique qu'il ne faut pas négliger dans l'évaluation des aléas naturels. La couche de glace

superficielle résultant de ce processus peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur et couvrir des superficies importantes. Par exemple, à Quaqtuaq, la formation d'un glaçage près de l'ancien magasin de la COOP se manifeste de manière récurrente en hiver.

Bien qu'elles ne soient pas reliées à la présence de pergélisol, les zones à risque d'avalanches doivent être prises en considération lorsque vient le temps de déterminer les secteurs à construire. Par exemple, le 1^{er} janvier 1999, neuf personnes ont péri dans une avalanche à Kangiqsualujjuaq. À la suite de cette catastrophe, le ministère de la Sécurité publique (MSP) a commandé une étude sur les risques d'avalanches (NGI, 2000) qui a conclu que sept villages du Nunavik étaient à risque. Plusieurs corridors d'avalanches ont été établis et des cartes ont été tracées de manière à circonscrire les zones problématiques. Bien que la majorité de ces corridors soit exempte d'habitations ou de constructions, certains bâtiments ont dû être relocalisés.

Au Nunavik, les marées peuvent être très importantes. À Tasiujaq (Baie-aux-Feuilles) par exemple, les grandes marées peuvent atteindre plus de 15 m de hauteur; elles sont parmi les plus hautes au Canada. Lors du jusant, c'est-à-dire lors de la marée descendante, les vitesses d'écoulement dans les rivières peuvent atteindre des valeurs plus importantes et accentuer l'érosion du substrat et des rives concaves, surtout dans les portions les plus prononcées des méandres (Figure 5.61 E). L'érosion en pied de talus d'une rive concave a déstabilisé les berges de la rivière Kugluk à Salluit déformant la surface, ce qui a eu pour effet de modifier les conditions de drainage et d'accentuer l'érosion d'une partie du remblai en amont, déstabilisant un appui de la fondation (Figure 5.61 F). Afin d'éviter de telles situations et d'anticiper ou de prévenir l'érosion des berges, il peut s'avérer nécessaire de procéder à une évaluation hydraulique plus approfondie. Le développement d'embâcles, favorisé par une combinaison de caractéristiques environnementales telles que la glace de rive, la géomorphologie locale (resserremments géomorphologiques du lit de la rivière) et la convergence des courants, peut causer d'importantes inondations et exercer une action érosive majeure sous l'effet des glaces en mouvement. Par exemple, d'importants épisodes d'embâcles, de débâcles et d'inondations se sont produits dans la communauté de Kuujjuaq, arrachant des maisons et raclant les berges et le lit du cours d'eau sur leur passage (Bleau, 2012). Une entrevue avec les aînés des villages peut fournir une information précieuse sur des événements antérieurs de cette nature.

Les zones inondables et littorales exposées à l'érosion sont également des éléments à considérer lorsque vient le temps de planifier la construction de nouveaux bâtiments. Dans les périodes de grandes marées et de dépression atmosphérique importante, l'action commune des vagues à de hauts niveaux d'eau contribue à éroder les berges (Savard et autres, 2016). Les bâtiments construits dans ces zones peuvent alors être détruits ou fortement endommagés (Figure 5.61 G et H). Les secteurs riverains devraient normalement être évités à moins qu'ils soient clairement situés à l'extérieur des zones inondables et que les berges offrent une protection naturelle ou mécanique suffisante contre les risques d'érosion.

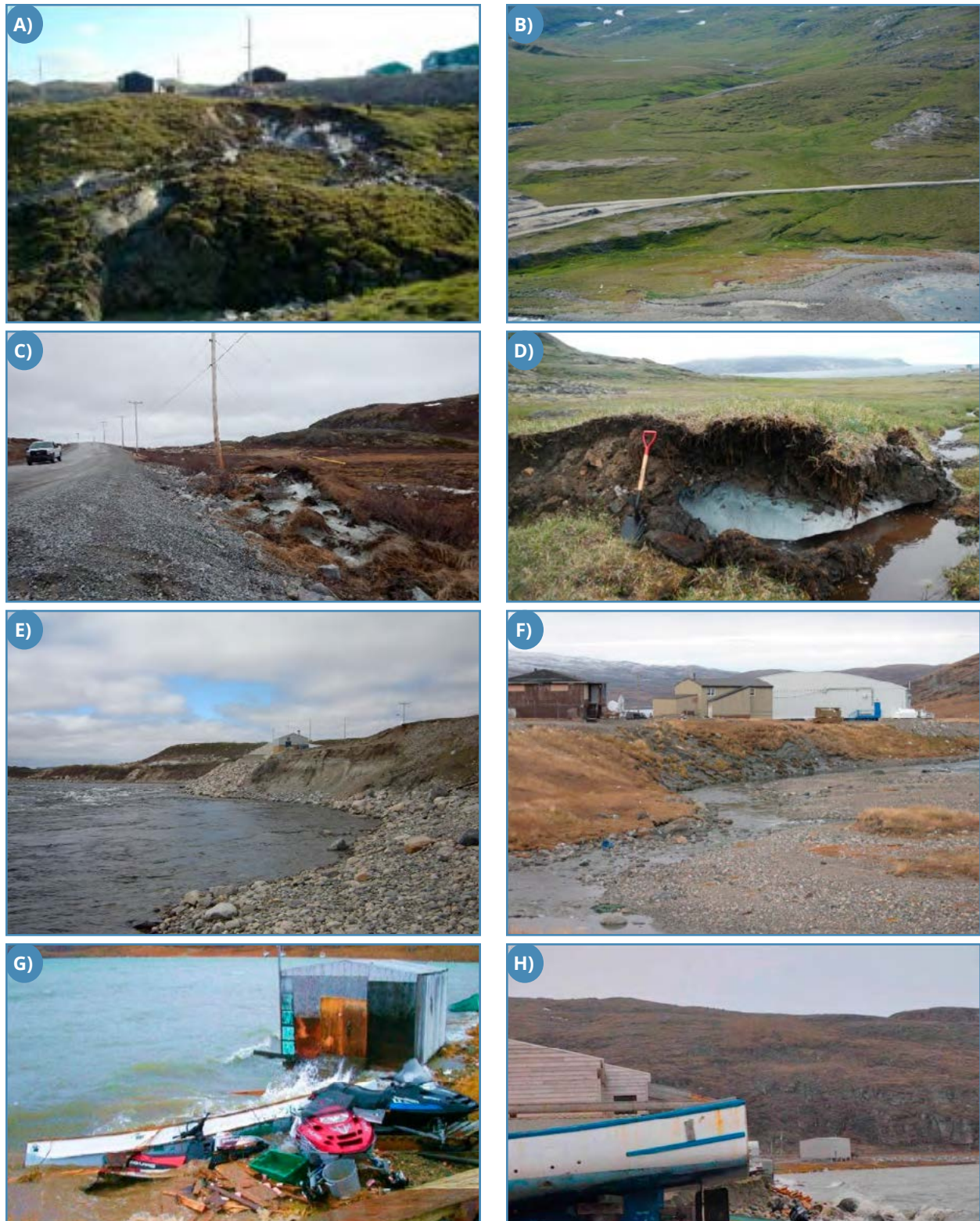


FIGURE 5.61 : A) RUPTURE DE LA COUCHE ACTIVE À SALLUIT. B) LOBES DE GÉLIFLUXION OBSERVÉS EN BORDURE DE LA CÔTE DU DÉTROIT D'HUDSON. BUTTE SAISONNIÈRE À NOYAU DE GLACE SITUÉE C) LE LONG DE LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE KANGIQSUALUJUAQ ET D) AU SUD DE LA COMMUNAUTÉ DE KANGIQSUJUAQ. TALUS EN ÉROSION SUR LES RIVES CONCAVES E) DE LA RIVIÈRE BÉRARD À TASIUJAQ ET F) DE LA RIVIÈRE KUUGULUK À SALLUIT. NOTEZ L'AFFAISSEMENT ET L'ÉROSION SUBSÉQUENTE DU RADIER QUI ONT AFFECTÉ L'ASSISE D'UNE FONDATION À SALLUIT. G) ET H) NIVEAU D'EAU EXCEPTIONNELLEMENT HAUT, SUBMERSION ET ÉROSION DU LITTORAL À SALLUIT (NUNATSIAQONLINE, 2010).

5.4.3.4 Considérations logistiques

Un des problèmes fréquents qui se posent dans les communautés est le manque de main-d'œuvre, de matériaux de construction et d'équipement adéquats pour exécuter les travaux nécessaires à la réalisation du projet (excavations, compaction, forages, granulats, etc.). Ces contraintes logistiques ont un impact sur le coût du projet. Par conséquent, il est impératif d'en tenir compte lors du choix de la fondation, car même si un type de fondation est idéal sur le plan technique et économique en fonction des conditions rencontrées sur le site d'implantation, il ne s'agit peut-être pas du choix optimal sur le plan logistique.

5.4.3.4.1 Disponibilité de la main-d'œuvre, de la machinerie et des matériaux

La construction dans le nord requiert généralement l'embauche d'une main-d'œuvre spécialisée et d'une main-d'œuvre non spécialisée. Elles sont supervisées par l'entrepreneur qui coordonne les différentes étapes de construction du projet et s'assure que la qualité des travaux et les exigences du projet sont respectées. Dans l'étude de faisabilité du projet, les besoins en main-d'œuvre doivent être soigneusement évalués, car celle-ci est souvent limitée, particulièrement dans les petites communautés isolées. Lorsqu'il est nécessaire d'embaucher de la main-d'œuvre spécialisée, elle doit souvent être hébergée sur place, ce qui augmente considérablement les coûts du projet. Pendant longtemps, la construction d'habitations au Nunavik se limitait à mettre en place des constructions préfabriquées, ce qui nécessite très peu de ressources locales (main-d'œuvre et matériaux). Quoique toujours répandue pour les petits bâtiments, cette pratique est moins fréquente pour les projets d'envergure ou quand l'accessibilité au site est problématique et nécessite que la construction soit faite sur place. Lorsque la main-d'œuvre spécialisée n'est pas ou est peu disponible, les structures préfabriquées qui peuvent être facilement assemblées sur place avec un minimum de supervision par la main-d'œuvre locale demeurent une option valable.

Certains travaux nécessaires à la préparation du terrain (excavation, compaction, drainage, etc.) et à la mise en place des fondations requièrent de la machinerie spécialisée (foreuse, grues, etc.) qui peut ne pas être disponible sur place. La plupart des communautés disposent d'une machinerie lourde comprenant des chargeurs, des camions, des pelles mécaniques, des boteurs, des niveleuses et des compacteurs. Toutefois, leur nombre limité et la courte saison de construction en font un équipement convoité qui n'est pas facilement disponible. Pour ce qui est de la machinerie spécialisée, telle que les foreuses, les grues et les nacelles, on n'en trouve pas dans toutes les communautés, aussi faut-il prévoir leur mobilisation au besoin. Pour la disponibilité et la location de machinerie lourde, avec ou sans opérateurs, il faut s'informer auprès de la corporation foncière, de la municipalité ou des compagnies de location.

Les matériaux de construction tels que le bois, le métal et la brique ne sont pas du tout, ou ne sont pas facilement disponibles dans la plupart des communautés. Au Nunavik, la majorité des communautés se trouvent au-delà de la limite des arbres et pour celles qui vivent à proximité, les forêts sont clairsemées et les arbres ont un potentiel limité tant sur le plan de la quantité que de la qualité pour servir de bois de construction. Le roc, les granulats (de carrière ou de gravière) et le sable sont les seuls matériaux de construction disponibles dans la plupart des communautés. Toutefois, il est nécessaire de s'assurer qu'ils sont disponibles en quantité suffisante et que leur qualité est acceptable pour l'usage qu'on veut en faire. Les principales sources de granulat de gravière sont les dépôts fluvioglaciaires, alluviaux et pré littoraux. Plusieurs de ces dépôts peuvent contenir une quantité importante de particules fines qui nécessitent des opérations de lavage et de tamisage avant d'être conformes aux exigences requises. Un inventaire des ressources en granulats par communauté est en cours de réalisation et les résultats sont disponibles auprès du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Dans certaines communautés, les sources de granulats qui se trouvent à proximité sont épuisées, ou presque, tandis que les sources potentielles sont trop éloignées ou sujettes à des considérations environnementales qui limitent leur exploitation. Pour cette raison, de plus en plus de communautés envisagent d'exploiter des carrières afin de produire des granulats. Toutefois, ce type d'opération est plus coûteux, ce qui augmente sensiblement le prix du matériau. Selon la qualité de la roche en place (roche ignée, métamorphique ou sédimentaire), l'utilisation de granulats peut être limitée à un nombre restreint d'applications afin d'éviter certains problèmes (désintégration des granulats sous contraintes, gélifraction, tassement, réaction alcali-granulat, etc.).

5.4.3.4.2 Transports des matériaux et de l'équipement

La mobilisation des matériaux dans les communautés du Nunavik est un facteur déterminant dans la sélection d'un système de fondation. Dans l'ensemble, il y a très peu de fournisseurs de matériaux de construction dans ces communautés. Par conséquent, des matériaux comme le bois, l'acier et le ciment doivent être importés. Leurs coûts de manutention et de transport peuvent représenter approximativement 20 % des coûts de construction, voire plus si le transport doit se faire par voie aérienne. Les coûts logistiques varient en fonction du type de fondation ainsi que de la disponibilité sur place des matériaux et de l'équipement nécessaire à sa construction.

En raison de l'absence d'un réseau routier qui relie les communautés nordiques entre elles et au sud, le transport des matériaux de construction représente une contrainte de taille dans la planification saisonnière de la construction, tant en raison de son impact sur le coût du projet que sur son échéancier. Actuellement, le mode de transport des matériaux le plus économique est la desserte maritime qui s'effectue sur une courte période durant l'année (de juin à novembre). Actuellement, deux principales compagnies maritimes desservent le Nunavik, il s'agit des compagnies NEAS et Desgagnés. La fréquence des arrivages dans les communautés, qui varie d'une année à l'autre selon la demande, se situe en général entre deux et quatre dessertes par années. Les communautés plus importantes comme Inukjuak, Salluit, Kuujuaq et Puvirnituk sont plus fréquemment desservies. Malgré l'augmentation de la desserte maritime, l'espace disponible demeure limité et peut rapidement manquer selon les activités de construction prévues et la quantité de biens de consommation commandée par la communauté. C'est pourquoi il est important de réserver l'espace nécessaire au transport des matériaux de construction et de la machinerie le plus tôt possible. Il faut noter qu'en raison de la présence de glaces et des conditions météorologiques variables, les retards de livraison sont fréquents, ce qui peut considérablement retarder l'échéancier. Afin de limiter les impacts possibles des retards de livraison, la pratique courante consiste à planifier les travaux de construction un an à l'avance afin de s'assurer qu'au moment où les travaux doivent débiter, les matériaux et l'équipement sont déjà sur place. En dernier recours, l'entrepreneur peut toujours compter sur le transport aérien pour la livraison de matériaux de petite taille, mais les limitations de poids et de dimensions ainsi que les coûts élevés doivent être pris en considération. Le Nunavik compte sur un réseau d'aéroports de qualité permettant l'atterrissage d'avions de type Dash 8 adaptés aux pistes en gravier ainsi que sur des vols commerciaux journaliers entre les communautés et le sud, assurés essentiellement par Air Inuit et First Air (Kuujuaq). Actuellement, deux pistes permettent l'atterrissage d'avions de plus grandes tailles (Boeing 737) au Nunavik, il s'agit de Puvirnituk et de Kuujuaq.

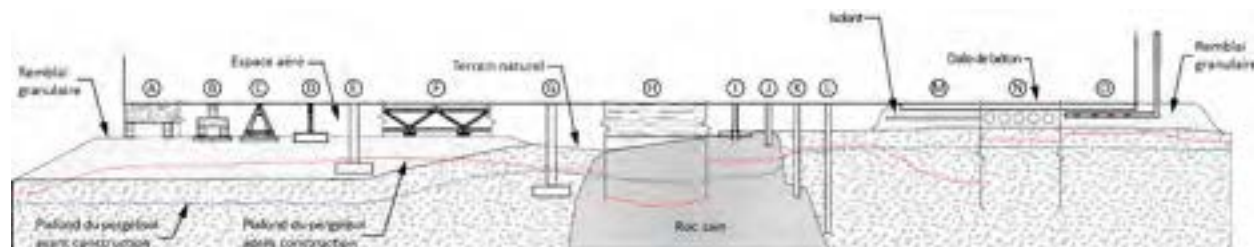
L'accessibilité de certains sites à l'intérieur d'une communauté est parfois difficile en raison de l'absence de route, d'une topographie accidentée ou de conditions de sol difficiles (ex. : secteur mal drainé sur pergélisol sensible). Pour ces raisons, la mobilisation de l'équipement sur le site d'implantation doit être soigneusement planifiée et peut nécessiter certaines précautions telles qu'un transport par voie aérienne ou pendant l'hiver pour ne pas perturber le terrain. L'accessibilité au site peut restreindre le choix du type de fondation en limitant la disponibilité des matériaux et de l'équipement qui sont nécessaires à sa construction et qui respectent le budget initial. Une mobilisation hivernale peut parfois être avantageuse, mais elle peut aussi complexifier certaines activités de construction, voire les empêcher.

5.5. TYPE DE FONDATION

Selon le type de sol, la charge permanente de la structure et les surcharges potentielles, il existe une variété de types de fondations qui conviennent aux régions froides et aux zones de pergélisol. Les types de fondations les plus simples sont habituellement utilisés pour les petits bâtiments non chauffés. La conception de bâtiments chauffés ou de plus grande envergure requiert souvent des soins particuliers qui, selon le type de sol, peuvent complexifier le choix du système de fondation. Dans la littérature, les types de fondations utilisés dans une zone de pergélisol se divisent en trois grandes catégories : les fondations superficielles, les fondations profondes et les fondations avec système d'extraction de chaleur. Pour chacune de ces grandes catégories, les principaux types de fondations utilisés pour la construction d'habitations et de bâtiments sur pergélisol sont présentés à la figure 5.62 et seront décrits dans la section suivante. Les coûts anticipés, les avantages, les inconvénients et les utilisations suggérées pour ces types de fondations sont présentés dans le tableau 1 de l'annexe XVI.

Au Nunavik, les types de fondations des bâtiments résidentiels érigés au cours des dernières décennies demeurent sensiblement les mêmes. Il s'agit, pour la plupart, de bâtiments à ossature de bois montés sur une

charpente d'acier avec un système de fondation superficielle (trépieds à vérins ajustables) sur remblai granulaire. Pour ce qui est des bâtiments à usage commercial ou institutionnel, ils sont dotés de systèmes de fondation allant de simples (dalle sur sol ou mur de fondation sur semelle) à complexes (dalle sur sol ventilée ou avec thermosiphons) selon les conditions de pergélisol rencontrées et leur sensibilité au dégel. Par exemple, le système de fondation de la piscine municipale de Salluit qui repose directement sur le roc ne comprend aucun mécanisme de préservation du pergélisol malgré l'importance de la charge permanente de l'infrastructure. Ce n'est pas le cas du nouveau garage municipal construit sur un pergélisol sensible, qui dispose d'une fondation sur dalle avec thermosiphons.



FONDATIONS SUPERFICIELLES		FONDATION PROFONDE	FONDATION AVEC SYSTÈME D'EXTRACTION DE CHALEUR
avec remblai granulaire	sans remblai granulaire		
<ul style="list-style-type: none"> • Poutres au niveau du sol (A) • Cales sur semelle (B) • Piliers ou trépieds avec vérins ajustables sur semelle (C et D) • Pilier sur semelle enfouie (dans le remblai) (E) • Fondation tridimensionnelle rigide (F) • Murs de fondation sur semelle filante • Dalle sur sol (M) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pilier sur semelle enfouie (dans le sol naturel) (G) • Murs de fondation sur semelle filante sur roc (H) • Pilier et semelle sur roc (I) • Pieux encastrés dans le roc, près de la surface (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pieux portant en pointe (K) • Pieux portant par adhérence et en pointe (L) 	<ul style="list-style-type: none"> • Radier ventilé (N) • Dalle sur sol avec thermosiphons (O) • Pieux thermiques

FIGURE 5.62 : TYPES DE FONDATIONS POUVANT ÊTRE UTILISÉS DANS LES ZONES DE PERGÉLISOL.

5.5.1 Les remblais granulaires

Le remblai granulaire n'est pas un type de fondation à proprement parler, il doit plutôt être considéré comme un composant essentiel de certains systèmes de fondation. Son utilisation est fréquente pour les sites où les conditions du sol de fondation sont extrêmement pauvres. L'utilisation d'un remblai, en plus d'offrir une surface de travail plane, permet essentiellement de préserver la température du pergélisol sous-jacent. En rehaussant la surface du sol, le régime thermique s'ajuste et le plafond du pergélisol remonte dans l'ancienne couche active, idéalement jusqu'à l'intérieur du remblai. De cette manière, les cycles de gel et de dégel saisonniers sont limités au remblai. Afin de restreindre tout mouvement potentiel lié au processus de soulèvement gélival saisonnier, le remblai doit être d'une épaisseur suffisante et composé de matériau non gélif (sable, sable et gravier, gravier ou roc concassé). Le radier devrait idéalement être mis en place un an avant les travaux de construction du bâtiment afin de permettre au régime thermique de se réajuster (remontée du plafond de pergélisol). Lors de la préparation d'un remblai sur le pergélisol, il est habituellement avantageux de remblayer le terrain en conservant la végétation et la couche de terre organique superficielle. Le retrait ou la perturbation de cette couche organique isolante, particulièrement au début de la saison chaude, contribue à augmenter l'épaisseur de la couche active, ce qui n'est pas souhaitable, surtout quand la partie superficielle du pergélisol est riche en glace. Dans certains

cas, lorsque le pergélisol est stable au dégel, il peut être nécessaire d'enlever complètement la couche organique superficielle ou les poches de sols organiques localisées avant d'entreprendre la construction du radier granulaire afin d'éviter des tassements trop importants sous les bâtiments.

La capacité portante du remblai dépendra de la qualité du matériau utilisé (résistance à l'état non gelé) et du degré de compaction. Pour les remblais normalement compactés par camion ou par boueur sur chenilles, la charge admissible peut être aussi faible que 75 kPa, mais peut atteindre plus de 250 kPa pour les remblais soigneusement contrôlés et testés (AGRA Earth & Environmental Limited, 2000). L'épaisseur du remblai granulaire entre la base de la semelle et le sol naturel sous-jacent doit être telle que la concentration des charges appliquées sur le sol naturel soit réduite à des valeurs acceptables tout en contrôlant l'amplitude des cycles gel-dégel afin de limiter la dégradation du pergélisol. L'amplitude de dégel peut être facilement estimée en utilisant l'équation simple de Stefan ou celle de Berggren modifiée (Aldrich et Paynter, 1966). Normalement, l'épaisseur du remblai doit être 1,5 fois supérieure à l'épaisseur maximale atteinte par la couche active.

Afin de prévenir une dégradation potentielle du pergélisol, il est important de limiter tout apport de chaleur pouvant provenir du bâtiment. Lorsque c'est possible, il est conseillé de surélever le bâtiment au-dessus du sol. L'espace sous le plancher du bâtiment est généralement compris entre 500 et 1000 mm de hauteur afin de favoriser un mouvement d'air permettant d'évacuer toute chaleur pouvant provenir du plancher. À noter que l'effet d'ombrage du bâtiment refroidit considérablement les températures de surface sous le bâtiment en été, températures qui peuvent être près de 50 % moins élevées (Bouchard, 2005).

Pour les bâtiments chauffés reposant sur une dalle, des précautions doivent être prises afin de limiter le transfert de chaleur du bâtiment au pergélisol. Selon les caractéristiques du pergélisol, ces précautions peuvent varier d'une simple pose d'isolant sous la dalle à l'installation d'un système d'extraction de chaleur passif ou mécanique. En effet, l'usage d'isolant rigide en polystyrène extrudé peut, dans certains cas, améliorer le comportement des fondations. Par exemple, dans le cas d'un bâtiment avec dalle sur sol, l'isolant permet de réduire les échanges thermiques de chaleur d'un bâtiment vers le sol afin d'en limiter l'empreinte thermique sur le pergélisol (Figure 5.55 : A) Positions du front de dégel sous des bâtiments chauffés en fonction de leur dimension, du type de fondation et du temps. B) Deux types de systèmes de fondation qui reposent sur un remblai granulaire.). Toutefois, dans certains cas, il peut aussi restreindre l'extraction de chaleur du pergélisol vers l'atmosphère en hiver, ce qui limite la capacité de ce dernier à se refroidir. Des analyses thermiques sont alors requises pour justifier l'utilisation de l'isolant et, au besoin, pour positionner judicieusement les matériaux. Selon la norme CAN/CSA-S501-14, intitulée « Modérer les effets de la dégradation du pergélisol des structures existantes », l'utilisation d'isolant peut être considérée dans les secteurs où les températures moyennes annuelles du sol sont inférieures à -4 °C, mais devrait être envisagée avec précaution et selon les recommandations d'un professionnel dans le cas d'un pergélisol dont la température moyenne annuelle se situe entre -4 et 0 °C. La bonne pratique suggère d'installer l'isolant à la fin de l'hiver plutôt que pendant l'été ou l'automne afin de réduire les risques d'emprisonnement de la chaleur sous celui-ci et d'éviter de retarder le regel de la couche active de plusieurs mois (Johnston, 1981). Selon la température de l'air, l'épaisseur de la couche d'isolation nécessaire variera entre 50 à 100 mm. La contrainte appliquée sur l'isolant ne doit pas dépasser 40 % de sa résistance en compression afin d'éviter le fluage du polystyrène.

Voici certaines recommandations pour la conception :

- Les surfaces finies des remblais granulaires doivent être profilées de façon à favoriser l'évacuation rapide des eaux de fonte et de précipitation vers les systèmes de drainage environnants. L'inclinaison minimale recommandée pour ces surfaces finies est de deux pour cent.
- Une plate-forme d'au moins trois mètres de largeur devrait être préservée en périphérie du bâtiment pour assurer une circulation stable des véhicules et éviter la formation d'ornières dans le sol naturel à proximité du bâtiment.
- Pour obtenir un drainage adéquat et optimiser l'usage des ressources granulaires, il est recommandé de préparer des plans de drainage et de terrassement avant de procéder à la construction des radiers qui serviront d'assises aux habitations. Il s'agit de bien intégrer l'évacuation des eaux de surface vers les dépressions longeant les rues ou, si nécessaire, vers de nouveaux fossés profilés en périphérie des lots.

- Les fossés doivent idéalement être profilés avec des matériaux de remblai afin d'éviter l'excavation et l'exposition du pergélisol et posséder une pente qui favorise un égouttement rapide. Dans la mesure du possible, et pour réduire les risques d'instabilité de talus, les fossés de drainage doivent être aménagés loin du pied des remblais lorsque le site est constitué de dépôts meubles sensibles au dégel. L'aménagement d'un remblai en pente douce peut être une solution à envisager dans ce cas.
- Pour répartir les mouvements différentiels locaux à la surface d'un remblai, il est également possible de le renforcer avec des rangs de géogrilles biaxiales. Cette solution ne vise qu'à atténuer l'amplitude d'un tassement très localisé et elle ne doit pas être retenue pour des tassements anticipés sur une zone de quelques mètres. Un renforcement avec des géogrilles biaxiales peut cependant améliorer la portance d'une zone de travail trop molle.
- Dans les remblais partiellement gélifs, l'ajout d'une membrane imperméable dans la partie supérieure peut réduire les mouvements du sol associés à la formation et au dégel de lentilles de glace saisonnières.

La mise en place d'un radier granulaire doit se faire méthodiquement et avec précaution afin de limiter les possibles perturbations thermiques sur le pergélisol. Il importe donc d'éviter de perturber la couche de végétation superficielle avec de la machinerie afin de ne pas affecter les propriétés thermiques et structurales du sol naturel sous le nouveau remblai. Pour ce faire, aucun véhicule motorisé pouvant endommager les couches végétales et organiques ne doit circuler directement sur la surface du terrain avant l'aménagement du radier. Il s'agit de conserver les propriétés isolantes de ces matériaux de surface et l'intégrité du drainage naturel en évitant la création de zones basses qui pourraient accumuler les eaux de surface et ainsi favoriser la dégradation thermique du pergélisol sous-jacent. L'approche suggérée est la suivante :

- Avant d'autoriser la circulation des camions et de l'équipement lourd sur roues, déverser une couche de matériaux non gélifs et compactables de 600 mm d'épaisseur en les poussant en avant à l'aide d'un boueur. Cette précaution sert à répartir les charges de l'équipement sur une plus grande surface porteuse et à assurer la stabilité de la couche de sol naturel sous-jacente.
- Déposer les matériaux de remblai sur la couche initiale, puis par couches successives d'environ 400 mm d'épaisseur. Recouvrir d'une mince couche de roulement faite de pierre concassée d'un calibre de 0 à 20 mm; lorsqu'un calibre plus petit n'est pas disponible, de la pierre dynamitée d'un calibre de 0 à 600 mm peut aussi être utilisée, puis recouverte d'une couche de pierre concassée d'un calibre de 0 à 150 mm et de la couche de roulement (Figure 5.63 A). Entre chaque couche de matériaux distincts, la granulométrie des granulats doit respecter la loi des filtres afin d'éviter toute migration de particules dans des vides laissés entre les cailloux de la couche sous-jacente.
- Densifier chaque couche entourant les bâtiments (minimum de huit passes) et la zone située immédiatement sous le bâtiment (minimum de 12 passes) à l'aide d'un lourd compacteur vibreur. Le contrôle de la qualité de ces matériaux et de leur mise en place par un laboratoire agréé est recommandé. Si des remontées d'eau sont observées en surface, arrêter immédiatement la vibration afin de ne pas déstabiliser la couche de sol sous-jacente et d'éviter l'apparition de zones molles.
- Une carapace composée de tout-venant ou d'un autre type d'enrochement peut également être placée sur les talus du remblai granulaire pour protéger celui-ci contre l'érosion.

Quelques exemples d'aménagement de radiers granulaires illustrant les recommandations citées précédemment sont présentés à la figure 5.63 B et à la figure 5.64.



FIGURE 5.63 : A) EXEMPLE D'AMÉNAGEMENT D'UN TERRAIN LÉGÈREMENT EN PENTE AVEC RADIER EN ESCALIER. B) STRUCTURE D'UN REMBLAI AVEC DIFFÉRENTS CALIBRES DE MATÉRIAUX GRANULAIRES.

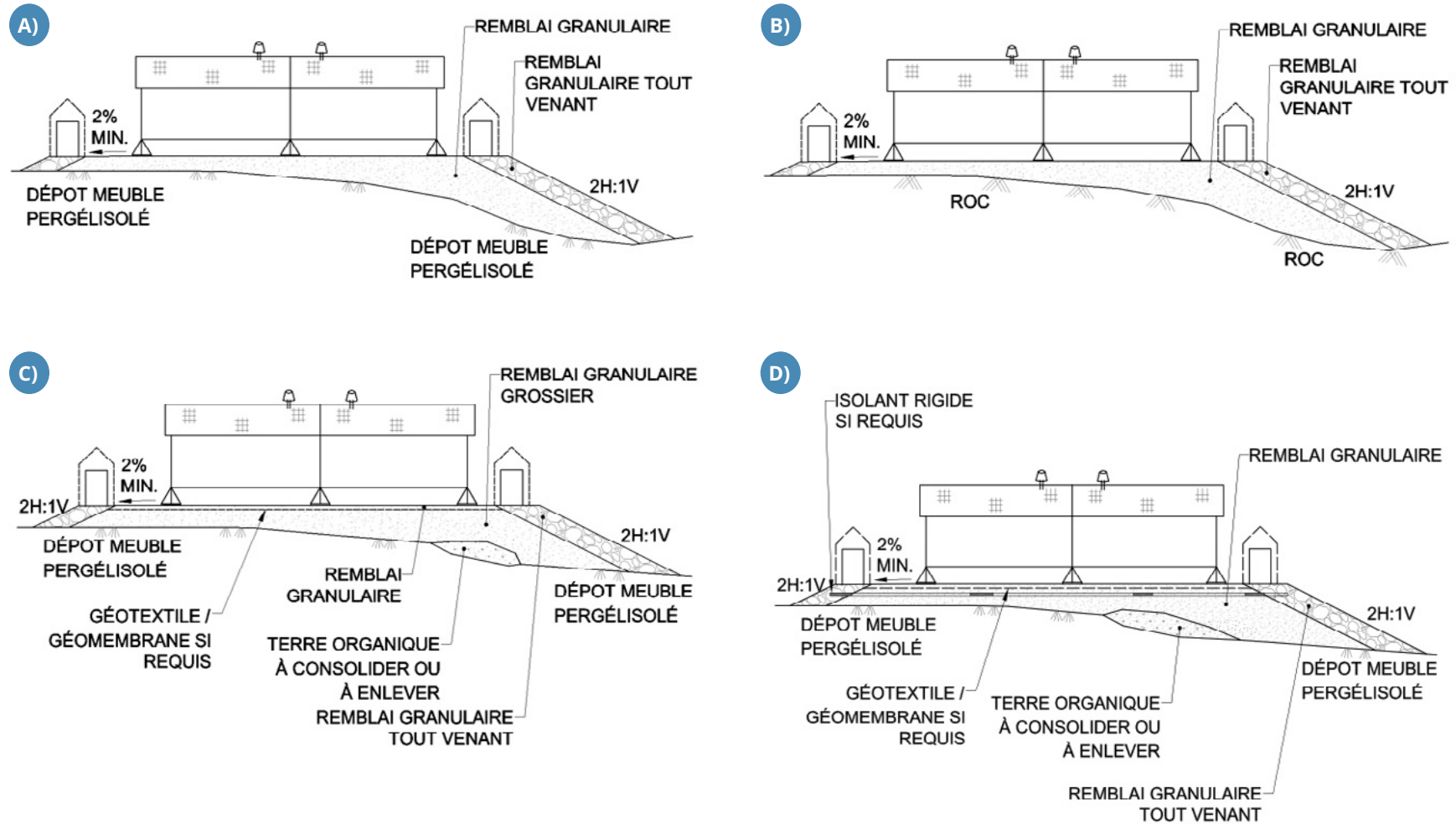


FIGURE 5.64 : REMBLAI GRANULAIRE PLACÉ A) SUR UN DÉPÔT MEUBLE PERGÉLISOLÉ OU B) SUR LE ROC. REMBLAI GRANULAIRE PLACÉ SUR UN DÉPÔT MEUBLE PERGÉLISOLÉ AVEC PRÉSENCE DE SOLS ORGANIQUES LOCALISÉS C) AVEC USAGE POSSIBLE D'UN GÉOTEXTILE OU D'UNE GÉOMEMBRANE ET D) AVEC USAGE POSSIBLE D'UN GÉOTEXTILE OU D'UNE GÉOMEMBRANE ET D'UN ISOLANT RIGIDE.

