



Construire sur le pergélisol

Guide pratique

Christian Bommer, Marcia Phillips, Hans-Rudolf Keusen
et Philipp Teyssere



WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF



Institut fédéral de recherches sur la forêt,
la neige et le paysage WSL

Construire sur le pergélisol

Guide pratique

Christian Bommer, Marcia Phillips, Hans-Rudolf Keusen et Philipp Teyssere

Editeur

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL,
Birmensdorf, 2010

Responsable de l'édition

James Kirchner, Directeur du WSL

Auteurs

Christian Bommer, WSL Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Davos
Marcia Phillips, WSL Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Davos
Hans-Rudolf Keusen, Geotest AG, Zollikofen; Philipp Teyssere, Teyssere & Candolfi AG, Viège

Commanditaires

armasuisse Immobilier; Office fédéral des transports OFT

Comité de direction

Ulrich Appenzeller, armasuisse Immobilier, Berne; Toni Eder, Office fédéral des transports OFT, Berne;
Michael Lehning, WSL Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Davos

Groupe d'accompagnement technique

Christian Tellenbach, armasuisse Immobilien, Berne; Rolf Keiser, armasuisse Immobilien, Berne; Urs Dietrich, Office fédéral des transports OFT, Berne; Charly Wuilloud, Service des forêts et du paysage du canton du Valais, Sion

Partenaires du projet

Geotest AG; Club alpin suisse; Canton du Valais

Lectorat de la version originale (en allemand)

Veronika Stöckli, SLF, Davos; Frank Krumm, SLF, Davos

Relecture technique

Lukas Arenson, BGC Engineering, Vancouver BC; Ruedi Degelo, Gasser Felstechnik AG, Lungern;
Felix Keller, Academia Engiadina, Samedan; Stefan Margreth SLF, Davos; Prof. Hansruedi Schneider, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil

Référence bibliographique

Bommer, C.; Phillips, M.; Keusen, H.-R.; Teyssere, P., 2010: Construire sur le pergélisol: Guide pratique. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, WSL. 126 pages

Traduction

Monique Dousse

Relecture

Marcia Phillips, SLF; Philippe Domont, Zurich; Christian Marro, Haute-Nendaz

Graphisme, mise en page

Jacqueline Annen, WSL

Photos de couverture

Du haut vers le bas

Excavation d'un terrain meuble, riche en glace, à l'aide d'une pelle mécanique (photo SLF)

Construction d'une cabane de haute montagne (photo SLF)

Filets à neige endommagés par une chute de pierres sur une pente fluante et gelée en permanence (photo SLF)

Semelle filante d'une cabane de montagne sur un sol rocheux (photo Ruch architectes, Meiringen)

Pylône coulissant d'une installation à câbles (photo SLF)

Trou de forage équipé d'instruments de mesure dans le pergélisol (photo SLF)

Diffusion

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

WSL Shop

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

Prix: 26 francs, e-shop@wsl.ch, www.wsl.ch/eshop

Téléchargement du fichier PDF: www.wsl.ch/publikationen/pdf/10493.pdf

ISBN 978-3-905621-49-5

© Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf, 2010

Avant-propos

Les stations et les pylônes d'installations à câbles, tout comme les gares et les bâtiments liés aux installations ferroviaires sont construits de façon stable et sûre. En haute montagne aussi, dans la neige et la glace, leurs fondations reposent sur de la roche stable. Les touristes et les voyageurs comptent sur cette sécurité. Or, cette certitude a été ébranlée ces dernières années par maints communiqués de presse: «les montagnes se liquéfient», «le pergélisol fond, les fondations deviennent instables». Le problème de la fonte du pergélisol est nouveau, mais pas la construction sur le pergélisol. Diverses techniques de construction ont été utilisées dans les Alpes jusqu'à présent; certaines ont fait leurs preuves, d'autres moins. Un fait est établi: ces dernières années, de plus en plus de dégâts sont à déplorer sur des constructions existantes. Le réchauffement climatique et le dégel de certaines zones de pergélisol ont encore accéléré ce processus. Dès lors, l'Office fédéral des transports (OFT), dans son rôle d'autorité de surveillance des chemins fer et des installations à câbles, s'est posé certaines questions: La sécurité des installations existantes est-elle encore assurée? Les exploitants ont-ils perçu les dangers et les risques? Quels sont les concepts d'assainissement économiquement appropriés et financièrement avantageux? Comment assurer une construction appropriée des nouvelles installations?

Depuis des décennies, le Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports (DDPS) construit et entretient de nombreux ouvrages en montagne. Les installations à câbles, les routes, les ouvrages de transmission, de combat et de commandement en font partie. Le fonctionnement irréprochable de cette infrastructure est primordial pour permettre à l'armée de remplir sa mission. Pour les installations civiles aussi, le pergélisol et sa disparition imposent des exigences de plus en plus sévères pour la construction de ces ouvrages. En tant qu'organe de gestion immobilière du DDPS, armasuisse Immobilier s'est demandé comment traiter au mieux ce problème.

Les bons exemples de constructions ne manquent pas. La recherche s'active et de nombreuses bases fondamentales sont acquises. Cet atout a fait naître l'idée de dresser un bilan de l'état des connaissances actuelles et de rendre accessible toute une documentation. L'Office fédéral des transports (OFT), en coopération avec armasuisse Immobilier, a confié un mandat allant dans ce sens au WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF. L'objectif était le suivant: rassembler les expériences acquises dans les projets, déterminer les lacunes de connaissances et les combler grâce à une recherche ciblée, ainsi qu'identifier des méthodes de surveillance efficaces dans divers cas de figure afin d'augmenter la sécurité et la robustesse des ouvrages.

Le guide issu de cette démarche est désormais disponible. Il est conçu comme un ouvrage de référence s'adressant à tous les géologues, bureaux d'ingénieurs et de planification, propriétaires et maîtres d'ouvrages, autorités fédérales, cantonales et communales ainsi qu'aux entrepreneurs engagés dans la construction d'ouvrages et d'installations dans les régions à pergélisol.

Le mandat de l'OFT et d'armasuisse Immobilier a pu se réaliser en coopération avec les meilleurs experts, sous la direction du SLF. Nous bénéficions ainsi d'un ouvrage qui pourra servir de base à la réalisation de multiples constructions et réfections. Il contribuera aussi à redonner confiance aux exploitants, voyageurs et touristes qui comptent sur la sécurité et la stabilité des constructions et installations sur le pergélisol.

Nous remercions sincèrement toutes les personnes qui ont contribué, tant par leurs travaux que par leurs conseils, à la réussite de ce guide largement étoffé.

Toni Eder, sous-directeur
Office fédéral des transports

Ulrich Appenzeller, sous-directeur
Chef armasuisse Immobilier

Remerciements

Aeberli Hans Ulrich (Jäckli AG)
Alpiger Klaus (Schneller Ritz und Partner AG)
Ammann Walter (IDRC)
Andenmatten Rinaldo (alp Andenmatten Lauber & Partner AG)
Bebi Paul (ehem. Baumeister-Polier)
Bertle Rufus (Geognos Bertle Technische Geologie GmbH)
Bonetti Hanspeter (Gasser Felstechnik AG)
Büchel Peter (CAS)
Danioth Carlo (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)
Degelo Ruedi (Gasser Felstechnik AG)
Delang Ulrich (CAS)
Eberle Toni (Eberle AG)
Elmiger Urs (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)
Feuz Peter (Schilthornbahn AG)
Heinzer Peter (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)
Horntrich Robert (Liftgesellschaft Sölden GmbH)
Huber Andreas (ehem. Führungsunterstützungsbasis der Schweizer Armee)
Hurm Martin (Bayrische Zugspitzbahn Bergbahn AG)
Imhasly Heinz (Fiesch-Eggishorn Luftseilbahnen AG)
Jaun Markus (armasuisse)
Jenatsch Reto (CAS)
Krummenacher Bernhard (Geotest AG)
Küchler Jörg (Küchler Ankertechnik AG)
Kuhn Markus (Sakret AG)
Kuprian Helmut (Liftgesellschaft Sölden GmbH)
Lardelli Thomaso (Büro für Technische Geologie AG)
Lauber Christian (alp Andenmatten Lauber & Partner AG)
Loser Stefan (Sika Schweiz AG)
Maesano Antonino (Matterhorn Engineering AG)
Marte Roman (Garber, Dalmatiner & Partner)
Münster Ruedi (Baugeologie AG)
Nötzli Jeanette (Universität de Zurich)
Raetzo Hugo (OFEV)
Schindler Heinz (Jungfraubahnen AG)
Schmid Odilo (Odilo Schmid & Partner AG)
Sommer Urs (Emch & Berger AG)
Steiner Walter (B+S AG)
Stoffel Lukas (SLF)
Thomet Richard (Thomet Bauleitung)
Venzin Andreas (Luftseilbahn Corvatsch AG)
Walser Markus (Silvrettaseilbahnen AG)
Wellauer Peter (Holcim AG)
Wohllaib Werner (BIAD)

Abstract

Construction on permafrost: a practical guideline

The successful realization of construction projects in mountain permafrost areas is a technical and logistic challenge for all parties involved. The site selection and the structure design are of central importance. The former must be based on a detailed preliminary study which investigates whether the site is located in permafrost terrain and determines the substrate characteristics. If the site is located in ice-rich terrain, a change of location or complete renouncement should be considered. Timely observations and appropriate monitoring instrumentation at a potential construction site deliver useful information on ground temperature, ice content and deformation characteristics.

Loading conditions taking into account potential changes to the permafrost substrate must be considered for the structure design. The influences of climate change, construction activity and the use of the infrastructure can lead to permafrost degradation and for example induce differential settlement and creep. The potential evolution of the permafrost during the service life of the structure must be forecasted and the substrate characteristics chosen accordingly. Infrastructure in exposed locations can additionally be affected by natural hazards originating in permafrost areas. These must be accounted for in the hazard analyses and the residual risk determined according to the serviceability of the infrastructure. The residual risks, consisting for example of excessive loads, natural hazards and other potential risks should be communicated to the constructors. A robust, reliable bearing structure with an appropriate foundation or anchor concept and planned redundancies is essential to avoid restrictions of use during the service life of the infrastructure. Monitoring systems can be used to detect and avoid problems or hazards, thus increasing safety during all project phases. The systematic recording and analysis of measurement data can also be used as an early warning system.

This practical guideline is subdivided into three main parts. In the first part, permafrost is defined, its characteristics described and practically applicable permafrost detection techniques are presented. The central part describes a recommended project schedule. The importance of a detailed preliminary study and of an integral monitoring system during all project phases is emphasized here. In a third part, various technical solutions for foundations, anchors, excavations, flexible systems, substrate improvement, tunnels and insulation techniques are enumerated. In addition, the specific handling of building materials for infrastructure in permafrost is discussed.

Every construction project in mountain permafrost is unique and requires specially adapted solutions in order to account for the many exceptional situations which can be encountered. Due to their complexity, it is not appropriate to develop general, all-encompassing 'recipes' for sustainable construction in permafrost. These guidelines nevertheless describe various challenges and solutions, which are based on the current practical and scientific state-of-the-art regarding permafrost infrastructure, but do not claim to be exhaustive.

Keywords: mountain permafrost, infrastructure on permafrost, substrate investigation, site selection, structure design, technical solutions, monitoring

Résumé

La réussite d'un projet de construction sur du pergélisol de haute montagne est pour tous un défi technique et logistique. Pour réaliser une construction durable, le choix du site et de la structure porteuse revêt une importance primordiale.

Le site doit faire l'objet d'une étude préliminaire détaillée afin de déterminer s'il se trouve sur du pergélisol et d'analyser les conditions de construction. Si le site se trouve sur du pergélisol riche en glace, la recherche d'un autre site ou l'abandon du projet devrait être envisagé. L'analyse de la température, de la teneur en glace et du comportement en déformation du sol peut être effectuée par une observation attentive et une instrumentation préalable du site envisagé.

Dans l'analyse de la structure porteuse, des problèmes supplémentaires doivent être pris en considération en raison des modifications possibles du pergélisol. Le réchauffement climatique, la construction d'ouvrages et leur utilisation peuvent contribuer à la dégradation du pergélisol dans le sol de fondation et produire divers effets, comme des tassements différentiels et des fluages. Il convient donc de prévoir l'évolution du pergélisol pendant la durée de vie d'un ouvrage et déterminer par conséquent les caractéristiques à long terme du terrain. Les infrastructures situées sur des terrains exposés peuvent aussi être soumises à des dangers naturels provenant de régions à pergélisol. Cette hypothèse doit être prise en compte dans l'analyse des dangers; il est nécessaire aussi d'estimer le risque résiduel lié à l'utilisation d'un ouvrage. Les risques résiduels non considérés, comme les dangers naturels et d'autres risques spécifiques, doivent être communiqués au maître de l'ouvrage. Afin de garantir la fiabilité d'une construction pour toute la durée de son utilisation, il importe que l'ouvrage soit pourvu d'une structure robuste et adéquate ainsi que de fondations appropriées. Il est possible de détecter d'éventuels problèmes ou dangers en exerçant une surveillance systématique durant toutes les étapes du projet. Cette précaution permettra d'augmenter encore la sécurité. Un système de relevé et d'évaluation systématique des mesures peut également tenir lieu de système d'alerte précoce.

Ce guide pratique est divisé en trois parties. La première contient des informations générales sur le phénomène du pergélisol. Les propriétés du pergélisol y sont décrites et les méthodes pratiques de prospection et de détection y sont répertoriées. La partie centrale comporte des recommandations pour la conduite d'un projet et souligne l'importance d'une étude préliminaire et d'une surveillance intégrée durant toutes les étapes du projet. La troisième partie présente des solutions techniques pour l'exécution des fondations, des ancrages, des travaux d'excavation et des systèmes souples. Ces solutions concernent aussi l'amélioration de la capacité portante du terrain ainsi que la construction de galeries et de tunnels. Des mesures visant à réduire l'apport de chaleur dans le sous-sol sont également décrites dans cette partie, de même que l'utilisation de matériaux de construction dans le pergélisol.

Dans le pergélisol alpin, chaque projet de construction est unique et requiert des solutions spécifiques et adaptées afin de faire face aux nombreuses situations exceptionnelles. Devant la complexité du problème, il est impossible de donner des «recettes» générales pour la construction durable sur ce type de terrain. Néanmoins, divers défis et solutions possibles sont présentés dans ce manuel. Ils sont basés sur un bilan des connaissances techniques et scientifiques actuelles – bilan qui ne saurait toutefois se prétendre exhaustif.

Mots clés: pergélisol, infrastructures sur pergélisol, reconnaissance du terrain, choix du site, analyse de structure porteuse, solutions techniques, surveillance.

Zusammenfassung

Die erfolgreiche Realisation eines Bauprojekts im Hochgebirgspermafrost ist für alle Beteiligten eine technische und logistische Herausforderung. Für die Erstellung von nachhaltigen Bauobjekten sind die Standortwahl und das Tragwerkskonzept von zentraler Bedeutung. Die Standortwahl muss auf eine detaillierte Vorstudie abgestützt werden, welche abklärt, ob der geplante Standort sich im Permafrost befindet, und die Baugrundbedingungen untersucht. Liegt der Standort im eishaltigen Permafrost, sollte eine Standortverschiebung oder ein Bauverzicht in Erwägung gezogen werden. Durch eine frühzeitige Beobachtung und Instrumentierung können Aussagen zur Temperatur, zum Eisgehalt und zum Deformationsverhalten des Baugrunds an einem potenziellen Standort gesammelt werden.

In der Tragwerksanalyse müssen zusätzliche Lastfälle berücksichtigt werden, welche mögliche Veränderungen des Permafrost-Baugrunds einbeziehen. Die Einflüsse der Klimaerwärmung, der Bauaktivität und der Nutzung können zur Permafrost-Degradation im Baugrund beitragen und Auswirkungen wie z.B. differenzielle Setzungen und Kriechdeformationen auslösen. Die Permafrostentwicklung während der geplanten Nutzungsdauer eines Bauwerks muss prognostiziert und dementsprechend die langfristigen, charakteristischen Baugrundwerte gewählt werden. Infrastrukturen an exponierter Lage können zusätzlich durch Naturgefahren aus Permafrostgebieten gefährdet werden. Dies ist in die Gefährdungsbilder einzubeziehen und das Restrisiko ist bezüglich der Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks abzuschätzen. Die nicht abgedeckten Restrisiken, die aus Überlastfällen, Naturgefahren und andern Sonderrisiken zusammengesetzt sein können, sind der Bauherrschaft zu kommunizieren. Zur Gewährleistung der Nutzung während der Lebensdauer eines Bauwerks ist ein robustes, angepasstes Tragwerk, mit einem geeigneten Fundations- und Verankerungskonzept sowie mit eingeplanten Redundanzen wichtig. Mit systematischen Überwachungsmessungen können allfällige Probleme oder Gefahren während allen Projektierungsphasen besser erkannt und die Sicherheit erhöht werden. Eine systematische Aufzeichnung und Auswertung der Messungen kann als Frühwarnsystem dienen.

Der praxisorientierte Leitfaden ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil «Grundlagen» wird das Phänomen Permafrost definiert, dessen Eigenschaften beschrieben und in der Praxis anwendbare Permafrost-Erkundungs- und Nachweismethoden aufgelistet. Im mittleren Teil des Leitfadens wird ein empfohlener Projektablauf aufgezeigt, und die Wichtigkeit einer ausführlichen Vorstudie mit entsprechender Vorlaufzeit sowie eines integralen Überwachungskonzepts während allen Projektphasen betont. Im dritten Teil werden technische Lösungen für Fragestellungen während der Ausführung und Sanierung von Fundationen, Verankerungen, Aushubarbeiten, flexiblen Systemen, Baugrund-Tragfähigkeitsverbesserung, Stollen und Tunnel sowie Massnahmen zur Verminderung von Wärmeeintrag in den Untergrund und der Umgang mit Baumaterialien von Bauten im Permafrost aufgezeigt.

Im Hochgebirgspermafrost ist jedes Bauprojekt einzigartig und verlangt nach speziellen, angepassten Lösungen, um die vielen aussergewöhnlichen Situationen zu meistern. Generelle, allumfassende «Rezepte» für nachhaltiges Bauen im Permafrost zu verfassen, ist aufgrund der hohen Komplexität nicht zweckmässig. Im vorliegenden Leitfaden werden dennoch diverse Herausforderungen und mögliche Lösungen dazu beschrieben. Diese basieren auf einem aktuellen, fachlichen und technischen Wissensstand, erheben jedoch keinen Anspruch allumfassend zu sein.

Schlüsselwörter: Gebirgspermafrost, Infrastruktur im Permafrost, Baugrunduntersuchung, Standortwahl, Tragwerkskonzept, technische Lösungen, Überwachung

Table des matières

Avant-propos	3
Remerciements	4
Abstract	5
Résumé	6
Zusammenfassung	7
Bases générales	13
Champ d'application et délimitation du domaine de validité	14
1 Explications	15
1.1 Glossaire du pergélisol	15
1.2 Le pergélisol: Définition et explications	17
1.3 Répartition du pergélisol	20
1.4 Propriétés du pergélisol	20
1.4.1 Propriétés thermiques du pergélisol	20
1.4.2 Propriétés géotechniques	23
1.5 Formes de terrain et géomorphologie dans le pergélisol	35
1.6 Le pergélisol et le réchauffement climatique	40
1.7 Les dangers naturels	40
1.8 Détection d'un pergélisol	43
1.8.1 Présence supposée d'un pergélisol	44
1.8.2 Vérification de la présence du pergélisol	55
Déroulement du projet	61
2 Etude préliminaire	64
2.1 Analyses nécessaires au préalable pour les nouvelles constructions sur pergélisol	64
2.1.1 Analyse préalable	64
2.1.2 Examens sur le terrain	64
2.1.3 Analyses en laboratoire	65
2.2 Analyses nécessaires au préalable pour les constructions existantes	65
2.2.1 Analyse préalable	65
2.3 Analyse de la structure porteuse	66
2.3.1 Choix du site	66
2.3.2 Concept de structure porteuse	67
3 Avant-projet	69
3.1 Convention d'utilisation	69
3.2 Base du projet	70
3.3 Impact sur l'environnement	70
3.4 Actions	70
3.4.1 Actions sur la structure porteuse	70
3.4.2 Modifications dues au pergélisol des actions sur la structure porteuse	70
3.5 Effets	72
3.5.1 Effets sur la structure porteuse	72
3.5.2 Modifications dues au pergélisol des effets sur la structure porteuse	72
3.5.3 Effets sur le sol de fondation	73

3.6	Analyse des conséquences et de la sensibilité	73
3.6.1	Etendue des analyses et des examens	74
3.7	Exemples d'application	76
3.7.1	Situation initiale – premier exemple	76
3.7.2	Actions sur la structure porteuse	77
3.7.3	Effets sur la structure porteuse	77
3.7.4	Analyse des conséquences et de la sensibilité	77
3.7.5	Etendue des analyses et des examens	78
3.8	Deuxième exemple d'application	78
3.8.1	Situation initiale	78
3.8.2	Actions sur la structure porteuse	79
3.8.3	Effets sur la structure porteuse	79
3.8.4	Analyse des conséquences et de la sensibilité	79
3.8.5	Etendue des analyses et des examens	80
4	Projet de construction	81
4.1	Dimensionnement	81
4.2	Vérifications	81
5	Réalisation	83
5.1	Projet d'exécution	83
5.1.1	Appel d'offres	83
5.1.2	Nouvelles constructions sur pergélisol	84
5.1.3	Réfection de constructions existantes sur pergélisol	84
5.2	Surveillance et contrôles de l'exécution de la construction sur le chantier	84
5.2.1	Préparation du système de surveillance	84
5.2.2	Système de surveillance pendant l'exécution des travaux sur le chantier	85
5.2.3	Plan de contrôle	86
5.2.4	Contrôles d'exécution	86
6	Utilisation et maintenance	87
6.1	Surveillance	87
6.1.1	Adaptation du système de surveillance	87
6.1.2	Plan de surveillance et d'entretien	87
6.1.3	Système de surveillance pendant l'utilisation et la maintenance	87
6.2	Planification de la maintenance et des interventions	87
6.2.1	Plan de maintenance et d'intervention	87
6.2.2	Interventions possibles	89
7	Démontage	91
7.1	Construire en ménageant l'environnement	91
7.2	Planification et réalisation	91
7.3	Constructions et éléments restants	91
7.4	Financement	92
	Solutions techniques	93
8	Solutions techniques	94
8.1	Fondations	94
8.1.1	Concept de fondation	94
8.1.2	Fondations superficielles	94

8.1.3 Fondations profondes	95
8.1.4 Essais de chargement de pieux	96
8.1.5 Plan de surveillance et d'entretien des fondations	96
8.2 Ancrages	97
8.2.1 Concept d'ancrage	97
8.2.2 Tirants en rocher et clous	98
8.2.3 Technique de forage	98
8.2.4 Essais de traction	99
8.2.5 Plan de surveillance et d'entretien des ancrages	99
8.3 Excavation	99
8.3.1 Travaux d'excavation	99
8.3.2 Talus	99
8.4 Matériaux de construction	100
8.4.1 Mortiers cimentés	100
8.4.2 Béton	101
8.4.3 Adjuvants et produits d'injection pour le mortier et le béton	103
8.4.4 Matériaux résistant au gel	104
8.4.5 Matériaux de construction adéquats	104
8.5 Systèmes souples	104
8.5.1 Pylônes d'installations à câbles couissant latéralement	105
8.5.2 Système d'appui tripode	106
8.5.3 Ouvrages paravalanches	107
8.5.4 Conduites d'eau	108
8.6 Atténuation de l'apport de chaleur dans le sous-sol	109
8.6.1 Isolation contre la chaleur	109
8.6.2 Isolation contre le froid	109
8.6.3 Mesures de construction	110
8.6.4 Systèmes de refroidissement actif ou passif	110
8.6.5 Récolte d'eau de pluie et de fonte des neiges	112
8.6.6 Modification de la surface du sol de fondation	112
8.7 Amélioration de la capacité portante du terrain	113
8.7.1 Remplacement de matériaux	113
8.7.2 Injection et clouage	113
8.7.3 Drainage	114
8.7.4 Procédés de dégellement du pergélisol	114
8.7.5 Procédés de maintien du pergélisol	115
8.8 Galeries et tunnels	116
8.8.1 Roche stable, pauvre en glace	116
8.8.2 Roche et terrains meubles instables et riches en glace	116
Annexes	119
Annexe A: Carte indicative du permafrost, OFEV Office fédéral de l'environnement, 2006	120
Annexe B: Exemple d'un plan de contrôle ou d'un plan de surveillance et d'entretien	121
Annexe C: Définition graphique de l'indice de gel et de dégel	122
Annexe D: Bibliographie	123
Annexe E: Liste des sources	125

Bases générales

La réussite d'un projet de construction sur du pergélisol en montagne est un défi pour chacun. Face à la grande complexité du problème, il est impossible de donner des «re-cettes» générales pour une construction durable sur le pergélisol. Néanmoins divers problèmes et solutions possibles sont proposés dans ce manuel.

Ce premier chapitre définit les bases nécessaires pour comprendre le phénomène du pergélisol et utiliser efficacement ce guide concernant la construction sur ce type de sol. Après une description du champ d'application de ce guide, un bref glossaire de la terminologie propre à la construction sur le pergélisol est présenté. Ces éléments sont suivis d'une explication des principaux termes en la matière et d'une présentation de la répartition du pergélisol dans les Alpes suisses. Viennent ensuite une description détaillée des propriétés thermiques et géothermiques du pergélisol alpin ainsi qu'une définition des principales formes de terrain. Les effets du changement climatique sur le pergélisol et les risques naturels possibles dans les régions à pergélisol y sont aussi évoqués. Ce chapitre s'achève par la présentation d'une démarche pratique et systématique de localisation de pergélisols.

Champ d'application et délimitation du domaine de validité

En créant ce manuel **Construire sur le pergélisol**, les auteurs ont élaboré un **guide pratique** afin de faciliter l'étude et la réalisation du projet, ainsi que l'utilisation, la maintenance et le démontage des ouvrages implantés sur le pergélisol alpin. La première partie contient des **informations générales**. On y décrit les principales propriétés du pergélisol alpin, sa répartition et sa présence, ainsi que les risques naturels possibles dans les régions à pergélisol. Cette partie s'achève par la présentation de méthodes reconnues et applicables pour détecter les pergélisols.

La deuxième partie du manuel, consacrée au **déroulement du projet**, est axée sur les normes SIA de la Société suisse des ingénieurs et des architectes. C'est sur cette base qu'ont été définies les étapes du projet:

- Etude préliminaire
- Avant-projet
- Projet de construction
- Réalisation
- Utilisation et maintenance
- Démontage

La troisième partie, réservée aux **solutions techniques**, porte sur les questions les plus fréquemment posées, sur les méthodes qu'il est possible d'adopter pour les fondations et les ancrages et sur des solutions techniques concernant les travaux d'excavation, les matériaux de construction, les systèmes souples, l'isolation thermique, l'amélioration de la capacité portante du terrain et la construction de tunnels dans le pergélisol.

Tous les chapitres s'achèvent par un bref résumé des connaissances présentées.

Le présent guide de construction sur le pergélisol se rapporte aux normes SIA 261, 261/1 et 267, 267/1. Lorsque rien d'autre n'est mentionné, ce sont les normes SIA sur les structures porteuses qui sont valables. Ces normes représentent les règles de l'art reconnues en matière de construction et constituent la collection des normes suisses en matière de construction (site web: www.sia.ch).

Les termes utilisés dans ce manuel correspondent à la terminologie du génie civil et sont complétés au besoin par les termes du glossaire de l'Association internationale du pergélisol (International Permafrost Association IPA).

Pour l'étude de projets de construction d'ouvrages paravalanches sur le pergélisol, il est fait référence à la Directive technique de la Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement (MARGRETH 2007). Ce manuel traite l'analyse de la structure porteuse, le dimensionnement, la construction, les contrôles d'exécution et la surveillance de la construction d'ouvrages paravalanches. La construction d'ouvrages avec piliers articulés sur le pergélisol est brièvement évoquée au chapitre 8.5 de ce manuel.

Ce guide n'est pas exhaustif. Il a pour but d'informer la pratique sur l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques concernant la réalisation et l'entretien de constructions sur le pergélisol.

1 Explications

1.1 Glossaire du pergélisol

Le présent glossaire contient les termes utilisés dans ce manuel ou dans la littérature spécialisée. Cette terminologie correspond en majeure partie au glossaire de l'Association internationale du pergélisol (IPA), (IPA, French terms (2005), site web: <http://nsidc.org/fgdc/glossary>).

Accrétion du pergélisol

Augmentation de l'épaisseur ou de l'étendue du pergélisol.

Affaiblissement dû au dégel

Réduction de la résistance au cisaillement lors du dégel d'un sol contenant de la glace (réduction de la compacité du sol de fondation).

Consolidation due au dégel

Renforcement du sol variant au cours du temps et provoqué par la fonte et l'écoulement de l'eau interstitielle excédentaire (augmentation de la compacité du sol de fondation).

Dégradation du pergélisol

Diminution de l'épaisseur ou de l'étendue du pergélisol.

Degrés-jours

Différence entre la température journalière moyenne de l'air et la température de référence (0 °C) cumulée sur tous les jours de l'année civile avec $T < 0\text{ °C}$ (pour l'indice de gel) ou $T > 0\text{ °C}$ (pour l'indice de dégel).

Délogement gélival / gélifraction

Destruction mécanique des matériaux qui se produit sous l'effet de la pression lorsque l'eau gèle dans les discontinuités rocheuses.

Dilatance

Augmentation du volume ou élévation du coefficient de frottement d'un terrain meuble granuleux qui apparaît sous l'action des forces de cisaillement.

Ejection gélivale

Soulèvement d'objets (p. ex. fondations) dans le pergélisol sous l'effet du gel. Ce processus peut entraîner l'éjection de l'objet.

Fonte sous pression

Réduction du point de fusion de la glace par l'exercice d'une pression.

Gel artificiel du sol

Production artificielle ou maintien d'un sol gelé.

Géli-adhérence

Processus selon lequel deux objets se lient par la glace.

Gélivation

Effet produit sur des objets dans le sol par l'alternance de dégel et de gel de l'eau interstitielle.

Glace de ségrégation

Glace se formant dans le sol le long d'un gradient de température négatif sous l'effet de la migration de l'eau interstitielle ou de l'évaporation.

Glace de sol

Désignation générale des formes de glace dans des sols gelés.

Glissement dû au dégel

Instabilité de la pente provoquée par le dégel de la glace de sol.

Gradient de température

Différence de température sur une certaine distance, exprimée en $^{\circ}\text{C m}^{-1}$.

Indice de dégel

Différence entre un minimum relatif et un maximum de la courbe des fréquences cumulées des températures journalières moyennes de l'air (fournit un indice en «degrés-jours») pendant une période de températures de l'air positives (en été) (SN 670 140b) (annexe C).

Indice de gel dans l'air

Différence entre un maximum relatif et un minimum de la courbe des fréquences cumulées des températures journalières moyennes de l'air (fournit un indice en «degrés-jours») pendant une période de températures de l'air négatives (en hiver) (SN 670 140b) (annexe C).

Pergélisol sensible au dégel

Sol qui subit un tassement notable ou une perte de résistance lors du dégel.

Pergélisol stable au dégel

Sol qui ne présente pas de tassement notable ni de perte de résistance lors du dégel.

Pieu réfrigéré

Pieu équipé d'un système de réfrigération.

Pression de soulèvement

Pression ascendante produite par le gel du sol et qui peut provoquer le soulèvement des infrastructures.

Profondeur de gel

Profondeur maximale de pénétration du gel dans le sol, mesurée normalement jusqu'à la surface du sol (pour en savoir plus: SN 670 140b, gel).

Reptation

Lente déformation (déformation par cisaillement variant au cours du temps) provoquée par une contrainte de longue durée qui est trop faible pour entraîner une rupture.

Résistance à la géli-adhérence

Résistance à la rupture ou au cisaillement qui doit être surmontée pour séparer deux objets liés par la glace.

Sol gélif

Sol dans lequel la ségrégation permet la formation de lentilles de glace capables de provoquer des dégâts dus à un soulèvement pendant le gel ou à une diminution de la portance lors du dégel (SN 670 140b).

Sol non gélif

Sol dans lequel l'eau interstitielle gelée n'entraîne pas de soulèvement dommageable et le dégel ne cause aucune réduction notable de la portance (SN 670 140b).

Soulèvement gélival

Mouvement ascensionnel ou latéral du sol ou d'objets se trouvant dans ou sur le sol et provoqué par la formation de la glace

Techniques de préservation du pergélisol

Méthodes de construction permettant de conserver le pergélisol.

Techniques favorisant le dégel du pergélisol

Méthodes de construction appliquées si la dégradation du pergélisol ne peut être évitée:

- Le sol est dégelé / compacté / remplacé
- Les tassements dus au dégel sont pris en considération lors de l'analyse de la structure porteuse et du dimensionnement de l'infrastructure.

Teneur en eau non gelée

Quantité d'eau non gelée (à l'état liquide) dans le pergélisol.

Tension de succion ou cryosuccion

Evolution d'une tension de succion qui se produit dans un sol gelé ou partiellement gelé et qui résulte d'un gradient de température dans la part d'eau non gelée.

Thermosiphon

Echangeur passif de chaleur (système de pompage de gaz ou de liquide à une ou deux phases) qui extrait la chaleur du sous-sol par un procédé de circulation ou de convection.

1.2 Le pergélisol: Définition et explications

Le **pergélisol** (permafrost) est un sol gelé qui présente des températures négatives durant toute l'année. Le pergélisol est donc un phénomène purement thermique: seule la température du sous-sol est déterminante – et non la teneur en glace. Dans les Alpes, le pergélisol est aussi appelé «pergélisol alpin» ou «pergélisol de montagne».

La couche du sol située entre la surface du sol et le toit du pergélisol est la zone de dégel ou **couche active** (fig. 1), qui dégèle en été et gèle en hiver. Son épaisseur va de quelques centimètres à plusieurs mètres et varie d'une année à l'autre. Etant donné que la couche active subit des changements de phase saisonniers (formation ou fonte de glace), elle peut poser des problèmes au point de vue géotechnique.

