



**Bureau de normalisation
du Québec**

CAN/BNQ 2501-500/2025

**Études géotechniques pour les fondations
de bâtiments et d'ouvrages d'art
dans les zones de pergélisol**

cch  scc

NORME

CAN/BNQ 2501-500/2025

Études géotechniques pour les fondations de bâtiments
et d'ouvrages d'art dans les zones de pergélisol

*Geotechnical Site Investigations for Foundations
of Building or Structure in Permafrost Zones*



BNQ
Bureau de normalisation
du Québec

Bureau de normalisation du Québec

Le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) est un organisme québécois de normalisation créé en 1961. Il est l'un des organismes d'élaboration de normes accrédités par le Conseil canadien des normes (CCN) et, par conséquent, fait partie du système national de normes.

À titre d'unité administrative d'Investissement Québec (IQ), le BNQ produit des normes répondant aux besoins de l'industrie, des organismes publics et parapublics et des groupes concernés.

Le Bureau de normalisation du Québec consacre d'abord ses activités à la production de normes répondant aux besoins de l'industrie, des organismes publics et parapublics et des groupes concernés; il s'occupe également de la certification des produits, des processus et des services à partir des normes qu'il a élaborées, en apposant, lorsqu'il y a lieu de le faire, sa propre marque de conformité. Enfin, le BNQ offre un service d'information, en ce qui a trait aux normes tant québécoises que nationales et internationales, aux industriels désireux de se conformer aux normes dans l'optique de la fabrication et de l'exportation de produits divers et de la prestation de services.

Norme nationale du Canada

Une Norme nationale du Canada est une norme qui a été élaborée par un organisme d'élaboration de normes (OEN) titulaire de l'accréditation du Conseil canadien des normes (CCN) conformément aux exigences et lignes directrices du CCN. On trouvera des renseignements supplémentaires sur les Normes nationales du Canada à l'adresse : <https://www.scc.ca>.

Le CCN est une société d'État qui fait partie du portefeuille d'Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDE). Dans le but d'améliorer la compétitivité économique du Canada et le bien-être collectif de la population canadienne, l'organisme dirige et facilite l'élaboration et l'utilisation des normes nationales et internationales. Le CCN coordonne aussi la participation du Canada à l'élaboration des normes et définit des stratégies pour promouvoir les efforts de normalisation canadiens.

En outre, il fournit des services d'accréditation à différents clients, parmi lesquels des organismes de certification de produits, des laboratoires d'essais et des organismes d'élaboration de normes. On trouvera la liste des programmes du CCN et des organismes titulaires de son accréditation à l'adresse : <https://www.scc.ca>.

DEUXIÈME ÉDITION — 2025-03-17

Cette nouvelle édition remplace celle du 20 février 2017.

La décision découlant de l'examen systématique qui permettra de déterminer si le présent document doit être modifié, révisé, reconduit ou archivé sera mise en œuvre au plus tard à la fin mars 2030.

ICS : 91.080.01; 93.020.

DEMANDE DE RENSEIGNEMENTS ET D'ACHAT

Toute demande de renseignements ou d'achat concernant le présent document peut être adressée au Bureau de normalisation du Québec (BNQ) à l'adresse courriel suivante : bnqinfo@bnq.qc.ca ou via le site Web du BNQ [<https://www.bnq.qc.ca>].

RÉVISION DES DOCUMENTS DU BNQ

La collaboration des utilisateurs et des utilisatrices des documents du BNQ est essentielle à la mise à jour de ceux-ci. Aussi, toute suggestion visant à améliorer leur contenu sera reçue avec intérêt par le BNQ. Nous vous prions de nous faire parvenir vos suggestions ou vos commentaires en utilisant le formulaire que vous trouverez à la fin du présent document.

Le présent exemplaire du document, qu'il soit en format électronique ou qu'il soit imprimé, n'est destiné qu'à une utilisation personnelle. Toute distribution à des tiers, à des partenaires ou à des clients, ainsi que toute sauvegarde, diffusion ou utilisation dans un réseau informatique, est interdite, à moins qu'une entente particulière n'ait été conclue entre un acheteur enregistré et le BNQ.

Un avis par courriel mentionnant la publication d'une nouvelle édition d'un document révisé, de modificatifs ou d'erratas sera envoyé à l'adresse courriel utilisée lors de l'achat en ligne.

Les notifications et le catalogue peuvent être consultés en tout temps dans le site Web du BNQ [<https://www.bnq.qc.ca>] pour vérifier l'existence d'une édition plus récente d'un document ou de la publication de modificatifs ou d'erratas.

© BNQ, 2025

Tous droits réservés. Sauf prescription différente, aucune partie du présent document ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et le microfilmage, sans l'accord écrit du BNQ.

AVIS

COMPRÉHENSION DE LA NOTION D'ÉDITION

Il importe de prendre note que la présente édition inclut implicitement tout modificatif et tout errata qui pourront éventuellement être faits et publiés séparément. C'est la responsabilité des utilisateurs du présent document de vérifier s'il existe des modificatifs et des erratas.

INTERPRÉTATION

Les formes verbales conjuguées **doit** et **doivent** sont utilisées pour exprimer une exigence (à caractère obligatoire) qui doit être respectée pour se conformer au présent document.

Les expressions équivalentes **il convient** et **il est recommandé** sont utilisées pour exprimer une possibilité préférée, mais non exigée pour se conformer au présent document. Les formes verbales conjuguées **peut** et **peuvent** sont utilisées pour exprimer une suggestion ou un conseil utiles, mais non obligatoires, ou une autorisation.

À l'exception des notes mentionnées **notes normatives** qui contiennent des exigences (à caractère obligatoire), présentées uniquement dans le bas des figures et des tableaux, toutes les autres notes du document mentionnées **notes** sont **informatives** (à caractère non obligatoire) et servent à fournir des éléments utiles à la compréhension d'une exigence (à caractère obligatoire) ou de son intention, des clarifications ou des précisions.

Les **annexes normatives** fournissent des exigences supplémentaires (à caractère obligatoire) qui doivent être respectées pour se conformer au présent document. Les **annexes informatives** fournissent des renseignements supplémentaires (à caractère non obligatoire) destinés à faciliter la compréhension ou l'utilisation de certains éléments du présent document ou à en clarifier l'application, mais ne contiennent aucune exigence (à caractère obligatoire) qui doit être respectée pour se conformer au présent document.

La **graphie** de certains mots contenus dans ce document peut ne pas tenir compte de l'orthographe modernisée.

DÉGAGEMENT DE RESPONSABILITÉ

Le présent document a été élaboré à titre de document de référence à des fins d'utilisation volontaire. Le BNQ ne peut être tenu responsable d'aucun dommage pouvant découler de l'utilisation de ce document, de son interprétation ou de la mise en œuvre des exigences qui y sont prévues. Il est de la responsabilité de l'utilisateur de s'assurer de vérifier si des lois ou des règlements rendent obligatoire l'utilisation du présent document ou si des règles de l'industrie ou des conditions de marché l'exigent, notamment, mais non limitativement, des règlements techniques, des plans d'inspection émanant d'autorités réglementaires, des programmes de certification. Il est également de la responsabilité de l'utilisateur de tenir compte des limites et des restrictions formulées dans le présent document et de juger de sa pertinence pour l'usage qu'il veut en faire.

EXIGENCES CONCERNANT LE MARQUAGE ET L'ÉTIQUETAGE

Il est possible que le présent document contienne des exigences concernant le marquage ou l'étiquetage, ou les deux. Dans cette éventualité, en plus de se conformer à ces exigences, les fournisseurs de produits ont la responsabilité de respecter les lois et les règlements nationaux, provinciaux ou territoriaux sur les langues en vigueur là où les produits sont distribués.

AVANT-PROPOS

La présente norme a été élaborée conformément aux exigences et lignes directrices du Conseil canadien des normes (CCN) pour les organismes d'élaboration de normes et approuvé par le CCN en tant que norme nationale du Canada. Sa publication a été approuvée par un comité de normalisation formé des membres suivants :

Fournisseurs

ARENSEN, Lukas	BGC Engineering
GROZIC, Ed	Tetra Tech Canada
PIAMSALEE, Aron	Stantec Consulting

Utilisateurs

BROWN, Sara (présidente)	Northwest Territories Association of Communities (NWTAC)
DAIGNAULT, Lupin	Office d'habitation du Nunavik (OHN)
HABIYAREMYE, Faustin	Société du Plan Nord

Intérêt général

AULD, Heather	Climate Services International
BILODEAU, Jean-Pascal	Université Laval
LEWKOWICZ, Antoni G.	Université d'Ottawa

Gouvernements et organismes de réglementation

BADLEY, Warren	Ministère des Services aux collectivités — Gouvernement du Yukon
MUGHAL, Naeem	Ministère des Services communautaires et gouvernementaux — Gouvernement du Nunavut

THÉRIAULT, Yves

Relations Couronne-Autochtones et Affaires du
Nord Canada (RCAANC) — Gouvernement du
Canada

WARNER, Terry

Ministère de l'Infrastructure — Gouvernement
des Territoires du Nord-Ouest (GTNO)

Équipe de coordination du Bureau de normalisation du Québec (BNQ)

PINARD, Amélie

TREMBLAY, Carole

L'élaboration de la présente norme a été rendue possible grâce au soutien financier du Conseil canadien des normes (CCN).

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
1 OBJET	2
2 DOMAINE D'APPLICATION	3
3 RÉFÉRENCES NORMATIVES	4
3.1 GÉNÉRALITÉS	4
3.2 DOCUMENTS D'ORGANISMES DE NORMALISATION	4
3.3 AUTRE DOCUMENT	6
4 DÉFINITIONS	6
5 PLANIFICATION D'UNE ÉTUDE GÉOTECHNIQUE	11
5.1 PORTÉE D'UNE ÉTUDE GÉOTECHNIQUE	11
5.2 ÉLABORATION DU PROGRAMME D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE	12
6 QUALIFICATIONS	13
6.1 QUALIFICATION DE L'EXPERT-CONSEIL EN GÉOTECHNIQUE	13
6.2 QUALIFICATION DE L'ÉQUIPE CHARGÉE DE L'ÉTUDE DU SOUS-SOL	13
6.3 QUALIFICATION DES ORGANISATIONS RÉALISANT LES ESSAIS, LES ANALYSES ET LES INSPECTIONS	13
7 ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DU SITE	13
7.1 GÉNÉRALITÉS	13
7.2 ÉVALUATION DOCUMENTAIRE	14
7.2.1 Généralités	14
7.2.2 Évaluation initiale des conditions climatiques	15
7.2.3 Sismicité	17
7.2.4 Géologie de surface et géomorphologie	17
7.2.5 Hydrologie des eaux de surface et des eaux souterraines	18
7.2.6 Couvert végétal	19
7.2.7 Zones de pergélisol et distribution locale	19
7.2.8 Caractéristiques du pergélisol	19
7.2.9 Caractéristiques propres au site	20
7.2.10 Accès au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et logistique	21

	7.2.11	Historique de l'utilisation des sols	21
	7.2.12	Bâtiments ou ouvrages d'art voisins	21
	7.2.13	Disponibilité des matériaux d'emprunt	22
	7.3	VISITE DU SITE DU BÂTIMENT OU DE L'OUVRAGE D'ART	22
	7.4	NIVEAU DE RISQUE DU PROJET LIÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	22
	7.5	RAPPORT	23
8		ÉTUDE DU SITE	23
	8.1	PROGRAMME D'ÉTUDE DU SITE	23
	8.2	ÉVALUATION DÉTAILLÉE DES RISQUES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET AUTRES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES	24
	8.2.1	Projections des changements climatiques	24
	8.2.2	Autres conditions environnementales	25
	8.3	TECHNOLOGIES DE TÉLÉDÉTECTION	26
	8.4	MÉTHODES D'ÉTUDE GÉOPHYSIQUE	26
	8.5	PROPRIÉTÉS DES SOLS	26
	8.5.1	Généralités	26
	8.5.2	Échantillonnage in situ	26
	8.5.3	Stratigraphie et cryostratigraphie	28
	8.5.4	Substrat rocheux	28
	8.5.5	Régime thermique du sol	29
	8.5.6	Propriétés géotechniques des sols	31
	8.5.7	Propriétés des sols à l'état gelé	31
	8.5.8	Propriétés thermiques	33
	8.6	PROPRIÉTÉS DU SUBSTRAT ROCHEUX	34
	8.6.1	Généralités	34
	8.6.2	Échantillonnage par carottage	34
	8.6.3	Stratigraphie et cryostratigraphie	35
	8.6.4	Désignation de la qualité de la roche (DQR)	35
	8.6.5	Température du substrat rocheux	35
	8.6.6	Résistance à la compression	35
	8.6.7	Salinité de l'eau souterraine	36
	8.7	CHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE	36
9		COMMUNICATION DES RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS	36
	9.1	GÉNÉRALITÉS	36
	9.2	PORTÉE DU RAPPORT	36
	9.3	CONDITIONS CLIMATIQUES	36
	9.4	SISMICITÉ	37
	9.5	GÉOLOGIE DE SURFACE ET GÉOMORPHOLOGIE	37
	9.6	HYDROLOGIE DES EAUX DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES	37
	9.7	COUVERT VÉGÉTAL	37
	9.8	ZONES DE PERGÉLISOL ET DISTRIBUTION LOCALE	37

9.9	CARACTÉRISTIQUES PROPRES AU SITE	37
9.10	HISTORIQUE DE L'UTILISATION DU SOL	38
9.11	BÂTIMENTS ET OUVRAGES D'ART VOISINS	38
9.12	CONDITIONS DU SOUS-SOL	38
9.12.1	Caractérisation des conditions du sous-sol	38
9.12.2	Propriétés du sous-sol	38
9.12.3	Essais in situ, inspections et essais en laboratoire	39
9.13	RECOMMANDATIONS	40
9.13.1	Adéquation du bâtiment ou de l'ouvrage d'art	40
9.13.2	Recommandations relatives aux fondations et options de rechange	40
9.13.3	Préparation du site	42
9.13.4	Gestion des eaux de surface	42
9.13.5	Considérations et calendrier relatifs à la construction	42
9.14	PLANIFICATION DE L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE	42
9.15	LIMITES DE L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE	43
Tableau 1 —	Planification des visites du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et des études de site	44
Annexe A —	Programme d'étude géotechnique	45
Figure A.1 —	Éléments du programme d'étude géotechnique	46
Annexe B —	Changements climatiques et dégradation du pergélisol	47
Figure B.1 —	Évolution de la température moyenne annuelle dans l'Arctique	49
Photo B.1 —	Photo aérienne montrant des affaissements causés par le dégel du pergélisol près de Fort Simpson (T.N.-O.)	52
Annexe C —	Forage et échantillonnage	53
Photo C.1 —	Équipement de forage portatif avec carottier CRREL	55
Photo C.2 —	Foreuse pneumatique chenillée	56
Photo C.3 —	Petite tarière montée sur un transporteur à chenilles, installée avec une tarière pleine et un carottier CRREL (foreuse ranger)	56
Photo C.4 —	Petite tarière, transportable par véhicule tout-terrain	57
Photo C.5 —	Foreuse à tarière d'avant-trou	58
Photo C.6 —	Tarière typique montrée sur un transporteur à chenilles	59
Photo C.7 —	Carottier CRREL et échantillon de pergélisol non remanié de sol gelé à grains fins	59
Photo C.8 —	Foreuse à diamant typique à saumure refroidie	60

Photo C.9 —	Échantillons non remaniés de grande qualité de matériaux de tills granulaires obtenus avec une foreuse à diamant à saumure refroidie	61
Photo C.10 —	Petite foreuse sonique sur un transporteur à chenilles	62
Tableau C.1 —	Comparaison d'équipements et de méthodes de forage	65
Tableau C.2 —	Équipements de forage pour l'étude du substrat rocheux	71
Annexe D —	Méthodes d'étude géophysique au sol	72
Photo D.1 —	Équipement de tomographie de résistivité électrique (TRE)	73
Photo D.2 —	Installation d'électrodes pour appareil de tomographie de résistivité électrique (TRE)	73
Photo D.3 —	Équipement de radar à pénétration de sol – Antenne 12,5 MHz	74
Photo D.4 —	Équipement de radar à pénétration de sol – Antenne en ligne 80 MHz	74
Tableau D.1 —	Caractéristiques des méthodes d'étude géophysique	75
Annexe E —	Courbe en trompette de la température	78
Figure E.1 —	Exemple de courbe en trompette de la température	78
Annexe F —	Liste de vérification	79
Annexe G —	Références informatives	82
Annexe H —	Références informatives de l'annexe B	87
Annexe I —	Bibliographie	91

INTRODUCTION

Les études géotechniques revêtent une importance primordiale pour sélectionner la conception, la construction et l'entretien adéquats des bâtiments et ouvrages d'art. Dans les zones de pergélisol, ces études présentent un degré accru de complexité en raison des facteurs suivants :

- a) la présence potentielle de glace dans le sol ou dans le substrat rocheux, dont les propriétés dépendent de plusieurs paramètres, notamment, sans toutefois s'y limiter, la température et la salinité;
- b) l'influence des changements climatiques, qui modifient le régime thermique du sol et, par conséquent, changent les propriétés du pergélisol;
- c) la présence de sols salins.

La présente norme a été élaborée dans le but d'établir une méthodologie cohérente pour la réalisation d'études géotechniques qui comprennent la collecte des données ainsi que l'évaluation des conditions propres aux sites et la communication des résultats en tenant compte des conditions climatiques saisonnières et interannuelles de même que des conditions climatiques projetées pour la durée de vie utile des fondations des bâtiments ou des ouvrages d'art. À long terme, puisqu'une mauvaise évaluation du site peut entraîner des dommages permanents, la présente norme contribuera à réduire les problèmes d'entretien persistants.

Le niveau de détail d'une étude géotechnique qui vise à obtenir l'information adéquate d'un site en vue de sélectionner et de concevoir le type de fondations approprié pour un bâtiment ou un ouvrage d'art dans une zone de pergélisol peut varier en fonction de nombreux facteurs. Il en va de même pour les plans de réhabilitation des fondations d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art existant situé dans une zone de pergélisol.

La présente norme est élaborée de manière à tenir compte des contraintes propres au Nord et de la diversité des projets de construction.

La présente norme prévoit également que chaque projet est mené dans un cadre de gestion des risques pour évaluer l'impact des changements climatiques selon le document CSA PLUS 4011. Chaque projet se voit attribuer un niveau de risque basé sur la sensibilité du site aux changements climatiques et la conséquence d'une défaillance potentielle des fondations du bâtiment et de l'ouvrage d'art. Pour les projets à risque modéré ou élevé, l'étude géotechnique sera beaucoup plus détaillée que pour les projets dont le risque est faible ou négligeable. La présente norme prévoit une certaine souplesse pour permettre d'adapter l'étude géotechnique en fonction des résultats préliminaires obtenus qui sont susceptibles d'influencer la portée des travaux lors de la réalisation de l'étape suivante. Des dangers et des risques liés à des considérations autres que les changements climatiques peuvent également être inclus dans le programme d'étude géotechnique, mais ne font pas partie de la présente norme.

Plus précisément, la norme définit une méthodologie cohérente pour les études géotechniques, mais comme de nombreux facteurs déterminent le niveau de détail nécessaire pour obtenir des données adéquates sur le site, la norme s'appuie sur le jugement de l'expert-conseil en géotechnique pour faire les recommandations appropriées au client. La norme prévoit également que l'expert-conseil en géotechnique et le client prennent les mesures nécessaires pour avoir une compréhension commune de l'ensemble des travaux à entreprendre tout au long du projet. Ce dialogue entre le client et l'expert-conseil en géotechnique permettra au client de prendre des décisions éclairées en tenant compte des risques.

La présente norme est la cinquième d'une série de normes nationales du Canada (NNC) novatrices, lesquelles visent à favoriser la durabilité et la résilience à long terme des infrastructures du Nord du Canada. Les quatre autres NNC, élaborées dans le cadre de l'Initiative de normalisation des infrastructures du Nord (ININ), sont les suivantes :

- a) CSA S500 — *Fondations à thermosiphon de bâtiments construits dans des régions pergélisolées;*
- b) CSA S501 — *Modérer les effets de la dégradation du pergélisol sur les fondations de bâtiments existants;*
- c) CSA S502 — *Gestion des risques liés aux charges de neige sur les infrastructures du Grand Nord canadien;*
- d) CSA S503 — *Planification, conception et maintenance de systèmes de drainage dans les communautés du Nord.*

Toutes ces NNC sont complémentaires; elles contribuent à l'atteinte du même objectif qui est d'aider le Grand Nord canadien à se doter d'infrastructures résilientes en dépit des incertitudes créées par les changements climatiques.

C'est aussi le cas du document CSA PLUS 4011 *Guide technique : Infrastructure dans le pergélisol : lignes directrices pour l'adaptation au changement climatique*. Il s'agit d'un document clé dont la première édition a été publiée en 2010 et rééditée en 2019 qui permet de mieux comprendre les répercussions potentielles des changements climatiques sur les infrastructures du Nord du Canada.

1 **OBJET**

La présente norme comprend des lignes directrices et des exigences afin d'assurer la réalisation cohérente et adéquate de toutes les étapes d'une étude géotechnique (planification, exécution, rapport) pour les fondations de bâtiments ou d'ouvrages d'art construits en zone de pergélisol.

La présente norme fournit une méthodologie rigoureuse pour la réalisation d'études géotechniques qui vise à obtenir l'information adéquate d'un site en vue de concevoir ou de réhabiliter les fondations de bâtiments ou d'ouvrages d'art en tenant particulièrement compte, dans un cadre de gestion des risques climatiques, des conditions qui prévalent sur le site, y compris :

- a) les caractéristiques distinctives du pergélisol;
- b) les conditions climatiques saisonnières et interannuelles de même que les conditions climatiques projetées pour la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

2 DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme s'applique aux études géotechniques réalisées dans des zones de pergélisol afin de fournir les renseignements essentiels à la conception, à la construction et à l'entretien ou la réhabilitation des nouvelles fondations de tout type de bâtiment ou d'ouvrage d'art et des fondations de bâtiments ou d'ouvrages d'art existants.

NOTE — Les principes établis dans la présente norme peuvent s'appliquer à d'autres types d'infrastructure située dans des zones de pergélisol, mais il revient à l'utilisateur de déterminer si la présente norme convient à ses besoins.

Elle s'applique également à l'évaluation des conditions propres au site dans le cadre de l'étude géotechnique.

La présente norme s'applique uniquement aux dangers et risques liés aux changements climatiques et autres considérations environnementales.

Elle ne s'applique pas à la surveillance postconstruction d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.

NOTE — Les utilisateurs de la présente norme qui souhaitent obtenir des renseignements sur d'autres aspects liés aux conditions, à la conception, à la surveillance et à la planification de la remise en état, qui ne sont pas couverts par la présente norme, peuvent se référer à d'autres documents, entre autres le document CSA S501.

Tous les aspects qui ne relèvent pas de la géotechnique ne sont pas couverts par la présente norme.

La présente norme est principalement destinée aux experts-conseils en géotechnique, mais elle peut également être utile aux propriétaires et aux concepteurs de bâtiments ou d'ouvrages d'art, aux entrepreneurs et aux organismes de réglementation.

3 RÉFÉRENCES NORMATIVES

3.1 GÉNÉRALITÉS

Les références présentées ci-dessous (incluant tout modificatif ou errata) sont des références normatives, c'est-à-dire à caractère obligatoire. Elles sont essentielles à la compréhension et à l'utilisation de la présente norme et sont citées aux endroits appropriés dans le texte.

Il convient de prendre note qu'une référence (normative et informative) datée signifie que c'est l'édition donnée de cette référence qui s'applique, tandis qu'une référence non datée signifie que c'est la dernière édition de cette référence qui s'applique.

NOTE — La présente norme cite également des références informatives, dont la liste est donnée en annexe. Une bibliographie de références portant sur des sujets abordés dans la présente norme est également fournie en annexe.

3.2 DOCUMENTS D'ORGANISMES DE NORMALISATION

BNQ (Bureau de normalisation du Québec) [<https://www.bnq.qc.ca>]

CAN/BNQ 2501-090 *Sols — Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande et de la limite de plasticité.*

(Soils — Determination of Liquid Limit by the Casagrande Apparatus and Determination of Plastic Limit.)

CAN/BNQ 2501-092 *Sols — Détermination de la limite de liquidité à l'aide d'un pénétromètre à cône et de la limite de plasticité.*

(Soils — Determination of Liquid Limit by a Fall Cone Penetrometer and Determination of Plastic Limit.)

CAN/BNQ 2501-170 *Sols — Détermination de la teneur en eau.*
(Soils — Determination of Water Content.)

CAN/BNQ 2501-250 *Sols — Détermination de la relation teneur en eau-masse volumique sèche — Essai avec énergie de compactage normale (600 kN·m/m³).*
[Soils — Determination of the Water Content-Dry Density Relation — Standard Compaction Effort Test (600 kN·m/m³).]

ASTM International [<https://www.astm.org>]

ASTM D698 *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ [600 kN·m/m³]).*

ASTM D2216	<i>Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.</i>
ASTM D4083	<i>Standard Practice for Description of Frozen Soils (Visual-Manual Procedure).</i>
ASTM D4318	<i>Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.</i>
ASTM D4542	<i>Standard Test Methods for Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Refractometer.</i>
ASTM D4611	<i>Standard Test Method for Specific Heat of Rock and Soil.</i>
ASTM D5334	<i>Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.</i>
ASTM D5520	<i>Standard Test Method for Laboratory Determination of Creep Properties of Frozen Soil Samples by Uniaxial Compression.</i>
ASTM D6032	<i>Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core.</i>
ASTM D6913	<i>Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.</i>
ASTM D7012	<i>Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.</i>
ASTM D7263	<i>Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens.</i>

Groupe CSA [<https://www.csagroup.org>]

CSA PLUS 4011

Guide technique : Infrastructure dans le pergélisol : lignes directrices pour l'adaptation au changement climatique.

(Technical Guide: Infrastructure in Permafrost: A Guideline for Climate Change Adaptation.)

ISO (Organisation internationale de normalisation) [<https://www.iso.org>]

ISO 14689

Reconnaissance et essais géotechniques — Identification, description et classification des roches.

(Geotechnical Investigation and Testing — Identification, Description and Classification of Rock.)

ISO 17892-1

Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 1 : Détermination de la teneur en eau.

(Geotechnical Investigation and Testing — Laboratory Testing of Soil — Part 1: Determination of Water Content.)