5.5.2 Fondations superficielles avec ou sans remblai granulaire

Les fondations superficielles, peu importe les matériaux utilisés (bois, métal, béton, etc.) ou leur géométrie, transmettent les charges de l'ouvrage directement à la surface du sol ou légèrement sous celle-ci. Ce type de fondation est généralement utilisé en présence d'une couche de sol superficielle qui possède les capacités portantes requises, et lorsque les caractéristiques du site d'implantation ainsi que celles de la charge et de la surcharge du bâtiment ne nécessitent pas une fondation profonde. Il existe deux catégories principales de fondations superficielles, celles qui sont directement déposées à la surface du sol et celles qui sont légèrement enfouies dans la partie superficielle du pergélisol. Selon la compétence du sol naturel à supporter la charge et la surcharge du bâtiment, il est fréquent de faire usage d'un remblai granulaire à l'intérieur duquel le pergélisol remontera et viendra englober la fondation.

Lorsqu'elles sont appropriées, les fondations superficielles devraient inclure des dispositifs d'ajustement en cas de mouvements du sol (vérin) ou du moins offrir la possibilité de niveler celui-ci au besoin (ajout de cale en bois). Un tel dispositif offre l'avantage de compenser les tassements différentiels susceptibles de se produire dans les secteurs où le pergélisol est riche en glace. La possibilité de faire un ajustement de l'ordre de 100 à 150 mm est normalement considérée comme acceptable. Pour permettre l'accès au personnel responsable de l'ajustement des fondations, la hauteur minimale de l'espace ventilé devrait être de 500 mm. Une hauteur plus importante, jusqu'à 1200 mm, améliore l'accès ainsi que le bris thermique entre le bâtiment chauffé et le sol sous-jacent.

Certaines fondations possèdent une structure métallique permettant de transférer la charge sur un nombre limité de points d'appui et de niveler le sol au besoin (fondations tridimensionnelles à points d'appui multiples). Ce type de fondation, employé avec succès dans l'Arctique canadien, mais très peu au Nunavik, est habituellement utilisé pour de petits bâtiments d'un ou deux étages.

5.5.2.1 Poutres au niveau du sol

Les poutres au niveau du sol consistent en des semelles en béton ou en bois lamellé disposées longitudinalement sous la structure et qui reposent sur un remblai granulaire (Figure 5.65 : Vue en coupe transversale et longitudinale d'un concept de fondation superficielle avec poutres au niveau du sol sur remblai granulaire.). Contrairement à une fondation qui comporte des semelles individuelles, les poutres au niveau du sol fournissent une plus grande surface de support et ont donc moins tendance à gauchir. Toutefois, ce type de fondation est vulnérable à des tassements différentiels en raison de ses limitations d'ajustement. Le fait de placer trois ou quatre rangées de poutres parallèles sous la structure assure un certain degré de flexibilité et de résistance comparativement à l'utilisation d'une seule poutre continue placée au niveau du sol autour du périmètre. Ce type de fondation peut ne pas élever suffisamment le bâtiment au-dessus du sol pour garantir une ventilation efficace, ce qui limite son utilisation lorsqu'il s'agit de bâtiments chauffés, mais ne l'empêche pas d'être adéquate pour les structures non chauffées et qui doivent être déplacées au besoin (McFadden, 2000).

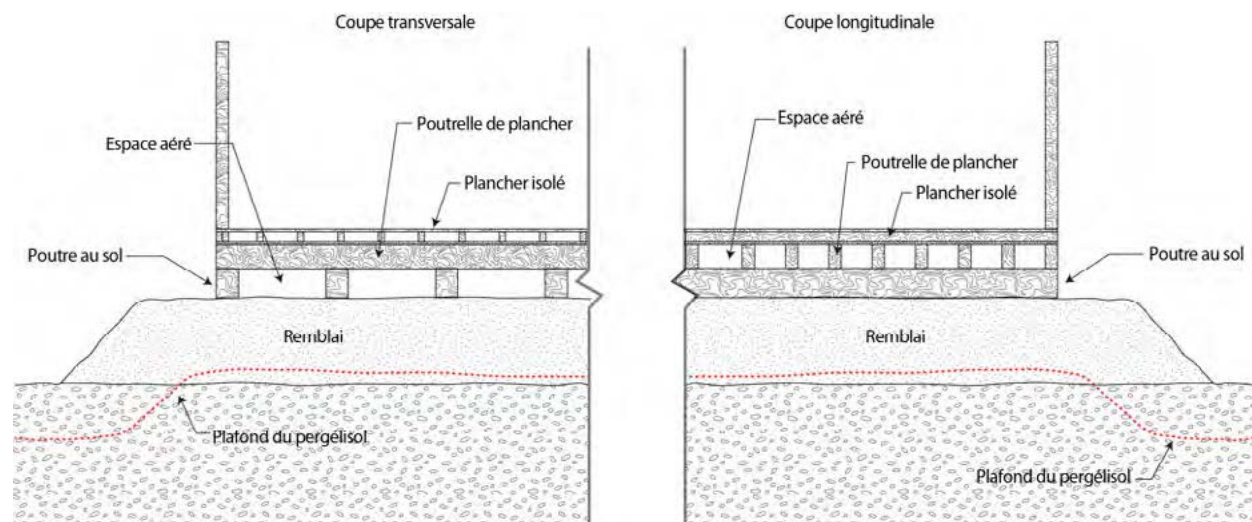


FIGURE 5.65 : VUE EN COUPE TRANSVERSALE ET LONGITUDINALE D'UN CONCEPT DE FONDATION SUPERFICIELLE AVEC POUTRES AU NIVEAU DU SOL SUR REMBLAI GRANULAIRE.

5.5.2.2 Cales sur semelle

Les cales sur semelle sont l'un des types de fondations les plus utilisés dans les zones de pergélisol continu et discontinu. Ce type de fondation se résume à disposer des couches de bois de charpente en alternance sur une semelle posée sur un remblai granulaire, un affleurement rocheux ou tout autre dépôt ayant les compétences nécessaires sur le plan de la capacité portante et de la gélivité (Figure 5.66 A). Les poutres principales de la structure sont supportées à des intervalles réguliers, généralement tous les deux mètres et demi à trois mètres, par des couches de pièces de bois empilées pour atteindre la hauteur requise, généralement un mètre, afin de créer un espace d'air suffisant sous le bâtiment pour éviter la transmission de la chaleur provenant de celui-ci au sol sous-jacent (Figure 5.66 B). Une hauteur convenable entre le bâtiment et le sol facilite également son nivellement en utilisant une paire de cales supplémentaires au besoin. Il est recommandé de fixer ce type de fondation aux poutres principales à l'aide d'équerres en métal ou d'un autre type d'attache (Figure 5.66 A). Dans certaines communautés, des câbles retiennent la structure au sol au moyen d'ancrages enterrés dans le remblai granulaire. Il est recommandé d'utiliser un bois traité pour les éléments de la fondation qui touchent directement le sol (semelle) ou qui pourraient être exposés à l'eau ou à la neige.

Ce type de fondation est essentiellement utilisé sur des sols qui ont une faible capacité d'appui et pour de petits bâtiments qui ne présentent pas beaucoup de risques de dommages provenant d'un degré raisonnable de mouvement (SCHL, 94-214). Longtemps utilisé au Nunavik en raison du peu de matériau nécessaire et de sa simplicité d'installation, ce type de fondation est toutefois de plus en plus délaissé dans les nouveaux modèles de maison pour être remplacé par des piliers ou des trépieds sur semelle avec vérin ajustable (Section 5.5.2.3).

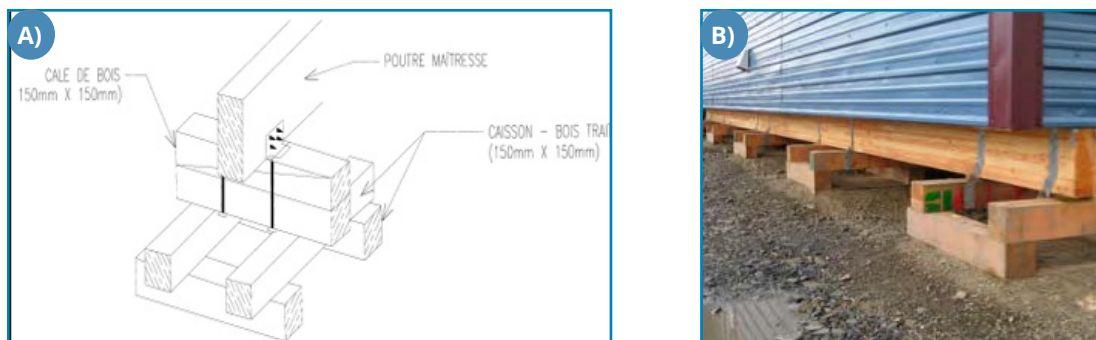


FIGURE 5.66 : A) COMPOSANTES DU SYSTÈME DE FONDATION SUPERFICIELLE UTILISANT DES CALES. B) POUTRE PRINCIPALE DE LA STRUCTURE SURÉLEVÉE ET SUPPORTÉE À INTERVALLES RÉGULIERS PAR DES CALES (COLD CLIMATE HOUSING RESEARCH CENTER, <http://www.cchrc.org/>).

5.5.2.3 Piliers ou trépieds avec ou sans vérins ajustables sur semelle

Type de fondation actuellement le plus utilisé au Nunavik pour les bâtiments d'habitation d'un ou deux étages, les piliers et les trépieds se présentent sous différentes formes et configurations. Les structures les plus courantes utilisées sont les trépieds (Figure 5.67 A et B) ou les piliers carrés ou cylindriques (Figure 5.67 C et D) qui s'appuient sur des semelles. Les semelles sont soit individuelles ou combinées selon qu'elles supportent un ou plusieurs piliers et leurs dimensions sont telles qu'elles permettent une bonne répartition de la charge du bâtiment au sol pour éviter l'enfoncement de la fondation. Dans une zone de pergélisol, l'utilisation de semelles individuelles est préférable, puisqu'elles présentent un risque moins important de causer des dommages à la fondation en cas de mouvements différentiels (SCHL, 94-214). Les semelles peuvent reposer directement à la surface du sol naturel si celui-ci est jugé compétent, mais le plus souvent, elles prennent appui sur un remblai granulaire non gélif. Les semelles peuvent également être enfouies dans le sol à de faibles profondeurs afin de reposer sur la partie supérieure du pergélisol ou à l'intérieur de celui-ci. Les trépieds sont essentiellement faits en métal, tandis que l'utilisation de bois, de béton ou d'acier est fréquente dans la fabrication des piliers. Pour ce qui est des semelles, le bois traité constitue un excellent choix de matériau lorsque celles-ci reposent à la surface d'un remblai granulaire bien drainé, d'autant plus que les propriétés thermiques du bois restreignent les transferts de chaleur au sol. Lorsqu'elles sont enfouies sous la surface, les semelles sont souvent faites de béton. Dans ce cas, il est important de bien s'assurer que le béton est de bonne qualité et renforcé avec des aciers.

Ce type de fondation offre généralement un excellent comportement. L'espace dégagé sous le bâtiment permet au vent de balayer la neige et de couper la transmission de chaleur de la maison au pergélisol. Cette approche donne généralement de bons résultats dans presque toutes les conditions de sols. L'utilisation de ce type de fondation peut néanmoins nécessiter une grande quantité de matériaux granulaires, surtout lorsque le terrain est en pente. Normalement, les supports de ces structures en forme de chevalets ou de colonnes d'acier, soutenues par du bois équarri ou par une semelle de béton, peuvent être construits à un coût raisonnable. L'utilisation de ce type de fondation de surface est souhaitable pour les sites où les mouvements de terrain sont faibles, mais si l'entretien est adéquat et fait sur une base régulière (nivellement), ce type de fondation s'ajuste à la plupart des mouvements différentiels qui peuvent se produire. On devrait y avoir recours lorsque le propriétaire et l'occupant sont en mesure d'entretenir la fondation si nécessaire. Son installation, qui ne requiert pas de machinerie spécialisée, seulement de la machinerie lourde habituellement disponible dans les villages du Nunavik, est simple. Son efficacité dépend toutefois largement de la qualité du remblai granulaire.

Quoique cela se produise rarement pour ce type de fondation au Nunavik, il peut s'avérer nécessaire, dans les zones d'activités sismiques ou les régions de forts vents (ex. : Salluit), de stabiliser la structure contre les charges horizontales à l'aide de contreventements posés entre les piliers (McFadden, 2000). Pour les bâtiments dont la charge et la surcharge sont faibles, il est également conseillé d'attacher la structure au sol à l'aide de câbles et d'ancrages.

5.5.2.3.1 Semelle reposant à la surface du sol ou légèrement imbriquée

Lorsque ce type de fondation repose sur un remblai granulaire compacté et bien drainé, ou qu'il y est légèrement encastré, les contraintes de pressions admissibles dépendront de la résistance à l'état non gelé du type de matériau utilisé. Par exemple, l'épaisseur du remblai granulaire entre la base de la semelle et le sol naturel sous-jacent doit être telle que la concentration des charges appliquées sur le sol naturel, tout en contrôlant l'amplitude du dégel afin de limiter la dégradation du pergélisol sous-jacent, est réduite à des valeurs acceptables. Étant donné que ce type de fondation repose sur la surface du sol plutôt que d'être imbriqué dans le pergélisol, les risques de mouvements saisonniers de terrain liés au soulèvement gélival peuvent forcer un ajustement régulier de la fondation à l'automne et au printemps. Pour remédier à ce risque, dans les secteurs où le matériau qui compose la couche active avant la construction est gélif, il est recommandé d'y déposer un remblai de matériau non gélif d'une hauteur suffisante pour faire remonter le pergélisol à la base de celui-ci et ainsi de limiter les cycles de dégel et de dégel.

Dans les endroits où le substrat rocheux affleure ou se retrouve à de faibles profondeurs sous les dépôts meubles (< 2 m), ce qui est très fréquent au Nunavik, il est possible de venir ancrer les semelles directement dans celui-ci (Figure 5.68 A). Le fait d'ancrer les fondations directement dans le socle rocheux augmente considérablement leur capacité portante tout en assurant une résistance aux contraintes latérales et aux soulèvements. De manière générale, une roche granitique sera plus solide qu'une roche sédimentaire, mais il importe de bien évaluer la compétence du substrat rocheux avant la construction, sans quoi il faudra demeurer conservateur dans l'estimation de sa capacité portante. Certains affleurements rocheux peuvent présenter un degré avancé d'altération où les nombreuses fissures verticales et horizontales permettent à l'eau de s'infiltrer et de geler forçant, dans certaines conditions, le soulèvement gélival de blocs rocheux. Ce processus périglaciaire actif affectant de nombreux affleurements rocheux à l'intérieur des communautés du Nunavik (L'Hérault et autres, 2013) peut altérer considérablement la compétence du substrat rocheux. Il faut noter que certains types de roches sont plus sensibles à la désagrégation physique résultant des cycles de gel et de dégel en raison de leur structure stratifiée, comme c'est le cas à Kangirsuk et Kangiqsuaq.

5.5.2.3.2 Semelle enfouie reposant sur ou dans le pergélisol

Les semelles directement déposées sur le pergélisol ou légèrement encastrées dans celui-ci sont assez fréquentes dans l'Arctique. Il existe plusieurs manières d'installer ce type de fondation. La première consiste à pratiquer une excavation dans le terrain naturel à travers la couche active afin d'atteindre le plafond du pergélisol, puis d'y encastrer la semelle (Figure 5.68 B et Figure 5.69 A). Si la couche active n'est pas gelée, les parois de l'excavation peuvent être très instables en raison de la présence de suintements d'eau alimentés par la nappe phréatique perchée au-dessus du pergélisol. L'effet conjoint du suintement d'eau et de l'effondrement des parois de l'excavation peuvent altérer la capacité portante du sol qui se retrouvera sous la semelle. Il importe dans ce cas d'adoucir les parois de l'excavation (1V:4H) et d'utiliser une pompe pour garder le trou sec. Il est également conseillé de procéder à l'excavation et à l'installation des semelles de fondation une semelle à la fois afin de limiter la surface et la durée d'exposition du pergélisol. Pour les secteurs où il est difficile de procéder à une excavation de la couche active malgré ces précautions, il est possible d'enfouir la semelle dans un remblai granulaire assez épais de manière à faire remonter le pergélisol à une hauteur suffisante pour recouvrir la semelle (Figure 5.69 B).

Les semelles en bois ou en béton préfabriqué peuvent être déposées sur une mince couche de nivellement directement sur le sol gelé, toutefois, si le béton doit être coulé en place, une couche de matériau granulaire compacté d'au moins 300 mm ou un isolant en polystyrène extrudé de 50 mm devrait protéger le pergélisol de la chaleur dégagée par le béton (AGRA Earth & Environmental Limited, 2000). La semelle ne doit jamais être directement déposée sur un pergélisol contenant de la glace de ségrégation. Dans cette situation, le pergélisol doit être excavé pour permettre d'y déposer une couche de matériau granulaire compactée d'au moins 30 à 60 cm comme on le voit illustré à la figure 5.69 A. La mise en place de cette couche granulaire compactée sous la semelle atténue également le dégel du pergélisol causé par la chaleur dégagée lors de la prise du béton. Au moment de mettre ce type de fondation en place, une attention particulière doit être portée à la température à laquelle le béton est coulé. Il ne doit être ni trop chaud, pour ne pas faire fondre le pergélisol, ni trop froid, pour geler sans avoir le temps de durcir. En effet, selon l'expérience réalisée par Braun et autres (1979), un béton coulé à des températures variant entre 15 et 18 °C va entraîner un dégel du sol adjacent jusqu'à une profondeur approximative comprise entre 0,5 et 1 fois l'épaisseur de la semelle. Lorsque la température ambiante est supérieure à 0 °C,

et pour minimiser le dégel du pergélisol, il est conseillé de procéder au remblayage de l'excavation dès que le béton a atteint une résistance suffisante. Par la suite, un isolant (tourbe ou isolant rigide) est placé à la surface du sol, puis recouvert au besoin par un remblai granulaire tout en s'assurant de laisser un dégagement d'une hauteur d'environ 500 à 1000 mm sous le bâtiment. Des tassements et des soulèvements peuvent survenir lors du réajustement thermique du sol après la mise en place de ce type de fondation. Cela peut prendre quelques saisons avant d'atteindre un nouvel équilibre.

Pour la portion enfouie du pilier située dans la couche active, il existe un risque de soulèvement par adhérence due au gel (Figure 5.51). Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser un matériau de comblement non gélif autour du pilier et de recouvrir celui-ci avec une gaine de polyéthylène ou l'équivalent (Figure 5.69 A). Un système d'ajustement avec vérins peut également être incorporé au design de fondation permettant ainsi le nivellement de la structure au besoin.

L'avantage d'enfouir la semelle dans le pergélisol est que celle-ci se retrouve sous la zone de gel et de dégel saisonnier (Figure 5.69 C), où elle repose sur un substrat gelé en permanence. Pour que ce type de fondation soit utilisé avec succès, il est essentiel de maintenir le sol gelé sous la semelle et de bien évaluer sa capacité portante et les tassements potentiels liés au fluage à long terme du sol de fondation. Les contraintes de pressions admissibles pour les fondations superficielles enfouies dans le pergélisol seront déterminées par la résistance au cisaillement du sol gelé en fonction de la durée et de la température. La profondeur de l'excavation requise avant d'atteindre le sommet du pergélisol est extrêmement variable d'un emplacement à l'autre (variabilité intrasite), d'un site à l'autre (variabilité locale) et d'un village à l'autre (variabilité régionale). Pour un même site et entre les sites, la couche active variera selon le type de matériau en place, le type de surface, la topographie, le drainage et l'enneigement. De manière générale, il est convenu que la couche active sera proportionnellement moins épaisse à mesure qu'on se déplace vers le nord. Par exemple, pour un site avec des matériaux et des conditions de surface similaires, la couche active sera plus épaisse à Umiujaq qu'à Salluit. Lors de la conception de ce type de fondation, la profondeur de l'encastrement doit tenir compte des impacts thermiques de l'infrastructure et des nouvelles conditions environnementales sur le régime thermique du sol (épaisseur de la couche active, températures du sol en profondeur) et également des impacts anticipés par les changements climatiques. Plusieurs expériences réalisées par Robinsky et Bessflug (1973) ont démontré l'efficacité de l'utilisation de semelles isolées pour les bâtiments chauffés et non chauffés afin d'éviter que le dégel ne pénètre au-delà de la base de la semelle.

La pratique courante suggère de construire les fondations au début de l'hiver, lorsque la couche active est la plus épaisse et que les températures froides contribuent à regeler la zone remblayée (Phukan et Andersland, 1981). Advenant une installation au cours de l'été, il faudra prévoir suffisamment de temps dans l'échéancier de construction pour permettre le regel du sol autour de la semelle et du pilastre.



FIGURE 5.67 : A ET B) TRÉPIEDS POSÉS SUR UNE SEMELLE DE BOIS MUNIS DE VÉRINS AJUSTABLES REPOSANT SUR UN REMBLAI GRANULAIRE (SOURCE : QUADRIVIUM). C) PILIER POSÉ SUR UNE SEMELLE EN BÉTON LÉGÈREMENT ENCASTRÉE DANS UN REMBLAI GRANULAIRE. D) TÊTE DE PILIER MUNIE D'UN VÉRIN AJUSTABLE.

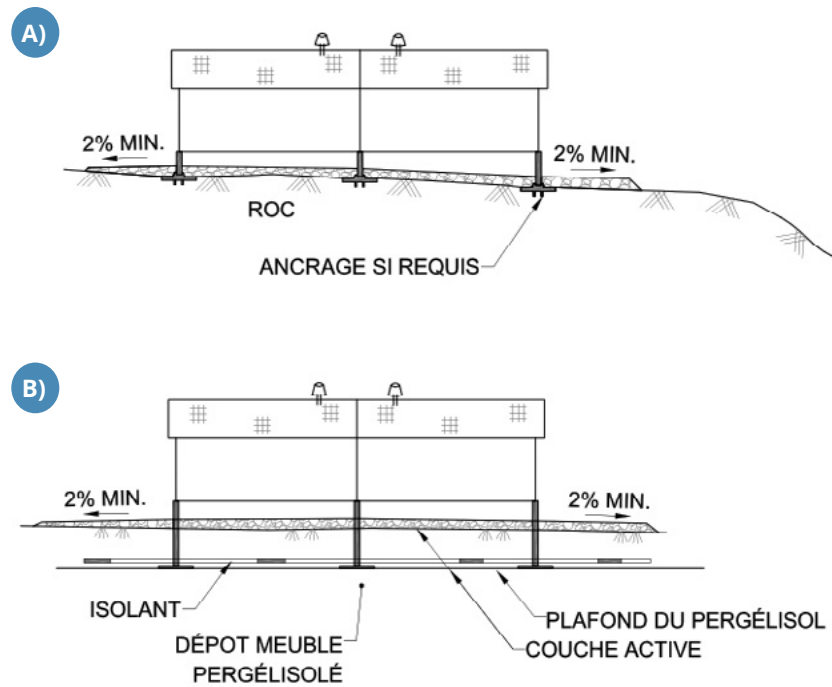


FIGURE 5.68 : A) SEMELLES REPOSANT À LA SURFACE DU ROC AVEC ANCRAGE SI REQUIS. B) SEMELLES ENFOUIES REPOSANT SUR LE PERGÉLISOL, OU LÉGÈREMENT ANCRÉES À L'INTÉRIEUR DE CELUI-CI, AVEC USAGE D'ISOLANT RIGIDE.

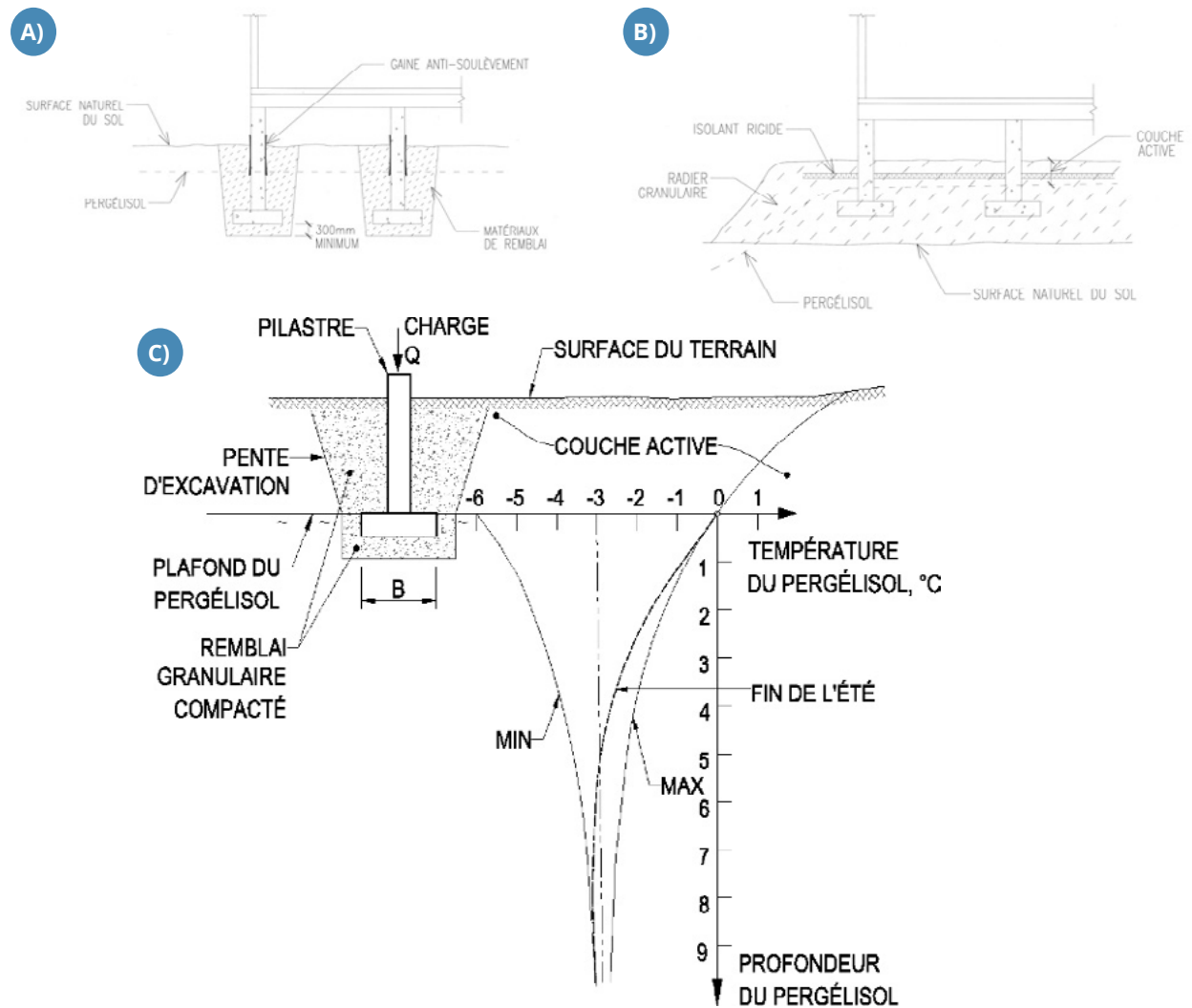


FIGURE 5.69 : SEMELLE ENCASTRÉE DANS LE PERGÉLISOL A) EN MILIEU NATUREL ET B) DANS UN REMBLAI GRANULAIRE REPOSANT À LA SURFACE DU SOL. C) SEMELLE EN BÉTON, ENCASTRÉE DANS LE PERGÉLISOL AVEC LES PROFILS DES TEMPÉRATURES MINIMALES ET MAXIMALES DANS LE SOL. (MODIFIÉ DE LA CONCEPTION ET RÉHABILITATION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN RÉGIONS NORDIQUES 1983 NBR 123 DE BRANKO LADANYI, ISBN 2-550-25505-4). NOTEZ QUE, DANS CETTE FIGURE, LA PROFONDEUR 0 A ARBITRAIREMENT ÉTÉ ATTRIBUÉE AU PLAFOND DU PERGÉLISOL ET NON À LA SURFACE DU TERRAIN.

5.5.2.4 Mur de fondation sur semelle filante

Les murs de fondation sur semelle filante, largement utilisés dans les secteurs où il n'y a pas de pergélisol, sont un type de fondation de plus en plus utilisé au Nunavik et au Nunavut pour supporter de gros bâtiments qui requièrent une bonne capacité portante et où le roc est sain, affleurant ou à une profondeur superficielle (Figure 5.70). Ce type de fondation a l'avantage d'offrir un espace vacant sous le bâtiment (sous-sol ou vide sanitaire) qui permet d'y placer les composants mécaniques du bâtiment. Cet espace peut également être aménagé à des fins d'entreposage pour les locataires. Dans une conception de ce type, il est possible d'intégrer de petites ouvertures tout le long de la fondation afin de permettre la ventilation du vide sanitaire et assurer ainsi l'extraction d'une certaine quantité de chaleur (vide sanitaire froid) (Johnston, 1981). Il est également possible de ventiler le vide sanitaire avec l'air chaud provenant de l'intérieur du bâtiment (vide sanitaire chaud) qui est ensuite expulsé par une cheminée. Dans ce cas, un isolant est utilisé pour recouvrir les murs et le plancher du vide sanitaire (Andersland et Ladanyi, 2004). La construction de ce type de fondation nécessite une source de granulats appropriés pour permettre la confection du béton. Il est à noter que ce type de fondation est très sensible aux tassements différentiels et qu'il est susceptible de perturber le régime thermique du sol en l'absence d'un

système de refroidissement (remblai ventilé ou thermosiphon). Par conséquent, son utilisation dans une zone de pergélisol demeure limitée aux endroits où le sol est stable lors du dégel (affleurement rocheux non altéré, dépôt granulaire épais pauvre en glace ou en couverture mince sur roc) et où les sols sont bien drainés. Ce type de fondation offre l'avantage de pouvoir s'ajuster à la topographie du substrat rocheux, et ce, même lorsque le site est en pente (Figure 5.70 C et D).

Le choix du site d'implantation d'une habitation reposant sur ce type de fondation doit être soigneusement évalué afin d'éviter les sols fins riches en glace qui peuvent parfois se trouver sous une couche de sable et de gravier de quelques mètres. Malgré sa profondeur, ce sol riche en glace est susceptible de dégeler en quelques années sous l'effet de la transmission de la chaleur du bâtiment au sol (Figure 5.55). Une telle situation a été observée à Umiujaq dans un secteur où quelques habitations avec sous-sol ont été construites sur une terrasse sableuse de quelques mètres d'épaisseur reposant sur un dépôt fin riche en glace.



FIGURE 5.70 : A) ET B) MUR DE FONDATION SUR SEMELLE FILANTE REPOSANT SUR UN SUBSTRAT ROCHEUX NIVELÉ À KANGIQSUJUAQ AU NUNAVIK, C) ET D) MUR DE FONDATION SUR SEMELLE FILANTE QUI REPOSE SUR UN SUBSTRAT ROCHEUX INCLINÉ À IQALUIT AU NUNAVUT.

5.5.2.5 Fondations tridimensionnelles à points d'assise multiples

Les fondations tridimensionnelles à points d'assise multiples sont conçues pour supporter des déplacements ou des affaissements de terrain importants tout en demeurant rigides afin d'empêcher la déformation du bâtiment. Ce type de fondation, développé en collaboration par la Société canadienne d'hypothèques et de logement et l'entreprise Triodetic Building Products Ltd., repose sur le principe qu'une structure tridimensionnelle posée sur trois assises élimine les problèmes causés par l'affaissement différentiel ou par l'élévation d'un des trois points, puisque ceux-ci définiront toujours un même plan. Tout déplacement vertical d'un de ces points inclinera simplement le plan permettant ainsi à la structure de se comporter comme une seule unité. En d'autres mots, un mouvement local aura un effet sur le plan d'inclinaison de la structure globale plutôt que de la déformer ponctuellement. Le plan de fondation peut par la suite être redressé au besoin à l'aide des plaques de soutien ajustable, et ce, tout en limitant les dommages potentiels d'une telle opération sur la structure.

Ces fondations se composent d'un réseau de membrures structurales en acier galvanisé ou en alliage interreliées à l'aide de nœuds afin de former une structure tridimensionnelle (Figure 5.71 A). Les nœuds spéciaux conçus pour ce type de fondation permettent de connecter plus de dix membrures en un seul point (Figure 5.71 B). Cette structure est formée d'une grille orthogonale supérieure et d'une grille orthogonale inférieure d'environ

un mètre carré qui sont interreliées par des barres diagonales. La charge et les contraintes sont exercées uniformément sur le cadre, ce qui augmente l'intégrité structurale du bâtiment. Pour assurer une bonne rigidité sous la torsion, chacune des grilles est contreventée par des membrures horizontales. Cette rigidité assure ainsi que la structure, en résistant aux forces multiaxiales et aux rotations des membrures individuelles, agira comme une dalle flottante. Pour cette raison, il n'est pas nécessaire de prévoir un épais remblai granulaire. Il suffit de préparer le terrain en assurant un bon drainage de surface et d'aménager des aires d'accès et de circulation convenables. Pour les sols plus fins, la pose d'un géotextile sur le terrain peut être nécessaire avant de mettre le remblai en place.

Les fondations tridimensionnelles s'assemblent sur place, sans nécessiter l'intervention d'une équipe d'ouvriers expérimentés. En général, une équipe de deux personnes réussit à monter la structure en quelques jours. Livré en pièces détachées, ce système est léger et peu volumineux, ce qui facilite son transport par avion ou par bateau. Pour une structure de 8,5 x 12,75 m (28 x 42 pi), le poids de la structure incluant les solives de plancher est d'environ 4500 kg pour un volume d'environ quatre mètres cubes dont aucun morceau n'excède une longueur de deux mètres (AGRA Earth & Environmental Limited, 2000).