Le sommet de la partie gelée, appelé le **toit du pergélisol**, est la limite supérieure du **corps du pergélisol** (fig. 1). Au-dessous, le sol présente des températures négatives durant toute l'année. Le corps du pergélisol peut avoir une épaisseur de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

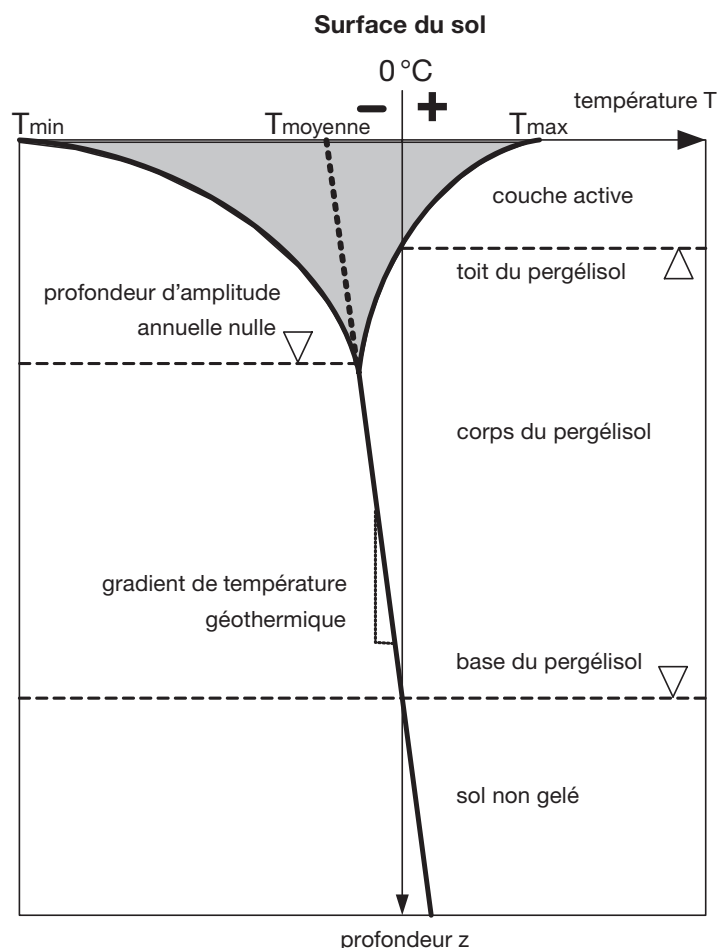


Fig. 1: Termes importants et répartition typique des températures (courbes noires) dans un pergélisol. La zone grise indique la largeur des variations saisonnières de la température dans le sous-sol.

La **base du pergélisol** est la limite inférieure du corps du pergélisol (fig. 1). Au-dessous de cette limite, le sol reste non gelé durant toute l'année à cause du **flux de chaleur géothermique** provenant de l'intérieur de la terre. La topographie alpine étant très complexe, l'intensité du flux constant de chaleur varie d'un site à l'autre.

A partir d'une certaine profondeur dans le sous-sol, c'est-à-dire la **profondeur d'amplitude annuelle nulle** (fig. 1), la température du sol ne présente plus aucune variation saisonnière.

Le pergélisol peut contenir de la **glace de sol** (chap. 1. 4. 2). Cette glace est formée par le gel de l'eau de pluie et de fonte de neige, par le dépôt de neige et de neige d'avalanche, ou elle provient d'une ancienne glace de glacier. Dans la roche, la glace de sol se trouve principalement dans des fissures et des ruptures. Dans les terrains meubles (p. ex. moraines, éboulis), la glace peut se trouver dans des pores et des cavités. La glace de sol peut se présenter de façon dispersée ou sous forme de glace massive (lentilles de glace). Lorsqu'elle gèle, l'eau contenue dans les interstices forme une **glace interstitielle**, sans apport d'eau supplémentaire. Lorsque l'eau gèle, son volume augmente de quelque 9 % (soulèvements) et inversement lorsqu'elle fond (tassements).

Les gradients de température peuvent entraîner le déplacement de la vapeur d'eau dans le sol d'un endroit plus chaud à un autre plus froid où elle gèle et forme ainsi une glace appelée **glace de ségrégation**. Ce type de formation de glace est aussi possible dans la roche, ce qui provoque une dilatation des fissures et une expansion de la roche.

La **teneur en glace** est déterminée par les propriétés du sol (granulométrie, volume des pores, cavités) et elle influe sur les propriétés mécaniques et la capacité portante du terrain. La teneur en glace gravitaire est déterminée par la fraction pondérale de glace par rapport aux matériaux secs du sol et elle est exprimée en pour-cent. Pour des taux entre 50 et 150 %, on parle d'une teneur élevée en glace. La teneur volumique en glace est calculée sur la base du rapport entre le volume de glace et le volume total de sol. La teneur volumique en glace maximale atteint alors un volume de 100 %. Diverses teneurs en glace sont décrites au chapitre 1.4.2.

Les sols fins peuvent aussi contenir de **l'eau non gelée** sous des températures inférieures à 0 °C, car la minéralogie (structure des cristaux et propriétés chimiques) et la taille des grains du sol peuvent abaisser le point de congélation.

Les zones non gelées se trouvant dans le corps du pergélisol sont appelées des **taliks** – lorsqu'elles sont situées au-dessus du toit du pergélisol, elles prennent le nom de couche dégelée résiduelle (fig. 2). Des flux d'eau (et donc aussi des flux de chaleur) peuvent se produire dans les taliks. Lors de la reconnaissance du terrain à proximité de sa surface, les couches dégelées résiduelles peuvent donner la fausse impression que le pergélisol est absent. Les taliks peuvent être engendrés par l'eau du sol ou l'activité liée à la construction, entre autres.

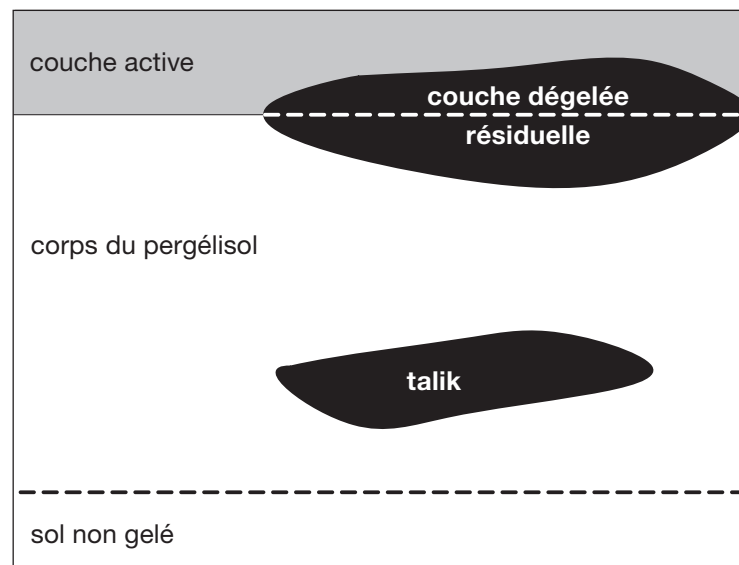


Fig. 2: Les taliks sont des zones non gelées ($T > 0^{\circ}\text{C}$) à l'intérieur du corps du pergélisol et dans la zone du toit du pergélisol.

1.3 Répartition du pergélisol

Dans les Alpes, le pergélisol peut être présent au-dessus de 2200 m d'altitude, selon l'exposition et la position dans la pente (chap. 1.8). Environ 6 % de la surface des Alpes suisses se trouvent dans une zone de pergélisol.

Dans certains cas particuliers, on rencontre du **pergélisol azonal** à des altitudes basses (vers 1000 m d'altitude) – généralement sous des éboulis situés à l'ombre au pied de parois rocheuses abruptes. De tels endroits sont souvent caractérisés par la présence d'arbres étonnamment peu développés. Le pergélisol azonal peut aussi être produit artificiellement, par exemple sous des patinoires artificielles qui ne disposent pas d'une couche d'isolation contre le froid entre la surface de la glace et le sol.

En montagne, la présence du pergélisol est fortement influencée par la topographie, le manteau neigeux (LUETSCHG *et al.* 2008), la température de l'air et le rayonnement solaire ainsi que par la constitution de la surface du sol, la géologie et l'hydrologie (tab. 1).

1.4 Propriétés du pergélisol

1.4.1 Propriétés thermiques du pergélisol

Dans les Alpes, les températures du pergélisol se situent généralement entre -3°C et 0°C . Elles sont parfois plus basses dans les parois rocheuses exposées en haute altitude.

Les températures du sol sont influencées par le flux géothermique provenant de l'intérieur de la terre; ce flux, qui reste constant au fil du temps, est légèrement inférieur en montagne. Par ailleurs, les conditions saisonnières et les processus à la surface du sol influencent considérablement les températures du sol (tab. 1).

La vitesse des variations de la température du sol est aussi influencée par les propriétés physiques du sol. Celles-ci sont à leur tour déterminées par la teneur en matière solide, en air, en glace et en eau, ainsi que par leurs propriétés thermiques. En raison de l'effet isolant de l'air, un éboulis ayant une forte teneur en air conduit la température plus lentement que la roche.

Les fluctuations des températures horaires et journalières s'enregistrent à proximité de la surface du sol, tandis que dans les zones plus profondes, seules les fluctuations saisonnières se remarquent. Plus on gagne en profondeur, plus les signaux de températures sont filtrés et retardés: A une profondeur de 10 m par exemple, la température varie à peu près 6 mois plus tard qu'à la surface du sol (fig. 3). La chaleur de l'été n'atteint donc cette profondeur qu'au cours de l'hiver – un fait qu'il importe de connaître, par exemple, avant d'installer des ancrages dans le pergélisol.

Transfert de la chaleur dans le sol

Dans le pergélisol, l'échange de chaleur s'effectue soit par **conduction thermique** (flux de chaleur dans des matériaux solides le long d'un gradient de température) soit par **convection** (p. ex. si l'air et l'eau circulent à travers les fissures et les interstices, fig. 4). La conduction thermique dépend de la conductivité thermique K ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) du sol. Dans les processus convectifs, des facteurs supplémentaires entrent en jeu dans le transfert de la chaleur

(p. ex. la vitesse de l'écoulement de l'air et de l'eau). En outre, la **chaleur latente** (0,334 MJ kg⁻¹ lors de la formation de la glace, 2,5 MJ kg⁻¹ lors de la condensation) est produite ou absorbée lors du gel et du dégel (gélivation) et lors de la condensation de l'eau ou de la sublimation de la glace (changements de phase).

Tab. 1: Paramètres influençant la température du sol et donc la répartition du pergélisol en haute montagne.

Paramètre	Explication
Topographie	Les températures du sol sont en général plus basses au pied des versants (dépôts d'avalanche), sur les crêtes (neige soufflée par le vent, faible flux géothermique), les parois rocheuses abruptes (peu ou pas de neige), les versants à l'ombre (peu d'ensoleillement) et dans les zones plus élevées (températures de l'air plus basses). La topographie étant complexe (p. ex. sur les crêtes), les températures du sol présentent de forts contrastes entre les versants ensoleillés et ceux qui sont ombragés – elles peuvent s'influencer mutuellement dans le sous-sol.
Répartition spatiale et temporelle du manteau neigeux	C'est principalement l'effet isolant du manteau neigeux qui détermine si et comment la température est échangée entre l'air et le sol. Le sol se refroidit davantage sur les lieux où la neige a été soufflée par le vent, où sa répartition est hétérogène (p. ex. sur les terrains parsemés de gros blocs) ou sur les lieux où elle a glissé (isolation plus faible). La température du sol est également plus basse là où la neige reste plus longtemps en été (pied des versants, dépressions de terrain, pistes de neige artificielle) (protection contre le rayonnement solaire et températures élevées de l'air). Répartition temporelle du manteau neigeux favorisant le pergélisol: peu de neige en automne et au début de l'hiver, beaucoup de neige au printemps et en été. Le manteau neigeux a une influence essentielle sur la répartition du pergélisol, car en haute montagne, le sol est souvent enneigé pendant 8 à 10 mois.
Température de l'air	Dans les régions à pergélisol, la température moyenne annuelle de l'air est inférieure à 0 °C (exception: en basse altitude, cette moyenne peut être dépassée sur les sites de pergélisol azonal). En montagne, le gradient thermique est d'environ 0,6 °C / 100 m.
Rayonnement	Le rayonnement direct à ondes courtes accélère la fonte de la neige et augmente la température du sol durant les saisons sans neige. Ces températures sont donc plus basses sur les versants à l'ombre et les sites ombragés.
Constitution de la surface du sol	Les sols rugueux, constitués de gros blocs, sont généralement plus froids (circulation de l'air, bon drainage, manteau neigeux hétérogène) que les sols fins.
Propriétés du sol	Les propriétés thermiques et géotechniques du sol sont fortement influencées par les propriétés physiques de la roche (p. ex. conductivité thermique, albédo) et par autres aspects, comme la stratification et la composition du sol de fondation).
Hydrologie	DLa température du sol est fortement influencée par l'eau d'écoulement. Une partie de l'eau qui s'écoule (pendant la fonte des neiges p. ex.) peut geler et former de la glace de sol. Dans le corps du pergélisol, des taliks peuvent se former au travers desquels l'eau s'écoule. Les lacs réchauffent le sol (haute capacité thermique). Les basses températures des sources (< 3 °C) peuvent laisser augurer la présence de glace dans le sol.
Glaciers	Etant donné que sous les glaciers alpins la température du sol est de 0 °C, il n'existe généralement pas de pergélisol à ces endroits, à l'exception de la zone située au-dessus de la rimaye, ainsi qu'au-dessous des glaciers suspendus et des névés.

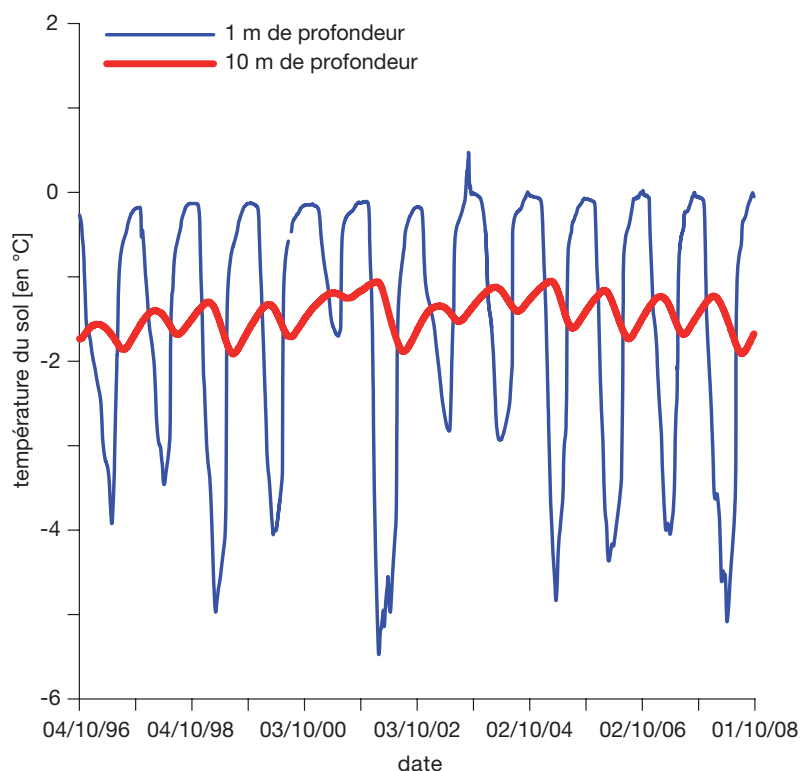


Fig. 3: Températures des trous de forage mesurées dans un pergélisol à 1 m et à 15 m de profondeur entre 1996 et 2008 (Schafberg Pontresina, GR) à 2900 m d'altitude. A 10 m de profondeur, le signal de température de l'été ou de l'hiver précédant est enregistré avec environ six mois de retard (données SLF, Davos).

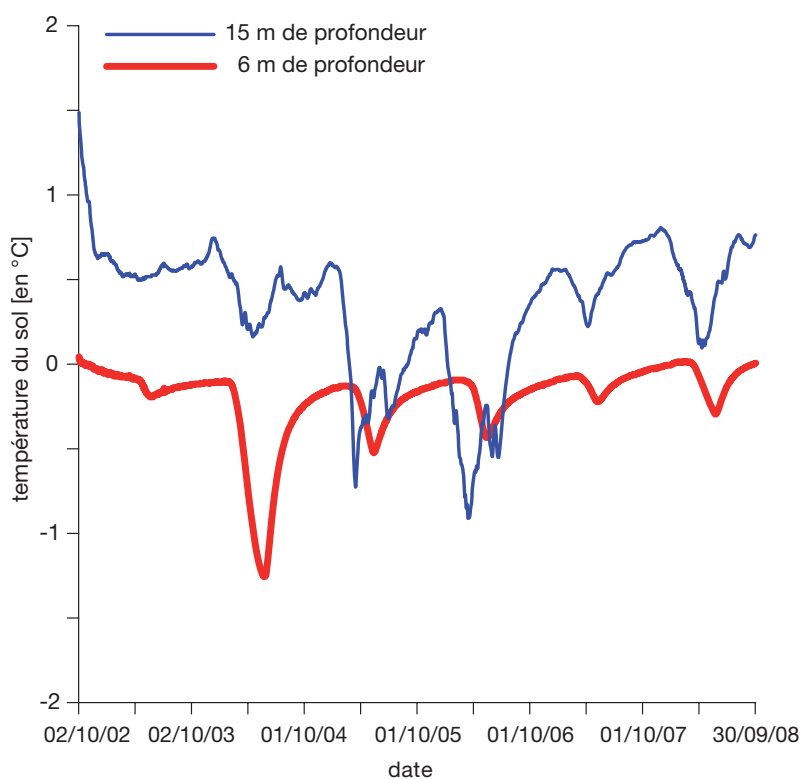


Fig. 4: Températures des trous de forage mesurées dans un éboulis pierreux à 6 m et à 15 m de profondeur, à 2400 m d'altitude (col de la Flüela, GR) entre 2002 et 2008. A 15 m de profondeur, on assiste à un déplacement convectif de chaleur qui est provoqué par la circulation d'air dans les cavités et qui entraîne des fluctuations de température abruptes. A 6 m de profondeur, par contre, la conduction thermique est prépondérante dans la glace de sol. Le type de fluctuation des températures fournit ainsi des indications sur la constitution du sous-sol (données SLF, Davos).

1.4.2 Propriétés géotechniques

Les propriétés géotechniques d'un sol de fondation contenant de la glace dépendent de la température. Lorsque celle-ci augmente, la résistance au cisaillement diminue, ce qui peut entraîner des déformations ou des défaillances de la structure porteuse. Nous abordons ci-dessous les propriétés géotechniques des terrains meubles et de la roche situés dans le pergélisol. Nous décrivons l'influence de chacune des composantes (glace, matière solide, eau et air) dont les teneurs influencent le comportement du sol en résistance et en déformation.

Propriétés structurelles

Les matériaux terreux et rocheux gelés sont des systèmes complexes, multiphasés, qui comprennent les quatre composantes suivantes:

- matière solide minérale (terrain meuble, roche)
- glace
- eau non gelée
- air

Dans le pergélisol, le volume des pores et le degré de saturation peuvent être déterminés de la même manière que dans un sol non gelé. Le degré de saturation indique dans quelle mesure les interstices sont remplis de glace et d'eau non gelée.

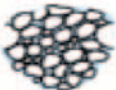
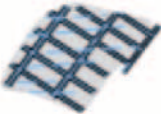
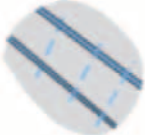
La glace est la composante du sous-sol gelé qui pose le plus de problèmes. Elle joue un rôle crucial dans les propriétés physiques et mécaniques du sol et de la roche. Plus la teneur en glace est élevée, plus les propriétés du pergélisol se rapprochent de celles de la glace pure. La glace se déforme de manière viscoplastique et détient des propriétés physiques et mécaniques particulières. Le comportement plastique (fluage) de la glace soumise à une charge revêt une importance essentielle au point de vue géotechnique (HAEFELI 1954).

Outre la glace, l'eau non gelée est une composante importante du pergélisol, dont elle influence les propriétés. L'eau non gelée apparaît, d'une part, sous la forme d'un film d'eau à la surface de la phase minérale et, d'autre part, à l'intérieur de la glace elle-même. Elle peut avoir un point de congélation inférieur à 0 °C en fonction de la minéralogie et de la granulométrie du terrain ou de la composition chimique de l'eau, comme sa teneur en sel, ou encore sous l'effet de compressions. Des recherches effectuées dans le Grand Nord ont montré que même un pergélisol de température inférieure à -5 °C pouvait avoir une teneur en eau de 5 % et plus. Lorsque le pergélisol se réchauffe, la teneur en eau non gelée peut passer à 10 à 40 %, suivant le type de sol (WILLIAMS 1967; TSYTOVICH 1975). Selon ARENSON *et al.* (2009), on peut en déduire que dans les Alpes, la plus grande partie de l'eau contenue dans le sol est gelée aux températures inférieures à -2 °C car la teneur en sel y est généralement faible.

On peut distinguer différents types de pergélisols en fonction de leur structure (tab. 2). Outre les sols dont la teneur en glace interstitielle est relativement faible, on trouve souvent de grosses lentilles de glace, comme dans les moraines riches en glace (RIEDER *et al.* 1980).

Dans la littérature canadienne (JOHNSTON 1981), une distinction est établie, à des fins géotechniques, entre trois types de pergélisols: le «pergélisol rigide» («hard frozen», sol de fondation présentant de faibles teneurs en eau non gelée), le «pergélisol plastique» («plastic frozen», sol de fondation présentant des teneurs élevées en glace et en eau non gelée)

Tab. 2: Exemples de types de glaces contenues dans un terrain meuble (glace interstitielle) et dans la roche (glace fissurale). Les valeurs indiquées peuvent varier localement et devraient être vérifiées sur le terrain ou testées en laboratoire.

Structure des matériaux	Représentation schématique	Teneur volumique en glace (degré de saturation en glace)	Comportement mécanique à l'état gelé
Quasi-isotrope (propriétés semblables dans toutes directions) Terrain meuble avec beaucoup de glace		riche en glace, 55–85 % (sursaturé)	fluage notable sous l'effet d'une charge (effet de la gravité, surcharge)
Terrain meuble avec peu de glace		pauvre en glace, 0–20 % (insaturé-saturé)	fluage sous l'effet d'une charge
Anisotrope (propriétés dépendantes de la direction) Roche fissurée avec beaucoup de glace		riche en glace, 10–30 % (saturée)	fluage sur les fissures
Roche fissurée avec peu de glace		pauvre en glace, 0–10 % (insaturée)	peu de problèmes, évent. fluage sur les fissures situées aux endroits défavorables

et le «pergélisol sec» («dry frozen», sol de fondation ne contenant pratiquement pas de glace). Le pergélisol plastique, tout comme la glace pure, tend à se déformer et à fluer, tandis que le pergélisol sec présente des propriétés mécaniques semblables à celles des sols non gelés. La déformabilité du pergélisol rigide dépend étroitement de sa teneur en glace. En plus des propriétés structurelles, statiques, du pergélisol, les processus cryogéniques y jouent un rôle important.

Les principaux processus sont les suivants:

- modification de la structure et de la texture, due
 - au gel de fractions d'eau,
 - à l'expansion de lentilles de glace,
 - à la fonte de glace ou de neige;
- transfert d'humidité du chaud vers le froid (ségrégation de la glace)

Lors de la fonte des neiges ou de fortes précipitations, l'eau transfère, entre autres, de la chaleur dans le sous-sol (convection). Selon la température du terrain, de la glace fond ou se forme alors dans le sol. En plus de conséquences telles que réduction de la stabilité ou apparition de tassements ou de soulèvements, l'augmentation ou la diminution de la teneur en glace modifie continuellement les propriétés géotechniques du sol.

Les différences de température entre le sol non gelé et le sol gelé créent ce qu'on appelle un gradient de température négatif. Sous l'effet de ce gradient, combiné avec la tension de succion qui apparaît lors de la formation de glace, l'eau interstitielle ou la vapeur d'eau migre du sol non gelé vers le sol gelé (fig. 7). En fonction de l'apport d'eau, des lentilles de glace peuvent se former sous l'effet d'un processus dit de ségrégation (alinéa «glace de ségrégation»). Le chapitre 1.7 revient plus en détail sur ces mécanismes et processus cryogéniques actifs dans le pergélisol.

Terrains meubles dans le pergélisol

Les propriétés géotechniques des terrains meubles situés dans le pergélisol dépendent essentiellement de leur teneur en glace, de leur composition granulométrique et de leur température. Les propriétés géotechniques de ces matériaux et leur comportement en résistance et en déformation sont présentés ci-dessous.

Forme des grains et granulométrie

La forme des grains et la distribution granulométrique des terrains meubles ainsi que les proportions de matière solide et de glace influencent le comportement en résistance et en déformation d'un sol de fondation gelé. Les courbes granulométriques indiquent généralement une composition bien structurée, mais présentant peu ou pas de composantes fines de la taille de l'argile. La composition et la texture des terrains meubles situés dans le pergélisol sont comparables à celles d'un sol non gelé. Ainsi, le pergélisol peut contenir toutes les classes de terrains meubles répertoriées dans le système unifié de classification des sols (USCS Unified Soil Classification System). En Suisse, la classification des terrains meubles est définie dans les normes SN 670 004-1a et SN 670 004-2a.

L'influence de la composition granulométrique sur la gélivité du terrain est traitée au chapitre 8.4.4. Les fractions fines influencent la formation de glace et par conséquent la gélivité des sols de fondation. Les composantes fines de ces sols peuvent fixer davantage d'eau et donc poser des problèmes, tels que soulèvements en cas de gel ou perte de résistance au cisaillement et tassements en cas de dégel.

Compacité et porosité

La compacité étant liée à la porosité, ces deux propriétés géotechniques, difficilement séparables, sont traitées dans la même rubrique. La compacité détermine en grande partie les propriétés mécaniques d'un sol contenant peu de fractions fines (sables, graviers). Une forte compacité augmente la résistance au cisaillement avec dilatance et diminue la sensibilité au tassement d'un pergélisol. Et une porosité réduite a généralement pour corollaire une basse teneur en glace et en air. Une faible compacité détermine les propriétés inverses. La porosité est par exemple plus grande, ce qui peut entraîner des teneurs supérieures en glace et en air. On constate généralement une augmentation de la compacité à la base de la couche active, due à la pression des niveaux supérieurs.

La porosité influence la teneur en glace et en eau des terrains meubles. La taille des pores joue un rôle important. Dans les plus grands, l'eau s'écoule principalement sous l'effet de la gravité. Dans les petits pores en revanche, elle peut être transportée dans n'importe quelle direction du sol, sous forme liquide entraînée par la capillarité et la tension de succion ou sous forme de vapeur en suivant un gradient de température. Les interstices assurent ainsi l'apport de l'eau liquide et de la vapeur d'eau nécessaires à la formation de glace de ségrégation.

Teneur en air interstitiel

La teneur en air interstitiel des sols de fondation meubles gelés est variable. En cas de surcharge ou de mouvement de cisaillement, une teneur élevée peut entraîner une diminution de la résistance, une augmentation des déformations ou un tassement du sol. Les tassements sont dus à une diminution de volume consécutive à une compaction. La teneur en air interstitiel d'un sol de fondation peut augmenter lorsque la glace qu'il contient fond.

Perméabilité hydraulique

L'hydrologie d'un sol de fondation gelé est compliquée, car elle est soumise à des processus de gel et de dégel. Elle varie par exemple lorsque de l'eau pénètre dans un pergélisol poreux insaturé et y forme une couche de glace continue, lorsque de l'eau circule dans le corps d'un pergélisol (talik) ou lorsqu'une arrivée d'eau plus chaude déclenche un processus de fonte. Ces facteurs modifient continuellement la perméabilité hydraulique du terrain.

En général, la perméabilité hydraulique est déterminée par la proportion de matériaux fins, par la teneur en glace et par la porosité (compacité). Dans la couche active, on remarque une augmentation vers le bas de la proportion de matériaux fins (ségrégation inverse) et de la compacité (pression exercée par les niveaux sus-jacents). La perméabilité diminue donc avec la profondeur. Dans la couche active, elle est plusieurs dizaines de fois plus grande que dans un corps de pergélisol riche en glace. On peut ainsi généralement considérer qu'un pergélisol saturé en glace est imperméable.

Teneur en glace

La majeure partie de l'eau contenue dans le pergélisol est sous forme de glace. La teneur en glace d'un sol de fondation meuble gelé est variable. Elle peut être dispersée ou se concentrer sous l'effet d'un processus de ségrégation. La figure 5 présente schématiquement différentes teneurs volumiques en glace dans un terrain meuble grossier. Outre la température du sol, c'est la teneur en glace qui influence le plus la résistance et la déformabilité d'un sol de fondation permagelé.

La fonte de la glace contenue dans le sol peut générer une diminution de son volume et par conséquent des tassements (fig. 6). La diminution de volume due au changement de phase et le drainage de l'eau de fonte à partir d'un terrain meuble sont présentés à la figure 6. La ligne bc décrit le dégel de la glace contenue dans le sol à une température de 0 °C. Dans un terrain meuble à grain fin, on constate également une consolidation continue due au dégel. Elle dure jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli dans le sol de fondation pour une pression exercée par les niveaux sus-jacents σ_0 et une surcharge $\Delta\sigma$. La diminution de volume due au tassement induit par le dégel et à l'augmentation de la contrainte de compression est décrite par la ligne cd de la figure 6.

Glace de ségrégation

La migration d'eau interstitielle ou de vapeur d'eau le long d'un gradient de température négatif (du chaud vers le froid) jusqu'au front du gel peut créer des zones riches en glace (lentilles ou couches de glace de diverses épaisseurs) dans le pergélisol. Ces formations, susceptibles de générer des soulèvements du sol de fondation (mouvements vers le haut ou vers l'extérieur dus à l'expansion du terrain), peuvent influencer sa résistance au cisaillement et sa portance selon la température de la glace. Le processus de ségrégation (formation de glace de ségrégation) est schématisé à la figure 7.

Température

L'abaissement de la température dans un pergélisol riche en glace peut augmenter sa résistance et diminuer ses déformations par fluage (fig. 8). La glace froide (≤ -2 °C) se déforme de manière moins ductile que la glace tempérée (≥ -2 °C). L'accroissement de la température dans un pergélisol riche en glace diminue sa résistance et accélère les mouvements de fluage. Selon ARENSON *et al.* (2009), la majeure partie de l'eau contenue dans un terrain meuble est gelée à partir de -2 °C, ce qui augmente la résistance du pergélisol.

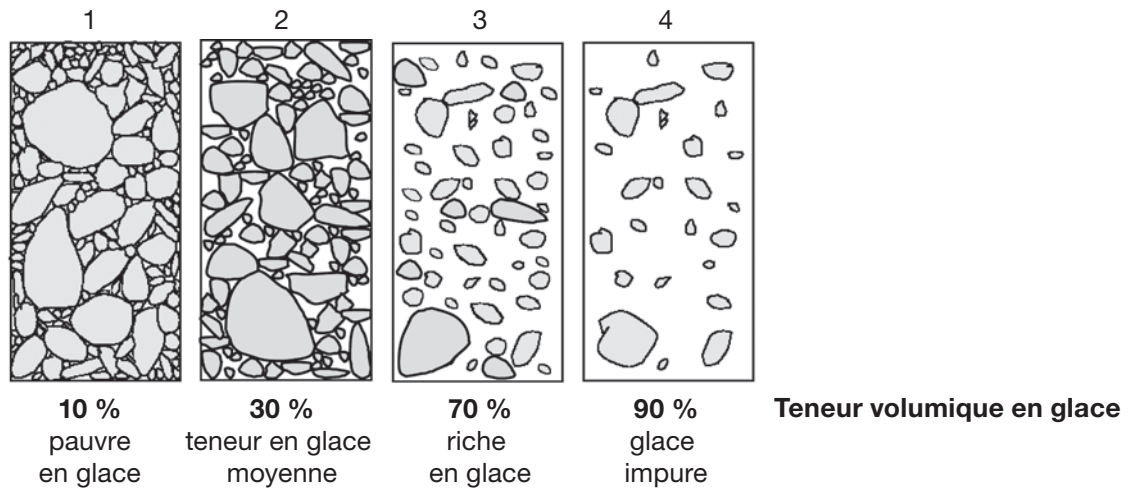


Fig. 5: Teneur volumique en glace dans un terrain meuble à grain fin; 1. gravier dense, pauvre en glace, 2. gravier meuble gelé, 3. gravier riche en glace (sursaturé de glace), 4. gravier avec glace impure (adapté selon ARENSON *et al.* 2007).

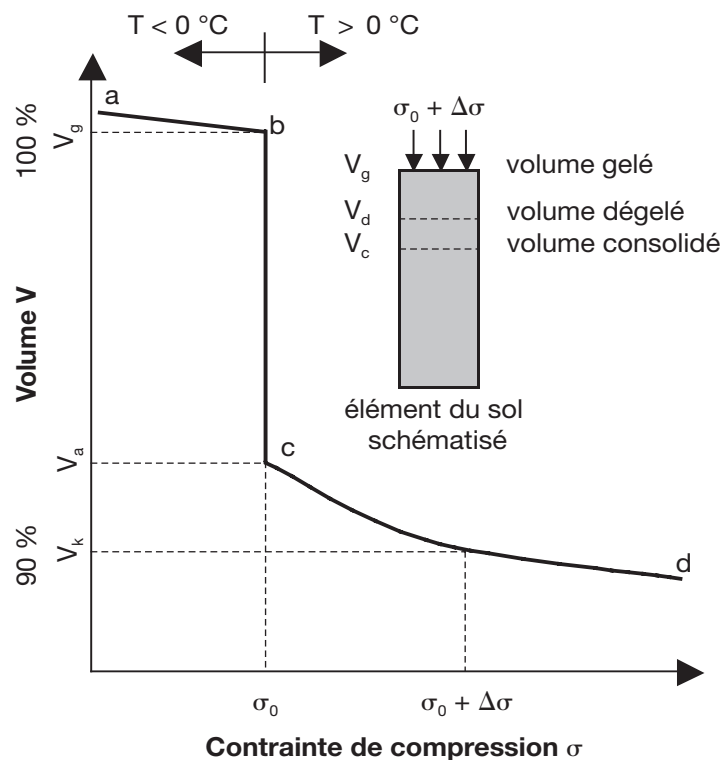


Fig. 6: Lien entre la contrainte de compression et la diminution de volume d'un terrain meuble qui se dégèle (adapté selon ANDERSLAND und LADANYI 2004). V_g = volume gelé, V_d = volume dégelé, V_c = volume consolidé, σ_0 = pression exercée par les niveaux sus-jacents, $\Delta\sigma$ = surcharge.