ISO 17892-2

Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 2 : Détermination de la masse volumique d'un sol fin.

(Geotechnical Investigation and Testing — Laboratory Testing of Soil — Part 2: Determination of Bulk Density.)

3.3 AUTRE DOCUMENT

SOCIÉTÉ CANADIENNE DE GÉOTECHNIQUE (SCG). *Canadian Foundation Engineering Manual*, 5^e édition, Vancouver, C.-B, 2023, 888 p.

4 DÉFINITIONS

Pour les besoins de la présente norme, les termes suivants sont ainsi définis :

banc d'emprunt, n. m. Zone de laquelle de la terre, du gravier, du sable ou une autre matière ont été excavés pour être utilisés comme matériau de construction. Anglais : **borrow pit**.

bâtiment, n. m. Construction utilisée ou destinée à être utilisée pour abriter ou recevoir des personnes, des animaux ou des choses (référence : *Code national du bâtiment — Canada* [formulation modifiée]). Anglais : **building**.

câble de température du sol, n. m. Câble, généralement installé dans un trou de forage et équipé de capteurs qui mesurent la température à plusieurs profondeurs. Anglais : **ground temperature cable**.

client, n. m. Personne ou organisation, y compris ses représentants désignés, qui retient les services d'un expert-conseil en géotechnique. Anglais : **client**.

concepteur, n. m. Ingénieur responsable de la conception et de la préparation ou de la fourniture des dessins ou des spécifications d'un projet de construction (référence : CSA S500 [formulation modifiée]). Anglais : **designer**.

couche active, n. f. Couche de sol annuellement soumise au dégel et au gel qui recouvre le pergélisol. Anglais : **active layer**.

cryopeg, n. m. Eau souterraine cryotique qui présente, de manière constante, une forte teneur en matières solides. Anglais : **cryopeg**.

NOTES —

- 1 Trois types de cryopegs peuvent être distingués en fonction de leur position dans le pergélisol :
 - a) un cryopeg basal est présent à la base du pergélisol;
 - b) un cryopeg isolé est complètement entouré de gélisol pérenne;
 - c) un cryopeg marin, basal ou isolé, est présent dans le pergélisol littoral ou sous-marin.
- 2 Les cryopegs peuvent être sous pression, y compris sous pression artésienne.
- 3 En Amérique du Nord, le terme *cryopeg* a été utilisé pour désigner une zone non gelée du pergélisol (c.-à- d. un talik) comprenant de l'eau souterraine cryotique à forte teneur en matières solides.

cryostratigraphie, n. f. Étude des masses de roches et des sédiments actuellement ou antérieurement gelés qui consiste à les classer en trois unités distinctes, identifiables et cartographiables, appelées « cryofacies », en fonction des propriétés de leur glace de sol inhérente, dans le but d'établir la distribution et les relations spatiales de ces unités en analysant leur succession dans le temps et d'interpréter l'histoire du pergélisol. Anglais : **cryostratigraphy**.

déformation lente du gélisol, n. f. Déformation lente résultant de l'application à long terme d'une contrainte trop faible pour produire une rupture immédiate dans le sol gelé. Anglais : **creep of frozen soil**.

degré-jour, n. m. Unité de mesure dérivée de l'écart entre la température moyenne d'une journée et une température de référence ou de base donnée. Anglais : **degree-day**.

échantillon de pergélisol non remanié, n. m. Échantillon de sol gelé provenant du pergélisol et conservé dans l'état où il a été prélevé. Anglais : **undisturbed permafrost sample**.

échantillon remanié, n. m. Échantillon de sol dont la structure a été modifiée de telle manière que ses propriétés structurales ne sont pas représentatives des conditions propres au site, et que seules les propriétés des particules du sol, dont la granulométrie, les limites d'Atterberg et, possiblement, la teneur en eau, peuvent être déterminées avec exactitude. Anglais : ***disturbed sample***.

épaisseur de la couche active (abrév. : **ECA**), n. f. Épaisseur de la couche superficielle du sol qui recouvre le pergélisol, annuellement soumise au dégel et au gel. Anglais : ***active layer thickness*** (abrév. : ***ALT***).

expert-conseil en géotechnique, n. m. Ingénieur responsable de la réalisation de l'étude géotechnique pour le client. Anglais : ***geotechnical consultant***.

facteur *n*, n. m. Rapport entre l'indice de gel ou de dégel du sol et l'indice de gel ou de dégel dans l'air. Anglais : ***n-factor***.

fondation, n. f. Structure située à la surface ou sous la surface du sol qui transfère les charges du bâtiment au sol. Anglais : ***foundation***.

NOTE — Les fondations de bâtiments ou de structures sont généralement classées en deux grandes catégories (superficielles ou profondes) selon l'endroit où les charges sont transférées au sol (à la surface/près de la surface ou plus bas, sur une couche du sous-sol ou sur diverses profondeurs). Les fondations superficielles les plus courantes comprennent les piliers sur semelles, les murs de fondations sur semelle filante et les dalles sur sol. Les fondations profondes comprennent principalement des pieux faits de différents matériaux, de différentes tailles, formes et configurations, selon l'application.

forage, n. m. Trou foré dans le sol, généralement pour observer et échantillonner le substrat, et dans les zones de pergélisol, souvent pour permettre l'installation d'un câble de température du sol. Anglais : ***borehole***.

glace de sol, n. f. Glace de tout type contenue dans le sol, y compris la glace morte. Anglais : ***ground ice***.

indice de dégel de l'air (abrév. : **IDA**), n. m. Somme des degrés-jours au-dessus de 0 °C calculée pour une période donnée à partir des températures de l'air. Anglais : ***air thawing index*** (abrév. : ***ATI***).

indice de gel de l'air (abrév. : **IGA**), n. m. Somme des degrés-jours en dessous de 0 °C calculée pour une période donnée à partir des températures de l'air. Anglais : ***air freezing index*** (abrév. : ***AFI***).

ouvrage d'art, n. m. Construction ou objet construit qui nécessite une base stable. Anglais : ***structure***.

pergélisol, n. m. Sol ou substrat rocheux, y compris la glace et les matières organiques qu'il contient, dont la température est égale ou inférieure à 0 °C pendant au moins deux années consécutives. Anglais : ***permafrost***.

pergélisol continu, n. m. Pergélisol présent sous toute la surface terrestre exposée d’une région géographique, à l’exception de sites très diversifiés, tels que des sédiments non consolidés récemment déposés ou exposés, où le climat commence à peine à exercer son influence sur le régime thermique du sol. Anglais : ***continuous permafrost***.

NOTE — Dans les zones de pergélisol continu, le pergélisol est présent sous 90 % ou plus de la surface terrestre exposée.

pergélisol discontinu, n. m. Pergélisol se trouvant sous certaines parties de la surface du sol exposée d’une région géographique, adjacent à des zones sans pergélisol. Anglais : ***discontinuous permafrost***.

NOTE — Selon l’échelle utilisée, plusieurs zones de pergélisol discontinu peuvent être observées en fonction du pourcentage de la surface du sol qui recouvre le pergélisol. Au Canada, elles sont appelées zone de pergélisol discontinu étendu (pourcentage de 50 % à 90 %), zone de pergélisol discontinu sporadique (pourcentage de 10 % à moins de 50 %) et parcelles isolées de zones de pergélisol (pourcentage de moins de 10 %).

pergélisol sensible au dégel, n. m. Pergélisol qui contient un volume excessif de glace et qui subirait une déformation importante ou une perte de résistance, ou les deux, en cas de dégel. Anglais : ***thaw-sensitive permafrost***.

profondeur d’amplitude annuelle nulle, n. f. Distance entre la surface du sol et le niveau inférieur sous lequel il n’y a pratiquement aucune variation annuelle de la température du sol. Anglais : ***depth of zero annual amplitude***.

NOTE — Toute variation annuelle de température ne dépassant pas 0,1 °C est considérée comme négligeable.

puits d’exploration, n. m. Excavation réalisée manuellement ou mécaniquement pour examiner le sol près de la surface et en prélever des échantillons. Anglais : ***test pit***.

région pergélisolée, n. f. Région géographique dans laquelle le pergélisol est présent sous une partie ou la totalité de la surface du sol. Anglais : ***permafrost region***.

NOTES —

- 1 Le pergélisol est défini comme cryogénisation permanente du sol selon le paramètre le plus facilement mesurable, soit la température du sol. Le pergélisol n’est pas nécessairement gelé, car l’eau présente peut geler ou dégeler à l’intérieur d’une gamme de températures inférieures à 0 °C et, dans certains substrats, l’humidité peut être totalement absente.
- 2 Le pergélisol comprend les glaces de sol pérennes, mais exclut les glaces de glaciers et le givre ainsi que les plans d’eau de surface dont la température ne dépasse jamais 0 °C.
- 3 La disparité des critères qui définissent le pergélisol et la couche active peut mener à une ambiguïté opérationnelle lorsque la profondeur du plafond de pergélisol est mesurée au moyen de sondes ou par la mesure de l’épaisseur de la couche active à partir des températures des forages.

talik, n.m. Couche ou masse de sol adjacent au pergélisol, non gelé de façon perpétuelle, en raison de conditions thermiques, hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques locales. Anglais : *talik*.

température moyenne annuelle de l'air (abrév. : **TMAA**), n. f. Température moyenne journalière ou mensuelle d'un site pour une année civile donnée. Anglais : *mean annual air temperature* (abrév. : *MAAT*).

NOTE — La température moyenne annuelle de l'air est publiée par Environnement et Changement climatique Canada pour divers emplacements.

température moyenne annuelle du sol (abrév. : **TMAS**), n. f. Température moyenne annuelle du sol à une profondeur donnée. Anglais : *mean annual ground temperature* (abrév. : *MAGT*).

NOTE — La température moyenne annuelle du sol à la profondeur d'amplitude annuelle nulle sert souvent à évaluer le régime thermique du sol à différents endroits.

thermosiphon, n. m. Dispositif de transfert de chaleur passif comprenant un tuyau scellé ainsi qu'un condenseur à la surface et un évaporateur sous la surface, qui contiennent tous deux du liquide ou du gaz, installé pour extraire la chaleur du sol (référence : CSA S500). Anglais : *thermosyphon*.

NOTE — Un thermosiphon :

- a) n'a pas de pièces mobiles;
- b) ne nécessite pas de source d'alimentation externe;
- c) fonctionne seulement lorsque la température de l'air est inférieure à celle du sol;
- d) est habituellement un système de réfrigération passif, mais peut aussi être combiné à un système de congélation actif, par la circulation de fluide refroidi en subsurface ou par le refroidissement du condenseur, pour assurer le refroidissement passif pendant de longues périodes;
- e) peut être un système à une ou deux phases :
 - Un thermosiphon à une phase est habituellement rempli de liquide ou de gaz. L'hiver, la chaleur du sol entourant l'évaporateur est absorbée par le fluide actif, puis le réchauffe; celui-ci circule alors vers la section du tuyau du condenseur de surface exposée à l'air frais, puis perd sa chaleur par conduction et par convection naturelle dans l'air.
 - Un thermosiphon à deux phases contient un fluide actif en phase liquide ou vapeur, selon sa température et sa pression. Lorsque l'air atteint une température inférieure à celle du sol, la vapeur se condense dans la section du condenseur du tuyau, la pression dans le tuyau diminue, et le liquide dans l'évaporateur commence à bouillir. Le cycle ainsi créé – ébullition, mouvement de la vapeur dans le tuyau, condensation et retour du condensat par gravité – est une manière efficace de transférer la chaleur vers le haut du tuyau pour rafraîchir le sol.

zone de pergélisol, n. f. Subdivision principale d'une région pergélisolée selon l'étendue estimée du pergélisol. Anglais : *permafrost zone*.

NOTE — La carte circumpolaire de l'International Permafrost Association illustre quatre zones de pergélisol, soit continue, discontinue, sporadique et isolée.

5 PLANIFICATION D'UNE ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

5.1 PORTÉE D'UNE ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

L'expert-conseil en géotechnique et le client doivent convenir de la portée et des limites de l'étude géotechnique. De plus, le processus doit permettre une certaine flexibilité puisqu'il est possible que les résultats de l'étude viennent modifier la portée initiale et révéler des besoins différents ou supplémentaires. Il est recommandé que la portée et les limites de l'étude géotechnique correspondent au projet à l'étude.

La portée de l'étude géotechnique doit tenir compte du concept envisagé pour le nouveau bâtiment ou ouvrage d'art ou des caractéristiques du bâtiment ou ouvrage d'art existant de manière à fournir les renseignements relatifs au terrain énumérés ci-après qui sont nécessaires à la conception ou à la réhabilitation des fondations.

Ces renseignements doivent comprendre, selon les besoins :

- a) la description du bâtiment ou de l'ouvrage d'art : emplacement, taille, configuration (nombre d'étages), emplacement au-dessus ou au-dessous du sol, et plan général du site avec le tracé du bâtiment ou de l'ouvrage d'art;
- b) les fonctions prévues du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et ses conditions d'exploitation (p. ex. : chauffé ou non, hypothèses sur les pertes de chaleur de l'enveloppe, exigences en matière d'accès du personnel et des véhicules);
- c) la magnitude et le type de charges, y compris les charges dynamiques;
- d) la durée de vie utile recommandée des fondations pour le bâtiment ou l'ouvrage d'art, sachant que les éléments du bâtiment ou de l'ouvrage d'art peuvent être réaménagés plusieurs fois sur les fondations d'origine;
- e) la tolérance du bâtiment ou de l'ouvrage d'art aux déformations (totales et différentielles);
- f) les installations auxiliaires (services publics) et l'infrastructure;
- g) les contraintes du calendrier de construction.

La portée de l'étude géotechnique doit inclure des modalités relatives à la collecte et à l'analyse des renseignements propres au site. Ces renseignements doivent comprendre, selon les besoins :

- a) les conditions de surface qui prévalent sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, notamment, sans toutefois s'y limiter, la topographie, le couvert végétal, la géologie de surface, la géomorphologie et l'écoulement des eaux de surface;

- b) les conditions du sous-sol, notamment, sans toutefois s'y limiter, la stratigraphie, les propriétés des dépôts meubles et du substrat rocheux, l'épaisseur de la couche active (ECA), la présence d'eaux souterraines, la présence et les caractéristiques de la glace de sol, le régime thermique du sol et la disponibilité des matériaux d'emprunt;
- c) les conditions climatiques, y compris les variations saisonnières et interannuelles de même que les conditions climatiques projetées pour la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art;
- d) les risques découlant de l'aléa sismique et des changements anticipés des conditions du terrain du bâtiment ou de l'ouvrage d'art tout au long de sa durée de vie utile.

La portée de l'étude géotechnique doit minimalement comprendre une évaluation préliminaire du site, conformément aux exigences du chapitre 7. En fonction du type et de la complexité du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ainsi que des conditions du site, elle peut également comprendre une étude du site, conformément aux exigences du chapitre 8.

5.2 ÉLABORATION DU PROGRAMME D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Le programme d'étude géotechnique doit être adapté au type et à la complexité du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, à la connaissance des conditions locales, à la période de l'année durant laquelle l'étude est menée et à la disponibilité de l'équipement d'échantillonnage. Pour plus d'information, un schéma des étapes à suivre (voir annexe A) et une liste de vérification des aspects à considérer sont fournis (voir annexe F).

Le niveau de détail visé par l'étude géotechnique et la formulation des recommandations concernant les fondations dépendent de nombreux facteurs et peuvent varier d'un projet à l'autre. L'expert-conseil en géotechnique et le client doivent prendre les mesures nécessaires pour en arriver à une compréhension commune des travaux à accomplir tout au long du projet. Dans tous les cas, l'expert-conseil en géotechnique doit informer le client lorsque des données supplémentaires sont requises afin d'être en mesure de faire les recommandations adéquates.

Lorsque dans le cadre de l'étude géotechnique, il est approprié et nécessaire de mesurer les conditions propres au site au fil du temps, l'expert-conseil en géotechnique et le client doivent convenir d'un programme de mesures. Ce programme doit définir les paramètres à mesurer et la période à couvrir. Il est recommandé d'envisager d'intégrer des parties du programme de mesures à un programme de surveillance de la performance à long terme pour le bâtiment ou l'ouvrage d'art.

L'expert-conseil en géotechnique doit prévoir de minimiser les perturbations du couvert de surface naturelle ainsi que les conditions de sol et de drainage (p. ex. : enlèvement ou endommagement de la tourbe ou de la couverture végétale) afin de maintenir le régime thermique du pergélisol et les conditions initiales du site.

NOTE — La réglementation relative à la préservation des conditions initiales du site peut s'appliquer.

6 QUALIFICATIONS

6.1 QUALIFICATION DE L'EXPERT-CONSEIL EN GÉOTECHNIQUE

L'expert-conseil en géotechnique doit être un ingénieur qui est autorisé à exercer par l'organisme de réglementation compétente en matière d'ingénierie dans la province ou dans le territoire où se trouve le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Les experts-conseils en géotechnique et les sous-traitants qu'ils retiennent pour réaliser une ou plusieurs parties des travaux doivent posséder la formation, l'expérience et l'expertise nécessaires pour effectuer de façon compétente des travaux dans un milieu pergélisolé.

6.2 QUALIFICATION DE L'ÉQUIPE CHARGÉE DE L'ÉTUDE DU SOUS-SOL

L'équipe chargée de l'étude du sous-sol doit utiliser l'équipement approprié et posséder la formation, l'expérience et l'expertise nécessaires pour effectuer de manière compétente des études du sous-sol dans un milieu pergélisolé.

L'étude du sous-sol doit être réalisée sous la supervision de l'expert-conseil en géotechnique.

6.3 QUALIFICATION DES ORGANISATIONS RÉALISANT LES ESSAIS, LES ANALYSES ET LES INSPECTIONS

Les organisations responsables d'effectuer les inspections et les essais in situ sur le substrat rocheux et les sols gelés ou non gelés doivent utiliser l'équipement approprié, suivre les procédures adéquates et faire appel à du personnel possédant la formation, l'expérience et l'expertise nécessaires pour réaliser de façon compétente les inspections et les essais in situ.

Les analyses et essais en laboratoire sur les sols gelés ou non gelés doivent être faits en utilisant l'équipement et les procédures adéquates par du personnel possédant la formation, l'expérience et l'expertise requises.

Ces travaux doivent être réalisés sous la supervision de l'expert-conseil en géotechnique.

NOTE — Le document ASTM D3740 donne des lignes directrices sur l'évaluation des compétences d'une organisation pour réaliser adéquatement les essais et les inspections prévus sur les sols et le substrat rocheux, y compris sur les exigences minimales relatives au personnel, aux installations, à l'équipement et au système qualité.

7 ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DU SITE

7.1 GÉNÉRALITÉS

L'évaluation préliminaire du site a pour objectif de recueillir les données disponibles afin de caractériser les conditions géotechniques, hydrologiques et climatiques qui prévalent sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et d'orienter, au besoin, l'élaboration du programme d'étude du site.

L'évaluation préliminaire du site doit comprendre une évaluation documentaire reposant sur les données disponibles, conformément aux exigences de l'article 7.2. Elle peut également comprendre :

- a) une visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, conformément aux exigences de l'article 7.3;
- b) une évaluation du niveau de risque du projet relativement aux changements climatiques, conformément aux exigences de l'article 7.4;
- c) un rapport sur les résultats, conformément aux exigences de l'article 7.5.

NOTE — Pour les projets pour lesquels les risques face aux changements climatiques sont faibles ou négligeables, il est possible que l'évaluation documentaire suffise à recueillir tous les renseignements nécessaires pour évaluer l'aptitude du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

7.2 ÉVALUATION DOCUMENTAIRE

7.2.1 Généralités

L'évaluation documentaire doit comprendre tous les éléments énumérés aux articles 7.2.2 à 7.2.13. Elle doit présenter les renseignements disponibles concernant les caractéristiques et les propriétés physiques de la surface du sol et du sous-sol du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et des propriétés voisines. Elle doit également résumer toutes les données sur les conditions climatiques locales et les conditions thermiques du sol et comporter une évaluation préliminaire de l'évolution possible de ces conditions pendant la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. L'évaluation documentaire doit permettre d'établir les exigences particulières du programme d'étude du site (p. ex. : forage, excavation de puits d'exploration et/ou méthodes d'étude géophysique; instruments ou essais en laboratoire spécifiques; niveau d'analyse des changements climatiques nécessaire) et de faciliter l'interprétation des résultats obtenus.

L'évaluation documentaire doit être adaptée aux fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art concerné et aux autres considérations relatives aux fondations. Ce type d'évaluation peut suffire aux structures légères et souples, mais les structures plus lourdes et plus rigides nécessitent des investigations intrusives plus approfondies.

NOTE — L'annexe A et la liste de contrôle de l'annexe F présentent la portée et les exigences de l'évaluation préliminaire du site décrite au chapitre 7 par rapport aux exigences supplémentaires d'une étude de site décrites au chapitre 8. La liste de vérifications de l'annexe F souligne les besoins courants en renseignements pour l'évaluation préliminaire du site par rapport aux renseignements supplémentaires généralement nécessaires pour une étude de site. La figure A.1 illustre le fait que, pour certains projets à faible risque relativement aux changements climatiques, une évaluation préliminaire peut suffire.

Les ressources pouvant fournir des renseignements utiles comprennent, sans s'y limiter :

- a) des images satellites;
- b) des cartes topographiques;

- c) des photographies aériennes;
- d) des données LiDAR (*Light Detection and Ranging* [détection et localisation par la lumière]);
- e) des données de radar interférométrique à synthèse d'ouverture (InSAR);
- f) des modèles numériques d'élévation;
- g) des données existantes sur la géologie de surface;
- h) des cartes du substrat rocheux;
- i) des rapports d'ingénierie géotechnique, d'hydrogéologie et de géologie;
- j) des plans de développement communautaire;
- k) des renseignements sur l'historique de l'utilisation des sites;
- l) des bases de données géoréférencées sur les températures du sol;
- m) des données et modèles climatiques provenant des gouvernements;
- n) des cartes régionales du pergélisol et du gélisol;
- o) des publications sur le sujet et des études de cas.

D'autres sources d'information sur les conditions du sol de surface et du sous-sol peuvent inclure des données sur le couvert végétal, le climat et l'écoulement des eaux de surface.

NOTE — Au Canada, plusieurs organismes recueillent des données sur le pergélisol, notamment concernant la distribution de divers types de glace massive, les conditions de pergélisol dans divers sédiments, l'ECA et la température du sol. Dans le nord du Canada, les données sur le pergélisol sont plus détaillées pour les régions où des études géotechniques plus approfondies ont été menées pour de grands projets, mais elles peuvent être incomplètes et dispersées dans les régions où le développement industriel est faible ou inexistant. Pour tous les projets, les bases de données et les cartes de Ressources naturelles Canada (RNCan) sont des sources de données primaires adéquates. Il est aussi possible de communiquer avec de nombreux autres organismes gouvernementaux qui recueillent, reçoivent ou gèrent également des données sur le pergélisol. Parmi ces organismes : les commissions géologiques des provinces et des territoires, les organismes de réglementation, les organismes de réglementation des mines, les ministères des Travaux publics, les établissements de recherche du Nord, les universités et les experts-conseils en géotechnique.

7.2.2 Évaluation initiale des conditions climatiques

7.2.2.1 Généralités — L'évaluation documentaire doit inclure une évaluation initiale des conditions climatiques saisonnières et interannuelles ainsi que des autres conditions énumérées aux articles 7.2.2.2 à 7.2.2.6 puisque ces facteurs peuvent avoir une incidence sur l'adéquation du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art pour le projet de bâtiment ou d'ouvrage d'art. Elle doit

comprendre les données et les tendances climatiques relatives à la région et au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ainsi qu'une évaluation préliminaire des répercussions possibles de ces conditions sur la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

NOTES —

- 1 Divers paramètres climatiques peuvent influencer le régime thermique du pergélisol sous-jacent et ainsi modifier ses propriétés mécaniques. Les données climatiques et météorologiques pour les régions partiellement couvertes par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) peuvent être disponibles à partir d'autres sources telles que les bases de données fédérales, provinciales et territoriales, des réseaux routiers et des sites miniers.
- 2 Il est parfois nécessaire d'interpréter des données provenant de stations météorologiques proches ou représentatives si le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art est situé à proximité de plusieurs stations. Il est également possible d'utiliser des données climatiques maillées en première estimation lorsqu'il n'existe pas de station météorologique représentative.

7.2.2.2 Température moyenne annuelle de l'air (TMAA) — La température moyenne annuelle de l'air (TMAA) doit être calculée à partir des données historiques de température de l'air ou des données maillées. De plus, les moyennes saisonnières et les tendances des moyennes saisonnières doivent être calculées.

7.2.2.3 Indices de gel et de dégel de l'air (IGA et IDA) — L'indice de gel de l'air (IGA) et l'indice de dégel de l'air (IDA) doivent être calculés à partir des données historiques de température de l'air ou des données maillées.

7.2.2.4 Précipitations et vents — Les données sur les précipitations, comprenant les précipitations de pluie et de neige, doivent être rapportées sur une base mensuelle.

La direction et la vitesse du vent peuvent être rapportées. Par exemple, une évaluation initiale de l'influence du vent sur des éléments de conception comme l'emplacement et la performance des thermosiphons de même que l'accumulation et le déplacement de la neige par le vent peut être pertinente.

NOTE — L'accumulation et le déplacement de la neige par le vent, en particulier les changements subis par les amoncellements de neige en raison de travaux de construction ou de la topographie, jouent un rôle important dans la conception des fondations dans le pergélisol. En effet, les amoncellements de neige près des structures isolent le sol et réduisent la circulation d'air sous les bâtiments élevés, ce qui nuit au refroidissement de la couche active et du pergélisol sous-jacent pendant l'hiver. Pour une conception réussie des fondations, il est essentiel de comprendre comment le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art prévu modifiera les schémas d'accumulation de neige.

Il convient de rapporter, le cas échéant, les données ou d'autres éléments de preuve montrant l'existence de précipitations et de vents extrêmes.

7.2.2.5 Microclimat — Pour les bâtiments et ouvrages d'art de grande taille et sujets à certains risques, une évaluation du microclimat doit être réalisée, en incluant la façon dont la topographie locale et les bâtiments et ouvrages d'art voisins peuvent influencer la température

de l'air, la direction et la vitesse du vent, les précipitations, les amoncèlements de neige, l'accumulation/le déplacement de la neige par le vent et l'exposition au soleil (orientation).