Depuis 1985, ce type de fondation tridimensionnelle rigide a été installé sur environ 800 unités de logement dans les communautés nordiques et aucun problème de comportement n'a été noté jusqu'à présent (Triodetic). Le suivi de plusieurs centaines de fondations de ce type reposant sur différents sols et dans différentes conditions de surface montre que les mouvements initiaux et à long terme de la structure sont tous restés à l'intérieur des limites acceptables (Vangool, 1996). Basée sur les performances de ce type de fondation, la durée de vie utile est estimée entre 70 et 80 ans. Le système de fondation tridimensionnelle à points d'assise multiples offre une grande flexibilité de conception pour les nouveaux projets ou pour les rénovations, puisqu'il n'y a aucune limitation liée à la taille du bâtiment. Il s'agit d'un type de fondation à considérer, surtout si la disponibilité de la main-d'œuvre, des matériaux et de la machinerie est limitée. L'une des limitations actuelles est que ce type de fondation ne convient qu'aux immeubles de formes rectangulaires. Pour le moment, il n'existe qu'une seule construction avec des fondations tridimensionnelles au Nunavik. Son installation, réalisée en 2013 dans la communauté d'Akulivik (Figure 5.72 A et B), fait partie d'un projet pilote visant à évaluer l'applicabilité de différents types de fondations au Nunavik.

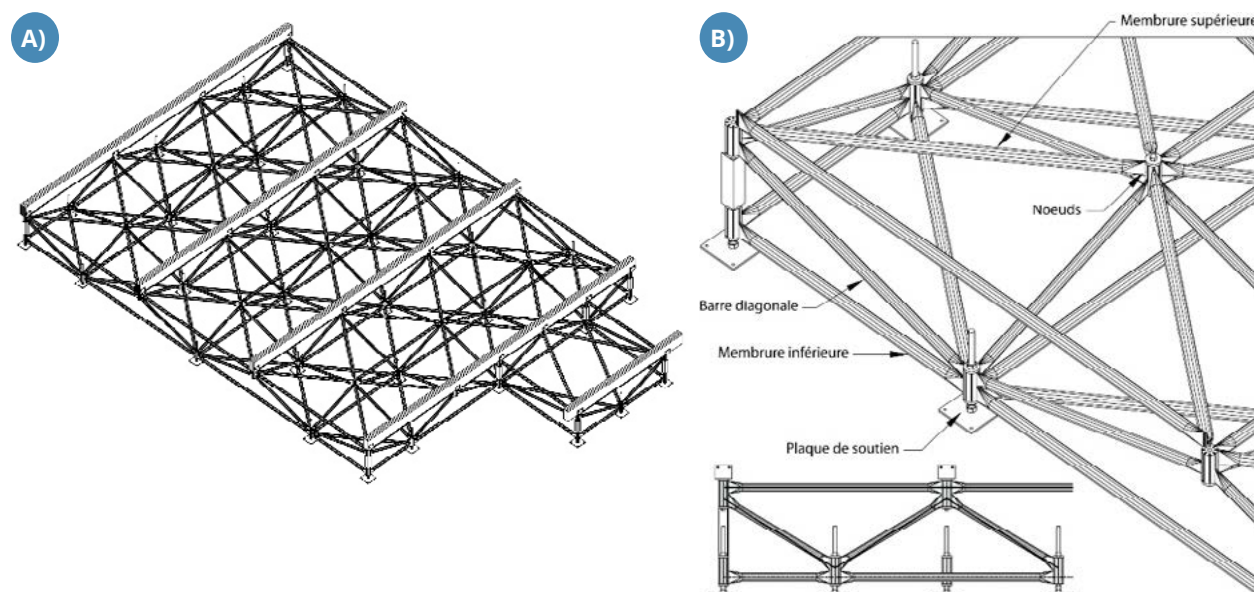


FIGURE 5.71 : A) RÉSEAU DE MEMBRURES STRUCTURALES, EN ACIER GALVANISÉ OU EN ALLIAGE, INTERRELIÉES À L'AIDE DE NŒUDS AFIN DE FORMER UNE STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE QUI AGIRA COMME UNE DALLE FLOTTANTE. B) GRILLE ORTHOGONALE SUPÉRIEURE ET GRILLE ORTHOGONALE INFÉRIEURE D'ENVIRON UN MÈTRE CARRÉ, INTERRELIÉES PAR DES BARRES DIAGONALES. LES NŒUDS SPÉCIAUX CONÇUS POUR CE TYPE DE FONDATION PERMETTENT DE CONNECTER PLUS DE DIX MEMBRURES EN UN SEUL POINT (MULTIPOINT FOUNDATIONS LTD. <http://multipoint-foundations.com/>, 10 DIDAK DR. ARNPRIOR, ONTARIO, CANADA, K7S 0C3. (613) 623 3434).

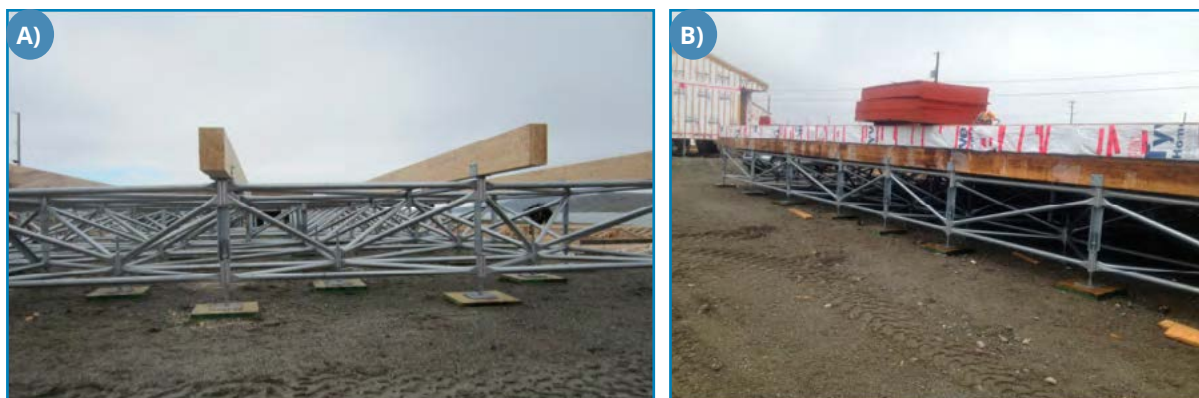


FIGURE 5.72 : A) ET B) FONDATION TRIDIMENSIONNELLE UTILISÉE LORS D'UN PROJET PILOTE POUR UN BÂTIMENT D'HABITATION, DANS LA COMMUNAUTÉ D'AKULIVIK AU NUNAVIK (SOURCE : MAKIVIK, 2013).

5.5.2.6 Dalle sur sol

Les dalles sur sol en béton apparaissent a priori comme un choix idéal pour les sous-sols d'habitations et pour plusieurs autres bâtiments tels que les garages, les casernes de pompiers et les entrepôts. Ce type de fondation permet généralement de fournir, à bon marché, un plancher durable et lisse ainsi qu'un support structural pour l'équipement lourd. Toutefois, en l'absence d'une technique d'extraction de chaleur sous la dalle (thermosiphon, remblai ventilé, etc.), la transmission de chaleur du bâtiment au pergélisol sous-jacent peut atteindre des profondeurs importantes (Figure 5.55). Étant donné que ce type de fondation, par sa rigidité, permet peu de mouvements de terrain, son utilisation demeure risquée en présence de pergélisol et elle ne doit être retenue qu'après une caractérisation exhaustive du site à l'étude. En présence de pergélisol riche en glace, les tassements peuvent être majeurs. Au Nunavik, la plupart des problèmes graves de fondation, c'est-à-dire ceux qui ont entraîné la démolition du bâtiment, son déplacement ou l'abandon du chauffage, sont reliés aux ouvrages chauffés construits sur une dalle sur sol. Quelques exemples d'aménagement de terrain avec dalle sur sol/sous-sol sont présentés à la figure 5.73. Idéalement, il est conseillé de choisir ce type de fondation pour un site où le roc est sain et près de la surface. Il est également recommandé de renforcer la dalle avec une armature d'acier afin d'augmenter sa rigidité et d'offrir une certaine résistance aux mouvements différentiels qui pourraient tout de même survenir.

Eranti et Lee (1986) rapportent qu'un nombre important de ruptures de ce type de fondation pour des bâtiments chauffés a été observé lorsque la stratégie de protection du pergélisol se limitait à la présence d'isolation sous la dalle. Par conséquent, outre l'isolation de la dalle, il est fréquent pour ce type de fondation d'inclure lors de la conception un système qui permettra d'évacuer la perte de chaleur provenant du bâtiment afin de limiter le dégel du pergélisol sous le bâtiment. Parmi ces systèmes, les plus fréquents sont les remblais ventilés ou les thermosiphons. Ces deux systèmes seront traités en détail dans la section 5.5.4 portant sur les fondations avec système d'extraction de chaleur.

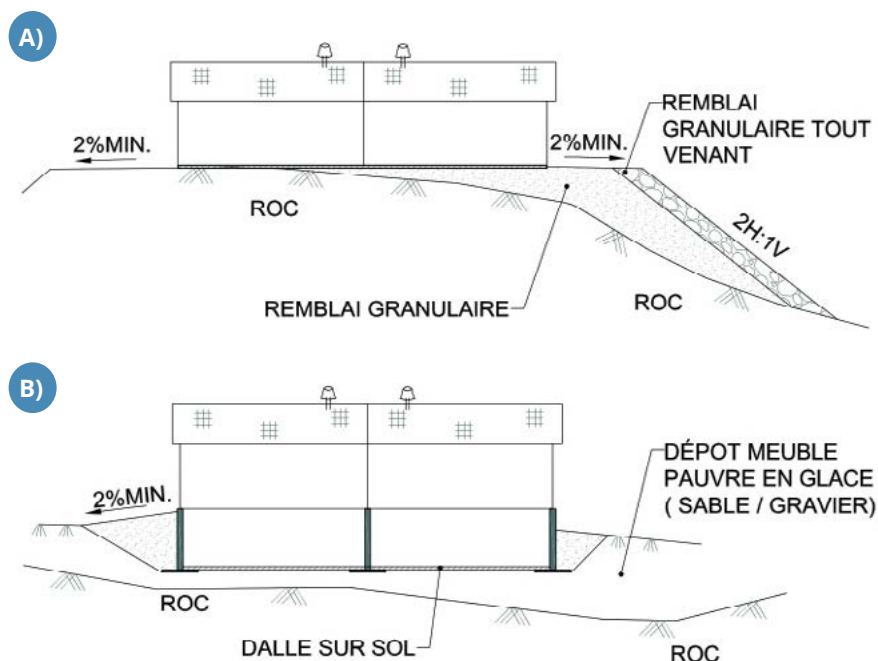


FIGURE 5.73 : A) DALLE SUR SOL OÙ LE ROC AFFLEURE. B) DALLE SUR SOL AVEC VIDE SANITAIRE OÙ UNE MINCE COUCHE DE DÉPÔT MEUBLE PAUVRE EN GLACE RECOUVRE LE ROC.

5.5.3 Fondations profondes

Les fondations sur pieux sont largement utilisées dans les zones de pergélisol. Ce type de fondation permet de supporter un large éventail de structures allant d'un grand bâtiment chauffé à une simple tour de communication, et ce, même lorsque les charges sont importantes et les conditions de pergélisol peu favorables (Johnston, 1981). Ce type de fondation, muni d'un espace permettant la circulation d'air sous la structure chauffée, s'est avéré très efficace, particulièrement dans les secteurs où le pergélisol est composé de sédiments fins riche en glace et sensible au dégel.

L'objectif de ce type de fondation est de transférer la charge de la structure à une couche compétente plus en profondeur qui restera mécaniquement et thermiquement stable tout au long de la durée de vie utile de l'infrastructure. Selon la stratigraphie du site et les propriétés des couches de matériau en place, la charge de l'infrastructure sera portée directement à la pointe en présence d'une couche de sol compétente (roc ou matériau granulaire dense et non gélif) ou répartie le long du pieu en utilisant les forces d'adhérence dues au gel. Ces deux méthodes, qui diffèrent dans leur répartition des charges de la structure au sol, définissent les deux principales catégories de pieux qui sont couramment utilisées dans une zone de pergélisol, soit les pieux portants par adhérence et en pointe (Figure 5.74 A) et les pieux portants en pointe seulement (Figure 5.74 B).

Les pieux peuvent être faits de bois, de béton ou d'acier. La sélection du type de matériau pour les pieux va dépendre de plusieurs facteurs tels que le type de sol et sa température, la charge à supporter, la disponibilité des matériaux et de l'équipement de construction ainsi que les coûts de transport et d'installation. Les pieux tubulaires en acier sont les plus couramment utilisés au Canada. Leur extrémité peut être ouverte ou fermée selon qu'ils seront forés directement dans le sol ou non. La pratique courante, du moins au Canada, est de forer un avant-trou d'un diamètre légèrement plus grand que le pieu pour ensuite y introduire ce dernier et combler l'espace avec une boue composée de sable et d'eau. La dimension des pieux ainsi que leurs profondeurs seront déterminées par le concepteur en fondation selon les forces d'adhérence requises pour résister à la charge appliquée par la structure et aux forces de soulèvement anticipées.

Comme le montrent les quelques exemples d'aménagement de terrain avec pieux jusqu'au roc (Figure 5.75), l'utilisation de ce type de fondation peut réduire sensiblement la quantité de granulats nécessaire, particulièrement lorsque la topographie est accidentée. Il faut noter que ce type de fondation ne dispense pas de construire une entrée en gravier suffisamment grande pour stationner les véhicules des résidents, tout en permettant la desserte en eau potable et en mazout et la collecte des eaux usées par camion. L'installation de pieux ne requiert pas d'excavation susceptible de déstabiliser le pergélisol. Toutefois, certains types de pieux ne permettent pas le nivelage au besoin en raison du tassement ou du soulèvement de ceux-ci. La simple pose de vis d'ajustement à la tête de chacun des pieux permet d'offrir une flexibilité en cas de mouvements de la fondation (Figure 5.76). On recommande d'utiliser des têtes ajustables pour les pieux portant par adhérence (*adfreeze pile*), ou pour ceux qui ne peuvent pas être encastrés et ancrés dans un roc de qualité, en raison des faibles possibilités de mouvements lors des cycles de gel et de dégel de la couche active.

5.5.3.1 Pieux portant par adhérence et en pointe

Pour cette catégorie, la majeure partie de la capacité portante des pieux est obtenue par le transfert de la charge sur la force d'adhérence qui se développe entre la surface latérale du pieu et le matériau de comblement utilisé ou les différentes couches de sol forées. Dans ce cas, une très faible portion de la capacité portante du pieu est assurée par la portance de la pointe. Pour aller chercher des forces d'adhérence suffisamment grandes pour soutenir la structure et supporter les soulèvements provoqués par le gel, les pieux doivent généralement pénétrer dans le sol jusqu'à une profondeur de sept à dix mètres (Torgersen, 1976).

Les forces de soulèvement par le gel peuvent être atténuées en s'assurant que la section du pieu qui traverse la couche active soit simplement munie d'une gaine ou recouverte d'un enduit lisse qui réduit l'adhésion du sol. Il est également possible de placer un isolant ou un remblai composé de matériau non gélif d'une épaisseur suffisante afin de limiter l'amplitude des cycles de gel et de dégel dans la couche gélive sous-jacente et de réduire ainsi les mouvements saisonniers. Il est également possible d'accroître la force d'adhérence entre le sol et le pieu en augmentant la rugosité de la surface du pieu qui sera ancrée dans le pergélisol (norme CAN/CSA-PLUS-4011-10). Pour ce faire, il existe de nombreuses options afin d'accroître cette force d'adhérence, parmi lesquelles on trouve l'ajout de collets en acier le long du pieu et le forage de trous permettant la migration du coulis à l'intérieur du pieu (Figure 5.77 A). Le nouveau concept d'habitation de la SHQ qui a été construit dans la communauté de Quaqtuq repose sur des pieux sur lesquels des collets d'acier ont été soudés et des trous percés afin d'accroître la capacité portante (Figure 5.77 A).

La conception de fondation qui utilise des pieux portant par adhérence et en pointe doit être minutieusement évaluée afin de tenir compte des multiples facteurs pouvant nuire à leur performance, par exemple, la transmission de chaleur au sol par pont thermique, l'infiltration d'eau le long des pieux, le réchauffement climatique et la présence de pergélisol salin. Une étude de reconnaissance de sol exhaustive, comprenant notamment le prélèvement et l'analyse d'échantillons et une évaluation du régime thermique sur toute la durée de vie de l'ouvrage, devrait être effectuée.

Pour utiliser de tels pieux, la température du pergélisol doit idéalement être inférieure à -3 °C, surtout lorsque les sols sont salins. La salinité du pergélisol doit impérativement être évaluée lors de l'étude du site, car sa présence complique la conception (norme CAN/CSA-PLUS-4011-10). Au Nunavik, plusieurs communautés ont à composer avec un pergélisol salin, une grande partie du territoire côtier ayant déjà été submergée par la mer de Tyrell (côte de la baie d'Hudson) ou par la mer d'Iberville (côte de la baie d'Ungava).

5.5.3.2 Pieux portant en pointe

Dans cette catégorie, la charge de la structure est essentiellement transférée par la pointe du pieu à une couche de sol compétente ce qui permet, dans bien des cas, d'augmenter substantiellement la capacité portante de la fondation même si le sol n'est pas adéquat en surface. Cette catégorie de pieux est considérée seulement quand ceux-ci atteignent le roc ou un matériau granulaire dense et non gélif (Johnston, 1981). D'après la norme CAN/CSA-PLUS-4011-10, l'option d'ancrer les pieux dans le roc est possible lorsque celui-ci se trouve à une profondeur inférieure à 10 m. Toutefois, dans des situations particulières et pour des raisons économiques (ex. : bâtiment ayant une charge utile et une surcharge très importantes), il peut s'avérer préférable d'opter pour des pieux prenant appui sur le roc plutôt que par adhérence, même si celui-ci se trouve à une profondeur supérieure à 10 m. Lorsque le pieu atteint le roc, il est commun de le faire pénétrer sur une profondeur d'environ deux mètres afin de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'un gros bloc et que la pointe du pieu s'appuie sur un roc de qualité peu altéré. Par la suite, un ciment à basse température est coulé entre les parois du puits de forage et du pieu afin de bien sceller le trou (Figure 5.77 B).

5.5.3.3 Mode d'installation et considérations

Il existe plusieurs méthodes d'installation des pieux. La méthode d'installation optimale dépend de plusieurs facteurs tels que le type de sol, sa température et la disponibilité de l'équipement sur place. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve les pieux enfoncés dans un avant-trou fait à la vapeur, à l'eau chaude ou à l'aide d'une tarière ou d'une foreuse rotative (eau ou air) et les pieux battus ou vibrés directement dans le sol. Une combinaison de ces différentes méthodes est également possible. Dans les secteurs où le pergélisol est chaud, la déstabilisation thermique qui se produit lorsque les pieux sont enfoncés dans un avant-trou fait à la vapeur ou à l'eau chaude retarde considérablement le retour aux conditions thermiques initiales. Il en est de même lorsque les pieux sont placés dans un avant-trou plus grand qui est ensuite comblé avec un coulis. Dans de telles circonstances, il peut être nécessaire d'utiliser un système de réfrigération artificiel pour favoriser le regel et la stabilisation thermique du trou de forage et du pergélisol environnant (thermopieux ou thermosondes). Dans ces zones, l'installation des pieux au printemps permet de profiter des températures froides du sol pour accélérer le regel autour du pieu et éviter ainsi de devoir refroidir artificiellement le sol. L'utilisation de vapeur ou d'eau pour forer l'avant-trou est de moins en moins fréquente, car cette méthode introduit d'importantes quantités de chaleur dans le sol, ce qui retarde considérablement le regel des pieux et ultimement l'échéancier de construction. Toutefois, il peut s'agir d'une solution acceptable dans les endroits où l'équipement nécessaire pour forer un avant-trou ou enfoncer directement les pieux n'est pas disponible.

Actuellement, la plupart des pieux sont soit battus ou vibrés directement dans le sol, soit placés dans un avant-trou rempli d'un coulis. Ces méthodes réduisent la perturbation thermique, ce qui permet un regel du sol dans les heures, voire les jours suivant l'installation du pieu (Johnston, 1981). Lorsque les pieux sont placés dans un avant-trou plus grand, un mélange de sable graveleux, de sable, de sable silteux ou de silt ayant une teneur en eau entre 6 et 15 % est généralement utilisé comme matériau de remplissage. Il est également possible d'utiliser du ciment. La température du mélange doit être près du point de congélation pour favoriser un regel rapide et ne devrait jamais excéder 4 °C. Lors du remplissage, une attention particulière doit être portée afin d'éviter la création de bulles d'air entre les parois du pieu et celle du trou. Un espace annulaire d'au moins 50 mm, mais n'excédant pas 100 mm, entre ces parois facilite les opérations de remplissage tout en permettant d'aligner le pieu lorsque le trou n'est pas complètement à la verticale (Johnston, 1981). Lorsque l'avant-trou est foré plus profondément que prévu, celui-ci peut être remblayé avec du sable ou du gravier fin compacté jusqu'au niveau désiré.

Dans les sols à grains fins et plastiques dont la température est supérieure à -3 °C, les pieux peuvent être battus ou vibrés directement dans le sol. Ce type d'opération réduit considérablement les perturbations thermiques et le regel s'effectue dans les minutes ou les heures suivant l'installation. De plus, il n'est pas nécessaire de préparer le coulis. Il est préférable de procéder à ce type d'installation au cours de l'été alors que les températures plus chaudes du sol favorisent une meilleure pénétration. Lorsque les pieux sont installés dans des avant-trous au cours de l'été, une attention particulière doit être portée afin d'éviter les infiltrations d'eau dans le trou et l'effondrement des parois dans la couche active. Pour ce faire, l'installation d'un tubage de surface ancré dans le pergélisol peut être nécessaire. Il peut également être nécessaire d'ériger un remblai de gravier qui facilitera le déplacement de la machinerie tout en protégeant la surface du sol naturel.

Il est primordial de s'assurer que le sol autour des pieux est complètement regelé et stabilisé thermiquement avant d'y déposer une charge. Pour cela, il est conseillé de faire le suivi des températures du sol à différentes profondeurs le long de quelques pieux témoins. L'instrumentation nécessaire pour cette opération permet également de faire un suivi de performance à long terme. De multiples facteurs déterminent le temps de regel du sol autour d'un pieu après son installation, ce sont le régime thermique du sol, la méthode d'installation du pieu, la saison d'installation (automne, hiver, printemps et été), l'espacement des pieux, le diamètre de l'avant-trou, la température et les propriétés thermiques du coulis (Figure 5.78). Lorsque les pieux sont installés à la fin de l'hiver, le regel du pergélisol autour de ces derniers se fait beaucoup plus rapidement qu'à la fin de l'été.

Les contraintes de soulèvement qui se développent dans la couche active lors du regel sont transmises aux pieux par le lien d'adhérence avec le sol gelé. Ces contraintes peuvent être appréciables. Penner et Goodrich (1983) ont calculé qu'elles pouvaient atteindre jusqu'à 500 kPa sur des pieux d'acier. Le poids d'un bâtiment résidentiel de deux étages n'est nettement pas suffisant pour résister aux forces de soulèvement d'un pieu par adhérence du sol. Afin de contrecarrer les forces de soulèvement en jeu et d'obtenir une résistance suffisante, les pieux devront, lorsque c'est possible, être encastrés et ancrés dans le roc. Pour limiter l'action du sol sur le pieu et ainsi diminuer le risque de soulèvement par le gel lors du regel de la couche active, il est recommandé de prévoir un pieu dont le fini est plus lisse ou une gaine anti-soulèvement dans la section qui traverse la couche active. L'ajout d'un remblai non gélif peut également contribuer à réduire les déplacements qui pourraient se produire. Finalement, afin de diminuer le transfert de chaleur des pieux portant par adhérence au sol, il pourrait être souhaitable de peindre en blanc la section des pieux en périphérie d'un bâtiment exposée au soleil.

Dans plusieurs communautés de l'Arctique canadien, on choisit de préférence la fondation sur pieux, bien qu'elle soit plus coûteuse qu'une fondation superficielle sur radier, en raison du peu d'entretien qu'elle requiert et de sa performance à long terme (AGRA Earth & Environmental Limited, 2000). En dépit des nombreux avantages que présente ce type de fondation, certaines difficultés concernant la conception et la mise en place demeurent. Par exemple, les risques liés à une mauvaise conception (mauvaise évaluation des profondeurs, des compétences du substrat, des forces d'adhérence, etc.) peuvent être néfastes pour la structure. De plus, l'installation de ce type de fondation requiert une main-d'œuvre et une machinerie spécialisées qui ne sont pas disponibles dans tous les villages du Nunavik. Par conséquent, si une mobilisation est nécessaire, cela peut augmenter considérablement le coût du projet et retarder l'échéancier de construction. Lorsque l'équipement et la machinerie sont disponibles, le coût par pieu est d'environ 500 \$ au Nunavut (Canadrill) et entre 700 et 1000 \$ dans l'ouest (Tundra Drilling Services Ltd.). Actuellement, aucune compagnie de forage n'est basée au Nunavik. Toutefois, Makivik dispose de quelques foreuses pneumatiques qui sont déplacées d'un village à l'autre en fonction des besoins. Lorsque présente et disponible, cette machinerie peut être louée avec ou sans opérateurs comme ce fut le cas pour la construction de la station de recherche du Centre d'études nordiques à Salluit en 2010 qui repose sur une fondation profonde composée de six pieux ancrés dans le roc.

Les fondations profondes, tels les pieux en acier ancrés dans le roc, ont été utilisées avec succès au Nunavik et au Nunavut. Ces fondations sont considérées comme stables et ne nécessitent que très peu d'entretien et généralement moins de matériaux granulaires que lors de la construction d'un radier. Elles permettent également de surélever les bâtiments chauffés au-dessus de la surface du terrain, favorisant ainsi le balayage de la neige par le vent et un meilleur bris thermique entre le bâtiment et le sol sous-jacent. Ce type de fondation s'ajuste très bien à une topographie accidentée. Pour des bâtiments d'habitation légers, le pieu le plus répandu est le pieu tubulaire en acier. Il peut être enfoncé jusqu'au roc ou encastré et ancré dans le socle rocheux pour contrecarrer les forces de soulèvement. Bien conçu, il offre une excellente capacité portante et une bonne performance à long terme. Bien que les pieux dont la capacité portante est assurée par adhérence et en pointe aient été présentés dans la présente section, l'utilisation de pieux encastrés ou ancrés dans le roc devrait être privilégiée en raison de leur résistance à l'arrachement et de leur stabilité à long terme, nonobstant l'évolution thermique du pergélisol sous l'effet des changements climatiques. En effet, d'après la norme CAN/CSA-PLUS-4011-10, les pieux qui sont ancrés dans le roc ne sont pas affectés par le régime thermique du sol et demeureront insensibles aux changements thermique et mécanique provoqués dans le pergélisol par les changements climatiques.

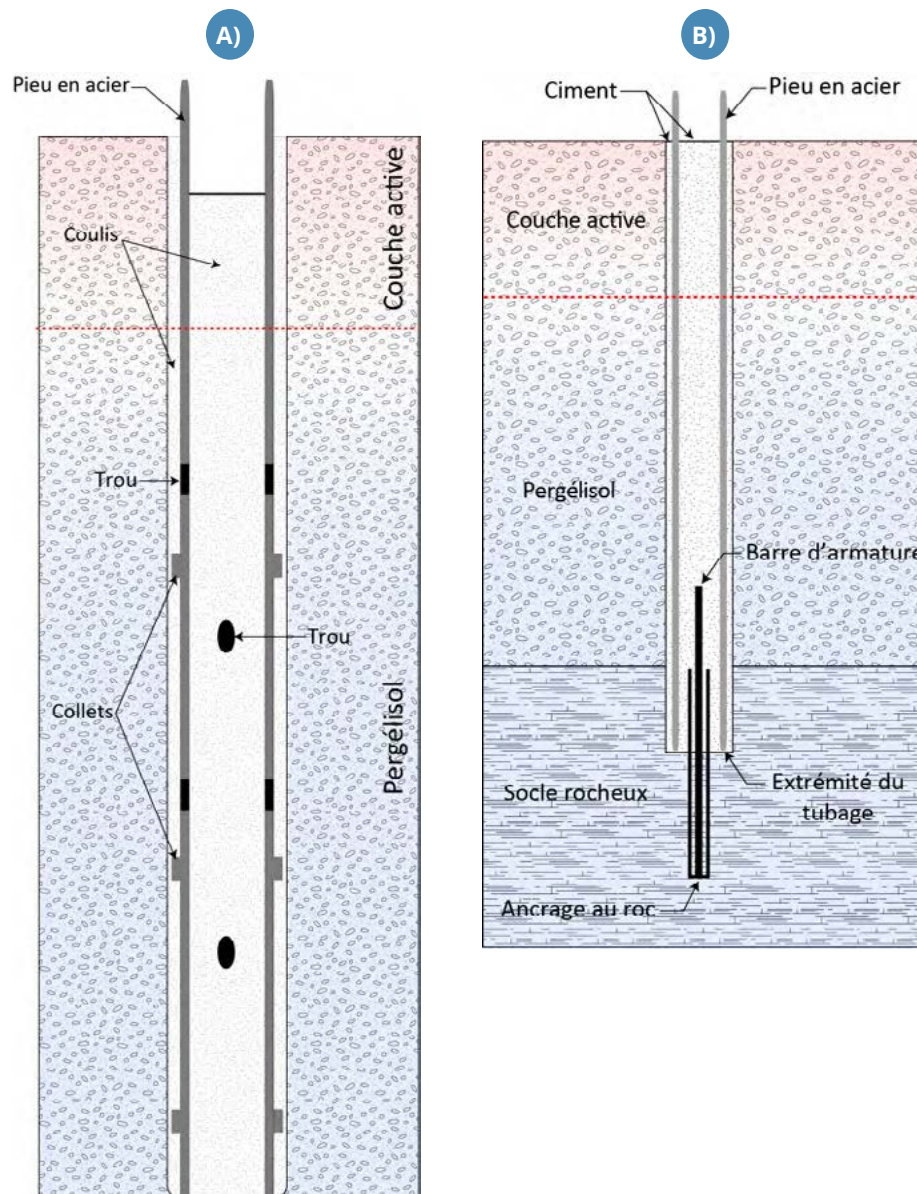


FIGURE 5.74 : A) CROQUIS D'UN PIEU PORTANT PAR ADHÉRENCE ET EN POINTE. B) CROQUIS D'UN PIEU PORTANT EN POINTE, ANCRÉ DANS LE ROC.

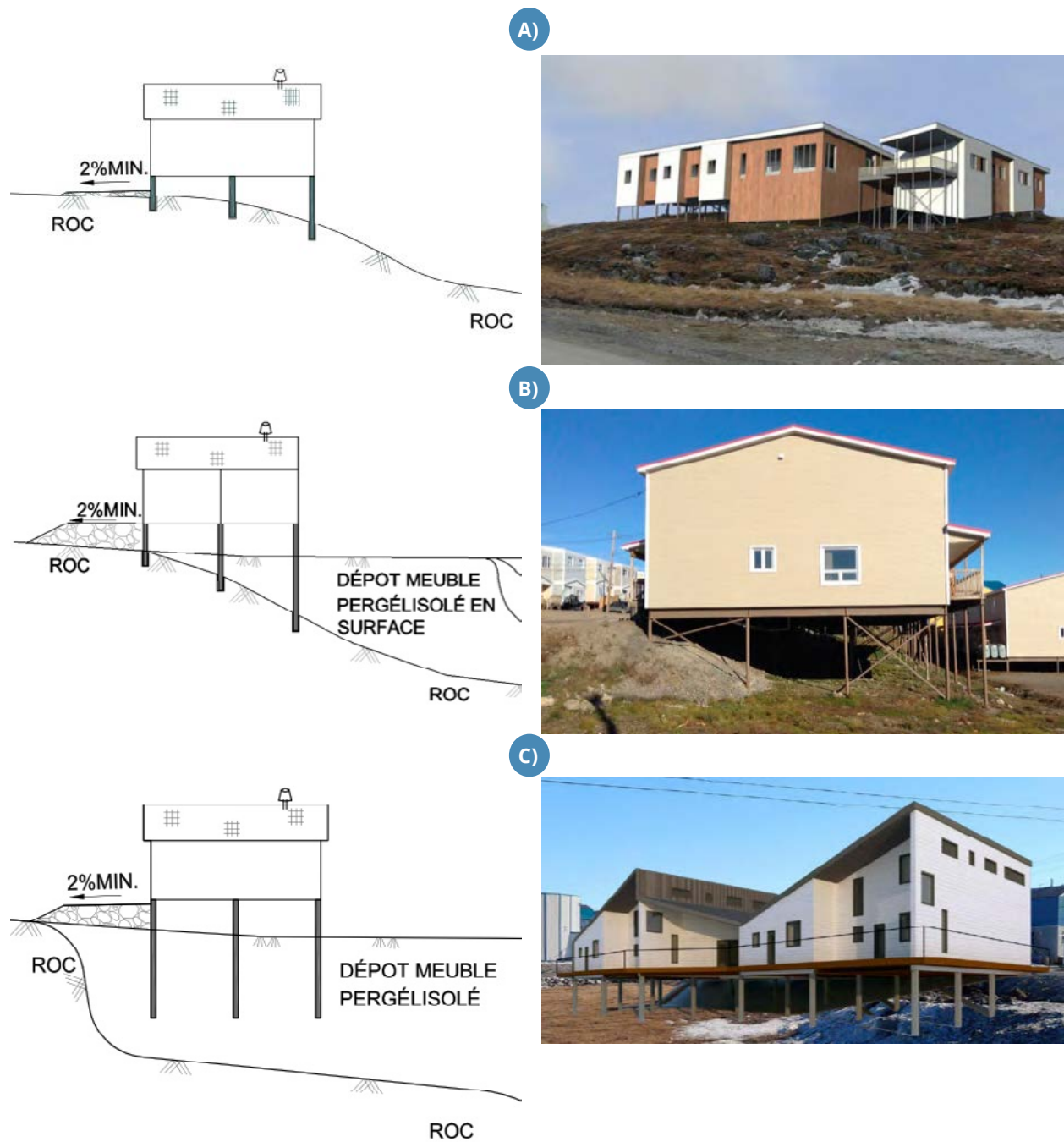


FIGURE 5.75 : A) PIEUX ENCASTRÉS DANS LE ROC, AVEC ROC EN SURFACE. B) PIEUX ENCASTRÉS DANS LE ROC LORSQUE CE DERNIER EST RECOUVERT D'UN MINCE DÉPÔT MEUBLE PERGÉLISOLÉ. C) PIEUX PORTANT PAR ADHÉRENCE ET EN POINTE PLANTÉS DANS UN ÉPAIS DÉPÔT MEUBLE PERGÉLISOLÉ (SOURCE : M. BLOUIN, MB-A).