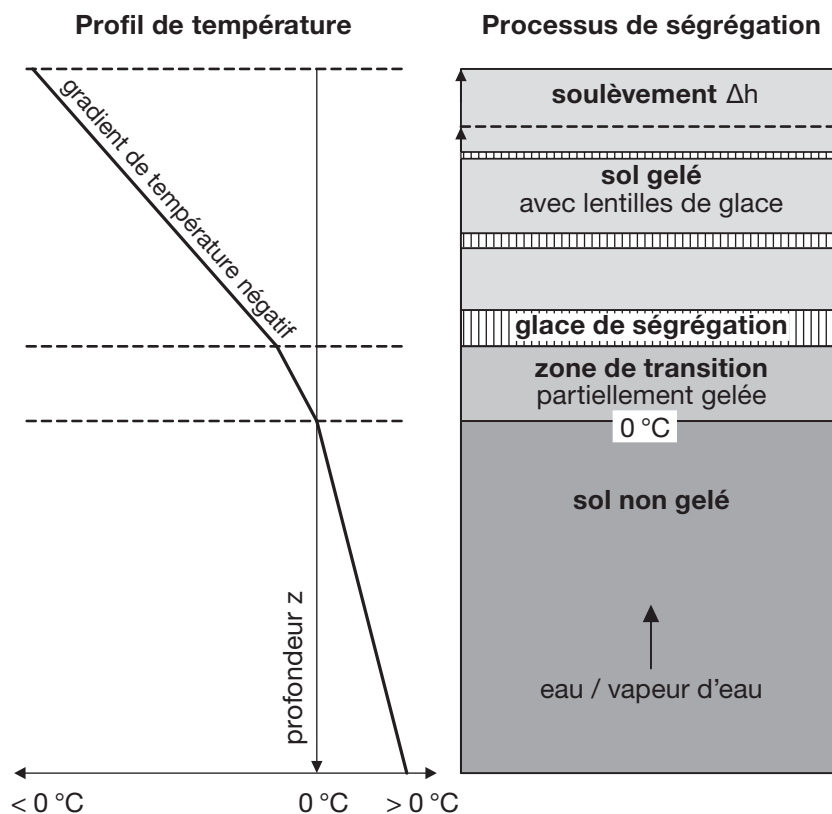


Fig. 7: Représentation schématique d'un processus de ségrégation, formation de glace de ségrégation.

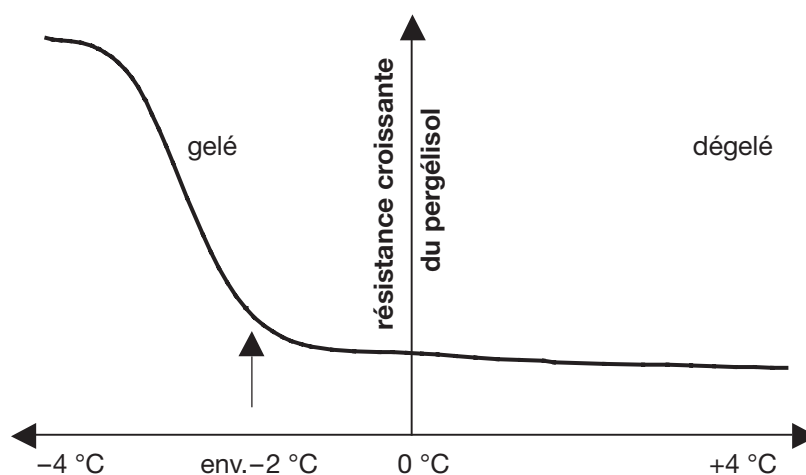


Fig. 8: Représentation schématique de la résistance du pergélisol en fonction la température (adaptée selon ANDERSLAND et LADANYI 2004).

Comportement en résistance

Le comportement en résistance d'un sol de fondation meuble permagelé dépend essentiellement de sa granulométrie, de sa compacité, de sa teneur en glace et de sa température. La résistance au cisaillement d'un terrain meuble grossier bien compacté est déterminée par son angle de frottement et par sa dilatance. Dans un sol de fondation gelé, la résistance au cisaillement peut augmenter grâce aux liaisons intergranulaires assurées par la glace. Ces liaisons sont comparables à une cimentation des grains.

On constate que la résistance au cisaillement de la matrice de glace d'un terrain meuble augmente jusqu'à la saturation en glace, car alors les forces sont principalement transmises par le squelette minéral. Lorsque la teneur en glace dépasse le degré de saturation (sursaturation en glace), la résistance au cisaillement du sol diminue à cause du fluage. Elle est alors déterminée par la glace, car le contact intergranulaire, générateur du frottement interne, a disparu (fig. 5). Dans ces conditions, la résistance au cisaillement diminue.

Lorsque la température du pergélisol est légèrement inférieure à 0°C, la résistance au cisaillement n'est guère plus élevée que dans un sol non gelé. En cas de dégel complet ou de fortes déformations, l'effet de cimentation de la glace disparaît et la résistance au cisaillement diminue à nouveau pour devenir comparable à celle d'un sol non gelé.

Un sol fin gelé résiste mieux au cisaillement qu'à l'état non gelé, tant qu'il n'est pas saturé en glace. D'importantes pressions interstitielles peuvent naître lorsqu'il dégèle. Il s'ensuit une réduction des contraintes effectives et donc une diminution de la résistance au cisaillement, ce qui peut entraîner des instabilités.

La résistance d'un sol de fondation permagelé dépend de la vitesse à laquelle il est chargé et des déformations qu'il subit. Ce comportement est présenté à la figure 10, en fonction de la teneur volumique en glace, et décrit au paragraphe suivant.

Comportement en déformation

Le comportement d'un sol de fondation meuble, gelé et riche en glace qui se déforme sous l'effet d'une charge constante dépend étroitement de la durée du processus. Dans ce cas, le mouvement de fluage est influencé par la teneur en glace et par sa température. Lorsque la teneur en glace d'un terrain meuble dépasse le degré de saturation (sursaturation en glace), les contacts intergranulaires, générateurs du frottement interne, disparaissent et les déformations par fluage augmentent.

La figure 9 présente les courbes de fluage d'un terrain meuble contenant de la glace qui est soumis à une surcharge, pour différents teneurs en glace et selon les trois phases de fluage dominantes. La courbe de fluage standard comprend trois phases caractéristiques dépendantes du temps: la phase primaire (immédiate, décroissante), la phase secondaire (constante) et la phase tertiaire (croissante jusqu'à la rupture, rarement atteinte).

La vitesse à laquelle une charge est appliquée ainsi que la teneur volumique en glace influencent le comportement en déformation d'un sol gelé contenant de la glace. Une mise en charge rapide peut provoquer une rupture cassante, tandis qu'une mise en charge lente induira, selon la teneur en glace, une déformation dilatante ou ductile comprenant un fluage (fig. 10).

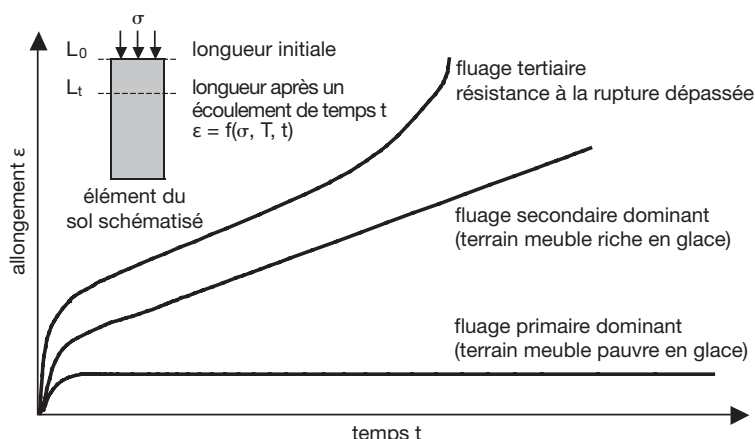


Fig. 9: Courbes de fluage en fonction de diverses teneurs en glace dans le terrain meuble (adapté selon ANDERSLAND et LADANYI 2004). L_0 = longueur initiale, L_t = longueur selon l'espace de temps t , ε = allongement, σ = charge supplémentaire, T = température.

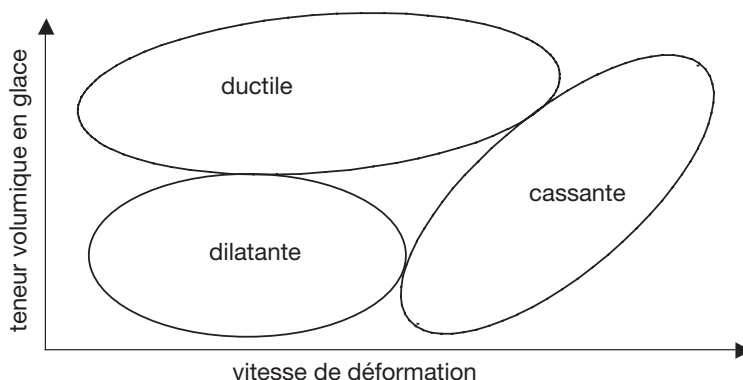


Fig. 10: Comportement en déformation et en résistance d'un terrain meuble dans le pergélisol, en fonction de la teneur volumique en glace (adapté selon ARENSON *et al.* 2002).

Résumé

Les propriétés géotechniques des terrains meubles situés dans la tranche de pergélisol sont déterminées par la température du sol et par les proportions de glace et de matière solide. La résistance dépend essentiellement de la distribution granulométrique, de la compacité, de la teneur en glace et de la température du sol. La résistance au cisaillement d'un sol gelé peut augmenter, selon la teneur en glace, grâce aux liaisons intergranulaires assurées par la glace.

Le comportement en déformation, étroitement tributaire du temps, est influencé par la teneur en glace et par sa température. Lorsque la teneur en glace d'un terrain meuble dépasse le degré de saturation, les contacts intergranulaires disparaissent et les déformations par fluage augmentent.

Le tableau 3 présente qualitativement l'influence des diverses propriétés géotechniques sur la résistance au cisaillement et sur le comportement en déformation d'un sol de fondation meuble permagelé. Les valeurs indiquées peuvent varier localement et elles devraient être vérifiées par des essais sur le terrain ou en laboratoire selon le contexte.

Le tableau 4 présente les valeurs caractéristiques des sols de fondation ainsi que les mécanismes de déformation et de résistance au cisaillement à l'œuvre dans les terrains meubles gelés. Les valeurs indiquées peuvent varier localement et elles devraient être vérifiées par des essais sur le terrain ou en laboratoire.

Tab. 3: Propriétés géotechniques de terrains meubles gelés qui influencent la résistance au cisaillement et le comportement en déformation. * CA: couche active; P: pergélisol

Terrain meuble	Résistance au cisaillement		Comportement en déformation	
	+ (augmentation)	– (diminution)	+ (augmentation)	– (diminution)
Distribution granulométrique	bien structurée, à grain grossier	uniforme, à grain fin	à grain fin	bien structurée, à grain grossier
Compacité	dense	meuble	meuble	dense
Perméabilité: CA / P*	élevée	faible	élevée, > fluage	faible, < fluage
Teneur en air interstitiel	faible, < fluage	forte, > fluage	élevée, > fluage	faible, < fluage
Teneur en glace	jusqu'à saturé	sursaturé, sec	sursaturé	sec à saturé
Température	$\leq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$, > fluage	$\leq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$, < fluage

Tab. 4: Valeurs caractéristiques du sol de fondation et mécanismes d'un terrain meuble gelé.

Description, valeurs du sol de fondation	Terrain meuble gelé, pauvre en glace	Terrain meuble gelé	Terrain meuble riche en glace	Glace impure
Poids spécifique [kg m ⁻³]	2000–2300	1550–2000	1100–1550	900–1100
Compacité	dense	meuble	–	–
Teneur en glace [%]	0–20	20–55	55–85	85–100
Frottement	frottement, dilatance	peu de frottement	très peu de frottement	très peu de frottement
Composition de la résistance au cisaillement, mécanismes	résistance de la glace, résistance du terrain meuble, obstacles structurels, dilatance	résistance de la glace, résistance du terrain meuble, obstacles structurels	résistance de la glace augmentée par la présence de particules de sol	résistance de la glace
Mécanismes de fluage et de déformation	fluage atténué, déformation empêchée par la forme des grains	fluage, déformation empêchée par la forme des grains	fluage, déplacements évent. empêchés par les particules de sol	pas d'obstacle à au fluage, les impuretés favorisent la recristallisation

La roche dans le pergélisol

Les propriétés géotechniques de la roche située dans le pergélisol sont essentiellement dictées par sa teneur en glace, par sa fissuration et par sa température. A la surface de la roche et dans la couche active, elles sont influencées par l'altération due au gel (gélifraction). Cette section décrit les propriétés géotechniques de la roche ainsi que son comportement en résistance et en déformation.

Propriétés de la roche

Sous l'angle de la construction, la qualité de la roche située dans le pergélisol dépend essentiellement de la densité de fissuration, de la largeur des fissures et de leur teneur en glace. L'alinéa suivant décrit une façon possible de déterminer la qualité de la roche (fréquence des fissures), tandis que les alinéas «Teneur en glace» et «Glace de ségrégation» donnent des indications concernant la teneur en glace.

Dans le cas des constructions complexes et sujettes aux déformations, il est recommandé de déterminer soigneusement les caractéristiques de la roche de fondation. En plus de la densité (fréquence) des fissures et de leur largeur, on établira leur direction et leur persistance. Le relevé des couches intermédiaires (remplissage des fissures) permet de déterminer la friction de glissement des discontinuités et les mesures de température fournissent des indications sur la cohésion entre la roche et la glace.

On peut aussi étudier les caractéristiques de la roche en procédant à un carottage. Les échantillons «intacts» prélevés sont ensuite analysés en laboratoire afin de déterminer leur résistance à la compression et leur friction de glissement. Il est aussi important de relever la direction des fissures dans les carottes. Les discontinuités peuvent être examinées de plus près à l'aide d'une caméra de forage. D'autres analyses réalisables sont présentées aux chapitres 2.1.2 et 2.1.3.

Rock Quality Designation Index (Indice RQD)

L'indice RQD (ASTM D6032) est une valeur utilisée pour classer la qualité des carottes de roche. Il est défini comme étant le rapport entre la somme des tronçons de longueur supérieure à 0,10 m et la longueur totale du forage. La valeur obtenue est comparée avec les valeurs empiriques figurant dans un tableau de classification (tab. 5), ce qui fournit une première évaluation de la qualité de la roche.

Tab. 5: Rock Quality Designation (RQD) – Valeurs empiriques destinées à classer la résistance à la pression des roches ou de la qualité de la roche (adapté selon DEERE 1963).

RQD	Qualité de la roche
< 25 %	très faible
25–50 %	faible
50–75 %	moyenne
75–90 %	bonne
90–100 %	excellente

Geological Strength Index (GSI)

La méthode du GSI est utilisée pour classer la qualité d'une roche très fissurée et altérée par le gel. L'indice GSI est fondé sur des observations géologiques de surface, concernant notamment la nature de la roche (lithologie), sa structure et ses caractéristiques superficielles (fissuration, altération, remplissage des fissures). Les estimations qui en résultent permettent d'établir une première évaluation de la qualité de la roche sans devoir procéder à un sondage du sol de fondation. L'ouvrage de MARINOS et HOEK (2005) décrit en détail la détermination de la qualité des roches selon le GSI .

Porosité

La porosité influence la teneur en eau de la roche. La taille des pores joue un rôle important. Dans les plus grands, l'eau s'écoule principalement sous l'effet de la gravité. Dans les petits pores en revanche, elle peut être transportée dans n'importe quelle direction de la roche, sous forme liquide entraînée par la capillarité et la tension de succion ou sous forme de vapeur en suivant un gradient de température. Dans la roche, l'apport de l'eau liquide ou de la vapeur d'eau nécessaire à la formation de glace de ségrégation n'est pas assuré par les pores, mais par les fissures.

Stratification et fissuration

Le sous-sol rocheux et les parois rocheuses ne posent problème que s'ils sont stratifiés ou fissurés et qu'ils contiennent de la glace. Dans ce cas, un réchauffement de la glace peut compromettre la stabilité de la roche et provoquer des chutes de blocs ou des éboulements.

Les circulations d'eau et d'air plus chaud dans les fissures favorisent le réchauffement de la roche et du pergélisol et contribuent donc à la fonte de la glace. Mais il est possible que l'écoulement de l'eau dans les fractures ouvertes soit entravé et que l'eau ainsi accumulée exerce une pression susceptible de déclencher des chutes de blocs ou des éboulements.

Teneur en glace

Dans une roche saine, la teneur en glace dépend essentiellement de la fréquence des discontinuités. Il est rare qu'une roche ne présente aucune fissure ni fracture. Celles-ci sont parfois remplies de glace. En plus de leur «effet de cimentation» (cohésion apparente), les fissures englacées peuvent imperméabiliser une paroi rocheuse au point que l'eau n'arrive plus à s'infiltrer dans la roche. Le tableau 2 fournit des indications concernant le volume de glace contenu dans la roche.

Glace de ségrégation

La ségrégation de la glace peut entraîner un élargissement des discontinuités de la roche. De nouvelles fissures se forment généralement à proximité de la surface du pergélisol ou à la base de la couche active. La ségrégation de la glace est favorisée par les conditions suivantes:

- gradient de température négatif (fig. 7);
- système de fissures (perméabilité) permettant la migration d'eau liquide ou le transfert de vapeur d'eau;
- apport d'eau (non gelée).

La glace de ségrégation joue un rôle essentiel dans les soulèvements de la roche (mouvements vers le haut ou vers l'extérieur dus à l'expansion de la roche) (chap. 1.7, fig. 20).

Température

Une diminution de la température du sol a un effet positif sur la stabilité des roches contenant de la glace, car elle renforce la cohésion de l'ensemble roche-glace. Une augmentation de la température provoque par contre une dégradation et par conséquent une déstabilisation du pergélisol. Des essais en laboratoire ont montré que lorsque la glace atteint une température légèrement inférieure au point de congélation, la liaison roche-glace s'affaiblit et devient instable (indice de stabilité: $< 1,0$ liaison roche-glace rompue; $> 1,0$ liaison roche-glace solide; fig. 11; DAVIES *et al.* 2001).

Un réchauffement du pergélisol se répercute plus rapidement à la surface des parois rocheuses abruptes que dans les terrains meubles. Comme les parois rocheuses ne présentent aucune couche isolante de gros blocs (espaces remplis d'air) et sont peu enneigées, elles sont directement influencées par la température de l'air et par le rayonnement solaire.

Comportement en résistance

La résistance à la compression d'une roche saine est en principe déterminée par le type de roche. Si elle est fissurée, la résistance dépend de la direction des fissures et de leur remplissage. Lorsqu'une force s'exerce perpendiculairement à une fissure remplie de glace, la résistance à la compression dépend des propriétés de la glace et de la roche.

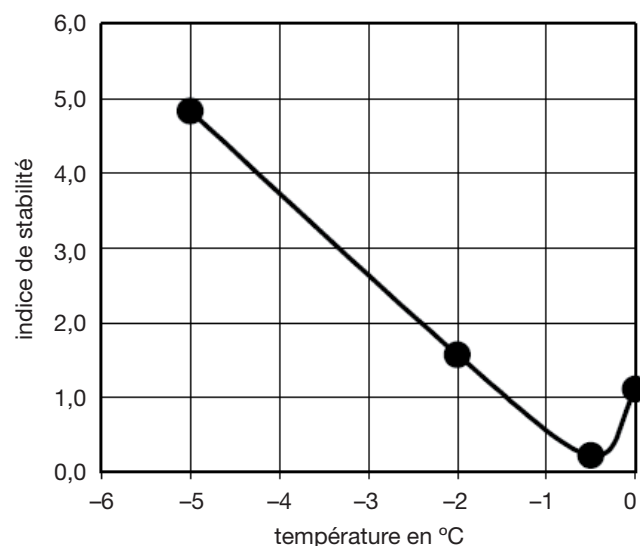


Fig. 11: Relation entre la température de la glace fissurale et l'indice de stabilité de la roche (adapté selon DAVIES *et al.* 2001).

Les forces s'exerçant parallèlement à une fissure sont appelées forces de cisaillement. La résistance au cisaillement d'une fissure remplie de glace dépend de la température de la roche et de la glace. Un réchauffement de la glace fissurale abaisse la stabilité. Ce comportement s'explique par l'apparition d'une surpression d'eau interstitielle accompagnée d'un blocage des cheminements de drainage. Il en résulte une diminution des contraintes effectives et de la résistance au cisaillement des fissures. En comparaison, les fissures exemptes ou remplies de glace ($T \leq -2\text{ °C}$) sont plus stables (fig. 11).

La résistance de la glace est influencée par la température, la pression hydrostatique, les conditions de sa formation, la structure de ses cristaux et les impuretés et matériaux fins qu'elle contient.

Comportement en déformation

Le comportement en déformation d'une roche saine est en principe déterminé par le module d'élasticité correspondant à ce type de roche. Si elle est fissurée, la déformation dépend de la direction des fissures et de leur remplissage. Lorsqu'une force s'exerce perpendiculairement à une fissure remplie de glace, le comportement en déformation dépend des propriétés de la glace et de la roche. Les forces s'exerçant parallèlement à une fissure entraînent une déformation par cisaillement. Celle-ci dépend de la température de la glace contenue dans la fissure. Un réchauffement de cette glace accélère les déformations par cisaillement (accélération du fluage) et peut, dans le pire des cas, rompre la liaison entre la glace et la roche.

Résumé

Dans la pratique, la principale propriété géotechnique d'une roche contenant de la glace est son comportement en déformation et en fluage sous l'effet d'une surcharge. Suivant la teneur en glace, il faut s'attendre à une déformation viscoplastique. Dans les roches fissurées contenant de la glace, les déformations sont déterminées par la direction des fissures et par leur remplissage. Selon la force exercée, la déformation et la résistance à la compression et au cisaillement dépendent des propriétés de la glace ou de la roche. Un réchauffement de la glace fissurale accélère les déformations par cisaillement (accélération du fluage) et peut, dans le pire des cas, rompre la liaison entre la glace et la roche.

Tab. 6: Propriétés géotechniques d'une roche gelée déterminant la résistance au cisaillement et le comportement en déformation.

Roche	Résistance au cisaillement		Comportement en déformation	
	+ (augmentation)	– (diminution)	+ (augmentation)	– (diminution)
Indice RQD	> 50 %	< 50 %	< 50 %	> 50 %
Porosité	faible	forte	forte	faible
Fissuration	faible, en direction inverse du cisaillement	élevée, en direction du cisaillement	élevée, en direction du cisaillement	faible, en direction inverse du cisaillement
Glace de ségrégation	aucune, voire quelques lentilles de glace	beaucoup de lentilles de glace	beaucoup de lentilles de glace	aucune, voire quelques lentilles de glace

Le tableau 6 présente qualitativement l'influence des diverses propriétés géotechniques sur la résistance au cisaillement et sur le comportement en déformation d'une roche gelée. Les valeurs indiquées peuvent varier localement et elles devraient être vérifiées par des essais sur le terrain ou en laboratoire selon le contexte.

1.5 Formes de terrain et géomorphologie dans le pergélisol

Le pergélisol est un phénomène thermique, généralement invisible. Il existe cependant certaines formes géomorphologiques et certains processus qui dévoilent la présence d'un pergélisol (chap. 1.8).

Les **glaciers rocheux actifs** sont des terrains en forme de langue, recouverts d'éboulis et constitués de pierres et de glace; ils fluent en aval à une vitesse de quelques centimètres à quelques mètres par an. Ils sont bombés, ont des structures de reptation à la surface et présentent des bords abrupts ($> 38^\circ$). Cette dernière caractéristique révèle la présence de glace, car l'angle naturel de talus des terrains meubles est inférieur à 38° environ. La température de l'eau d'éventuelles sources sur le front est inférieure à 3°C . Les glaciers rocheux actifs mesurent quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres de long et leur épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Ils sont facilement visibles sur les cartes, les photos aériennes ou sur le terrain et ils ressemblent à des coulées de lave visqueuses (fig. 12, à gauche).

Les **glaciers rocheux reliques** ne contiennent pas de glace, ils sont à peine bombés et sont affaissés. Leurs bords ont une déclivité inférieure à 38° . Des lichens et de la végétation peuvent se trouver à leur surface. L'eau de source, lorsqu'elle existe, a une température supérieure à 3°C . Cela signifie qu'on ne trouve probablement pas de glace à l'intérieur (fig. 12, à droite).

De plus petits **lobes de solifluxion**, en forme de langue, peuvent aussi apparaître dans des sédiments meubles, comme les éboulis ou les moraines. Ces lobes s'étendent sur quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres et leur épaisseur va de quelques centimètres à quelques décimètres. Dans les régions à pergélisol, ils sont généralement sans végétation et leurs bords sont abrupts, ce qui indique la présence de glace dans le sol. Ils sont facilement repérables sur les photos aériennes et sur le terrain (fig. 13).



Fig. 12: (à gauche) Glacier rocheux actif présentant des structures de fluage et des bords abrupts (Val d'Err, région du Julier, à 2600 m d'altitude, GR); (à droite) Glacier rocheux relique affaissé et comportant de la végétation (Älpeltispitz, Klosters, à 2300 m d'altitude GR) (photo: Thomas Stucki, SLF).



Fig. 13: Lobes de solifluxion sur un éboulis (région du Julier, à 2700 m d'altitude, GR).

Les **taches de neige pérenne** subsistent une ou plusieurs années sans fondre en été et isolent ainsi le sol des températures élevées de l'air et du rayonnement solaire. Elles se trouvent généralement au pied des pentes (dépôts d'avalanche) ou dans des dépressions (neige soufflée par le vent) et sont facilement visibles sur les photos aériennes et sur le terrain en automne (fig. 14).

Des **affaissements thermokarstiques** se produisent si la glace de sol fond et que le sol perd une part de son volume (des espaces vides se forment). Ils peuvent apparaître en l'espace quelques jours à plusieurs années et avoir une profondeur de plusieurs mètres. Le sol qui les entoure peut encore contenir de la glace (fig. 15).



Fig. 14: Taches de neige pérenne (dépôts d'avalanche) au pied d'une pente raide (Schafberg, à 2800 m d'altitude, Pontresina, GR).



Fig. 15: Affaissement thermokarstique dans un terrain meuble sur une piste de ski.



Fig. 16: Sol structuré dans un terrain légèrement incliné (région du Julier, à 2700 m d'altitude, GR).



Fig. 17: Glace fissurale dans une zone de départ d'un éboulement (Gemsstock, à 2960 m d'altitude, UR. photo: Carlo Daniöth).

Les **sols structurés** se développent généralement dans des matériaux meubles. Sur les terrains plats, ils peuvent par exemple former des cercles de pierre et sur les terrains en pente des sols striés. De telles structures indiquent la présence de sols contenant de la glace et le déroulement de processus de dégel et de gel. Mais ils ne sont pas un indicateur fiable de pergélisol (fig. 16).

Dans les zones de départ de glissements de terrain, de laves torrentielles (dans les terrains meubles) et de chutes de pierres (dans la roche), de la **glace de sol** ou de la **glace fissurale** peut devenir visible. Une telle glace prouve clairement la présence d'un pergélisol, mais elle est rarement visible sur le terrain (fig. 17).

Les parois rocheuses se trouvant sous les **glaciers suspendus** sont gelées en permanence, car si ce n'est pas le cas, la glace glisserait sur la surface du rocher. Elles sont donc une preuve évidente de la présence d'un pergélisol (fig. 18).

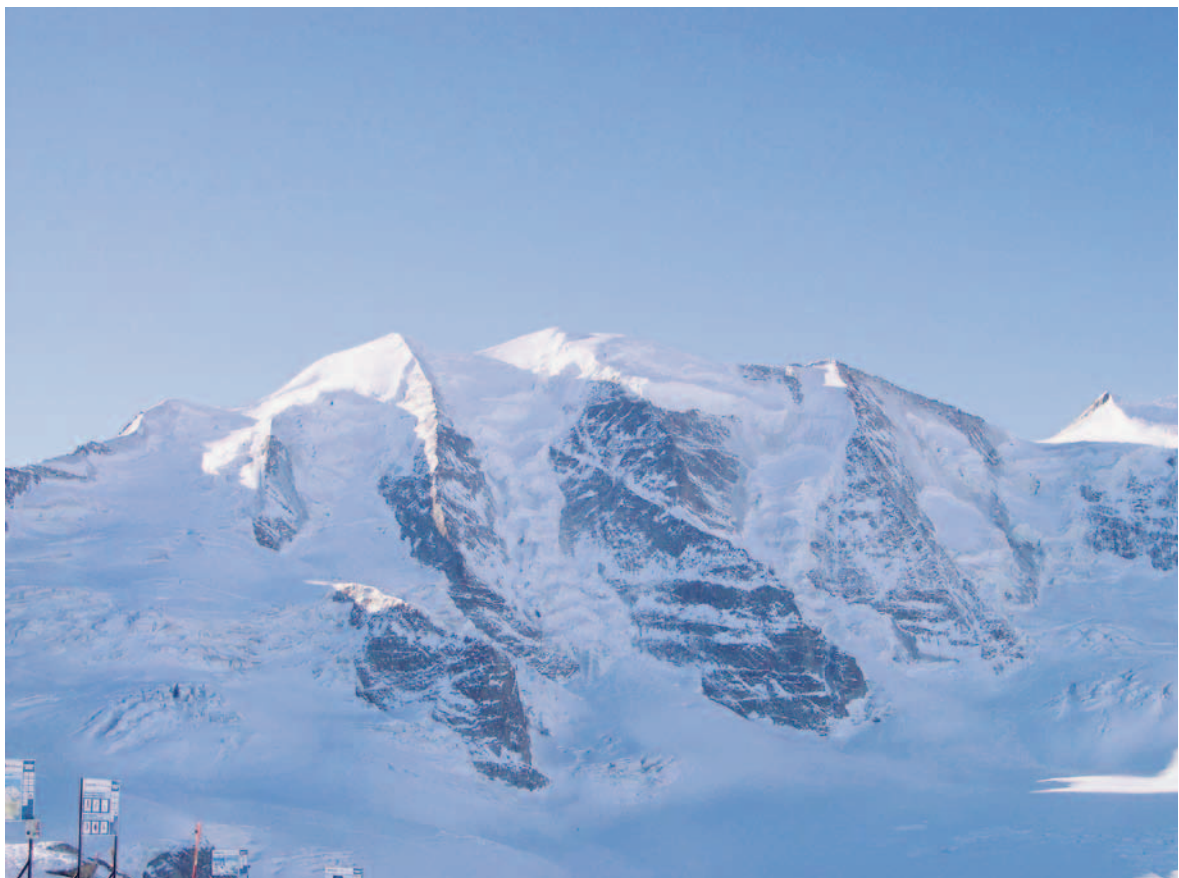


Fig. 18: Glaciers suspendus et parois de glace (Piz Palü, GR). Les glaciers suspendus sont gelés sur les parois rocheuses abruptes et révèlent la présence d'un pergélisol dans le sous-sol.

1.6 Le pergélisol et le réchauffement climatique

Les rapports nationaux et internationaux sur le climat publiés en 2007, prévoient un réchauffement de 2 à 3 °C au cours des 50 prochaines années en Suisse (Occc, 2007; IPCC, 2007). Divers scénarios climatiques envisagent même des réchauffements plus marqués en haute montagne dans l'arc alpin (jusqu'à 4 °C; GIORGI *et al.* 1997). En parallèle à cette augmentation, les précipitations devraient diminuer de 5 à 30 % en été et augmenter de 20 % en hiver. Il faut aussi s'attendre à une augmentation des précipitations extrêmes ainsi qu'à des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse en été. Les conséquences sont difficilement estimables. Mais il est certain que le réchauffement général et l'augmentation des événements extrêmes exercent un effet destructif sur le pergélisol et la glace du sol (MARTY *et al.* 2009). Si le pergélisol se réchauffe ou en vient même à fondre, des mouvements de masse pourraient en résulter (chap. 1.7). L'actuel réchauffement climatique représente donc un défi technique particulier à prendre en compte lors de la mise sur pied et de l'entretien de constructions ancrées dans le pergélisol.

1.7 Les dangers naturels

Le pergélisol est soumis à des dangers naturels spécifiques, dus à la glace qu'il contient. Les principaux processus actifs sont les suivants:

- a) fluage de pentes, glaciers rocheux (production accrue de matériaux charriables);
- b) tassements dus au dégel de glace interstitielle ou fissurale;
- c) éboulements et glissements de terrain dus à la pression d'eau de dégel dans le pergélisol;
- d) érosion de corps de pergélisol dégelés due à une structure instable

Le processus a) est un phénomène continu sur une longue période. Il est comparable aux mouvements de pentes permanents fréquents dans les Alpes, parfois actifs depuis plusieurs milliers d'années. Ces mouvements de fluage dans le pergélisol peuvent être expliqués à l'aide de modèles rhéologiques, comme les grands glissements de terrain permanents. Selon la profondeur du plan de glissement, des constructions entières sont déplacées ou soumises à des mouvements différentiels. Les forces à l'œuvre sont plusieurs fois supérieures à la pression normale des terres.

Les processus b) à d) sont causés par des modifications dans le pergélisol. Lorsqu'il est intact, l'effet de la température de l'air se fait sentir loin à l'intérieur de la roche. La profondeur d'incidence, tributaire de la conductivité thermique de la roche, se situe à 25 mètres environ dans le gneiss et le calcaire. Des mesures effectuées au Jungfraujoch le confirment (fig. 19).

Les fluctuations de la température à l'intérieur du pergélisol entraînent un gel-dégel continu d'une partie de l'eau qu'il contient. La vapeur d'eau migre alors du chaud vers le froid, le long d'un gradient de température négatif, et de la glace se forme de façon anticyclique par rapport aux fluctuations de la température (ségrégation). Des mesures réalisées pendant dix ans dans la région du Sphinx au Jungfraujoch illustrent bien ce phénomène. La roche subit chaque année une déformation inverse aux variations de sa température et cette déformation n'est pas entièrement réversible. Le refroidissement entraîne une cristallisation de la glace, qui s'accompagne d'une expansion de la roche. Au Sphinx, cette déformation a atteint 3 mm en dix ans (fig. 20). L'expansion des fissures remplies de glace affaiblit la roche, qui tend à devenir moins stable.