NOTE — En raison de l'influence de la topographie locale sur les conditions climatiques d'un site, les données climatiques provenant d'une station climatique voisine peuvent ne pas être représentatives des conditions propres au site. Une évaluation du microclimat contribue à évaluer la représentativité des données climatiques disponibles et la nécessité d'ajustements éventuels.

7.2.2.6 Projections de changements climatiques — Les projections de changements climatiques doivent couvrir les éléments pertinents relatifs aux fondations du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art tout au long de leur durée de vie utile de même que les effets de ces éléments sur le régime thermique du sol et sur l'état du pergélisol du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

Dans le cadre de l'évaluation documentaire, les projections initiales relatives aux changements climatiques doivent être basées sur les lignes directrices établies au chapitre 5 du document CSA PLUS 4011.

NOTES —

- 1 Le chapitre 4 du document CSA PLUS 4011 présente des renseignements additionnels sur les projections de changements climatiques, leur portée et leurs incertitudes. Les tableaux 5.2 et 5.3 du chapitre 5 présentent une analyse des modèles climatiques mondiaux (MCM) et proposent une orientation sur l'établissement de projections de changements climatiques à l'étape de la préévaluation.
- 2 Selon le document CSA PLUS 4011, le pergélisol se réchauffe et se dégrade plus rapidement que prévu dans certaines régions sensibles au dégel. L'annexe B de ce document propose des renseignements additionnels sur les processus de dégradation du pergélisol sensible au dégel qui s'amplifient.
- 3 Des données du gouvernement canadien sur les projections de changements climatiques peuvent être consultées dans les sites Web du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (CCmaC) et d'ECCC (Données et scénarios climatiques canadiens).

7.2.3 Sismicité

L'aléa sismique associé au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doit être établi conformément au *Code national du bâtiment — Canada*.

7.2.4 Géologie de surface et géomorphologie

Une analyse de la géologie de surface et de la géomorphologie doit être réalisée sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette analyse doit comprendre une description détaillée du mort-terrain, y compris du couvert organique et de ses caractéristiques, telles que sa sensibilité au gel ou au dégel, son degré d'homogénéité, son origine et ses perturbations antérieures, le cas échéant.

Les types de substrat rocheux, leur origine, l'épaisseur probable du mort-terrain ainsi que la présence d'affleurements rocheux, de galets et de roches en surface, de remblais ainsi que de bancs d'emprunt existants doivent aussi être décrits.

Les formes de relief périglaciaires observées sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, en particulier celles qui sont associées à la glace de sol, tel que la glace massive, les coins de glace, les monticules et les poches de glace, les pingos, les aueis, les pases et les thermokarsts, doivent être décrites. Ces formes de relief périglaciaires doivent être décrites conformément au document *La terminologie du pergélisol et notions connexes*.

Les processus géomorphologiques susceptibles de perturber le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ou ses fondations, comme la solifluxion, la couche active, les affaissements causés par le dégel régressif, l'érosion physique ou thermique ou les avalanches doivent être relevés.

7.2.5 Hydrologie des eaux de surface et des eaux souterraines

L'écoulement des eaux de surface et les prévisions concernant les conditions des eaux souterraines au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doivent être évalués. L'évaluation doit relever toute caractéristique physique du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art qui est susceptible d'avoir une incidence négative sur ses fondations, comme la dégradation du pergélisol causée par l'écoulement des eaux de surface ou des eaux souterraines en été de même que les travaux de nivellement requis pour contrôler cet écoulement. Les éléments qui doivent être abordés comprennent, sans s'y limiter, la pente, le couvert végétal, la présence et le niveau des ruisseaux et des plans d'eau à découvert qui sont à proximité, la présence de sources et de glaçages connexes, le niveau des mers, l'emplacement des fossés et des parcours de drainage les plus proches, l'emplacement des ponceaux à proximité, les éventuels problèmes liés à la formation de glace pendant les périodes de gel, l'emplacement des marais et des tourbières, la probabilité d'un haut niveau d'eau souterraine dans la couche active en été, la présence possible de taliks ou de cryopegs, les inondations passées ainsi que tout autre élément observé.

NOTES —

- 1 L'écoulement des eaux de surface ne se produit que pendant la période chaude de l'année, lors de la fonte des neiges, lors du dégel saisonnier en surface et quand il pleut. Dans le pergélisol, l'écoulement des eaux souterraines se limite habituellement à la zone de dégel annuel près de la surface (couche active). Cependant, l'écoulement des eaux souterraines est plus complexe dans le pergélisol discontinu et il ne se limite pas à la couche active. Pendant l'étude du site, il est recommandé d'évaluer la continuité attendue du pergélisol au site ainsi que la présence et les caractéristiques des taliks de même que la façon dont ceux-ci influenceront l'évaluation des eaux souterraines.
- 2 Les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent nuire aux travaux de construction, éroder la zone nivelée autour du bâtiment et entraîner la formation de lentilles de glace et le soulèvement de gel pendant la période de gel automnale. Il est donc recommandé de cerner ces problèmes potentiels dans le cadre de l'évaluation documentaire de sorte qu'ils soient pris en considération dans l'élaboration du programme d'étude du site, dans la sélection et la conception des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et dans la conception du nivellement et du drainage autour du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.
- 3 Le document CSA S503 est un document de référence qui propose des lignes directrices à ce sujet.

7.2.6 Couvert végétal

Le couvert végétal sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doit être documenté, y compris le type d'arbustes, d'arbres et de couvert végétal bas qui le composent, l'épaisseur du tapis végétal, le pourcentage du sol couvert par la végétation de même que l'historique des incendies de forêt survenus dans la région. Les perturbations du couvert végétal naturel et des conditions de drainage susceptibles de se produire au cours de l'étude du site et de la construction peuvent affecter de manière significative les conditions du pergélisol et, par conséquent, il est recommandé qu'elles soient réduites afin de le préserver.

NOTES —

- 1 Le type de végétation est souvent révélateur du type de sol, de l'hydrologie et de la présence de pergélisol, en particulier dans les zones de pergélisol discontinu.
- 2 La végétation joue un rôle essentiel en fournissant de l'ombre en été et en influençant les schémas de distribution de la neige, ce qui a une incidence sur la distribution du pergélisol dans les zones de pergélisol discontinu et affecte les températures du sol ainsi que l'ECA dans les zones de pergélisol continu.
- 3 La mousse et la tourbe à la surface du sol réduisent les transferts de chaleur entre l'atmosphère et le sol en été et influencent fortement l'ECA et la température du sol en absorbant la chaleur latente et en créant une isolation.
- 4 À la limite sud de la zone de pergélisol discontinu, des parcelles isolées de pergélisol peuvent se trouver en terrain organique.
- 5 Dans le pergélisol discontinu, le retrait des arbres et du couvert végétal peut accélérer le dégel du pergélisol, ce qui peut permettre la conception de fondations des bâtiments et des ouvrages d'art en fonction de conditions non pergélisolées.

7.2.7 Zones de pergélisol et distribution locale

La zone de pergélisol dans laquelle le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art est situé doit être déterminée en se référant à la carte du pergélisol au Canada (consulter le site Web de RNCAN). S'il ne s'agit pas d'une zone de pergélisol continu, il convient de préciser la distribution du pergélisol sur le site.

NOTE — Les régions pergélisolées sont habituellement subdivisées en zone de pergélisol selon la proportion du sol gelé en permanence. La subdivision de base aux latitudes élevées prévoit des zones de pergélisol continu (> 90 % de la surface), de pergélisol discontinu étendu (de 50 % à 90 % de la surface), de pergélisol discontinu sporadique (de 10 % à moins de 50 % de la surface) et des parcelles isolées de pergélisol.

7.2.8 Caractéristiques du pergélisol

7.2.8.1 Température moyenne annuelle du sol (TMAS) — Aux endroits où des mesures de la température du sol pour l'année de conception du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ne sont pas

disponibles, l'expert-conseil en géotechnique doit estimer la température moyenne annuelle du sol (TMA).

NOTES —

- 1 Il est approprié, à grande échelle, d'estimer la TMA à partir de la TMAA, mais cela s'applique moins à l'échelle du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art puisque la TMA peut varier considérablement d'un site à l'autre en fonction des conditions de surface (végétation, eau, neige, etc.) et des conditions du sous-sol. Pour déterminer précisément la TMA actuelle, il est nécessaire de prendre des mesures sur place (voir article 8.5.5.2), et pour établir des projections quant à la température du sol pendant la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, il est nécessaire d'exécuter une modélisation statistique ou numérique (voir article 8.5.5.2).
- 2 Il est possible d'appliquer un facteur n à la TMAA, établie conformément aux exigences de l'article 7.2.2.2, pour obtenir une estimation préliminaire de la température moyenne annuelle de la surface du sol dans des situations telles que les évaluations documentaires. Les résultats ainsi obtenus fournissent une approximation raisonnable pouvant être utilisée pour estimer la TMA.
- 3 La TMA à une profondeur donnée peut être calculée à partir des données de surveillance de la température de forages disponibles à partir de bases de données nationales (Nordicana D) et internationales (Global Terrestrial Network for Permafrost).

7.2.8.2 Épaisseur de la couche active — L'expert-conseil en géotechnique doit donner une estimation de l'ECA attendue pour l'année où le bâtiment ou l'ouvrage d'art a été conçu et pour toute la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette estimation peut être basée sur des données publiées provenant de sites représentatifs voisins ou sur le type de matériau de surface.

NOTE — La couche active est généralement plus profonde dans les substrats rocheux et dans les matériaux granulaires secs et moins profonde dans les tills saturés à granulométrie fine et dans les sols à grains fins (silts et argiles). Cependant, de nombreux autres facteurs propres à chaque site ont un effet sur l'ECA, notamment, sans s'y limiter, le couvert végétal, le couvert de neige, l'écoulement des eaux de surface et des eaux souterraines, l'orientation et l'élévation, etc.

7.2.8.3 Autres caractéristiques — L'expert-conseil en géotechnique doit déterminer si des documents supplémentaires sur la caractérisation locale du pergélisol sont disponibles pour le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et ses environs. Ces documents peuvent inclure des renseignements pertinents sur l'état du pergélisol provenant d'études géotechniques menées sur des sites voisins, comme la teneur en glace, le type de sol et de substrat rocheux, la salinité des eaux interstitielles et la température du sol.

NOTE — Des données sur la salinité des eaux interstitielles ont été publiées dans « Distribution of Saline Permafrost in the Northwest Territories, Canada », dans *Canadian Geotechnical Journal*.

7.2.9 Caractéristiques propres au site

Les caractéristiques propres au site doivent être documentées. Elles doivent comprendre, selon le cas :

- a) l'élévation du site;

- b) l'inclinaison et l'orientation de la pente de la surface du sol sur le site et dans les environs, rapportées le plus précisément possible et accompagnées des sources consultées et de leurs limites;

NOTE — L'orientation d'une pente (au nord ou au sud) influence la présence de pergélisol et la température du sol.

- c) l'emplacement des pentes raides;
- d) l'emplacement des dépôts à neige et les détails de la gestion de la neige;
- e) l'emplacement et la description des structures voisines, notamment, sans s'y limiter, les bâtiments, les stationnements, les routes ou les infrastructures de services publics.

7.2.10 Accès au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et logistique

S'il est nécessaire de mener une étude du site conformément aux exigences du chapitre 8, les contraintes logistiques, les problèmes potentiels d'accès au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et les restrictions saisonnières doivent être documentés dans le rapport sur l'évaluation préliminaire du site (voir article 7.5).

7.2.11 Historique de l'utilisation des sols

L'historique de l'aménagement et de l'utilisation des sols, y compris, le cas échéant, tout ouvrage retiré ou abandonné, le remblayage en sous-sol et en surface ainsi que la présence potentielle de contaminants sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, doit être documenté.

Il est recommandé que l'expert-conseil en géotechnique demande au propriétaire tout document relatif à l'historique de l'utilisation du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et fournir tout rapport d'évaluation environnementale du site disponible.

Si le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art a été utilisé à des fins récréatives ou comme banc d'emprunt, cette information doit aussi être précisée; cette exigence vaut aussi pour une aire de remplissage, comme un ancien remblai granulaire ou un dépôt en tas.

7.2.12 Bâtiments ou ouvrages d'art voisins

L'expert-conseil en géotechnique doit évaluer le type de fondations des bâtiments ou des ouvrages d'art avoisinant le site à l'étude, le cas échéant. Le comportement de ces fondations, y compris toute défaillance, doit être évalué et documenté.

Les caractéristiques des matériaux de remblayage et l'origine du banc d'emprunt utilisé pour créer une infrastructure comme un remblai ou une route doivent être documentés.

7.2.13 Disponibilité des matériaux d'emprunt

Les bancs d'emprunt potentiels près du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doivent être évalués, car ils peuvent influencer le choix des fondations proposées pour le bâtiment ou l'ouvrage d'art.

7.3 VISITE DU SITE DU BÂTIMENT OU DE L'OUVRAGE D'ART

Si elle est jugée pertinente par l'expert-conseil en géotechnique, une visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doit être recommandée dans le cadre de l'évaluation préliminaire du site pour confirmer les données recueillies lors de l'évaluation documentaire et recueillir toute autre information utile qui n'a pu être évaluée adéquatement dans le cadre de l'évaluation documentaire. Il convient que la décision de réaliser une visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art soit prise par le client en consultation avec l'expert-conseil en géotechnique dans un cadre de gestion des risques. Il convient que la recommandation de l'expert-conseil en géotechnique soit basée notamment, sans s'y limiter, sur la complexité du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, sa sensibilité aux changements climatiques et sa tolérance à la déformation, les données recueillies lors de l'évaluation documentaire, l'existence d'un microclimat propre au site, l'incertitude concernant l'accessibilité au site, l'incertitude concernant l'équipement le plus adéquat pour l'étude du site et les exigences relatives à l'échéancier.

Le moment de la visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doit être discuté avec le client et choisi en tenant compte des avantages et des inconvénients énumérés au tableau 1, en plus des exigences relatives à l'échéancier global.

La visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art peut comprendre des entrevues avec des détenteurs des connaissances locales et la collecte d'information sur l'état de la surface du sol par l'excavation de puits d'exploration dans la couche active ou de la réalisation de trous de forage préliminaires, si cela est jugé nécessaire pour l'élaboration du programme d'étude du site.

NOTE — Afin de diminuer les coûts, il est possible que le client préfère combiner la visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art avec l'étude du site (voir chapitre 8). Si c'est le cas, il convient de revoir le moment de la visite du site en tenant compte des exigences liées à l'échéancier de l'étude du site (voir tableau 1).

7.4 NIVEAU DE RISQUE DU PROJET LIÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dans le cadre de l'évaluation préliminaire du site, l'expert-conseil en géotechnique doit déterminer le niveau de risque du projet lié aux changements climatiques. Ce niveau de risque doit être établi conformément à la première étape du processus d'évaluation des changements climatiques intitulée « Stage One: Climate change screening » (étape un : analyse préliminaire des changements climatiques) présentée au chapitre 5 du document CSA PLUS 4011, à partir de toutes les données compilées lors de l'évaluation préliminaire du site. Les niveaux de risque liés aux changements climatiques sont tirés du tableau 5.1 du document CSA PLUS 4011 :

- D : projet à risque faible à négligeable;
- C : projet à risque faible à négligeable;

- B : projet à risque modéré à élevé;
- A : projet à risque modéré à élevé;

NOTE — Bien que ce ne soit pas explicitement indiqué pour ces quatre niveaux (A - D), le risque n'est lié qu'aux impacts des changements climatiques. Les autres risques ne sont pas inclus dans les quatre niveaux ci-dessus.

Le niveau de risque du projet lié aux changements climatiques doit être utilisé dans l'élaboration du programme d'étude du site, comme l'illustre le schéma de l'annexe A.

7.5 RAPPORT

Les résultats de l'évaluation préliminaire du site doivent être présentés dans un rapport. Ce rapport doit être présenté de façon à permettre au client de comprendre les conditions propres au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et leur impact potentiel sur le projet. L'expert-conseil en géotechnique doit discuter du rapport avec le client.

Le rapport et la discussion peuvent donner lieu à l'une ou l'autre des options suivantes :

- a) Option 1 : les résultats de l'évaluation préliminaire du site permettent de procéder à la conception des fondations pour le concept de bâtiment ou d'ouvrage d'art prévu par le client sans entreprendre une étude du site. Le rapport doit être présenté conformément aux exigences du chapitre 9.
- b) Option 2 : les résultats de l'évaluation préliminaire du site ne permettent pas de procéder à la conception des fondations au concept du bâtiment ou de l'ouvrage d'art du client, par conséquent, une étude du site est nécessaire, conformément aux exigences du chapitre 8.
- c) Option 3 : les résultats de l'évaluation préliminaire du site permettent de proposer une solution de rechange à la fondation du bâtiment ou de l'ouvrage d'art initialement envisagée et de déterminer s'il est nécessaire de procéder à une étude du site, conformément aux exigences du chapitre 8.
- d) Option 4 : les résultats de l'évaluation préliminaire du site permettent d'établir que le site actuel du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ne convient pas au concept de bâtiment ou d'ouvrage d'art prévu par le client. Le rapport doit inclure les justifications conformément aux exigences de l'article 9.13.1.

8 ÉTUDE DU SITE

8.1 PROGRAMME D'ÉTUDE DU SITE

L'expert-conseil en géotechnique et le client doivent convenir de la portée et des limites du programme d'étude du site. Cependant, il est recommandé de convenir d'une certaine flexibilité

tout au long du processus de réalisation du programme puisqu'il est possible que les résultats de l'étude viennent modifier la portée initiale et révéler des besoins supplémentaires ou différents.

Ce programme peut inclure, en tout ou en partie, les éléments décrits dans le présent chapitre. Le programme d'étude du site doit être suffisant pour permettre d'établir, en détail, la présence, l'étendue, les caractéristiques et les propriétés des sols et du substrat rocheux gelés et non gelés, la présence de glace dans le sol, la présence d'eaux souterraines et le régime thermique du sol sur le site à l'étude.

Le moment de l'étude du site et son ampleur doivent faire l'objet de discussions avec le client et être choisis en fonction des avantages et des inconvénients énumérés au tableau 1, en plus des exigences relatives à l'échéancier global.

Le programme d'étude du site doit préciser :

- a) le nombre d'excavations et de forages nécessaires;
- b) leur emplacement et leur profondeur;
- c) la méthode d'échantillonnage in situ;
- d) l'équipement d'échantillonnage du sol ou du substrat rocheux à utiliser;
- e) les inspections et les essais à réaliser pour déterminer les propriétés du sol et du substrat rocheux;
- f) les méthodes de télédétection et d'étude géophysique pouvant être utilisées en soutien aux opérations d'excavation ou de forage, le cas échéant.

NOTES —

- 1 Le choix de la méthode et de l'équipement appropriés repose principalement sur l'expérience et le jugement de l'expert-conseil en géotechnique ainsi que sur les résultats de l'évaluation préliminaire des risques associés aux changements climatiques sur les fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art pendant leur durée de vie utile et la disponibilité de l'équipement sur place.
- 2 La planification d'une étude géotechnique dans des lieux éloignés vise aussi un équilibre entre l'obtention de données exhaustives sur le site et le coût des méthodes utilisées pour obtenir ces données. Les types d'échantillons obtenus par les différentes méthodes de forage sont décrits à l'annexe C.

8.2 ÉVALUATION DÉTAILLÉE DES RISQUES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET AUTRES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

8.2.1 Projections des changements climatiques

À cette étape, si le niveau de risque du projet lié aux changements climatiques est modéré ou élevé (niveau est A ou B, conformément aux exigences de l'article 7.4), une évaluation détaillée

de ces risques peut s'avérer nécessaire. Les résultats des essais relatifs aux propriétés des sols, conformément aux exigences de l'article 8.5, peuvent également justifier une évaluation plus détaillée des répercussions des changements climatiques.

Plus précisément, pour les projets à risque modéré ou élevé, la conception de fondations dans le pergélisol doit tenir compte d'une évaluation plus détaillée des projections des conditions climatiques tout au long de la durée de vie utile de ces fondations.

Si des changements aux propriétés géotechniques, physiques et thermiques ou à la réponse du sol sont prévus en raison de changements dans le régime de températures du sol, il convient d'évaluer une gamme de valeurs possibles au cours de l'étude géotechnique.

Il convient de déterminer les projections de conditions climatiques conformément aux lignes directrices présentées à l'annexe B. Il convient de faire appel à des experts en climatologie pour interpréter et mettre à jour les considérations régionales associées aux changements climatiques pertinents pour la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

Les facteurs climatiques évalués doivent comprendre, au minimum, les moyennes mensuelles de températures de l'air et de précipitations, l'IGA ainsi que l'IDA à partir de l'année de conception du bâtiment ou de l'ouvrage d'art jusqu'à la fin de sa vie utile.

De plus, il convient de prendre en compte dans l'évaluation détaillée des risques liés aux changements climatiques, les facteurs contribuant à l'accélération du dégel du pergélisol riche en glace, tels que la chaleur estivale ou les fortes précipitations. L'expert-conseil en géotechnique doit documenter comment ces facteurs climatiques ont été établis.

Il est recommandé que la gestion des eaux de surface prenne en compte les moyennes de précipitations de pluie mensuelles et totales. De même, il est recommandé que la température de l'air et l'épaisseur du couvert de neige soient prises en compte pour évaluer leurs effets sur le régime thermique du sol.

NOTE — Pour les fondations complexes présentant des risques élevés liés aux changements climatiques, l'expert-conseil en géotechnique et le client peuvent convenir d'utiliser des probabilités annuelles projetées sur la fin de vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

8.2.2 Autres conditions environnementales

Une évaluation plus détaillée des autres conditions environnementales déterminées dans le cadre de l'évaluation documentaire (voir article 7.2) peut également s'avérer nécessaire. Ces dernières peuvent inclure la géologie et la géomorphologie de surface, l'hydrologie des eaux de surface et des eaux souterraines, le couvert végétal ainsi que les caractéristiques propres au site.

8.3 TECHNOLOGIES DE TÉLÉDÉTECTION

Si des technologies de télédétection sont utilisées, leurs résultats doivent être consignés dans le rapport d'étude géotechnique conformément aux exigences de l'article 9.12.1. Cela doit comprendre une description des méthodes utilisées et des résultats obtenus.

NOTE — Les documents *Remote Sensing in Northern Hydrology: Measuring Environmental Change*, *La photo-interprétation et le territoire canadien*, *Opportunities to Use Remote Sensing in Understanding Permafrost and Related Ecological Characteristics: Report of a Workshop*, *Remote Sensing for Geoscientists: Image Analysis and Integration* et *Remote Sensing of the Cryosphere* fournissent des renseignements sur l'utilisation des technologies de télédétection dans les milieux pergélisolés.

8.4 MÉTHODES D'ÉTUDE GÉOPHYSIQUE

Si des méthodes d'étude géophysique sont utilisées, leurs résultats doivent être consignés dans le rapport d'étude géotechnique, conformément aux exigences de l'article 9.12.1. Cela doit comprendre une description des méthodes utilisées et des résultats obtenus.

NOTE — L'annexe D fournit des renseignements sur les différentes méthodes d'étude géophysique.

8.5 PROPRIÉTÉS DES SOLS

8.5.1 Généralités

Les résultats des essais relatifs aux propriétés du sol sont nécessaires pour évaluer les options de fondations et leur plan de conception géotechnique détaillé. Ces résultats peuvent également justifier le besoin d'analyses spécifiques décrites à l'article 8.5 ou la nécessité d'une évaluation détaillée des répercussions des changements climatiques.

8.5.2 Échantillonnage in situ

Des puits d'exploration et des forages doivent être réalisés conformément au programme d'étude du site afin d'obtenir des données sur la stratigraphie et la cryostratigraphie du sol par l'observation des puits d'exploration et de l'avancement des trous de forage ainsi que le prélèvement d'échantillons aux fins d'essais en laboratoire.

NOTE — Les puits d'exploration peuvent parfois n'atteindre que la limite supérieure du pergélisol ou présenter une profondeur limitée. Par conséquent, ils ne fournissent que peu de données significatives sur l'état du sous-sol.

Pour caractériser adéquatement le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, il convient de réaliser au moins un forage pour chaque 200 m² de l'empreinte au sol du bâtiment ou de l'ouvrage d'art avec au moins trois forages par bâtiment ou ouvrage d'art. Des forages supplémentaires doivent être effectués si l'état du sous-sol est très hétérogène. L'emplacement des forages doit être choisi

en fonction des caractéristiques observées à la surface, de la topographie et de toute autre exigence propre au site.

NOTE — Dans le nord du Canada, les entrepreneurs en forage facturent souvent à la journée plutôt qu'à l'heure. Par conséquent, il peut être avantageux de forer davantage de trous que le nombre recommandé si la réalisation des trous de forage ne prend qu'une petite partie de la journée.

L'exploration menée sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art doit atteindre une profondeur de 10 m ou une profondeur au moins égale à la largeur minimale des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, à moins qu'un substrat rocheux résistant ne se trouve à faible profondeur. Si c'est le cas, le forage doit se poursuivre sur au moins 2 m dans un substrat rocheux résistant. La profondeur d'exploration doit être supérieure à la longueur de pieux prévue pour les bâtiments ou les ouvrages d'art qui seront supportés par des pieux afin de permettre d'établir la nature des matériaux qui supporteront les pieux.

Les carottes et autres échantillons doivent être minimalement recueillis à chaque mètre de profondeur, ou moins en cas de changement d'unité stratigraphique.

NOTE — De plus petits intervalles d'échantillonnage sont recommandés dans les quatre premiers mètres de profondeur en raison de la forte probabilité de trouver des matériaux riches en glace dans l'interface transitoire entre la couche active et le plafond du pergélisol.

L'intervalle entre les prélèvements doit être modifié lorsque des variations sont observées ou en cas de conditions géotechniques sensibles associées au pergélisol, comme une concentration de glace élevée, une zone non gelée ou d'autres variations semblables.

Une attention particulière doit être apportée à l'évaluation de l'intégrité de chaque échantillon (remanié ou non) et au repérage de toute source potentielle de perturbations causées par les opérations de forage. Les procédures de forage qui permettent d'obtenir des échantillons non remaniés dont le régime thermique n'est pas modifié doivent être privilégiées dans la plupart des études (p. ex. : forage utilisant un fluide de refroidissement, forage sonique ou forage en tarière sèche).