FIGURE 5.76 : A) ET B) TÊTES DE PIEUX AJUSTABLES (MENTION DE SOURCE : E. L'HÉRAULT, CEN, 2015). C) CONTREVENTEMENTS (SOURCE : N. JOURNEAUX).



FIGURE 5.77 : A) PIEUX SUR LESQUELS DES COLLETS D'ACIER ONT ÉTÉ SOUDÉS ET DES TROUS PERCÉS AFIN D'ACCROÎTRE LA CAPACITÉ PORTANTE (MENTION DE SOURCE : G. ROBICHAUD, 2015). PIEUX PORTANT EN POINTE SERVANT DE FONDATION AU PROTOTYPE D'HABITATION DE LA SHQ À QUAQTAQ LORS B) DE LA MISE EN PLACE DU COULIS ET C) UNE FOIS COUPÉS AU NIVEAU AVEC LA SOLIVE DE RIVE FIXÉE (SOURCE : E. L'HÉRAULT, CEN, 2015).

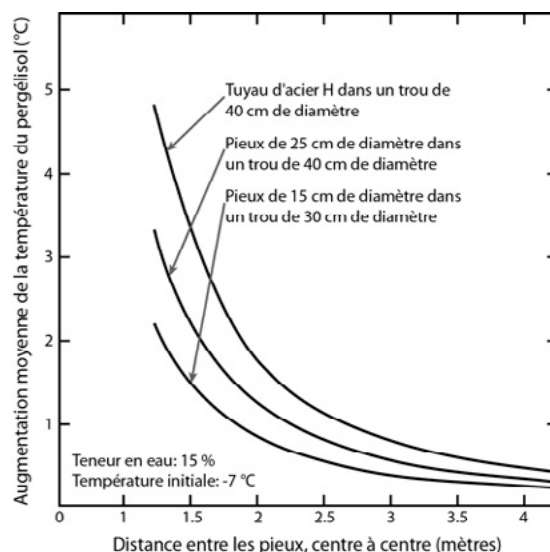


FIGURE 5.78 : EFFET DU DIAMÈTRE DU TROU ET DE L'ESPACEMENT DES PIEUX SUR LA TEMPÉRATURE DU PERGÉLISOL (TIRÉ DE « PERMAFROST : ENGINEERING DESIGN AND CONSTRUCTION » 1981 NBR P.483 DU COMITÉ ASSOCIÉ DE LA RECHERCHE GÉOTECHNIQUE DU CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA, ISBN 0-471-79918-1).

5.5.4 Fondations avec système d'extraction de chaleur

5.5.4.1 Fondations ventilées

L'un des moyens le plus employé, le plus efficace et le plus économique pour empêcher une dégradation du pergélisol sous un bâtiment chauffé consiste à utiliser une fondation ventilée (U.S. ARMY/AIR FORCE, 1983). Ce type de fondation permet à l'air froid de circuler, librement ou dans un conduit, entre le sol et le plancher d'un bâtiment en hiver afin d'en extraire la chaleur et de maintenir des conditions froides. Dans la conception de plusieurs types de fondations, tant superficielles que profondes, on prête une attention particulière au maintien d'un espace d'air suffisant entre le sol et le bâtiment. Lorsque la charge qui sera appliquée sur le plancher du bâtiment est importante, comme c'est le cas dans un garage, un entrepôt, un hangar, une centrale électrique ou tout autre bâtiment à usage industriel, on privilégiera souvent une fondation de type dalle sur sol, car elle répartit la charge sur l'ensemble de la structure. Ainsi, contrairement à une fondation qui utilise des semelles individuelles, le risque de surcharge localisée pouvant provoquer des tassements différentiels est atténué. Toutefois, ce type de fondation étant déposé directement à la surface d'un remblai granulaire, il ne permet pas l'extraction de la chaleur par circulation d'air ce qui entraîne un réchauffement du régime thermique sous le bâtiment, voire la fonte du pergélisol. Cette perturbation thermique du pergélisol sera d'autant plus importante si le bâtiment est chauffé. Il est donc impératif d'isoler et de ventiler ce type de fondation afin de limiter la perte de chaleur provenant du bâtiment et la dégradation thermique ultérieure du pergélisol sous-jacent.

La dalle sur sol offre plusieurs options pour assurer une ventilation adéquate sous le bâtiment. Cependant, ces options sont plus dispendieuses que celle qui consiste simplement à surélever la structure au-dessus du sol avec des pieux ou des piliers sur semelle. Dans l'une de ces options, il faut placer des conduits en position horizontale à intervalle régulier sous la zone couverte par la dalle, sur le remblai (Figure 5.79 A) ou à l'intérieur de celui-ci (Figure 5.79 B). De cette manière, l'air froid qui entre et circule dans le conduit se réchauffe graduellement par l'absorption d'une partie de la chaleur du sol avant de ressortir de l'autre côté. Même lorsque les conditions de vent ne permettent pas un passage forcé de l'air dans les conduits, la circulation d'air se produit naturellement en raison de la présence d'un gradient thermique le long du système qui favorise la convection. L'air qui pénètre dans le conduit doit être suffisamment froid pour permettre un regel complet du remblai au cours de l'hiver et ainsi préserver le pergélisol sous-jacent. L'ajout de cheminées permet d'accroître la circulation d'air dans le

système par le phénomène de tirage thermique, tout en s'assurant de garder l'entrée et la sortie des conduits au-dessus du couvert nival maximal (Figure 5.79 C). Certains systèmes utilisent un ventilateur afin de forcer la circulation d'air dans les conduits, toutefois cet ajout augmente les risques de bris qui sont susceptibles de réduire considérablement la performance du système, voire de la supprimer. De plus, ce type de système doit nécessairement être fermé au printemps afin d'éviter tout apport de chaleur externe pendant la saison estivale. Malgré l'automatisation de la procédure d'ouverture et de fermeture du système, le risque d'oubli demeure élevé.

Les conduits placés sous la surface sont plus exposés aux infiltrations d'eau et de sol, ce qui peut compromettre considérablement la performance du système. Plusieurs expériences ont démontré qu'il est préférable que les conduits soient placés légèrement au-dessus de la surface du sol et inclinés par rapport au terrain environnant de manière à éviter l'accumulation d'eau et à favoriser le drainage advenant une infiltration de neige, de glace ou d'eau (U.S. ARMY/AIR FORCE, 1983).

En raison des nombreuses difficultés techniques pouvant survenir lors de la construction et des risques élevés de mauvais fonctionnement (infiltration d'eau, de neige ou de sol, tuyau obstrué), le Guide des bonnes pratiques de construction du Nunavut (2005) ne recommande pas d'utiliser des dalles de béton ventilées naturellement. Quant à opter pour un système de ventilation mécanique, il faut savoir que celui-ci présente les mêmes risques, auxquels s'ajoute un risque de bris mécanique du système et des coûts de maintenance. Il existe plusieurs exemples de ruptures de ce type de fondation en raison d'infiltrations d'eau dans la littérature (Bjella, 2010), néanmoins certaines fondations ont prouvé leur efficacité malgré quelques difficultés techniques (Odom, 1983, cité dans Clark [2007]). Dans les zones de pergélisol discontinu, ce système peut être insuffisant pour assurer un regel complet du remblai sous le bâtiment.

Advenant l'utilisation d'un tel système, il est nécessaire de porter une attention particulière aux points suivants lors de la conception :

- Les conduits doivent avoir un diamètre assez large pour en permettre l'inspection et en faciliter la maintenance au besoin (débouchage) par le personnel chargé de l'entretien.
- Le remblai sera composé de matériaux non gélifs, d'une épaisseur suffisante pour s'assurer que les cycles de gel et de dégel demeurent à l'intérieur de celui-ci.
- Les conduits doivent être étanches afin d'éviter toute infiltration d'eau.
- Les extrémités des cheminées doivent être placées à une hauteur suffisante pour ne pas disparaître sous les combes à neige qui se développent fréquemment en bordure des bâtiments.
- Si un système de clapets est installé, ceux-ci doivent se trouver seulement sur les cheminées positionnées sur le côté au vent du bâtiment afin de permettre un mouvement convectif même lorsque les clapets sont fermés.

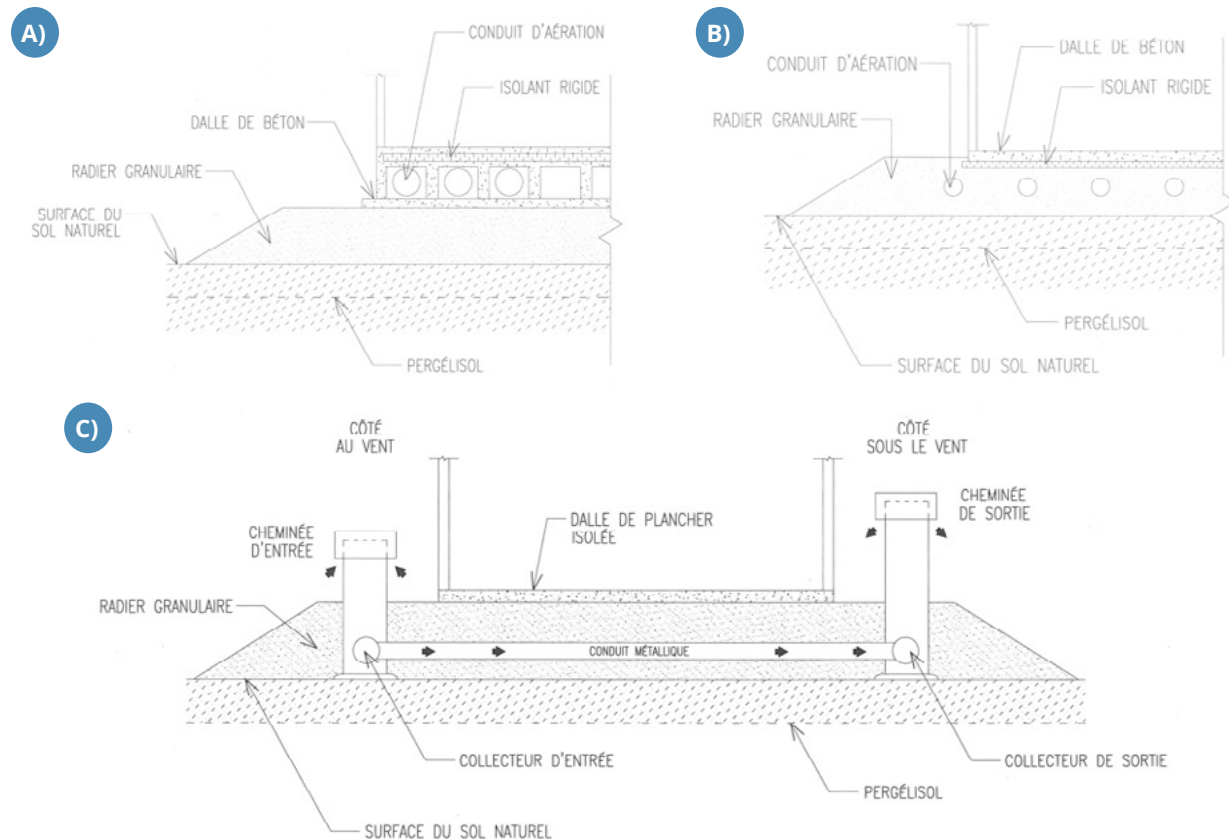


FIGURE 5.79 : FONDATION VENTILÉE UTILISANT DES CONDUITS DISPOSÉS HORIZONTALEMENT SOUS LA ZONE COUVERTE PAR LA DALLE A) À LA SURFACE OU B) DANS LE REMBLAI. C) FONDATION VENTILÉE AVEC L'AJOUT DE CHEMINÉES AFIN D'ACCROÎTRE LA CIRCULATION D'AIR DANS LE SYSTÈME PAR LE PHÉNOMÈNE DE TIRAGE THERMIQUE (MODIFIÉ DE JOHNSTON, 1981).

5.5.4.2 Thermosiphons

Le thermosiphon n'est pas un type de fondation à proprement parler, mais plutôt un ajout à un type de fondation lorsqu'il est impossible de surélever celle-ci afin de permettre une évacuation efficace de la chaleur (ex. : dalle sur sol) ou de stabiliser thermiquement le sol pour répondre à des spécifications techniques particulières (thermopieux et thermosondes). L'objectif de ce système de refroidissement est d'assurer la stabilité des conditions de gel sous un bâtiment en maintenant la température du sol en dessous de 0 °C. Les thermosiphons sont des systèmes de refroidissement à deux phases dits passifs, c'est-à-dire qu'ils ne nécessitent pas de supplément d'énergie et ne contiennent pas d'éléments actionnés mécaniquement. Le thermosiphon consiste en un tube fermé et étanche capable d'extraire la chaleur du sol et de l'évacuer dans l'atmosphère à travers le changement de phase d'un liquide vers son état gazeux. Au Canada, le liquide à deux phases utilisé est le dioxyde de carbone.

Les composants d'un thermosiphon sont illustrés à la figure 5.80 A. Il s'agit essentiellement d'un conduit placé sous le niveau du sol, appelé évaporateur, d'un conduit vertical placé au-dessus du niveau du sol, appelé conducteur, d'un radiateur installé à l'extrémité supérieure du conducteur, d'une vanne de remplissage et le liquide. Le principe d'échange de chaleur d'un thermosiphon est illustré à la figure 5.80 A. Lorsque la température de l'air est inférieure à celle du sol, la vapeur se condense dans la partie supérieure, appelée radiateur. La pression dans le tube est alors réduite et force l'ébullition et l'évaporation du liquide présent dans la portion inférieure (évaporateur), soit sous la fondation. Les cycles d'évaporation et de condensation extraient la chaleur du sol lorsque la température de l'air est plus basse que le point de congélation. Le système ne fonctionne pas en été en raison de l'absence de différentiel de température permettant sa mise en marche. Par conséquent, la température du sol gelé sous le bâtiment tend à augmenter graduellement. Pour éviter que le sol dégèle complètement,

l'action hivernale des thermosiphons doit compenser le gain thermique estival. Lorsque les conditions climatiques n'offrent pas une période de fonctionnement assez longue ou que les différentiels de température ne permettent pas un fonctionnement efficace du système, il est conseillé d'opter pour un système hybride. Celui-ci est muni d'un échangeur thermique à l'intérieur du radiateur qui permet une connexion à un système de refroidissement. L'utilisation d'un système de refroidissement permet de prolonger la durée d'opération du système en assurant un différentiel de température permettant la convection et ainsi l'extraction de chaleur sous la fondation. En maintenant artificiellement une température froide à sa sortie, ce type de système permet d'accroître le taux de refroidissement même pendant la période estivale. Il peut également permettre d'atteindre un état d'équilibre thermique souhaité avant la construction de l'infrastructure lorsque les délais de construction sont courts ou de pallier à un réchauffement des températures du sol plus important ou plus rapide que prévu.

Le thermosiphon fonctionne autant horizontalement, sous une dalle sur sol, que verticalement, en faisant office de pieux. Les thermosiphons verticaux et inclinés utilisent la gravité afin de permettre au gaz de migrer vers le radiateur pour se condenser et ensuite s'écouler sous forme liquide à l'extrémité inférieure de l'évaporateur. Les thermosiphons en boucles horizontales utilisent plutôt les différentiels de pression et l'écoulement gaz-liquide avec bouchons (*slug flow*) pour acheminer le gaz au radiateur. Ainsi, selon les applications, les thermosiphons peuvent être configurés de plusieurs façons. Il existe quatre principales configurations : les thermosondes (Figure 5.80 B), les thermopieux (Figure 5.80 C), les thermosiphons inclinés (Figure 5.80 D) et les thermosiphons en boucles horizontales (Figure 5.80 E). Les thermosondes sont utilisées afin de maintenir le sol gelé autour des pieux ou des autres types de fondations et, contrairement aux thermopieux, elles ne supportent aucune charge structurale. Les thermopieux consistent en des pieux auxquels la technologie du thermosiphon a été intégrée. Pour cette application, le radiateur se situe à l'extrémité superficielle du pieu dans l'espace ventilé sous le bâtiment. Leur utilisation peut être intéressante lorsqu'une couche active composée de sols gélifs sujets au gonflement peut causer, par adhérence, le soulèvement des pieux conventionnels. Leur usage peut aussi être bénéfique dans les zones de pergélisol tiède, quand le potentiel de fluage du pieu est élevé. Selon les informations disponibles, il n'y a pas de pieux thermiques au Nunavik et, selon Holubec (2008), il n'y en a aucun au Canada. Toutefois, les pieux thermiques sont largement utilisés en Alaska. Par exemple, du début des années 1960 jusqu'en 1975, 120 000 pieux thermiques refroidis par thermosiphon y ont été installés pour supporter les 1300 km de gazoduc qui relie Prudhoe Bay à Valdez.

Les thermosiphons inclinés et en boucles horizontales sont utilisés essentiellement sous les dalles de béton ou les vides sanitaires afin d'évacuer la chaleur transmise au sol par le bâtiment. Lorsque les thermosiphons sont employés sous une dalle ou un vide sanitaire, les composants suivants s'ajoutent au système de fondation : un remblai granulaire compacté de un à deux mètres d'épaisseur, une assise et un enrobage de sable pour protéger les conduits horizontaux ou inclinés et une couche d'isolation rigide de 100 à 200 mm d'épaisseur. Il convient de noter que le dimensionnement et la configuration des différents composants du système à thermosiphon sont interdépendants. Par exemple, une augmentation de la capacité de l'évaporateur ou du radiateur permettra de réduire l'épaisseur de l'isolation nécessaire sous la dalle de fondation. Une augmentation de l'épaisseur de l'isolation sous la fondation viendra diminuer l'épaisseur requise du remblai granulaire non gélif. Les principales différences entre les deux configurations sont le diamètre des tuyaux (100 mm pour les thermosiphons inclinés et 50 mm pour les thermosiphons en boucles horizontales), l'angle d'installation (plat versus incliné) et la configuration des tuyaux (individuel versus en boucle). L'un des inconvénients des thermosiphons inclinés est que l'évaporateur doit être installé avec une pente comprise entre trois et dix pour cent (Wagner, 2014), ce qui nécessite une attention particulière lors de la mise en place et augmente les coûts d'installation. Pour de plus grands bâtiments, l'angle d'installation nécessaire au bon fonctionnement de ce système peut nécessiter un remblai plus épais, ce qui augmente les coûts de mise en place. Les thermosiphons en boucles horizontales sont plus faciles à installer et permettent de geler 1,4 fois plus de volume de sol que les thermosiphons inclinés (Yarmak et Long, 2002). Depuis les vingt dernières années, les thermosiphons en boucles horizontales sont majoritairement utilisés au Canada (norme CAN/CSA-S500-14); une installation type sous une dalle sur sol est illustrée à la figure 5.81. L'utilisation des thermosiphons est largement répandue dans l'Arctique canadien et en Alaska depuis les années 1960, autant dans les zones de pergélisol continu que discontinu. Depuis 1985, plus de cent systèmes de thermosiphons ont été installés dans le Nord canadien (dont une dizaine au Nunavik) pour des applications industrielles, commerciales et institutionnelles. Leur utilisation est beaucoup plus rare dans le domaine de la construction d'habitations. Ce type de système peut être utilisé à des fins correctives pour régler le sol sous des semelles de béton ayant eu un mauvais comportement ou pour de nouvelles constructions sur

dalle comme l'aérogare de l'aéroport de Kuujuaq (2006) (Figure 5.82) et le nouveau garage municipal de Salluit (2009) (Figure 5.83 A). Le suivi thermique du sol sous la dalle de fondation du nouveau garage municipal à Salluit démontre bien l'efficacité du système installé (Figure 5.83 B et C).

Tout récemment, la fiabilité de cette technologie et son rendement dans un contexte de changement climatique ont été évalués par Holubec (2008). Malgré la fiabilité éprouvée du système, certaines lacunes lors du choix du site, de la conception, de l'évaluation du réchauffement climatique anticipé, de la construction, du suivi de performance et de l'entretien peuvent compromettre considérablement sa performance et provoquer des tassements susceptibles d'endommager considérablement la structure d'un bâtiment. Plusieurs exemples d'échec de ce type de fondation sont documentés ici et là dans la littérature. Afin de mieux orienter la conception, la mise en place et l'entretien d'un tel système, un effort de standardisation a donné naissance à la norme CAN/CSA-S500-14, intitulée « Fondations à thermosiphon de bâtiments construits dans des régions pergélisolées ». Il importe de s'y référer lorsqu'une fondation munie d'un tel système est envisagée.

Les thermosiphons sont conçus pour préserver le pergélisol et non en créer, raison pour laquelle ils ne devraient pas être utilisés dans les zones où l'on trouve une grande quantité d'eau de surface ou en présence d'un écoulement souterrain abondant qui sont des sources importantes de chaleur. L'installation de thermosiphons doit être considérée seulement si le pergélisol sur lequel reposera la fondation est instable au dégel. Un site où le pergélisol est stable au dégel, tel qu'un substrat rocheux ou un dépôt grossier pauvre en glace, ne nécessite pas une telle méthode de protection. Les thermosiphons ne devraient pas être utilisés pour des infrastructures non chauffées, à moins que celles-ci reposent sur un pergélisol chaud et qu'aucune autre option permettant de limiter la perturbation thermique du pergélisol provoquée par la construction et la présence de la nouvelle infrastructure ne soit envisageable. Le liquide de refroidissement ne doit pas représenter un risque potentiel pour la stabilité du pergélisol ou pour l'environnement en cas de fuite. Il est recommandé d'isoler les boucles afin de limiter le déversement et de maintenir le reste des thermosiphons opérationnels. Il est également recommandé de protéger les radiateurs de tout dommage potentiel pouvant être causé par la circulation des véhicules et les opérations de déneigement. Il est impératif d'éloigner les radiateurs de toute source de chaleur provenant du bâtiment tel que les sorties de ventilation. Il est également recommandé d'instrumenter les thermosiphons avec des capteurs de température afin de suivre les performances du système et de détecter rapidement tout bris pouvant compromettre la stabilité de la fondation. La norme CAN/CSA-S500-14 suggère de préparer le site, c'est-à-dire d'installer le remblai, les évaporateurs et l'isolation à la fin du printemps ou au début de l'été afin de préserver les températures froides dans le sol. Parce qu'elle requiert que le matériel de construction soit déjà sur le site, cette stratégie demande à être bien planifiée si le matériel doit être acheminé par bateau. Lorsque la préparation du site est achevée à la fin de l'été, il faut attendre jusqu'au regel complet du sol, soit au cours de l'hiver, pour commencer la construction.

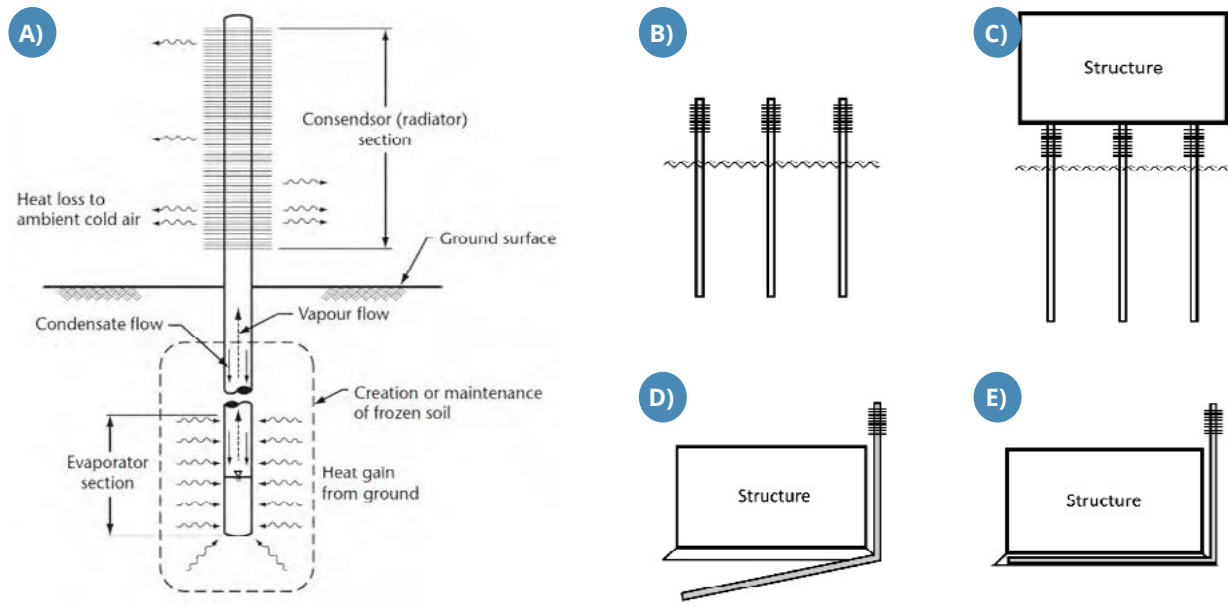


FIGURE 5.80 : A) COMPOSANTS ET PRINCIPE D'ÉCHANGE DE CHALEUR D'UN THERMOSIPHON (MODIFIÉ DE CSA PLUS 4011-10 ET REPRODUIT AVEC L'AUTORISATION DE DON HAYLEY). DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DES THERMOSIPHONS ET LEURS APPELLATIONS : B) THERMOSONDES, C) THERMOPIEUX, D) THERMOSIPHONS INCLINÉS ET E) THERMOSIPHONS EN BOUCLES HORIZONTALES (TIRÉ DE LA NORME CAN/CSA-S500-14 « THERMOSYPHON FOUNDATIONS FOR BUILDINGS IN PERMAFROST REGIONS » 2014 NBR P. 44, CODE DE PRODUIT : 2423122).

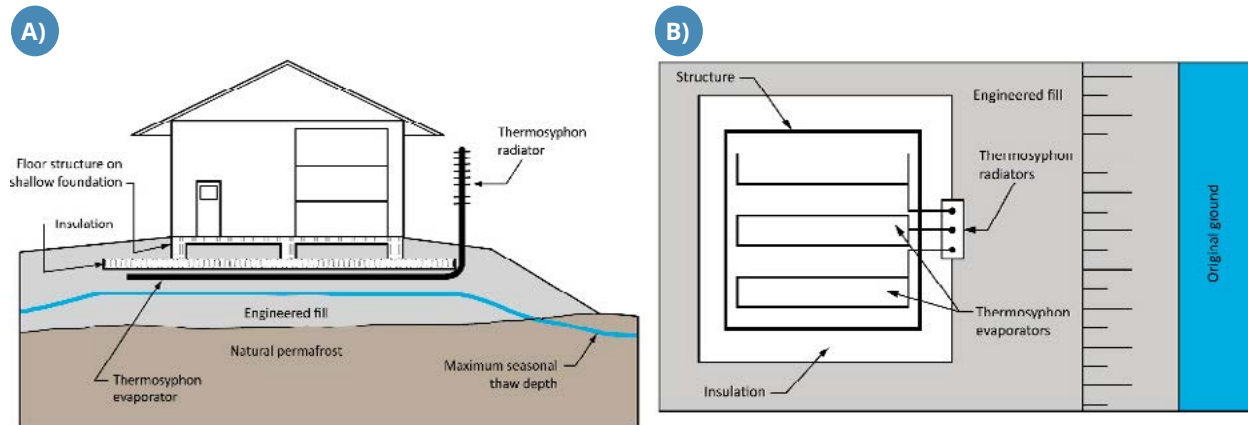


FIGURE 5.81 : VUE EN COUPE (A) ET EN PLAN (B) D'UNE FONDATION DE TYPE DALLE SUR SOL MUNIE D'UN SYSTÈME DE THERMOSIPHONS EN BOUCLES HORIZONTALES (TIRÉ DE CAN/CSA-S500-14 « THERMOSYPHON FOUNDATIONS FOR BUILDINGS IN PERMAFROST REGIONS » 2014 NBR P. 44, CODE DE PRODUIT : 2423122).



FIGURE 5.82 : SYSTÈME DE FONDATION AVEC THERMOSIPHONS À L'AÉROGARE DE L'AÉROPORT DE KUUJJUAQ AU NUNAVIK (PHOTO PRISE PAR CLAUDE LEPAGE).

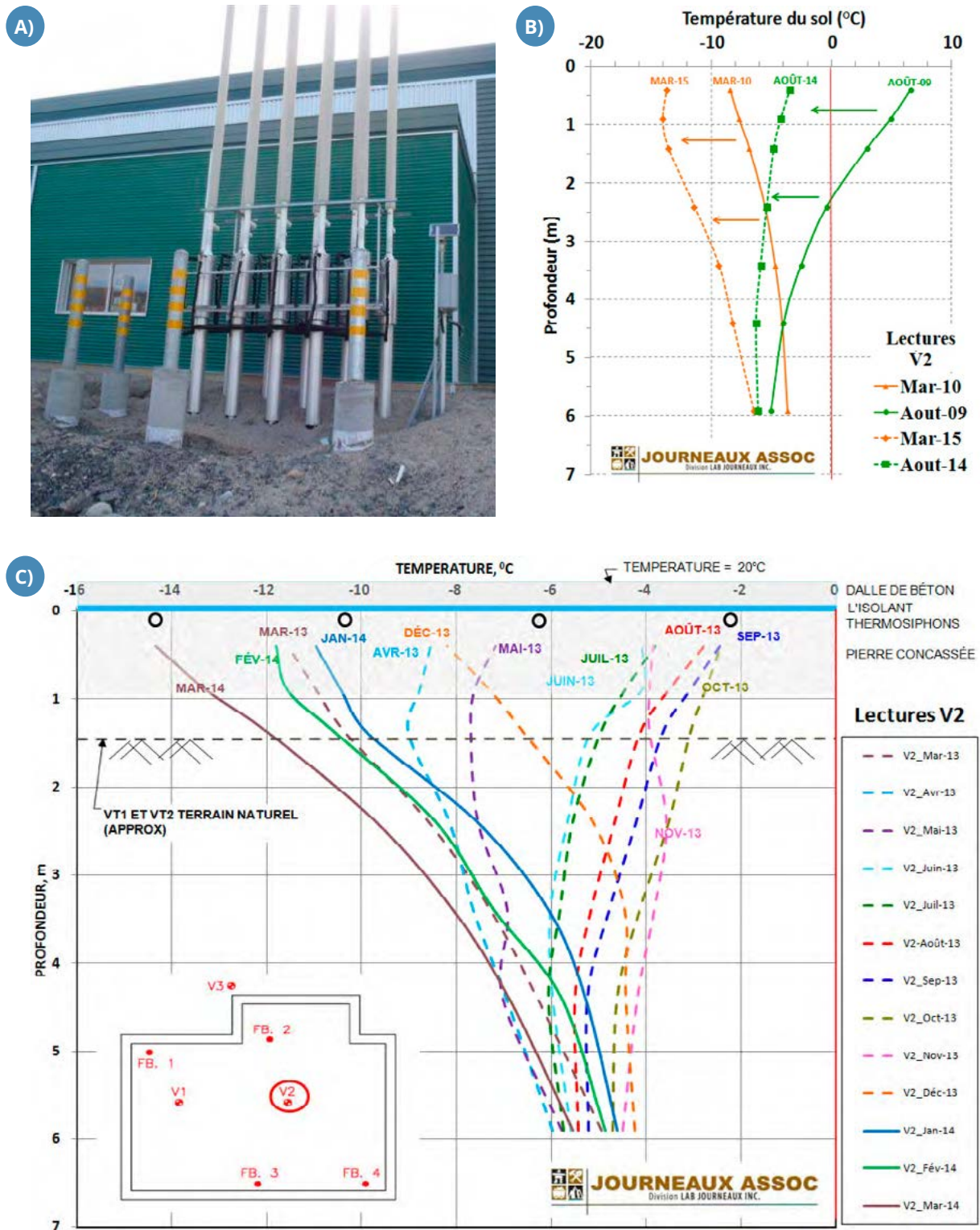


FIGURE 5.83 : A) NOUVEAU GARAGE MUNICIPAL DE SALLUIT AVEC DALLE SUR SOL ET SYSTÈME DE THERMOSIPHONS EN BOUCLES HORIZONTALES. PROFILS THERMIQUES MESURÉS SOUS LA FONDATION À L'EMPLACEMENT DU CÂBLE À THERMISTANCES V2 B) ENTRE 2009 ET 2015 ET C) ENTRE MARS 2013 ET MARS 2014 QUI MONTRENT LE REFROIDISSEMENT DU SOL DEPUIS L'INSTALLATION (SOURCE ET FIGURES : N. JOURNEAUX).

5.6 PRÉPARATION DU TERRAIN ET GESTION DE LA CONSTRUCTION

5.6.1 Planification saisonnière de la construction

En raison des particularités géographiques, climatiques et géologiques du Nunavik, la planification saisonnière des travaux de construction doit être minutieusement étudiée afin de tirer avantage des conditions météorologiques et géotechniques propices à la réalisation du projet. Une bonne planification doit maintenir un équilibre entre les contraintes budgétaires et temporelles, les contraintes logistiques de transport des matériaux et d'accessibilité au site et les contraintes techniques et de performance liées à l'environnement qui varient en fonction des tâches à réaliser (excavation, remblaiement, etc.) et des éléments de conception du bâtiment (type de fondation) (Figure 5.84). Le maintien de l'équilibre entre ces différentes contraintes dictera la distribution saisonnière du type et de la quantité de travail à effectuer.

Le climat du Nunavik, caractérisé par une courte saison estivale et un hiver long et froid, représente un défi de taille dans la planification saisonnière de la construction. En effet, les températures froides ainsi que la courte période d'ensoleillement en hiver peuvent affecter sévèrement, voire empêcher la réalisation de certaines activités de construction (diminution du rendement des travailleurs causée par le froid, difficultés techniques, etc.). D'un autre côté, en raison de la présence du pergélisol et de sa fragilité thermique, la construction hivernale peut être avantageuse à certains égards. Par exemple, lorsqu'une traverse de cours d'eau ou d'un terrain sensible est nécessaire, la construction d'un chemin de glace peut faciliter l'accès au site tout en préservant le terrain naturel. La construction d'un remblai servant de route d'accès au site ou de surface de travail peut être évitée permettant ainsi d'économiser des sommes considérables. Lors des excavations, les risques de fonte excessive, de déstabilisation des versants et de perte de portance du pergélisol, particulièrement dans les sols fins riches en glace, peuvent rendre l'installation de semelles enfouies difficile, voire impossible. Dans de tels cas, il peut parfois être préférable de procéder aux excavations au début de l'automne lorsque les températures de l'air sont froides et la profondeur de dégel près de son maximum. À mesure que l'hiver avance, le refroidissement de la température du sol accroît sa résistance compliquant les opérations d'excavation. L'excavation d'un sol gelé à des températures froides peut se comparer à excaver un béton d'une résistance allant de faible à modérée.