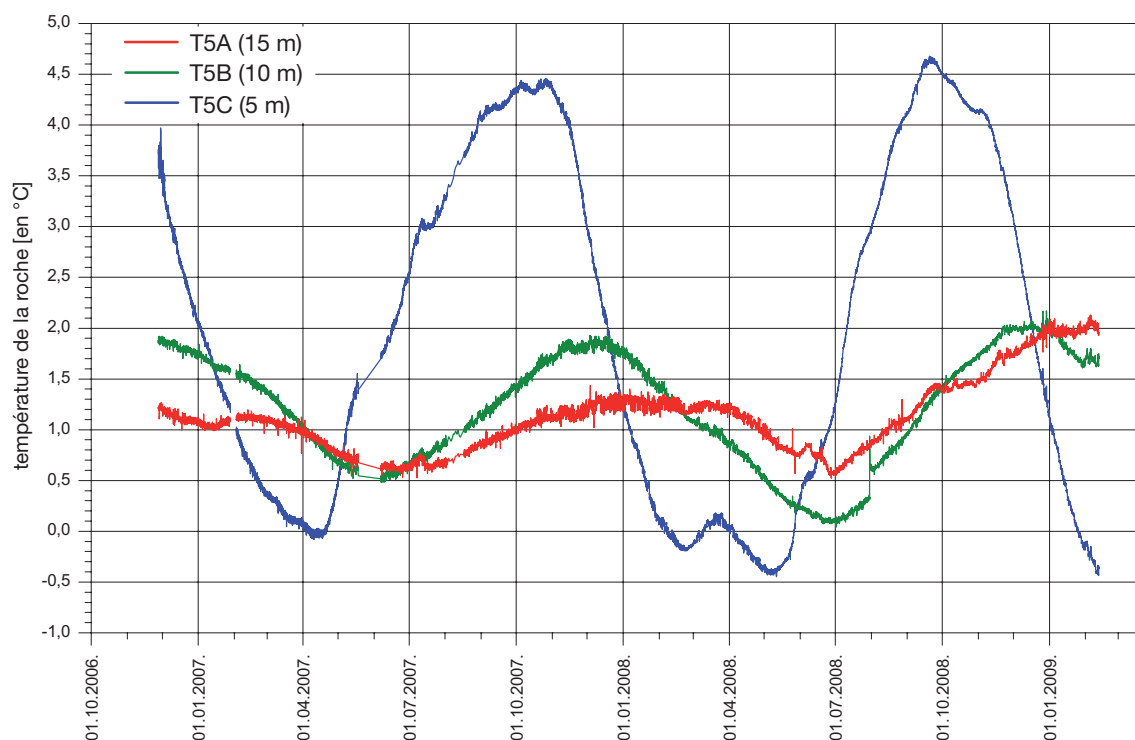


Fig. 19: Effets de température dans la roche du Jungfraujoch en fonction de la profondeur (roche: gneiss; endroit: sortie du glacier; exposition: sud). Plus la profondeur augmente, plus l'amplitude de l'effet de la température s'atténue et se décale dans le temps (Données de Geotest, Zollikofen).

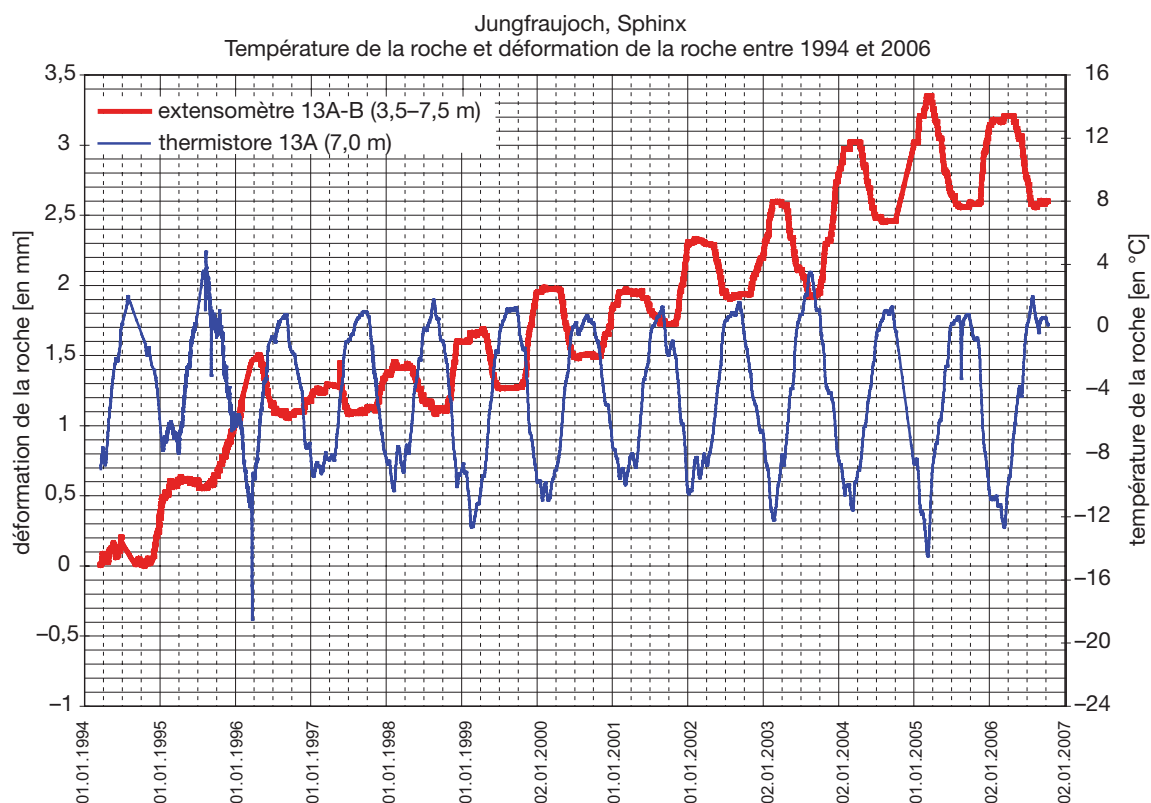


Fig. 20: Déformation anticyclique et partiellement irréversible (en rouge) dans la roche du Jungfraujoch (roche: gneiss avec fissures remplies de glace). La roche s'élargit sous l'effet de la ségrégation de la glace (Données de Geotest, Zollikofen).

Les processus b) à d) sont causés par la perte de stabilité d'un pergélisol en train de dégeler. Dans un pergélisol intact, la glace empêche les infiltrations d'eau et imperméabilise le sous-sol. Lorsque la glace interstitielle ou fissurale fond, de l'eau peut pénétrer dans la roche. Il n'est pas important de savoir si elle provient de l'extérieur (pluie, fonte des neiges) ou de glace qui dégèle dans le pergélisol. Si cette eau n'est pas évacuée complètement, elle soumet la roche à des pressions qui peuvent conduire à une perte subite de stabilité. L'éboulement qui s'est produit le 18 janvier 1997 dans le versant de la Brenva illustre clairement ce phénomène (fig. 21).

Durant l'été caniculaire 2003, des éboulements se sont produits en maints endroits des Alpes. Ils ont principalement affecté des versants exposés au nord, au-dessus de 3000 m d'altitude, comprenant donc du pergélisol encore intact. A cette époque, la température de l'air était restée élevée durant des semaines et n'était pas redescendue au point de congélation pendant la nuit. Ces conditions ont entraîné le dégel du pergélisol et la perte de stabilité décrits ci-dessus. De tels éboulements se sont produits par exemple à l'Eiger (les 6, 8 et 17 août 2003), au Cervin (en juillet 2003; fig. 22) et aux Drus (le 8 août 2003).

Les tassements dus au dégel du pergélisol dépendent de la teneur en glace. Ils peuvent atteindre 60 % dans un pergélisol non remanié riche en glace, de poids volumique égal à $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ($1,2 \text{ t m}^{-3}$) (WATSON 1973). La perte de glace due au dégel dans le pergélisol est de nature à fragiliser la structure du sol et à le rendre particulièrement sensible à l'érosion et aux laves torrentielles.



Fig. 21: Niche d'arrachement de l'éboulement du 18 janvier 1997 sur le versant de la Brenva (Mont Blanc, à env. 3600 m d'altitude). On remarque nettement l'eau de fonte qui s'écoule dans la zone d'arrachement (photo: Maurizio Fonte).

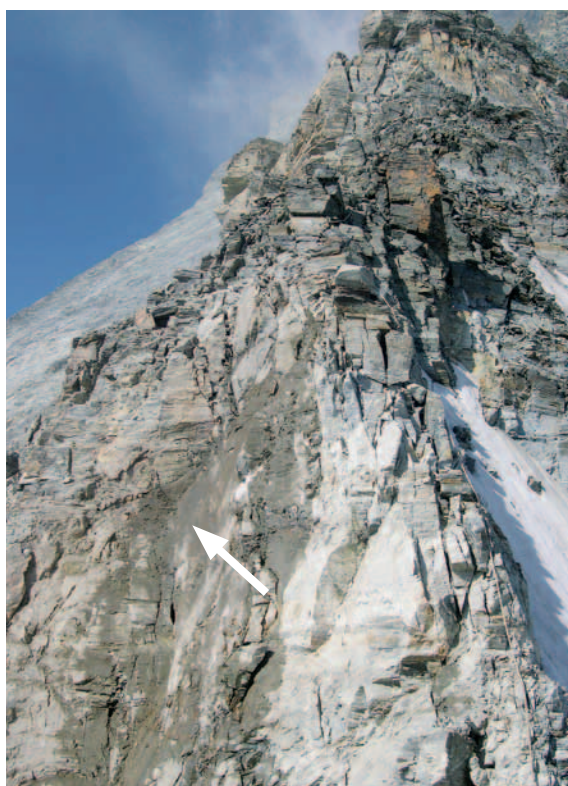


Fig. 22: Eboulement au Cervin / arête du Hörnli, en juillet 2003. Les fissures étaient remplies de glace. Les endroits en foncé marquent les écoulements d'eau de fonte (photo: Geotest, Zollikofen).

Le réchauffement climatique, de plus en plus observable depuis 1980, met le pergélisol à rude épreuve et déclenche des processus de dégel. Il faut donc s'attendre à une recrudescence des éboulements et des glissements de terrain dans les régions à pergélisol. D'après un sondage réalisé auprès des exploitants de cabanes CAS en 2007, les événements naturels ayant affecté les chemins d'accès sont partiellement dus au dégel du pergélisol. Ce phénomène peut tout à fait occasionner d'importants risques locaux pour les aménagements touristiques en montagne.

1.8 Détection d'un pergélisol

La détection d'un pergélisol demande des méthodes progressives qui fournissent des renseignements de plus en plus fiables et exigent un investissement toujours plus grand. Si l'on soupçonne la présence d'un pergélisol, la première étape consiste à recueillir des informations à propos du site, à évaluer le terrain en question et à effectuer certaines mesures. Ces démarches fournissent des indications sur la probabilité de la présence d'un pergélisol, ou elles permettent déjà d'enregistrer des mouvements de surface.

Pour obtenir une preuve concrète de la présence d'un pergélisol et des renseignements significatifs sur la température du sol et la teneur en glace, il faut, dans une deuxième étape, examiner le sol de fondation par des fentes de sondage ou en procédant à des forages. De tels examens devraient être réalisés par des spécialistes. Ils sont récapitulés dans un diagramme de déroulement de la détection de pergélisol (fig. 23).

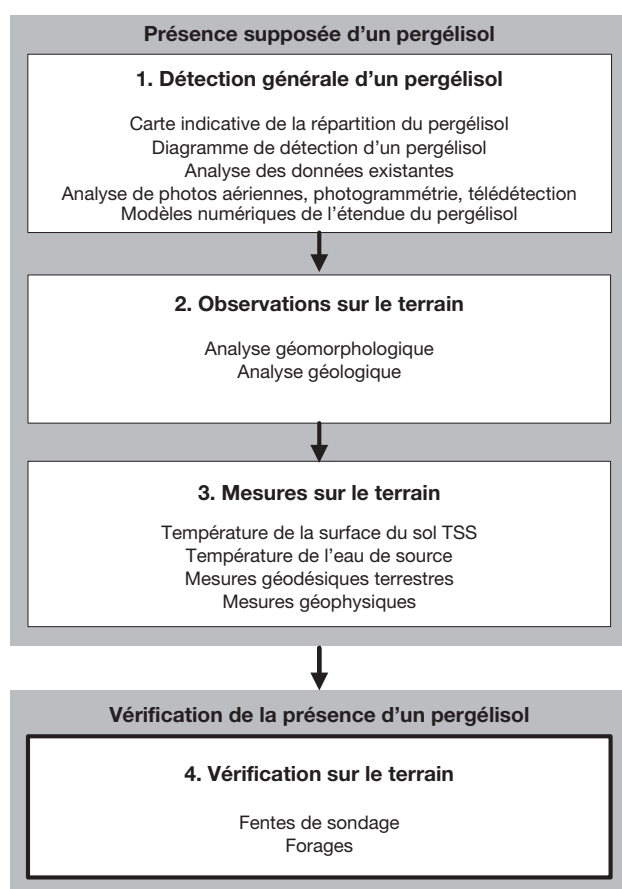


Fig. 23: Diagramme du déroulement de la détection de sites à pergélisols, avec exemples des travaux réalisés à chaque étape (adapté selon HARRIS *et al.* 2001).

1.8.1 Présence supposée d'un pergélisol

Détection générale d'un pergélisol

Carte indicative de la répartition du pergélisol en Suisse

La «Carte indicative du permafrost en Suisse» (OFEV 2006) montre les régions des Alpes suisses dans lesquelles la présence du pergélisol est possible localement, voire probable sur toute l'étendue. Cette carte fournit un premier aperçu des éventuels sites à pergélisol, mais comme elle est fondée sur des modélisations très simplifiées, il est indispensable d'approfondir l'examen sur place. La présence exceptionnelle de pergélisols azonaux ou de pergélisols produits artificiellement ne figure pas sur cette carte (fig. 24 et annexe A). La carte à l'échelle 1: 50 000 peut être obtenue auprès de l'OFEV.

Cartes indicatives de pergélisols régionaux

Outre la carte indicative de l'OFEV, des cartes ont été établies séparément pour diverses régions. Il existe pour la Haute Engadine, par exemple, une carte glaciologique de la région du Julier et de la Bernina (1998, carte de synthèse PNR 31) à l'échelle 1: 60 000. Les glaciers, ainsi que l'étendue du pergélisol et les lobes de solifluxion dans cette région sont représentés sur cette carte disponible aux éditions vdf (site web: www.vdf.ethz.ch).

Estimation de la présence de pergélisol sur les versants en fonction de l'altitude et de l'exposition

A l'aide d'un simple diagramme (fig. 25), il est possible d'estimer sommairement la probabilité de la présence d'un pergélisol en montagne. En utilisant ce diagramme, on tiendra compte du fait que le pergélisol peut aussi exister à plus basse altitude et qu'il est indispensable d'approfondir l'examen du terrain, car la topographie, le recouvrement du sol et le manteau neigeux ont une très forte influence sur l'étendue locale du pergélisol.

Ce diagramme indique que la limite inférieure de la présence probable d'un pergélisol se situe légèrement au-dessous de 3000 m d'altitude dans les expositions E à SW en passant par le sud – elle est donc nettement plus élevée que dans le secteur W à NE en passant par le nord où elle se situe à 2500 mètres. La présence de pergélisols à plus basse altitude est due, entre autres, à la présence de dépôts d'avalanche. Au pied des versants, on peut trouver du pergélisol 200 ou 300 m plus bas si de la neige d'avalanche s'y est accumulée et qu'elle n'a pas fondu en été. Un diagramme semblable à celui de la figure 25 existe pour l'estimation de la présence de pergélisols au pied des versants (HAEBERLI 1975).

Données existantes collectées dans les régions à pergélisol

Dans les Alpes suisses, diverses mesures sont effectuées depuis plusieurs années dans le pergélisol et des mesures météorologiques sont aussi réalisées sur certains sites. Ces données fournissent de précieuses informations sur l'étendue du pergélisol, son état, son développement et les conditions météorologiques.

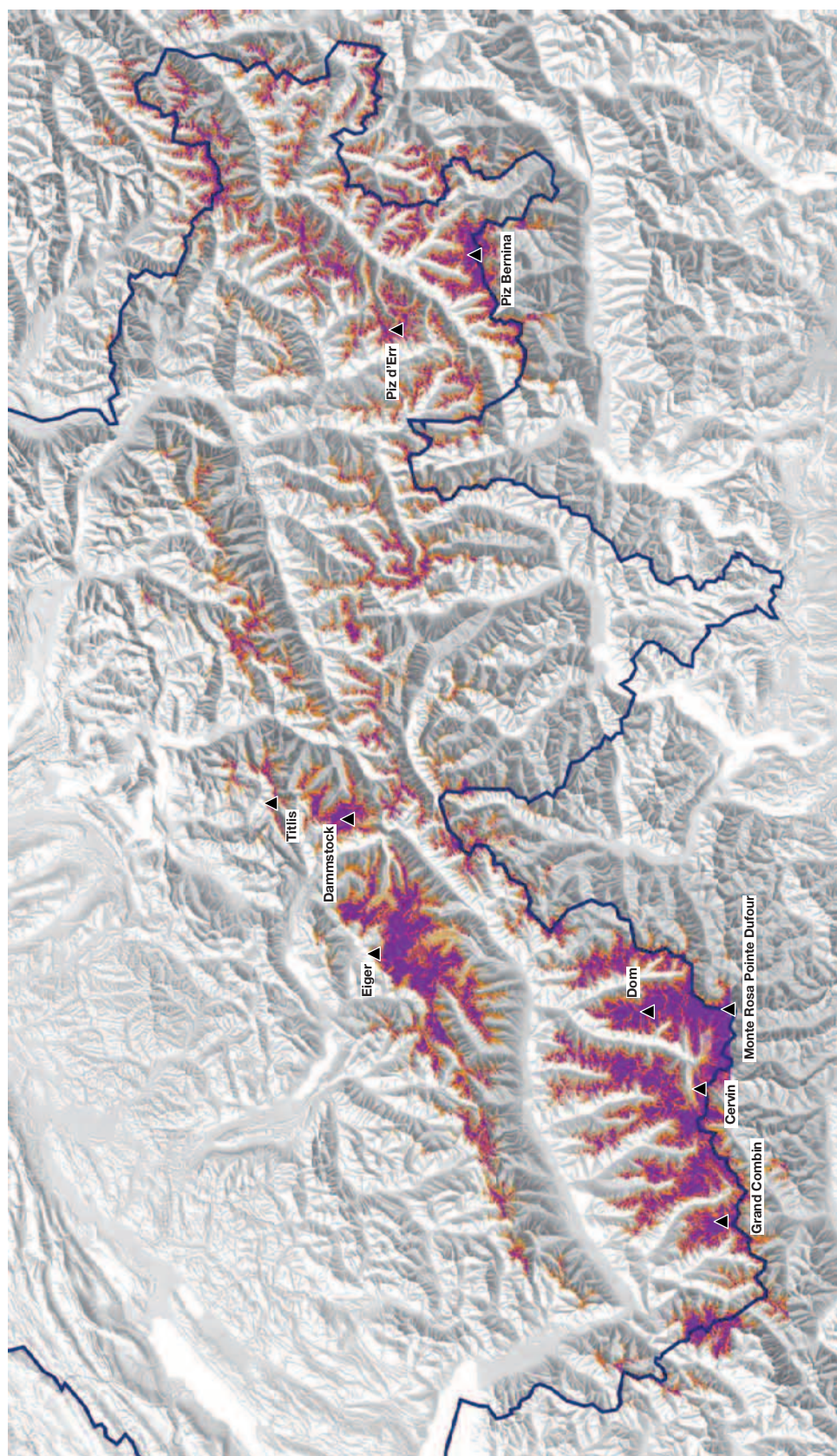
Sur mandat de l'Académie suisse des sciences naturelles (ScNAT), de MétéoSuisse et de l'OFEV, l'état et les modifications du pergélisol des Alpes suisses sont observés à l'aide du réseau de mesures PERMOS (Permafrost Monitoring Suisse) (site web: www.permos.ch). PERMOS coordonne les mesures automatiques de la température effectuées dans les trous de forage et à la surface du sol sur des sites sélectionnés dans divers types de terrain (fig. 26). En outre, PERMOS organise régulièrement des analyses photogrammétriques des mouvements de glaciers rocheux.

Carte indicative du permafrost en Suisse

Évolution du permafrost – modélisations réalisées grâce
au MNT25 (OFEV, juillet 2006)

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Légende:

- permafrost possible localement
- permafrost probable sur toute la surface

Fig. 24: Carte indicative de la répartition potentielle du pergélisol en Suisse (source: OFEV 2006).

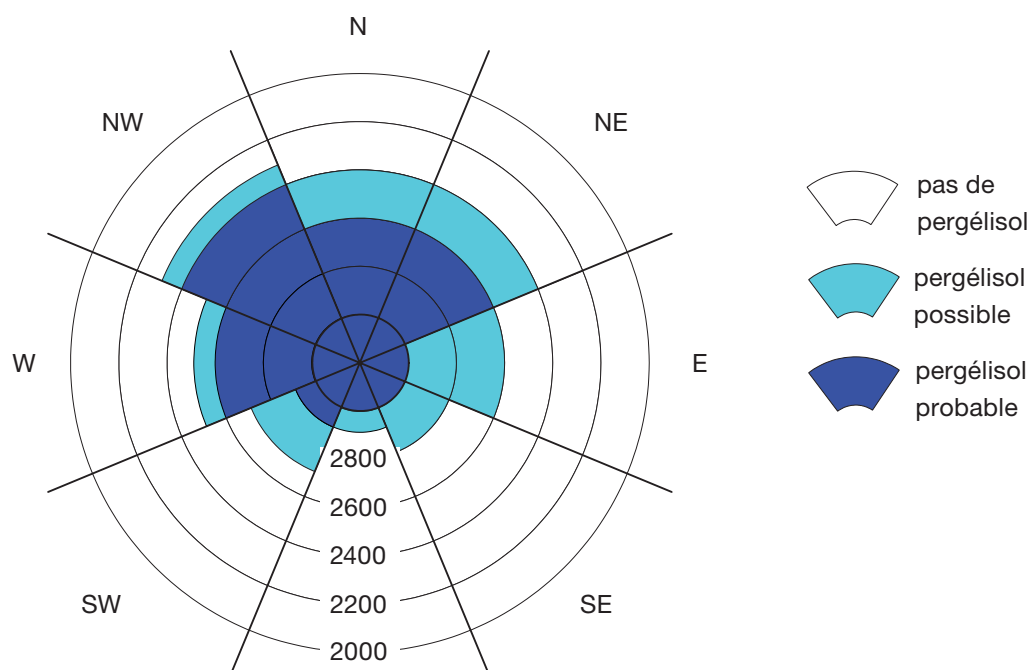


Fig. 25: Diagramme pour l'estimation de la présence de pergélisols sur les versants en fonction de l'altitude et de l'exposition (simplifié selon les règles générales de HAEBERLI 1975).

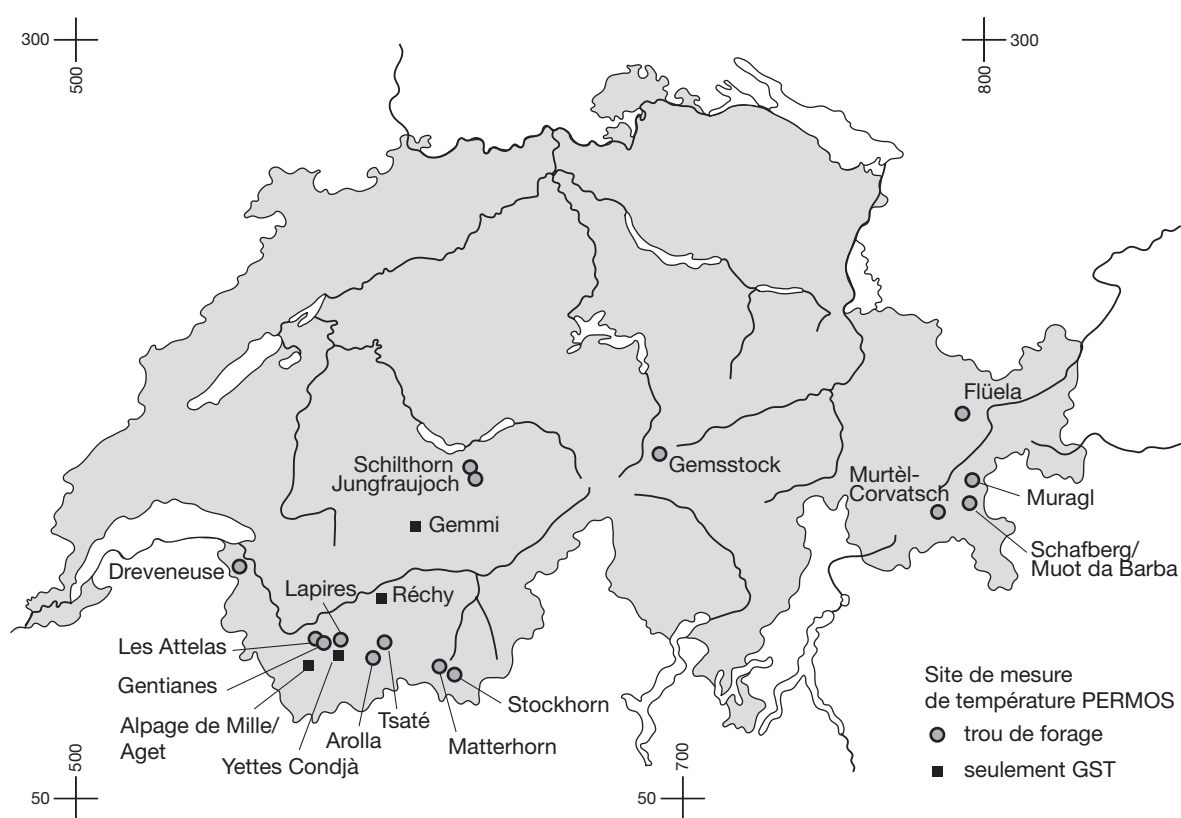


Fig. 26: Sites de mesure PERMOS (mesures de la température dans les trous de forage et à la surface du sol [GST: ground surface temperature, température de la surface du sol]) dans les Alpes suisses (état en 2009); (source: PERMOS, site web www.permos.ch).

Les températures relevées dans les trous de forage fournissent les informations suivantes:

- Températures minimales et maximales du sol à diverses profondeurs
- Epaisseur de la couche active en été
- Profondeur du sol à partir de laquelle les variations saisonnières de température sont nulles (profondeur d'amplitude annuelle nulle)
- Epaisseur du corps du pergélisol (selon la profondeur du forage)
- Position, extension verticale et température des taliks dans le pergélisol
- Mécanismes de transfert de chaleur (p. ex. conduction thermique / convection)

Les stations de mesures ENET (réseau complémentaire de MétéoSuisse) et les stations IMIS (système intercantonal de mesure et d'information) relèvent des données météorologiques et nivo-climatologiques sur divers sites en haute montagne. Ces données peuvent être obtenues auprès de MétéoSuisse (site web: www.meteoschweiz.ch) et au WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (site web: www.slf.ch) (fig. 27). Diverses autres institutions possèdent également des stations météorologiques en haute montagne et une partie des données est directement accessible par Internet.

Les stations de mesures automatiques relèvent les paramètres suivants:

- température de l'air
- hauteur de neige
- force du vent, direction du vent
- rayonnement de courte longueur d'onde
- humidité de l'air
- température à la surface de la neige et à la surface du sol
- température à l'intérieur du manteau neigeux

La température moyenne annuelle de l'air, les indices de gel et de dégel, la température de la surface du sol ainsi que les hauteurs de neige moyennes et extrêmes sont des informations particulièrement importantes pour des projets de construction sur le pergélisol.

Les températures de la surface du sol relevées par PERMOS et les hauteurs de neige enregistrées à proximité d'une station météorologique permettent de déterminer la température à la base du manteau neigeux et de vérifier ainsi la probabilité de la présence d'un pergélisol (voir rubrique Mesures sur le terrain).

Pour certaines régions et pour des constructions existantes, il existe déjà des données et des informations utiles issues d'analyses antérieures. Il est recommandé de se renseigner auprès du canton et de la commune si des études préliminaires ont été réalisées pour le site en question.

Analyses de photos aériennes

Les images à basse résolution prises par des capteurs optiques dans l'espace fournissent un premier aperçu sommaire du terrain (p. ex. les relevés de Google-Earth, fig. 28). Les photos aériennes à haute résolution prises au cours de plusieurs années à diverses échelles peuvent être obtenues à l'Office fédéral de topographie et commandées en ligne (site Internet: www.swisstopo.ch [fig. 29]). Ces photos offrent une vue d'ensemble générale qu'il est très difficile d'obtenir directement sur le terrain. Elles fournissent d'importantes indications sur la probabilité de la présence de pergélisols et permettent de discerner les paramètres suivants:

- les formes particulières du terrain, comme les glaciers rocheux, les parois rocheuses situées à l'ombre ou les formes de solifluxion
- les taches de neige pérenne

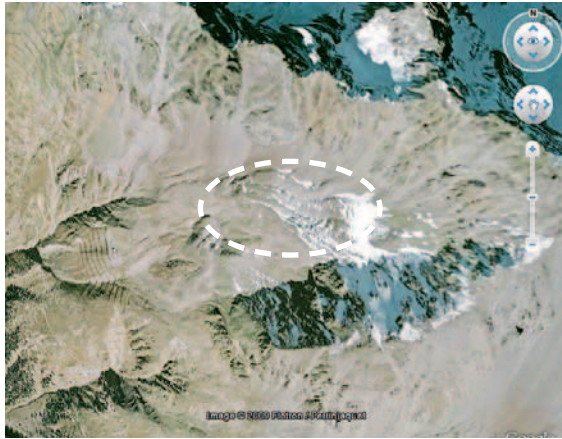


Fig. 28: Image d'un glacier rocheux en Haute Engadine (Foura da l'amd' Ursina, au-dessus de Pontresina, GR; au milieu de la photo). (© Google-Earth 2009).



Fig. 29: Prise de vue aérienne du même glacier rocheux (au milieu de la photo) que celui de la figure 28. Les structures de fluage du glacier rocheux se distinguent mieux sur cette photo prise à une date inconnue (source: Swisstopo).

- la déclivité (p. ex. le front d'un glacier rocheux)
- la rugosité superficielle
- les régions dépourvues de végétation
- les zones de décrochement et de dépôt de mouvements de masses
- les déplacements et les changements d'altitude

Photogrammétrie

La photogrammétrie aérienne numérique permet, en comparant des photos prises à différentes époques, d'identifier les processus de reptation et de glissement ainsi que les tassements et les soulèvements dans les régions à pergélisol. Cette comparaison permet aussi de connaître la stabilité de la pente et les zones potentielles de danger. Une série de telles photos permet également suivre l'évolution du terrain à long terme et de quantifier les vitesses et les masses en mouvement. En pratique, cette méthode est adéquate pour compléter et extrapoler des mesures géodésiques ponctuelles de déformations et estimer les risques à grande échelle (KÄÄB 2001). L'application et l'interprétation de cette méthode nécessitent des instruments spéciaux et des connaissances spécifiques. Il convient finalement de souligner que la photogrammétrie aérienne ne permet pas obligatoirement de détecter la présence du pergélisol.

Téledétection

L'interférométrie par images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSA ou SAR) est une méthode de téledétection de plus en plus utilisée dans des régions à pergélisol de l'arc alpin. Il s'agit d'une méthode d'analyse de photos radars prises par satellite (DELALOYE *et al.* 2007). Cette méthode permet de détecter des mouvements à grande échelle de la surface terrestre et de quantifier leurs vitesses. La surface terrestre est ainsi photographiée à divers intervalles de jours, de mois ou d'années. Un déplacement se traduit par des décalages de phases sur les images radars correspondantes. En partant de ces interférences et en tenant compte du relief et des conditions météorologiques, il est possible de calculer les mouvements horizontaux pour des intervalles de temps donnés.

L'interférométrie SAR recèle quelques problèmes. Les ombres radars (lacunes dues au relief sur les images satellites), la couverture neigeuse et la végétation compliquent l'inter-

prétation des images. Par ailleurs, cette méthode ne permet pas de détecter clairement le pergélisol. Elle a cependant le grand avantage de simplifier le calcul des vitesses approximatives des mouvements de pentes en haute montagne.

Modèles de calcul de l'étendue du pergélisol

Les modèles numériques permettent d'estimer l'étendue du pergélisol en montagne. En outre, des scénarios prospectifs peuvent être calculés pour simuler par exemple les influences du changement climatique ou celles d'une construction sur le pergélisol.

Les modèles numériques sont constitués d'hypothèses et de calculs. Le bilan énergétique de la surface du sol est calculé à l'aide de données météorologiques. Le flux géothermique de l'intérieur de la terre étant généralement faible en haute montagne, il est supposé être constant dans le modèle. Si l'on connaît les propriétés du sol (p. ex. la conductivité de la roche, la teneur en glace, etc.), les températures dans le sous-sol peuvent être calculées avec une grande précision. Face à une topographie complexe, il faut aussi tenir compte des effets tridimensionnels, car les températures du sol peuvent fortement varier, par exemple entre le versant sud et le versant nord d'une arête (NOETZLI et GRUBER 2005, fig. 30). Les mesures de température dans les trous de forage confirment ce phénomène (fig. 31). L'un des défis de la modélisation réside dans la simulation de processus tels que les flux d'air et d'eau dans le sol. Les mesures effectuées dans les trous de forage et à la surface du sol sont utiles pour calibrer et tester des modèles numériques.

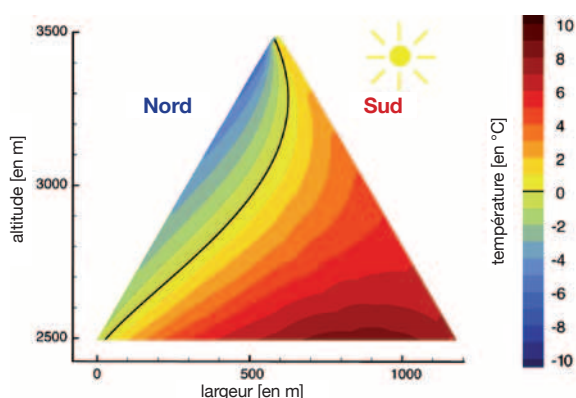


Figure 30: Températures modélisées en section dans une arête allant d'ouest en est. Dans le sous-sol, elles sont dictées par les flux thermiques latéraux évoluant du versant sud, qui est chaud, au versant nord, plus froid (extrait de NOETZLI et GRUBER 2005).