Les échantillons remaniés doivent être placés dans des contenants hermétiques afin de conserver leur contenu en eau après le dégel. Les échantillons non remaniés doivent être conservés à l'état gelé en vue d'essais supplémentaires. Les échantillons doivent être conservés jusqu'à ce que le client n'en ait plus besoin.

NOTE — Le document *Transportation, Preparation, and Storage of Frozen Soil Samples for Laboratory Testing* fournit des lignes directrices sur le transport, la préparation et l'entreposage des échantillons de sol à l'état gelé pour les essais en laboratoire.

Tous les échantillons et les carottes doivent être décrits, conformément aux exigences de l'article 9.12.3, et photographiés au fur et à mesure de la collecte. L'expert-conseil en géotechnique doit noter et photographier le matériel utilisé pour l'excavation des puits d'exploration et les travaux de forage.

8.5.3 Stratigraphie et cryostratigraphie

L'expert-conseil en géotechnique doit superviser l'excavation des puits d'exploration et l'avancement des forages afin de documenter la stratigraphie et la cryostratigraphie des sols, leurs variations et l'emplacement des échantillons.

Les sols non gelés doivent être décrits conformément au document *Canadian Foundation Engineering Manual*. Si l'équipement de forage et d'échantillonnage le permet, la description de la glace dans le sol doit être effectuée au moins tous les 0,5 m le long d'un trou de forage ou chaque fois qu'un changement important survient. Les sols gelés doivent être décrits conformément aux exigences du document ASTM D4083.

NOTES —

- 1 Une description additionnelle de la cryostratigraphie est fournie dans « Cryostructures in Permafrost », dans *Canadian Journal of Earth Sciences* ou « Description and Classification of Frozen Soils », dans *Proceedings of the 1st International Conference on Permafrost*.
- 2 Il est reconnu que certains équipements de forage et d'échantillonnage fournissent des échantillons remaniés (p. ex. : les foreuses pneumatiques chenillées, les tarières), ce qui peut se solder par une description moins détaillée des sols gelés.

Dans le cadre de la description de la cryostratigraphie, l'estimation du contenu volumétrique en glace doit être basée sur les valeurs suivantes :

- a) glace pure (contenu volumétrique en glace de 100 %);
- b) glace pauvre en sédiments (contenu volumétrique en glace supérieur à 75 % et inférieur à 100 %);
- c) glace riche en sédiments (contenu volumétrique en glace supérieur à 50 % et inférieur ou égal à 75 %);
- d) sédiments riches en glace (contenu volumétrique en glace supérieur à 15 % et inférieur ou égal à 50 %);
- e) sédiments faibles en glace (contenu volumétrique en glace supérieur ou égal à 15 %).

NOTE — Une indication du contenu volumétrique en glace du terrain peut être obtenue en dégelant un échantillon de sol dans un récipient transparent et en laissant l'eau surnageante s'accumuler sur les particules de sol. Le rapport entre le volume (ou la hauteur) de l'eau surnageante et le volume (ou la hauteur) de particules de sol représente le contenu approximatif en glace excédentaire. Les sols sans eau surnageante sont pauvres en glace.

8.5.4 Substrat rocheux

Lorsque le substrat rocheux est atteint au cours d'une étude géotechnique du mort-terrain, l'expert-conseil en géotechnique doit mesurer et consigner sa profondeur. Les forages doivent

atteindre une profondeur suffisante pour confirmer sa présence, déterminer l'épaisseur de la zone altérée ou fracturée et évaluer sa capacité à résister au gel et au dégel.

8.5.5 Régime thermique du sol

8.5.5.1 Mesure de la température du sol — Si l'expert-conseil en géotechnique le recommande, la température du sol doit être mesurée et enregistrée. La prise de mesures peut être automatisée grâce à un système d'acquisition de données connecté à un câble de température du sol muni d'un ou de plusieurs capteurs à des intervalles prédéterminés. Les capteurs doivent avoir une précision d'au moins 0,1 °C et le décalage à 0 °C doit être établi dans un bain de glace.

Idéalement, il convient de mesurer le profil de température du sol dans des trous de forage de 10 m à 20 m de profondeur, selon ce que prévoit le programme d'étude du site. L'intervalle entre les différents capteurs peut augmenter en fonction de la profondeur; les capteurs peuvent être plus rapprochés dans la partie supérieure du sol afin de permettre d'estimer l'ECA.

NOTE — Les capteurs de température du sol peuvent être placés à des profondeurs de 0,05 m, de 0,25 m, de 0,5 m, de 1 m, de 1,5 m, de 2 m, de 2,5 m, de 3 m, de 4 m, de 5 m, de 6 m, de 8 m, de 10 m, de 12 m, de 15 m et de 20 m sous la surface du sol.

Les câbles de température du sol doivent être installés dans des trous de forage, puis remplis de sable sec ou d'un autre matériau conducteur pour une installation permanente. Si les câbles de température du sol sont à retirer, il convient de les placer dans un tubage scellé de faible diamètre placé à l'intérieur du trou de forage ayant été remblayé. Dans ce dernier cas, le tubage peut être rempli d'un matériau antigel sans danger pour l'environnement ou de tout autre matériau afin d'éviter les courants convectifs verticaux à l'intérieur du tubage.

Idéalement, il convient de mesurer la température du sol pendant un an. La température du sol doit être mesurée au minimum jusqu'à ce que le régime thermique se rétablisse à la suite des perturbations thermiques causées par le forage.

NOTE — Le rétablissement du régime thermique peut demander plusieurs jours, voire plusieurs mois, selon les conditions du sol et les méthodes de forage employées.

Des graphiques de températures du sol doivent être fournis pour chaque forage doté d'instruments de mesure affichant les variations de température observées au cours de la période de mesure. Les graphiques doivent également indiquer les températures minimale et maximale enregistrées au cours de cette période.

NOTE — Au besoin, il convient de mesurer la base du pergélisol à l'aide de la TMAS, soit par la lecture directe de la courbe de température si le pergélisol est peu profond, soit par inférence au moyen d'une extrapolation (voir annexe E).

8.5.5.2 Température moyenne annuelle du sol (TMAS) — Les mesures de température du sol consignées conformément aux exigences de l'article 8.5.5.1 doivent servir à confirmer la TMAS établie pendant l'évaluation préliminaire du site (voir article 7.2.8.1).

La TMAS doit être déterminée à la profondeur d’amplitude annuelle nulle. Si la profondeur d’amplitude annuelle nulle n’est pas atteinte lors du forage, conformément aux exigences de l’article 8.5.5.1, elle doit être déterminée par extrapolation et/ou en faisant la moyenne des températures chaudes et froides du sol pour estimer la température à la profondeur d’amplitude annuelle nulle extrapolée.

NOTE — La TMAS à la profondeur d’amplitude annuelle nulle est habituellement utilisée pour évaluer le régime thermique du sol à différents endroits.

La TMAS pour la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l’ouvrage d’art doit être estimée en fonction des projections de changements climatiques établies, conformément aux exigences de l’article 8.2.1. L’expert-conseil en géotechnique doit documenter la façon dont cette estimation a été établie.

8.5.5.3 Épaisseur de la couche active (ECA) — L’expert-conseil en géotechnique doit estimer l’ECA pour le sol qui se trouve sous le bâtiment ou l’ouvrage d’art et aux environs. La profondeur de dégel annuel peut être déduite du profil de température du sol, déterminé conformément aux exigences de l’article 8.5.5.1. La profondeur de dégel peut également être mesurée en sondant mécaniquement la couche active ou obtenue en réalisant des forages ou des excavations en un certain nombre d’endroits, selon ce que prévoit le programme d’étude. Les profondeurs de dégel moyenne, maximale et minimale mesurées au site du bâtiment ou de l’ouvrage d’art doivent être enregistrées.

NOTE — Les mesures effectuées entre la fin de l’été et le début de l’automne, selon l’endroit, donnent l’ECA au moment où la profondeur de dégel saisonnier atteint son maximum.

L’enregistrement de la profondeur de dégel doit comprendre des notes sur la date d’observation, le couvert végétal, le relief, l’écoulement des eaux de surface ainsi qu’une description des matériaux du sous-sol dans les divers secteurs sondés.

Les observations sur la profondeur de dégel doivent être effectuées dans des secteurs présentant différents types de surface, puis élargies aux endroits de ces secteurs qui présentent des variations notables du relief, de l’écoulement des eaux de surface ou des matériaux du sous-sol.

NOTES —

- 1 Des variations de la profondeur du dégel sont possibles pour une parcelle d’à peine 1,5 m².
- 2 L’ECA après la construction peut différer de celle en conditions non perturbées. La couche active est plus mince dans les zones caractérisées par une épaisse couche de matière organique au-dessus des sols à grains fins et à forte teneur en eau. Le retrait de la couche organique et l’application de mesures de contrôle des eaux souterraines pendant la construction d’un bâtiment ou d’un ouvrage d’art entraînent une augmentation de l’ECA.

L’ECA prévue pour la durée de vie utile des fondations du bâtiment ou de l’ouvrage d’art doit être estimée selon les projections de changements climatiques établies, conformément aux exigences de l’article 8.2.1. L’expert-conseil en géotechnique doit documenter la façon dont cette valeur a été déterminée.

8.5.6 Propriétés géotechniques des sols

8.5.6.1 Généralités — Le programme d'étude du site doit préciser quelles propriétés géotechniques des sols doivent être mesurées dans le cadre de l'étude géotechnique. Si le programme d'étude le mentionne, les propriétés géotechniques des sols doivent être mesurées conformément aux exigences des articles 8.5.6.2 à 8.5.6.8.

Les propriétés géotechniques des sols gelés déterminées à l'état non gelé permettent de classer les sols dans différents groupes dont le comportement est connu et d'estimer les paramètres de conception nécessaires. Les propriétés géotechniques des sols gelés à l'état non gelé doivent être établies à partir d'échantillons remaniés ou non remaniés.

8.5.6.2 Teneur en eau — La teneur en eau (humidité) des sols doit être déterminée conformément aux exigences de la norme CAN/BNQ 2501-170 ou des documents ISO 17892-1 ou ASTM D2216.

8.5.6.3 Granulométrie — La granulométrie des sols doit être déterminée conformément aux exigences du document ASTM D6913.

8.5.6.4 Limite de liquidité et limite de plasticité — La limite de liquidité et la limite de plasticité des sols doivent être déterminées conformément aux exigences des normes CAN/BNQ 2501-090 ou CAN/BNQ 2501-092 ou du document ASTM D4318.

8.5.6.5 Classification des sols — Les sols à l'état non gelé doivent être classés conformément au document *Canadian Foundation Engineering Manual*.

8.5.6.6 Salinité — La salinité des eaux interstitielles doit être déterminée conformément aux exigences du document ASTM D4542. Au moins cinq échantillons doivent être prélevés à partir de deux forages pour la mesure de la salinité.

8.5.6.7 Masse volumique — La masse volumique doit être mesurée en laboratoire, conformément aux exigences des documents ISO 17892-2 ou ASTM D7263. Elle peut également être mesurée in situ, conformément aux exigences des normes CAN/BNQ 2501-052, CAN/BNQ 2501-054, CAN/BNQ 2501-058 ou CAN/BNQ 2501-060 ou du document ASTM D1556/D1556M.

8.5.6.8 Autres propriétés géotechniques — La densité sèche maximale et la teneur en eau optimale des sols à utiliser pour les travaux de terrassement doivent être déterminées conformément aux exigences de la norme CAN/BNQ 2501-250 ou du document ASTM D698.

NOTE — La méthode d'essai définie dans le document ASTM D698 était autrefois appelée « essai Proctor normal ».

8.5.7 Propriétés des sols à l'état gelé

8.5.7.1 Généralités — Le programme d'étude du site doit préciser quelles propriétés des sols à l'état gelé doivent être mesurées ou déterminées. Il doit également préciser si ces propriétés sont déterminées par des essais in situ ou en laboratoire et si les paramètres de conception

technique doivent être établis sur la base d'une décision éclairée qui tient compte des risques à partir de corrélations publiées dans la littérature et des propriétés géotechniques des sols déterminées conformément aux exigences de l'article 8.5.6.

Si les propriétés des sols gelés doivent être mesurées par des essais en laboratoire ou in situ, cela doit se faire conformément aux exigences des articles 8.5.7.2 à 8.5.7.7 à partir d'échantillons gelés non remaniés. Les échantillons doivent être extraits des sections appropriées de la carotte gelée sous la supervision de l'expert-conseil en géotechnique. Les échantillons doivent rester gelés pendant leur transport au laboratoire.

NOTES —

- 1 De nombreuses propriétés des sols gelés dépendent de la température. Étant donné que la température du sol finale à long terme n'aura pas été établie au moment des essais en laboratoire, il est habituel d'effectuer les essais en laboratoire à deux températures représentatives de la fourchette probable.
- 2 En raison de la complexité et du coût de la mesure des propriétés des sols à l'état gelé en laboratoire ou in situ, il n'est pas rare de déterminer les paramètres de conception technique à partir des corrélations publiées dans la littérature.

8.5.7.2 Masse volumique apparente — La masse volumique apparente doit être mesurée en laboratoire conformément aux exigences des documents ISO 17892-2 ou ASTM D7263.

8.5.7.3 Déformation et consolidation causée par le dégel — Si l'expert-conseil en géotechnique juge que le site des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art est sensible au dégel, la consolidation causée par le dégel doit être mesurée en laboratoire par des essais, par exemple, par un essai de compression en fonction du temps causé par le dégel et l'évacuation de l'eau excédentaire des sols gelés.

NOTE — Des estimations de la déformation causée par le dégel peuvent être réalisées à partir des corrélations élaborées dans le document *Alaska Highway Gas Pipeline (Yukon Section) — Thaw Settlement Design Approach*. De plus, « One-Dimensional Consolidation of Thawing Soils », dans *Canadian Geotechnical Journal* et « Thaw-Consolidation Tests on Remoulded Clays », également dans *Canadian Geotechnical Journal* fournissent des renseignements additionnels sur la consolidation au dégel.

8.5.7.4 Susceptibilité au dégel — Si l'expert-conseil en géotechnique estime que la susceptibilité au dégel présente un risque pour le bâtiment ou l'ouvrage d'art, celle-ci doit être déterminée au moyen de trois échantillons de carotte gelés soumis à des essais.

NOTE — Le document ASTM D5918 spécifie comment déterminer la susceptibilité au dégel.

8.5.7.5 Teneur en eau non gelée — Il convient de déterminer en laboratoire les caractéristiques de gel du sol ainsi que la relation entre la teneur en eau non gelée et la température à l'aide de techniques de résonance magnétique nucléaire (RMN) pulsée ou de

réflectométrie à dimension temporelle. Il est aussi possible d'utiliser les relations présentées dans la littérature.

NOTE — « The Measurement of Unfrozen Water Content by Time Domain Reflectometry: Results from Laboratory Tests », dans *Canadian Geotechnical Journal*, *Measurement of the Unfrozen Water Content of Soil: Comparison of NMR and TDR Methods*, « The Prediction of Unfrozen Water Contents in Frozen Soils from Liquid Limit Determinations », dans *Monograph 76-8* et « Measurement of Unfrozen Water Content and Relative Permittivity of Frozen Unsaturated Soil Using NMR and TDR », dans *Cold Regions Science and Technology* fournissent des renseignements utiles sur la mesure de la teneur en eau non gelée.

8.5.7.6 Propriétés de déformation lente — Les propriétés de déformation lente des sols à l'état gelé doivent être déterminées conformément aux exigences du document ASTM D5520.

8.5.7.7 Propriétés de résistance — Lorsqu'il est nécessaire de mesurer la résistance des sols à l'état gelé, la résistance à la compression non confinée peut être mesurée à l'aide des méthodes d'essai spécifiées dans le document ASTM D2166/D2166M. Pendant l'essai, il convient de maintenir l'équipement d'essai et l'échantillon à une température inférieure au point de congélation pendant toute la durée de l'essai. Lorsque cela est possible, la réalisation de multiples essais à différentes températures et à différentes vitesses de déformation peut fournir des indications importantes sur le comportement rhéologique du sol à l'état gelé.

NOTE — Les propriétés de résistance dépendent de la vitesse de déformation et de la température.

8.5.8 Propriétés thermiques

8.5.8.1 Généralités — Le programme d'étude du site doit préciser quelles propriétés thermiques des sols doivent être mesurées ou déterminées dans le cadre de l'étude géotechnique. Le programme d'étude du site doit également préciser si les propriétés thermiques des sols doivent être mesurées à partir d'échantillons gelés, non gelés, remaniés ou non remaniés, ou calculées à partir des propriétés des matériaux et de leurs proportions ou à partir des valeurs données dans la littérature. Si le programme d'étude du site en fait mention, les propriétés thermiques du sol doivent être mesurées conformément aux exigences des articles 8.5.8.2 à 8.5.8.4.

NOTE — Les propriétés thermiques des matériaux choisis peuvent être estimées sur la base des valeurs typiques existant dans la littérature, par exemple : « Thermal Properties of Soils », dans *Bulletin 28*, « Thermal Properties of Soil », dans *W. R. van WIJK (ed.), Physics of Plant Environment*, « Water Supply in Cold Regions », dans *Monograph 111-C5a, Permafrost: Engineering Design and Construction, Heat Transfer in Cold Climates* et « Thermal Properties of Soils », dans *Monograph 81-1*.

8.5.8.2 Conductivité thermique — Il convient de mesurer la conductivité thermique des sols pergélisolés à l'état gelé ou non gelé conformément aux exigences du document ASTM D5334. La conductivité thermique du sol gelé ou non gelé peut également être évaluée selon le type de sol, la masse volumique sèche et le degré de saturation en eau à l'aide des tableaux présentés au chapitre 3 « Ground Thermal Regime », dans *Geotechnical Engineering for Cold Regions*.

NOTE — La composition des sols naturels varie sur des distances relativement courtes; les conductivités thermiques moyennes sont donc appropriées pour de nombreux problèmes thermiques. Diverses méthodes de calcul de la conductivité thermique des sols ont été passées en revue dans « Thermal Properties of Soils », dans *Monograph 81-1* et *Thermal Conductivity of Soils*. Ces méthodes donnent généralement les meilleurs résultats pour les sols gelés et non gelés, fins ou grossiers, à des degrés de saturation supérieurs à 0,1. On s'attend à ce que la conductivité thermique calculée s'écarte de moins de 25 % des valeurs mesurées.

8.5.8.3 Chaleur spécifique — La chaleur spécifique des sols doit être déterminée conformément aux exigences du document ASTM D4611 ou calculée à partir des corrélations données dans la littérature.

8.5.8.4 Chaleur latente de fusion — La chaleur latente de fusion de l'eau doit être calculée conformément aux données établies dans la littérature.

NOTE — La valeur de référence de l'eau est généralement de 334 J/g.

8.6 PROPRIÉTÉS DU SUBSTRAT ROCHEUX

8.6.1 Généralités

Le programme d'étude du site doit préciser quelles propriétés du substrat rocheux doivent être mesurées dans le cadre de l'étude géotechnique. Si le programme d'étude du site en fait mention, l'échantillonnage par carottage doit être réalisé conformément aux exigences de l'article 8.6.2 et les propriétés du substrat rocheux doivent être étudiées conformément aux exigences des articles 8.6.3 à 8.6.7.

8.6.2 Échantillonnage par carottage

Lorsque cela est spécifié dans le programme d'étude géotechnique, il convient d'effectuer l'échantillonnage du substrat rocheux de manière à obtenir des échantillons intacts et de bonne qualité. Pour ce faire, il s'agit de forer le substrat rocheux à l'aide d'un équipement de forage doté de carottiers double ou triple, parcourant une distance de 1,5 m. Si des échantillons non remaniés thermiquement sont nécessaires, le forage doit être effectué à l'aide d'un fluide de forage refroidissant.

NOTE — Les carottiers triples sont à privilégier puisqu'ils minimisent le remaniement des échantillons de substrat rocheux fracturé.

Tous les échantillons doivent être décrits conformément aux exigences de l'article 9.12.3 et photographiés au fur et à mesure de la collecte. L'expert-conseil en géotechnique doit noter et photographier le matériel utilisé pour l'étude du substrat rocheux.

8.6.3 Stratigraphie et cryostratigraphie

L'expert-conseil en géotechnique doit superviser l'avancement des forages afin de documenter la stratigraphie et la cryostratigraphie du substrat rocheux et ses variations ainsi que l'emplacement des échantillons.

L'expert-conseil en géotechnique doit examiner le substrat rocheux pour établir, selon le cas :

- a) les types de roches;
- b) la taille et la forme des blocs rocheux;
- c) le degré de météorisation;
- d) la fréquence des fractures;
- e) le remplissage, le type, l'espacement, le pendage, l'ouverture et la rugosité des discontinuités;
- f) les textures cryogéniques (distribution de la glace).

8.6.4 Désignation de la qualité de la roche (DQR)

La désignation de la qualité de la roche (DQR) doit être établie conformément aux exigences des documents ISO 14689 ou ASTM D6032.

8.6.5 Température du substrat rocheux

La température du substrat rocheux doit être mesurée sur place conformément aux exigences de l'article 8.5.5.1.

8.6.6 Résistance à la compression

La résistance à la compression des échantillons intacts de substrat rocheux doit être déterminée conformément aux exigences du document ASTM D7012.

NOTE — S'il est nécessaire d'effectuer des essais exhaustifs ou d'obtenir rapidement des données pour des activités de reconnaissance, d'autres essais peuvent être utilisés conformément aux exigences du document ASTM D5731 pour réduire le temps et les coûts des essais de résistance à la compression. Ces essais peuvent permettre de prendre rapidement des décisions éclairées en tenant compte des risques pendant les phases exploratoires et de choisir de façon plus rentable et plus efficace les échantillons en vue d'essais en laboratoire plus précis et plus coûteux. Il convient de ne pas se servir de ces résultats à des fins de conception ou d'analyse.

8.6.7 Salinité de l'eau souterraine

En présence d'eau souterraine dans le substrat rocheux, la salinité doit être déterminée conformément aux exigences du document ASTM D4542. Un minimum de cinq échantillons doit être prélevé à partir de deux forages pour mesurer la salinité de l'eau souterraine.

NOTE — La salinité de l'eau souterraine a des effets sur le point de congélation et, par conséquent, sur la teneur en eau non gelée et la conductivité hydraulique du substrat rocheux.

8.7 CHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE

Des échantillons d'eau souterraine doivent être prélevés pour mener des essais sur la qualité et la chimie de l'eau selon les normes et directives pertinentes dans les cas où l'expert-conseil détermine que ces essais sont nécessaires.

NOTE — Des données sur la qualité et/ou la chimie de l'eau peuvent être nécessaires lors de la production de mélange de béton ou lorsqu'une contamination du sol est présumée.

9 COMMUNICATION DES RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS

9.1 GÉNÉRALITÉS

Les résultats de l'étude géotechnique doivent être présentés dans un rapport. La nature du rapport d'étude géotechnique dépend de la portée de l'étude, de l'ampleur et de la complexité du projet et des conditions propres au site.

9.2 PORTÉE DU RAPPORT

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre une description de la portée de l'étude géotechnique dont l'expert-conseil en géotechnique et le client auront convenu au début de l'étude, conformément aux exigences de l'article 5.1, et de toute modification qui aura dû y être apportée pendant la réalisation du projet.

Le rapport doit également comprendre l'étude de conception du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ou la description du bâtiment ou de l'ouvrage d'art pour lesquelles le plan de réhabilitation des fondations est requis, conformément aux exigences de l'article 5.1.

L'utilisation prévue du rapport par le client (p. ex. : étude préliminaire/avant-projet de conception, estimation des coûts, conception détaillée, limitations) doit également être documentée.

9.3 CONDITIONS CLIMATIQUES

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre une description des conditions climatiques ayant une incidence sur le site, à savoir les conditions climatiques saisonnières et interannuelles, la TMAA, l'IDA, l'IGA, les précipitations, les vents, les considérations relatives au microclimat ainsi que les projections de conditions climatiques pour la durée de vie utile des fondations du

bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette description doit répondre aux exigences définies aux articles 7.2.2 et 8.2.1. Le rapport doit aussi renvoyer aux sources des données climatiques et météorologiques et justifier le choix de ces sources.

Le rapport doit comprendre une revue historique du climat et une analyse des différences entre les conditions climatiques passées et celles qui ont été observées lors de l'étude géotechnique.

Le rapport doit comprendre une évaluation des répercussions que peuvent avoir les conditions climatiques projetées sur les conditions du sol tout au long de la vie utile des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

NOTE — Une emphase particulière sur les températures est nécessaire, mais, plus importante encore, sur les répercussions des changements de schémas de précipitations, aussi bien pour la neige que pour la pluie.

9.4 SISMICITÉ

Comme le précise l'article 7.2.3, le rapport d'étude géotechnique doit présenter l'aléa sismique associé au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

9.5 GÉOLOGIE DE SURFACE ET GÉOMORPHOLOGIE

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre une description de la géologie de surface et de la géomorphologie de la zone où se trouve le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.4.

9.6 HYDROLOGIE DES EAUX DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre une description des conditions d'écoulement des eaux de surface et de l'état attendu des eaux souterraines sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.5.

9.7 COUVERT VÉGÉTAL

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre une description du couvert végétal sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.6.

9.8 ZONES DE PERGÉLISOL ET DISTRIBUTION LOCALE

Le rapport d'étude géotechnique doit décrire la zone de pergélisol du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et, le cas échéant, la distribution du pergélisol sur le site. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.7.

9.9 CARACTÉRISTIQUES PROPRES AU SITE

Le rapport d'étude géotechnique doit décrire les caractéristiques propres au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.9.

9.10 HISTORIQUE DE L'UTILISATION DU SOL

Le rapport d'étude géotechnique doit décrire l'historique de l'utilisation du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.11.

9.11 BÂTIMENTS ET OUVRAGES D'ART VOISINS

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre des données pertinentes sur tout bâtiment voisin ou tout ouvrage d'art voisin. Cette section du rapport doit traiter des éléments définis à l'article 7.2.12.

9.12 CONDITIONS DU SOUS-SOL

9.12.1 Caractérisation des conditions du sous-sol

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre un résumé du programme d'étude du site réalisé pour caractériser les conditions du sous-sol qui prévalent sur le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, y compris la période de l'année où l'étude géotechnique a été réalisée.