Le type de fondation choisi peut également avoir une influence sur la planification saisonnière, pour éviter des problèmes techniques lors de sa mise en place ou pour améliorer la performance du système de fondation. Par exemple, il est préférable d'installer les pieux en hiver ou au printemps afin de bénéficier d'une stabilisation thermique optimale du sol autour des pieux et d'éviter dans la mesure du possible l'utilisation d'un coûteux système de refroidissement. Par ailleurs, pour éviter certaines complications, la construction de fondation en béton coulé sur place durant les mois d'hiver nécessite des ressources matérielles et humaines supplémentaires qui augmentent les coûts et les délais de réalisation. Une conception adaptée pourrait alors se traduire par l'usage de composants en béton préfabriqué (ex. : pilier sur semelle individuelle). Lorsque le système de fondation requiert un remblai, il est préférable que sa mise en place se fasse avant l'hiver précédant la construction du bâtiment. Cette approche permet au régime thermique d'atteindre son nouvel état d'équilibre, tout en laissant le temps à la couche active et au remblai de se stabiliser mécaniquement. En raison de difficultés possibles d'extraction de granulats dans les bancs d'emprunt ou de respect des critères de compaction requis pour assurer la stabilité du remblai, la construction d'un remblai en hiver n'est pas souhaitable.

Une planification des travaux de construction d'habitations sur une période de deux ans offre généralement des avantages marqués sur le plan de la qualité et de la stabilité des fondations. Ce délai permet d'éviter les problèmes associés aux contraintes logistiques et techniques spécifiques aux conditions géographiques, climatiques et géologiques du Nunavik. Le progrès et l'efficacité du travail durant ces périodes dépendront également de la façon dont le concepteur a tenu compte des conditions du site dans son travail. Une mauvaise planification ou une conception mal adaptée peut augmenter considérablement les coûts de réalisation d'un projet et retarder l'échéancier.

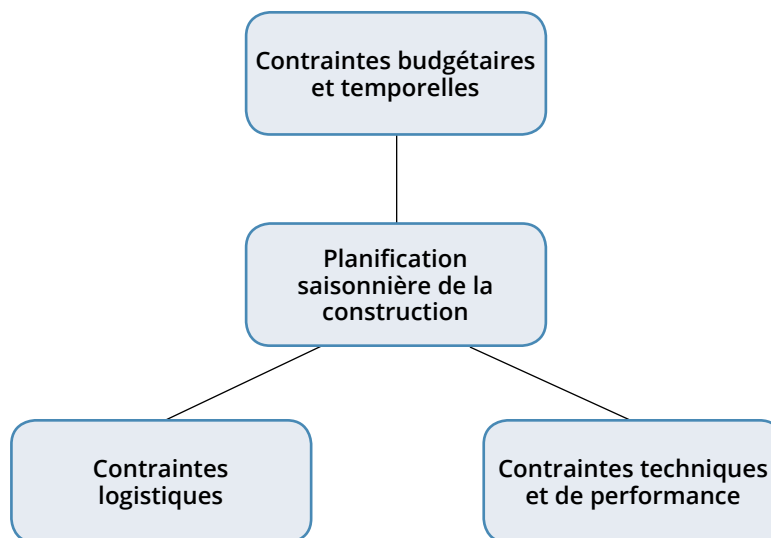


FIGURE 5.84 : CONTRAINTES À CONSIDÉRER DANS LA PLANIFICATION SAISONNIÈRE D'UNE CONSTRUCTION AU NUNAVIK.

5.6.2 Protection du terrain naturel

La construction d'habitations s'effectue fréquemment dans des secteurs dont les surfaces sont recouvertes de sols organiques. Ce type de surface est susceptible d'être endommagé par le passage de l'équipement (Figure 5.85 A). Même des cicatrices peu profondes peuvent canaliser le drainage naturel accentuant ainsi le risque d'accumulation d'eau susceptible d'entraîner une dégradation du pergélisol. Lorsque c'est possible, l'équipement devrait être utilisé plus tard en automne ou durant l'hiver, quand le sol est gelé. Cette précaution facilite le déplacement de la machinerie et diminue les dommages à la surface du terrain. La méthode de construction d'un radier granulaire présentée à la section 5.5.1 permet également de réduire la dégradation du terrain naturel. La pose d'un géotextile en guise de barrière physique entre le terrain naturel et les matériaux permet de limiter les interactions possibles entre ces deux composants afin de préserver leur intégrité (Figure 5.85 B). Advenant une mise en place hivernale du radier granulaire, il est nécessaire d'enlever la neige au préalable tout en étant très minutieux lors des opérations de déneigement près de l'interface avec le terrain naturel. Il est préférable de laisser une mince couche de neige plutôt que de risquer de détruire la végétation et la couche organique de surface. La couche granulaire placée pendant l'hiver ne doit toutefois pas être trop épaisse et il faut attendre la fonte de la mince couche de neige qui y est emprisonnée avant d'ajouter des matériaux pour assurer un bon comportement du remblai à long terme.



FIGURE 5.85 : A) PERTURBATION DU TERRAIN LORS DE LA MISE EN PLACE D'UNE FONDATION SUR PIEUX À PANGNIRTUNG AU NUNAVUT (SOURCE : E. L'HÉRAULT, CEN, 2010). B) MISE EN PLACE D'UN GÉOTEXTILE SUR LE SOL NATUREL AFIN D'ÉVITER LA MIGRATION ET LE MÉLANGE DES MATÉRIEAUX IN SITU AVEC CEUX QUI COMPOSENT LE REMBLAI GRANULAIRE À SALLUIT AU NUNAVIK.

5.6.3 Disposition des bâtiments et des rues

Dans un projet de développement urbain au Nunavik, la prise en compte de la direction des vents dominants en hiver permettra de planifier l'orientation optimale des rues et des bâtiments de façon à en réduire l'enneigement et ainsi favoriser la préservation du pergélisol tout en réduisant les coûts de déneigement.

Dans le milieu nordique, la répartition du couvert de neige est intimement liée à la topographie et aux structures végétales. Ces composants locaux influencent la dynamique éolienne, comme la vitesse et la direction des vents, de manière à favoriser ou à entraver la sédimentation et l'accumulation de neige arrachée au sol et transportée par le vent. Puisque les vents sont forts au Nunavik, la neige tend à s'accumuler aux endroits où l'énergie de transport est atténuée comme dans les fractures peu profondes du socle rocheux, les dépressions et les faibles irrégularités du relief. Dans le milieu bâti, l'aérodynamisme des infrastructures s'ajoute à la topographie à titre de facteur de contrôle de l'enneigement. Par conséquent, peu importe l'orientation de l'infrastructure, des accumulations de neige sont à prévoir au cours de l'hiver du côté de la maison qui n'est pas exposé aux vents dominants (Figure 5.86). Ces accumulations de neige prennent la forme de congères en queue de comète dont l'importance découle davantage des caractéristiques aérodynamiques du site (interaction de la géométrie du bâtiment avec l'orientation et la vélocité des vents dominants durant l'hiver) que de la quantité totale de précipitation reçue. De telles accumulations peuvent nuire au comportement des fondations, puisqu'en raison de ses propriétés isolantes, la neige limite l'extraction de la chaleur qui a été accumulée dans le sol durant la saison estivale, processus essentiel au maintien du pergélisol.

Les fondations sur chevalets, qui fournissent un bon dégagement de la maison par rapport au sol, ont démontré leur efficacité pour diminuer l'accumulation de neige en périphérie et sous l'infrastructure. Comparativement à des fondations qui reposent directement sur le sol (dalle de béton) (Figure 5.87 A et B), ces fondations surélevées (chevalets sur radier ou pieux) ont en effet une influence restreinte sur les composantes de la dynamique éolienne comme la vitesse et la direction des vents. Ainsi, ce type de fondation facilite le transport de la neige et, par conséquent, diminue le potentiel d'accumulation nivale sous l'infrastructure et en périphérie de celle-ci. Le passage forcé du vent dans l'espace confiné sous l'infrastructure peut même accroître sa vélocité (effet entonnoir) et augmenter sa capacité à transporter la neige. Cette accentuation de la déflation sous les infrastructures surélevées garde le sol dépourvu de couverture nivale, ce qui aide à le maintenir froid et à assurer la stabilité du pergélisol (Allard, Fortier et autres, 2004; Bouchard, 2005). La hauteur des fondations est un paramètre important à considérer dans l'évaluation du potentiel d'accumulation nivale. Des simulations sur modèles réduits à l'intérieur d'une soufflerie, réalisées par Sherwood (1967), ont démontré qu'un bâtiment surélevé entre deux et quatre pieds (500 à 1000 mm) au-dessus de la surface naturelle environnante atténue considérablement la formation de congères. Les observations de terrain réalisées en période hivernale dans les communautés du Nunavik et du Nunavut confirment l'efficacité des fondations surélevées avec espace ventilé pour réduire les accumulations de neige aux abords des bâtiments.

Outre l'influence de la hauteur de l'infrastructure sur le potentiel d'accumulation nivale, il est également important de considérer son orientation par rapport aux vents dominants. Lorsque c'est possible, la face la plus étroite des bâtiments devrait être orientée de façon à faire face aux vents dominants. Ainsi, la zone d'accumulation de neige sera réduite à la largeur de l'infrastructure (Figure 5.88 B). Ce principe s'applique également aux aires de stationnement et d'entreposage qui bénéficient d'un meilleur balayage par le vent lorsque leur géométrie est élancée. Il importe également de prévoir un espace suffisamment dégagé entre chaque bâtiment pour éviter l'agglomération de congères et permettre à la machinerie utilisée pour le déneigement de circuler, si nécessaire. Un exemple de l'effet de la disposition des bâtiments et des rues sur la dynamique d'enneigement est présenté à la figure 5.89.



FIGURE 5.86 : RELATION GÉNÉRALE ENTRE LES INFRASTRUCTURES ET L'ENNEIGEMENT EN MILIEU BÂTI (TIRÉ DE BOUCHARD, 2005).



FIGURE 5.87 : A) ET B) BÂTIMENTS DONT LA FONDATION REPOSE DIRECTEMENT SUR LE SOL, FAVORISANT L'ACCUMULATION DE NEIGE (SOURCE : E. L'HÉRAULT, CEN, 2010).



FIGURE 5.88 : A) MAISONS DONT L'AXE DE LONGUEUR EST PERPENDICULAIRE AUX VENTS DOMINANTS. B) MAISON DONT L'AXE DE LONGUEUR EST PARALLÈLE AUX VENTS DOMINANTS (TIRÉ DE ALLARD ET AUTRES, 2010).

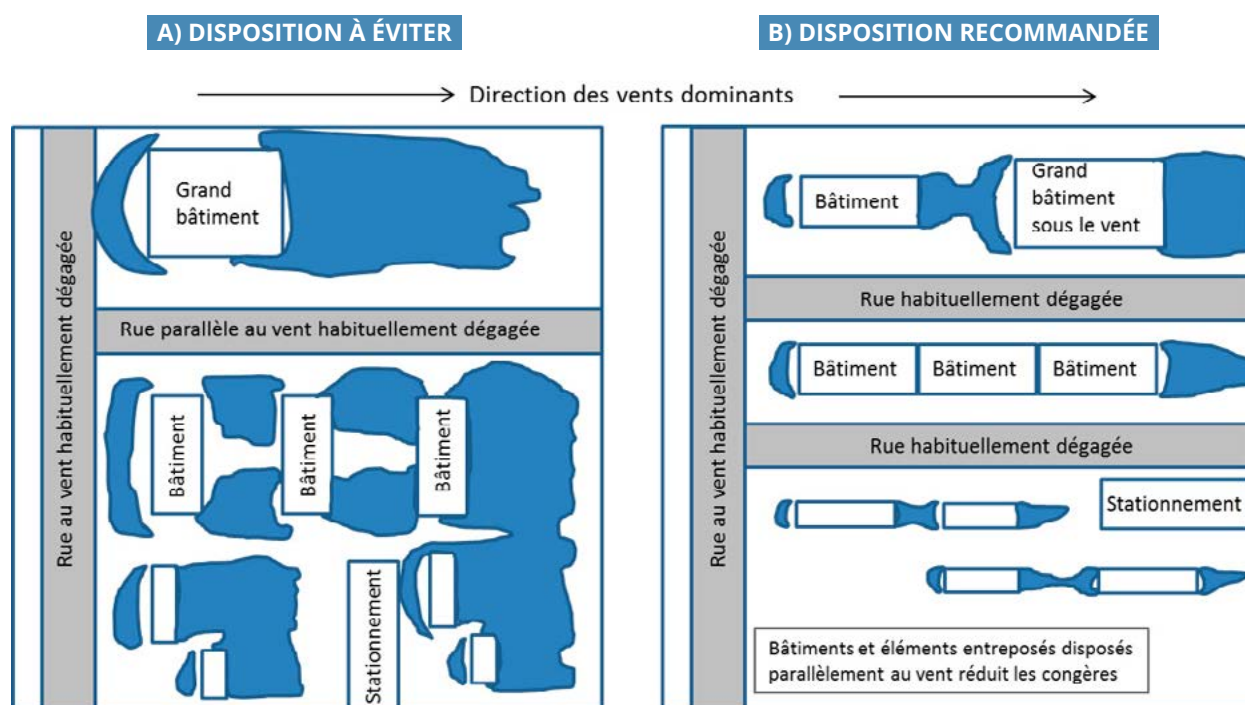


FIGURE 5.89 : ACCUMULATION DE NEIGE EN FONCTION DES VENTS DOMINANTS ET DE LA DISPOSITION DES BÂTIMENTS. A) DISPOSITION À ÉVITER ET B) À PRIVILÉGIER.

5.6.4 Drainage du site

Un site bien drainé facilite les opérations nécessaires à sa préparation (compactage, déplacement de la main-d'œuvre et de la machinerie) tout en assurant un comportement adéquat des fondations dans l'avenir. Voilà pourquoi le plan de drainage de tout nouveau projet devrait toujours être intégré à celui de la communauté. Une fois le piquetage des lots et des bâtiments réalisé selon les plans du projet, et avant de commencer la construction, une visite du chantier par le personnel compétent est nécessaire pour vérifier les éléments géologiques, géotechniques et hydrauliques prédominants, valider les choix qui ont été faits au moment de l'étude du site et apporter des modifications au plan de drainage si nécessaire. Lors de la construction sur un pergélisol riche en glace, une attention particulière doit être portée à la circulation des véhicules afin d'éviter de creuser des ornières qui canaliseront rapidement l'écoulement de surface et entraîneront une déstabilisation thermique du pergélisol et une dégradation rapide du terrain naturel (affaissement, fluage, glissement, etc.). Ce type de perturbation risque de compliquer les opérations de construction, voire de compromettre la stabilité de l'infrastructure.

Lors de la préparation des plans de drainage, il faut tenir compte de la position des axes naturels d'écoulement de l'eau de surface. En règle générale, il convient de préserver les mêmes chemins d'écoulement, car un équilibre s'est probablement établi avec les années, surtout lorsque l'écoulement est permanent. Le repositionnement des axes d'écoulement pourrait entraîner une dégradation rapide des zones de pergélisol riche en glace par thermo-érosion. Le profilage des talus des fossés doit s'effectuer minutieusement selon la nature des matériaux en place. Par exemple, dans un sable fin, des pentes de trois unités horizontales par unité verticale (3H : 1V ou 33 %) peuvent être requises alors que des pentes de 1,5H : 1V (67 %) peuvent être acceptables dans un dépôt de gravier. Selon la vitesse d'écoulement de l'eau et la nature des sols, il peut aussi être nécessaire de prévoir l'empierrement du fossé pour en prévenir l'érosion. Dans les secteurs où le pergélisol est riche en glace, il est préférable de ne pas faire d'excavation en optant plutôt pour un drainage superficiel au moyen de fossés larges et peu profonds. Dans ces secteurs, la pose de géomembrane dans le fond d'un fossé ou sous un ponceau peut réduire les infiltrations d'eau de surface et limiter les échanges thermiques entre l'eau et le pergélisol.

En règle générale, un drainage efficace permet d'acheminer l'eau de son point de départ naturel jusqu'à un point de collecte, une rigole ou un fossé, pour ultimement rejoindre un canal qui dirigera l'eau vers la zone de décharge. En s'assurant que l'eau de surface s'égoutte correctement, un bon réseau de drainage permet de réduire les accumulations superficielles ainsi que la teneur en eau dans les sols sous-jacents. Une attention particulière doit être portée au drainage dans la zone directement en périphérie du bâtiment, là où convergent l'eau en provenance du toit en l'absence de gouttière, celle qui provient de la fonte des accumulations naturelles ou anthropiques de neige au printemps et les déversements qui se produisent lors du remplissage des réservoirs d'eau. Pour ce faire, il est recommandé d'aménager le terrain en périphérie des bâtiments suivant une pente de deux à cinq pour cent qui permet d'évacuer les eaux ruisselant en surface vers le fossé de drainage le plus près. Certaines expériences ont démontré qu'en l'absence d'une pente adéquate, la saturation d'un remblai granulaire possédant une portion élevée de silt ou d'un mélange de silt et d'argile peut très vite mener à une perte de portance localisée, puis à la rupture du sol supportant la fondation. Lorsque le remblai granulaire est principalement composé de gravier et de cailloux, la saturation n'occasionne généralement pas de problèmes de perte de portance. Dans le cas d'un remblai en partie gélif, l'utilisation d'une géomembrane sous la couche granulaire de surface peut servir de barrière aux eaux afin de prévenir leur pénétration dans le remblai sous-jacent.

Au Nunavik, on trouve souvent des rigoles peu profondes qui séparent les rues des habitations. La circulation des véhicules pour accéder au bâtiment s'effectue normalement sans problème à travers ces rigoles peu profondes et d'inclinaison douce. Un exemple de configuration optimale d'un réseau de drainage soigneusement intégré à un ensemble résidentiel est présenté à la figure 90 A). Aux intersections des rues, des caniveaux préfabriqués en béton ont été utilisés avec succès au cours des dernières années. Ces structures de drainage peu profondes offrent l'avantage d'être faciles à nettoyer et à entretenir. Il s'agit d'enlever la grille en fonte qui repose à la surface du caniveau pour enlever manuellement les débris qui s'y trouvent. Pour des raisons d'entretien et de nettoyage, et lorsque l'épaisseur du remblai routier le permet, des ponceaux d'au moins 450 mm de diamètre devraient être utilisés de préférence aux ponceaux de plus petit diamètre. Dans le cas de ponceaux susceptibles d'être obstrués par la glace, l'ajout d'un ponceau de plus petit diamètre, installé légèrement au-dessus du ponceau principal, peut servir à recueillir le trop-plein lors des coups d'eau printaniers et ainsi assurer un drainage adéquat. Les fossés et les ponceaux devraient être situés dans l'emprise des routes et être adéquatement entretenus pour éviter les inondations et la formation de bassins d'eau stagnante comme l'illustre la figure 5.91.

Afin de normaliser la planification, la conception et la maintenance des systèmes de drainage dans les communautés du Nord, une norme récente a été développée (CAN/CSA-S503-15). Cette norme, intitulée « Planification, conception et maintenance de systèmes de drainage dans les communautés du Nord », comprend une série de recommandations et d'exigences qui visent à assurer une évacuation adéquate des eaux de surface afin de préserver la stabilité du pergélisol. Elles se résument comme suit :

- Les fossés de drainage ne devraient pas être excavés dans du pergélisol riche en glace.
- La zone sous la structure et dans un périmètre de quatre mètres autour de celle-ci devrait être nivelée de manière à faciliter l'évacuation rapide des eaux de surface loin de la structure.
- Lors du dégel printanier, l'eau ne devrait pas s'accumuler sous la structure ou la fondation ou immédiatement à côté. Des remblais supplémentaires devraient être placés à certains endroits pour faciliter un meilleur drainage.
- Les descentes pluviales des bâtiments et des structures doivent être dirigées dans des blocs parapluie qui se déversent sur le sol naturel à une distance d'au moins quatre mètres de toute structure. Lorsqu'il n'y a pas de gouttière, la pente des zones qui entourent le périmètre du bâtiment devrait être inclinée d'au moins quatre pour cent en direction opposée à la structure.
- Les nouvelles constructions autour des structures ou des bâtiments existants qui ont une incidence négative sur le régime thermique du pergélisol devraient être évitées.

Cette norme traite également des défis qu'imposent les changements climatiques dans les processus de planification, de conception et de maintenance des systèmes de drainage. L'instabilité climatique générale anticipée, caractérisée par une augmentation d'événements irréguliers, dont certains pourraient être catastrophiques, risque d'entraîner davantage de précipitations soudaines et fortes et de plus grandes accumulations de neige. Ces événements climatiques extrêmes devront être considérés lors de la conception du drainage autour d'un nouveau bâtiment.



FIGURE 5.90 : A) VUE DE PROFIL ET EN PLAN ILLUSTRANT LA CONFIGURATION OPTIMALE D'UN RÉSEAU DE DRAINAGE SOIGNEUSEMENT INTÉGRÉ À LA CONFIGURATION URBAINE D'UNE COMMUNAUTÉ (TIRÉ DE CAN/CSA-S503-15, « COMMUNITY DRAINAGE SYSTEM PLANNING, DESIGN, AND MAINTENANCE IN NORTHERN COMMUNITIES », 2015 NBR P. 83, CODE DE PRODUIT : 2423574). B) CANIVEAU PEU PROFOND EN BÉTON RECOUVERT D'UNE GRILLE, UTILISÉ AVEC SUCCÈS AU NUNAVIK AUX INTERSECTIONS DES RUES.



FIGURE 5.91 : ACCUMULATION IMPORTANTE D'EAU A) EN PÉRIPHÉRIE D'UN REMBLAI ET B) DANS UN FOSSÉ DE DRAINAGE
(SOURCE : E. L'HÉRAULT, CEN, 2008).

5.6.5 Construction sur sol organique

Il faut s'attendre à des accumulations de sol organique dans toutes les dépressions locales, sur les surfaces de roc ou de till ondulantes ainsi que sur les surfaces moins accidentées telles les zones humides situées à la surface des plaines de silt ou d'argile. Les mesures d'épaisseur et de résistance des couches de sol organique sont nécessaires pour évaluer les tassements différentiels prévisibles lors du remblayage et après la construction des maisons.

Avec ces informations, il est possible de déterminer l'épaisseur de la première couche de remblai requise pour éviter de créer des ornières dans cette couche organique et la méthode de compaction nécessaire pour consolider ces tourbes compressibles sous l'empreinte des bâtiments. Un suivi de la densification de tous les remblais granulaires est nécessaire. Un ingénieur d'expérience pourra ainsi fixer le poids, le nombre de passes et la vitesse du compacteur. L'utilisation de vibrations doit également être approuvée par un ingénieur, particulièrement lorsqu'il existe un dépôt argileux ou silteux sensible au remaniement directement sous la couche de sol organique, ou lorsqu'on rencontre une couche organique plus épaisse et saturée. Avec une étude préalable et un suivi adéquat pendant les travaux, il est souvent possible de construire des habitations sur ces remblais sans qu'elles subissent de tassements différentiels nuisibles à la structure.

Dans le cas des sols organiques de très faible résistance, difficiles à excaver jusqu'à la couche sous-jacente de matériaux ayant une meilleure capacité portante, des morceaux de roc dynamité peuvent être enfoncés pour déplacer le sol organique problématique hors de la zone influencée par les charges transmises au sol par le bâtiment.

Il est également possible d'utiliser des méthodes de renforcement des remblais granulaires sous les bâtiments lorsque des tassements différentiels sont anticipés. Par exemple, l'installation de géogrilles biaxiales peut augmenter la rigidité du remblai et réduire les affaissements non uniformes du terrain et les tassements différentiels des empattements. Cette approche peut être utile pour des tassements très isolés, mais elle est peu efficace si les tassements s'étendent sur une zone de quelques mètres.

Le Service de la géotechnique et de la géologie du MTMDT a préparé en 2012 un document intitulé « Guide pour l'étude et la construction de remblais routiers sur tourbières ». Ce document présente plusieurs éléments d'information qui peuvent aussi s'appliquer à la construction des bâtiments sur tourbières.

5.6.6 Construction à proximité des pentes

La présence de pentes est un facteur important à considérer lorsque vient le temps de sélectionner les secteurs à bâtir. Dans une zone de pergélisol, des pentes beaucoup plus douces que celles normalement considérées comme stables dans le sud du Québec peuvent être sujettes à des mouvements de masse superficiels. Des décrochements de la couche active peuvent survenir dans les sols argileux tandis que des lobes de gélifluxion peuvent se former progressivement dans les tills riches en glace. Un avis technique, réalisé spécialement pour le village de Salluit par Journeaux (2010), recommande d'éviter les pentes dépassant une inclinaison de cinq pour cent dans les sols argileux et les tills riches en glace. La construction sur des pentes plus abruptes doit faire l'objet d'une évaluation plus approfondie qui tient notamment compte du comportement de la couche active au dégel ainsi que des propriétés géotechniques du dépôt.

Sur des sites en pente, toute construction devrait donc commencer sur les terrains en contrebas et continuer vers les terrains situés plus haut, de façon à ce que le poids du remblai agisse comme une butée et augmente la stabilité de la pente en réduisant les mouvements vers l'aval. De plus, l'ajout d'une couche de matériau à la surface du sol favorise la remontée du plafond de pergélisol dans la couche active et dans le remblai, ce qui augmente la résistance à la rupture. Dans certains cas, l'ajout d'une géogrille du côté aval peut régler les problèmes de stabilité de l'accotement et du haut du remblai lorsqu'il y a fluage de la couche active pendant le dégel.

Lors des travaux, il est important de s'assurer de ne pas abimer la végétation dont l'effet isolant permet de préserver le pergélisol et, dans une moindre mesure, d'augmenter la résistance au cisaillement grâce au système racinaire (Andersland et Ladanyi, 2004). Il s'avère également essentiel de contrôler le drainage, car celui-ci permet de réduire les pressions interstitielles et, par conséquent, contribue à prévenir les glissements de terrain.

5.6.7 Gestion des granulats

Depuis quelques décennies, le développement du Nunavik et la construction de nouvelles infrastructures ont nécessité l'utilisation de quantités importantes de granulats. La plupart des villages nordiques disposent de bancs d'emprunt de sable et de gravier. Le maintien de la demande soulève toutefois la question de la disponibilité à long terme de ces ressources.

Dans certaines communautés, on constate un épuisement progressif des bancs d'emprunt proches des villages. Dans certains cas, il est nécessaire d'aménager et d'exploiter de nouvelles carrières où les granulats sont fabriqués à partir du roc en place. Ces matériaux doivent être dynamités, puis concassés pour obtenir les calibres désirés, ce qui est plus coûteux que d'extraire du sable et du gravier de bancs d'emprunt (Annexe XVI, tableau 2). Des travaux visant à trouver et à caractériser des sources de granulats à proximité des villages nordiques ont récemment été entrepris par le Bureau de l'exploration géologique du Québec du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Les résultats de ces caractérisations devraient être disponibles au fur et à mesure de leur publication sur le site du MERN.

La quantité de matériaux utilisée pour construire des radiers granulaires sous les bâtiments peut parfois être très importante, notamment lorsque l'aménagement du terrain s'effectue dans des secteurs en pente. De plus, la construction de remblais s'est tellement répandue qu'elle fait maintenant partie de presque tous les projets, sans nécessairement qu'on ait procédé à une évaluation de la sensibilité du sol ni optimisé les volumes requis. Au Nunavik, un nombre important de remblais sont très épais en raison de la topographie accidentée des sites d'implantation et du type de fondation choisi. Par exemple, la figure 5.92 A montre un radier granulaire à Salluit dont l'épaisseur atteint quatre à cinq mètres par endroits. Dans cet exemple, la conception aurait pu être optimisée en optant pour une fondation mieux adaptée à la topographie du terrain prenant directement appui sur le roc, comme illustré à la figure 5.92 B et à la figure 5.92 C. La géométrie, la hauteur et la nature des matériaux des remblais devraient être dictées, en premier lieu, par les paramètres de géotechnique et de drainage, puis être harmonisées avec les plans de terrassement et de drainage du secteur à construire.

Une sélection judicieuse des matériaux pourrait également contribuer à la saine gestion des ressources granulaires. Par exemple, il n'est pas nécessaire de construire l'ensemble du radier granulaire avec les mêmes matériaux. Les matériaux situés à l'extérieur de l'empreinte du bâtiment pourraient être de moins bonne qualité. Dans ces endroits, on peut utiliser des rejets de concasseur ou de tamiseur (cailloux et blocs), du sable silteux ou du till. La loi des filtres doit cependant être respectée ou une membrane géotextile doit être prévue pour séparer ces matériaux de ceux qui sont de meilleure qualité et serviront à fabriquer la couche de roulement d'au moins

150 mm d'épaisseur, normalement composés de sable et de gravier. Un exemple de matériaux mis au rebut à proximité d'un ancien concasseur et qui pourraient très bien servir à la construction de radiers granulaires est illustré à la figure 5.92 D).



FIGURE 5.92 : A) REMBLAI GRANULAIRE TRÈS ÉPAIS SUR UN TERRAIN EN PENTE À SALLUIT AU NUNAVIK. B) ET C) SYSTÈME DE FONDATION ADAPTÉ À LA TOPOGRAPHIE DU TERRAIN PRENANT DIRECTEMENT APPUI SUR LE ROC À IQALUIT AU NUNAVUT. D) REJETS DE CONCASSEUR POUVANT ÊTRE UTILISÉS DANS LA CONSTRUCTION DE RADIER GRANULAIRE (SOURCE : N. JOURNEAUX).

5.7 ENTRETIEN, MISE EN PLACE DE TECHNIQUES D'ATTÉNUATION DE LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL ET SUIVI POST-CONSTRUCTION

Dans les années suivant la construction d'une infrastructure, il est essentiel, et ce, pour toute sa durée de vie utile, de prendre des mesures courantes et proactives pour préserver le pergélisol en périphérie et sous l'infrastructure, car la stabilité de la fondation en dépend. Un entretien et un suivi régulier permettent de diminuer le risque de fonte du pergélisol et d'intervenir au besoin si cela se produit pour freiner l'évolution du phénomène et empêcher la déformation du bâtiment avant qu'il ne soit trop tard. On peut ainsi éviter de coûteuses réparations à la structure et aux composants mécaniques (électricité, chauffage, plomberie).

Une norme, maintenant disponible, a récemment été élaborée afin de structurer les activités de suivi et d'entretien pour modérer les effets de la dégradation du pergélisol sur les infrastructures existantes. La norme CAN/CSA-S501-14, intitulée « Modérer les effets de la dégradation du pergélisol des structures existantes », propose des mesures préventives et proactives de maintien du pergélisol en périphérie et sous les structures des bâtiments existants. Ces mesures s'intègrent à un schéma d'entretien continu destiné à maintenir des conditions de site optimales pour préserver le pergélisol (drainage et enneigement) et de surveillance pour déceler rapidement tous les signes de dégradation de la structure ayant un lien avec le pergélisol (Figure 5.93). Une inspection annuelle de chaque bâtiment construit sur le pergélisol devrait être faite pour déceler tout signe de dégradation. Cette inspection devrait faire partie intégrante d'un programme de surveillance dirigé par un ingénieur dans le but de vérifier l'intégrité structurale du bâtiment et de détecter tout changement dans l'état thermique des matériaux de fondation sous-jacents. Ce programme de surveillance devrait documenter, s'il y a lieu, l'évolution des signes de dégradation qui affectent la structure (les fissures et les déformations dans la fondation, la structure ou les éléments structuraux visibles, l'état des portes et des fenêtres, les dommages aux composants mécaniques du bâtiment et tous les autres dommages intérieurs superficiels), l'évolution de la déformation de la surface du sol (tassement ou soulèvement) et tout changement dans les conditions du site, ainsi que tout autre indice pouvant signaler une source potentielle de problèmes (drainage, enneigement, végétation et aménagement du lot). L'information de la fiche d'inspection pourrait être colligée dans une base de données pour faciliter la mise à jour, la consultation et la diffusion de l'information.

La norme CAN/CSA-S501-14 dresse également les étapes à suivre dans l'évaluation des structures touchées par une dégradation du pergélisol afin de bien documenter le type et les causes du problème en vue d'appliquer les mesures correctives adéquates (Figure 5.93). Une bonne évaluation permet, par exemple, de faire la distinction entre les détériorations importantes causées aux bâtiments ou aux structures par la dégradation du pergélisol et celles qui résultent des mouvements saisonniers du gel au sol. Cette distinction est cruciale, car elle permet d'orienter la stratégie d'intervention vers des mesures d'atténuation appropriées. Il est à noter que les différentes stratégies d'atténuation de la dégradation du pergélisol en périphérie et sous les infrastructures existantes proposées dans cette norme dépendent de l'origine du problème (gel saisonnier ou dégradation du pergélisol), du type de fondation et des conditions du site. Les principales mesures d'atténuation de la dégradation du pergélisol sont présentées dans le tableau 5.8.

Lors de l'utilisation d'une mesure d'atténuation de la dégradation du pergélisol sous l'infrastructure et en périphérie, il importe de maintenir un suivi à long terme afin d'évaluer sa performance et d'apporter des ajustements au besoin. Pour des systèmes de fondation plus complexes, tels les thermosiphons, il est nécessaire d'adapter le programme de suivi aux recommandations des fournisseurs spécialisés dans ce domaine.