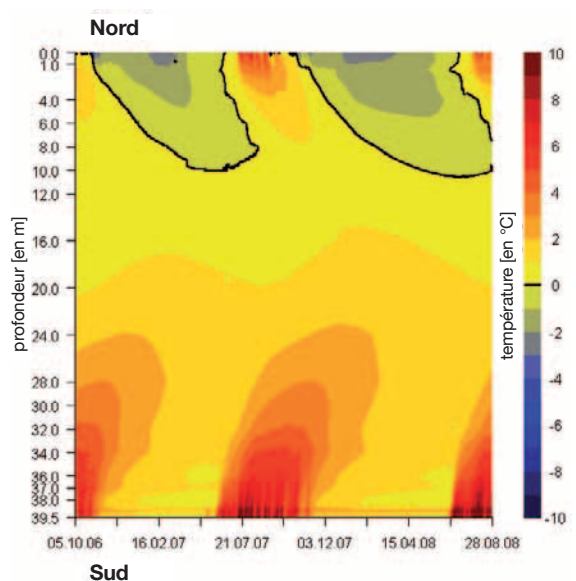


Figure 31: Températures mesurées dans un trou de forage horizontal de 40 m de longueur dans l'arête du Gemsstock (Andermatt UR) entre octobre 2006 et août 2008. L'axe X indique l'espace temporel. L'axe Y montre les distances dans le trou de forage du versant nord au versant sud. Les surfaces en couleur illustrent les températures de la roche (légende). La roche est beaucoup plus chaude sur le versant sud que sur le versant nord de l'arête (données SLF, Davos).

Observations sur le terrain

Analyse géomorphologique

L'analyse géomorphologique fournit les premières indications sur la présence ou non d'un pergélisol dans le sous-sol. Elle est réalisée à l'aide d'analyses de cartes ou de photos aériennes et plus particulièrement lors de visites sur le terrain. Cette appréciation nécessite des connaissances en la matière. Les principaux phénomènes géomorphologiques dans les régions à pergélisol sont décrits au chapitre 1.5.

Analyse géologique

L'analyse géologique fournit d'importantes indications sur la composition, la structure, la stabilité du sous-sol et sa teneur potentielle en glace et en eau. Cette analyse est fondée sur l'examen de cartes géologiques (carte géologique de la Suisse, à diverses échelles) et des investigations sur le terrain, comme le prélèvement d'échantillons du sol et de carottes qui seront analysés en laboratoire.

En plus des examens géologiques habituels, les expertises géologiques réalisées dans les régions à pergélisol des Alpes nécessitent la prise en compte des aspects suivants:

- Durée et type de la dernière glaciation (ils influencent la température du sol et sa teneur en glace)
- Epaisseur estimée de la couche recouvrant la roche en place, origine des matériaux (p. ex. éboulis, éboulis de blocs, moraines)
- Teneur en glace, répartition de la glace et type de glace (p. ex. glace en lentilles, couches de glace, glace fissurale, glace enfouie, glace interstitielle), ségrégation de la glace (entraîne un agrandissement des fentes et une expansion de la roche)
- Erosion, degré d'altération, sensibilité au gel (gélifraction d'origine chimique ou mécanique, désagrégation par le gel)
- Masses en reptation
- Instabilités dans les zones environnantes
- Couches aquifères, apport d'eau (naturel ou artificiel), étanchéisation produite par la glace
- Risques de séismes (les séismes peuvent liquéfier un terrain meuble riche en glace et entraîner des éboulements dans les parois rocheuses contenant de la glace)
- Directions interdites des tirants (lorsqu'il y a une surface de fracture ou un dièdre de fractures) et directions recommandées des tirants.

Mesures sur le terrain

Les premières mesures peuvent être réalisées par des moyens relativement modestes, mais elles requièrent des instruments de mesure spéciaux et l'interprétation des données exige des connaissances spécifiques.

Température de la surface du sol (TSS) ou température à la base du manteau neigeux

La mesure des températures à la surface du sol en hiver (la température à la base du manteau neigeux) est une méthode simple et efficace pour recueillir des informations sur la répartition spatiale du pergélisol. Au printemps, lorsque la hauteur de neige mesure un mètre ou plus et que la fonte des neiges n'a pas encore débuté, la température de la surface du sol reste plus ou moins constante sous la neige, car le manteau neigeux isole le sol. La TSS est influencée par les températures dans le sol et par l'épaisseur du manteau neigeux, ou par son effet isolant contre les basses températures de l'air.

Pour obtenir des données les plus explicites possibles, des enregistreurs automatiques de température doivent être utilisés pour relever la température à la surface du sol pendant tout un hiver au moins. Les hauteurs de neige doivent aussi être mesurées en parallèle (automatiquement ou manuellement à l'aide de jalons). Pour éviter des pertes, les instruments de mesure de température seront fixés au sol et leur position enregistrée avec un GPS. Ces instruments doivent être étanches et robustes afin qu'ils puissent fonctionner pendant une longue période en haute montagne (fig. 32, à droite) (site web: www.utl.ch).

Si la hauteur de neige dépasse 80 cm durant une grande partie de l'hiver, les températures du sol mesurées à la base du manteau neigeux (fig. 32, à gauche) à la fin de l'hiver (entre la fin février et le début avril) peuvent être interprétées comme indiqué au tableau 7.

Tab. 7: Probabilité de la présence de pergélisol selon la température à la base du manteau neigeux et à la surface du sol en hiver (TSS hiver) pour une hauteur de neige de > 80 cm.

TSS hiver	Probabilité de la présence de pergélisol
< -3°C	Pergélisol probable
-2°C à -3°C	Pergélisol possible
> -2°C	pergélisol improbable

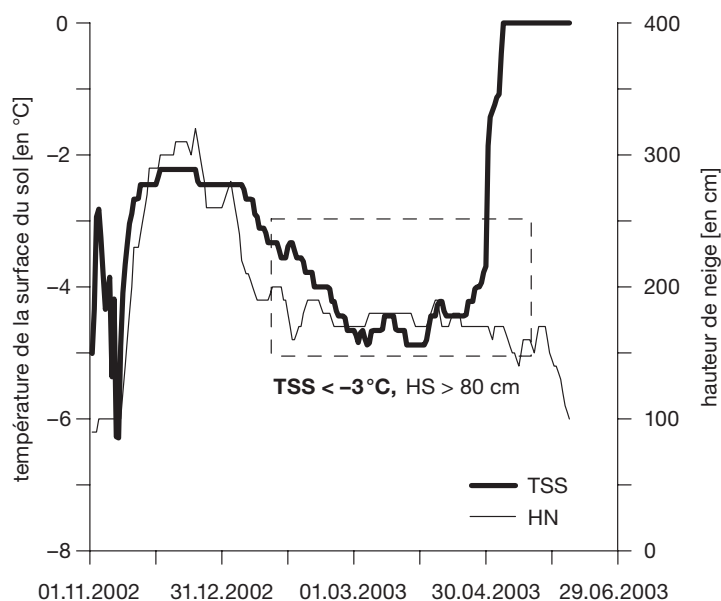


Fig. 32: (à gauche) Mesures des températures à la surface du sol (TSS) et des hauteurs de neige (HN) au Schaffberg, Pontresina, à 2900 m d'altitude, durant l'hiver 2002-2003. Les hauteurs de neige ont été relevées à l'aide d'une caméra automatique et d'un jalon à neige. Les basses températures de la surface du sol au printemps indiquent la présence d'un pergélisol si l'épaisseur du manteau neigeux dépasse 80 cm (cadre en pointillé); (à droite) Enregistreur de données (logger), robuste et étanche, destiné à mesurer les TSS en haute montagne.

Températures de l'eau de source

Des températures de l'eau de source inférieures à 3 °C en été signifient que les températures du sol sont basses et que le sol pourrait contenir de la glace. La température de l'eau devrait être mesurée le plus près possible de la source. Les mesures seront effectuées après la fonte des neiges, à l'aide d'un thermomètre calibré.

Relevés à l'aide du compas solaire

Grâce au compas solaire, on peut constater la durée potentielle du rayonnement solaire pour chaque mois à n'importe quel point sur le terrain. L'instrument permet de déterminer visuellement l'influence de l'horizon (montagnes, constructions et autres objets inclus) sur la durée du rayonnement solaire. À l'aide d'un programme simple, on peut alors estimer le rayonnement exprimé en GJ m^{-2} pour diverses altitudes et expositions. Ainsi est-il possible de déterminer sommairement la probabilité de la présence d'un pergélisol (KRUMMENACHER et BUMANN 2004). Le compas solaire est surtout utilisé dans la pratique forestière et en architecture pour déterminer les conditions de luminosité en forêt et dans un bâtiment.

Mesures géodésiques terrestres

Les mesures géodésiques terrestres, réalisées à l'aide d'un théodolite, d'un tachymètre ou d'un scanner laser, permettent de détecter les éventuels mouvements de fluage avec leur vitesse ainsi que les affaissements, soulèvements et variations de volume affectant la surface de la roche ou du sol ou des constructions. Mais ces mesures ne révèlent pas à coup sûr la présence ou non d'un pergélisol.

Le terrain est mesuré au sol à partir de points fixes, complétés par des points de référence situés à des endroits stables. Les points fixes seront choisis avec prudence et leurs positions seront contrôlées régulièrement à l'aide d'un GPS précis, car les mouvements de pente étendus et les tassements sont fréquents dans les régions à pergélisol. Les mesures géodésiques terrestres effectuées régulièrement permettent de déterminer les éventuelles variations de la vitesse des déformations.

Mesures géophysiques

Les méthodes de mesure géophysiques, comme le sondage électrique, le sondage sismique ou le géoradar, donnent une image du sous-sol à partir de la surface. La température, la teneur en eau et en glace, ainsi que la stratigraphie peuvent ainsi être déterminées. On lève des profils linéaires, complétés par des mesures ponctuelles, effectuées par exemple dans des forages. Ces méthodes prennent moins de temps et coûtent moins cher que toute analyse nécessitant une intervention mécanique dans le sol. Les séries chronologiques de mesures géophysiques permettent de constater les changements dans le pergélisol (p. ex. la fonte de la glace ou l'avancement et le recul des fronts de gel dans le sol).

Les sondages électriques servent par exemple à déterminer la résistivité électrique des matériaux du sol (VONDER MÜHLL 1993). Un courant électrique est injecté dans le terrain au moyen de deux électrodes et la différence de potentiel induite est mesurée sur d'autres électrodes situées entre les deux. Les différences d'intensité et de potentiel mesurées servent à calculer la résistance électrique des couches du sol (fig. 33).

Comme le point de congélation fait augmenter sensiblement la résistance électrique, les sondages électriques permettent de localiser la présence de matériaux gelés dans le sol. La conductivité électrique – et donc la résistance – sont connues pour différents matériaux

(tab. 8, HAUCK et KNEISEL 2008). Dans un sol gelé, les résistances électriques peuvent fortement varier, car elles sont influencées par la teneur en glace, la température du sol et la présence d'impuretés. Etant donné que la teneur en eau peut varier dans les différentes couches du sol, les valeurs de résistance peuvent aussi se chevaucher (HAUCK et KNEISEL 2008). Dès lors, les résultats des mesures seront interprétés avec prudence. Il est recommandé de combiner si possible deux méthodes géophysiques.

Tab. 8: Résistances électriques de divers matériaux (extrait de HAUCK et KNEISEL 2008).

Matériau	Résistance électrique [Ωm]
Argile	1 – 100
Sable	100 – 5×10^3
Gravier	100 – 4×10^2
Granite	5×10^3 – 10^6
Schiste	100 – 10^4
Eau souterraine	10 – 300
Matériau meuble gelé, glace de sol, pergélisol de montagne	1 – 10^3 – 10^6
Glace de glacier (tempérée)	10^6 – 10^8
Air	infini

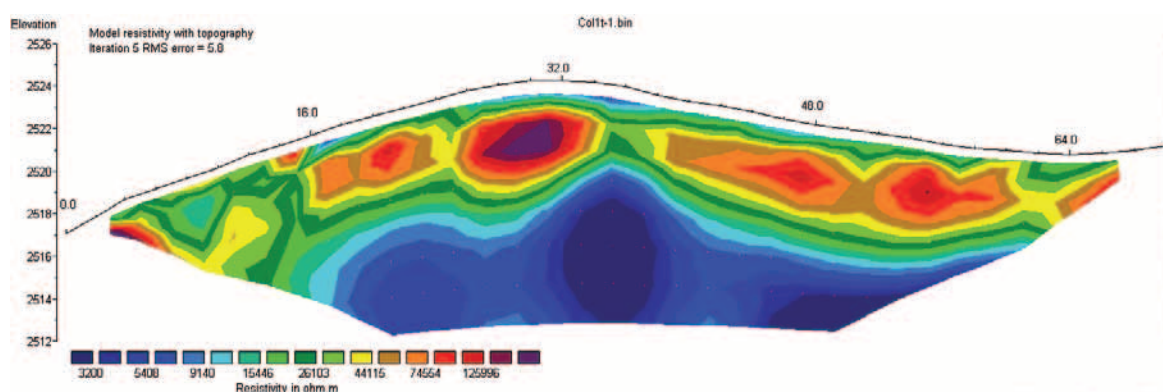


Fig. 33: Profil géoélectrique (tomographie en 2D) d'un site en montagne à 2500 m d'altitude. La roche compacte est indiquée par la couleur bleue. Des éboulis de gros blocs pouvant contenir de la glace (résistances > 50 000 Ωm) se trouvent dans zone jaune et rouge de la partie supérieure (données Geotest, Davos).

1.8.2 Vérification de la présence du pergélisol

Fentes de sondage

Les fentes de sondage offrent la possibilité d'obtenir directement des informations sur les propriétés du sol de fondation dans les premiers mètres supérieurs. Il est préférable de creuser ces fentes à la machine (p. ex. avec une pelle mécanique ou une pelle araignée) et si possible à divers endroits dans la zone prospectée. Si le terrain meuble présente de fortes teneurs en glace (fig. 34), des problèmes techniques peuvent se poser au moment de l'extraction. En général, la profondeur de telles fentes est limitée à 5 mètres.

Les instruments de mesures, comme les thermomètres (p. ex. dans un tube de protection), peuvent être installés dans une fente de sondage si celle-ci est de nouveau soigneusement remplie le plus rapidement possible, afin de réduire au maximum toute perturbation thermique. Notons toutefois qu'une perturbation de la stratigraphie et des propriétés du sol de fondation est inévitable lors de tels travaux. Les échantillons de sol destinés aux analyses en laboratoire devraient contenir de la glace et être transportés et entreposés à l'état réfrigéré (chap. 2.1.3). Lors du creusement des fentes de sondage, les aspects suivants seront répertoriés:

- Endroit exact (altitude, exposition, coordonnées)
- Dimensions de la fente de sondage (longueur, largeur, profondeur)
- Stratigraphie, épaisseur des couches
- Granulométrie
- Stabilité du matériau du sol de fondation
- Teneur en eau
- Teneur en glace, répartition de la glace, propriétés de la glace
- Température du sol à diverses profondeurs
- Estimation des valeurs du sol de fondation



Fig. 34: Matériau meuble riche en glace dans une fente de sondage.

Forages

Les forages fournissent des indications directes sur les propriétés du sol de fondation jusqu'à une grande profondeur; toutefois, ils sont spatialement ponctuels (piqûre d'aiguille). Les forages font partie des méthodes d'analyses les plus coûteuses en termes de temps et de dépenses, mais ils sont particulièrement utiles, car ils permettent de relever ultérieurement et à long terme, par exemple, la température du sol ou des déformations à diverses profondeurs.

Un système de forage rapide et relativement bon marché convient pour effectuer les forages (marteau fond de trou). Les matériaux sont extraits par soufflage d'air comprimé. Lors de tels forages, les personnes expérimentées sont capables d'identifier les matériaux du sol de fondation en suivant la progression de la foreuse et en examinant les propriétés des matériaux extraits. Elles sont aussi à même, par exemple, d'établir une distinction entre la roche, les éboulis, les éboulis contenant de la glace et la glace. Si de la glace de sol est présente, les matériaux de forage contiennent généralement des éclats de glace et le forage est rendu plus difficile.

Les forages par carottier double sont plus coûteux et compliqués, mais ils permettent d'extraire les matériaux dans un état le plus intact possible. Les carottes ainsi prélevées sont entreposées au frais et transportées au laboratoire à l'état réfrigéré pour y être analysées.

Selon le type de foreuse, le carottage peut atteindre quelques mètres ou plusieurs centaines de mètres. Il faudrait en tout cas traverser la couche active et si possible atteindre la base du pergélisol. On évitera surtout de forer avec de l'eau afin de ménager au mieux le pergélisol. Le trou de forage sera donc rincé par soufflage d'air et non avec de l'eau. Il importe aussi d'éviter que la tête de forage reste immobile dans le trou, car la foreuse risque de geler et de se bloquer. La grande hétérogénéité des sous-sols gelés complique généralement le carottage. Les paramètres suivants seront consignés au protocole de forage:

- Endroit exact (altitude, exposition, coordonnées)
- Profondeur du trou de forage
- Stratigraphie, épaisseur des couches
- Granulométrie
- Stabilité du trou de forage
- Teneur en eau
- Teneur en glace, répartition de la glace, forme de la glace
- Température du sol à diverses profondeurs (thermomètre muni d'un long câble)
- Progression de la foreuse, problèmes particuliers (p. ex. coincement de la tête de forage)

Afin de permettre la réalisation de mesures ultérieures (tab. 9), les trous de forage devraient être équipés d'un tube étanche. Ces tubes doivent être soudés et étanchéifiés à l'aide d'un ruban adhésif imperméable. Il importe aussi que le couvercle inférieur du tube soit étanche et solidement monté.

Le trou de forage autour du tuyau doit être rempli d'un coulis de mortier et protégé par un puits (avec un couvercle) à la surface (fig. 35). Lors de la mise en place du tube, le tuyau à mortier doit être installé parallèlement au tube afin de faciliter l'injection du mortier et de garantir que l'espace entre le sous-sol et le tube soit rempli de mortier (fig. 36).

S'il est prévu de mesurer uniquement la température du sol dans le tube, on peut remplacer le mortier par du sable. Cela atténue la perturbation thermique, car aucun processus de prise n'a lieu. S'il est prévu de mesurer des déformations (mesures inclinométriques et



Fig. 35: Puits avec couvercle pour protéger le trou de forage, le tube et les instruments de mesure.



Fig. 36: L'équipe de forage soude et rend étanche un tube Inkrex pendant l'installation dans le trou de forage. Un tuyau destiné à injecter le mortier dans le trou de forage est installé parallèlement au tube Inkrex.

extensométriques), les trous de forage doivent être équipés de tubes inclinométriques et de tubes Inkrex; l'espace entre les tubes et les trous de forage doit être rempli de mortier.

Mesures effectuées dans les trous de forage

Les trous de forage permettent de relever diverses données (tab. 9) afin d'examiner l'état du sol de fondation et de constater les éventuels changements. Si l'on procède aux mesures dans un trou de forage dépourvu de tube, une grande prudence s'impose, car les parois du forage peuvent s'écrouler à tout moment. Dans les corps de pergélisol fluants (p. ex. les glaciers rocheux, les éboulis abrupts), il est fréquent que les trous de forage se déforment très rapidement et qu'il ne soit plus possible d'y introduire ou d'en extraire des instruments. Si les mesures de température du sol doivent se poursuivre pendant une longue période, il convient d'installer une chaîne de thermistors le plus rapidement possible et de la relier à un enregistreur de données (logger) entreposé dans un endroit sûr à

Tab. 9: Mesures effectuées dans les trous de forage sans tube et avec tube.

Mesures dans les trous de forage (sans tube)	Grandeurs mesurées
Température du sol (mesures manuelles ou automatiques)	Répartition de la température du sol dans le trou de forage Épaisseur de la couche active Épaisseur du corps du pergélisol Position des éventuels taliks Variations à court et à long termes
Relevés à l'aide d'une caméra de forage	Stratigraphie Teneur en glace Distribution granulométrique Couches aquifères
Géophysique du trou de forage	Teneur en glace Teneur en eau Stratigraphie
Essai pressiométrique (difficilement réalisable)	Caractéristiques de la tension-dilatation Résistance
Câble TDR (Time-domain reflectometry) (relativement nouveau) NB: particulièrement adéquat lorsque les taux de déformation sont élevés et pour les trous de forage profonds	Déplacements horizontaux Horizons de cisaillement
Mesures dans les trous de forage (avec tube)	Grandeurs mesurées
Température du sol (mesures manuelles ou automatiques)	Répartition de la température dans le trou de forage Épaisseur de la couche active Épaisseur du corps du pergélisol Position des éventuels taliks Variations à court et à long termes ATTENTION: Si le trou de forage est rempli d'un coulis de mortier, la chaleur de prise est produite pendant un mois au moins!
Mesures inclinométriques – avec tube inclinométrique (mesures manuelles ou automatiques)	Déplacements horizontaux Horizons de cisaillement
Mesures extensométriques – avec tube Inkrex	Tassements dans le sous-sol Soulèvements dans le sous-sol

la surface du sol, par exemple dans un puits muni d'un couvercle. En général, les mesures continuent d'être prises jusqu'à ce que le trou de forage soit complètement cisailé. Les mesures inclinométriques ou extensométriques nécessitent l'installation de tubes spéciaux qui sont équipés de glissières de guidage internes ou d'anneaux en laiton. Ceux-ci peuvent être commandés directement auprès de l'entreprise de forage.

L'essentiel en bref

Dans les Alpes suisses, on suppose qu'il existe du pergélisol à partir de 2200 m d'altitude, selon les conditions dans la pente et son exposition. L'étendue du pergélisol est influencée par divers facteurs, notamment par la température de l'air, le rayonnement solaire, la constitution du sol, la topographie et la neige. Les propriétés thermiques, structurelles et géotechniques d'un pergélisol varient largement d'un site à l'autre. Le réchauffement et les précipitations intenses, en été, peuvent induire des dangers naturels et déclencher des mouvements de pente dans les régions à pergélisol. La détermination de la présence d'un pergélisol passe par l'application de méthodes progressives qui fournissent des renseignements de plus en plus fiables et exigent un investissement de plus en plus grand. Pour obtenir une preuve concrète de la présence ou de l'absence d'un pergélisol, des examens doivent être réalisés directement sur le site.

Déroulement du projet

L'étude préliminaire (chap. 2) est l'étape principale de l'étude d'un projet de construction sur le pergélisol. Si l'on veut garantir la réussite de la réalisation d'un tel projet, il est indispensable d'allier le savoir-faire acquis dans toutes les disciplines en question. Des spécialistes déterminent d'abord la répartition du pergélisol (chap. 1.3), ses propriétés (chap. 1.4) ainsi que les dangers naturels menaçant les sites de construction potentiels (chap. 1.7). La présence d'un pergélisol devrait être déterminée provisoirement, puis vérifiée ou exclue, en passant par quatre étapes (voir chap. 1.8). Pour les constructions existantes, l'étude préliminaire (chap. 2.2) sert à étudier les causes des dégâts subis par l'ouvrage et si des problèmes ou des dommages ultérieurs sont à prévoir.

Ces bases permettent aux spécialistes du génie civil de prévoir le comportement d'une construction sur un sol de fondation présentant des caractéristiques particulières. Ainsi est-il possible de planifier les adaptations et les mesures nécessaires lors de l'avant-projet déjà (chap. 3). On peut ensuite élaborer le projet de construction (chap. 4) et en planifier la réalisation en coopération avec les architectes et les planificateurs (chap. 5). Grâce à cette méthode progressive et pragmatique, le savoir acquis peut être transmis sous une forme claire et adéquate. Il en est de même pour l'utilisation et la maintenance d'un ouvrage (chap. 6). Dans le chapitre 7, nous énumérons quelques points à prendre en considération lors du démontage. Le déroulement du projet recommandé pour les constructions sur le pergélisol est présenté à la figure 37 «Étapes d'un projet de construction sur le pergélisol» et au tableau 10 «Déroulement des étapes du projet».

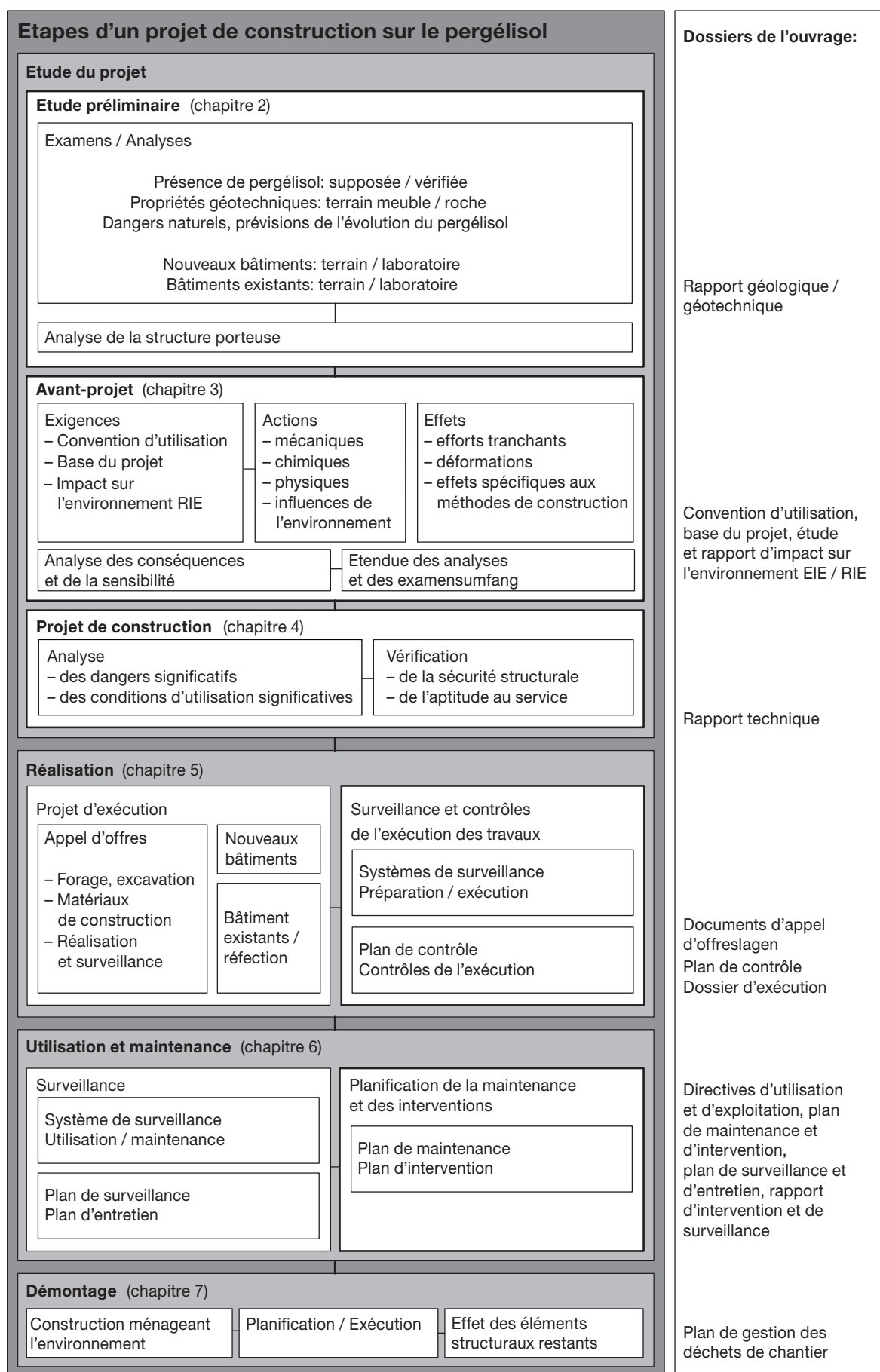


Fig. 37: Rapport entre les éléments de l'étude du projet.

Tab. 10: Déroulement des étapes du projet et responsabilités.

Etapes		Maître de l'ouvrage	Auteur du projet	Spécialiste en pergélisol	Office des constructions
Etude du projet	Etude préliminaire (Chapitre 2)	Définit le concept du projet et la situation	Consulte les cartes indicatives du pergélisol et collecte les données existantes	Fournit des renseignements sur les documents existants en matière de pergélisol	
		S'il manque des données fondamentales sur le pergélisol, fait réaliser les premiers examens afin d'évaluer l'adéquation du site	Réunit les documents existants et élabore l'analyse de la structure porteuse	S'il manque des données, réalise les premiers examens de la présence du pergélisol et éval. l'optimisation du site (ou l'abandon), prévoit l'évolution du pergélisol	
	Avant-projet (Chapitre 3)	Définit les exigences d'utilisation et la durée de l'utilisation	Elabore la <i>convention d'utilisation et la base du projet</i> avec le maître de l'ouvrage	Aide à résoudre les questions spécifiques au pergélisol	
		Fait réaliser une EIE si nécessaire	Etudie l'impact sur l'environnement <i>EIE</i> , établit le <i>RIE</i> si nécessaire	Fournit son aide dans l'étude d'impact sur l'environnement	Vérifie le <i>RIE</i> du projet
		Définit les objectifs de protection et les risques spéciaux dans le cadre de la convention d'utilisation	Etudie les actions et les effets s'exerçant sur la structure porteuse	Fournit des renseignements sur les méthodes avérées de construction sur le pergélisol	
		Fait réaliser au besoin une reconnaissance du terrain	Esquisse un concept de fondation possible dans le pergélisol	Réalise la reconnaissance du terrain, établit le <i>rapport géotechnique</i>	
	Projet de construction (Chapitre 4)	Choisit la variante définitive du projet	Définit le concept de fondation sur la base de la reconnaissance du terrain, détermine les conditions d'utilisation et analyse les dangers	Donne des conseils d'ordre géotechnique au sujet du concept de fondation	
			Réalise le dimensionnement et la vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service, établit le <i>rapport technique</i>	Prévoit les mesures et les surveillances nécessaires	
Autorisation			Au nom du maître de l'ouvrage, soumet les dossiers du projet en vue de la demande d'autorisation de construire.		Examine le projet, attribue l'autorisation de construire, éval. sous réserve de la présentation d'autres documents
Réalisation (Chapitre 5)			Etablit <i>les documents d'appel d'offres</i>		
			Etablit le <i>plan de contrôle</i> , accompagne et surveille la réalisation de la construction	Compare les prévisions avec la réalité (adaptations), veille à ce que la construction soit réalisée conformément au <i>plan de contrôle</i> , réalise les mesures et la surveillance	Vérifie si les travaux ont été exécutés conformément à l'autorisation de construire
			Etablit le <i>dossier d'exécution</i>		
Utilisation et maintenance (Chapitre 6)		Définit les concepts d'utilisation	Elabore avec le maître de l'ouvrage les <i>directives d'utilisation</i> et d'exploitation	Aide à résoudre les questions spécifiques au pergélisol	
		Définit les concepts de maintenance	Elabore avec le maître de l'ouvrage le <i>plan de maintenance et d'intervention</i>	Aide à résoudre les questions spécifiques au pergélisol	
		Fait réaliser des surveillances régulières	Réalise la surveillance et l'entretien conformément au <i>plan de surveillance et d'entretien</i>	Examine la surveillance en rapport avec les questions spécifiques au pergélisol, établit le <i>rapport de surveillance</i>	
			Etablit le <i>rapport d'interventions</i>		
Démontage (Chapitre 7)		Donne le mandat de démontage	Fait élaborer le <i>plan de gestion des déchets de chantier</i> , examine les effets des éléments structuraux restants		Autorise le plan de gestion des déchets de chantier

2 Etude préliminaire

2.1 Analyses nécessaires au préalable pour les nouvelles constructions sur pergélisol

2.1.1 Analyse préalable

Avant de construire sur le pergélisol, il faut entreprendre les premières démarches de détection du pergélisol et de ses propriétés. Cette procédure est décrite en détail aux chapitres 1.3, 1.4 et 1.8. L'analyse spécifique réalisée à temps et la prospection du site potentiel fournissent des renseignements sur la température et le comportement en déformation du sous-sol.

Le choix d'un site approprié à une nouvelle construction est d'une importance primordiale. Si le sol de fondation est riche en glace, il est généralement judicieux de chercher tout de suite un autre site afin d'éviter que des problèmes ne se posent ultérieurement (chap. 2.3.1).

Suivant les exigences posées par la construction, d'autres analyses et examens seront réalisés sur le site choisi (chap. 3.6.1). Il est rare qu'on puisse se passer d'une reconnaissance du terrain. A cette occasion, on analysera et interprétera les propriétés géotechniques du pergélisol (chap. 1.4.2); les mesures de construction des fondations seront définies en rapport avec le type d'ouvrage prévu et consignées dans un rapport. L'étendue et le contenu de la reconnaissance du terrain se conformeront à la norme SIA 267. D'autres examens à effectuer sur le terrain et en laboratoire sont décrits sous les points 2.1.2 et 2.1.3.

L'étude préliminaire à une construction sur le pergélisol prend plus de temps que pour les constructions classiques. Les reconnaissances du terrain, notamment, nécessitent une plus longue préparation, ce qui augmente les coûts de l'étude préliminaire. Néanmoins, ces investissements supplémentaires du début deviennent rapidement rentables. Diverses études de cas réalisées dans les Alpes ont montré que des études préliminaires détaillées permettent de prolonger la durée des ouvrages et d'épargner des coûts élevés de réfection ou d'implantation de nouvelles constructions sur le pergélisol.

2.1.2 Examens sur le terrain

Lorsqu'il s'agit de constructions complexes, sujettes à la déformation, et de conditions géotechniques difficiles, il importe d'examiner soigneusement la constitution du sol de fondation sur le site choisi. Les examens sur le terrain, à l'aide de sondages ou de forages, fournissent des informations directes sur les propriétés du sol de fondation. Ces deux méthodes d'examens sur le terrain sont décrites plus précisément au chapitre 1.8.2.

Beaucoup de méthodes développées pour l'examen d'un sol de fondation de fine texture et non gelé ne sont pas applicables sur un sol à grain grossier et gelé en montagne. C'est le cas, par exemple, du dilatomètre plat (DMT) ou du test de pénétration standard (SPT).

2.1.3 Analyses en laboratoire

En plus des relevés à la surface du sol et des examens sur le terrain, on peut procéder à des carottages et analyser ensuite les échantillons en laboratoire. Le tableau 11 présente différents essais de laboratoire avec les informations qu'on peut en tirer et les normes à respecter dans chaque cas.

Les analyses en laboratoire d'échantillons de pergélisol exigent certains préparatifs logistiques. Pour garantir le prélèvement d'un échantillon le plus intact possible, il faut procéder à un carottage rotatif refroidi à l'air (carottier double ou triple). Les échantillons gelés devraient être transportés au laboratoire dans un conteneur réfrigéré; il seront ensuite préparés et testés dans une chambre froide. Il est important que les échantillons ne fondent pas.

2.2 Analyses nécessaires au préalable pour les constructions existantes

2.2.1 Analyse préalable

Pour les constructions déjà présentes sur le pergélisol, une analyse préalable est nécessaire si ces constructions doivent être réparées, transformées, agrandies ou sont destinées à rester sur place en l'état. L'objectif d'une telle analyse est de déceler les causes de dégâts et de déterminer la nécessité d'une réfection. Autant les diverses causes possibles des dommages que leurs conséquences sont difficiles à déterminer. Les actions et les effets sont étroitement liés en raison de l'interaction entre la structure porteuse de la construction et le pergélisol. Ces actions et leurs divers effets sont traités au chapitre 3 et récapitulés dans des tableaux qui aident à mieux comprendre ce système d'interactions.