Le résumé du programme d'étude du site doit détailler toutes les méthodes utilisées pour évaluer les conditions du sous-sol, ce qui peut inclure une évaluation documentaire (voir article 7.2), des technologies de télédétection (voir article 8.3) et des méthodes d'étude géophysique (voir article 8.4) ainsi que des essais et des inspections in situ combinés à des essais en laboratoire (voir articles 8.5 et 8.6).

9.12.2 Propriétés du sous-sol

Le rapport d'étude géotechnique doit préciser les propriétés du sous-sol du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et leur variabilité. Le rapport doit également préciser si ces propriétés ont été mesurées par des essais in situ ou en laboratoire ou décrire comment elles ont été estimées. Le rapport doit faire état du niveau d'exactitude et de précision des mesures.

Le rapport d'étude géotechnique doit comprendre une description des principaux sols et du substrat rocheux observés et décrire les anomalies locales qui peuvent avoir une incidence sur la conception des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

Le rapport d'étude géotechnique doit présenter, comme le définit la portée de l'étude :

- a) la stratigraphie et la cryostratigraphie des sols et du substrat rocheux (voir articles 8.5.3 et 8.6.3);
- b) le régime thermique du sol (voir articles 7.2.8 et 8.5.5);
- c) les propriétés géotechniques des sols (voir article 8.5.6);

- d) les propriétés des sols à l'état gelé (voir article 8.5.7);
- e) les propriétés du substrat rocheux (voir articles 8.6.4, 8.6.5, 8.6.6 et 8.6.7).

Si la conception le nécessite, le rapport doit comprendre les propriétés thermiques des sols déterminées conformément aux exigences de l'article 8.5.8.

9.12.3 Essais in situ, inspections et essais en laboratoire

Si les propriétés du sous-sol ont été déterminées grâce à une combinaison d'essais in situ, d'inspections et d'essais en laboratoire, le rapport d'étude géotechnique doit comprendre la liste du matériel utilisé, le nombre de puits d'excavation et de trous de forage, leur emplacement et la date à laquelle ils ont été réalisés ainsi que les essais in situ et les essais en laboratoire effectués.

Le rapport d'étude géotechnique doit inclure les résultats de tous les essais et de toutes les études ainsi qu'une copie des rapports d'essai.

Il doit également comprendre un registre détaillé des forages et des puits d'exploration incluant au minimum les éléments suivants :

- a) les coordonnées précises de l'entrée du forage avec une précision de ± 5 m pour les coordonnées x et y et de $\pm 0,5$ m pour l'élévation relative. Si les forages sont inclinés, le pendage et l'azimut doivent en être précisés. Les systèmes de coordonnées et de références doivent être précisés;
- b) la stratigraphie détaillée du sol et du substrat rocheux, déterminée à partir des échantillons recueillis, des observations visuelles, des difficultés ou caractéristiques du forage et des commentaires du foreur, le cas échéant;
- c) les emplacements et les techniques d'échantillonnage, y compris le degré de perturbation, ainsi que les essais in situ et les essais de laboratoire réalisés sur chaque échantillon;
- d) les méthodes de forage;
- e) la cryostratigraphie, y compris le contenu volumétrique en glace;
- f) l'instrumentation installée dans le forage, le cas échéant;
- g) les conditions des eaux souterraines, y compris les caractéristiques et l'étendue des cryopegs, le cas échéant, et la présence de toute arrivée d'eau ainsi que son origine ou son emplacement;
- h) toute note relative à l'instabilité du forage ou du puits d'exploration.

Si des instruments ont été installés, les mesures prises doivent être incluses dans le rapport. Si le site a été visité à plusieurs reprises durant l'étude, les températures de sol obtenues et les relevés

de suivi doivent être fournis. Il est recommandé que des courbes montrant les variations saisonnières à différentes périodes de l'année soient également incluses si elles sont disponibles.

De plus, le rapport doit contenir des renseignements concernant la stabilité des relevés des instruments. Enfin, le rapport doit également comprendre des renseignements sur les instruments installés, notamment, sans s'y limiter, le fabricant du câble et des capteurs, les données d'étalonnage, les réglages de l'enregistreur de données (si applicable), le comportement, les exigences d'entretien et la fréquence de téléchargement. Les capteurs de températures à thermistance doivent avoir une précision d'au moins $\pm 0,1$ °C et une résolution de 0,01 °C sur une échelle variant de +30 °C à -30 °C; il est recommandé que le décalage à 0° soit établi dans un bain de glace.

9.13 RECOMMANDATIONS

Lorsque des recommandations sont à inclure dans le rapport d'étude géotechnique, les aspects décrits aux articles 9.13.1 à 9.13.5 doivent être inclus.

NOTE — Certains clients peuvent aussi demander un rapport de données. Dans ces cas, l'expert-conseil en géotechnique n'est responsable que de la collecte des données; l'interprétation et les recommandations étant effectuées par d'autres parties.

9.13.1 Adéquation du bâtiment ou de l'ouvrage d'art

Le rapport d'étude géotechnique doit formuler des recommandations sur l'adéquation du site et du bâtiment ou de l'ouvrage d'art actuel ou proposé. Si ces recommandations montrent que le site ne convient pas au concept prévu par le client, le rapport doit présenter les justifications nécessaires.

9.13.2 Recommandations relatives aux fondations et options de rechange

Le rapport d'étude géotechnique doit fournir des recommandations sur le type de fondations approprié en fonction des conditions du pergélisol identifiées et aux propriétés structurales du bâtiment ou de l'ouvrage d'art. Ces recommandations doivent tenir compte des impacts des conditions climatiques projetées sur la capacité des fondations à supporter le bâtiment ou l'ouvrage d'art pendant toute sa durée de vie. Il est recommandé que le rapport considère également l'accumulation et le déplacement, actuels et projetés, de la neige par le vent (voir article 7.2.2.4) puisque ces facteurs peuvent entraîner des répercussions importantes sur le comportement thermique des sols et du substrat rocheux qui supportent les fondations.

Il convient que les recommandations relatives aux fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art soient basées sur l'évaluation et la caractérisation du site ainsi que sur les incertitudes relatives aux conditions du sol projetées, lesquelles sont elles-mêmes liées aux incertitudes relatives aux conditions climatiques projetées.

Le rapport peut également proposer d'autres options de fondations de bâtiment ou d'ouvrage d'art viables et présenter les avantages et les inconvénients des options recommandées.

NOTE — Une orientation et du soutien technique pour soutenir la conception de fondations dans le pergélisol ainsi que la sélection, le contrôle et l'évaluation de leur performance sont présentés dans les documents suivants, sans s'y limiter :

- a) CSA PLUS 4011 définit des méthodes pour estimer la durabilité des structures techniques sur des fondations dans le pergélisol tout au long de leur durée de vie utile dans le nord du Canada en vue d'atténuer, dès la conception, les risques de défaillance des systèmes de fondations causés par les changements climatiques et de s'adapter à ces derniers.
- b) CSA PLUS 4011.1 est un document d'accompagnement à CSA PLUS 4011 qui présente des renseignements techniques sur les propriétés des différents systèmes de fondations, des critères de sélection, des conditions du sol et des problèmes connexes destinés à soutenir le processus de sélection et de décision quant au choix des systèmes de fondations dans le pergélisol et à leurs limites.
- c) Le document *Canadian Foundation Engineering Manual* contient un chapitre (chapitre 13) qui traite spécifiquement des fondations dans le pergélisol, y compris des études de site (dans le pergélisol) de la classification des pergélisols, du suivi de la température du sol, de la conception de fondations superficielles ou profondes, de l'incidence des perturbations dans le sol, des impacts des changements climatiques, de la susceptibilité causée par le dégel et du fluage des fondations ainsi que des méthodes de conception adaptative visant à répondre aux changements dans le régime thermique des sols.

Dans le cas où une fondation profonde est recommandée, l'expert-conseil en géotechnique doit fournir des recommandations concernant les propriétés de géliadhérence des sols pergélisolés à l'état gelé. Pour la conception préliminaire, la température moyenne du pergélisol peut être utilisée pour estimer la géliadhérence moyenne. Pour la conception finale, les distributions de température du sous-sol doivent être obtenues sur le terrain et les géliadhérences doivent être calculées en fonction de la température de tout le profil du sol.

NOTE — La résistance de la géliadhérence utilisée pour la conception des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art peut être calculée selon les travaux présentés dans les documents suivants : « Pile Design in Permafrost », dans *Canadian Geotechnical Journal* ou « A Study of Some Factors Affecting the Adfreeze Bond of Piles in Permafrost », dans *Actes de la Cinquième conférence canadienne sur le pergélisol* ou dans le document *Canadian Foundation Engineering Manual*.

Dans le cas d'une étude géotechnique réalisée dans le cadre d'un plan de réhabilitation de fondations existantes d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art, le rapport doit formuler des recommandations visant l'atténuation des effets de la dégradation du pergélisol sur les fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

NOTE — Des indications visant à atténuer les effets de la dégradation du pergélisol sur les fondations existantes de bâtiments ou d'ouvrages d'art sont présentées dans le document CSA S501.

Si la conception proposée nécessite l'installation d'instruments visant à surveiller le comportement des fondations dans le temps, cela doit être précisé dans le rapport d'étude géotechnique. De même, il est recommandé que d'autres tâches liées à la surveillance telles que

la vérification du thermosiphon, les études de susceptibilité, les inspections visuelles soient clairement décrites dans ce rapport.

9.13.3 Préparation du site

Lorsqu'inclus dans la portée de l'étude géotechnique, le rapport doit présenter un résumé de la préparation du site requise en vue de la construction des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art ainsi que le calendrier optimal lié à la préparation du site, en tenant compte des restrictions d'accès potentielles (p. ex. : déneigement en hiver, essouchement).

Le cas échéant, le rapport d'étude géotechnique doit également énumérer les bancs d'emprunt potentiels (voir article 7.2.13) et préciser les quantités probables des matériaux disponibles.

9.13.4 Gestion des eaux de surface

Lorsqu'inclus dans la portée de l'étude géotechnique, le rapport doit fournir des indications concernant la gestion des eaux de surface et des eaux souterraines. Les répercussions de la construction du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et de tout ouvrage de terrassement sur les schémas d'écoulement local des eaux de surface et des eaux souterraines doivent être prises en compte et des recommandations sur les mesures de drainage nécessaires (fossés, bermes, gestion de la neige, etc.) doivent être formulées.

9.13.5 Considérations et calendrier relatifs à la construction

Lorsqu'inclus dans la portée de l'étude géotechnique, le rapport doit présenter des commentaires et des indications sur des questions relatives au site qui peuvent avoir une incidence sur la sélection et la conception des fondations du bâtiment ou de l'ouvrage d'art, comme, entre autres, l'excavation de tourbe et de sols peu profonds à haute teneur en glace, la nécessité d'assécher l'excavation et la réutilisation du sol minéral dégelé pour le remblayage, le forage préliminaire pour l'installation de pieux, le moment de la construction de la couche de remblai, le déroulement des travaux, le moment de l'installation du thermosiphon ou d'autres aspects.

Lorsqu'inclus dans la portée de l'étude géotechnique, le rapport doit également préciser les mois où le dégel est le plus profond afin de faciliter l'excavation, le cas échéant, ainsi que la date limite pour l'achèvement des travaux de terrassement. Si l'excavation nécessite des opérations de forage et de dynamitage, le rapport doit aussi le mentionner. De la même façon, le rapport doit établir à quel moment la construction ou l'installation des fondations ne doivent pas être réalisées en raison de la possibilité de dégel non réversible ou de l'impossibilité de mener les travaux de construction. Les approches à utiliser pendant la construction et les restrictions sur les activités de construction (p. ex. aucun équipement sur la surface naturelle du sol) doivent être décrites.

9.14 PLANIFICATION DE L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Le rapport doit préciser le moment de l'année où l'étude géotechnique a été menée de même que les répercussions de ce choix sur les caractéristiques du sol près de la surface (p. ex. : ECA, température du sol, écoulement d'eau dans la couche active, écoulement d'eau à la surface, couvert de neige).

9.15 LIMITES DE L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

L'expert-conseil en géotechnique doit préciser les limites pratiques et juridiques de l'étude géotechnique et de l'information qui en découle dans le rapport d'étude géotechnique. Cela inclut généralement une limite d'utilisation des résultats de l'étude géotechnique aux besoins du client pour lequel le rapport a été préparé.



Tableau 1

Planification des visites du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et des études de site
(articles 7.3 et 8.1)

Saison	Avantages	Inconvénients
Printemps — début de l'été	- Le sol gelé permet un meilleur accès pour l'équipement de forage et de meilleurs échantillons de la couche active. - L'air est plus chaud, ce qui réduit le nombre d'interventions à basse température. - Des sources d'eau de surface peuvent être disponibles pour le forage. - Les signes d'amoncèlements et de bancs de neige peuvent être encore présents. - Il est possible de repérer les signes de certaines caractéristiques périglaciaires se produisant en hiver, comme les buttes saisonnières à noyau de glace ou les glaçages. - Les conditions de drainage en surface peuvent être plus faciles à établir au printemps et au début de l'été. - Les jours sont plus longs. - Une visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art au printemps ou au début de l'été peut laisser suffisamment de temps pour mener l'étude du site plus tard en été ou en automne.	- La couche active n'est pas complètement dégelée. - Les conditions d'eaux souterraines en été ne se sont pas encore complètement mises en place. - Les puits d'exploration sont limités à la profondeur du gel dans la couche active. - Le couvert de neige restant peut camoufler les caractéristiques topographiques, la végétation ou d'autres caractéristiques importantes de la surface. - La crue nivale peut nuire à l'étude.
Milieu de l'été — automne	- La couche active atteint sa profondeur maximale ou s'en approche et elle se prête mieux aux puits d'exploration et aux mesures. - Les conditions des eaux de surface et des eaux souterraines sont plus évidentes. - Les caractéristiques de la surface sont faciles à repérer.	- Le sol plus mou peut compliquer l'accès à l'équipement de forage en plus d'être plus sensible aux perturbations. - L'éboulement ou l'envasement des sols de la couche active peut compliquer le forage. - Une visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art à la fin de l'été ou à l'automne peut ne pas laisser suffisamment de temps pour préparer et exécuter une étude du site au cours du même été.
Hiver	- Si elles ne sont pas recouvertes de neige, les caractéristiques périglaciaires qui se produisent en hiver, comme les buttes saisonnières à noyau de glace ou les glaçages, peuvent être repérées. - Les amoncèlements de neige sont faciles à repérer. - Le potentiel de perturbation de la surface naturelle du sol est plus faible. - L'accès aux sites de forage est souvent plus facile sur la neige que sur le terrain accidenté de la toundra. - La récupération d'échantillons gelés non remaniés est plus facile si un forage est proposé. - Une visite du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art en hiver peut faciliter l'étude du site au printemps et possiblement la construction dans l'été de la même année.	- La durée limitée du jour et le froid nuisent à l'efficacité et à l'équipement. - Le couvert de neige camoufle les caractéristiques microtopographiques, la végétation et les autres caractéristiques de la surface. - L'ECA ne peut pas être déterminée. - Les conditions de drainage de la surface et des eaux souterraines ne peuvent pas être observées. - Il peut être difficile de trouver de l'eau pour le forage. - Les conditions météorologiques peuvent retarder les travaux et les déplacements, faisant ainsi augmenter les coûts.
NOTES — 1 La période de l'année à laquelle l'étude de site est menée peut influencer la méthode d'échantillonnage et les coûts. 2 Dans l'Arctique de l'Ouest, l'accessibilité (par la route en hiver et par barge en été) peut jouer un rôle dans le choix du moment de l'étude du site. 3 Dans l'Arctique de l'Est, l'horaire et le temps associé au transport maritime ne permettent pas de mobiliser l'équipement de forage, et le transport aérien devient la seule solution. Cependant, la présence d'une équipe de forage dans une collectivité constitue un facteur important dans la planification (et le coût) de l'étude du site.		

ANNEXE A
(informative)

Programme d'étude géotechnique
(articles 5.2 et 7.4 et annexe F)

La figure A.1 donne des lignes directrices sur la préparation du programme d'étude géotechnique en fonction du niveau de risque du projet lié aux changements climatiques (voir article 7.4). Ces niveaux de risque, établis selon le document CSA PLUS 4011, déterminent l'étendue de l'analyse des changements climatiques et les mesures additionnelles nécessaires à l'étude géotechnique pour caractériser adéquatement le site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art.

La liste de vérification de l'annexe F peut être utilisée avec le schéma présenté à la figure A.1.

Suite à la page suivante



ANNEXE B
(informative)

Changements climatiques et dégradation du pergélisol
(articles 7.2.2.6 et 8.2.1)

B.1 INTRODUCTION

Les températures de l'air dans l'Arctique se sont réchauffées beaucoup plus rapidement que dans le reste du monde (Rantanen et autres, 2022). Ce réchauffement a contribué au dégel et à la dégradation du pergélisol dans certaines parties des régions arctiques et subarctiques; la dégradation étant souvent exacerbée par les feux de forêt, les précipitations et les chutes de neige extrêmes, les changements du manteau neigeux et la construction (Biskaborn et autres, 2019).

Les conditions de dégel et de dégradation du pergélisol varient considérablement dans l'espace et dans le temps. Malheureusement, les données reflétant les changements dans le pergélisol plus profond (c.-à-d. > 1 m) sont limitées dans le temps et dans l'espace. Tout en reconnaissant les limites des données de surveillance disponibles et de la modélisation du pergélisol, la présente norme fournit les bonnes pratiques recommandées pour l'évaluation et la gestion des divers risques auxquels sont exposés les fondations érigées en zone de pergélisol dans un contexte de changement climatique.

B.2 RISQUES POUR LES ZONES ARCTIQUES DANS UN CLIMAT CHANGEANT

Pendant des décennies, le développement communautaire, économique et industriel dans l'Arctique a reposé sur l'hypothèse que le pergélisol servirait de plateforme permanente et stable aux fondations. Cependant, la construction, le réchauffement de la température de l'air et d'autres changements climatiques entraînent une augmentation du dégel du pergélisol, ce qui menace à la fois les infrastructures existantes et les projets de construction futurs.

Une étude récente a estimé que de 30 % à 50 % des infrastructures essentielles situées dans les zones de pergélisol pourraient être mises en péril d'ici le milieu du siècle par le réchauffement climatique prévu (Hjort autres, 2022).

NOTE — Il convient de noter que l'étude a utilisé des cartes du pergélisol à l'échelle circumpolaire, qu'elle n'a pas pris en compte les critères de conception utilisés pour les infrastructures locales et régionales et que, ultérieurement, son objectif n'était pas de refléter les conditions et les risques à l'échelle régionale ou locale.

Cette étude recommande que les conditions géotechniques et géologiques, notamment l'évaluation de la sensibilité au dégel, soient étudiées avec précision et référencées dans l'espace pour guider la conception technique et la construction dans les zones de pergélisol dans un contexte de changement climatique.

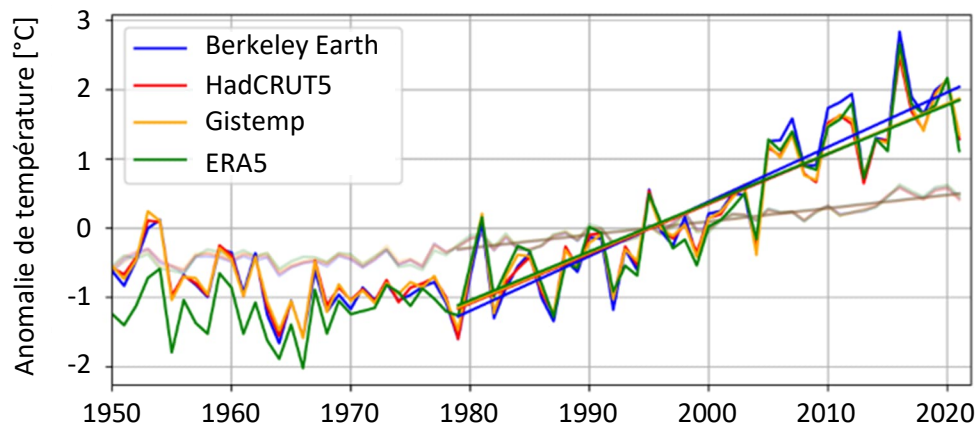
Une autre étude, basée sur les plus récents modèles climatiques ainsi que sur un modèle géotechnique pour évaluer les changements de la capacité portante du pergélisol et les risques d'affaissement du sol des infrastructures de l'Arctique circumpolaire, estime qu'environ 17 % à 33 % des routes et autres infrastructures linéaires risquent de subir des dommages importants dans l'avenir en raison de l'affaissement causé par le dégel, lui-même induit par les effets du climat (Streletskiy et autres, 2023). De plus, l'étude établit la corrélation entre les émissions globales de gaz à effet de serre (GES) plus élevées à des pourcentages de risque également plus importants.

En raison de l'emplacement des infrastructures et des types de pergélisol, (Streletskiy et autres, 2023) ont estimé que l'Alaska et le nord du Canada présentaient un pourcentage plus élevé de routes à risque sur le pergélisol discontinu que sur le pergélisol continu. Le coût total pour le remplacement des tronçons de route endommagés a été estimé à environ 12 milliards de dollars au Canada tandis qu'il a été prévu qu'environ 13 % à 17 % des bâtiments risquaient d'être affectés par la perte de capacité portante du pergélisol dans l'avenir en fonction du taux d'augmentation des GES. Il convient de noter que les nouvelles technologies peuvent contribuer à réduire les risques de dégel du pergélisol pour les ouvrages d'art tout au long de leur durée de vie prévue, comme le soulignent les autres documents traitant du pergélisol nordique de cette série (p. ex. : CSA S500, CSA S501) et les recherches en cours (p. ex. : Oswald et Coutts, 2024). Dans l'ensemble, les risques les plus élevés pour les infrastructures dans les zones de pergélisol nord-américaines concernent les zones côtières de faible altitude et le pergélisol riche en glace.

Outre les risques liés au dégel du pergélisol, les infrastructures situées dans les régions pergélisolées sont exposées à des risques supplémentaires en raison de l'érosion rapide des côtes, des nouveaux risques d'inondation, des glissements de terrain, qui sont des phénomènes nouveaux et accélérés, à l'assèchement des lacs situés au sommet des crêtes et à d'éventuelles ruptures de barrières de neige. Le réchauffement de l'Arctique étant plus rapide que celui d'autres régions, le dégel du pergélisol entraînera également des répercussions à l'échelle mondiale en raison de la libération de carbone. Étant donné que l'Arctique est le plus grand réservoir de carbone sensible au climat ou la plus grande source de stockage de carbone de la Terre et qu'il se réchauffe plus rapidement que dans les autres régions, des préoccupations existent à l'effet qu'une fonte importante du pergélisol ne libère également des émissions supplémentaires de GES, amplifiant ainsi les effets des changements climatiques à l'échelle mondiale (Meredith et autres, 2019; Nitzbon et autres, 2024; Canadell et autres, 2021).

B.3 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DÉGEL DU PERGÉLISOL

Considérant un phénomène climatique connu depuis longtemps et appelé *amplification arctique*, de récentes études sur le climat affirment que de nombreuses régions de l'Arctique se sont réchauffées à des taux variant de deux à quatre fois la moyenne mondiale (Rantanen et autres, 2022), comme l'illustre la figure B.1.



Source : « The Arctic has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe since 1979 », dans *Communications Earth and Environment* (traduction libre).

Figure B.1 — Évolution de la température moyenne annuelle dans l'Arctique

NOTE — Anomalies de température moyenne annuelle dans l'Arctique circumpolaire (66,5° à 90° Nord) [couleurs foncées] comparées aux moyennes de température mondiales (couleurs pâles) pour la période de 1950 à 2021, selon plusieurs ensembles de données d'observation. Les anomalies de température ont été calculées par rapport à la période standard de 30 ans qui s'étend de 1981 à 2010. Les lignes droites représentent les tendances linéaires de température dans l'Arctique et les régions du monde pour la période de 1979 à 2021, illustrant ainsi le fait que l'Arctique circumpolaire s'est réchauffé jusqu'à quatre fois plus que la moyenne mondiale depuis 1981.

Les tendances des températures au sol dans les régions arctiques sont largement cohérentes avec celles des températures de l'air. Par exemple, un réchauffement généralisé du pergélisol à la profondeur d'amplitude annuelle nulle a généralement été observé dans l'Arctique canadien au cours des trois à quatre dernières décennies, mais il comporte une variabilité spatiale et temporelle en ce qui concerne l'ampleur des changements (Smith, Duchesne et O'Neill, 2024). Les relations entre les températures de l'air et du pergélisol ne sont pas simples en raison de couches tampons diverses sur un site donné, y compris la végétation, la couche active et la couverture neigeuse ainsi que des défis liés à la surveillance à la collecte de données (Derksen et autres, 2019; Biskaborn et autres, 2019; Smith et autres, 2022). Les mesures du pergélisol à plus long terme à la profondeur d'amplitude annuelle nulle ou près de celle-ci identifient des augmentations des températures du sol dans les zones de pergélisol continu du Nunavut et de la région du nord de Mackenzie allant de 0,4 °C à 1 °C par décennie, tandis que des taux de réchauffement d'environ 0,1 °C par décennie ont été mesurés dans la partie centrale de la vallée du Mackenzie (Derksen et autres, 2019; Smith, Duchesne et O'Neill, 2024). Dans les zones de pergélisol continu les plus

froides, un réchauffement à la profondeur d’amplitude annuelle nulle atteignant environ 1 °C par décennie a été observé dans l’Extrême-Arctique.

L’épaisseur de la couche active a également augmenté d’environ 10 % depuis les années 2000 dans la vallée du Mackenzie (Derksen et autres, 2019). Des mesures prises à l’aide de sonde et des observations de la surface du sol dans cette vallée indiquent que la dégradation du pergélisol riche en glace se produit à de nombreux endroits, entraînant ainsi un affaissement substantiel de la surface et la formation généralisée de reliefs thermokarstiques (Derksen et autres, 2019; O’Neill et autres, 2023; Smith, Duchesne et O’Neill, 2024). Ces changements dans le pergélisol sont cohérents avec les changements observés en Russie, en Alaska et dans d’autres régions arctiques.