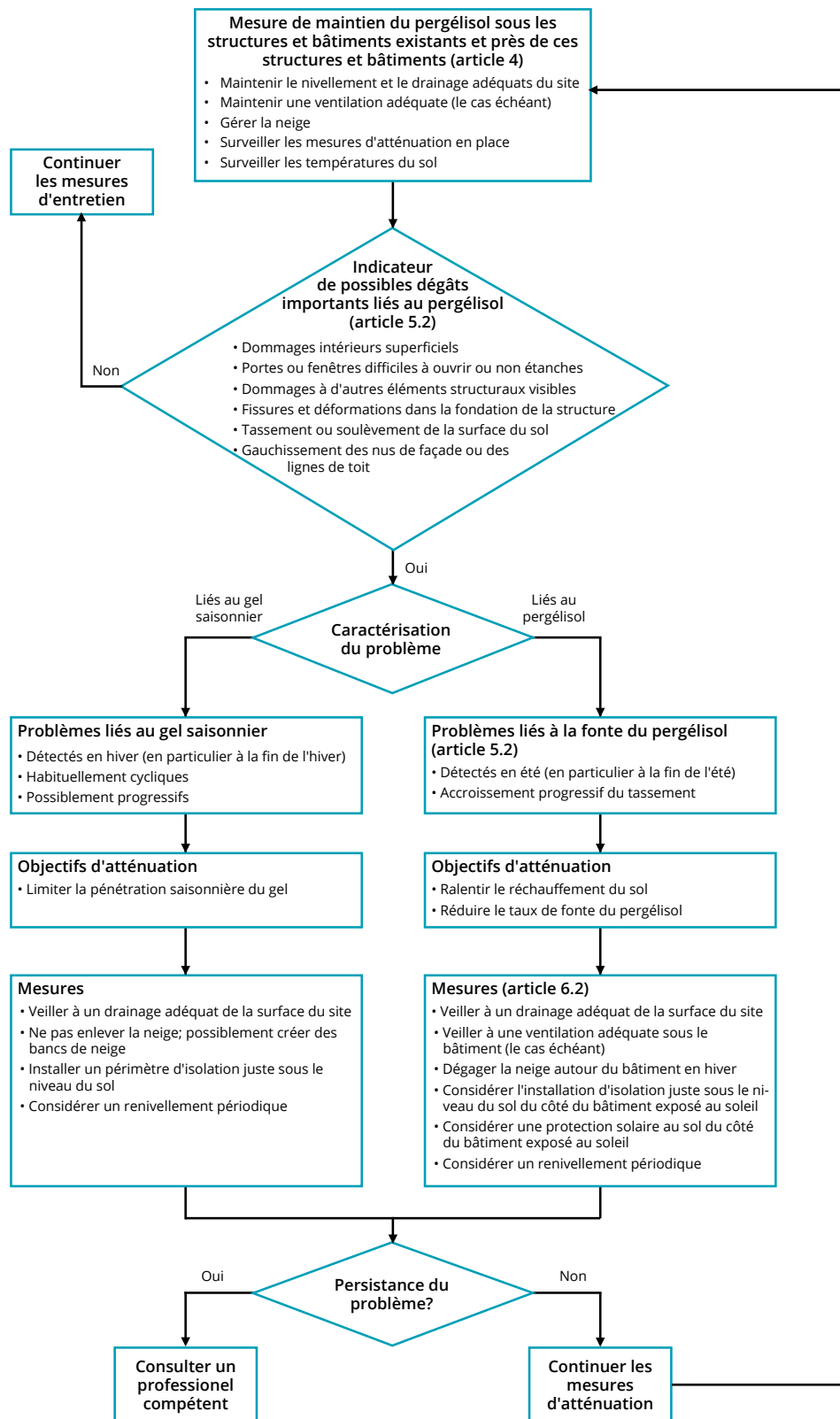


FIGURE 5.93 : MESURES DE MAINTIEN DU PERGÉLISOL, SUIVI DES INDICATEURS ATTRIBUABLES À UNE DÉGRADATION POSSIBLE DU PERGÉLISOL, CARACTÉRISATION DU PROBLÈME ET MISE EN PLACE DE MESURES D'ATTÉNUATION APPROPRIÉES AU SITE (MODIFIÉ DE CAN/CSA-S501-14, « MODERATING THE EFFECTS OF PERMAFROST DEGRADATION ON EXISTING BUILDING FOUNDATIONS », 2014 NBR P.55, CODE DE PRODUIT : 2423338).

TECHNIQUE D'ATTÉNUATION	Fondations superficielles			Fondations profondes	
	Semelles en surface	Semelles enfouies	Dalle sur terre-plein	Pieux favorisant la géli-adhérence	Pieux cimentés ou chargés en pointe
Protection solaire – voir l'article 6.3.1	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Drainage – voir l'article 6.3.2	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Gestion de la neige – voir l'article 6.3.3	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Ventilation – voir l'article 6.4.2	Oui	Oui	Non	Oui	Non
Isolation du sol – voir l'article 6.4.3	Oui	Oui	Non	Oui	Peut-être
Ajustement/mise à niveau de la fondation existante – voir l'article 6.4.4	Oui	Oui	Peut-être	Oui	Oui
Réfrigération mécanique – voir l'article 6.4.5	Oui	Oui	Peut-être	Oui	Oui
Thermosiphons – voir l'article 6.4.5	Oui	Oui	Peut-être	Oui	Oui
Remplacement de la fondation – voir l'article 6.4.6	Oui	Oui	Non	Peut-être	Peut-être

TABEAU 5.8 : APPLICABILITÉ DES DIVERSES TECHNIQUES POUR ATTÉNUER LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL (TIRÉ DE LA NORME CAN/CSA-S501-14 « MODERATING THE EFFECTS OF PERMAFROST DEGRADATION ON EXISTING BUILDING FOUNDATIONS », 2014 NBR P.55, CODE DE PRODUIT : 2423338).

5.8 VISION DE LA PLANIFICATION

L'aménagement du territoire passe par une planification des secteurs raisonnablement constructibles. Établir quels sont ces secteurs nécessite de prendre en considération l'ensemble des facteurs qui peuvent influencer le comportement des infrastructures. La construction des bâtiments et des rues, le contrôle du drainage de même que l'installation des services publics nécessiteront des travaux de génie bien ordonnés et planifiés pour protéger le pergélisol. Il faut éviter de placer trop près l'un de l'autre des bâtiments supportés par un type de fondation différent, particulièrement lorsque cela peut entraîner une modification du régime thermique du pergélisol sous le bâtiment adjacent, un problème causé dans bien des cas par la mauvaise planification du réseau de drainage et des accumulations de neige. En résumé, les conditions suivantes devraient être respectées dans les secteurs à bâtir :

- La zone de construction devrait se trouver, de préférence, sur un roc de bonne qualité⁷ ou sur un sol stable au dégel pour lequel les tassements en cas de dégel respectent les tolérances admissibles.
- L'inclinaison des pentes recouvertes de dépôts meubles doit être suffisamment douce pour assurer leur stabilité à long terme, en tenant compte de tous les changements anticipés.
- Les remblais surdimensionnés et les travaux de terrassement d'importance devraient être réduits au minimum tandis que l'excavation dans les zones de pergélisol riche en glace est à éviter.
- Le secteur doit être bien drainé et situé hors des zones inondables ou touchées par les marées et les surcotes de tempêtes.
- La dimension et la géométrie des lots doivent être suffisantes pour construire le bâtiment, tout en laissant une aire de circulation adéquate en périphérie de celui-ci.
- Une marge suffisante doit être prévue à proximité des zones sensibles à l'érosion ou aux glissements de terrain tels le haut des talus riverains, les pieds de pente potentiellement instables et les bordures des cours d'eau.
- Les constructions doivent être érigées à l'extérieur des zones exposées aux avalanches ou à tout autre risque naturel potentiel.

⁷ Lorsque ces zones se font plus rares, les autorités locales peuvent choisir de les réserver à des fins institutionnelles, commerciales ou industrielles de manière à assurer la pérennité des édifices de grande taille et à en réduire le coût de construction.

BIBLIOGRAPHIE

- AINING ZHANG, F. Z., R. Li et E. H. ANWAR MAJID (2007). *Potential climate change-induced permafrost degradation and building foundations: An assessment of impacts and costs for five case communities in the Northwest Territories*. Canada. Draft, 114 p.
- ALDRICH, H. P. Jr. et H. M. PAYNTER (1966). *Depth of Frost Penetration in Non-uniform Soil*. U. S. Army Cold Reg. Res. Eng. Lab. Spec. Rep. 104.
- ALLARD, M. et E. L'HÉRAULT (2009). *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Volet numéro 3 : Cartographie étendue des dépôts de surface et évaluation des profondeurs du substrat rocheux*. Réalisé pour le compte du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 46 p.
- ALLARD, M. et M. K. SÉGUIN (1987a). « Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 41 : 141-152.
- ALLARD, M. et M. K. SÉGUIN (1987b). "The Holocene evolution of permafrost near the tree-line on the eastern coast of Hudson Bay (northern Québec)", *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 24 : 2206-2222.
- ALLARD, M., E. L'HÉRAULT, J. DOYON et D. SARRAZIN (2010). *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik : Analyse microclimatique adaptée à l'aménagement du village de Salluit*. Réalisé pour le compte du MAMROT. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 38 p.
- ALLARD, M., M. K. SÉGUIN et R. LÉVESQUE (1987). "Palsas and mineral permafrost mounds in northern Québec", Dans : *International Geomorphology 1986, Part II*, V. Gardiner éditeur, John Wiley & Sons Ltd., London, p. 285-309.
- ALLARD, M., R. FORTIER, O. Gagnon et Y. MICHARD (2004). *Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Salluit : Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique. Rapport final*. Réalisé pour le compte du ministère de la Sécurité publique. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 93 p.
- ALLARD, M., T. GIBÉRYEN, E. L'HÉRAULT et D. SARRAZIN (2009). *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Volet numéro 2 : Espaces potentiellement disponibles pour la construction*. Rapport d'étape réalisé pour le compte du MAMROT. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 41 p.
- ALLARD, M. et D. SARRAZIN (2008). *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit. Volet numéro 1 : Mise à jour des lectures et observations depuis 2004*. Rapport d'étape réalisé pour le compte du MAMROT. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 49 p.
- ALLARD, M. et E. L'HÉRAULT (2010). *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik*. Rapport d'étape : Cartographie du potentiel de construction de la vallée de Salluit selon les conditions de pergélisol et les pentes. Réalisé pour le compte du MAMROT. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 21 p.
- ALLARD, M., E. L'HÉRAULT, T. GIBÉRYEN et C. BARRETTE (2010). *L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Rapport final : Salluit : s'adapter et croître*. Réalisé pour le compte du MAMROT. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 53 p.

- ALLARD, M. et M. LEMAY (2013). *Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. ArcticNet Inc. Québec, Québec, Canada, 318 p.
- ANDERSLAND, O. B. et B. LADANYI (2004). *Frozen ground engineering. Second Edition*. Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, 362 p.
- ANDERSON, D. M. et N. R. MORGENSTERN (1973). "Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: a review", Dans : *Proc. 2nd International Conference on Permafrost, Yakutsk, U.S.S.R., North American Contribution, U.S. National Academy of Sciences*, p. 257-288.
- ARCTIC FOUNDATIONS OF CANADA. Site Internet. Technologies/Thermopiles. <http://www.arcticfoundations.ca/technologies.html>.
- ASSOCIATE COMMITTEE ON GEOTECHNICAL RESEARCH (1988). *La terminologie du pergélisol et notions connexes*, National Research Council of Canada, Ottawa, 154 pp.
- ASSOCIATE COMMITTEE ON GEOTECHNICAL RESEARCH, NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA (1981), *Permafrost - Engineering Design and Construction*. édité par G.H. Johnston. Toronto, John Wiley & Sons, 483 p.
- ASSOCIATION DES TRANSPORTS DU CANADA (2010). *Guidelines for Development and Management of Transportation Infrastructure in Permafrost Regions*, 175 p.
- ASTM D4083-89 (2007). *Standard Practice for Description of Frozen Soils (Visual-Manual Procedure)*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- BLEAU, Stéphanie (2012). *Étude du comportement des glaces dans un environnement subarctique en régime macrotidal, estuaire de la rivière Koksoak, Nunavik*. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de l'eau, 248 p.
- BOMMER, C. et collab. (2010). *Construire sur le pergélisol : Guide pratique*. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, WSL, 126 p. <http://www.wsl.ch/dienstleistungen/publikationen/pdf/10493.pdf>.
- BRAUN, B., J. A. SHUSTER et E. W. BURNHAM (1979). "Ground Freezing for Support of Open Excavation", First International Symposium on Ground Freezing, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 429-453.
- BROWN, R., M. LEMAY, M. ALLARD, N. E. BARRAND, C. BARRETTE, Y. BÉGIN, T. BELL, M. BERNIER, S. BLEAU, D. CHAUMONT, Y. DIBIKE, A. FRIGON, P. LEBLANC, D. PAQUIN, M. J. SHARP et R. WAY (2012). "Climate variability and change in the Canadian Eastern Subarctic IRIS region" (Nunavik and Nunatsiavut), Dans : Allard M. et M. Lemay (éditeurs), *Nunavik and Nunatsiavut, from Science to Policy, Integrated Regional Impact Study of the Canadian Eastern Subarctic Region*, ArcticNet, Chapitre 2, p. 57-113.
- BURT, T.P. et P. J. WILLIAMS (1976). "Hydraulic conductivity in frozen soils", *Earth Surface Processes*, vol. 1 : 349-360.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA) (2010). *Technical guide: Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation*. Mississauga, CSA, 97 p.
- CARBONNEAU, A-S., E. L'HÉRAULT, S. AUBÉ-MICHAUD, M. TAILLEFER, M.-A. DUCHARME, M. PELLETIER et M. ALLARD (2015). *Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour huit communautés du Nunavik. Rapport final*. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 127 p.
- CASAGRANDE, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions*, American Society of Civil Engineers 113 : 901-992.
- COMITÉ ASSOCIÉ DE RECHERCHES GÉOTECHNIQUES (1988). *La terminologie du pergélisol et notions connexes*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, 154 p.

- Convention de la Baie-James et du Nord québécois et conventions complémentaires*, édition 2006.
- COUILLARD, L. et S. PAYETTE (1985). « Évolution holocène d'une tourbière à pergélisol » (Québec nordique), *Canadian Journal of Botany*, vol. 63 : 1104-1121.
- CSA STANDARDS (2009), *Infrastructure Foundations & Permafrost: A Practice Guide for Climate Change Adaptation - Permafrost Workshop Inuvik*, January 19-20, 2009. Disponible sur : <http://www.docstoc.com/docs/26114678/Infrastructure-Foundations-Permafrost-A-Practice-Guide-for>
- DESJARLAIS, C. et collab. (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal, Ouranos, 128 p. http://www.ouranos.ca/fr/pdf/ouranos_sadapterauxcc_fr.pdf.
- DEPARTMENT OF PUBLIC WORKS AND SERVICES OF THE GOVERNMENT OF THE NORTHWEST TERRITORIES (2009). *Good building practice for Northern facilities (2)*. Yellowknife, Department of Public Works and Services of the Government of the Northwest Territories. <http://www.pws.gov.nt.ca/pdf/GBP/GBP%202011%20-%20Oct%2018%20Update.pdf>.
- DEVER, L., C. HILLAIRES-MARCELET J. C. FONTES (1984). « Composition isotopique, géochimique et genèse de la glace en lentilles (palsen) dans les tourbières du Nouveau-Québec », (Canada), *Journal of Hydrology*, vol. 71 : 107-130.
- DIONNE, J.-C. (1978). « Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie, Québec subarctique », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 32 : 187-247.
- DIONNE, J.-C. (1983b). « Réseaux reliques de polygones de tourbe, moyenne et basse Côte-Nord du Saint-Laurent, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 37 : 127-146.
- DIONNE, J.-C. (1984). « Palses et limites méridionales du pergélisol dans l'hémisphère nord : le cas de Blanc-Sablon, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38 : 165-184.
- DOUGLAS, T. A. et collab. (2008). *Permafrost Dynamics at the Fairbanks Permafrost Experimental Station Near Fairbanks, Alaska*, Ninth International Conference on Permafrost, 6 p.
- DYKE, L. D. (1984). "Frost heaving of bedrock in permafrost regions", *Bul. of the Assoc. of Eng. Geol.*, 21: 389-405.
- EPOO, D., M. Larivière et C. Larrivée (2005). *Guide de la construction au Nunavik. Deuxième édition*, 18 p. Version anglaise disponible sur : http://www.pituvik.com/Construction/Guide_for_construction_in_Nunavik.pdf.
- ETKIN, D., G. Paoli et D. Riseborough (1998). *Climate Change Impacts On Permafrost Engineering Design*. Toronto, Environmental Adaptation Research Group, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 40 p.
- FAROUKI, O. T. (1981). *Thermal properties of soils*, CRREL (monograph 81-1), Hanover N. H., 136 p.
- FILION, L. (1983). *Dynamique holocène des systèmes éoliens et signification paléoclimatique (Québec nordique)*, Thèse de doctorat non publiée, Université Laval, Dép. de géographie, Québec, 123 p.
- FILION, L. et P. MORISSET (1983). "Eolian landforms along the eastern coast of Hudson Bay, Northern Québec", *Tree-line Ecology. Proceedings of the Northern Québec Tree-line Conference*, Collection Nordica, no 47, Centre d'études nordiques, Université Laval, p. 73-94.
- FOURNIER, A. « Enveloppes de bâtiment pour climats extrêmes, conférence technique # 184 », *Conseil de l'enveloppe du bâtiment du Québec*, [Enligne], [\[http://www.cebq.org/documents/Enveloppes_climats_extremes.pdf\]](http://www.cebq.org/documents/Enveloppes_climats_extremes.pdf) (Présentation donnée le 28 avril 2010).
- GIEC (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

Good Building Practice for Northwest Facilities (édition 2011) par le gouvernement des Territoires du Nord-Ouest.

Good Building Practice Guideline (édition 2005) par le gouvernement du Nunavut.

GOVERNMENT OF NUNAVUT (2005). *Good Building Practices: Guideline. Second Edition*. Nunavut Kavamanga, Government of Nunavut. <http://cgs.gov.nu.ca/PDF/Good%20Building%20Practices%20Guideline.pdf>.

GOUVERNEMENT DU NUNAVUT, MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT (2013). *Guide du propriétaire sur le pergélisol au Nunavut*, Yellowknife, T.N.-O., 22 p. http://www.climatechangenunavut.ca/sites/default/files/permafrost_nunavut_fr_reduced_size.pdf.

Government of the Northwest Territories, Good Building Practice for Northern Facilities 2011, Third Edition – guidelines for building in the North [<http://www.pws.gov.nt.ca/pdf/GBP/GBP%202011.pdf>] (Consulté le 2 août 2012).

Guide de la construction au Nunavik, 2^e édition (2005).

Guide Perrier. Choix de fenêtre : fenêtres tout PVC efficaces, durables et pratiques, [En ligne], [<http://www.guideperrier.com/article3384/Choix-de-fenetre-fenestres-tout-PVC-efficaces-durables-et-pratiques>], (Consulté le 2 août 2012).

HAMELIN, L.-E. et A. CAILLEUX (1969). « Les paises dans le bassin de la Grande rivière de la Baleine », *Revue de Géographie de Montréal*, vol. 23 : 329-337.

HIVON, E. G. et D. C. SEGO (1993). Distribution of Saline Permafrost in the Northwest Territories, Canada. "*Canadian Geotechnical Journal*", 30, pp. 506-514. <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/t93-043>.

HOLUBEC, I. (2010). *Geotechnical site investigation: Guidelines for building foundations in permafrost. Prepared for: Department of Public Works and Services*. Government of the Northwest Territories, 48 p. <http://www.pws.gov.nt.ca/pdf/publications/GeotechnicalGuidelines.pdf>.

HOLUBEC, I. (2008). *Flat Loop Thermosyphon Foundations in Warm Permafrost. Prepared for Government of the NT*, Asset Management Division, Public Works and Services and Climate Change Vulnerability Assessment, Canadian Council of Professional Engineers, 22 p. <http://www.pws.gov.nt.ca/pdf/publications/Thermosyphon%20Foundations%20in%20warm%20permafrost%20.pdf>.

James Bay and Northern Quebec Agreement and complementary agreements, édition 2006.

JETCHICK, É. (1988). *Les polygones à coin de sol dans les tills, région du lac Minto, Québec nordique*, Thèse de maîtrise non publiée, Université Laval, Dép. de géographie, Québec, 151 p.

JETCHICK, É., et M. ALLARD (1990). "Soil wedge polygons in northern Québec: description and paleoclimatic significance", *Boreas*, vol. 19 : 353-367.

JOHNSTON, G. H. (1981). *Permafrost : Engineering Design Construction*. John Wiley & Sons Ltd., Toronto, 540 p.

JOURNEAUX, N. L. (2010). *Construction d'habitations NV of Salluit: Avis technique*. Rapport no L-09-1324. Québec. Réalisé pour le compte du MAMROT.

JOURNEAUX, N. L. (2011). *Analyse technique et financière du plan d'aménagement du village de Salluit et recommandations sur la réalisation d'études géotechniques au Nunavik*. Rapport no L-10-1398 – Rév. 4. Réalisé pour le compte du MAMROT, 53 p.

KASPER, J. et M. ALLARD (2001). "Late Holocene climate change as detected through ice-wedge growth and decay on the southern shore of Hudson Strait, northern Québec, Canada", *The Holocene*, 11: 563-577.

LAGAREC, D. (1980). *Étude géomorphologique de paises et autres buttes cryogènes en Hudsonie, Nouveau-Québec*, Thèse de doctorat non publiée, Université Laval, Dép. de géographie, Québec, 308 p.

LA SOCIÉTÉ CANADIENNE DE GÉOTECHNIQUE (1994). *Manuel canadien d'ingénierie des fondations. Seconde édition*. British Columbia, Société canadienne de géotechnique, 558 p.

LEMKE, P. et collab. (2007). *Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground*. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp. 337-383. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter4.pdf>.

LEROUÉIL, S., G. DIONNE et M. ALLARD (1990). « Tassement et consolidation au dégel d'un silt argileux à Kangiqsualujuaq », Dans : *Pergélisol-Canada, Actes de la Cinquième conférence canadienne sur le pergélisol, Conseil national de recherches Canada et Centre d'études nordiques*, Université Laval, Collection Nordicana, vol. 54 : 309-316.

LÉVESQUE, R. (1986). *Géomorphologie et cartographie assistée par ordinateur du pergélisol, aux rivières Nastapoca et Sheldrake, Hudsonie*, Thèse de maîtrise non publiée, Université Laval, Dép. de géographie, Québec, 144 p.

LEWKOWICZ, A. G. et C. HARRIS (2005). "Morphology and geotechnique of active-layer detachment failures in discontinuous and continuous permafrost", northern Canada, *Geomorphology*, 69: 275-297.

L'HÉRAULT, E. (2009). *Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik*, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, 140 p.

L'HÉRAULT, E., M. ALLARD, M. LEMAY, C. BARRETTE, A-S. CARBONNEAU et M-A. DUCHARME (2015). *Route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq : Développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol et identification de solutions d'adaptation dans un contexte de changements climatiques*. Rapport final réalisé pour le compte du MTQ. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 89 p.

L'HÉRAULT, E., M. ALLARD, M. LEMAY, C. BARRETTE et A-S. CARBONNEAU (2014). *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujuaq, Nunavik*. Rapport final au MTQ, Centre d'études nordiques, Université Laval, 77 p.

L'HÉRAULT, E., M. ALLARD, D. FORTIER, A-S. CARBONNEAU, J. DOYON-ROBITAILLE, M-P. LACHANCE, M-A. DUCHARME, K. LARRIVÉE, K. GRANDMONT et C. LEMIEUX (2013). *Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik*. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 90 p.

L'HÉRAULT, E., M. ALLARD, C. BARRETTE, G. DORÉ, et D. SARRAZIN (2012). *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik*. Rapport final. Réalisé pour le compte du MTQ. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 224 p.

L'HÉRAULT, E. (2009). *Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik*. Mémoire de M. Sc., Département de géographie. Québec, Université Laval, 149 p.

LINELL, K. A. (1973). *Long-term effects of vegetative cover on permafrost stability in an area of discontinuous permafrost*. In: Permafrost: North American contribution to the Second International Conference, pp. 688-693.

MACKAY, J. R. (1990). "Some observations on the growth and deformation of epigenetic, syngenetic and anti-syngenetic ice wedges", *Permafrost and periglacial processes*, vol. 1 : 15-29.

MICHAUD, Y. et J.-C. DIONNE (1987). « Altération des substrats rocheux et rôle du soulèvement gélival dans la formation des champs de blocaille, en Hudsonie », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 41 : 7-18.

- MICHAUD, Y. et L. D. DYKE (1990). "Mechanism of bedrock frost heave in permafrost regions", Dans : *Pergélisol-Canada, Actes de la Cinquième conférence canadienne sur le pergélisol, Conseil national de recherches Canada et Centre d'études nordiques*, Université Laval, Collection Nordicana, col. 54 : 125-130.
- MCFADDEN, T. (2001). *Design Manual for Stabilizing Foundations on Permafrost*. North Pole, Permafrost Technology Foundation, 160 p.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, DIRECTION DU LABORATOIRE DES CHAUSSÉES, SERVICE DE LA GÉOTECHNIQUE ET DE LA GÉOLOGIE (septembre 2012). *Guide pour l'étude et la construction de remblais routiers sur tourbières*. Québec, 56 p.
- NERSESOVA, Z. A. et TSYTOVICH (1963). "Unfrozen water in frozen soils", Dans : *Proceedings of First International Permafrost Conference*, Lafayette, Indiana, Building research Advisory Board, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, D.C., p. 230-234.
- NGI (2000). *Avalanche hazard assesment in Nunavik and on Côte-Nord, Québec, Canada*. Rapport du Norwegian Geotechnical Institute pour le ministère de la Sécurité publique du Québec.
- PAYETTE, S., H. SAMSON et D. LAGAREC (1976). "The evolution of permafrost in the taiga and the forest-tundra, western Québec-Labrador peninsula", *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 6 : 339-358.
- PAYETTE, S. et M. K. SEGUIN (1979). « Les buttes minérales cryogènes dans les basses terres de la rivière aux Feuilles », Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33 : 339-358.
- PAYETTE, S., L. GAUTHIER et I. GRENIER (1986). "Dating ice-wedge growth in subarctic peatlands following deforestation", *Nature*, 332 (6081) : 724-727.
- PENNER et GOODRICH (1983). « Principe de fonctionnement d'un pieu thermique » [*Arctic Foundations*, <http://www.arcticfoundations.com>].
- QUIROUETTE, R.L. (1989). Proceedings, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, *Regard sur la science du bâtiment 1986 - Un pare-air pour l'enveloppe du bâtiment*, ISSN 0835-6548, repéré à <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/rsb/86-pare-air.html>.
- RBQ (2012) *Règlement modifiant le Règlement modifiant le Code de construction*, [En ligne], [<http://www.rbq.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/acces-information/projet-reglement-code-efficacite-energetique.pdf>] (Consulté le 8 août 2012).
- RICE, E. (1996). *Building in the North, Anchorage. Forth Edition*. Alaska, Science & Technology Foundation, 93 p. http://www.uaa.alaska.edu/civil-engineering/arctic/upload/Building_in_the_North.pdf.
- RIOUX, N., Y. SAVARD et D. ST-LAURENT (2010). *Guide de planification et de réalisation des études de reconnaissance de sols*, Québec, Gouvernement du Québec, 78 p.
- RNCan. — *Fenêtres, portes et puits de lumière homologués ENERGY STAR*, [En ligne], [<http://oe.nrcan.gc.ca/node/4176>] (Consulté le 2 août 2012).
- RNCan. — *Portes, fenêtres et puits de lumière éconergétiques pour le secteur résidentiel*, [En ligne], [<http://oe.nrcan.gc.ca/publications/equipement/fenestres-et-portes/1166>] (Consulté le 2 août 2012).
- RNC. *Le mécanisme de votre maison : Ventilation et contrôle du flux d'air*, [En ligne], [<http://oe.nrcan.gc.ca/node/15316>] (Consulté le 1^{er} août 2012).
- RWDI Inc.
- SALZMANN, N., C. FREI, P.L. VIDALE et M. HOELZLE (2007a). "The application of Regional Climate Model output for the simulation of high-mountain permafrost scenarios." *Global and Planetary Change*, 56(1-2): 188-202.
- SALZMANN, N., J. NOTZLI, C. HAUCK, S. GRUBER, M. HOELZLE et W. HAEERLI (2007b). "Ground surface temperature scenarios in complex high-mountain topography based on regional climate model results." *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112(F2): 10.

- SAVARD, J.-P. (2016). *Impacts des changements climatiques sur le régime des tempêtes et les niveaux d'eau extrêmes dans la baie d'Hudson, la baie James et le détroit d'Hudson*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada. Montréal : Ouranos, 82 p.
- SEGUIN, M. K. et J. CRÉPAULT (1979). « Étude géophysique d'un champ de paises à Poste-de-la-Baleine », *Nouveau-Québec, Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33 : 327-337.
- SEGUIN, M. K. et M. ALLARD (1984). « La répartition du pergélisol dans la région du détroit de Manitounuk, côte est de la mer d'Hudson », *Canada, Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 21 : 354-364.
- SEGUIN, M. K. et J. FRYDECKI (1990). "Approach to gravity estimation of the volume ice fraction in discontinuous permafrost". *Geoexploration*, vol. 26 : 233-251.
- SEIFERT, R. (2000). *Building in Alaska: Special considerations for building in Alaska*. Fairbanks, University of Alaska Fairbanks, 11 p.
- SOCIÉTÉ CANADIENNE D'HYPOTHÈQUES ET DE LOGEMENT (SCHL). (2012). *L'air et l'humidité : Un guide pour comprendre et régler les problèmes d'humidité dans les habitations* (Publication no 61227), repéré à <https://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/61227.pdf?fr=1479917804999>.
- SCHL (2009). *La maison durable pour le Nord : un processus de conception novateur*, [En ligne]. [<http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/66542.pdf>] (Consulté le 1^{er} août 2012).
- SCHL SÉRIE TECHNIQUE 94-203 (1994). *Concevoir des enveloppes de bâtiment durables pour les habitations nordiques*, [En ligne]. [ftp://ftp.cmhc-schl.gc.ca/cmhc/french/f-factsheets/f-94_203.html] (Consulté le 1^{er} août 2012).
- SCHL SÉRIE TECHNIQUE 94-214 (1994). *Pergélisol et types de fondations*, [En ligne]. [ftp://ftp.cmhc-schl.gc.ca/cmhc/french/f-factsheets/f-94_214.html] (Consulté le 1^{er} août 2012).
- SCHL SÉRIE TECHNIQUE 94-217 (1994). *Ventilation et étanchéité à l'air des bâtiments dans le Nord*, [En ligne]. [ftp://ftp.cmhc-schl.gc.ca/cmhc/french/f-factsheets/f-94_217.html] (Consulté le 1^{er} août 2012).
- SCHL (2004b). *Examen de l'utilisation de l'espace domestique par les familles inuites d'Arviat, au Nunavut*, [En ligne], [<http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/63601.pdf?fr=1282842924656>] (Consulté le 2 août 2012).
- SCHL SÉRIE TECHNIQUE 09-105. *Comprendre la perméance à la vapeur et la condensation dans les murs*, [En ligne], [<http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/66565.pdf?fr=1282848746515>] (Consulté le 2 août 2012).
- SCHL SÉRIE TECHNIQUE 94-207 (1994). *Problèmes des portes et fenêtres pour les habitations nordiques*, [En ligne], [ftp://ftp.cmhc-schl.gc.ca/cmhc/french/f-factsheets/f-94_207.html] (Consulté le 2 août 2012).
- SCOTTER, G. W. et S. E. ZOLTAI (1982). "Earth Hummocks in the Sunshine area of the Rocky Mountains", *Alberta and British Columbia, Arctic*, vol. 35 : 411-416.
- SHILTS, W. W. (1978). "Nature and genesis of mud-boils, central Keewatin", *Canada, Canadian Journal of Earth Sciences*, vol 15 : 1053-1068.
- SMITH, D.W. (1996). *Cold regions utilities monograph. Third Edition*. Virginia, The American Society of Civil Engineers and the Canadian Society for Civil Engineering.
- SMITH, S. et M. BURGESS (2000). *Ground Temperatures Database for Northern Canada*. Geological Survey of Canada Open File Report 3954, 27 p.
- SOCIÉTÉ CANADIENNE D'HYPOTHÈQUES ET DE LOGEMENT (SCHL) (2008). *L'observateur du logement au Canada*. Sixième édition d'une série annuelle. Canada, SCHL, 92 p. <http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/66138.pdf>.

TABLE RONDE NATIONALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE (2009). *Franç Nord : Adaptation de l'infrastructure du Nord canadien au changement climatique*. Ottawa, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 162 p.

TECHNICAL COUNCIL ON COLD REGIONS ENGINEERING MONOGRAPH, EDITED BY DAVID C. ESCH (2004). *Thermal analysis, construction, and monitoring methods for frozen ground*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Virginia, 492 p.

TECHNICAL COUNCIL ON COLD REGIONS ENGINEERING MONOGRAPH, EDITED BY EDWIN S. CLARKE (2007). *Permafrost Foundation, State of the Practice*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Virginia, 86 p.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), FOURTH ASSESSMENT REPORT, CLIMATE CHANGE 2007, *The Physical Science Basis*, Chapter 4, 50 p. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter4.pdf>.

Topoclimat et microclimats de la vallée de Salluit (Nunavik), mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval de Québec dans le cadre du programme de maîtrise en sciences géographiques, Département de géographie, Faculté de foresterie et de géomatique, © Frédéric Bouchard, 2005.

TRIODETIC (sans date). Multipoint Foundation Frames, 23 p. <http://multipoint-foundations.com/pdfs/frost.pdf>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (2012). *Policy Implications of Warming Permafrost*, UNEP, 30 p. <http://www.unep.org/pdf/permafrost.pdf>.

U.S. ARCTIC RESEARCH COMMISSION PERMAFROST TASK FORCE (2003). *Climate change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure*. Special Report 01-03. Arlington, Virginia, U.S. Arctic Research Commission, 62 p. <http://www.arctic.gov/publications/permafrost.pdf>.

VANGOOL, W.J. (1996). *Foundations for permafrost and other problem soils*. Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. ASCE, New York, NY, pp. 303-314.

WASHBURN, A. L. (1979). *Geocryology: A survey of periglacial processes and environments*, London, Edward Arnold, 406 p.

WILLIAMS, P. J. (1967). *Properties and behaviour of freezing soils*, Norwegian Geotechnical Institute, Paper 72, 120 p.

WILLIAMS, P. J. (1986). *Pipelines and Permafrost, Science in a Cold Climate*, Ottawa: Carleton University Press, 137 p.

WILLIAMS, P. J. et M. W. SMITH (1989). *The Frozen Earth: Fundamentals in Geocryology*, Cambridge University Press, New York, 305 p.

YARMAK, E. Jr. et E.L. LONG (2002). *Recent developments in thermosyphon technology*. Proc. 11th Int'l Conf. On Cold Regions Engineering, Anchorage, Alaska, May 2002.