Tab. 11: Présentation des analyses d'échantillons de pergélisol.

Essai en laboratoire	Caractéristiques étudiées	Normes
Caractéristiques géotechniques	Teneurs en matière solide, en glace, en eau, en air et en sel	SN EN 1097-5, SN 670 903-5, SN 670 335
Granulométrie	Distribution granulométrique, classification selon l'USCS, résistance au gel	SN 670 004-1a, SN 670 140b
Essai de compression simple	Résistance au cisaillement, comportement en résistance	SN 670 352
Essai de cisaillement direct	Résistance maximale et résistance résiduelle au cisaillement (pour de longues distances de cisaillement) comportement en résistance	ASTM D 3080 DIN 18137-3
Essai de cisaillement triaxial taux de déformation constant	Résistance maximale et résistance résiduelle au cisaillement, comportement en résistance	ASTM D 2850, ASTM D 4767
Essai de cisaillement triaxial contrainte de compression constante	Comportement en fluage et en déformation	SN 670 340
Essai oedométrique	Compressibilité, comportement en déformation dans le temps, perméabilité à l'eau	ASTM D 2435
Caractéristiques thermiques	Conductivité thermique, capacité thermique spécifique	ASTM D 5334-00

Les dommages sont principalement dus à deux évolutions possibles: fonte de la glace (cas I) ou formation de glace (cas II). Dans le cas I, la réfection est nécessaire parce que de la chaleur pénètre le sous-sol (dégradation du pergélisol). Cela peut entraîner un affaissement de la couche active ou une modification de la teneur en glace dans le pergélisol et donc aussi une modification des propriétés géotechniques (résistance au cisaillement, portance du sol). Il peut en résulter des déformations par fluage, des tassements ou des fissures dans la structure porteuse, qui restreignent son utilisation. L'apport de chaleur dans le sous-sol peut avoir diverses causes. Il peut provenir de la chaleur émise passagèrement pendant la prise du béton, ou par des locaux chauffés, des conduites d'eau, des appareils produisant de la chaleur, voire du réchauffement climatique.

Dans le cas II, la réfection est nécessaire parce que du pergélisol se forme (accrétion du pergélisol). Ce processus est dû à un refroidissement activement provoqué (patinoire), à la formation de glace de ségrégation ou aux basses températures régnant dans le sous-sol. L'augmentation du volume d'eau sous l'effet du gel peut se répercuter sur la structure porteuse et provoquer une pression de soulèvement, une augmentation d'efforts tranchants, des fléchissements et des fissures.

Une réfection des constructions existantes peut être nécessaire en raison d'un de ces deux cas ou d'une combinaison des deux. Il importe surtout de découvrir, lors de l'analyse préalable, l'ampleur spatiale et l'évolution temporelle du problème afin d'en minimiser les conséquences en entreprenant une réfection adéquate.

2.3 Analyse de la structure porteuse

2.3.1 Choix du site

L'enjeu majeur de l'analyse d'une structure porteuse de constructions sur le pergélisol réside dans le choix du site. Le sol de fondation sur un pergélisol peut présenter une forte tendance au fluage, selon le type de charge, la direction du mouvement et la teneur en glace. Ce phénomène est dû au comportement viscoplastique à la déformation de la glace. Si le sol de fondation est riche en glace, d'importantes déformations par fluage et des tassements peuvent s'y produire. Il sera alors difficile, voire impossible, de trouver une solution durable pour la structure porteuse et son entretien risque alors de coûter très cher. Ces influences peuvent aussi, au pire, abrégé la durée de vie des constructions. Dans de tels cas, il faudrait envisager de choisir un autre site ou de renoncer à la construction. Le processus de fluage, qui dépend de facteurs évoluant au cours du temps, doit être pris en considération en prévoyant une structure porteuse robuste et adéquate, des fondations et des ancrages appropriés (chap. 8.1.1. et 8.2.1) et suffisamment de redondances. Il est essentiel de respecter ces impératifs si on veut garantir la durée de vie de l'installation prévue.

Les infrastructures situées sur des terrains exposés peuvent aussi être menacées par des dangers naturels, comme les chutes de pierres, les glissements de terrain, les laves torrentielles et les avalanches provenant des régions à pergélisol (chap. 1.7). Cette hypothèse sera incluse dans l'analyse des dangers; on estimera en outre le risque résiduel lié à l'aptitude au service de l'ouvrage. Ces influences devraient être prises en compte en choisissant le site; s'il s'agit d'un ouvrage existant, on examinera le potentiel de danger. S'il en résulte que ce potentiel n'est pas acceptable, il sera nécessaire d'installer des ouvrages protection répondant à la situation spécifique du site. Il peut s'agir de filets de protection contre les chutes de pierres, de clouages ou d'ancrages dans la roche, ainsi que de parois et de murs de protection ou d'ouvrages paravalanches (fig. 38).

2.3.2 Concept de structure porteuse

Le concept d'une structure porteuse devrait intégrer les considérations suivantes:

- Choisir judicieusement le site.
- Couvrir tous les dangers significatifs (calculs de scénarios, cas de charges).
- Prévoir une structure porteuse robuste et adéquate, dotée de réserves de sécurité repérables (pas de réserves de sécurité cachées).
- Veiller à ce que la structure porteuse puisse être adaptée aux conditions réelles.
- Fixer les éléments porteurs et des éléments de construction dans le pergélisol en le perturbant le moins possible (tenir compte des forces de soulèvement provenant de la couche active).
- Faire en sorte que les déformations n'entravent pas l'utilisation de la construction (aptitude au service) et prévoir éventuellement la possibilité de réajustements.
- Intégrer les dangers naturels dans l'analyse des dangers et estimer le risque résiduel pesant sur l'aptitude au service de la construction.



Fig. 38: Travaux d'ancrage dans la roche afin de protéger la sortie d'une galerie contre les chutes de pierres (photo: Gasser, Lungern).

L'essentiel en bref

L'étude préliminaire est l'étape clé dans l'étude d'un projet de construction sur pergélisol. Par rapport aux constructions sur sol non gelé, il faut prévoir plus de temps pour la reconnaissance du terrain, car elle englobe les relevés de l'évolution saisonnière de la température du sol et de l'air. En conséquence, l'étude préliminaire coûte plus cher, mais elle est finalement rentable car elle permet de prolonger la durée de vie des ouvrages et de réduire les coûts de réfection ou d'implantation de nouvelles constructions.

Si les constructions sont complexes et sujettes à la déformation et que les conditions géotechniques posent problème, il faudrait aussi déterminer la constitution du sol de fondation du site choisi en procédant à des examens sur le terrain et à des analyses en laboratoire.

Lorsqu'il s'agit de réparer des constructions existantes, c'est au cours de l'analyse préalable qu'il importe de découvrir les causes des dégâts. Plusieurs causes sont possibles. Il est difficile de les définir et de comprendre leur effet, car il existe une étroite interaction entre la structure porteuse et le pergélisol. Il est donc recommandé de faire appel à des spécialistes.

Le choix du site est d'une importance cruciale dans le concept d'une structure porteuse. A ce stade, il importe de déterminer si le site prévu se trouve sur du pergélisol, d'étudier les conditions du sol de fondation et de tenir compte des dangers naturels. Si le site se trouve dans du pergélisol riche en glace, il faudrait envisager d'en choisir un autre ou de renoncer à la construction. La structure porteuse devrait être robuste, adaptée aux conditions du site et planifiée avec des marges de sécurité suffisantes afin d'éviter de devoir restreindre l'utilisation d'un ouvrage au cours de son existence.

3 Avant-projet

3.1 Convention d'utilisation

Durant l'utilisation d'un bâtiment, de multiples exigences doivent être respectées. Celles-ci sont définies dans la convention d'utilisation. Les bases de ce document seront établies lors de l'étude préliminaire en concertation par le maître de l'ouvrage et l'auteur du projet.

La procédure d'établissement de la convention d'utilisation ainsi que son contenu sont précisés dans la norme SIA 260. Pour les constructions sur pergélisol, il faut encore définir certains points supplémentaires (tab. 12, colonne de gauche).

Les principaux dangers et scénarios seront étudiés à ce stade d'avant-projet (chap. 3.4.2, 3.5.2 et 3.6); les risques résiduels non couverts résultant des cas de charge, des dangers naturels et d'autres risques particuliers doivent être définis d'entente avec le maître de l'ouvrage.

Tab. 12: Examens complémentaires de divers facteurs à prendre en compte dans la convention d'utilisation et dans la base du projet de constructions sur pergélisol.

Convention d'utilisation	Base du projet
<i>Définir les exigences</i>	<i>Appliquer les exigences</i>
Evaluation et choix du site (conditions du sol de fondation, vérification de la présence du pergélisol, teneur en glace)	Au stade de l'étude préliminaire, il est utile d'examiner en détail (conformément à l'importance de l'objet) le site, le sol de fondation et les conditions du pergélisol (chapitre 2)
Système de structure porteuse adapté au site et au sol de fondation (garantir la sécurité structurale)	Choix d'un système de structure porteuse adéquat en prévoyant éventuellement les moyens de correction nécessaires pour les constructions sujettes à la déformation (p. ex. structure porteuse ajustable)
Durée d'utilisation (Conséquences des changements dans le sol de fondation tout au long de l'existence d'une construction)	Choix d'un type de fondation adéquat qui évitera qu certaines déformations restreignent l'utilisation d'une construction
Déformations admissibles (garantir l'aptitude au service)	Propriétés géotechniques du sol de fondation et conséquences d'une modification de la teneur en glace: – Fluages d'un sol de fondation riche en glace sous l'effet de l'introduction des forces – Calculs des tassements (fonte de la glace dans le sol de fondation) – Calculs des soulèvements (formation de glace dans le sol de fondation) – Calculs de la résistance au cisaillement et de la capacité portante du terrain (dépréciation des caractéristiques du sol de fondation)
Apport attendu de chaleur dans le sous-sol (p. ex. pendant la réalisation ou l'utilisation)	Protection contre l'apport de chaleur dans le sous-sol (chapitre 8) à l'aide de: – méthodes de construction adaptées (étape de la construction) – mesures de construction adaptées (étape de l'utilisation)
Incertitudes concernant les coûts (en raison de l'altitude, de la logistique, du climat)	Etablissement d'un budget précis, diminution des incertitudes concernant les coûts à l'aide de: – documents d'appel d'offres complets – planification et exécution des travaux confiées à des entrepreneurs expérimentés

3.2 Base du projet

Les exigences à respecter et l'utilisation d'une construction qui ont été définies dans la convention d'utilisation sont mises en œuvre dans la base du projet. Elles servent de guide à l'auteur du projet et l'aideront à remplir les conditions définies conformément aux normes et dans les règles de l'art.

La procédure et le contenu de la base du projet se conformeront à la norme SIA 260. L'étendue et le contenu de la base du projet dépendent de l'importance de l'ouvrage et des dangers. Pour les constructions sur pergélisol, certains points supplémentaires doivent être pris en considération (tab. 12, colonne de droite).

3.3 Impact sur l'environnement

La nécessité d'établir une étude ou un rapport d'impact sur l'environnement (EIE ou RIE) doit être étudiée pendant l'avant-projet. Cette étude devrait être réalisée le plus tôt possible. Etant donné que la majorité des bâtiments sur le pergélisol se trouve en dehors des zones à bâtir, une expertise environnementale est nécessaire dans la plupart des cas. Son étendue et son contenu seront définis sur la base de la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) et des directives des Services cantonaux de l'environnement.

3.4 Actions

3.4.1 Actions sur la structure porteuse

Les actions se rapportent à la structure porteuse et elles sont distinguées selon leur origine et leur type, ainsi qu'en fonction de leur durée et de leur variabilité spatio-temporelle. La caractérisation précise des actions se conformera aux normes SIA 260 et 261.

Le tableau 13 synthétise des actions possibles non spécifiques au pergélisol et des actions liées au pergélisol subies par une structure porteuse située en haute montagne.

Les combinaisons d'actions déterminantes seront étudiées et prises en compte dans le dimensionnement (chap. 4.1).

3.4.2 Modifications dues au pergélisol des actions sur la structure porteuse

Le tableau 14 présente au moyen de trois scénarios quelles peuvent être les conséquences d'une modification imputable au pergélisol des actions s'exerçant sur une structure porteuse: 1) pas de modification dans le sol de fondation permagelé; 2) modification dans le sol de fondation permagelé due à la dégradation de la glace qu'il contient; 3) modification dans le sol de fondation permagelé due à l'accrétion de glace.

Tab. 13: Actions possibles sur la structure porteuse.

Actions (description)	con- stantes	va- riables	excep- tion- nelles
Provenant de l'environnement (site en haute montagne, action non spécifique au pergélisol):			
– Température de l'air (variations journalières et saisonnières de la température)	x	x	x
– Poids de la neige (variations saisonnières du poids de la neige)	x	x	x
– Vent (variations journalières et saisonnières du vent)		x	x
– Poids de la glace (variations saisonnières du poids de la glace)	x	x	x
– Dangers naturels (chutes de pierres, avalanches, laves torrentielles, rupture glaciaire)			x
Provenant du sol de fondation (action spécifique au pergélisol):			
– Température du sol (négative, variations saisonnières)	x	x	
– Propre charge du sol (charge volumique, teneur en glace)	x	x	
– Pression du sol (résistance au cisaillement, charge volumique)	x	x	
– Pression du fluage (température du sol, teneur en glace, comportement en déformation)	x	x	
– Pression de l'eau (variations saisonnières, répartition, écoulement)		x	x
– Pression de l'eau interstitielle (variations saisonnières, résistance au cisaillement)		x	
– Déformations (fluages, perte de volume, résistance au cisaillement, glace de ségrégation)		x	x
– Teneur en sel du sol (point de congélation de l'eau plus bas)	x	x	

Tabl. 14: Modifications imputables au pergélisol des actions s'exerçant sur la structure porteuse et leurs conséquences.

Modification des actions	Conséquences
Scénario 1: Pas de modification dans le sol de fondation permagélé	Voir tableau 13 ci-dessus
Scénario 2a: Modification dans le sol de fondation permagélé due à la dégradation de la glace qu'il contient	Augmentation de la pression du sol due à la diminution de la résistance au cisaillement Diminution de la portance due à la réduction de la résistance au cisaillement, instabilités Augmentation de pression par fluage due à l'augmentation de la température de la glace Augmentation des déformations du sol de fondation, perte de volume (tassement) Augmentation de l'épaisseur de la couche active Augmentation de la pression de l'eau interstitielle due à la fonte de la glace de sol paissseur de la couche active Augmentation de la pression de l'eau, de la répartition hydrostatique ou de la pression hydrodynamique
Scénario 2b: Plus aucun pergélisol présent dans le sol de fondation (stade final du scénario 2a)	Déformations du sol de fondation dues à une perte de volume, consolidation (tassement) Diminution de la portance du sol, instabilités dues à une diminution de la résistance au cisaillement Diminution de la pression de l'eau interstitielle Diminution de la pression de l'eau et de la pression hydrodynamique
Scénario 3: Modification dans le sol de fondation permagélé due à l'accrétion de glace	Augmentation des efforts de traction sur les éléments structurels (pieux, ancrage) Augmentation des déformations du sol de fondation, augmentation de volume (pression de soulèvement) Diminution de l'épaisseur de la couche active Diminution de la pression de l'eau interstitielle sous l'effet du gel de l'eau interstitielle Diminution de la pression de l'eau, de la répartition hydrostatique ou de la pression hydrodynamique

3.5 Effets

3.5.1 Effets sur la structure porteuse

On entend par effets sur la structure porteuse sa réponse aux actions qu'elle subit. Le présent guide traite uniquement des effets imputables à un sol de fondation permagelé. Ils peuvent être déduits des actions possibles énumérées au tableau 13 (tab. 15).

3.5.2 Modifications dues au pergélisol des effets sur la structure porteuse

Le tableau 14 présente trois scénarios décrivant une modification des actions imputable au pergélisol: 1) pas de modification dans le sol de fondation permagelé; 2) modification dans le sol de fondation permagelé (dégradation); 3) modification dans le sol de fondation permagelé (accrétion). Les effets qui en résultent sont exposés au tableau 16.

Tab. 15: Effets possibles exercés sur la structure porteuse.

Actions provenant du sol de fondation	Effets
Température du sol	Endommagement des matériaux (processus de prise du béton, éclatements)
Propre charge du sol	Efforts tranchants, fléchissements, fissures
Pression du sol	Efforts tranchants, fléchissements, fissures
Pression du fluage	Efforts tranchants, fléchissements, fissures
Pression de l'eau	Efforts tranchants, fléchissements, fissures, dégâts d'eau
Pression de l'eau interstitielle	Efforts tranchants, fléchissements, fissures, dégâts d'eau
Déformations	Efforts tranchants, fissures, défaillances de la structure porteuse
Teneur en sel du sol	Endommagement des matériaux (corrosion, éclatements)

Tab. 16: Effets exercés sur la structure porteuse en raison d'une modification dans le pergélisol.

Actions provenant du sol de fondation	Effets
Scénario 1 (pas de modification dans le sol de fondation permagelé)	Voir les effets énoncés au tableau 15 ci-dessus
Scénario 2a (Modification dans le sol de fondation permagelé, dégradation)	Efforts tranchants, fléchissements, déformations différentielles du sol de fondation (tassements), fissures, défaillance de la structure porteuse, dégâts d'eau
Scénario 2b (plus aucun pergélisol présent dans le sol de fondation)	Efforts tranchants, fléchissements, fissures, déformations différentielles du sol de fondation
Scénario 3 (Modification dans le sol de fondation permagelé, accrétion)	Efforts tranchants, fléchissements, déformations différentielles du sol de fondation (pression de soulèvement), fissures, défaillances de la structure porteuse

3.5.3 Effets sur le sol de fondation

On entend par effets sur le sol de fondation sa réponse aux actions qu'il subit. Les effets imputables au pergélisol n'ont d'importance que s'ils affectent la structure porteuse. Ils sont énumérés dans les tableaux 15 et 16. Ceux qui ne touchent pas la structure porteuse ne sont pas présentés dans ce guide.

Les actions et les effets sont pris en compte dans le dimensionnement. Les actions sont combinées dans diverses configurations de danger pour vérifier la portance du sol. Les effets, limités par les exigences formulées dans la convention d'utilisation et dans la base du projet, sont étudiés en vérifiant l'aptitude au service de l'ouvrage.

3.6 Analyse des conséquences et de la sensibilité

L'analyse des conséquences et de la sensibilité porte sur la sensibilité du sol de fondation soumis à diverses actions. Les informations de base proviennent d'une description du projet, d'une simple reconnaissance du terrain et d'une description des actions. Les éléments examinés dans la description du projet portent sur l'objectif, la situation et les exigences liées à l'utilisation (convention d'utilisation et base du projet). Une reconnaissance du terrain doit caractériser l'état initial (état réel) du sol, que ce soit pour un nouveau bâtiment ou un bâtiment existant. Les actions sur la structure porteuse sont présentées au tableau 13. En outre, le tableau 14 comprend trois scénarios illustrant les modifications des actions imputables au pergélisol et leurs conséquences sur la structure porteuse. De ces considérations ressort la sensibilité du sol de fondation (analyse de la sensibilité, «Y», fig. 39). Cette sensibilité est définie sur la base de la température du sol, de la teneur en glace et de la structure du sol ou de la roche (chap. 1.4.2).

Les effets peuvent avoir des conséquences diverses selon le type d'ouvrage et le site. L'importance des conséquences permet de qualifier l'importance des effets. Pour une cabane ou un abri de montagne, les tassements dus à la fonte du pergélisol peuvent occasionner des désagréments et faire augmenter les coûts d'entretien. Par ailleurs, les instabilités causées par les tassements différentiels des stations de remontées mécaniques ou des fondations des pylônes peuvent provoquer un déraillement, voire un décrochement des câbles, ou même faire défaillir la structure porteuse. De tels événements peuvent être à l'origine de multiples problèmes qui vont de la panne du système d'exploitation à la mise en danger de vies humaines et d'importants biens matériels. Les risques sont donc à réduire à une mesure acceptable en s'appuyant sur les dispositions et les dimensionnements définis dans la convention d'utilisation et dans la base du projet. Face à ces risques, une analyse des conséquences s'impose. La figure 39 présente une telle analyse des conséquences «X» et de la sensibilité «Y» et fournit les connaissances nécessaires pour comprendre les interactions entre le sol de fondation et la structure porteuse.

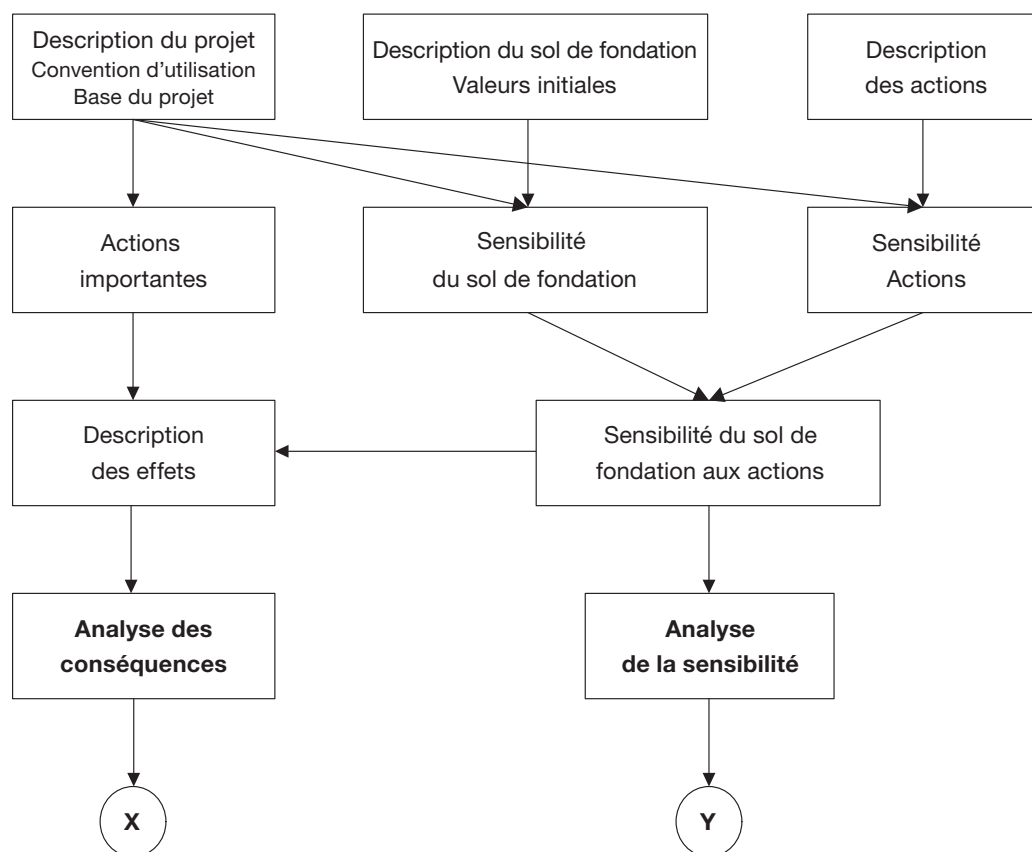


Fig. 39: Schéma opérationnel de l'analyse des conséquences et de la sensibilité pour les constructions sur le pergélisol (adapté selon PERD, 1998).

3.6.1 Etendue des analyses et des examens

L'appréciation des risques se base sur la probabilité d'occurrence d'un événement et sur ses conséquences (dégâts). Dans l'appréciation des risques en rapport avec la construction sur pergélisol, ces probabilités correspondent à la sensibilité de l'ouvrage soumis à des actions. Une action (p. ex. due au réchauffement) s'exerçant dans le pergélisol représente un danger pour une structure porteuse, car elle peut renforcer les influences déjà existantes et aggraver leurs effets (p. ex. défaillance de la structure porteuse). Les conséquences permettent de définir l'importance des effets.

Divers types d'infrastructures dans le pergélisol sont classés dans un diagramme des conséquences et de la sensibilité (figure 40). Ce diagramme montre l'importance qualitative des conséquences «X» que peut avoir la défaillance d'une structure porteuse ainsi que le degré de sensibilité d'une structure porteuse soumise à diverses actions «Y». Cette classification sert aussi de base pour déterminer l'étendue des analyses et des examens «Z», qui varient selon le quadrant dans lequel on classe la construction sur pergélisol (tab. 17). Les classifications des différents types de construction présentées à la figure 40 sont des exemples et elles doivent être redéfinies pour chaque construction.

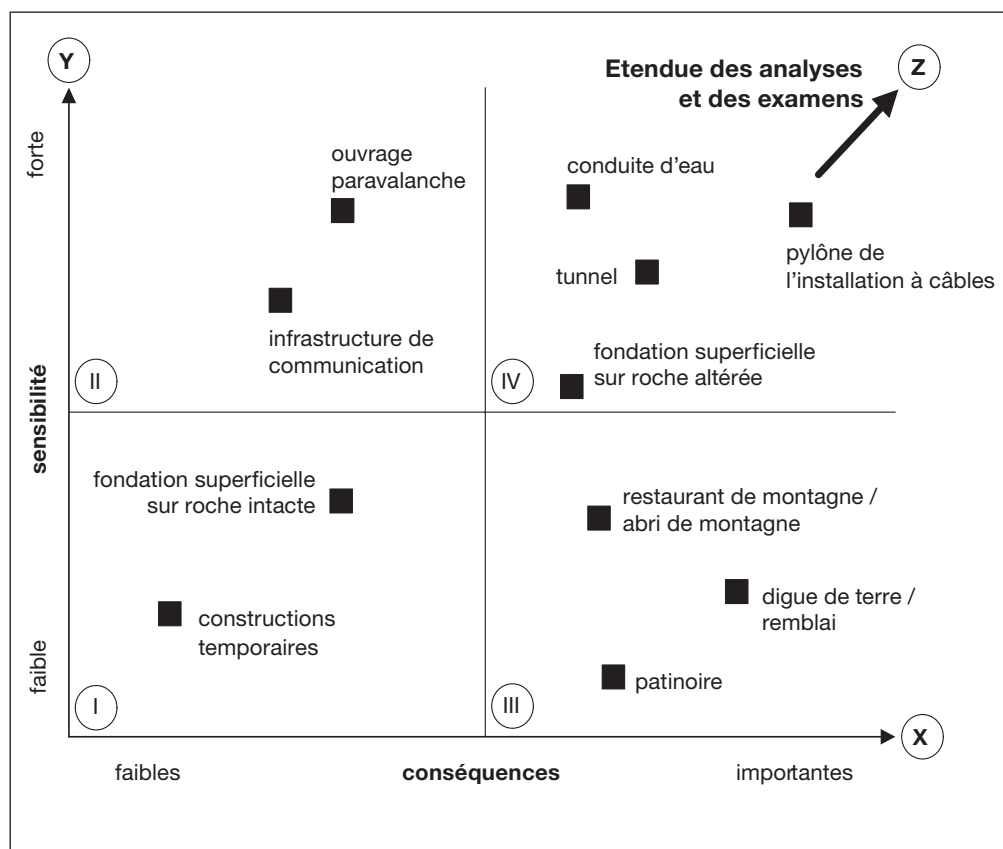


Fig. 40: Exemple d'une classification dans le diagramme des conséquences et de la sensibilité pour des infrastructures dans le pergélisol (adapté selon PERD, 1998). Les quadrants I à IV sont expliqués au tableau 17.

Tableau 17: Etendue de l'analyse et des examens d'après les quadrants de l'analyse des conséquences et de la sensibilité.

* Analyse qualitative: modélisation analytique des actions variables / Effets sur la structure porteuse.
 + Analyse quantitative: modélisation numérique détaillée (sur base informatique) des actions variables / Effets sur la structure porteuse

Quadrant	Etendue recommandée des analyses et examens
I	Pas d'analyse ni d'examen détaillé nécessaire
II	Réaliser une analyse qualitative*: appréciation d'experts, reconnaissance du terrain, analyse quantitative s'il n'existe pas de projet comparable
III	Réaliser une analyse quantitative+ limitée: appréciation par un ingénieur des paramètres utilisés, surveillance du sol de fondation, analyse quantitative complète s'il n'existe pas de projet comparable
IV	Réaliser une analyse quantitative+ détaillée: analyse détaillée du sol de fondation sur le terrain et en laboratoire, appréciation indépendante d'experts (ingénieur de contrôle), surveillance de l'ensemble de l'ouvrage

Une surveillance et un entretien appropriés des constructions sur le pergélisol pendant toutes les étapes du projet permettent généralement de découvrir les conséquences à temps et de prendre des mesures de sécurisation (chap. 5 et 6).

3.7 Exemples d'application

Les deux exemples suivants indiquent les éléments à considérer pour chaque action et chaque effet et la façon d'en tenir compte dans l'analyse des conséquences et de la sensibilité afin de déterminer l'étendue des analyses et des examens.

3.7.1 Situation initiale – premier exemple

Une station de transport par câble non chauffée est fondée sur une semelle filante. Elle est sise dans la couche active d'une roche fissurée en aval et, en amont, sur une roche fissurée contenant de la glace. L'influence produite par le sol de fondation est examinée pour ce cas de figure (fig. 41).

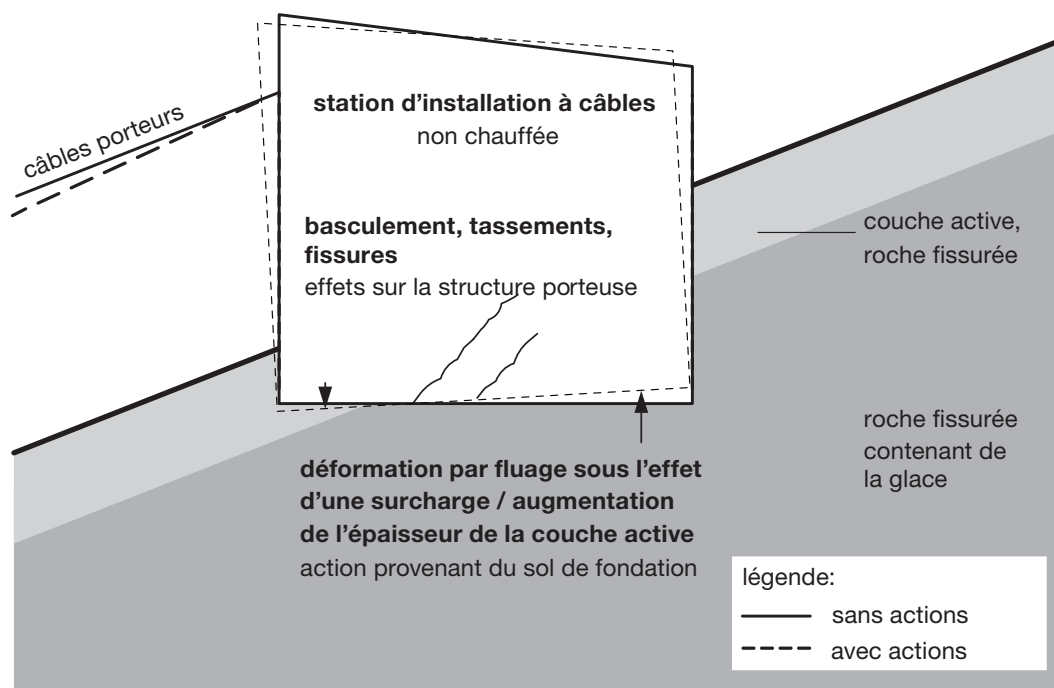


Fig. 41: Représentation schématique d'une station d'installation à câbles située dans une roche fissurée contenant de la glace et soumise à une action ou à un effet provenant du sol de fondation.

3.7.2 Actions sur la structure porteuse

Parmi les actions provenant du sol de fondation, celle qui est choisie ici se rapporte aux déformations (tassements) par fluage sous l'effet d'une surcharge ou d'une augmentation de l'épaisseur de la couche active, ce qui peut représenter une action variable et exceptionnelle selon le tableau 13. Cette condition de dimensionnement sera prise en compte lors de la vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service de l'ouvrage (norme SIA 260).

3.7.3 Effets sur la structure porteuse

Les effets exercés depuis le sol de fondation sur la structure porteuse sont schématisés à la figure 41. Les effets de l'action variable ou exceptionnelle (tassement différentiel du sol de fondation) peuvent conduire à des basculements; ils peuvent aussi provoquer des efforts tranchants et des fissures dans la structure porteuse, comme on le voit aux tableaux 15 et 16 (scénario 2a). Ces conditions de dimensionnement seront prises en compte lors de la vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service de l'ouvrage (norme SIA 260). Face aux modifications prévisibles que subira la construction, il importe de concevoir une structure porteuse adéquate et d'adopter des méthodes de surveillance capables de garantir une détection précoce des difficultés.

3.7.4 Analyse des conséquences et de la sensibilité

Les premières reconnaissances du terrain ont montré qu'une roche fissurée contenant de la glace se trouve sous la roche fissurée de la couche active. Sous l'effet d'une surcharge et du réchauffement climatique, il faut s'attendre à ce que des influences s'exercent depuis le sol de fondation. L'introduction de charges dans un sol de fondation contenant de la glace peut entraîner des déformations par fluage. Sous l'effet du réchauffement, l'épaisseur de la couche active peut augmenter, ce qui conduirait à une dégradation de la roche et à des tassements différentiels sous le bâtiment. Les tassements du sol de fondation dans la zone très sollicitée de l'arête de basculement aval de la station font diminuer la résistance au basculement, ou provoquent même le basculement de la station si ce danger n'est pas détecté. Suivant la sensibilité du sol de fondation, une action s'exerce sur l'ouvrage; cette influence peut être considérée comme faible à forte selon le type de structure porteuse et les systèmes de surveillance installés dans le sol et dans la structure elle-même (axe Y, fig. 40).

Les exigences définies dans la convention d'utilisation d'une installation à câbles et dans la base du projet montrent que les actions qui entraînent une réduction de la stabilité requise ou des déplacements de l'axe du câble (effet) peuvent avoir de lourdes conséquences. Les actions provenant du sol de fondation (déformations par fluage sous une surcharge, augmentation de l'épaisseur de la couche active) peuvent être la cause de tels déplacements ou déstabilisations. S'il existe une forte probabilité de déplacement spontané ou de défaillance de la structure porteuse, il faut admettre que les conséquences pour l'ouvrage seront en principe importantes (axe X, fig. 40).