B.4 RYTHMES VARIABLES DE LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL

Si le réchauffement de la température moyenne de l’air peut mener à un dégel du pergélisol du haut vers le bas plus étendu et plus uniforme, de nombreuses études montrent aussi que le dégel progressif peut également être accompagné de formation de thermokarst, d’érosion thermique et de perte de masse; ces phénomènes sont toujours plus rapides et ils se produisent à des échelles qui diffèrent du dégel progressif, dans le temps et dans l’espace (Burn, 2021; Kokelj et autres, 2023). Ce dégel plus rapide, menant à des paysages formés par des thermokarsts, est à prévoir dans les zones de pergélisol riches en glace (Lewkowicz et Way, 2019; Farquharson et autres, 2019; Rodenhizer et autres, 2022). Les diverses caractéristiques du thermokarst comprennent l’affaissement du sol, les ravins d’érosion, les éboulements ou les glissements de terrain rétrogressifs causés par le dégel, la formation de taliks, l’apparition de nouveaux lacs, l’agrandissement et même l’assèchement occasionnel de lacs et autres perturbations (Hjort et autres, 2022).

Le dégel plus rapide et le déclenchement de processus thermokarstiques variables dans l’espace et dans le temps surviennent souvent à la suite d’événements climatiques déclenchés par des conditions météorologiques extrêmes ou des perturbations (Rodenhizer et autres, 2022). Ces conditions météorologiques extrêmes peuvent inclure des températures anormalement chaudes pendant la saison du dégel (Lewkowicz et Way, 2019; Farquharson et autres, 2019), des feux de forêt (Smith, Riseborough et Bonnaventure, 2015; Turetsky et autres, 2020; Young et autres, 2022), des précipitations excessives et des événements pluvieux extrêmes (Kokelj et Jorgenson, 2013; Douglas, Turetsky et Koven, 2020; Magnússon et autres, 2022; Kokelj et autres, 2015; Hamm et autres, 2023), des inondations côtières (Zheng et autres, 2019; Guimond et autres, 2021) et des hivers anormalement enneigés (Jorgenson et autres, 2020; Parmentier et autres, 2024). Les travaux de construction eux-mêmes peuvent également déclencher ou accélérer les processus thermokarstiques (Schnabel, Goering et Dotson, 2020; Kanevskiy et autres, 2022). Les caractéristiques du thermokarst varient considérablement en fonction de facteurs spécifiques au site, tels que la topographie, les caractéristiques du sol, la teneur en glace du sol, l’érosion et les processus de thermo-érosion.

Un collectif regroupant plusieurs partenaires afin de cartographier le thermokarst dans les Territoires du Nord-Ouest a estimé qu’une grande partie des sols pergélisolés de l’ouest de l’Arctique canadien sont largement vulnérables au dégel (Kokelj et autres, 2021). D’autres études

menées dans l'Arctique canadien indiquent que, malgré les températures très froides du pergélisol (< 10 °C), les zones de pergélisol froid, présentant de la glace de sol massive près de la surface, sont très vulnérables à une dégradation rapide du pergélisol et à la formation de thermokarsts (Farquharson et autres, 2019; Nitzbon et autres, 2020).

Dans le contexte actuel de changements climatiques, il est prévu que les processus de dégel du pergélisol dans l'Arctique canadien continueront d'affecter de vastes zones d'ici le milieu du siècle, ce qui entraînera des risques accrus pour les fondations (Derksen et autres, 2019; Kokelj et autres, 2021). Dans son rapport, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [Meredith et autres, 2019] estime qu'environ 80 % du pergélisol de l'Arctique circumpolaire dégèlera progressivement sous l'effet des changements climatiques, mais qu'environ 20 % des régions arctiques, comportant un pergélisol relativement riche en glace risquent d'être exposées à un dégel et à un affaissement rapides.

B.5 DÉGRADATION DU PERGÉLISOL, RISQUES ET NORMES CANADIENNES

Puisque le rythme futur des changements climatiques dépend des scénarios relatifs aux émissions de GES à l'échelle mondiale, le document CSA PLUS 4011 et les différentes normes canadiennes sur le pergélisol recommandent que la conception technique se base sur les effets des changements climatiques projetés pour les prochaines décennies ou pour la durée de vie prévue des fondations. Le guide et les normes recommandent également que ces estimations soient accompagnées d'une surveillance efficace du pergélisol afin d'informer les propriétaires du comportement de l'infrastructure pendant sa durée de vie utile.

Historiquement, les lignes directrices et les normes canadiennes portant sur les risques pour les infrastructures dans les zones de pergélisol ont toujours considéré un dégel graduel et uniforme en réponse aux augmentations prévues de la température de l'air (Groupe CSA, 2019). Toutefois, dans certaines régions plus sensibles au dégel, comme les régions côtières, le pergélisol peut se dégrader à un rythme sans précédent (Lewkowicz et Way, 2019). Alors que le dégel progressif du haut vers le bas peut affecter quelques centimètres de la surface d'un site sur plusieurs décennies, les changements plus rapides peuvent affecter les surfaces de quelques mètres sur des périodes beaucoup plus courtes (p. ex. : de quelques semaines à plusieurs années) [Lewkowicz et Way, 2019; Burn, 2021; Anthony, 2023]. Dans de tels cas, les pratiques d'ingénierie qui ne tiennent compte que du réchauffement graduel de l'air et du dégel progressif du pergélisol du haut vers le bas risquent de sous-estimer le taux de dégradation, ce qui amène à souligner l'importance de réaliser des évaluations plus poussées et plus détaillées des risques liés aux changements climatiques des sites pergélisolés, en incluant les exigences et les recommandations dans la présente norme.



Source : gouvernement des T.N.-O., ENR-Forest Management.

Photo B.1 — Photo aérienne montrant des affaissements causés par le dégel du pergélisol près de Fort Simpson (T.N.-O.)

B.6 NOTE SUR LE DOCUMENT CSA PLUS 4011 ET LA DÉGRADATION PROGRESSIVE DU PERGÉLISOL

Bien que le document CSA PLUS 4011 expose de manière générale les risques liés aux changements climatiques causés par le dégel progressif du pergélisol du haut vers le bas, il est possible que les futures mises à jour comportent des risques supplémentaires résultant d'une dégradation plus rapide du pergélisol. Ce document identifie également quatre niveaux de risque (1 à 4) pour les zones de pergélisol à évolution lente en fonction des TMAA locales. Par souci de simplicité, le document utilise les TMAA comme substituts aux TMAA, ce qui permet au document mis à jour d'utiliser les futures projections des TMAA moyennes (pour les TMAA) et de soutenir les « meilleures pratiques en matière de changements climatiques » en utilisant plusieurs projections de changements climatiques et différentes hypothèses liées aux émissions de GES pendant la durée de vie des fondations des bâtiments et des ouvrages d'art.

ANNEXE C
(informative)

Forage et échantillonnage
(article 8.1)

C.1 EXCAVATION DE PUIITS D'EXPLORATION

Des excavatrices sur roues et sur chenilles, équipées de marteaux hydrauliques, sont utilisées pour excaver des substrats rocheux friables. Pourvu que l'accès au site permette l'utilisation d'excavatrices, ces machines offrent une grande polyvalence et une excellente capacité pour l'évaluation à une faible profondeur des conditions du sous-sol dans les sols gelés et un substrat rocheux friable. En l'absence de marteaux hydrauliques ou de godets d'excavateur munis de dents défonceuses, les études du sous-sol dans le pergélisol froid (≤ -2 °C) à l'aide d'excavatrices courantes demandent habituellement trop de temps, à moins que les températures du sol ne soient que légèrement inférieures à 0 °C. Il est essentiel de choisir la taille du marteau et la configuration de l'excavatrice en fonction de la résistance à la compression uniaxiale prévue du matériau à excaver. Cela peut se faire en utilisant la documentation du fabricant si les plages probables de résistance du sol sont connues.

Comme des boteurs munis de dents défonceuses sont disponibles dans certaines collectivités nordiques, des études sur les matériaux d'emprunt granulaires sont parfois réalisées à l'aide de ce type de machine.

Un des principaux facteurs pouvant faire obstacle à l'utilisation d'excavatrices et de boteurs est l'exigence de restauration des puits d'exploration à la satisfaction des propriétaires du terrain et des autorités gouvernementales. Il convient d'éviter autant que possible l'écoulement d'eau dans les puits d'exploration et de les remblayer le plus rapidement possible après l'observation/l'échantillonnage/l'installation ou en présence de tout signe d'instabilité. Contrairement à la plupart des excavations de reconnaissance en zones tempérées, un puits d'exploration réalisé dans le pergélisol, s'il ne fait pas l'objet d'un remblayage et d'une surveillance adéquats, peut entraîner des modifications permanentes et destructrices du terrain, qui constituent un danger pour les grands mammifères et autres animaux sauvages. Par conséquent, l'excavation des puits d'exploration aux stades préliminaires et lors de la conception initiale représente une plus grande responsabilité que les opérations de forage.

C.2 FORAGE

C.2.1 GÉNÉRALITÉS

Les petites foreuses portatives peuvent être montées sur de petits véhicules ou déplacées avec un équipement comme un chargeur ou un chariot élévateur; si elles sont montées sur des patins, elles peuvent être remorquées par un chargeur ou un boteur. Nombre de petites foreuses

peuvent aussi être héliportées. Les foreuses portatives montées à l'arrière d'un Nodwell ou d'un autre type de véhicule à chenilles permettent de forer dans des endroits éloignés dans des conditions hivernales sans recourir au transport par hélicoptère.

Les types d'équipement de forage suivants ayant déjà été utilisés pour des études géotechniques dans les régions arctiques et subarctiques incluent :

- a) de l'équipement de forage portatif;
- b) des foreuses à percussion pneumatique chenillée;
- c) des tarières — forage à tarière creuse ou pleine;
- d) des foreuses soniques — forage par vibrations à haute fréquence;
- e) des foreuses à diamant — forage au diamant.

Il peut être extrêmement difficile d'effectuer des forages dans le pergélisol et d'extraire des échantillons gelés non remaniés; il convient donc que ces travaux soient confiés à des foreurs d'expérience.

C.2.2 ÉQUIPEMENT DE FORAGE PORTATIF

Parfois, un équipement de forage petit, léger et portatif, qui peut être manié par une ou deux personnes, suffit. La Commission géologique du Canada (CGC) a créé un carottier modifié CRREL (*Cold Regions Research and Engineering Laboratory*). Le carottier CRREL consiste en un carottier creux en acier auquel est soudée une tarière à double hélice. Fixé à une tête mécanique, le carottier CRREL peut extraire une carotte continue de haute qualité dans la neige ou la glace ainsi que dans les sols organiques ou les sols minéraux à grains fins. L'inconvénient du carottier CRREL est qu'il ne fonctionne pas bien dans les sols grossiers, graveleux, non gelés ou contenant une quantité importante d'eau non gelée. De plus, le forage peut être ralenti par le manque de place pour les déblais à l'extérieur du carottier, ce qui limite la longueur de la carotte extraite en une course.

La CGC utilise aussi le forage au diamant, avec un carottier dont l'outil de forage est en carbure diamanté. Fixé à une tête mécanique, ce carottier peut pénétrer un sol à grains fins comportant de la glace, du sable, des graviers et des blocs dont le diamètre peut atteindre 200 mm. Il s'agit d'un équipement standard qui produit des carottes continues de grande qualité. L'inconvénient de ce type de forage est que dans la glace pure, la carotte tend à se fragmenter, ce qui ralentit le forage, et dans un pergélisol dont la température est élevée ($> -2^{\circ}\text{C}$), la carotte tend à se désagréger en raison de son manque de cohésion et de la chaleur causée par la friction.

Ce type d'équipement permet d'extraire des carottes pleine longueur de 100 mm de diamètre presque sans altérations, dans une grande variété de sols gelés. La profondeur du forage est habituellement de 4 m à 5 m, mais il est possible d'atteindre 7 m dans des conditions optimales avec une équipe de forage de deux ou trois personnes. Lorsque le forage est effectué dans un sol à grains fins, comme l'argile, qui contient peu de glace, il se peut que la boue bouche le carottier

et ralentisse le forage. Concrètement, un contenu volumétrique en glace de 5 % à 10 % suffit pour obtenir de bonnes conditions d'échantillonnage dans un sol à grains fins. Il est possible de varier le diamètre et la longueur du carottier, et d'utiliser différents matériaux (carbure ou diamant) et configurations pour l'outil de forage.

La photo C.1 montre un petit équipement de forage portatif opéré par deux personnes. Ici, un moteur à essence pousse un carottier CRREL dans un sol gelé à grains fins.



Source : inconnue.

Photo C.1 — Équipement de forage portatif avec carottier CRREL

C.2.3 FOREUSES À PERCUSSION PNEUMATIQUES CHENILLÉES

Dans l'Arctique de l'Est, l'un des seuls types de foreuses disponibles sur place dans de nombreuses collectivités est la foreuse pneumatique chenillée. Cette foreuse est conçue pour creuser rapidement un trou dans la roche avant un dynamitage; elle est souvent utilisée pour obtenir des données sur les caractéristiques des sols pergélisolés en raison des coûts excessifs de la mobilisation d'un autre type d'équipement de forage en région éloignée. Même si elle est loin d'être idéale, elle permet d'estimer raisonnablement la teneur en humidité du sol ou du substrat rocheux. Ce type de foreuse ne fournit que de petites écailles de sol ou de roche, rejetées à la surface. Ces matériaux sont souvent dégelés, ou partiellement dégelés. Ils permettent donc d'estimer le type de sol, sa teneur en glace et l'épaisseur des dépôts meubles uniquement si le substrat rocheux est situé à une profondeur inférieure à la profondeur de pénétration. Ce type de

foreuse est chenillé et remorque souvent le compresseur qui actionne le marteau. La photo C.2 montre une foreuse pneumatique chenillée.



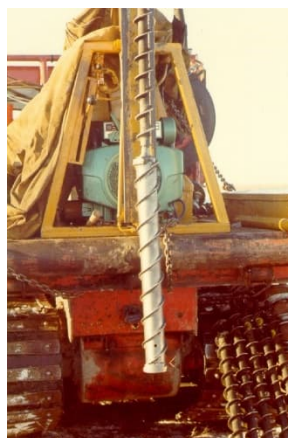
Source : inconnue.

Photo C.2 — Foreuse pneumatique chenillée

C.2.4 TARIÈRES

Les tarières sur camion, sur chenilles ou héliportées sont d'usage assez répandu dans les régions pergélisolées où les sols sont principalement à grains fins.

La foreuse Ranger est l'une des premières petites foreuses mises au point par Mobile Augers and Research Ltd., d'Edmonton. Cette foreuse a été utilisée pour différents projets d'étude du sous-sol le long de tracés d'oléoducs au Yukon, dans les Territoires du Nord-Ouest et au Nunavut, ainsi que pour certaines études réalisées pour l'oléoduc de Norman Wells. La photo C.3 illustre une foreuse Ranger.



Source : inconnue.

Photo C.3 — Petite tarière montée sur un transporteur à chenilles, installée avec une tarière pleine et un carottier CRREL (foreuse ranger)

La foreuse pèse environ 500 kg; elle peut être montée sur un camion ou un transporteur à chenilles. Étant légère, elle peut aussi être transportée en un seul voyage par un hélicoptère Jet Ranger 206 de Bell ou l'équivalent.

La foreuse Ranger est normalement dotée d'une tarière pleine de 100 mm ou 150 mm de diamètre. La profondeur de forage maximale dépend des conditions du sous-sol; toutefois, dans la plupart des matériaux, la limite pratique est de 5 m à 10 m. La foreuse Ranger n'est pas assez massive ou puissante pour forer efficacement dans des dépôts de gravier. Son utilisation se limite donc généralement aux silts, aux argiles et aux tills riches en argile.

Dans les sols non gelés et les sols peu cimentés par la glace, des échantillons remaniés peuvent être prélevés avec des tarières ou des tubes Shelby. La foreuse peut être configurée pour la réalisation d'essais de pénétration standards. Moyennant certaines modifications, la foreuse Ranger peut être utilisée pour forer avec des tarières creuses et pour le carottage du substrat rocheux.



Source : inconnue.

Photo C.4 — Petite tarière, transportable par véhicule tout-terrain

La foreuse d'avant-trou est un type de foreuse à tarière assez couramment utilisé dans la partie nord-ouest des Territoires du Nord-Ouest. La photo C.5 montre une foreuse à tarière d'avant-trou typique. Ces grandes foreuses sont souvent disponibles dans les régions de la vallée du Mackenzie et du delta du Mackenzie, où elles sont utilisées pour percer des colonnes de surface ou des caves avant-puits pour l'utilisation d'équipements d'exploration pétrolière et gazière. Elles sont aussi parfois utilisées pour forer des trous d'installation pour des pieux favorisant la géliadhérence. Ces foreuses ne peuvent extraire que des échantillons remaniés, mais cela est parfois suffisant pour déterminer au moins la quantité de glace de sol présente dans le pergélisol. Comme elles sont disponibles dans l'Arctique de l'Ouest, elles permettent d'éviter le coût élevé associé à la mobilisation d'un équipement de forage plus approprié dans les cas où un système de fondations simple convient au bâtiment projeté.



Source : inconnue.

Photo C.5 — Foreuse à tarière d'avant-trou

Il existe des tarières plus grosses, plus lourdes et plus puissantes que les foreuses Ranger et autres petites foreuses à tarière, qui sont donc plus aptes à pénétrer dans certains tills et dépôts granulaires. Ces grosses foreuses peuvent également être montées sur des camions ou des transporteurs à chenilles; sur de courtes distances, elles peuvent être déplacées par un chargeur ou un chariot élévateur, ou remorquées par un buteur. Le trou est généralement foré à l'aide d'une tarière pleine ou creuse de 150 mm de diamètre. La profondeur de forage maximale dépend des conditions du sous-sol; toutefois, dans les matériaux gelés à grains fins, la limite pratique est d'environ 15 m. Certaines de ces foreuses peuvent être reconfigurées pour le carottage du substrat rocheux.

Les tarières plus grosses sont souvent montées sur des camions ou des transporteurs à chenilles, comme le montre la photo C.6.



Source : inconnue.

Photo C.6 — Tarière typique montrée sur un transporteur à chenilles

Dans les sols non gelés, des échantillons peuvent être obtenus à l'aide de techniques d'échantillonnage classiques, y compris les essais de pénétration standards (EPS) et l'échantillonnage avec des tubes Shelby. Si la température du pergélisol est élevée ($> -2^{\circ}\text{C}$), on peut obtenir des échantillons ponctuels de sols gelés remaniés à l'aide de la tarière ou d'échantillonneurs conventionnels pour sols non gelés.

Dans les sols gelés sans gravier, le trou peut être foré avec un carottier CRREL. La photo C.7 montre un carottier CRREL et un échantillon de pergélisol non remanié de sol gelé à grains fins.



Source : inconnue.

Photo C.7 — Carottier CRREL et échantillon de pergélisol non remanié de sol gelé à grains fins

C.2.5 FOREUSES À DIAMANT

La foreuse BBS-1, l'une des premières foreuses à diamant héliportées, a été développée par Midwest Drilling de Winnipeg (aujourd'hui Major Drilling Ltd.).

La foreuse BBS-1 a été largement utilisée dans les années 1970 et 1980 pour étudier le sous-sol le long de nombreux tracés d'oléoduc proposés dans tout l'Arctique canadien. En raison de l'utilisation répandue de ce type de foreuse en exploration minière, de nombreuses entreprises ont des foreuses à diamant semblables qui peuvent être utilisées pour des études géotechniques. Il existe aujourd'hui de nombreux types de foreuses à diamant de toutes les tailles dans l'Arctique canadien, notamment dans les secteurs où l'exploration minérale est courante; il est donc parfois possible de mobiliser ces foreuses sur une distance relativement courte pour effectuer une étude du site dans une municipalité. Les foreuses à diamant permettent la réalisation d'études géotechniques dans des tills granulaires et des dépôts fluvioglaciers dérivés de roches ignées et métamorphiques. Les blocs et les galets sont répandus dans ces matériaux et compliquent considérablement le forage avec la plupart des autres types d'équipement de forage. Les foreuses à diamant permettent également l'échantillonnage du substrat rocheux sur lequel reposent les dépôts meubles. Un système de réfrigération peut être utilisé avec la foreuse, dans lequel de l'air ou un fluide réfrigéré peut servir de fluide de forage pour éviter le dégel de la carotte. La photo C.8 montre une foreuse à diamant typique utilisant un système à fluide réfrigéré. L'utilisation de saumure refroidie comme fluide de forage était courante jusqu'à récemment. En raison de l'imposition de restrictions environnementales, des fluides écologiques à bas point de congélation (notamment des fluides à base de glycol, ou même un fluide à base de jus de betterave) commencent à être utilisés comme fluides de forage.



Source : inconnue.

Photo C.8 — Foreuse à diamant typique à saumure refroidie

Les foreuses à diamant sont efficaces dans les sols gelés à granulométrie fine ou grossière; elles ne conviennent toutefois pas au forage et à l'échantillonnage des dépôts meubles non gelés ni à

l'échantillonnage de la couche active, à moins que le forage ne soit réalisé en hiver. La photo C.9 montre la grande qualité des échantillons non remaniés qu'il est possible d'obtenir avec une foreuse à diamant à saumure refroidie dans des matériaux de tills granulaires gelés, très difficiles à échantillonner.



Source : inconnue.

Photo C.9 — Échantillons non remaniés de grande qualité de matériaux de tills granulaires obtenus avec une foreuse à diamant à saumure refroidie

C.2.6 FOREUSES SONIQUES

La première foreuse sonique a été mise au point par la compagnie Midwest Drilling de Winnipeg (aujourd'hui Major Drilling Ltd.). Cette foreuse hélicoptée a été largement utilisée pour des études du sous-sol le long de la portion du gazoduc Polar Gas située dans les îles de l'Arctique, où le sous-sol se caractérise aussi bien par des argiles à plasticité élevée que par des grès et calcaires résistants du substrat rocheux.

Plusieurs entreprises de forage exploitent maintenant des foreuses soniques de diverses tailles. Les foreuses soniques utilisent toujours un oscillateur hydraulique pour produire une force axiale et des vibrations à haute fréquence qui sont transmises le long d'une tige de forage creuse jusqu'à l'outil de forage. La tige de forage est avancée de 1 m à 3 m avant d'être retirée du trou. La carotte de sol à l'intérieur de la tige est ensuite dégagée par vibrations et recueillie. La photo C.10 montre une foreuse sonique relativement petite montée sur un transporteur à chenilles.



Source : inconnue.

Photo C.10 — Petite foreuse sonique sur un transporteur à chenilles

Les foreuses soniques produisent des carottes continues dans de nombreux types de dépôts meubles, y compris les tills gelés à grains grossiers riches en glace. La vitesse d'avancement de l'outil de forage et la profondeur de forage maximale dépendent principalement de la densité du sol. Dans les dépôts meubles, en particulier ceux qui comportent un excès de glace, la vitesse d'avancement du forage est assez rapide. Les foreuses soniques pulvérisent les grandes pierres au lieu de les carotter et ne pénètrent pas efficacement dans la plupart des formations du socle rocheux. La profondeur de pénétration maximale dans les dépôts meubles est habituellement de 30 m.

Les carottes récupérées durant le forage fournissent un registre continu de la stratigraphie du sous-sol, mais il arrive, selon la structure du sol, que les carottes gelées soient brisées et remaniées.

C.2.7 FOREUSES HÉLIPORTABLES

Dans certains cas, lorsque les sites ne sont accessibles que par hélicoptère, l'équipement pouvant être transporté est limité en matière de poids et de dimensions. Les foreuses géotechniques héliportables et les outils qui y sont associés sont donc conçus pour être transportés de cette façon.

Les systèmes héliportables offrent des avantages en matière d'accessibilité et de mobilité, mais ce type d'équipement a ses limites :

- a) Limites de poids : les hélicoptères ayant une capacité de charge limitée, le matériel de forage héliportable est léger et compact, ce qui peut en restreindre la taille et les capacités.
- b) Temps de montage et de démontage : le montage et le démontage du matériel de forage héliportable demandent souvent plus de temps que du matériel stationnaire plus imposant, ce qui diminue l'efficacité globale de l'opération de forage, particulièrement dans les situations où une installation rapide est essentielle.
- c) Profondeur et puissance limitées : la profondeur et la puissance de forage des appareils héliportables peuvent être limitées par rapport à celle des appareils de forage au sol plus imposants.
- d) Contraintes liées aux conditions météorologiques : les opérations en hélicoptère dépendent grandement des conditions météorologiques. Les conditions défavorables telles que de forts vents ou une faible visibilité peuvent empêcher le transport de l'équipement de forage vers des sites éloignés ou à partir de ces sites et entraîner des retards dans les opérations.
- e) Coûts : le transport par hélicoptère peut faire monter le coût des opérations de forage héliportées. Le coût par projet de forage peut être plus élevé que pour l'équipement au sol, ce qui peut réduire la faisabilité des solutions héliportables.

Malgré ces limites, l'équipement de forage géotechnique héliportable demeure une solution avantageuse pour atteindre les sites éloignés ou difficiles d'accès où les autres moyens de transport peuvent s'avérer peu pratiques. Il est recommandé de baser le choix d'utiliser de l'équipement héliportable sur une évaluation attentive des exigences et des contraintes propres au projet.

C.3 MÉTHODES DE FORAGE DES SOLS

Le tableau C.1 décrit des considérations concernant les techniques de forage et d'échantillonnage possibles pour les études géotechniques ainsi que les avantages et les limites de leur utilisation dans des sols gelés et non gelés. L'équipement et la technique de forage les mieux adaptés à un projet donné dépendent des facteurs suivants :

- a) les objectifs de l'étude (étape de la conception, portée de l'étude et exigences concernant les échantillons);
- b) les besoins en matière d'échantillons;
- c) l'emplacement du site et l'accès à ce dernier;
- d) les conditions du sous-sol anticipées;
- e) les considérations d'ordre économique.

Quand l'accès au site le permet, les foreuses multifonctionnelles classiques montées sur des véhicules à roues ou à chenilles sont à privilégier. Cependant, pendant la conception préliminaire et les premiers stades de la conception, le coût de l'utilisation de ces foreuses est parfois trop élevé. Des foreuses portatives plus petites, qui sont moins polyvalentes, mais plus faciles à déplacer peuvent être adéquates pour des plages de données restreintes.