ANNEXES

ANNEXE I :

Organismes et intervenants pour tout projet de construction au Nunavik

ANNEXE II :

Instructions supplémentaires sur l'arpentage foncier

ANNEXE III :

Description des projets soumis et soustraits au processus d'évaluation environnementale (extrait du chapitre 23 de la Convention de la Baie-James et du Nord québécois)

ANNEXE IV :

Tableau récapitulatif des autorisations requises

ANNEXE V :

Programme Novoclimat

ANNEXE VI :

Fuites d'air à travers l'enveloppe

ANNEXE VII :

Propriétés minimales d'un système d'étanchéité à l'air efficace

ANNEXE VIII :

Perméance à la vapeur d'eau

ANNEXE IX :

Infiltrations dans un ensemble de construction

ANNEXE X :

Mur à écran pare-pluie

ANNEXE XI :

Degrés-jours

ANNEXE XII :

Autres normes

ANNEXE XIII :

Fenêtres et portes homologuées ENERGY STAR

ANNEXE XIV :

Infiltrométrie

ANNEXE XV :

Proposition de révision

ANNEXE XVI :

Fondations

ANNEXE I : ORGANISMES ET INTERVENANTS POUR TOUT PROJET DE CONSTRUCTION AU NUNAVIK

Pour de plus amples renseignements sur les tarifs de location, les services offerts, la location d'équipement, les ressources humaines ou de l'information sur une communauté en particulier, veuillez communiquer avec les villages nordiques et les corporations foncières, dont les coordonnées apparaissent ci-dessous.

VILLAGE NORDIQUE	CORPORATION FONCIÈRE
AKULIVIK Boîte postale 50 Akulivik (Québec) J0M 1V0 Tél. : 819 496-2222 Téléc. : 819 496-2200	QEKEIRRIAQ LHC Boîte postale 59 Akulivik (Québec) J0M 1V0 Tél. : 819 496-2640 Téléc. : 819 496-2629
AUPALUK Boîte postale 6 Aupaluk (Québec) J0M 1X0 Tél. : 819 491-7070 Téléc. : 819 491-7035	NUNAVIK LHC Boîte postale 29 Aupaluk (Québec) J0M 1X0 Tél. : 819 491-7045 Téléc. : 819 491-7045
INUKJUAQ Boîte postale 234 Inukjuak (Québec) J0M 1M0 Tél. : 819 254-8845 Téléc. : 819 254-8779	PITUVIK LHC Boîte postale 285 Inukjuak (Québec) J0M 1M0 Tél. : 819 254-8101 Téléc. : 819 254-8252
IVUJIVIK Boîte postale 20 Ivujivik (Québec) J0M 1H0 Tél. : 819 922-9940 Téléc. : 819 922-3045	NUVUMMI LHC Boîte postale 157 Ivujivik (Québec) J0M 1H0 Tél. : 819 922-9944 Téléc. : 819 922-3045
KANGIQSUALUJUAQ Boîte postale Kangiqsualujuaq (Québec) J0M 1N0 Tél. : 819 337-5270 Téléc. : 819 337-5200	QINIQTIQ LHC Boîte postale 160 Kangiqsualujuaq (Québec) J0M 1N0 Tél. : 819 337-5449 Téléc. : 819 337-5752

VILLAGE NORDIQUE	CORPORATION FONCIÈRE
KANGIQSUJUAQ Boîte postale 60 Kangiqsujuaq (Québec) J0M 1K0 Tél. : 819 338-3342 Téléc. : 819 338-3237	NUNATURLIK LHC Boîte postale 39 Kangiqsujuaq (Québec) J0M 1K0 Tél. : 819 338-3368 Téléc. : 819 338-1071
KANGIRSUK Boîte postale 90 Kangirsuk (Québec) J0M 1A0 Tél. : 819 935-4388 Téléc. : 819 935-4287	SAPUTIK LHC Boîte postale 119 Kangirsuk (Québec) J0M 1A0 Tél. : 819 935-4269 Téléc. : 819 935-4440
KUUIJUAQ Boîte postale 210 Kuujjuaq (Québec) J0M 1C0 Tél. : 819 964-2943 Téléc. : 819 964-0734	NAYUMIVIK LHC Boîte postale 209 Kuujjuaq (Québec) J0M 1C0 Tél. : 819 964-2870 Téléc. : 819 964-2280
KUUIJUARAPIK Boîte postale 360 Kuujjuarapik (Québec) J0M 1G0 Tél. : 819 929-3360 Téléc. : 819 929-3453	SAKKUQ LHC Boîte postale 270 Kuujjuaraapik (Québec) J0M 1G0 Tél. : 819 929-3348 Téléc. : 819 929-3275
PUVIRNITUQ Boîte postale 150 Puvirnituq (Québec) J0M 1P0 Tél. : 819 988-2825 Téléc. : 819 988-2751	DIRECTION GÉNÉRALE DU NORD-DU-QUÉBEC Boîte postale 151 Puvirnituq (Québec) J0M 1P0 Tél. : 819 755-4838 Téléc. : 819 755-3541
QUAQTAQ Boîte postale 107 Quaqtaq (Québec) J0M 1J0 Tél. : 819 492-9912 Téléc. : 819 492-9935	TUVAALUK LHC Boîte postale 102 Quaqtaq (Québec) J0M 1J0 Tél. : 819 492-9281 Téléc. : 819 492-9302

VILLAGE NORDIQUE	CORPORATION FONCIÈRE
SALLUIT Boîte postale 240 Salluit (Québec) J0M 1S0 Tél. : 819 255-8953 Téléc. : 819 255-8802	QAQQALIK LHC Boîte postale 30 Salluit (Québec) J0M 1S0 Tél. : 819 255-8908 Téléc. : 819 255-8864
TASIUJAQ Boîte postale 54 Tasiujaq (Québec) J0M 1T0 Tél. : 819 633-9924 Téléc. : 819 633-5026	ARQIVIK LHC Boîte postale 52 Tasiujaq (Québec) J0M 1T0 Tél. : 819 633-5335 Téléc. : 819 633-5337
UMIUJAQ Boîte postale 108 Umiujaq (Québec) J0M 1Y0 Tél. : 819 331-7000 Téléc. : 819 331-7057	ANNITURVIK LHC Boîte postale 148 Umiujaq (Québec) J0M 1Y0 Tél. : 819 331-7831 Téléc. : 819 331-7832

I.2 : FORMULAIRES ET CONSTRUCTION AU NUNAVIK

Pour obtenir de l'aide lorsque vous remplissez les formulaires de demande ou pour obtenir de plus amples renseignements sur la construction au Nunavik, n'hésitez pas à communiquer avec les personnes suivantes :

COORDONNATEUR DE L'ASSOCIATION DES CORPORATIONS FONCIÈRES DU NUNAVIK	Boîte postale 179 Kuujjuaq (Québec) J0M 1C0 Tél. : 819 964-2925 Téléc. : 819 964-2613
AMÉNAGISTE, SERVICE DES RESSOURCES RENOUVELABLES, ADMINISTRATION RÉGIONALE KATIVIK	Boîte postale 9 Kuujjuaq (Québec) J0M 1C0 Tél. : 819 964-2961 Téléc. : 819 964-0694 http://www.krg.ca

I.3 : BAUX FONCIERS POUR LES TERRES DES CATÉGORIES II ET III

POUR LA RÉGION SITUÉE À L'EST DU DEGRÉ 76 DE LONGITUDE

**MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET
DES RESSOURCES NATURELLES
DU QUÉBEC**

**DIRECTION RÉGIONALE
DE LA GESTION DU TERRITOIRE PUBLIC**
837, boulevard Sacré-Cœur
Saint-Félicien (Québec) G8K 1S7
Tél. : 418 695-7877
Téléc. : 418 695-8133

POUR LA RÉGION SITUÉE À L'OUEST DU DEGRÉ 76 DE LONGITUDE

**MINISTÈRE DES FORÊTS,
DE LA FAUNE ET DES PARCS**

**DIRECTION RÉGIONALE
DE LA GESTION DU TERRITOIRE PUBLIC**
1122, Route 111 Est
Amos (Québec) J9T 1N1
Tél. : 819 444-5641
Téléc. : 819 444-5837

Il est également possible d'obtenir un formulaire de demande de bail foncier à l'adresse suivante :

<https://mern.gouv.qc.ca/territoire/droit/formulaire-utilisation-terres-etat.html>

I.4 : POUR OBTENIR DES INSTRUCTIONS PARTICULIÈRES D'ARPENTAGE POUR TOUS LES TRAVAUX D'ARPENTAGE FONCIER DEVANT ÊTRE RÉALISÉS AU NUNAVIK :

**MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE
ET DES RESSOURCES
NATURELLES (MERN)**
**BUREAU DE L'ARPENTEUR GÉNÉRAL
DU QUÉBEC**
**DIVISION DES TERRITOIRES
AUTOCHTONES ET DES FRONTIÈRES**

5700, 4^e Avenue Ouest, bureau F-310
Charlesbourg (Québec) G1N 6R1
Tél. : 418 627-6263
Téléc. : 418 643-6512
Courriel : services.specialises@mern.gouv.qc.ca

Pour de plus amples informations concernant le Bureau de l'arpenteur général du Québec, vous pouvez visiter le site Web du Ministère à l'adresse suivante :

<http://www.mern.gouv.qc.ca/information-fonciere>

I.5 : POUR OBTENIR LES CERTIFICATS D'AUTORISATION

**MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE
LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES**
**DIRECTION RÉGIONALE DU
NORD-DU-QUÉBEC**

180, boulevard Rideau, 1^{er} étage
Rouyn-Noranda (Québec) J9X 1N9
Tél. : 819 763-3333
Téléc. : 819 763-3202

Pour de plus amples renseignements sur les certificats d'autorisation du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, vous pouvez visiter le site Web du Ministère à l'adresse suivante :

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/ministere/certif/>

I.6 : POUR LES RACCORDEMENTS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUE ET TÉLÉPHONIQUE, COMMUNIQUEZ AVEC :

HYDRO-QUÉBEC

1 800 472-5103

BELL CANADA

819 773-5515

I.7 : POUR DE PLUS AMPLES RENSEIGNEMENTS SUR LES SITES ARCHÉOLOGIQUES, COMMUNIQUEZ AVEC LES ORGANISMES SUIVANTS :

INSTITUT CULTUREL AVATAQ

Inukjuak (Québec) J0M 1M0
avataq@avataq.qc.ca (renseignements
généraux) severian@avataq.qc.ca
(Service de l'archéologie)

**MINISTÈRE DE LA CULTURE ET
DES COMMUNICATIONS**
DIRECTION NORD-DU-QUÉBEC

19, rue Perreault Ouest, bureau 450
Rouyn-Noranda (Québec) J9X 6N5
Tél. : 819 763-3517
Téléc. : 819 763-3382
dratnq@mcc.gouv.qc.ca

ANNEXE II : INSTRUCTIONS SUPPLÉMENTAIRES SUR L'ARPENTAGE FONCIER

Les instructions suivantes sont fournies à titre indicatif, en complément à la section 1.4.

Rappelons qu'il est essentiel de communiquer avec le Bureau de l'arpenteur général du Québec (BAGQ) au moins 30 jours avant d'exécuter les travaux sur le terrain pour obtenir toutes les instructions relatives à l'arpentage. Cette démarche est nécessaire pour pouvoir déposer les documents d'arpentage au Greffe de l'arpenteur général du Québec.

- Le plan d'arpentage foncier doit indiquer l'emplacement (lot) où sera érigée la construction, et notamment les limites du lot, ses mesures, sa superficie ainsi que les lots adjacents. Il doit être déposé au Greffe de l'arpenteur général du Québec.
- Le Greffe de l'arpenteur général du Québec agit à titre de guichet unique pour le dépôt des documents d'arpentage foncier, c'est un registre public accessible à tous. Seul le BAGQ est autorisé à émettre des copies conformes de documents déposés au Greffe de l'arpenteur général du Québec. Le BAGQ n'exige aucuns frais des arpenteurs-géomètres pour une demande d'instructions particulières d'arpentage.
- À la suite du dépôt au Greffe de l'arpenteur général du Québec, le BAGQ fera parvenir une copie conforme du document à l'aménagiste de l'Administration régionale Kativik et à la corporation foncière concernée.
- En ce qui concerne tous les autres travaux d'arpentage à caractère privé qui ne créent pas ou ne modifient pas le morcellement (ex. : certificats de localisation), il n'y a pas lieu de les déposer au Greffe de l'arpenteur général du Québec. Toutefois, une copie conforme du document et un fichier numérique doivent être transmis au BAGQ par l'arpenteur-géomètre mandaté afin d'incorporer les données recueillies sur le terrain à la carte de compilation des arpentages produite par la Division des territoires autochtones et des frontières du BAGQ.

ANNEXE III : DESCRIPTION DES PROJETS SOUMIS ET SOUSTRATS AU PROCESSUS D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE (EXTRAIT DU CHAPITRE 23 DE LA CONVENTION DE LA BAIE-JAMES ET DU NORD QUÉBÉCOIS)

Projets automatiquement **soumis** au processus d'évaluation et d'examen des répercussions sur l'environnement et le milieu social :

1. Toute exploitation minière, ainsi que toute addition, transformation ou modification importante d'exploitations minières déjà existantes. Toutefois, les travaux de reconnaissance aérienne et terrestre, d'arpentage, de cartographie et de carottage sont permis sans qu'un rapport des répercussions soit exigé.
2. L'emplacement et l'exploitation d'importants bancs d'emprunt, de carrières de sable, de gravier et d'autres carrières.
3. Production d'énergie :
 - a. Centrales hydroélectriques, installations nucléaires et ouvrages connexes
 - b. Réservoirs d'emmagasiner et bassins de retenue d'eau
 - c. Lignes de transport à 75 kV et plus
 - d. Extraction et traitement de ressources énergétiques
 - e. Centrales thermiques alimentées en combustibles fossiles, d'une capacité de plus de trois mille kilowatts (3000 kW).

4. Exploitation sylvicole :
 - a. Grandes routes d'accès construites pour l'exploitation des forêts
 - b. Scieries, usines de pâte et de papier ou autres installations reliées aux activités forestières
 - c. En général, tout changement appréciable dans l'utilisation des terres qui influe de façon sensible sur une superficie de plus de vingt-cinq milles carrés (25 mi²)
5. Services communautaires et municipaux :
 - a. Nouveaux et importants systèmes de captage et d'évacuation des eaux usées et des égouts
 - b. Collecte et élimination des déchets solides, y compris l'enfouissement sanitaire et l'incinération
 - c. Projets de parcs, de réserves écologiques ou d'autres utilisations similaires des terres
 - d. Nouvelles pourvoiries pour plus de trente (30) personnes, y compris les réseaux d'avant-postes
 - e. Nouvelles villes, communautés ou municipalités, ou expansion appréciable de celles qui existent déjà
6. Transport :
 - a. Routes d'accès aux localités, et routes avoisinantes à celles-ci
 - b. Installations portuaires
 - c. Aéroports
 - d. Chemins de fer
 - e. Infrastructure routière en vue de nouveaux lotissements
 - f. Pipelines
 - g. Travaux de dragage pour l'amélioration de la navigation

Projets automatiquement soustraits au processus d'évaluation et d'examen des répercussions sur l'environnement et le milieu social :

1. Tout développement dans les limites des communautés qui n'ont pas de répercussions directes sur les ressources fauniques en dehors de ces limites.
2. Les petits hôtels, les motels, les stations-service et autres constructions semblables en bordure des routes provinciales et de routes secondaires.
3. Les constructions destinées à l'habitation, aux commerces de gros et de détail, aux garages, aux bureaux ou à l'artisanat et au stationnement des voitures.
4. Les centrales thermiques alimentées en combustible fossile et d'une capacité inférieure à trois mille kilowatts (3000 kW).
5. Les immeubles suivants :
 - maisons d'enseignement
 - banques
 - casernes de pompiers
 - biens destinés à l'administration, aux loisirs, aux activités culturelles, au culte, aux sports et à la santé
 - biens immeubles

- matériel servant aux télécommunications.
6. La construction, la modification, la rénovation, la relocalisation ou la conversion à d'autres usages des postes directeurs et des postes de transformation d'une puissance de soixante-quinze kilovolts (75 kV) ou moins et les lignes de transport d'énergie d'une tension de soixante-quinze kilovolts (75 kV) ou moins.
 7. La construction et le prolongement de conduites principales de moins de trente centimètres (30 cm) de diamètre sur une longueur maximale de cinq milles (5 mi).
 8. L'investigation, l'étude préliminaire, la recherche, les études et les relevés techniques antérieurs à tout aménagement, tout ouvrage ou toute construction.
 9. L'exploitation sylvicole lorsqu'elle fait partie de plans de gestion approuvés du gouvernement, sous réserve des dispositions de l'alinéa 23.5.34 de la Convention de la Baie-James et du Nord québécois.
 10. Les rues et les trottoirs municipaux construits conformément aux règlements municipaux.
 11. L'exploitation et l'entretien des routes et des ouvrages d'art routiers.
 12. Les installations temporaires servant à la chasse, au trappage, à l'exploitation des ressources fauniques; les services de pourvoiries et de campements logeant moins de trente (30) personnes.
 13. Les réparations et l'entretien des ouvrages municipaux.
 14. L'extraction et la manutention de la stéatite, du sable, du gravier, du cuivre et du bois, pour utilisation personnelle et communautaire.
 15. La coupe limitée de bois pour utilisation personnelle ou communautaire.
 16. Les bancs d'emprunt servant à l'entretien des routes.

Les dispositions précédentes ne sont pas interprétées comme restreignant les exigences relatives à l'évaluation des répercussions sur l'environnement conformément au processus fédéral d'évaluation et d'examen des répercussions qui s'appliquent aux projets fédéraux.

ANNEXE IV : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES AUTORISATIONS REQUISES

Le tableau qui suit résume les autorisations que donne chaque organisme.

ORGANISME	AUTORISATIONS	FRAIS APPLICABLES
VN	Permis d'aménagement pour les projets réalisés sur les terres de catégorie I	Frais d'administration
	Autorisation pour extraire des matériaux naturels sur les terres de catégorie I	S. O.
CF	Protocole d'entente conclu avec l'entrepreneur pour l'occupation et l'utilisation de terres de catégorie I pendant la construction	Frais de location pour la période de construction qui peuvent être différents de ceux en dehors de la saison de construction
	Baux fonciers pour l'occupation des terres de catégorie I	Frais d'administration et de location
	Droit d'obtenir du gravier ou d'autres matières minérales des terres de catégorie I	Frais de compensation pour l'extraction de minéraux (prix à la tonne)
ADMINISTRATION RÉGIONALE KATIVIK	Certificat d'autorisation pour réaliser des projets sur les terres des catégories II et III	S. O.
MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	Certificat d'autorisation pour le traitement de l'eau potable et des eaux usées, et pour l'élimination des déchets Certificat d'autorisation pour l'exploitation d'une nouvelle carrière ou d'un nouveau banc d'emprunt	S. O.
MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES NATURELLES	Baux fonciers pour les projets réalisés sur les terres des catégories II et III, de même que dans les VN de Puvirnituq et d'Ivujivik	Frais d'administration et de location
BUREAU DE L'ARPENTEUR GÉNÉRAL DU QUÉBEC	Instructions particulières d'arpentage pour tous les travaux d'arpentage foncier devant être réalisés sur les terres de catégorie I ainsi que pour tous les travaux d'arpentage devant être réalisés à Puvirnituq, à Ivujivik et sur les terres de catégories II et III	S. O.

ANNEXE V : PROGRAMME NOVOCLIMAT

L'information qui suit est tirée du site Web de Transition énergétique Québec.

Depuis 1999, Novoclimat définit des **exigences techniques** à respecter lors de la construction d'une maison ou d'un bâtiment multilogement afin d'offrir une performance énergétique supérieure à celle qu'exige le Code de construction en vigueur.

Ce programme prépare progressivement l'industrie à un prochain rehaussement des standards en efficacité énergétique.

Novoclimat inclut la **formation** et la **certification** des entrepreneurs en construction et des spécialistes en ventilation, l'**inspection** des habitations lors de leur construction et l'**homologation** des habitations conformes.

Enfin, ce programme comprend également le versement d'une **aide financière** :

- à l'acheteur et à l'entrepreneur pour le volet Maison;
- au promoteur pour les volets Petit bâtiment multilogement et Grand bâtiment multilogement.

Ce programme a été officiellement prolongé jusqu'au 31 mars 2021. Transition énergétique Québec a du même coup retiré la mention « 2.0 » pour revenir à l'appellation « Novoclimat » pour tous les volets.

Depuis le 31 janvier 2018, de nouvelles exigences techniques s'appliquent pour tous les volets du programme Novoclimat. Sans s'y limiter, les principaux changements apportés aux exigences techniques sont les suivants :

- Retrait de la partie 4 – Exigences complémentaires au choix
- Ajout d'exigences prescriptives permettant d'atteindre des économies de 20 % d'énergie malgré le retrait des exigences complémentaires au choix

Un tableau comparatif des exigences techniques des deux versions du programme est disponible dans la page **Documents techniques et formulaires** de chaque volet du programme.

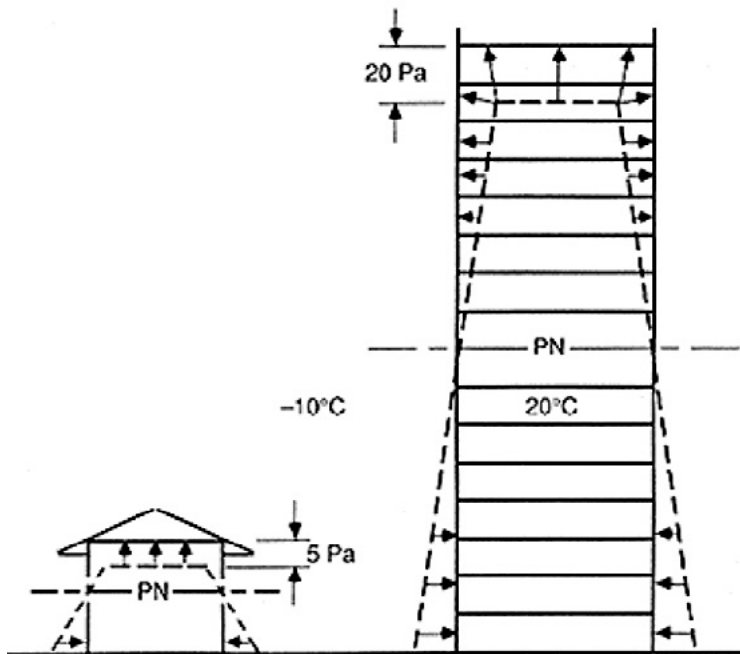
ANNEXE VI : FUITES D'AIR À TRAVERS L'ENVELOPPE

Les fuites se produisent généralement à travers les fissures et les petites ouvertures des fenêtres, des portes, des murs, des planchers ou des toitures isolées. Leur importance dépend de la façon dont le bâtiment est conçu, de la qualité des matériaux, de la façon dont ils ont été assemblés et de la différence de pression d'air de part et d'autre de l'enveloppe.

Les fuites à travers l'enveloppe causent souvent les problèmes suivants : coûts élevés de chauffage, pourriture ou corrosion des matériaux dues à l'infiltration d'eau et apparition de moisissures dissimulées en raison de condensation d'humidité dans les composants internes de l'enveloppe.

Les trois principaux mécanismes qui permettent le passage de l'air de part et d'autre de l'enveloppe d'un bâtiment sont : l'effet de cheminée, l'action du vent et la ventilation mécanique.

VI.1 : EFFET DE CHEMINÉE



Dans les bâtiments à plusieurs étages, l'effet de cheminée tend à causer des exfiltrations dans les parties hautes et des infiltrations dans les parties basses. Plus la température augmente, plus la densité de l'air diminue, c'est pourquoi l'air chaud est plus léger que l'air froid. Ainsi, l'air chaud monte et sa flottabilité exerce une pression vers l'extérieur au niveau des plafonds et de la partie supérieure des murs. Les ouvertures dans les pare-vapeurs permettent à l'air chaud et humide de circuler dans le toit ou dans la structure des murs où il se refroidit et dépose de l'humidité sur les surfaces intérieures froides du toit ou du revêtement mural.

FIGURE VI.1 : DIFFÉRENCES DE PRESSION DANS UN BÂTIMENT / SOURCE : ARTICLE DU CNRC INTITULÉ : « DÉFINITION DU PARE-AIR » PRODUIT DANS LE CADRE DU REGARD 86 SUR LA SCIENCE DU BÂTIMENT

VI.2 : ACTION DU VENT

Les courants d'air non contrôlés à travers l'enveloppe diminuent le bien-être des occupants et sont la cause de multiples désordres. Le vent qui souffle sur une maison produit une pression positive, soit une surpression sur la face extérieure du mur exposé au vent et donc une infiltration. Le vent produit aussi une pression négative sur les autres murs, soit une dépression, causant ainsi une exfiltration. Cette pression négative entraîne l'air de l'intérieur vers l'extérieur par de petites ouvertures, et l'humidité que contient cet air chaud se condense à l'intérieur de la structure murale, sur les éléments froids.

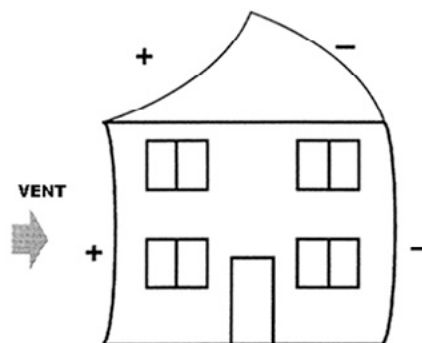


FIGURE VI.2 : PRESSIONS GÉNÉRÉES PAR LE VENT SUR UNE HABITATION / SOURCE : ARTICLE DU CNRC INTITULÉ : « DÉFINITION DU PARE-AIR » PRODUIT DANS LE CADRE DU REGARD 86 SUR LA SCIENCE DU BÂTIMENT

VI.3 : LA VENTILATION MÉCANIQUE

La figure VI.3 illustre les entrées et les sorties d'air d'une habitation nécessaires pour l'utilisation d'appareils comme la chaudière, la sècheuse et la hotte de la cuisinière.

Alors que les ventilateurs d'extraction réduisent la pression à l'intérieur d'une maison en extrayant l'air, les systèmes mécaniques de ventilation mal équilibrés, y compris les ventilateurs d'alimentation, peuvent générer une pression positive. L'air et l'humidité circulent alors vers l'extérieur et le comble où la condensation peut s'accumuler.

Une conception et une construction minutieuses sont nécessaires pour assurer le minimum de fuites d'air, l'étanchéité à l'eau et une efficacité énergétique appropriée aux bâtiments du Nunavik. Pour ce faire, les gestionnaires, les concepteurs et les constructeurs doivent avoir une très bonne connaissance des systèmes d'étanchéité à l'air, à l'eau et à la vapeur.

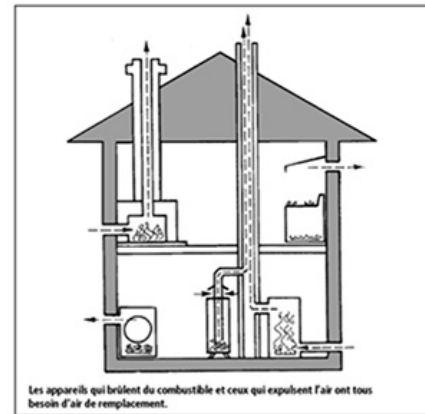


FIGURE VI.3 : ENTRÉES ET SORTIES D'AIR DANS UNE HABITATION / SOURCE : ARTICLE DU RNC INTITULÉ : « LE MÉCANISME DE VOTRE MAISON : VENTILATION ET CONTRÔLE DU FLUX D'AIR »

ANNEXE VII : PROPRIÉTÉS MINIMALES D'UN SYSTÈME D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR EFFICACE

VII.1 : CONTINUITÉ

La continuité dans l'étanchéité à l'air demande plus que l'absence de trous ou d'imperfections. Le système devant jouer le rôle de pare-air doit inclure les matériaux de raccordement et les détails de scellement adéquats pour prévenir toute faille aux points de rencontre suivants : autour des ouvertures de portes et fenêtres; aux jonctions murs-toiture; aux jonctions murs-fondations; aux jonctions murs-planchers isolés; autour de toute saillie architecturale telle que galerie, balcon, brise-soleil; autour des dispositifs d'électromécanique tels que fils, tuyaux et conduits traversant l'enveloppe du bâtiment, etc. En résumé, la solution gagnante est d'assurer la parfaite continuité entre tous les matériaux du système afin d'obtenir une « coquille » pare-air étanche à l'air.

VII.2 : RÉSISTANCE STRUCTURALE

L'élément conçu pour servir de pare-air doit être capable de résister à la surcharge de pression imposée ou être protégé par un autre matériau capable de le faire. Il doit pouvoir résister à la pression ou à la succion des plus fortes surcharges de vent sans se rompre ni se détacher de son support. Le pare-air ne doit ni se détacher de son support ni subir de défaillance par fluage sous une pression soutenue produite par l'effet de tirage, la pressurisation ou l'extraction créés par les ventilateurs. Le pare-air et son support doivent être suffisamment rigides pour résister aux mouvements. Ainsi, à moins d'être coincée entre deux plaques rigides, une pellicule pare-air doit être assez solide pour résister aux pressions et aux dépressions d'air, ce qui est difficile à obtenir avec des membranes minces.

VII.3 : FAIBLE PERMÉABILITÉ À L'AIR

Une des caractéristiques primordiales d'un pare-air est qu'il offre une forte résistance à l'écoulement d'air. Puisqu'une imperméabilité absolue à l'air est rarement possible, voire rarement nécessaire, on exigera des matériaux pare-air qu'ils présentent une faible perméabilité à l'air. Pour leur classement, les matériaux sont évalués avec un indice appelé « taux de perméabilité à l'air » lors de tests des laboratoires privés ou gouvernementaux. À cet égard, la norme canadienne du Centre canadien de matériaux de construction (CCMC) fixe le taux maximal admissible à 0,02 L/s.m² à un différentiel de pression de

75 Pa. À noter que ce seuil s'avère relativement peu exigeant puisque les membranes pare-air d'usage courant vendues en quincaillerie affichent des résultats variant entre 0,005 et 0,001 7 L/s.m². Dans la catégorie des membranes pare-air/pare-vapeur, il est possible d'atteindre des taux de perméabilité à l'air extrêmement bas, de l'ordre de 0,000 3 L/s.

VII.4 : PERMÉANCE ÉLEVÉE À LA VAPEUR D'EAU (LORSQUE POSÉ DU CÔTÉ FROID DE L'ISOLANT)

La perméance est la propriété d'un matériau de diffuser la vapeur d'eau plus ou moins facilement : sous une pression d'humidité donnée, plus la perméance du matériau est élevée, plus cette diffusion se trouve facilitée. On pourrait illustrer cette propriété dans les termes suivants : une perméance supérieure permet au matériau de « respirer » facilement sous une pression d'humidité. Pour leur classement, les matériaux sont évalués par un indice appelé « perméance à la vapeur d'eau » lors de tests de laboratoires privés ou gouvernementaux. À cet égard, la norme canadienne du CCMC fixe le taux minimal admissible à 170 ng/Pa.s.m² pour une membrane de revêtement externe, ce qui équivaut à 3 US perm (1 US perm = 57,21 ng/Pa.s.m²). Ce seuil est vraiment peu exigeant puisque les membranes pare-air courantes vendues en quincaillerie affichent des résultats de test variant entre 7 et 30 US perm.

Un système pare-air dont la barrière principale est du côté froid de la composition isolée devrait présenter une perméance élevée à la vapeur d'eau afin que l'humidité intérieure ayant pu traverser le pare-vapeur intérieur puisse s'évacuer rapidement à travers l'enveloppe et ainsi minimiser le risque de condensation dans les composants internes du mur isolé.

VII.5 : DURABILITÉ

Comme les matériaux du système d'étanchéité à l'air ne sont jamais apparents, qu'ils ne sont jamais exposés directement aux intempéries, ils sont assurés d'une durabilité prolongée s'ils sont recouverts dans les délais prescrits pendant le chantier. La durabilité du système d'étanchéité dans son entier est donc liée plutôt à la robustesse des éléments de liaison ou de scellement entre les différentes membranes pare-air qui composent le système : raccordement entre deux laizes de la même membrane, raccordement entre deux membranes de nature différente (jonctions murs-toit, murs-plancher, murs-ouvertures, murs-saillies, etc.). Comme la plupart de ces raccordements sont faits par adhésion ou par scellement, et que tout assemblage avec adhésion ou scellement sur le chantier exige une réelle méticulosité pour être fiable, c'est la jonction soignée des différents éléments de l'assemblage pare-air qui permettra d'obtenir la durabilité recherchée pour ce composant du bâtiment. À cette fin, les précautions suivantes sont incontournables : propreté des surfaces, assèchement complet des matériaux, température d'application contrôlée, compatibilité entre les matériaux et entre les produits, chevauchement adéquat entre les membranes assemblées, usage d'apprêt avant adhésion, pression d'application minimale, etc.

L'environnement auquel le pare-air n'est exposé que brièvement pendant la construction peut tout de même nuire à la durabilité de certains des matériaux qui le composent. Ces matériaux doivent être adéquatement protégés des intempéries, du rayonnement ultraviolet et des dommages mécaniques pendant la construction.

ANNEXE VIII : PERMÉANCE À LA VAPEUR D'EAU

La mesure du débit de diffusion de la vapeur d'eau à travers un matériau de construction est appelée « perméance à la vapeur d'eau ». Plus cette perméance est faible, mieux le produit résiste au passage de la vapeur et plus il est jugé efficace comme pare-vapeur. L'unité de mesure courante de la perméance est le perm (US perm en Amérique du Nord) : 1 US perm équivaut à 57,2 ng/Pa.s.m².