3.7.5 Etendue des analyses et des examens

La classification d'une installation à câbles ou des fondations d'un pylône dans le pergélisol dépend des modifications présumées du sol de fondation, du concept de structure porteuse, du type de fondation et des méthodes de surveillance utilisées. Dans certains cas, il faut aussi déterminer la sensibilité du sol de fondation et les conséquences pour l'ouvrage. En raison de la forte sollicitation des forces des câbles et de la grande importance de la sécurité, le résultat sera placé dans le troisième ou le quatrième quadrant (fig. 40). Les analyses, examens et surveillances à réaliser devraient alors être définis sur la base du tableau 17.

3.8 Deuxième exemple d'application

3.8.1 Situation initiale

Un restaurant chauffé repose sur une fondation superficielle dans la couche active d'un terrain meuble. Des matériaux meubles contenant de la glace se trouvent au-dessous. L'influence d'un facteur environnemental et celle du sol de fondation sont examinées pour ce cas de figure (fig. 42).

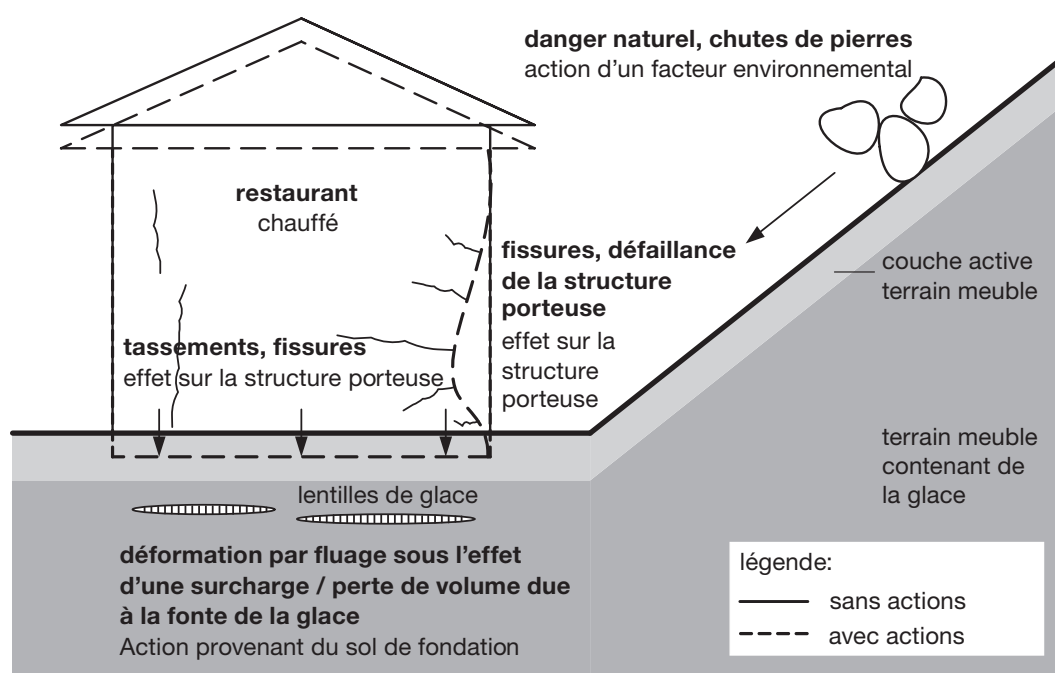


Fig. 42: Représentation schématique d'un restaurant chauffé situé sur un pergélisol meuble et soumis à l'action ou à l'effet provenant d'un facteur environnemental ou du sol de fondation.

3.8.2 Actions sur la structure porteuse

Parmi les actions provenant de l'environnement, celle choisie ici porte sur le danger naturel de chutes de pierres, ce qui représente une action exceptionnelle d'après le tableau 13. Pour les actions provenant du sol de fondation, le choix a été porté sur les déformations par fluage sous l'effet d'une surcharge ou d'une perte de volume entraînée par la fonte de la glace, ce qui représente une action variable et exceptionnelle, selon le tableau 13. Ces conditions de dimensionnement seront prises en compte lors de la vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service de l'ouvrage (norme SIA 260).

3.8.3 Effets sur la structure porteuse

Les effets provenant de l'environnement et du sol de fondation sur la structure porteuse sont schématisés à la figure 42. Les effets de l'action exceptionnelle exercée par des chutes de pierres ou des déformations peuvent provoquer des fissures dans la structure porteuse et entraîner sa défaillance. Les effets d'une action variable de déformations peuvent conduire au déploiement d'efforts tranchants, à des tassements et des ruptures dans la structure porteuse (tableaux 15 et 16, scénario 2a). Ces conditions de dimensionnement seront prises en compte lors de la vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service de l'ouvrage (norme SIA 260).

3.8.4 Analyse des conséquences et de la sensibilité

Les premières reconnaissances du terrain ont montré que des terrains meubles contenant de la glace se trouvaient sous la couche active. Sous l'effet d'une surcharge et en raison du chauffage du restaurant, il faut s'attendre à ce que des actions s'exercent à partir du sol de fondation. L'introduction de charges dans un sol de fondation contenant de la glace peut engendrer des déformations par fluage. Sous l'effet du réchauffement, la glace fond, ce qui conduit à une perte de volume du sol de fondation et à ainsi à des tassements sous les constructions. La sensibilité du sol de fondation à ces actions doit donc être supposée comme moyenne à forte (axe Y, fig. 40).

Les exigences définies dans la convention d'utilisation d'un restaurant et dans la base du projet montrent que les actions qui produisent des déformations et des fissures (effets) ont pour conséquence de restreindre la capacité d'utilisation. Les actions provenant du sol de fondation (déformations par fluage sous une surcharge, fonte de la glace) peuvent aussi produire de telles déformations et fissures. Mais les conséquences peuvent tout de même être considérées comme faibles (axe X, fig. 40).

Des mesures appropriées seront prises pour éviter toute interruption d'exploitation due à une défaillance de la structure porteuse imputable à une chute de pierres (filet pare-pierres, confortement de parois rocheuse). Il faut également estimer le risque résiduel et en discuter avec le maître de l'ouvrage. Les risques résiduels n'entrent pas en considération dans l'analyse des conséquences et de la sensibilité.

3.8.5 Etendue des analyses et des examens

En raison de la forte sensibilité du sol de fondation et des conséquences peu importantes, le restaurant est classé dans le deuxième quadrant (fig. 40). Il est donc possible de déterminer l'étendue des analyses et des examens (axe Z, fig. 40). Les analyses, examens et surveillances à réaliser seront alors définis sur la base du tableau 17.

L'essentiel en bref

Ce chapitre expose les études complémentaires nécessaires pour établir la convention d'utilisation et la base du projet relatives aux constructions érigées sur du pergélisol. On y trouve aussi une description des actions et des effets produits sur la structure porteuse d'une construction sur pergélisol.

La sensibilité du sol de fondation de la construction sur pergélisol est examinée au moyen d'une analyse des conséquences et de la sensibilité. L'étendue des analyses et des examens est déterminée en fonction de la sensibilité de ce sol face aux influences subies et aux conséquences qui découlent des effets observés.

4 Projet de construction

4.1 Dimensionnement

Le dimensionnement consiste à définir les dimensions, les matériaux et les détails constructifs d'une structure porteuse sur la base des situations de danger et des états d'utilisation déterminants selon les normes sur les structures porteuses SIA 262 à 267. Lorsque les risques sont difficilement estimables et les conditions du sol de fondation complexes – ce qui est fréquent dans le pergélisol – les valeurs caractéristiques du sol de fondation seront choisies en se référant à la base du projet. Le réchauffement climatique et les influences que les travaux de construction et l'utilisation de l'infrastructure exercent sur la teneur en glace du sol de fondation devraient également être pris en considération. En prévoyant la durée d'existence d'un ouvrage, les valeurs caractéristiques du sol de fondation devraient être estimées en tenant compte d'un éventuel changement d'état.

Les valeurs de dimensionnement d'un pergélisol seront déterminées selon la norme SIA 267 à partir des valeurs caractéristiques du sol de fondation et des facteurs partiels ou des facteurs de conversion exigés. Les valeurs correspondantes sont prises en compte dans la vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service de l'ouvrage.

4.2 Vérifications

La sécurité structurale et l'aptitude au service doivent être vérifiées conformément à la norme SIA 260. Pour les constructions situées sur du pergélisol, il y a lieu de vérifier, dans la mesure où ils sont déterminants, les quatre types d'état limite applicables à la sécurité structurale selon la norme SIA 267. Ils concernent la perte d'équilibre, l'épuisement de la résistance ultime, la perte de la résistance au glissement et l'épuisement de la résistance à la fatigue.

Les états limites de l'aptitude au service doivent être examinés conformément à la convention d'utilisation. Selon les exigences de la norme SIA 267, la vérification de l'aptitude au service concernant les constructions situées sur du pergélisol consiste essentiellement à calculer les tassements, les basculements, les déplacements et les déformations.

→ Pour vérifier la résistance et l'aptitude au service des structures porteuses en béton, en acier, en bois et en maçonnerie, on appliquera les dispositions des normes sur les structures porteuses SIA 262 à 267.

5 Réalisation

5.1 Projet d'exécution

5.1.1 Appel d'offres

Des documents complets d'appel d'offres sont essentiels si l'on veut obtenir des offres adéquates pour la réalisation du projet. En établissant un appel d'offres pour des travaux de construction sur le pergélisol, il importe de prendre en considération les quelques aspects suivants:

Forages et travaux de terrassement

- La géli-adhérence ou le blocage des instruments dans un trou de forage contenant de la glace peut occasionner des retards, des dommages ou des pertes de matériel.
- Les forages devraient être exécutés uniquement par soufflage d'air comprimé, afin de limiter à un minimum l'apport de chaleur dans le sol de fondation.
- La pelle mécanique est peu efficace dans les sols de fondation contenant de la glace. D'après le Catalogue des articles normalisés (CAN), ils sont difficilement excavables à la pelle mécanique et sujets à complications (les blocs doivent être concassés au marteau-piqueur). Par ailleurs, le sol de fondation doit être clairement décrit dans les conditions générales. Pour les travaux d'excavation, il faut donc prévoir d'utiliser un marteau-piqueur ou d'excaver à l'explosif. Le test de pénétration standard (TPS) ne peut pas être réalisé dans le pergélisol. D'où la nécessité de bien décrire la composition et la compacité supposée du sol de fondation.
- Les roches et les terrains meubles contenant de la glace étant plus difficiles à miner, il est nécessaire d'utiliser davantage d'explosifs et de diminuer les espaces entre les minages.

Matériaux de construction

- Les températures négatives du sol ralentissent la prise du mortier et du béton. Il est donc nécessaire d'utiliser des adjuvants ou un liant qui permettent d'atteindre le durcissement voulu. En outre, il est possible de chauffer l'eau de gâchage pour le mortier ou le béton ainsi que les agrégats. Les effets de l'eau chaude, des adjuvants et de la chaleur de prise sur un sol contenant de la glace doivent être pris en considération lors du dimensionnement.
- Le mortier et le béton devraient être rendus résistants au gel à l'aide d'agents aérateurs ou étanchéifiés en diminuant le rapport eau/ciment lors du mélange.
- Les matériaux de remplissage ou de coffrage devraient être non gélifs, comme le sable, les gravillons, le gravier ou les sédiments graveleux (chap. 8.4.4).
- Pour limiter au mieux l'échange de chaleur entre l'ouvrage et le sol de fondation, des matériaux isolants devraient être utilisés (chap. 8.6.1).

Réalisation et surveillance

- Les travaux de construction ne peuvent s'effectuer en général que pendant une courte période.
- Les conditions climatiques du site devraient être prises en considération car, en haute montagne, il peut neiger n'importe quand, ce qui raccourcit encore la brève période favorable pour construire.
- Les ancrages et les tirants en rocher doivent être fixés et injectés immédiatement après le percement de chaque trou de forage, car ces trous gèlent rapidement s'ils ne peuvent pas être chauffés.

- Il importe de tenir compte du fait que les capacités de l'être humain et de la machine diminuent avec l'altitude.
- Les travaux de construction sur le pergélisol imposent des exigences particulières. Il est donc avantageux de confier ces travaux à des constructeurs expérimentés.
- Un système de surveillance devrait être planifié dès l'avant-projet et installé avant le début des travaux de construction (tab. 18.)

5.1.2 Nouvelles constructions sur pergélisol

Le projet d'exécution d'un nouveau bâtiment sur le pergélisol devrait garantir une disposition de l'ouvrage la mieux adaptée possible au site (chap. 2.3). Les connaissances acquises lors de l'analyse préalable doivent être prises en compte dans le choix de la structure porteuse, ce qui requiert parfois une adaptation de la convention d'utilisation. Si le site se révèle défavorable ou que la structure porteuse ne peut pas remplir les exigences imposées (chap. 3), un changement de site ou un renoncement à la construction devrait être envisagé.

5.1.3 Réfection de constructions existantes sur pergélisol

Avant d'entreprendre un projet de réparation sur le pergélisol, il faudrait analyser ce qui a rendu la réfection nécessaire. Le déroulement d'une telle procédure est présenté au chapitre 6.2 qui décrit un plan de maintenance et d'intervention et indique les mesures de réfection possibles. Ces mesures permettent de stabiliser les constructions existantes et, si nécessaire, d'agir contre la dégradation du pergélisol. Si le sous-sol ne contient qu'une faible part de pergélisol, on peut adopter une méthode de construction entraînant la fonte du pergélisol (chap. 8.7.4).

Pour stabiliser le sous-sol, on peut envisager des injections de mortier ou l'installation d'ancrages supplémentaires. Pour lutter contre une dégradation du pergélisol, on peut installer des systèmes de refroidissement ou améliorer l'isolation entre la construction et le sol de fondation. L'utilisation de systèmes de construction et de correction mobiles (chap. 8.5) représente la technique la plus durable dans certains cas, mais elle est difficilement applicable aux constructions existantes.

Si même des méthodes bien choisies ne permettent pas de réparer les dommages, il faudra renoncer à une réfection à court ou moyen terme et envisager un démontage (chap. 7), puis une reconstruction, voire un nouvel ouvrage.

5.2 Surveillance et contrôles de l'exécution de la construction sur le chantier

5.2.1 Préparation du système de surveillance

Pour garantir une surveillance optimale du sol de fondation et de l'ouvrage, il faut d'abord installer un système de mesure. Les mesures devraient débuter avant d'entreprendre les travaux de construction, afin de détecter à temps les modifications dans le sol de fondation et aux environs. Il peut s'agir de déformations ou de changements de températures du sol. Un système de mesure soigneusement conçu permet de mieux déceler les éventuels changements et dangers et d'augmenter ainsi la sécurité.

Le choix d'un système de mesure est influencé par la sensibilité à la déformation de la construction. Si l'on utilise des instruments de mesure peu précis, les déplacements ou les variations de température relevés risquent de tomber dans la marge d'imprécision des instruments et empêcher d'en tirer des conclusions fiables sur le sol de fondation. Il faudrait donc se doter de systèmes très précis, même si leurs coûts devaient être plus élevés.

La durée de la surveillance prévue peut également influencer le choix d'un système de mesure. Si la surveillance recouvre la durée de vie d'une construction, le système à choisir doit être durable ou interchangeable. Comme la surveillance sert souvent aussi de système d'alerte précoce, d'importantes informations concernant la sécurité peuvent se perdre en cas de panne. C'est pourquoi les principaux systèmes de mesure devraient être redondants et le système de surveillance remplaçable.

Le système de surveillance d'une construction devrait intégrer des réseaux de mesure existants ou d'autres sources de données. Cette solution permet de créer des synergies et d'épargner des coûts. Les divers réseaux de mesure existants sont décrits au chapitre 1.8.

5.2.2 Système de surveillance pendant l'exécution des travaux sur le chantier

Le tableau 18 ci-dessous présente différents systèmes appropriés à la surveillance de constructions sur le pergélisol pendant et immédiatement après l'exécution des travaux.

L'exemple d'un plan de contrôle se trouve à l'annexe B.

Tab. 18: Systèmes de surveillance pendant et immédiatement après l'exécution des travaux.

Système de surveillance	Objet de surveillance	Exigences spéciales	Fréquence des mesures
Surveillance visuelle	– Fissures, cavités – Glace – Changements en général	Visibilité	quotidienne à hebdomadaire
Mesures automatiques de la température du sol et de l'air	– Evolution de la température des surfaces, des trous de forage et de la structure porteuse	Accessibilité	horaire à quotidienne
Mesures géodésiques	– Déplacements à la surface du terrain	Points fixes stables sur le terrain	hebdomadaire à mensuelle
Scanner laser 3D	– Déplacements du terrain – Grands changements de volume dans le terrain (engendrés par des mouvements de roche, la disparition ou la formation de glace, etc.) – Déplacements des infrastructures	Points de référence mesurés sur le terrain	annuelle
Mesures Inkrex dans le trou de forage	– Soulèvements dans le sol de fondation – Tassements dans le sol de fondation	Tube Inkrex dans le trou de forage	mensuelle
Mesures inclinométriques dans le trou de forage	– Déplacements horizontaux dans le sol de fondation	Tube inclinométrique dans le trou de forage	mensuelle
Mesures extensométriques	– Déplacements des fissures dans la roche – Déplacements des constructions	Accessibilité	quotidienne à hebdomadaire
Captage des forces	– Compression du sol sous les fondations – Forces d'ancrage	Accessibilité	mensuelle à annuelle
Essai de traction	– Forces d'ancrage	Accessibilité à la tête de l'ancrage	unique

5.2.3 Plan de contrôle

Un plan de contrôle permet de fixer préalablement la fréquence des mesures et les cotes d'alerte, de décrire les mesures d'urgence en matière de sécurité et de définir clairement les responsabilités. Les mesures de surveillance régulières sont consignées dans un protocole et remises immédiatement aux responsables. Ceux-ci interprètent les données et émettent des recommandations pour la suite de la procédure ou ils ordonnent des mesures d'urgence. L'exemple d'un plan de contrôle se trouve à l'annexe B.

5.2.4 Contrôles d'exécution

Il convient de contrôler régulièrement l'exécution des travaux, la fondation et son environnement à l'aide du plan de contrôle et d'en consigner les résultats dans un protocole. Une telle surveillance systématique sert à protéger le personnel de chantier; elle permet aussi d'améliorer la qualité des travaux et donc de prolonger la durée de vie d'une construction. En outre, une surveillance systématique fait office de système d'alerte précoce et permet de mieux évaluer les dangers. L'exemple d'un plan de contrôle se trouve à l'annexe B.

La fréquence des mesures d'un système choisi devrait être adaptée à la complexité d'une construction et à sa sensibilité à la déformation. Il est en tout cas recommandé d'installer suffisamment tôt un système de mesure adéquat qui surveille la construction et ses environs avant, pendant et après l'exécution des travaux.

L'exécution des travaux doit être contrôlée soigneusement. Dans le cas de tirants d'ancrage précontraints, on réalisera par exemple des essais de traction et de mise en tension dans le cadre de l'assurance qualité selon les normes SIA 267 et 267/1. D'autres travaux ou éléments de construction doivent être contrôlés et vérifiés selon les normes SIA prévues.

Les contrôles d'exécution et les mesures seront enregistrés et évalués régulièrement et les données interprétées. Seule cette manière de faire permettra d'assurer la protection du personnel de chantier et le fonctionnement du système de surveillance et d'alerte précoce.

L'essentiel en bref

Des documents complets d'appel d'offres réduisent le risque de dépassement des coûts. En établissant un appel d'offres pour des constructions sur le pergélisol, il est particulièrement important de prendre en considération les aspects suivants:

- les travaux de forage et d'excavation
- les matériaux de construction et
- la réalisation et la surveillance.

Des systèmes de surveillance et de contrôle utilisables pendant l'exécution des travaux de construction sur le pergélisol sont présentés dans ce chapitre. Les mesures initiales devraient être effectuées avant le début des travaux. Les mesures régulières permettent de mieux déceler les éventuels problèmes ou dangers et d'augmenter ainsi la sécurité. Les relevés et évaluations systématiques des mesures peuvent servir de système d'alerte précoce.

L'exemple d'un plan de contrôle se trouve à l'annexe B.

6 Utilisation et maintenance

6.1 Surveillance

6.1.1 Adaptation du système de surveillance

Le système de surveillance installé pendant l'exécution des travaux est généralement repris et adapté pour l'utilisation et la maintenance de l'ouvrage. De telles observations servent à garantir le respect des exigences de construction définies dans la convention d'utilisation et la base du projet (chap. 3).

6.1.2 Plan de surveillance et d'entretien

Pendant l'étape d'utilisation et de maintenance, le plan de surveillance ou d'entretien est établi à partir du plan de contrôle. Ce plan doit être adapté en conséquence. Il détermine la fréquence des mesures et les cotes d'alerte, décrit les mesures d'urgence en matière de sécurité et définit les responsabilités. Les mesures régulières sont consignées dans un protocole de mesures et remises aux responsables. Ceux-ci interprètent les données et ils émettent au besoin des recommandations pour la suite de la procédure ou ordonnent des mesures d'urgence.

6.1.3 Système de surveillance pendant l'utilisation et la maintenance

Les processus dynamiques, qui varient au cours du temps et agissent sur une structure porteuse sise sur un pergélisol, devraient être vérifiés régulièrement à l'aide d'un système de surveillance simple. Il est ainsi possible de suivre, pour chaque objet, l'évolution dictée par des facteurs temporels (fiche de rappel). Quelques systèmes de surveillance utilisables pour les constructions sur le pergélisol pendant d'utilisation et la maintenance des ouvrages sont présentés au tableau 19. Ils ressemblent aux systèmes de surveillance utilisés pendant l'exécution des travaux, mais la fréquence des mesures est différente.

L'exemple d'un plan de surveillance et d'entretien se trouve à l'annexe B.

6.2 Planification de la maintenance et des interventions

6.2.1 Plan de maintenance et d'intervention

L'analyse des résultats de la surveillance et des observations (méthode observationnelle, norme SIA 267) d'une structure porteuse dans le pergélisol sont d'une importance capitale. Si cette analyse révèle que les exigences de construction définies dans la convention d'utilisation et la base du projet ne peuvent pas être remplies en vue de l'utilisation et de la maintenance, il est indispensable d'élaborer un plan de maintenance et d'intervention. Grâce à une surveillance optimale et à des interventions appropriées, la maintenance et l'utilisation d'un ouvrage seront assurées pendant toute la période prévue et sa durée de vie prolongée.

Tab. 18: Systèmes de surveillance pendant et immédiatement après l'exécution des travaux.

Système de surveillance	Objet de surveillance	Exigences spéciales	Fréquence des mesures
Surveillance visuelle	– Fissures, cavités – Glace – Changements en général	Visibilité	quotidienne à hebdomadaire
Mesures automatiques de la température du sol et de l'air	– Evolution de la température des surfaces, des trous de forage et de la structure porteuse	Accessibilité	horaire à quotidienne
Mesures géodésiques	– Déplacements à la surface du terrain	Points fixes stables sur le terrain	hebdomadaire à mensuelle
Scanner laser 3D	– Déplacements du terrain – Grands changements de volume dans le terrain (engendrés par des mouvements de roche, la disparition ou la formation de glace, etc.) – Déplacements des infrastructures	Points de référence mesurés sur le terrain	annuelle
Mesures Inkrex dans le trou de forage	– Soulèvements dans le sol de fondation – Tassements dans le sol de fondation	Tube Inkrex dans le trou de forage	mensuelle
Mesures inclinométriques dans le trou de forage	– Déplacements horizontaux dans le sol de fondation	Tube inclinométrique dans le trou de forage	mensuelle
Mesures extensométriques	– Déplacements horizontaux dans le sol de fondation	Accessibilité	quotidienne à hebdomadaire
Captage des forces	– Compression du sol sous les fondations – Forces d'ancrage	Accessibilité	mensuelle à annuelle
Essai de traction	– Forces d'ancrage	Accessibilité à la tête de l'ancrage	unique

6.2.2 Interventions possibles

Les quelques interventions énumérées ci-après permettent d'améliorer la résistance et l'aptitude au service durant l'utilisation et la maintenance:

- Injection de mortier dans les fissures et fractures
- Installation de micropieux supplémentaires
- Clouage avec armature et revêtement de béton projeté (en terrain meuble et en rocher)
- Clouage ou ancrage (en rocher)
- Reprise en sous-œuvre ou redressement de la fondation
- Installation d'un système de refroidissement actif ou passif
- Installation d'une isolation thermique

Il est également possible de combiner les diverses interventions.

L'essentiel en bref

Le plan de surveillance et d'entretien indique la fréquence des mesures et les cotes d'alerte pendant l'utilisation et la maintenance des ouvrages, il décrit les mesures d'urgence en matière de sécurité et définit les responsabilités.

Des systèmes de surveillance applicables pendant la durée de service de constructions implantées sur le pergélisol sont présentés dans ce chapitre.

Le plan de maintenance et d'intervention définit les interventions permettant d'améliorer la résistance des constructions et leur aptitude au service. Quelques interventions possibles sont mentionnées.

L'exemple d'un plan de surveillance et d'entretien se trouve à l'annexe B

7 Démontage

7.1 Construire en ménageant l'environnement

Le choix des matériaux, le type d'infrastructure et la technique de construction déterminent la qualité des déchets de chantier lors du démontage. Le volume de ces déchets, la possibilité de les valoriser ou de les éliminer, et donc les coûts de démontage, dépendent du volume de matériaux posant le moins possible de problèmes. On évitera dès lors d'utiliser des matériaux composites et des techniques d'assemblages indissociables, des substances et adjuvants problématiques (p. ex. fluidifiants de béton) ainsi que les matériaux contenant des métaux lourds. Si l'on tient compte de ce cycle des matières lors de l'étude du projet, la gestion des déchets de chantier lors d'une transformation ou d'un démontage sera plus facile et meilleur marché.

7.2 Planification et réalisation

Les techniques de démontage et de démolition doivent permettre de trier les déchets dans les règles de l'art et si possible de les valoriser (principe du tri multibennes). D'après la recommandation SIA 430, l'élimination sélective correspond au niveau technique actuel. Ce chapitre traite le contenu d'un plan d'élimination réglant le déroulement du démontage, ainsi que l'élimination et la valorisation des déchets de chantier.

Pendant le démontage d'une construction en haute montagne, les entrepôts sont petits, faute d'espace, ce qui rend une évacuation rapide d'autant plus importante. Les transports seront planifiés soigneusement, car ils peuvent coûter très cher si les lieux sont difficilement accessibles. Par ailleurs, les performances des engins de démolition peuvent être limitées en altitude. Sans compter que les travaux peuvent aussi être retardés par le mauvais temps en été.

Pendant le démontage, une construction peut perdre de son effet stabilisant et les matériaux avoisinants peuvent devenir instables. Afin de garantir la sécurité au travail, on procédera par étapes ou on prendra des mesures de sécurité temporaires.

7.3 Constructions et éléments restants

Pour les constructions ou les éléments qui ne sont pas démontés après l'utilisation, il convient d'examiner les conséquences qu'ils peuvent avoir à long terme. Les éléments porteurs restant dans le sous-sol, comme les tirants, doivent être détendus. Pour les ouvrages de stabilisation des pentes, comme les murs de soutien, on analysera les conséquences d'une défaillance de la structure porteuse.

Si les éléments de construction restants n'ont pas été pollués chimiquement durant l'utilisation (p. ex. par de l'huile, des carburants), on ne peut parler de site pollué au sens de l'Ordonnance sur les sites contaminés (OSites). Néanmoins, un démontage devrait avoir pour but de reconstituer l'état naturel initial et de démonter la majeure partie d'une construction existante. Il faudrait s'abstenir en général d'imperméabiliser une large part de la surface. S'il faut tout de même procéder à cette intervention et ne pas démolir, on créera alors des perforations pour que l'eau puisse circuler de façon naturelle.

7.4 Financement

Le financement d'un démontage devrait être déjà réglementé pendant la procédure d'autorisation de construire et d'exploiter. En créant un fonds qui couvre les coûts de démontage, il sera possible de garantir qu'aucune construction ne restera sur place et que l'état originel sera rétabli.

L'essentiel en bref

Le cycle des matières devrait être pris en compte lors de l'étude du projet déjà. Ainsi, la gestion des déchets lors d'une transformation ou d'un démontage sera facilitée et coûtera moins cher. Il convient d'éviter d'utiliser des matériaux composites et des assemblages indissociables ainsi que des matériaux contenant des métaux lourds.

La séparation et la valorisation des déchets de chantier, tout en ménageant l'environnement, sont réglementées dans le plan d'élimination des déchets. Il convient d'examiner les effets des éléments de construction restant sur place et d'analyser les conséquences, pour les éléments porteurs, d'une défaillance de la structure porteuse.

Le financement d'un démontage devrait être réglementé pendant la procédure d'autorisation de construire et d'exploiter.

Solutions techniques

Ce chapitre présente les principales solutions techniques utilisables pendant la réalisation ou la réfection de constructions sur le pergélisol. Les solutions décrites ici se rapportent aux thèmes suivants:

- Fondation sur des sols instables
- Ancrages dans un sol de fondation aux conditions changeantes
- Excavations compliquées de matrices de blocs, de roche ou de glace
- Prise retardée de matériaux de construction cimentés dans le froid
- Réalisation de constructions dans un sol de fondation riche en glace et très fluant
- Apport indésirable de chaleur dans le sous-sol
- Diminution de la capacité portante du terrain
- Percement et soutènement de galeries et de tunnels

L'analyse de la structure porteuse comprend le dimensionnement, les détails constructifs, les contrôles d'exécution et la surveillance propres à toutes les techniques de constructions décrites dans ce chapitre. Ces techniques doivent être appliquées conformément aux normes SIA qui s'y rapportent.

8 Solutions techniques

8.1 Fondations

8.1.1 Concept de fondation

Le choix d'un système de fondation est influencé, d'une part, par la capacité portante du terrain et le type d'action exercée, comme l'ampleur d'une surcharge ou sa direction et, d'autre part, par les exigences liées à l'aptitude au service d'une construction. Les exigences d'utilisation, comme les tassements admissibles et les déplacements horizontaux d'une construction, sont fixées dans la convention d'utilisation, au chapitre 3. Ces exigences servent de base non seulement au concept de fondation, mais aussi à l'établissement de la base du projet, à la reconnaissance du terrain et à la détermination de la valeur des efforts tranchants à introduire. Le concept de fondation devrait tenir compte des éléments suivants (fondées sur le chap. 2.3):

- Une fondation robuste et fiable, dotée de réserves de sécurité repérables (pas de réserves de sécurité cachées) qui devraient être déduites de scénarios et d'analyses des dangers.
- Une fondation appropriée, rigide ou souple, doit pouvoir être adaptée aux conditions réelles.
- La fondation doit être encastree dans un sol «non remanié» (tenir compte des forces de soulèvement provenant de la couche active).
- Les basculements, fléchissements et fissures pendant l'existence d'une construction ne doivent pas conduire à devoir restreindre son utilisation (aptitude au service).

8.1.2 Fondations superficielles

Les fondations superficielles ont pour but de transmettre les charges dans le sous-sol à proximité de la surface. Elles peuvent revêtir la forme de semelles isolées, de semelles filantes et de radiers. Le choix dépend de la capacité portante du terrain. Lorsque les forces sont concentrées en certains points, on applique des semelles isolées. Lorsque les charges s'exercent principalement sous les parois extérieures et intérieures (charges linéaires), la fondation la plus appropriée est une semelle filante placée sous ces parois. Mais comme elle est sensible aux tassements différentiels, il est alors préférable d'opter pour une structure porteuse rigide. Lorsque des charges importantes s'exercent sur une surface ou que le sol de fondation est de mauvaise qualité, la surcharge est le mieux reprise et répartie par un radier qui permet de reporter les efforts tranchants. La profondeur d'encastrement et la géométrie de la fondation influencent aussi le dimensionnement. La figure 43 présente une semelle filante posée sur un soubassement rocheux pour fonder une cabane de montagne.

Dans le pergélisol, la facilité d'exécution d'une fondation joue aussi un rôle important qu'il convient de prendre en considération. S'il faut excaver profondément pour trouver une roche ferme, la pose d'une semelle filante demande moins de travail et de temps que celle d'un radier, et les coûts de construction sont réduits d'autant.

La fondation devrait empêcher la pénétration de chaleur dans le sous-sol (chap. 8.6), où la fonte de la glace conduit à des pertes de volume pouvant entraîner des tassements différentiels et par conséquent des restrictions d'utilisation de l'ouvrage.

→ Les fondations superficielles seront exécutées conformément au chapitre 8 de la norme SIA 267.



Fig. 43: Semelle filante posée sur un soubassement rocheux pour fonder une cabane de montagne (photo: Architectes Ruch, Meiringen).

8.1.3 Fondations profondes

Il est exceptionnel de devoir établir une fondation profonde dans le pergélisol de montagne. S'il s'agit d'un sol bien résistant proche de la surface, de grosses surcharges peuvent déjà être reprises par une fondation superficielle, facile à réaliser. Les fondations profondes sont généralement exécutées avec des micropieux constitués de tubes perforés à gaine d'acier ou de tiges filetées en acier. Ces micropieux sont principalement sollicités en compression, en compression et cisaillement, et aussi en traction (charge du vent, séisme).

La figure 44 représente schématiquement des modes d'action de fondations sur pieux. L'introduction des charges dans le sous-sol exploite le frottement latéral et la résistance de pointe des pieux, qui déterminent conjointement leur résistance ultime. Dans la couche active, les pieux peuvent subir des forces de soulèvement (efforts de traction) dues aux processus de gel et de dégel. Ces forces peuvent être atténuées en revêtant les pieux d'un géotextile sur toute l'épaisseur de la couche active (fig. 44).

Pour dimensionner un pieu, on tient compte du frottement latéral sur toute la hauteur d'encastrement dans le pergélisol. La géli-adhérence du pieu dans le sous-sol augmente

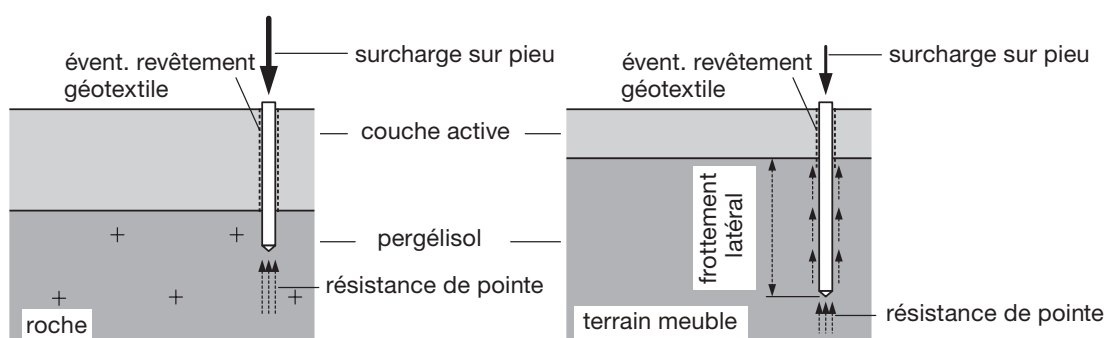


Fig. 44: Représentation schématique des modes d'action de fondations sur pieux; (à gauche) dans la roche, uniquement sur la résistance de pointe; (à droite) dans un terrain meuble, sur la résistance de pointe et sur le frottement latéral.

le frottement latéral. Cette adhérence (résistance à la géli-adhérence) dépend de la température, ce qui doit être pris en compte dans le dimensionnement en fonction de la durée de service prévue. Un système de refroidissement actif ou passif peut maintenir cette adhérence (chap. 8.6.4). Mais un tel système ne peut pas être installé ultérieurement dans les pieux. Il importe d'en être conscient lors du dimensionnement ou de l'installation des pieux. Si aucun revêtement géotextile n'est prévu, les forces de soulèvement seront également intégrées dans le dimensionnement de la fondation sur pieux.