Tableau C.1

Comparaison d'équipements et de méthodes de forage
(volet 1 de 6)

Équipement de forage	Applications	Méthodes de forage	Types d'échantillonnage et qualité	Avantages	Limites
Foreuses rotatives	Prélèvement de tout type d'échantillons de sol et de substrat rocheux. Forage de trous pour de nombreux types d'essais <i>in situ</i> et de carottage. Forage de trous inclinés dans les sols ou le substrat rocheux.	Outil de forage à l'extrémité d'une tige de forage rotative mécanique à laquelle est appliquée une pression hydraulique. Le trou est normalement maintenu ouvert par la boue de forage, bien que de l'air ou de l'eau puissent être utilisés dans certains cas.	Les méthodes d'échantillonnage comprennent typiquement le carottier fendu et le tube Shelby dans des sols gelés faiblement cimentés (chauds). Des carottes de bonne qualité peuvent être récupérées dans les sols gelés chauds à haute teneur en glace et dans le substrat rocheux friable si la foreuse est équipée d'un carottier.	Le forage est relativement rapide. La foreuse peut pénétrer dans la plupart des types de matériaux. L'opérateur peut délimiter les blocs et les galets selon la progression du trépan ou de sa résistance.	Ces foreuses sont difficiles à utiliser en milieu marécageux ou accidenté. Les foreuses sur camion nécessitent un chemin d'accès et une plateforme de niveau pour le forage. Les déblais sont fortement remaniés et peuvent être difficiles à exploiter. L'usure de l'outil de forage peut entraîner des coûts élevés. La pénétration à des profondeurs importantes dans les sols résistants ou des couches de gravier est difficile, voire impossible dans les blocs et le substrat rocheux. Un refus de la foreuse est possible dans des substrats rocheux résistants. Ces foreuses ne conviennent généralement pas à l'échantillonnage de sols gelés très compacts.
Foreuse à tarière (continue à tige pleine)	Forage de trous petits à moyens pour l'obtention d'échantillons continus, mais remaniés. Foreuse normalement utilisée dans les sols cohérents suffisamment résistants pour prévenir l'affaissement du trou ouvert. Une foreuse lourde et puissante est utilisée pour creuser dans les sols gelés et le pergélisol.	Course rotative continue d'une tarière hélicoïde. Le retrait de tous les tronçons permet l'examen de tous les déblais de sol le long des tiges de la tarière. Possibilité d'ajouter un carottier CRREL pour l'extrémité de la tarière pour l'échantillonnage de sol non perturbé.	Les méthodes d'échantillonnage comprennent typiquement des échantillons ponctuels remaniés de sols gelés et dégelés recueillis au moyen d'une tarière ou d'un carottier fendu. Les échantillons ponctuels remaniés conviennent à l'évaluation du type de sol et du volume de glace visible, et à l'échantillonnage de sol pour les tests d'indice en laboratoire. Un carottier à tarière sèche (p. ex. : un carottier CRREL) peut être fixé au bout d'une tarière pleine pour récupérer des carottes de qualité dans les sols à haute teneur en glace à grains fins. L'échantillonnage par tube Shelby est possible dans les sols gelés chauds à grains fins.	Cette méthode permet une procédure rapide pour le sondage d'exploration dans les sols cohérents résistants et le substrat rocheux tendre. Échantillonnage par essai de pénétration standard (EPS) possible dans les sols gelés peu cimentés chauds quand le trou reste ouvert après le retrait de la tarière. Dans les sols à grains fins gelés, un carottier CRREL qui ne nécessite pas de fluide de forage peut être utilisé. Relativement peu coûteuse et rapide, cette méthode permet de classer les sols. Carottier CRREL — Carottes congelées non remaniées de haute qualité.	Le trou s'affaisse quand la tarière est retirée de sols granulaires cohérents peu liés (sols gelés chauds) ou sans cohésion. Les échantillons prélevés de la tarière sont remaniés. La pénétration à des profondeurs importantes dans les sols résistants ou des couches de gravier est difficile, voire impossible dans les blocs et dans le substrat rocheux. L'avancement de la tarière est lent dans les sols gelés bien liés et la tarière produit de la chaleur qui peut dégeler le pergélisol chaud et faire fondre la glace interstitielle. Les descriptions des sols et les échantillons obtenus à partir des déblais de la tarière ne peuvent pas être utilisés pour une évaluation appropriée de la structure du pergélisol et de ses propriétés. Le CRREL ne peut être utilisé que dans les sols de couverture à grains fins.

Tableau C.1

Comparaison d'équipements et de méthodes de forage
(volet 2 de 6)

Équipement de forage	Applications	Méthodes de forage	Types d'échantillonnage et qualité	Avantages	Limites
Foreuse à tarière à tige creuse	Forage de trous petits à moyens pour l'échantillonnage du sol.	Semblable à la tarière continue, mais le tube de poussée de la foreuse à tarière à tige creuse est plus profond dans le sol que la foreuse à tarière pleine.	Permet l'échantillonnage continu au fur et à mesure que la tarière pénètre dans le sous-sol. Peut offrir un meilleur portrait des conditions du sol que certaines autres méthodes de forage.	Méthode rapide dans les sols peu à moyennement résistants. EPS et récupération d'échantillons non remaniés possibles dans les sols gelés peu cimentés (chauds). Peuvent faire face à toute une série de conditions souterraines, y compris les sols qui s'affaissent et les eaux souterraines.	Cette méthode a un avancement lent dans la plupart des sols gelés. L'échantillonnage à l'aide de tarières à tige creuse doit être effectué avec prudence, car elle peut rester bloquée par le gel dans le trou. La pénétration à des profondeurs importantes est difficile dans les sols résistants ou les couches de gravier, voire impossible dans les blocs et le substrat rocheux. L'outil de forage de la tarière peut causer un remaniement considérable.
Tarières de grand diamètre (à godet, à disque, à hélicoïde, à caisson)	Forage de trous de grand diamètre pour le prélèvement d'échantillons remaniés et l'examen des couches de sol dans les sols cohérents où le trou reste ouvert.	La tarière rotative de grand diamètre découpe le sol pour former le trou.	Les échantillons des tronçons sont remaniés. Il est difficile de prélever des échantillons de sol gelé non remanié. Il peut être possible d'abaisser d'autres appareils d'échantillonnage dans le trou, mais cela nécessite plus d'équipement et peut s'avérer compliqué.	Méthode rapide qui convient aux conditions de gel et de pergélisol. Permet l'examen détaillé des conditions du sous-sol par l'observation des déblais de la tarière	La profondeur est limitée par les eaux souterraines et les conditions propres au substrat rocheux. Cette méthode ne convient pas aux sols sans cohésion, aux argiles tendres ou aux sols organiques. Les foreuses imposantes requièrent un accès facile. Un refus de la tarière est possible dans les blocs et le substrat rocheux.
Foreuses de battage (y compris de type Becker)	Forage de puits d'eau Sondages d'exploration à travers des galets et des blocs.	Foreuse de battage de pieux utilisée pour enfoncer un tubage double pendant que de l'air circule dans l'espace annulaire pour expulser les déblais du tubage intérieur.	Sans objet	La pénétration est relativement rapide dans les galets et dans les blocs. Cette méthode convient bien aux sondages d'exploration dans des tills gelés non plastiques. Il est possible d'obtenir une mesure relative de la résistance en notant le nombre de coups de battage pour une distance de pénétration donnée.	Les limites sont semblables à celles des foreuses à percussion, mais l'avancement est beaucoup plus rapide. L'avancement est très lent dans les sols cohérents/plastiques. Les EPS et le prélèvement d'échantillons non remaniés ne sont possibles que dans le pergélisol chaud à grains fins. Il est impossible d'y adapter un carottier CRREL.

Tableau C.1
Comparaison d'équipements et de méthodes de forage
(volet 3 de 6)

Équipement de forage	Applications	Méthodes de forage	Types d'échantillonnage et qualité	Avantages	Limites
Foreuses à percussion pneumatiques (y compris les appareils de forage sismique et les foreuses pneumatiques chenillées)	Forage de trous pour ancrage dans le substrat rocheux ou dynamitage.	La tête de la foreuse écaille et broie le substrat rocheux à chaque coup de battage. Les fragments de roches sont retirés par pression d'air.	Les échantillons grandement remaniés sont de petits éclats qui ont été projetés à la surface. En général, ils ne peuvent pas être utilisés pour l'échantillonnage ou les essais.	Procédure rapide pour le forage de trous de faible diamètre dans le substrat rocheux dur. Peut être utilisée pour déterminer l'épaisseur des dépôts meubles qui reposent sur le substrat rocheux. Méthode la plus efficace pour le substrat rocheux dur et massif.	Il est possible de perdre toute la tige de forage dans les dépôts meubles contenant des blocs, de la roche fracturée désagrégée, des lentilles d'argile, du shale saturé, etc. Il est impossible de prélever des échantillons non remaniés.
Foreuses à diamant	Carottage continu de la roche et des dépôts meubles gelés pour des études géotechniques.	Le carottage continu se fait en installant un ou plusieurs tubages et en faisant avancer un carottier triple ou double pour forer et échantillonner à des intervalles de 1,5 m à 3 m. Le système de forage utilise de la boue, un fluide ou de l'air pour retirer les débris du trou. La boue, la saumure ou l'air peuvent être refroidis pour maintenir les échantillons à la température voulue.	Collecte d'échantillon de haute qualité. Cette méthode est efficace pour préserver la glace du sol dans la carotte gelée. Il est possible d'effectuer des EPS.	C'est la méthode la plus efficace pour la récupération de carottes gelées avec le moins de remaniement mécanique ou thermique si un fluide de forage refroidi est utilisé. Cette méthode produit une carotte presque continue. De nombreuses foreuses sont hélicoptées.	Cette méthode nécessite l'utilisation d'un fluide de forage et d'un système de refroidissement. Le transport et l'utilisation de la foreuse est coûteuse. Le forage est lent et l'efficacité du forage dépend de la taille de l'équipement de forage. Il est difficile de récupérer des échantillons dans les dépôts meubles non gelés (couche active). Les EPS nécessitent généralement que des modifications soient apportées à l'équipement de forage.

Tableau C.1

Comparaison d'équipements et de méthodes de forage
(volet 4 de 6)

Équipement de forage	Applications	Méthodes de forage	Types d'échantillonnage et qualité	Avantages	Limites
Foreuses soniques	Système rapide et polyvalent pour forer des trous tubés de 150 mm à 300 mm de diamètre jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 150 m.	Des oscillations mécaniques de haute fréquence sont produites dans une tête spéciale qui transmet les vibrations résonnantes et la puissance de rotation à l'outil de forage. Des vitesses d'avancement élevées sont possibles sans fluide de forage ou d'air.	Des carottes continues sont récupérées. La stratigraphie est intacte, mais les carottes peuvent être remaniées ou non selon la difficulté de forage et le niveau d'expérience du foreur. En raison des vibrations et du chargement de cycle continu, les échantillons de sol et de roche sont susceptibles d'être remaniés et peuvent ne pas convenir à certains essais spécialisés en laboratoires.	Cette méthode est utilisée avec succès dans les régions pergélisolées. Cette méthode fournit une pénétration rapide dans tous les types de sols, dont des blocs et les galets. Certaines foreuses permettent l'échantillonnage par enfoncement d'un tube Shelby ainsi que l'échantillonnage au piston hydraulique et à l'aide d'un carottier fendu. Cette méthode produit jusqu'à 80 % moins de rejets qu'avec les méthodes conventionnelles, ce qui réduit les coûts d'élimination des déchets contaminés, qui sont élevés. Certaines foreuses sont hélicoptées.	Le système de forage produit des quantités importantes de chaleur dans le sol ou le substrat rocheux, de sorte que le régime thermique des carottes continues est souvent modifié. Bien qu'elle permette de forer à travers les blocs et le substrat rocheux, cette méthode est lente et très coûteuse. Les foreuses soniques pulvérisent les galets, les fragments de roche et les blocs, modifiant ainsi la distribution granulométrique des échantillons. Il convient donc d'être prudent lors de l'évaluation de la taille et de l'angularité des graviers. En pratique, il est nécessaire de pouvoir effectuer un carottage avec le même équipement de forage dans le substrat rocheux et les blocs. Les foreuses imposantes sur camion nécessitent un chemin d'accès et une plateforme de niveau pour le forage. Les vibrations risquent de causer des problèmes mécaniques à l'équipement de forage. Le forage sonique génère souvent une chaleur considérable, de sorte que la teneur en eau des échantillons récupérés sera probablement inférieure à la teneur in situ de la formation.

Tableau C.1
Comparaison d'équipements et de méthodes de forage
(volet 5 de 6)

Équipement de forage	Applications	Méthodes de forage	Types d'échantillonnage et qualité	Avantages	Limites
Foreuses hélicoptables	Sites accessibles uniquement par voie aérienne, sans accès terrestre.	Diverses méthodes de forage (tarière, foreuse à diamant, foreuse sonique) peuvent être utilisées à condition que le matériel puisse être transporté par hélicoptère. Les hélicoptères ont une capacité de charge limitée, donc l'équipement de forage doit être léger et compact, ce qui peut en restreindre la taille et les capacités.	La méthode de forage et les techniques d'échantillonnage possibles déterminent et influencent le type d'échantillons et leur qualité.	L'équipement de forage géotechnique hélicoptable demeure une solution avantageuse pour atteindre les sites éloignés ou difficiles d'accès, où les autres moyens de transport peuvent s'avérer peu pratiques. Il est recommandé de baser le choix d'utiliser de l'équipement hélicoptable sur une évaluation attentive des exigences et des contraintes propres au projet	Temps de montage et de démontage : Le matériel de forage hélicoptable demande souvent plus de temps qu'un matériel stationnaire plus imposant, ce qui diminue l'efficacité globale de l'opération de forage, particulièrement dans les situations où une installation rapide est essentielle. Contraintes liées aux conditions météorologiques : Les opérations en hélicoptère dépendent grandement des conditions météorologiques. Les conditions défavorables, comme de forts vents ou une faible visibilité, peuvent empêcher le transport de l'équipement de forage vers des sites éloignés ou à partir de ces et entraîner des retards dans les opérations. Vitesse de forage : Leur petite taille et les restrictions de poids peuvent rendre les opérations de forage plus lentes qu'avec de plus grandes foreuses. Coûts : Le transport par hélicoptère peut contribuer à l'augmentation des coûts des opérations de forage hélicoptées. Le coût par projet de forage peut être plus élevé que pour l'équipement au sol, ce qui peut réduire la faisabilité des solutions hélicoptables.

Tableau C.1

Comparaison d'équipements et de méthodes de forage
(volet 6 de 6)

Équipement de forage	Applications	Méthodes de forage	Types d'échantillonnage et qualité	Avantages	Limites
Foreuses portatives	Pour forer des trous étroits de façon rapide et économique sans utiliser d'équipement lourd tout en remaniant le sol de façon minimale.	Plusieurs types de foreuses portatives existent et les modèles disponibles sur le marché se multiplient. Les foreuses fonctionnent typiquement à l'essence, mais certaines options électriques ou à batterie sont disponibles. Par exemple : carottier à fenêtre, foreuse en sac à dos, système de forage Talon. Une foreuse en sac à dos fonctionne à essence et requiert une batterie grosse et lourde pour faire fonctionner la pompe à eau.	Permet de prélever des carottes dans le pergélisol à grains fins jusqu'à une profondeur de 5 m avec une foreuse de 50 mm, puis de forer avec une tarière de 25 mm dans le pergélisol à grains fins jusqu'à une profondeur de 7 m.	Équipement efficace, compact et à faible impact. Assez léger pour être transporté par une seule personne et capable de forer à travers plusieurs types de roche, de glace et de terre dans le pergélisol. Équipement mobile et polyvalent.	Profondeur de forage typique de moins de 5 m, mais certains appareils peuvent atteindre 10 m dans des conditions de sol idéales et avec les bons accessoires. La récupération d'échantillons remaniés ne fonctionne pas bien dans les sols grossiers, graveleux, non gelés ou contenant une quantité importante d'eau non gelée. Les tiges de forage et les attaches s'usent et se brisent souvent. Les inconvénients de cette méthode de forage sont que dans la glace pure, la carotte tend à se fragmenter, ce qui ralentit le forage, et dans un pergélisol dont la température est élevée (> -2 °C), la carotte tend à se désagréger en raison de son manque de cohésion et de la chaleur causée par la friction. Selon la méthode de forage et l'emplacement, il peut être difficile de trouver une source d'eau ou de transporter un réservoir d'eau.

C.4 MÉTHODES DE FORAGE DANS LE SUBSTRAT ROCHEUX

La résistance des roches sédimentaires intactes à l'état gelé peut être supérieure de 80 % à la résistance mesurée à l'état non gelé. Les masses de roche gelées qui sont fracturées et météorisées présentent également une plus grande résistance à l'état gelé qu'à l'état non gelé. Il est donc risqué, dans le pergélisol, de présumer que tous les types de substrat rocheux sont convenables à l'exception des substrats rocheux les plus friables. Le caractère « convenable » d'un substrat rocheux doit donc être établi à la lumière de mesures fiables de la température du sol, d'observations des structures favorables et de données suffisantes sur la résistance à la compression uniaxiale reposant sur des mesures directes et indirectes. Cela nécessite l'échantillonnage des blocs dans des puits d'exploration ou sous forme de carottes non remaniées obtenues par forage au diamant ou par forage sonique. L'installation de câbles de température du sol dans les trous de forage est la meilleure approche pour déterminer les températures du substrat rocheux. Le tableau C.2 fournit la liste de l'équipement de forage qui peut être utilisé pour l'étude du substrat rocheux.

Tableau C.2

Équipements de forage pour l'étude du substrat rocheux

Équipements de forage montés sur camion ou sur chenilles	Commentaires
Foreuse sonique	Le remaniement des échantillons est parfois important; le forage est lent.
Foreuse Becker	Ne convient pas à l'échantillonnage.
Foreuse rotative	Évaluation basée sur le comportement de la foreuse perçu par l'opérateur; la plupart des foreuses rotatives sont converties au forage au diamant.
Foreuse à diamant	Couramment utilisée pour des échantillons de substrat rocheux de bonne qualité.
Tarière pleine	Ne convient pas à l'échantillonnage; peut sonder certaines roches météorisées.
Tarière creuse	Ne convient pas à l'échantillonnage; peut sonder certaines roches météorisées.
Excavatrice avec marteau	Possible, mais n'est pas couramment utilisée à cette fin.
Grande tarière (Texoma)	Ne convient pas pour l'échantillonnage; peut sonder certaines roches météorisées.
Foreuse à percussion (sismique ou pneumatique chenillée)	Ne se prête pas au carottage; peut servir à distinguer la roche météorisée d'un substrat rocheux résistant.

ANNEXE D
(informative)

Méthodes d'étude géophysique au sol
(article 8.4)

Quand elles sont utilisées dans le bon contexte, les méthodes d'étude géophysique au sol peuvent ajouter une valeur considérable aux forages et aux puits d'exploration en permettant d'améliorer l'interpolation des conditions du sol entre les forages ou puits d'exploration et de mieux délimiter les anomalies du sous-sol. Les études géophysiques peuvent être menées avant un programme de forage ou d'excavation de puits d'exploration, à titre indicatif.

NOTE — Il existe aussi des méthodes aériennes d'étude géophysique qui peuvent être utilisées pour de grands barrages ou de grandes infrastructures linéaires. Pour les bâtiments, on obtient une meilleure résolution avec les méthodes d'étude géophysique au sol.

Dans un milieu pergélisolé, les études géophysiques sont couramment utilisées pour établir la présence et la distribution (horizontale et verticale) de pergélisol, de masses de glace, de pergélisol riche en glace et de taliks. Les méthodes d'étude géophysique sont également utilisées pour mesurer les propriétés physiques et mécaniques des matériaux gelés et non gelés et d'autres problèmes techniques ou environnementaux divers, comme l'emplacement des écoulements d'eaux souterraines, des vides et des fractures. En raison de l'influence de l'état (gelé ou non) de l'eau contenue dans un milieu pergélisolé, de nombreuses propriétés physiques et mécaniques des sols dépendent de la température. C'est pourquoi l'expert-conseil en géotechnique doit avoir une connaissance globale du milieu (stratigraphie, caractéristiques générales des sols [granulométrie, porosité, teneur en eau, température, salinité, etc.]) pour analyser les données géophysiques, faute de quoi il pourrait en faire une interprétation erronée. Les méthodes d'étude géophysique complètent donc les forages et les puits d'exploration et sont rarement utilisées de manière isolée.

Le tableau D.1 présente un survol des principales méthodes d'étude géophysique, de leurs caractéristiques et de leurs applications possibles dans des milieux pergélisolés. Le tableau D.1 est tiré de « *Advances in Geophysical Methods for Permafrost Investigations* », dans *Permafrost and Periglacial Processes*. « *Geophysics in the Study of Permafrost* », dans *Geotechnical and Environmental Geophysics* est aussi une référence utile.



Source : BGC Engineering.

Photo D.1 — Équipement de tomographie de résistivité électrique (TRE)



Source : BGC Engineering.

Photo D.2 — Installation d'électrodes pour appareil de tomographie de résistivité électrique (TRE)



Source : BGC Engineering.

Photo D.3 — Équipement de radar à pénétration de sol – Antenne 12,5 MHz



Source : BGC Engineering.

Photo D.4 — Équipement de radar à pénétration de sol – Antenne en ligne 80 MHz

Tableau D.1
Caractéristiques des méthodes d'étude géophysique
(volet 1 de 3)

Méthode d'étude géophysique	Profondeur de pénétration	Traitement des données	Applications	Commentaires
Tomographie de résistivité électrique (TRE)	De 0,15 à 0,2 fois l'espace entre les électrodes (configuration de Wenner).	Logiciels existants (p. ex. : RES2DINV).	- Détection de masses de glace, p. ex. glaciers rocheux, tills gelés riches en glace, moraines et autres phénomènes périglaciaires. - Cartographie de blocs de glace isolés. - Surveillance de l'évolution des propriétés du pergélisol et de la couche active. - Cartographie de la distribution des sols gelés. - Analyse de l'origine de la glace dans les glaciers rocheux. - Quantification/comparaison du contenu en glace.	- Un bon contact électrique entre les électrodes et le sol est essentiel. Cela est encore plus important dans certains types de sols (p. ex. : till, substrat rocheux, remblayage de gravier compact ou asphalte). - Il est nécessaire d'avoir de l'expérience en inversion de données pour le traitement des données. - Il est parfois difficile de faire la distinction entre la glace, l'air et certains types de roches. - La TRE est insensible au bruit électromagnétique d'origine humaine.
TRE à couplage capacitif	Dépend de la géométrie de l'instrument et de la résistivité de la couche supérieure. La profondeur est habituellement de 10 m à 20 m. L'effet pelliculaire (ou l'effet de peau) sur les mesures électromagnétiques détermine souvent la limite pratique de la profondeur de pénétration dans les zones très conductrices. La formule suivante donne une approximation de la profondeur de l'effet pelliculaire : $SD = 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$ où SD : profondeur de l'effet pelliculaire, en mètres; ρ : résistivité, en ohms; f : fréquence, en hertz.	Logiciels existants (p. ex. : RES2DINV).	- Détection de corps de glace et de taliks dans la zone de pergélisol discontinu. - Surveillance de l'évolution des propriétés du pergélisol et de la couche active. - Cartographie de la distribution des sols gelés. - Quantification/comparaison du contenu en glace.	- Le contact n'est pas nécessaire. - La méthode permet une installation et une acquisition de données rapides. - La méthode convient aux levés de résistivité sur les routes. - Les levés peuvent être difficiles en terrain accidenté ou dans une végétation dense. - La méthode est idéale dans les secteurs de résistivité élevée. - Il est nécessaire d'avoir de l'expérience en inversion de données pour le traitement des données.

Tableau D.1
Caractéristiques des méthodes d'étude géophysique
(volet 2 de 3)

Méthode d'étude géophysique	Profondeur de pénétration	Traitement des données	Applications	Commentaires
Cartographie par induction électromagnétique dans le domaine fréquentiel (FEM)	Dépend de la géométrie de l'instrument et de la fréquence (effet pelliculaire; souvent limitée à < 10 m).	Souvent, lecture directe de la conductivité sur l'instrument.	• Cartographie de glaces de sol isolées. • Cartographie des limites de zones riches en glace et d'autres phénomènes périglaciaires. • Cartographie des différences horizontales dans l'ECA. • Détermination du degré d'hétérogénéité pour évaluer la représentativité des mesures en un point.	• L'équipement est léger. • Les différentes conditions à la surface peuvent avoir une grande influence sur les résultats. • La dérive de l'instrument peut entraîner des résultats erronés à cause de faibles valeurs. • Le traitement de données est simple. • Les résultats peuvent dépendre de la fréquence. • L'équipement est sensible au bruit électromagnétique d'origine humaine (lignes de transport électriques, etc.).
Tomographie — sismique réfraction	De 1/3 à 1/5 de la distance maximale entre la source et le récepteur; dépend aussi de la distribution d'énergie et de la vitesse du tir.	Choix des premières arrivées; logiciels existants (p. ex. : REFLEXW, SeisImager) — une certaine expérience est nécessaire.	• Détection de masses de glace dans les tills riches en glace, les glaciers rocheux, les moraines et autres phénomènes périglaciaires. • Cartographie de blocs de glace isolés. • Distinction entre la glace, l'air et certains types de roches, qui ont tous une résistivité anormalement élevée. • Cartographie de l'ECA.	• Il convient d'avoir au moins douze récepteurs, avec des tirs entre deux récepteurs, ou à tous les deux récepteurs. • Une masse peut servir de source pour la plupart des applications. • Les géophones sont sensibles aux conditions climatiques (vent, pluie) et aux travaux de construction (forage, camions), ce qui entraîne du bruit dans les données. • Il est nécessaire d'avoir de l'expérience en inversion de données pour le traitement des données.

Tableau D.1
Caractéristiques des méthodes d'étude géophysique
(volet 3 de 3)

Méthode d'étude géophysique	Profondeur de pénétration	Traitement des données	Applications	Commentaires
Géoradar (GPR)	Difficile à prédire — dépend de l'atténuation et de la fréquence. La profondeur varie habituellement de 2 m à 5 m à une fréquence de 200 MHz, de 5 m à 10 m à une fréquence de 100 MHz et de 10 m à 20 m à une fréquence de 50 MHz.	Logiciels existants (p. ex. : REFLEXW, EKKO Project) — expérience nécessaire.	- Étude stratigraphique. - Cartographie des limites de masses de glace dans les tills riches en glace, les glaciers rocheux et autres phénomènes périglaciaires (p. ex. : coins de glace). - Cartographie de l'ECA. - Cartographie de la topographie sous-glaciaire. - Surveillance des changements hydrothermiques saisonniers dans les glaciers. - Cartographie de l'épaisseur de la glace et de la neige.	- La profondeur de pénétration dans les couches conductrices est faible près de la surface (matériaux à grains fins, terrains mal drainés, plans d'eau, etc.). - La méthode est difficile à utiliser dans les milieux très hétérogènes. - Les levés sont rapides sur la glace, la neige et les infrastructures linéaires (p. ex. : routes et chemins). - Le choix de la fréquence de l'antenne est important, car il influence la résolution et la profondeur des levés. - Il est difficile de déterminer l'échelle de profondeur du radargramme (conversion vitesse-profondeur). - Il est nécessaire d'avoir de l'expérience en traitement des données. - L'équipement est sensible au bruit électromagnétique d'origine humaine (lignes de transport électriques, etc.) et aux réflecteurs au-dessus du sol (parois rocheuses, câbles, etc.).