Les matériaux pare-vapeur disponibles sur le marché sont classifiés en type I, II ou III selon la valeur de perméance qui leur est attribuée par des tests normés, le type I offrant la meilleure performance pour contenir la vapeur d'eau :

- type I : moins de 15 ng/Pa.s.m² (0,26 US perm)
- type II : entre 15 et 60 ng/Pa.s.m² (0,26 – 1,05 US perm)
- type III : plus grand que 60 ng/Pa.s.m² et au plus 572 ng/Pa.s.m² (1,05 – 10 US perm)

Les exigences du Code de construction relatives aux matériaux pare-vapeur s'appliquent différemment selon la zone climatique, mais dans tous les cas, leur perméance doit être d'au plus 1,05 US perm (60 ng/Pa.s.m²), ce qui demande minimalement un produit de type II. Cette valeur n'est pas très contraignante, puisque de simples finis intérieurs de peinture alkyde sur un panneau de plâtre peuvent offrir une telle protection. À titre d'exemple, la pellicule de polyéthylène d'usage courant d'une épaisseur de 0,15 mm offre une perméance de 0,03 US perm (1,6 ng/Pa.s.m²), ce qui est de loin supérieur à la norme minimale et qui la classe comme type I. Dans l'annexe A, le chapitre Bâtiment du Code fournit un tableau avec les valeurs de perméance à la vapeur d'eau des matériaux de construction courants.

L'Office des normes générales du Canada (ONGC) autorise une certification des différents produits pare-vapeur vendus sur le marché selon les normes CGSB-51.33-M et CGSB-51.34-M, permettant ainsi à ces produits d'afficher un numéro d'homologation comme preuve de conformité au Code.

ANNEXE IX : INFILTRATIONS DANS UN ENSEMBLE DE CONSTRUCTION

Les assemblages de construction sont naturellement conçus pour empêcher l'eau et la neige de pénétrer à l'intérieur des composants de l'enveloppe. Or, les précipitations qui sont poussées par de forts vents réussissent dans certains cas à traverser le revêtement extérieur. À cet égard, le chapitre Bâtiment du Code prévoit qu'il n'est pas nécessaire d'éliminer absolument toutes les accumulations ou d'empêcher à tout prix l'humidité de pénétrer dans un ensemble de construction : « La pluie poussée par le vent qui pénètre au travers du revêtement extérieur peut ne pas influencer sur la performance à long terme de l'ensemble de construction, à condition que l'humidité soit séchée ou évacuée avant qu'elle ne commence à détériorer les matériaux du bâtiment. » Un design qui permet un assèchement rapide des matériaux humides ou mouillés doit donc faire partie de la conception.

ANNEXE X : MUR À ÉCRAN PARE-PLUIE

Le design de type « à protection dissimulée » est primitif et peu utilisé aujourd'hui, contrairement au design de type « à écran pare-pluie », beaucoup plus populaire. La distinction entre ces deux types de murs est expliquée dans la section A-9.27.2 du chapitre Bâtiment du Code. On y apprend (article A-9.27.20) que le type de mur « à écran pare-pluie » comporte trois variantes :

1. le mur à écran pare-pluie « de base », qui ne requiert pas de cavité à l'arrière;
2. le mur à écran pare-pluie « drainant », dont la cavité arrière se vide et est ventilée grâce à un matériau de support conçu à cette fin;
3. le mur à écran pare-pluie « ouvert », le plus courant. Il comporte une cavité de 10 à 19 mm de profondeur derrière le parement, ouverte et ventilée à l'air libre.

ANNEXE XI : DEGRÉS-JOURS

L'évaluation du chauffage en « degrés-jours » (DJ) sous 18°C dans une région ou une ville donnée est une mesure de dépense énergétique annuelle correspondant au calcul suivant : la somme annuelle, pour chaque jour requérant du chauffage, du différentiel entre la température moyenne journalière et la température de référence de 18°C. L'annexe C du chapitre Bâtiment du Code présente un tableau complet de ces données pour les principales localités du Québec, dont les quatre villages suivants du Nunavik : Inukjuak, avec 9050 DJ, Kuujuaq, avec 8650 DJ, Kuujuarapik, avec 8250 DJ, et Puvirnituq, avec 9200 DJ.

ANNEXE XII : AUTRES NORMES

D'autres normes d'efficacité énergétique, qui régissent notamment l'isolation des bâtiments, peuvent s'avérer tout aussi pertinentes pour le climat nordique : par exemple, le programme Novoclimat de Transition énergétique Québec (TEQ) pour le volet « Maison et petit bâtiment multi-logement », le programme des maisons certifiées ENERGY STAR de Ressources naturelles Canada (RNCAN) ou le programme de certification R-2000, également de RNCAN. Comme leur application est facultative, ces normes ne sont pas présentées dans le guide. La documentation de TEQ et de RNCAN demeure toutefois une source de renseignements précieux, en particulier la publication de Novoclimat, qui contient de nombreux conseils pratiques et qui est abondamment illustrée.

ANNEXE XIII : FENÊTRES ET PORTES HOMOLOGUÉES ENERGY STAR

Les fenêtres et les portes homologuées ENERGY STAR sont mises à l'essai et sont certifiées par un organisme indépendant agréé. Les produits sont homologués ENERGY STAR en fonction de leur valeur U (coefficient de transmission thermique global) ou de leur cote de rendement énergétique (RE), lesquelles sont supérieures aux exigences du Code de construction.

La carte XIII.I illustre la répartition des zones climatiques du Canada par code de couleur. Le Nunavik correspond à la zone D, qui est de 8000 degrés-jours et plus.

Suivent deux tableaux qui donnent les cotes de performance des fenêtres et des portes homologuées ENERGY STAR pour chacune des quatre zones climatiques déterminées pour le Canada. Le facteur U indiqué représente la mesure du taux de transfert thermique à travers l'élément. Une valeur U peu élevée est souhaitable, car elle indique une faible perte thermique en hiver et un faible gain thermique en été. La valeur U est l'inverse mathématique de la valeur de résistance thermique RSI, attribuée habituellement aux parois isolées. Quant au RE, il représente la mesure du rendement énergétique général de la fenêtre incorporant la perte de chaleur par transmission thermique, le gain solaire et la perte de chaleur par fuite d'air. Plus la cote de RE est élevée, meilleur est le rendement énergétique de la fenêtre en saison de chauffage.

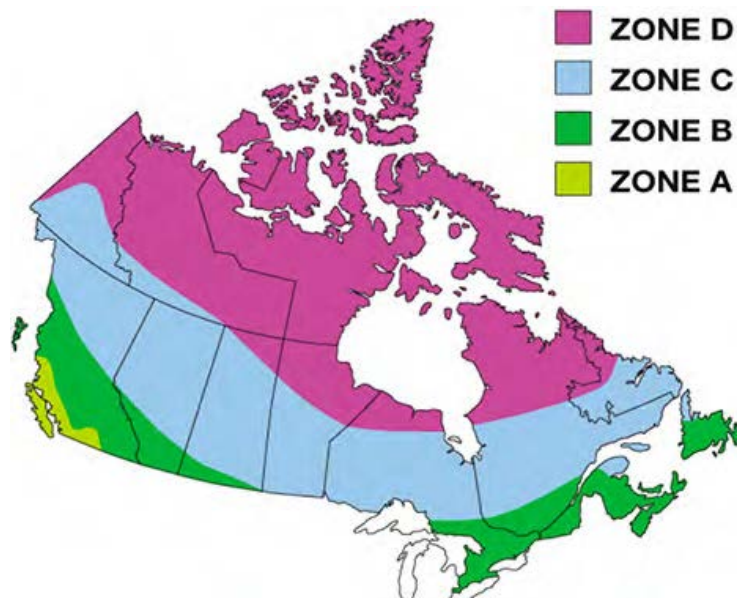


FIGURE XIII.I : ZONES CLIMATIQUES AU CANADA / SOURCE : RESSOURCES NATURELLES CANADA

FENÊTRES					
ZONE	Échelle de degrés-jours chauffage	Cheminement de conformité			
		Rendement énergétique (RE)	ou	Facteur U	
		RE minimum (sans unité) Facteur U maximum 2,00 W/m ² •K (0,35 Btu/h•pi ² •°F)		Facteur U maximum W/m ² •K (Btu/h•pi ² •°F)	RE minimum (sans unité)
A	< = 3500	21	ou	1,80 (0,32)	13
B	> 3500 à < = 5500	25	ou	1,60 (0,28)	17
C	> 5500 à < = 8000	29	ou	1,40 (0,25)	21
D	> 8000	34	ou	1,20 (0,21)	25

TABLEAU XIII.1 : CHEMINEMENT DE CONFORMITÉ DES FENÊTRES ENERGY STAR

PORTES					
ZONE	Échelle de degrés-jours chauffage	Cheminement de conformité			
		Rendement énergétique (RE)	ou	Facteur U	
		RE minimum (sans unité) Facteur U maximum 2,00 W/m ² •K (0,35 Btu/h•pi ² •°F)		Facteur U maximum W/m ² •K (Btu/h•pi ² •°F)	RE minimum (sans unité)
A	< = 3500	21	ou	1,80 (0,32)	s/o
B	> 3500 à < = 5500	25	ou	1,60 (0,28)	s/o
C	> 5500 à < = 8000	29	ou	1,40 (0,25)	s/o
D	> 8000	34	ou	1,20 (0,21)	s/o

TABLEAU XIII.2 : CHEMINEMENT DE CONFORMITÉ DES PORTES ENERGY STAR

ANNEXE XIV : INFILTROMÉTRIE

XIV.1 : TEST D'INFILTROMÉTRIE

Le test d'infiltrométrie doit être réalisé par un spécialiste dans ce domaine, indépendant de lien contractuel avec les intervenants du projet. Ce spécialiste devra tout d'abord fermer toutes les ouvertures sur l'extérieur (fenêtres, portes, trappes de ventilation, drain de plomberie, etc.) et vérifier que les portes intérieures sont ouvertes afin de permettre la libre circulation de l'air. Par la suite, un infiltromètre est installé dans la porte d'entrée. Cet appareil est muni d'une toile en nylon étanche fixée dans l'ouverture de la porte à l'aide d'un cadre ajustable aux dimensions de la porte et d'un ventilateur. L'appareil mesure la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur et établit la quantité d'air qui s'infiltré dans le bâtiment.

Par la suite, l'opérateur procède à une recherche de fuite pour trouver les endroits où des modifications doivent être apportées afin d'améliorer l'étanchéité à l'air du bâtiment. Ces modifications pourront être faites sans que cela coûte trop cher, puisque l'enveloppe est encore accessible par l'intérieur. Pour ce faire, on utilise une fumée artificielle qui trace le passage des infiltrations, un anémomètre qui détecte le déplacement de l'air aux endroits où l'air s'infiltré ou encore la thermographie infrarouge qui permet de visualiser les endroits qui sont refroidis par les infiltrations.

Il est recommandé de faire un autre test d'infiltrométrie après les travaux afin d'établir le taux d'infiltration d'air dans le bâtiment lors de sa livraison. Dans une construction neuve, les résultats devraient s'approcher des valeurs recommandées par le programme d'efficacité énergétique Novoclimat, qui sont établies dans le tableau XIV.1 ci-dessous.

FUITES D'AIR MAXIMALES ADMISSIBLES ⁷					
Type de bâtiment	CAH à 50 Pa	SFN à 10 Pa		TFN à 50 Pa	
Détaché	1,5	0,75	1,08	0,57	0,11
Attenant ⁸ (ex.: jumelé, en rangée)	2,0	1,18	1,70	0,78	0,15

TABLEAU XIV.1 : FUITES D'AIR MAXIMALES ADMISSIBLES, TABLEAU 2.2.2.1 TIRÉ DE LA PAGE 19 DU PROTOCOLE NOVOCLIMAT

Un rapport des résultats obtenus sur l'étanchéité à l'air du bâtiment devra ensuite être remis au représentant du propriétaire et devra minimalement traiter des sujets suivants :

- les conditions générales du bâtiment et du test;
- les murs extérieurs;
- le comble;
- les portes;
- les fenêtres;
- l'étanchéité;
- les recommandations.

7. L'étanchéité à l'air du bâtiment est mesurée par un test d'infiltrométrie exécuté selon la norme CAN/CGSB2-149, 10-M86 « Détermination de l'étanchéité à l'air des enveloppes de bâtiment par la méthode de dépressurisation par ventilateur ».

8. S'applique uniquement aux bâtiments séparés en plus d'une zone par une ou plusieurs parois mitoyennes et faisant l'objet de tests d'infiltrométrie distincts pour chacune de ces zones.

XIV.2 : ANALYSE THERMOGRAPHIQUE

L'enveloppe des édifices, c'est-à-dire le plancher (exposé à l'air extérieur comme dans les édifices surélevés sur pieux ou sur vérins ajustables généralement construits en milieu nordique), les murs et la toiture devraient être soumis à une analyse thermographique, afin d'observer les écarts de comportement thermique présents et de déceler toute anomalie. Cette analyse devrait être faite simultanément sur les parois extérieures et intérieures de l'enveloppe de l'édifice.

L'analyse thermographique devrait idéalement comporter à la fois les volets qualitatif et quantitatif, le premier servant à recueillir des renseignements sur les composants de l'enveloppe ayant des comportements thermiques imprévus ou anormaux, le second servant à examiner les mesures du rayonnement infrarouge et à évaluer les comportements thermiques déficients causés par des profils défectueux.

Pour les bâtiments préfabriqués et totalement assemblés en usine, il est recommandé de faire le plus de tests possible sur place pour mesurer l'isolation et l'étanchéité à l'air. Le constructeur peut ainsi apporter les modifications qui s'imposent sans les retards et les frais supplémentaires à déboursier (acheminement de matériaux et transport et hébergement de main-d'œuvre spécialisée) pour procéder aux travaux sur le site. Étant donné que les mesures temporaires de conditionnement utilisées ne sont pas représentatives des conditions climatiques réelles au Nunavik et de l'occupation ou de l'exploitation réelle de l'édifice, l'analyse devrait porter sur le seul volet qualitatif. Une autre possibilité pour les bâtiments préfabriqués est d'installer les éléments de finition intérieure après l'analyse thermographique sur le site. Le constructeur peut ainsi apporter les modifications requises avant de fermer les murs intérieurs.

Pour les bâtiments construits directement au Nunavik et pour les bâtiments préfabriqués en panneaux, mais assemblés au Nunavik, l'analyse thermographique sera faite sur le site, dès que les conditions propices à sa réalisation seront réunies. Les quantités minimales de matériaux de remplacement initialement prévues dans le contrat de construction (voir la section 3.2.4, Remplacement des matériaux et des produits) pourront servir à la réalisation immédiate des travaux de réfection requis, le matériel pouvant être renouvelé lors de l'approvisionnement annuel.

Le gestionnaire de contrats n'aura qu'à déduire les frais pour l'utilisation de ces matériaux de remplacement des paiements dus à l'entreprise qui exécute les travaux. Ici aussi, l'analyse devrait se concentrer sur le volet qualitatif, bien que le volet quantitatif puisse fournir des informations intéressantes sur la performance réelle de l'installation et permettre la compilation de statistiques pour les suivis futurs, lesquelles représentent des données cruciales en cas de réclamation à l'entreprise qui exécute les travaux.

En plus de constituer un précieux outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de contrats de construction lors du paiement des travaux, la production d'un rapport d'analyse thermographique ou d'infiltrométrie garantit leur qualité d'exécution et les performances prévues pour l'ensemble des composants de l'enveloppe. Si la qualité d'exécution ou les performances sont inférieures à celles qui ont été prévues, le constructeur n'aura alors pas le choix d'apporter les mesures correctives qui s'imposent.



FIGURE XIV.1 : PHOTO INFRAROUGE D'UNE HABITATION PRISE EN HIVER. LE ROUGE REPRÉSENTE LES ÉLÉMENTS CHAUDS ET LE BLEU, LES FROIDS. / SOURCE : GOOGLE IMAGES

ANNEXE XV : PROPOSITION DE RÉVISION

Nous invitons les personnes intéressées à participer à la révision du *Guide de bonnes pratiques* à soumettre leurs propositions de modification à l'aide du présent formulaire.

Veuillez inscrire le numéro de la section concernée et le numéro de la page : _____

Décrivez brièvement la modification, l'ajout ou le retrait proposés : _____

Énoncez la raison pour laquelle vous faites cette proposition (expérience sur le terrain, apparition d'une nouvelle technologie, autres) : _____

Nom et occupation : _____

Organisme ou entreprise : _____

Téléphone et adresse de courrier électronique : _____

Date : _____

Adresse postale : _____

S'il vous plaît, faites parvenir votre proposition à l'adresse suivante :

Direction de l'expertise-conseil et du soutien à l'industrie
Société d'habitation du Québec
Aile Jacques-Parizeau
1054, rue Louis-Alexandre-Taschereau, 4^e étage
Québec (Québec) G1R 5E7
lhn@shq.gouv.qc.ca

ANNEXE XVI : FONDATIONS

Tableau 1 : Comparaison entre les différents types de fondations.

Type de fondation		Coût \$ à \$\$\$	Avantage	Désavantage	Utilisation suggérée et autres notes
Fondations superficielles	Radier granulaire	\$-\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Offre généralement un excellent rendement lorsque bien conçu et mis en place correctement.• Intéressant pour la construction sur pergélisol chaud et riche en glace.• Méthode éprouvée, efficace et bien connue localement.• Requiert de la machinerie habituellement disponible dans les communautés.	<ul style="list-style-type: none">• Son coût devient beaucoup plus élevé s'il faut le produire avec du granulat concassé ou sur des terrains fortement inclinés.• Utilise les ressources en granulat naturel de plus en plus rares.• Si la machinerie n'est pas disponible, la mobilisation peut augmenter considérablement les coûts.• Problème de compaction fréquent dans les communautés sans rouleau compacteur.	<ul style="list-style-type: none">• Dans presque toutes les situations sauf si la topographie nécessite des volumes trop importants de granulat ou s'il y a pénurie de granulat.• Ce n'est pas un système de fondation en soi, il doit être combiné à d'autres techniques (voir ci-dessous).• Le remblai doit être bien compacté et profilé correctement à la surface afin d'évacuer l'eau de surface adéquatement.
	Poutres au niveau du sol	\$	<ul style="list-style-type: none">• Peu coûteux.• Procure une plus grande portance que les cales sur semelles, les piliers ou les trépieds.• Assure une certaine flexibilité face aux mouvements différentiels selon la configuration des poutres.• Simple et facile à construire.• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machine-rie spécialisées.• Déplacement du bâtiment facile.	<ul style="list-style-type: none">• La durée de vie de la structure peut être raccourcie en raison des mouvements possibles.• Sujet aux mouvements saisonniers lors du gel et du dégel.• Si les poutres ne sont pas adéquatement ancrées, l'infrastructure peut se déplacer et basculer hors des fondations lors de vents violents.• Ne permet pas un espace d'air suffisant pour évacuer efficacement la chaleur et la neige sous le bâtiment.• Requiert un radier granulaire.	<ul style="list-style-type: none">• Une configuration optant pour trois ou quatre rangées de poutres parallèles sous la structure plutôt qu'une seule poutre continue autour du périmètre assure plus de flexibilité et de résistance.• Non recommandé pour les bâtiments chauffés, mais adéquat pour les structures non chauffées et celles qui doivent être déplacées au besoin.
	Cales sur semelle	\$	<ul style="list-style-type: none">• Peu coûteux.• Simple et facile à construire.• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machinerie spécialisées.• Ajustement facile.• Permet un espace d'air ventilé sous le bâtiment.• Déplacement du bâtiment facile.	<ul style="list-style-type: none">• La durée de vie de la structure peut être raccourcie en raison des mouvements possibles.• Sujet aux mouvements saisonniers lors du gel et du dégel.• Si les cales ne sont pas adéquatement ancrées, l'infrastructure peut se déplacer et basculer hors des fondations lors de vents violents.• Requiert un radier granulaire.• Requiert une mise à niveau régulière afin de réduire les risques de dommages à la structure.	<ul style="list-style-type: none">• Un des types de fondations le plus utilisé dans les zones de pergélisol continu et discontinu.• Essentiellement utilisé sur des sols qui ont une faible capacité d'appui et pour de petits bâtiments qui ne présentent pas beaucoup de risques de dommages provenant d'un degré raisonnable de mouvements.• Longtemps utilisé au Nunavik en raison du peu de matériau nécessaire et de sa simplicité d'installation, ce type de fondation est toutefois délaissé au profit des piliers ou des trépieds sur semelle avec vérin ajustable.• Il est recommandé d'utiliser un bois traité pour les éléments de la fondation qui touchent directement le sol (semelle) et de fixer la fondation aux poutres principales en utilisant des équerres en métal ou un autre type d'attache.

Fondations superficielles	Piliers ou trépieds avec ou sans vérins ajustables sur semelle qui repose à la surface	\$	<ul style="list-style-type: none">• Peu coûteux.• Facile à construire.• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machinerie spécialisées.• Nivellement facile.• Permet un espace d'air ventilé sous le bâtiment.• Peut être construite avec un seul matériau (bois, acier ou béton) ou une combinaison de matériaux.• Déplacement du bâtiment facile.	<ul style="list-style-type: none">• La durée de vie de la structure peut être raccourcie en raison des mouvements possibles.• Sujet aux mouvements saisonniers lors du gel et du dégel.• Si les piliers ou les trépieds ne sont pas adéquatement ancrés, l'infrastructure peut se déplacer et basculer hors des fondations lors de vents violents.• Requiert un radier granulaire.• Requiert une mise à niveau régulière afin de réduire les risques de dommages à la structure.	<ul style="list-style-type: none">• Peut être utilisé dans la plupart des situations lorsque la construction d'un radier granulaire est justifiée.• Système de fondation le plus connu et le plus répandu au Nunavik.• Excellente performance.• Le bois traité utilisé comme assise peut être remplacé par du béton coulé en place ou par de petites dalles de béton préfabriquées.
	Piliers avec ou sans vérins ajustables sur semelle enfouie	\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Offre une résistance aux charges latérales sans nécessiter de contreventement supplémentaire.• Peu affecté par les mouvements saisonniers de gel et de dégel.• Nivellement facile.• Permet un espace d'air ventilé sous le bâtiment.• Peut être construite avec un seul matériau (bois, acier ou béton) ou une combinaison de matériaux.	<ul style="list-style-type: none">• Requiert de la machinerie d'excavation.• Étapes de préparation et de construction longues et délicates qui peuvent retarder l'échéancier.• Risque élevé de perturbation thermique du pergélisol (exposition du pergélisol, thermo-érosion) et d'instabilité des parois d'excavation.• Si aucune précaution n'est prise, ce type de fondation est sujet au soulèvement par adhérence due au gel qui agit sur la portion enfouie du pilier qui traverse la couche active.• Des tassements et des soulèvements peuvent survenir lors du réajustement thermique du sol après la mise en place de ce type de fondation. Ce réajustement peut prendre quelques saisons avant qu'un nouvel équilibre soit atteint.	<ul style="list-style-type: none">• Utilisation assez fréquente dans l'Arctique.• La pratique courante suggère de construire les fondations au début de l'hiver, lorsque la couche active est la plus épaisse et que les températures froides contribuent à regeler la zone remblayée.• Il est conseillé de procéder à l'excavation et à l'installation des semelles de fondation une à la fois afin de limiter la surface et la durée d'exposition du pergélisol.• Dans les secteurs mal drainés, il importe d'adoucir les parois d'excavation (1V:4H) et d'utiliser une pompe pour garder les trous secs.• Pour les secteurs où il est difficile de procéder à une excavation de la couche active malgré ces précautions, il est possible d'enfouir la semelle dans un remblai granulaire assez épais de manière à faire remonter le pergélisol à une hauteur suffisante pour recouvrir la semelle.
	Mur de fondation sur semelle filante	\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machinerie spécialisées.• Peut supporter de lourdes charges.• Surface d'appui très stable lorsque le système est bien conçu.• Peut être ventilé.• Offre de l'espace sous le bâtiment pour du rangement et pour l'installation de composants mécaniques.	<ul style="list-style-type: none">• Non ajustable à moins qu'il serve d'appui à des trépieds ou à des pilastres ajustables.• Il faut contrôler la qualité du béton, ce qui demande des ressources additionnelles.	<ul style="list-style-type: none">• Système recommandé lorsque les charges sont plus importantes.• Approprié pour des semelles s'appuyant sur le roc, sur un dépôt non gélif ou à une profondeur égale ou inférieure au plafond que devrait avoir le pergélisol à la fin de la vie utile du bâtiment.• Peut également reposer sur un radier granulaire pleine grandeur ou limité à la surface portante de la semelle.• Peut nécessiter l'excavation d'un dépôt riche en glace de faible épaisseur au-dessus du roc et du remblayage.

Fondations superficielles	Dalle sur sol	\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Facile à construire.• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machinerie spécialisées.• Structure rigide qui réduit les mouvements différentiels.• Peut supporter de l'équipement lourd.• Le bâtiment peut être chauffé s'il est bien conçu.	<ul style="list-style-type: none">• Le nivellement du terrain avant la mise en place de la dalle peut nécessiter l'excavation de roc.• D'importantes quantités de remblai peuvent être nécessaires si le terrain est en pente.• Parmi les systèmes de fondations les plus risqués, car il y a transmission directe de la chaleur du bâtiment au pergélisol sous-jacent.• Faible tolérance aux mouvements différentiels.• Renivelage de la fondation difficile.	<ul style="list-style-type: none">• Nécessite un sol d'excellente qualité (roc ou mince dépôt de sable et de gravier), car peut vite devenir très problématique sur un sol riche en glace.• Il est recommandé de renforcer la dalle avec une armature d'acier afin d'augmenter sa rigidité et d'offrir une certaine résistance aux mouvements différentiels qui pourraient survenir.• Outre l'isolation de la dalle, il est fréquent d'inclure dans la conception de ce type de fondation un système d'extraction de chaleur pour évacuer celle provenant du bâtiment.• Au Nunavik, la plupart des problèmes graves de fondation, c'est-à-dire ceux qui ont entraîné la démolition du bâtiment, son déplacement ou l'abandon du chauffage, concernaient des bâtiments chauffés et construits avec des dalles sur sol riche en glace. La construction de bâtiments d'habitation avec sous-sol sur un pergélisol riche en glace est à éviter. Ce type de fondation présente un risque élevé de problèmes.
	Fondation tridimensionnelle à points d'assise multiples	\$\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Facile à construire.• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machinerie spécialisées.• Assemblage rigide qui réduit les mouvements différentiels.• Préparation minimale du site requise.• Réduction de l'épaisseur du radier granulaire nécessaire.• Idéale pour la réfection de bâtiment existant.• Le renivelage est moins fréquent et moins dommageable sur la structure qu'avec les autres types de fondations ajustables.• Déplacement du bâtiment facile.	<ul style="list-style-type: none">• Coûteux à l'achat.• Matériau spécialisé non disponible sur place.• Les membrures structurales interreliées du système de fondation limitent l'accès aux composants mécaniques sous le bâtiment.	<ul style="list-style-type: none">• Utilisé sur les terrains mous exposés aux tassements différentiels.• Historique de succès dans le Grand Nord canadien.• Premier système de ce type construit en 2013 au Nunavik. Performance à suivre.

Fondations profondes	Pieux portant par adhérence et en pointe	\$\$-\$\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Offre une résistance aux charges latérales sans nécessiter de contreventement supplémentaire.• Nivellement facile si muni de vérin.• Permet un espace d'air ventilé sous le bâtiment.• Peut être construit en différents matériaux (bois ou acier).	<ul style="list-style-type: none">• Requiert une conception détaillée et une étude de site.• Requiert de la main-d'œuvre et de la machinerie spécialisées (foreuse et forage).• Corrosion possible.	<ul style="list-style-type: none">• Utilisé lorsqu'il n'est pas possible de descendre les pieux jusqu'au roc.• Technique de fondation très risquée dans un contexte de réchauffement climatique. Requiert une tête de pieu ajustable et une étude de site préalable.• Il est recommandé de munir la portion du pieu qui traverse la couche active d'une gaine anti-soulèvement ou de l'enrober de graisse ou d'une membrane de polyéthylène.
	Pieux portant en pointe	\$\$-\$\$\$	<ul style="list-style-type: none">• Offre une résistance aux charges latérales sans nécessiter de contreventement supplémentaire.• Nivellement facile si muni de vérin.• Permet un espace d'air ventilé sous le bâtiment.• Peut être construit en différents matériaux (bois ou acier).• Les pieux ne sont pas affectés par le gel et le dégel lorsqu'ils sont bien ancrés dans le roc.• Fiabilité et rendement satisfaisants dans un contexte de changement climatique.	<ul style="list-style-type: none">• Requiert de la main-d'œuvre et de la machinerie spécialisées (foreuse et forage).• Corrosion possible.	<ul style="list-style-type: none">• Utilisé généralement lorsque le roc est à moins de dix mètres de la surface.• Il est recommandé d'ancrer les pieux dans le roc sur au moins un mètre pour neutraliser les forces de soulèvement générées par l'adhérence au gel dans la couche active.• Il est recommandé de munir la portion du pieu qui traverse la couche active d'une gaine anti-soulèvement ou de l'enrober de graisse ou d'une membrane de polyéthylène.• Des têtes de pieux ajustables sont recommandées pour les pieux enfoncés jusqu'au roc afin d'absorber les mouvements dus au gel et au dégel.

Fondations avec système d'extraction de chaleur	Fondation ventilée	\$-\$	<ul style="list-style-type: none">• Efficace.• Économique.• Facile à construire.• Ne requiert ni main-d'œuvre ni machinerie spécialisées.• Principe simple.	<ul style="list-style-type: none">• Risque d'infiltration lorsque les conduits sont placés sous la surface du terrain naturel.• Requiert un entretien saisonnier (fermeture des clapets).• Ce système peut ne pas permettre un regel complet du remblai sous le bâtiment dans les zones de pergélisol discontinu.	<ul style="list-style-type: none">• Utilisé pour des bâtiments qui reposent sur une dalle sur sol.• Les conduits doivent être étanches et avoir un diamètre assez large pour faciliter l'inspection et l'entretien.• Les extrémités des cheminées doivent être placés à une hauteur suffisante pour ne pas disparaître sous les combes à neige qui se développent fréquemment en bordure des bâtiments.• Si un système de clapets est installé, ceux-ci doivent se trouver seulement sur les cheminées positionnées sur le côté au vent du bâtiment afin de permettre un mouvement convectif même lorsque les clapets sont fermés.
	Thermosonde	\$\$\$+	<ul style="list-style-type: none">• Fiabilité et rendement satisfaisants.• Technologie éprouvée qui permet de maintenir le sol gelé autour des pieux ou d'un autre type de fondation.• La performance du système peut être accrue au besoin en ajoutant un système de refroidissement.• Les thermosiphons en boucles horizontales sont plus faciles à installer que les thermosiphons inclinés et permettent de geler 1,4 fois plus de volume de sol.	<ul style="list-style-type: none">• Très coûteux et rarement utilisé pour des bâtiments d'habitation.• Conception et construction plus compliquées nécessitant des spécialistes.• Requiert un radier granulaire.• Renivelage de la fondation difficile.• Suivi post-construction nécessaire (état des thermosiphons et instrumentation).• Très peu de fournisseurs.• Peut nécessiter une maintenance régulière si des composants mécaniques sont utilisés pour forcer la convection (système actif).• Les thermosiphons inclinés nécessitent une attention particulière lors de leur mise en place afin de respecter l'angle requis d'installation et sont moins efficaces que les thermosiphons en boucles horizontales.	<ul style="list-style-type: none">• Utilisé afin de maintenir le sol gelé autour des pieux ou des autres types de fondations. Contrairement aux thermopieux, les thermosondes ne supportent aucune charge structurale.
	Thermopieux	\$\$\$+			<ul style="list-style-type: none">• Utilisé normalement pour des bâtiments plus grands que les bâtiments d'habitation.• Leur utilisation peut être intéressante lorsqu'une couche active composée de sols gélifs sujets au gonflement peut causer, par adhérence, le soulèvement des pieux conventionnels. Leur usage peut aussi être bénéfique dans les zones de pergélisol tiède, quand le potentiel de fluage du pieu est élevé.• Il n'existe pas d'exemples d'utilisation de pieux thermiques au Nunavik ou ailleurs au Canada.• Ils sont largement utilisés en Alaska.
	Thermosiphons inclinés	\$\$\$+			<ul style="list-style-type: none">• Les thermosiphons inclinés et en boucles horizontales sont utilisés essentiellement sous les dalles de béton ou les vides sanitaires afin d'évacuer la chaleur transmise au sol par le bâtiment.• Ils devraient être utilisés lorsqu'il n'a pas été possible de sélectionner un site où l'on peut construire une dalle de béton sur sol conventionnelle.• En cas de fuite, le fluide utilisé ne doit pas dégrader le pergélisol et l'environnement.• Les boucles devraient pourvoir être isolées au besoin et les radiateurs protégés et situés loin des sorties de ventilation.
	Thermosiphons en boucles horizontales	\$\$\$+			

Tableau 2 : Coûts relatifs à l'acquisition et à la mise en place des matériaux dans les communautés du Nunavik. Ces chiffres sont fournis à titre indicatif seulement. Ils correspondent à ceux qui avaient cours au moment de la préparation de ce guide et devront être validés pour chaque communauté et chaque projet de construction d'habitations. Ils peuvent également varier sensiblement d'une communauté nordique à l'autre selon que la quantité de matériaux nécessaires au projet est faible ou considérable ou que l'équipement et les autres ressources requises sont disponibles localement ou non.

MATÉRIAU	USAGE	COÛT APPROXIMATIF (1)
Roc dynamité – Tout-venant	Construction de radiers granulaires et de routes	50 \$/m³
Sable et gravier naturel, extrait de bancs d'emprunt	Construction de radiers granulaires et de routes	30 \$/m³
Sable et gravier naturel tamisés	Construction de radiers granulaires et de routes	40 \$/m³
Cailloux et blocs, par exemple rejets de concasseur	Remplissage de terrain, hors de l'empreinte des bâtiments	25 \$/m³
Pierre concassée de calibre 0 à 20 mm	Construction de radiers granulaires et de la couche de roulement des radiers et des routes	100 \$/m³
Pierre concassée nette	Travaux de drainage	150 \$/m³
Excavation des sols meubles non gelés	Fondations, routes	15 \$/m³
Excavation du roc par dynamitage (volume important)	Fondations, routes	40 \$/m³
Forage	Installation des pieux	1000 \$/pieu si roc en surface et pieu encastré à un mètre dans le roc* 1800 \$/pieu si dépôt de surface de faible épaisseur et encastrement à un mètre dans le roc*
Béton	Fondations	2000 \$/m³

* SELON LA DISPONIBILITÉ DE L'ÉQUIPEMENT DE FORAGE. LES PRIX PEUVENT VARIER CONSIDÉRABLEMENT SI LA MOBILISATION DE PERSONNEL SPÉCIALISÉ ET D'ÉQUIPEMENT S'AVÈRE NÉCESSAIRE.

**BÂTISSONS
ENSEMBLE
DU MIEUX-VIVRE**