ANNEXE E
(informative)

Courbe en trompette de la température
(article 8.5.5.1)

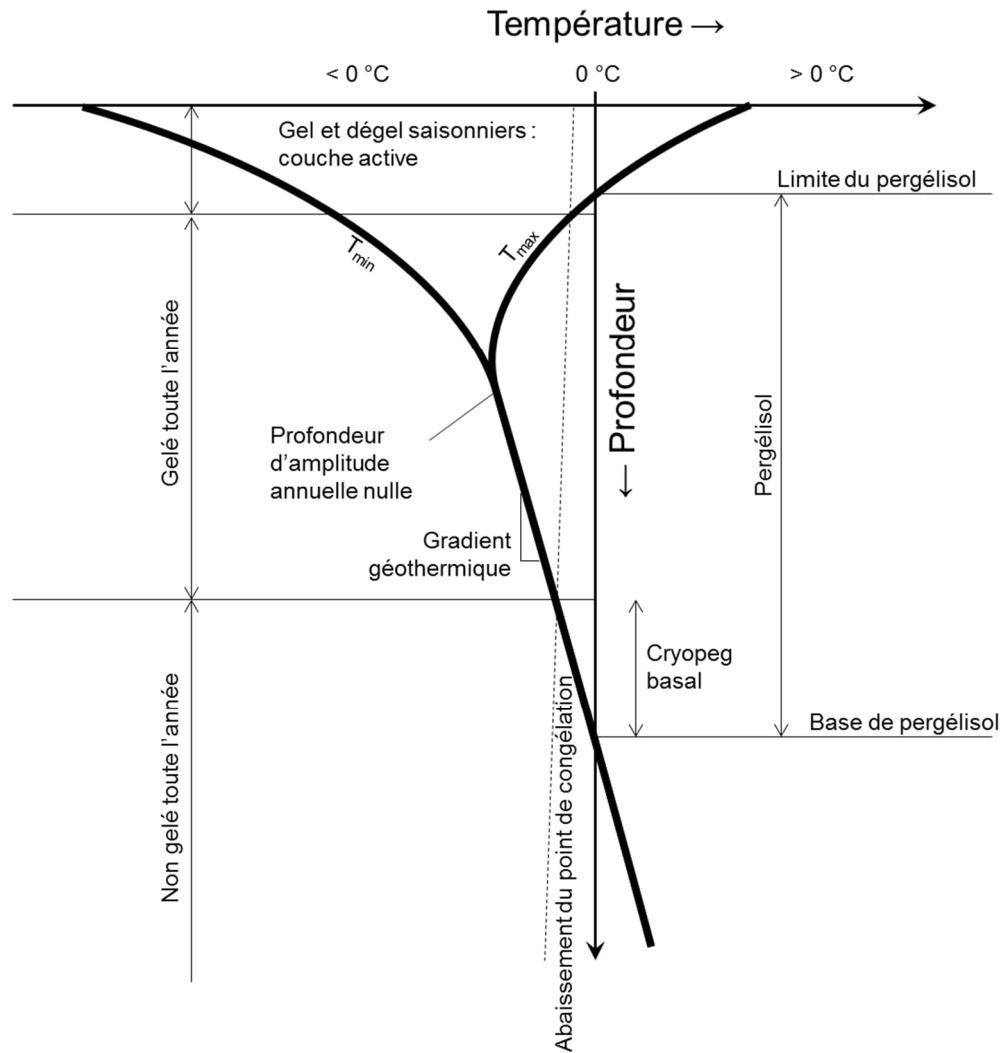


Figure E.1 — Exemple de courbe en trompette de la température

ANNEXE F
(informative)

Liste de vérification
(article 5.2 et annexe A)

Cette liste, qui peut être utilisée avec le schéma présenté à l'annexe A, fournit des indications complètes à propos de toutes les étapes à envisager dans le cadre d'un programme d'étude géotechnique en zone de pergélisol. Selon le niveau de risque lié aux changements climatiques du projet (A à D), plus ou moins d'éléments additionnels de la liste peuvent s'appliquer.

GÉNÉRALITÉS

- ☐ Portée
- ☐ Expert-conseil en géotechnique qualifié
- ☐ Équipe chargée de l'étude du sous-sol qualifiée
- ☐ Laboratoire d'essais qualifié
- ☐ ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DU SITE

ÉVALUATION DOCUMENTAIRE

- ☐ Évaluation initiale des conditions climatiques
- ☐ Sismicité
- ☐ Géologie de surface et géomorphologie
- ☐ Hydrologie des eaux de surface et des eaux souterraines
- ☐ Couvert végétal
- ☐ Zones de pergélisol et distribution locale
- ☐ Caractéristiques du pergélisol

CARACTÉRISTIQUES PROPRES AU SITE

- ☐ Accès au site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art et logistique
- ☐ Historique de l'utilisation du sol

- ☐ Bâtiments ou ouvrages d'art voisins
- ☐ Disponibilité des matériaux d'emprunt
- ☐ Visite du site
- ☐ Niveau de risque lié aux changements climatiques du projet
- ☐ Rapport d'évaluation préliminaire du site

ÉTUDE DU SITE

ÉVALUATION DÉTAILLÉE DES RISQUES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET AUTRES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

- ☐ Projections des changements climatiques
- ☐ Autres conditions environnementales
- ☐ Technologies de télédétection
- ☐ Études géophysiques

PROPRIÉTÉS DES SOLS

- ☐ Stratigraphie et cryostratigraphie
- ☐ Régime thermique du sol
- ☐ Propriétés géotechniques des sols
- ☐ Propriétés des sols à l'état gelé
- ☐ Propriétés thermiques

PROPRIÉTÉS DU SUBSTRAT ROCHEUX

- ☐ Stratigraphie et cryostratigraphie
- ☐ Désignation de la qualité de la roche (DQR)
- ☐ Température du substrat rocheux
- ☐ Profondeur du substrat rocheux
- ☐ Résistance à la compression

- ☐ Salinité
- ☐ Chimie de l'eau souterraine

RAPPORT

- ☐ Portée
- ☐ Conditions climatiques
- ☐ Sismicité
- ☐ Géologie de surface et géomorphologie
- ☐ Hydrologie des eaux de surface et des eaux souterraines
- ☐ Couvert végétal
- ☐ Zones de pergélisol et distribution locale
- ☐ Caractéristiques propres au site
- ☐ Historique de l'utilisation du sol
- ☐ Bâtiments et ouvrages d'art voisins

CONDITIONS DU SOUS-SOL

- ☐ Résumé du programme d'étude du site
- ☐ Propriétés du sous-sol
- ☐ Essais in situ, inspections et essais en laboratoire

RECOMMANDATIONS

- ☐ Adéquation du site du bâtiment ou de l'ouvrage d'art
- ☐ Recommandations relatives aux fondations et aux options de rechange
- ☐ Préparation du site
- ☐ Gestion des eaux de surface
- ☐ Considérations et calendrier relatifs à la construction
- ☐ Limites de l'étude géotechnique

ANNEXE G
(informative)

Références informatives

G.1 GÉNÉRALITÉS

Les références indiquées ci-dessous sont citées à titre informatif dans la présente norme.

G.2 DOCUMENTS D'ORGANISMES DE NORMALISATION

BNQ (Bureau de normalisation du Québec) [<https://www.bnq.qc.ca>]

CAN/BNQ 2501-052	<i>Sols — Détermination de la masse volumique du sol en place à l'aide d'une membrane élastique — Appareil de type Washington.</i> (Soils — Determination of In-Place Density of Soil Using an Elastic Membrane — Washington Type Apparatus.)
------------------	--

CAN/BNQ 2501-054	<i>Sols — Détermination de la masse volumique du sol en place à l'aide d'une membrane élastique.</i> (Soils — Determination of In-Place Density of Soil Using an Elastic Membrane.)
------------------	--

CAN/BNQ 2501-058	<i>Sols — Détermination de la masse volumique du sol en place à l'aide d'une membrane flexible (volume d'eau).</i> [Soils — Determination of In-Place Density of Soil Using a Flexible Membrane (Water Volume).]
------------------	---

CAN/BNQ 2501-060	<i>Sols — Détermination de la masse volumique du sol en place selon la méthode du cône de sable.</i> (Soils — Determination of In-Place Density of Soil Using the Sand-Cone Method.)
------------------	---

ASTM International [<https://www.astm.org>]

ASTM D1556/D1556M	<i>Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method.</i>
-------------------	---

ASTM D2166/D2166M	<i>Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.</i>
-------------------	---

ASTM D3740	<i>Practice for Minimum Requirements for Agencies Engaged in Testing and/or Inspection of Soil and Rock as Used in Engineering Design and Construction.</i>
ASTM D5731	<i>Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.</i>
ASTM D5918 ¹	<i>Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils.</i>
BAKER, T. H. W. <i>Transportation, Preparation, and Storage of Frozen Soil Samples for Laboratory Testing</i> , ASTM Special Technical Publication, n°. 599, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1976, p. 88-112.	
Groupe CSA [https://www.csagroup.org]	
CSA S500	<i>Fondations à thermosiphon de bâtiments construits dans des régions pergélisolées.</i> (Thermosiphon Foundations for Buildings in Permafrost Regions.)
CSA S501	<i>Modérer les effets de la dégradation du pergélisol sur les fondations de bâtiments existants.</i> (Moderating the Effects of Permafrost Degradation on Existing Building Foundations.)
CSA S502	<i>Gestion des risques liés aux charges de neige sur les infrastructures du Grand Nord canadien.</i> (Managing Changing Snow Load Risks for Buildings in Canada's North.)
CSA S503	<i>Planification, conception et maintenance de systèmes de drainage dans les communautés du Nord.</i> (Community Drainage System Planning, Design, and Maintenance in Northern Communities.)
CSA PLUS 4011.1	<i>Guide technique : considérations relatives à la conception et à la construction des fondations dans les régions de pergélisol.</i> (Technical Guide: Design and Construction Considerations for Foundations in Permafrost Regions.)

1 Ce document a été archivé en 2022, et n'a pas été remplacé depuis.

G.3 LOI, RÈGLEMENT OU DOCUMENT DE MÊME NATURE

CANADA. *Code national du bâtiment — Canada.*

G.4 DOCUMENTS GOUVERNEMENTAUX

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA (CNRC), sous-comité du pergélisol.
La terminologie du pergélisol et notions connexes, note de service technique
n° 142, Ottawa (Ontario), Conseil national de recherches du Canada, 1988, 154 p.

MOLLARD, J. D. et J. R. JANES. *La photo-interprétation et le territoire canadien*, Hull
(Québec), Approvisionnement et Services Canada, Canada, 1985, 431 p.

G.5 AUTRES DOCUMENTS

ALTER, A. J. « Water Supply in Cold Regions », dans *Monograph 111-C5a*, Hanover
(New Hampshire), U. S. Army Cold Regions Research Engineering Laboratory,
1969, 93 p.

de VRIES, D. A. « Thermal Properties of Soil », dans *W. R. Van Wijk (ed.), Physics of
Plant Environment*, Amsterdam (Pays-Bas), North Holland Publishing Company,
1966, p. 210-235.

DUGUAY, C. R. et A. PIETRONIRO (ed.). *Remote Sensing in Northern Hydrology:
Measuring Environmental Change*, Washington (D.C.), American Geophysical
Union, 2005, 160 p.

FAROUKI, O. T. « Thermal Properties of Soils », dans *Monograph 81-1*, Hanover (New
Hampshire), U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981,
151 p.

HANNA, A. J. et autres. *Alaska Highway Gas Pipeline (Yukon Section) — Thaw
Settlement Design Approach*, compte rendu de la 4^e International Permafrost
Conference tenue à Fairbanks (Alaska), Washington (D.C.), National Academy
Press, 1983, p. 439-444.

HARLAN, R. L. and J. F. NIXON. « Ground Thermal Regime » (chapitre 3), dans
Geotechnical Engineering for Cold Regions, ed. O.B. Andersland and D.M.
Anderson. New York: McGraw-Hill, 1978, p. 103-163.

HIVON E. G. et D. C. SEGO. « Distribution of Saline Permafrost in the Northwest
Territories, Canada », dans *Canadian Geotechnical Journal*, 30(3), 1993,
p. 506-514.

- JOHANSEN, O. *Thermal Conductivity of Soils*, thèse de doctorat, Trondheim (Norvège), 1975.
- JOHNSTON, G. H. *Permafrost: Engineering Design and Construction*, Conseil national de recherches du Canada, Comité associé de recherches géotechniques, Hoboken (New Jersey), John Wiley & Sons, 1981, 540 p.
- KERSTEN, M. S. « Thermal Properties of Soils », dans *Bulletin 28*, Minneapolis (Minnesota), Engineering Experiment Station, University of Minnesota, 1949.
- KNEISEL, C. et autres. « Advances in Geophysical Methods for Permafrost Investigations », dans *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(4), 2008, p. 157-178.
- LADANYI, B. et A. THÉRIAULT. « A Study of Some Factors Affecting the Adfreeze Bond of Piles in Permafrost », dans *Actes de la Cinquième conférence canadienne sur le pergélisol*, Québec (Québec), Université Laval, Collection Nordiana, n° 54, 1990, p. 327-334.
- LINELL, K. A. et C. W. KAPLAR. « Description and Classification of Frozen Soils », dans *Proceedings of the 1st International Conference on Permafrost*, Washington (D.C.), National Academy of Science, publication n° 1287 du Conseil national de recherches du Canada, 1966, p. 481-487.
- LUNARDINI, V. J. *Heat Transfer in Cold Climates*, Van Norstrand Reinhold Company, 1981, 731 p.
- MORGENSTERN, N. R. et J. F. NIXON. « One-Dimensional Consolidation of Thawing Soils », dans *Canadian Geotechnical Journal*, 8 (4), 1971, p. 558-565.
- MORGENSTERN, N. R. et L. B. SMITH. « Thaw-Consolidation Tests on Remoulded Clays », dans *Canadian Geotechnical Journal*, 10(1), 1973, p. 25-40.
- MURTON, J. B. et H. M. FRENCH. « Cryostructures in Permafrost », dans *Canadian Journal of Earth Sciences*, Tuktoyaktuk (Arctique de l'Ouest [Canada]), 31, 1994, p. 737-747.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Opportunities to Use Remote Sensing in Understanding Permafrost and Related Ecological Characteristics: Report of a Workshop*, Washington (D.C.), The National Academies Press, 2014, 23 p.
- PATTERSON, D. E. et M. W. SMITH. « The Measurement of Unfrozen Water Content by Time Domain Reflectometry: Results from Laboratory Tests », dans *Canadian Geotechnical Journal*, 18(1), 1981, p. 131-144.
- PROST, G. L. *Remote Sensing for Geoscientists: Image Analysis and Integration*, 3^e édition, Boca Raton (Floride), CRC Press, 2014, 720 p.

- SCOTT, W. J., P. V. SELLMANN et J. A. HUNTER. « Geophysics in the Study of Permafrost », dans *Geotechnical and Environmental Geophysics*, edited by W. J. Ward, Society of Exploration Geophysicists, 1990, p. 355-384.
- SMITH, M. W. et A. R. TICE. *Measurement of the Unfrozen Water Content of Soil: Comparison of NMR and TDR Methods*, Hanover (New Hampshire), U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988, 12 p.
- TEDESCO, M. (ed.). *Remote Sensing of the Cryosphere*, Hoboken (New Jersey), John Wiley & Sons, 2015, 432 p.
- TICE, A. R., D. M. ANDERSON et A. BANIN. « The Prediction of Unfrozen Water Contents in Frozen Soils from Liquid Limit Determinations », dans *Monograph 76-8*, Hanover (New Hampshire), U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1976, 9 p.
- WATANABE, K. et T. WAKE. « Measurement of Unfrozen Water Content and Relative Permittivity of Frozen Unsaturated Soil Using NMR and TDR », dans *Cold Regions Science and Technology*, 59(1), 2009, p. 34-41.
- WEAVER, J. S. et N. R. MORGENSTERN. « Pile Design in Permafrost », dans *Canadian Geotechnical Journal*, 18, 1981, p. 357-370.

ANNEXE H
(informative)

Références informatives de l'annexe B

H.1 GÉNÉRALITÉS

Les références indiquées ci-dessous sont citées à titre informatif dans l'annexe B.

H.2 DOCUMENT GOUVERNEMENTAL

DERKSEN, C. et autres. « Changes in Snow, Ice, and Permafrost across Canada: Chapter 5 », dans *Canada's Changing Climate Report*, (ed.) E. Bush and D. S. Lemmen; Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, [En ligne], 2019, p. 194-260.

H.3 AUTRES DOCUMENTS

ANTHONY, W. « The Big Thaw: Melting Permafrost is Causing a Global Problem », in *Geographical*, 2023.

BISKABORN, B. K. et autres. « Permafrost is Warming at a Global Scale », dans *Nature Communications*, 10, 264, 2019.

BURN, C. « Understanding Permafrost Responses to Climate Change », dans *Scientia, Earth & Environmental Sciences*, mars 2021.

CANADELL, J. G. et autres. « Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks », dans *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution - Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, NY, É.-U., [En ligne], 2021, p. 673-816.

DOUGLAS, T. A., M. R. TURETSKY et C. D. KOVEN. « Increased rainfall stimulates permafrost thaw across a variety of Interior Alaskan boreal ecosystems », dans *npj Climate and Atmospheric Science* 3, 28, [En ligne], décembre 2020.

FARQUHARSON, L. M. et autres. « Climate Change Drives Widespread and Rapid Thermokarst Development in Very Cold Permafrost in the Canadian High Arctic », dans *Geophysical Research Letters*, volume 46, numéro 12, juin 2019, p. 6681-6689.

- GUIMOND, J. A. et autres. « Saltwater Intrusion Intensifies Coastal Permafrost Thaw », dans *Geophysical Research Letters*, volume 48, numéro 19, septembre 2021.
- HAMM, A. et autres. « Continentality Determines Warming or Cooling Impact of Heavy Rainfall Events on Permafrost », dans *Nature Communications*, 14, 3578, juin 2023.
- HJORT, J. et autres. « Impacts of Permafrost Degradation on Infrastructure », dans *Nature Reviews Earth & Environment* 3, 2022, p. 24-38.
- JORGENSEN, M. T. et autres. « The Roles of Climate Extremes, Ecological Succession, and Hydrology in Repeated Permafrost Aggradation and Degradation in Fens on the Tanana Flats, Alaska », dans *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125 (12), [En ligne], novembre 2020.
- KANEVSKIY, M. et autres. « The Shifting Mosaic of Ice-Wedge Degradation and Stabilization in Response to Infrastructure and Climate Change, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska, USA », dans *Arctic science*, 8(2), [En ligne], février 2022, p. 498-530.
- KOKELJ, S. V. et autres. « Increased Precipitation Drives Mega Slump Development and Destabilization of Ice-Rich Permafrost Terrain, Northwestern Canada », dans *Global and Planetary Change*, 129: 56-68, juin 2015.
- KOKELJ, S. V. et autres. « Landscape-Scale Variations in Near-Surface Soil Temperature and Active-Layer Thickness: Implications for High-Resolution Permafrost Mapping », dans *Permafrost and Periglacial Processes*, août 2021.
- KOKELJ, S. V. et autres. « Mapping and Understanding the Vulnerability of Northern Peatlands to Permafrost Thaw at Scales Relevant to Community Adaptation Planning », dans *Environmental Research Letters*, volume 16, numéro 5, mai 2021.
- KOKELJ, S. V. et autres. « The Northwest Territories Thermokarst Mapping Collective: a Northern-Driven Mapping Collaborative Toward Understanding the Effects of Permafrost Thaw » dans *Arctic Science*. 9(4): 886-918, septembre 2023.
- KOKELJ, S. V. et M. T. JORGENSEN. « Advances in Thermokarst Research: Recent Advances in Research Investigating Thermokarst Processes », dans *Permafrost and Periglacial Processes*, 24 (2):108–19, 2013.
- LEWKOWICZ, A. G. et R. G. WAY. « Extremes of Summer Climate Trigger Thousands of Thermokarst Landslides in a High Arctic Environment », dans *Nature Communications*, 10, 1329, avril 2019.

- MAGNÚSSON R. Í. et autres. « Extremely Wet Summer Events Enhance Permafrost Thaw for Multiple Years in Siberian Tundra », dans *Nature Communications*, 13, 1556, mars 2022.
- MEREDITH, M. et autres. « Polar Regions », dans *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni and New York, NY, É.-U., 2019, p. 203-320.
- NITZBON, J. et autres. « Fast Response of Cold Ice-Rich Permafrost in Northeast Siberia to a Warming Climate », dans *Nature Communications*, 11, 2201, mai 2020.
- NITZBON, J. et autres. « No Respite from Permafrost-Thaw Impacts in the Absence of a Global Tipping Point », dans *Nature Climate Change, Nature*, vol. 14(6), juin 2024, p. 573-585.
- O'NEILL, H. B. et autres. « Widespread Permafrost Degradation and Thaw Subsidence in Northwest Canada », dans *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128, e2023JF007262, 2023.
- OSWELL, J. M. et R. COUTTS. « Development and Performance of an Adaptive Adfreeze Pile », dans *Canadian Geotechnical Journal*, 2024.
- PARMENTIER, F.-J. W. et autres. « Rapid Ice-Wedge Collapse and Permafrost Carbon Loss Triggered by Increased Snow Depth and Surface Runoff », dans *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL108020, juin 2024.
- RANTANEN, M. et autres. « The Arctic has Warmed Nearly four Times Faster than the Globe since 1979 », dans *Communications Earth and Environment*, 3, 168, 2022.
- RODENHIZER, H. et autres. « Abrupt Permafrost Thaw Accelerates Carbon Dioxide and Methane Release at a Tussock Tundra Site », dans *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, volume 54, numéro 1, septembre 2022, p. 443-464.
- SCHNABEL, W., D. J. GOERING et A. DOTSON. « Permafrost Engineering on Impermanent Frost », dans *Spring Bridge Issue on Engineering and Climate Change*, volume 50, numéro 1, mars 2020.
- SMITH, S. L., C. DUCHESNE et H. B. O'NEILL. « Long-Term Permafrost Monitoring in Northern Canada – What Have we Learned? », dans *Conference paper, 12th International Conference on Permafrost*, Whitehorse, 2024.

- SMITH, S. L., D. RISEBOROUGH et P. BONNAVENTURE. « Eighteen Year Record of Forest Fire Effects on Ground Thermal Regimes and Permafrost in the Central Mackenzie Valley, NWT, Canada », dans *Permafrost and Periglacial Processes*, volume 26, numéro 4, 2015, p. 289-303.
- SMITH, S. L. et autres. « The Changing Thermal State of Permafrost », dans *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 2022, p. 10-23.
- STRELETSKIY, D. A. et autres. « The Costs of Arctic Infrastructure Damages due to Permafrost Degradation », dans *Environmental Research Letters*, volume 18, numéro 1, 2023.
- TURETSKY, M. R. et autres. « Carbon Release through Abrupt Permafrost Thaw », dans *Nature Geoscience*. 13(2), 2020, p.138-43.
- YOUNG, J. M. et autres. « Recent Intensification (2004–2020) of Permafrost Mass-Wasting in the Central Mackenzie Valley Foothills is a Legacy of Past Forest Fire Disturbances », dans *Geophysical Research Letters*, 49, décembre 2022.
- ZHENG, L. et autres. « Changing Arctic River Dynamics Cause Localized Permafrost Thaw », dans *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, volume 124, numéro 9, septembre 2019, p. 2324-2344.

ANNEXE I
(informative)

Bibliographie

I.1 GÉNÉRALITÉS

Les références indiquées ci-dessous peuvent être consultées pour en savoir davantage sur les sujets abordés dans la présente norme.

I.2 AUTRES DOCUMENTS

ANDERSLAND, O. B. et B. LADANYI. *Frozen Ground Engineering*, Hoboken (New Jersey), John Wiley & Sons, 2^e édition, 2004, 384 p.

HAUCK, C. et C. KNEISEL. *Applied Geophysics in Periglacial Environments*, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (N.Y.), Cambridge University Press, vol. 240, 2008, 256 p.

I. HOLUBEC CONSULTING. *Geotechnical Site Investigation Guidelines for Building Foundations in Permafrost*, document préparé pour le ministère des Travaux publics et des Services des Territoires du Nord-Ouest, janvier 2010, 48 p.

COMMENTAIRES ET SUGGESTIONS

Dans le but d'améliorer les documents publiés par le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) et d'en faciliter la mise à jour, nous vous invitons à nous faire parvenir vos commentaires et suggestions relatifs au présent document.

À cet effet, vous êtes priés de communiquer avec notre service à la clientèle au bnqinfo@bnq.qc.ca pour nous faire part de vos idées. Afin de faciliter le repérage de votre courriel, nous vous demandons d'inscrire « Commentaires » dans l'objet de votre courriel et de nous fournir les renseignements suivants :

- a) le numéro et le titre du document (CAN/BNQ 2501-500 *Études géotechniques pour les fondations de bâtiments et d'ouvrages d'art dans les zones de pergélisol*);
- b) vos commentaires ou suggestions (p. ex. : signaler une erreur, suggérer une modification, faire part du besoin d'un nouveau document sur un sujet apparenté ou autre);
- c) votre nom et vos coordonnées.



Bureau de normalisation
du Québec

QUÉBEC

333, rue Franquet
Québec (Québec) G1P 4C7
T 1 844 474-6367

MONTREAL

1201, boulevard Crémazie Est, bureau 1.210
Montréal (Québec) H2M 0A6
T 1 844 474-6367

www.bnq.qc.ca
bnqinfo@bnq.qc.ca