Le temps nécessaire pour qu'un pieu gèle dans le sous-sol dépend de la température du sol, de la teneur en glace et de la composition granulométrique. Des expériences faites dans des sols à grain fin en Alaska et en Russie montrent qu'un pieu est gelé après une semaine environ. Dans le pergélisol de montagne, cette période est généralement plus longue, car les températures du sol y sont plus élevées.

→ Les fondations profondes seront exécutées conformément au chapitre 9 de la norme SIA 267.

8.1.4 Essais de chargement de pieux

Les essais de chargement dynamique des pieux permettent de déterminer la valeur caractéristique de la résistance ultime externe ainsi que le comportement en déformation d'un pieu. Pour obtenir des résultats représentatifs, ces épreuves devraient être réalisées avec des pieux aussi semblables que possible et dans des conditions de mise en place comparables (constitution du sol de fondation, teneur en glace, température de la glace, foreuse). Etant donné que les pieux sont généralement testés peu après leur mise en place, ils ne sont que partiellement gelés. C'est pourquoi ils atteignent leur résistance ultime externe, à court terme, et indiquent les déformations à long terme. Selon la sollicitation à laquelle ils sont soumis, les micropieux devraient aussi subir une épreuve de traction.

→ Les éventuels essais de chargement des pieux seront exécutés conformément au chapitre 5 de la norme SIA 267/1.

8.1.5 Plan de surveillance et d'entretien des fondations

Le plan d'entretien indique les mesures à effectuer, le calendrier à respecter et les responsables de ces tâches. Il détermine également les valeurs d'alarme (p. ex. le déplacement maximum par unité de temps) et décrit les mesures d'urgence en matière de sécurité. Les systèmes de surveillance fournissent des indications sur les mouvements dans le sous-sol. Selon l'aptitude au service exigée, cette surveillance peut s'exercer à l'aide de mesures géodésiques réalisées périodiquement à la surface de l'infrastructure, de mesures d'inclinaison sur la façade du bâtiment ou à la lecture du protocole de la fissuration (voir le chapitre 6). Pour détecter des accélérations de mouvements, il importe d'effectuer des mesures de contrôle périodiques (p. ex. une fois par mois ou par an).

Comme la fondation n'est en général pas accessible, les travaux d'entretien sont difficiles. En concevant une fondation bien adaptée aux conditions locales (chap. 8.1.1), il est possible de réduire ces travaux d'entretien à un minimum pendant toute la durée de vie de la construction. Il est aussi possible d'opter pour un système souple qui peut s'adapter aux mouvements dans le sous-sol (chap. 8.5).

8.2 Ancrages

8.2.1 Concept d'ancrage

Le choix d'un système d'ancrage dans le pergélisol est déterminé par la résistance du sous-sol, le poids des charges à introduire et le risque potentiel d'une défaillance de l'ancrage. L'aptitude au service d'une construction est un facteur important dans ce choix. Les exigences d'utilisation d'une construction sont définies dans la convention d'utilisation présentée au chapitre 3. Ces exigences servent de base non seulement à l'élaboration d'un concept d'ancrage, mais aussi à l'établissement de la base du projet et à la reconnaissance du terrain. Le concept d'ancrage nécessite des considérations semblables à celles émises pour le concept de fondation (basé sur le chap. 2.3):

- Ancrages robustes et fiables, avec des redondances et des emplacements de réserve selon la norme SIA 267
- Ancrages souples et vérifiables, pouvant être adaptés aux conditions effectivement rencontrées
- Corps d'ancrage (longueur des ancrages) positionné dans un pergélisol non remanié
- Ancrages conservant une résistance ultime caractéristique donnée pendant toute la durée d'utilisation de la construction (pas de restriction d'utilisation, aptitude au service).

L'introduction dans la roche de lourdes charges à fort potentiel de dégâts en cas de défaillance, devrait être réalisée à l'aide d'une galerie d'ancrage ou d'un puits d'ancrage et être soumise à une surveillance (fig. 45). En garantissant l'accessibilité aux deux extrémités du tirant (têtes d'ancrage), il sera possible de réaliser des contrôles et des remplace-

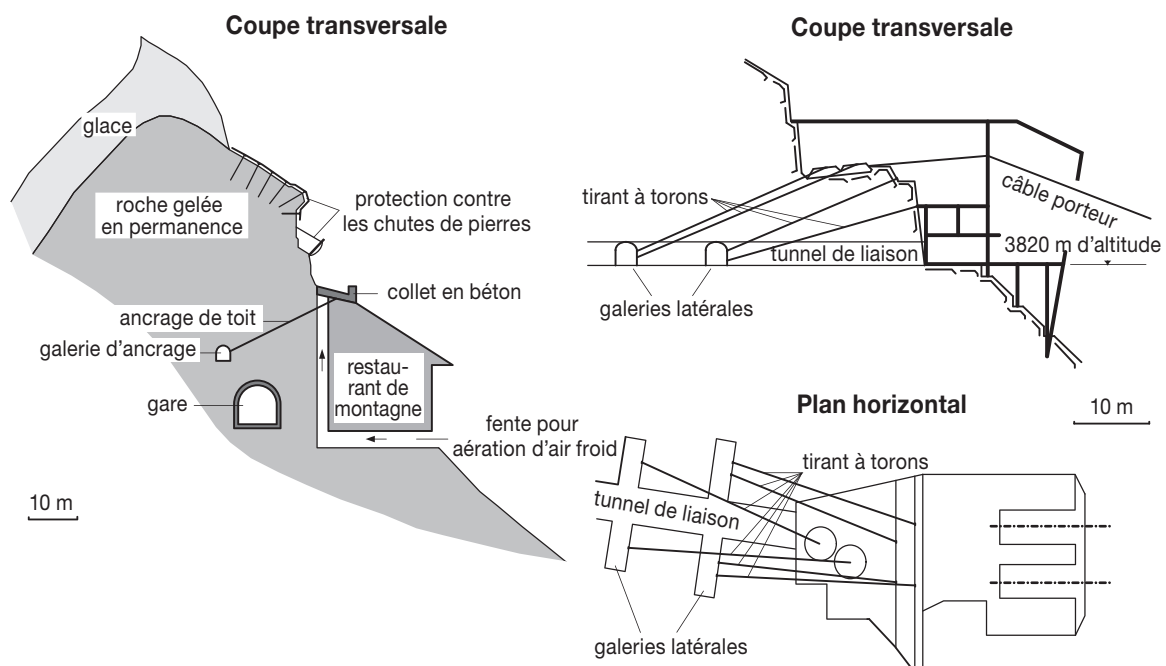


Fig. 45: Représentation schématique de deux ancrages dans une galerie d'ancrage; (à gauche) restaurant de montagne au Jungfrauoch (adapté selon KEUSEN et AMIGUET 1987); (à droite) Petit Cervin, station d'installations à câbles (adapté selon KEUSEN et HAEBERLI 1983).

ments, et d'augmenter ainsi la sécurité. Dans le pergélisol, on évitera si possible d'ancrer de lourdes charges par simple frottement. Les charges moins importantes peuvent être transmises de façon conventionnelle avec un faible potentiel de dommage.

8.2.2 Tirants en rocher et clous

Les ancrages sont des éléments porteurs forés qui sont principalement sollicités en traction. Dans le pergélisol, tout comme dans un sous-sol non gelé, une distinction est établie entre les tirants précontraints (torons ou barres en acier) et les clous ou boulons généralement non contraints (tiges en acier profilées). L'introduction de charges dans le sous-sol est basée sur frottement qui réagit de façon sensible aux modifications dans le sous-sol. Un réchauffement du sous-sol peut réduire la résistance au cisaillement, ce qui diminue la résistance ultime externe d'un ancrage existant et permet le déploiement de forces latérales dans les ancrages. Il peut s'ensuivre une perte de résistance de l'ancrage, des déformations ou une défaillance de la structure porteuse. Lorsqu'on dimensionne l'ancrage d'une construction, il faut donc lui conférer une résistance ultime externe caractéristique qui subsistera durant toute la durée de service fixée dans la convention d'utilisation.

Pour réussir, l'installation d'ancrages exige de l'expérience et un équipement adéquat. Les ancrages d'injection devraient être forés ou reforés, mis en place et injectés le même jour. Il sera ainsi possible d'assurer une parfaite liaison avec le sous-sol et d'éviter que de la glace se forme entre le corps d'ancrage et la paroi du trou foré. On peut aussi chauffer les trous de forage (serpentins de chauffage), ce qui permet de mettre en place et d'injecter plusieurs ancrages le même jour. Le mortier d'ancrage doit être préchauffé et injecté en étant adapté aux températures du trou de forage. Il est techniquement difficile de procéder à une injection complémentaire dans un deuxième système. On en tiendra compte lors du choix du système d'ancrage.

→ Les ancrages seront exécutés conformément aux chapitres 10 et 11 de la norme SIA 267.

8.2.3 Technique de forage

Dans le pergélisol, les travaux de forage sont difficiles, notamment dans un terrain meuble riche en glace. Si l'on utilise un marteau fond de trou et qu'on nettoie à l'air comprimé, les matériaux de forage et la glace fondante se mélangent et forment une masse visqueuse. Cela peut ralentir la progression de la foreuse ou bloquer la tête de forage. Il est donc nécessaire de retirer souvent l'affût et de nettoyer le trou de forage à l'air comprimé. Les matériaux du sous-sol très riches en glace se prêtent mal au forage à l'aide d'un marteau fond de trou. Dans ces conditions, il faut remplacer la tête de forage par un carottier.

Pour améliorer la stabilité du trou de forage dans un terrain meuble pauvre en glace ou dans la couche active, il est avantageux de consolider le trou de forage ou de le tuber. Si l'on procède à un tubage, cela augmente les coûts d'installation et de forage, car le système de forage dépend des forces en action.

8.2.4 Essais de traction

Il faudrait en principe procéder à des essais de traction avant de lancer l'appel d'offres et de choisir les tirants. Ces essais seront réalisés dans des conditions comparables à celles de l'ancrage prévu. Ils permettent de déterminer la résistance ultime externe caractéristique d'un ancrage, sa longueur, la méthode de forage appropriée, le type d'injection et le mortier.

→ Les essais de traction ou de mise en tension seront exécutés conformément aux chapitres 6 et 7 de la norme 267/1.

8.2.5 Plan de surveillance et d'entretien des ancrages

Lors de l'installation des ancrages, il faut absolument établir un plan de surveillance et d'entretien, et vérifier régulièrement ces ancrages (chap. 6). Pour des charges conséquentes, il est recommandé de procéder à une surveillance permanente à l'aide de capteurs de forces et de prévoir des redondances. Ces mesures permettront de réaliser des travaux d'entretien sans réduire la sécurité et sans interrompre la mise en service de l'installation.

8.3 Excavation

8.3.1 Travaux d'excavation

Un sol de fondation riche en glace complique l'exécution des travaux d'excavation. Dans un terrain meuble, il faut s'attendre à trouver des matériaux qui se désagrègent difficilement, comme les gros blocs et les pierres prises dans une matrice de glace. Il est donc parfois nécessaire d'utiliser une pelle mécanique de plus grande dimension (évent. avec une pelle plus étroite) ou un marteau piqueur. S'il faut travailler dans la roche, on peut envisager d'utiliser un marteau-piqueur ou d'excaver à l'explosif, selon le degré de fissuration de la roche. La manière de prendre en compte ces complications dans l'appel d'offres est décrite au chapitre 5.1.1.

Si les travaux d'excavation ont lieu en été, il serait utile de recouvrir les talus de déblais d'un textile non tissé. Cette protection atténuera le réchauffement du pergélisol sous l'effet du rayonnement solaire et des températures élevées; elle empêchera aussi la chute de blocs par le dégel et les instabilités dues aux précipitations. En outre, le textile non tissé sert à protéger les ouvriers contre les pierres qui se détacheraient du talus. Si l'excavation est réalisable en hiver, les basses températures de l'air refroidiront le pergélisol.

8.3.2 Talus

L'angle de pente de l'excavation dans un terrain meuble est déterminé, notamment, par la composition granulométrique, la compacité ainsi que la teneur en glace et en eau du sol de fondation. Les terrains meubles à grain grossier et pauvres en glace peuvent être talutés selon une pente de 1:1 (verticale: horizontale) comme les sols non gelés et les terrains meubles riches en glace selon une pente plus raide, de 3:2 à 2:1. Selon la déclivité et la hauteur du talus, des bermes ou un confortement de la fouille devraient être planifiés. En

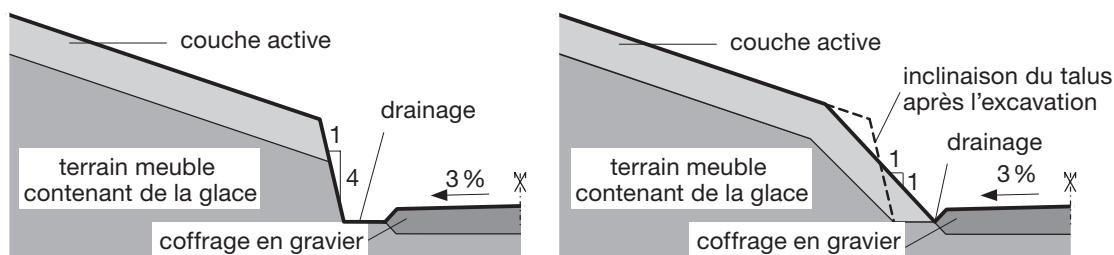


Fig. 46: Evolution naturelle, sur quelques années, de l'inclinaison du talus d'une excavation dans un terrain meuble contenant de la glace et une couche active; (à gauche) coupe transversale directement après l'excavation; (à droite) coupe transversale quelques années plus tard (adapté selon BERG et SMITH 1976).

hiver et pour de courtes durées (< 6 mois, selon l'altitude et l'exposition), on peut généralement aménager des talus plus raides (à court terme, aussi verticalement) qu'en été ou pour de longues durées de travail (> 1 an). En hiver, les basses températures de l'air empêchent les processus de dégel, si bien que les talus restent plus stables

La figure 46 présente schématiquement l'évolution naturelle de la géométrie d'un talus dans un terrain meuble contenant de la glace. L'angle de pente abrupte au début se réduit au fil du temps sous l'effet de fonte de la glace. Il importe de prévoir suffisamment de place au pied du talus pour éviter que des instabilités du terrain empêchent l'utilisation d'une route par exemple.

L'angle de pente ainsi que le confortement de la fouille dans le pergélisol rocheux dépendent de la densité et de la direction des fissures ainsi que de la teneur en glace. Les roches en bon état, présentant peu de fissures et toutes favorablement orientées, peuvent être talutées en pente abrupte et ne nécessitent généralement pas de confortement de fouille ni de bermes. Par contre, les roches très fissurées avec des fissures mal orientées exigent, selon la déclivité et la hauteur du talus, l'aménagement de bermes et un confortement temporaire exécuté à l'aide de béton projeté ou d'un clouage.

→ Les vérifications géotechniques seront réalisées par un ingénieur conformément à la norme SIA 267.

8.4 Matériaux de construction

8.4.1 Mortiers cimentés

Mortiers d'ancrage ou d'injection

Dans le pergélisol, les mortiers d'ancrage ou d'injection traditionnels ne peuvent pas atteindre la résistance requise. Le processus de prise est ralenti, voire empêché par les températures négatives du sol. Et le gel de l'eau peut produire des fissures dans le corps des ancrages, si bien qu'ils ne pourront pas être suffisamment sollicités. Pour obtenir les résistances à la compression exigées, il faut utiliser des techniques de pose et des mortiers d'ancrage spéciaux.

L'Office fédéral de l'environnement OFEV tient une liste de types de mortiers spéciaux pour la construction d'ouvrages paravalanches dans le pergélisol (site web: www.umwelt-

schweiz.ch/typenpruefung). Ces mortiers homologués doivent être utilisés pour tous les projets de paravalanches et d'ouvrages pare-pierres que la Confédération cofinance. Suivant le produit, ces mortiers peuvent être employés jusqu'à une température du sol de -4°C . Dans le pergélisol, il est rare que les températures soient inférieures à ce niveau dans la zone des ancrages.

Le mortier d'ancrage dans le pergélisol devrait être choisi en fonction des températures du sol dans le trou de forage. La température du sol de la construction doit être contrôlée et à consignée avant la mise en place des ancrages et les injections. Les mortiers d'ancrage pour des températures inférieures à 0°C ont une granulométrie un peu plus grossière. Dès lors, le diamètre des tuyaux d'injection devrait être supérieur à 15 mm pour éviter qu'ils se bouchent. Il est recommandé de suivre les indications du fabricant de liant.

Pour activer la prise d'un mortier dans le sous-sol permagélé, l'eau de gâchage doit être préchauffée afin que le mortier mélangé atteigne une température d'environ 20°C . La température de l'eau dépend de celle du mortier sec (dans l'hypothèse d'un rapport de mélange eau/mortier = 0,18). Quelques exemples en sont présentés au tableau 20 ci-dessous.

Tab. 20: Températures nécessaires à l'eau en fonction de la température du mortier sec.

Température du mortier avant de procéder au mélange	Température de préchauffage nécessaire à l'eau
0°C	44°C
4°C	39°C
8°C	34°C
12°C	29°C
16°C	24°C
20°C	20°C

Ces données sont issues de la Directive technique concernant la «Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement» (MARGRETH 2007) (site web: www.umwelt-schweiz.ch/uv-0704-f). Ce manuel contient une description détaillée de l'utilisation des mortiers dans le pergélisol.

On peut aussi activer la prise du mortier en préchauffant le trou de forage avec de l'eau ou des serpentins de chauffage électrique. On ne manquera pas d'évacuer cette eau ou de retirer les serpentins avant de mettre en place l'ancrage et son injection.

8.4.2 Béton

Processus de prise

Les températures négatives de l'air et du sol ralentissent ou empêchent la prise du béton. Dans ces conditions, il risque de ne pas atteindre la résistance à la compression voulue. Le prétraitement et le finissage du béton revêtent donc une grande importance et on prévoira les mesures supplémentaires qui s'imposent. Ces opérations sont les suivantes:

- Installation dans le sous-sol d'une isolation thermique résistant à la compression. Cette isolation placée entre le sous-sol et le corps du béton isole le béton. Elle favorise la prise complète et réduit au minimum l'apport de la chaleur de prise dans le sous-sol.

- Préchauffage des agrégats et de l'eau de gâchage. Les agrégats et l'eau de gâchage doivent être préchauffés avant de mélanger le béton. Cela empêche le béton frais de geler et accélère en même temps le processus de prise. On veillera à ce que la température du béton frais ne tombe pas au-dessous de 5 °C pendant sa mise en place (conformément à la norme SIA 262).
 - Protection contre les températures négatives de l'air. On peut lutter contre les effets des températures négatives de l'air en recouvrant la surface du béton de nattes thermiques ou en chauffant le coffrage. Il convient toutefois d'éviter que cette surface se dessèche, ce qui pourrait provoquer des fissures de retrait.
 - Le temps de transport du béton sur le chantier (p. ex. par camion ou hélicoptère) doit être calculé de façon à ce que le béton soit encore maniable à son arrivée. Il est recommandé de ne pas commencer à bétonner de bonne heure le matin, car les basses températures de l'air sont défavorables à la qualité du béton.
- Le transport, la mise en place et le compactage du béton frais seront exécutés en conformément aux indications de la norme SIA 262 (chiffre 6.4.5).

Chaleur de prise

La chaleur de prise augmente avec la teneur en ciment, l'utilisation de ciment fin et de divers adjuvants. Ce dilemme entre un apport accru de chaleur dans le sous-sol et une meilleure résistance précoce du béton sera pris en compte lors du choix du produit et lors du dimensionnement.

Le ciment Portland de type CEM I dégage 375-525 kJ de chaleur de prise par kilogramme de ciment, ce qui correspond à la chaleur d'hydratation (Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke). Un mètre cube de béton contient quelque 325 kg de ciment, ce qui signifie un apport de chaleur de 120 000 à 170 000 kJ pendant sa prise. Pour éviter que la glace fonde dans le sol de fondation, il importe de séparer thermiquement les fondations en béton du sous-sol (chap. 8.6). Il sera ainsi possible de minimaliser l'apport de chaleur et donc le volume de glace fondue. Pour faire fondre un kilogramme de glace, une énergie de 333 kJ est nécessaire.

La durée du processus de prise dépend de la température ambiante. Les basses températures le ralentissent, les hautes températures l'accélèrent. Sous une température ambiante de 20 °C, 50% à 75% de la chaleur de prise sont libérés après 7 jours. Si des températures ambiantes négatives interrompent la prise avant l'hydratation complète, la chaleur de prise ne peut pas être libérée entièrement (Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke), ce qui nuit à la résistance du béton.

Propriétés

En règle générale, on utilisera du «béton à propriétés spécifiées» (SN EN 206-1). Il est subdivisé en classes d'expositions (SN EN 206-1:2000) selon l'environnement et le type d'intervention auxquels il est soumis. Pour les éléments en béton qui sont en contact direct avec le sol de fondation ou pour ceux qui se trouvent à l'extérieur, on choisit généralement la classe d'exposition XF, (endommagement de la structure du béton sous l'effet du gel), avec ou sans produit de dégel. Cette classe d'exposition prend en compte la pénétration d'eau dans le béton et les effets de gel et de dégel.

Les propriétés du béton adoptées influencent la résistance et se répercutent donc dans le dimensionnement de la structure porteuse. Ces considérations seront prises en compte dans le concept de structure porteuse.

→ En règle générale, les contrôles de qualité du béton seront exécutés conformément à la norme SIA 262/1. Afin de garantir la qualité, des contrôles du béton frais sont obligatoires pour de grands projets, mais ils sont difficilement réalisables pour des objets de moindre importance.

8.4.3 Adjuvants et produits d'injection pour le mortier et le béton

Accélération de la prise

Divers adjuvants et produits d'injection sont utilisés pour influencer la prise et la résistance d'un mortier ou d'un béton cimenté. On applique généralement une grande proportion (400 kg) de ciment fin de haute qualité, qui développe rapidement une forte résistance. On y ajoute souvent un accélérateur de prise qui augmente encore la chaleur produite. Cet apport de chaleur dans le sous-sol peut conduire à une dégradation locale du pergélisol.

Réduction du retrait

Les agents réducteurs de retrait ont pour effet d'augmenter le volume du mortier de 1 à 2 %. Cela permet de freiner la réduction par séchage du mortier. En règle générale, l'armature minimale posée dans les fissures se conforme à la norme SIA 262.

Fluidité

La fluidité d'un mortier indique la distance qu'il peut parcourir dans une fissure ou une fente de rocher. Cette distance est mesurée par l'aptitude à l'étalement du mortier et elle est influencée par des adjuvants, comme un fluidifiant ou produit thixotrope. Un mortier d'injection thixotrope réduit la quantité de mortier nécessaire car il empêche le produit de remplissage de s'écouler dans des fentes ou des fissures.

Résistance au gel

La résistance au gel du béton peut être atteinte à l'aide de deux approches différentes. La première prévoit de fabriquer le béton en abaissant la valeur E/C (proportion d'eau par rapport au ciment). Ici, la proportion d'eau peut être encore abaissée en y mélangeant un fluidifiant. La deuxième approche consiste à augmenter la teneur en air interstitiel. Il faut pour cela ajouter un agent d'occlusion dans une proportion de ≥ 3 % du poids du liant. Si l'on veut maintenir une résistance élevée au gel, la teneur en air interstitiel devrait se situer entre 6 et 10 % dans le béton frais. L'expérience montre que pour résister sans dommage à un gel unique, le béton doit atteindre une résistance de l'ordre de 10 N mm^{-2} . Il convient d'atteindre une telle résistance au gel le plus rapidement possible.

→ La résistance au gel sera vérifiée conformément à la norme SIA 262/1, annexe C:
Résistance au gel en présence de sels de déverglaçage

L'utilisation d'un produit anti-gel accélère le processus de prise d'environ une heure. Pour obtenir la résistance au gel souhaitée, on appliquera les approches décrites ci-dessus. Un anti-gel ne peut garantir la résistance au gel, mais il contribue tout de même à accélérer le processus de prise et à réduire des dégâts du gel.

→ Pour les adjuvants au mortier et au béton, les normes SN EN 934-1 à SN EN 934-6 sont généralement applicables.

8.4.4 Matériaux résistant au gel

Pour atténuer au mieux les actions exercées sur la structure porteuse par les soulèvements et les tassements provenant du sol de fondation, il faudrait utiliser des matériaux de remplissage résistant au gel. Cette résistance au gel est particulièrement importante pour les matériaux de remblayage d'une excavation, d'un lit de compensation ou d'un remplacement de matériaux sous la fondation. Un sol de fondation est considéré comme résistant au gel s'il est constitué de gravier ou de sable propre et d'une granulométrie adéquate (GW ou SW selon le système USCS, Unified Soil Classification System), avec une part de particules fines ($< 0,02$ mm) de $\leq 3\%$ en poids. Si le taux de particules fines dépasse 3% en poids, un test de résistance au gel sera entrepris. Cet examen comprend des essais CBR (California Bering Ratio), décrits dans les normes SN 670 320 et SN 670 321. Un simple appareil cribleur disponible sur place peut aider à tamiser la part trop élevée de particules fines des matériaux restants.

→ La classification d'un sol de fondation en fonction de sa résistance au gel est définie dans la norme SN 670 140b. Cette norme indique la profondeur maximale de pénétration du gel à respecter.

8.4.5 Matériaux de construction adéquats

La structure porteuse de constructions sur le pergélisol est généralement constituée d'une fondation en béton armé et d'une superstructure en acier, en bois, en béton armé ou en maçonnerie. Grâce au mode de construction souple du béton armé, les fondations peuvent localement être solidement reliées au sous-sol. Si l'on utilise des matériaux résistant au gel et qu'on applique un enrobage minimal sur l'armature conformément à la norme SIA 262, on peut aussi attendre une bonne résistance aux intempéries. C'est la raison pour laquelle le béton armé est un matériau adéquat pour établir les fondations de constructions sur pergélisol. Pour la superstructure, les poutres en acier galvanisé, le bois, le béton armé ou les maçonneries en pierre ont fait leurs preuves.

Les fondations de pylônes soumis à de faibles surcharges (télé-ski, stations météo) sont souvent réalisées avec des plaques en acier. Elles sont particulièrement appropriées dans un sous-sol fluant et riche en glace, comme les glaciers rocheux ou les glaciers, car elles sont facilement remplaçables.

Les coûts de transport des matériaux de construction dépendent des voies d'accès. Une structure porteuse optimisée atténue le propre poids des fondations en béton armé, des ouvrages en maçonnerie ou des constructions en acier, ce qui diminue les coûts de transport et de construction.

8.5 Systèmes souples

Les systèmes de construction et de correction amovibles gagnent en importance, notamment dans les pergélisols riches en glace et très fluants. Les systèmes souples, qui s'adaptent aux mouvements du sous-sol, ou les systèmes réajustables prolongent la durée d'un ouvrage; ils ont déjà été utilisés avec succès pour diverses infrastructures. Mais si le fluage du sous-sol est trop conséquent, il vaudrait mieux envisager de changer de site, d'où l'importance de la prospection.

8.5.1 Pylônes d'installations à câbles couissant latéralement

Certaines infrastructures, comme les pylônes d'installations à câbles, ne tolèrent que de faibles décalages par rapport à leur axe, sinon le guidage du câble n'est plus assuré correctement. Un petit tassement différentiel affectant la fondation d'un pylône peut faire dévier considérablement son sommet, au risque que le câble déraile ou se décroche. C'est pourquoi ces tassements nécessitent souvent une réfection des fondations (reprise en sous-œuvre, pose de plaques d'acier). Par contre, les pylônes capables de coulisser latéralement peuvent être réajustés en cas de déformation par fluage ou de déplacement de la fondation perpendiculairement à l'axe du câble. Certains domaines skiables autrichiens sont déjà équipés systématiquement de tels pylônes. Ils sont appliqués dans des pentes en reptation ou en glissement, sur la base d'expertises géologiques. Le pied des pylônes pourra coulisser dans une, deux ou trois directions, selon les mécanismes de déplacement attendus.

La figure 47 présente deux configurations de pylônes couissant latéralement. Dans la photo de gauche, on voit des rails d'acier zingués 1) qui sont encastrés dans le socle en béton et reliés à son armature. La marge de réajustement, qui va de plusieurs centimètres à quelques décimètres, est donnée par la longueur des rails. L'inconvénient de cette configuration est qu'il est difficile de contrôler la protection anticorrosion (eau stagnant dans les rails) à la jonction des rails et de l'armature. Comme la liaison se trouve à l'intérieur du socle en béton, le contrôle est très laborieux.

La configuration de droite sur la figure 47 est un peu plus sophistiquée: pour réajuster le pylône, on déplace la poutre en acier galvanisé 2) sur la plaque en acier 4) à l'intérieur du cadre en acier 3). Les avantages par rapport à la variante de gauche sont que la protection anticorrosion est plus facile à contrôler sur tous les éléments et que la marge de réajustement est nettement supérieure (échelle du mètre). Sur la photo de droite, on voit bien dans quelle direction les déplacements sont attendus: le pied du pylône est placé tout à gauche, ce qui permet d'exploiter toute la largeur du socle vers la droite pour le repositionner.



Fig. 47: Deux variantes de construction de pylônes couissant latéralement, (à gauche) rails en acier, (à droite) plaques en acier (photo: Office fédéral des transports, OFT, Berne).

Pour choisir judicieusement l'emplacement d'un pylône d'installation à câbles, il faut, le cas échéant, mesurer les déformations de la pente ou estimer la direction principale de déformation sur la base de la géologie et de la déclivité. Une fondation de pylône neuve devrait être décalée par rapport à l'axe de l'installation, du côté opposé à la direction principale de déformation. La durée de l'ouvrage en sera prolongée et les coûts de maintenance réduits.

8.5.2 Système d'appui tripode

Un appui tripode est un système statique. Ne reportant pas les efforts tranchants, il ne génère aucune sollicitation supplémentaire susceptible de provoquer des déformations, des fissures, voire une destruction de la structure porteuse dans le pire des cas. Le poids propre de l'infrastructure et les charges qu'elle supporte sont transmises sous la forme de charges ponctuelles par l'intermédiaire de trois semelles isolées. Ces charges ponctuelles (fig. 48, à gauche) ne peuvent être reprises que par un sol de fondation résistant. Les fondations doivent être dimensionnées de manière à pouvoir reprendre ces charges élevées. Un radier, une fondation profonde ou un renforcement du sol de fondation seront éventuellement nécessaires (chap. 8.1 ou 8.7). Les tassements peuvent être compensés en soulevant la structure porteuse avec des presses hydrauliques et en intercalant des plaques en acier (fig. 48, à droite).

La figure 49 présente un autre système d'appui tripode. La structure porteuse de la station intermédiaire d'un télésiège est constituée d'une poutre en béton en «T». Les deux appuis amont et l'appui aval sont fondés sur deux radiers distincts et indépendants. Ces trois appuis sont disposés horizontalement pour permettre de déplacer l'ensemble de la station. Lorsque l'installation est en service, seuls les deux appuis amont sont maintenus à l'horizontale. Ainsi, l'appui aval est libre dans le plan horizontal, ce qui permet à la plaque de fondation aval de se mouvoir indépendamment du reste de la structure. La poutre est déplacée ou soulevée à l'aide de presses hydrauliques. Lorsqu'ils sont délestés, les appuis peuvent être corrigés en fonction des déplacements qui se sont produits (PHILLIPS *et al.* 2007).



Fig. 48: (à gauche) Système d'appui tripode d'une construction en acier sur une semelle isolée en béton; (à droite) correction d'un tassement à l'aide d'une presse hydraulique et pose de plaques en acier (photos: Markus Walser, Ischgl).

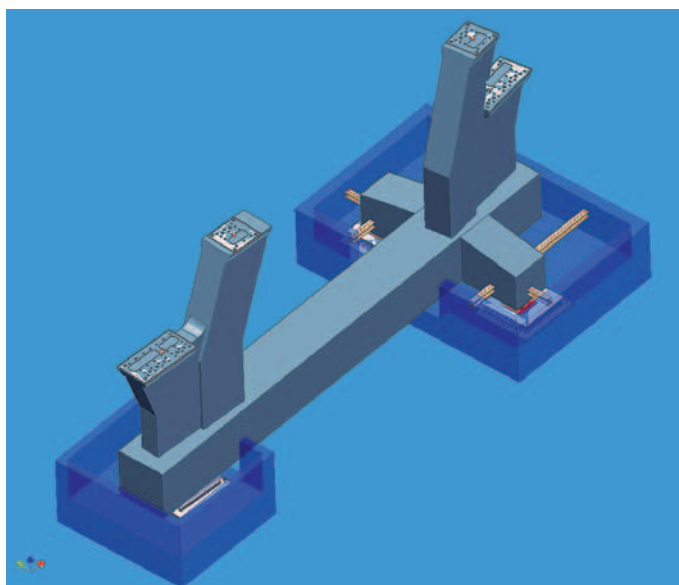


Fig. 49: Système d'appui tripode de la station intermédiaire d'une installation à câbles avec supports, poutres en T et caisson de fondation (© Leitner AG, PHILLIPS *et al.* 2007).

8.5.3 Ouvrages paravalanches

Pour tenir compte des mouvements de reptation d'ouvrages paravalanches ancrés dans le pergélisol, les ouvrages ne doivent pas être liés rigidement au sous-sol. Les filets à neige munis de piliers articulés posés sur une plaque de base en acier répondent à ces conditions et font partie des ouvrages paravalanches homologués par l'OFEV (site web: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung). Ces ouvrages se déplacent au gré des déformations par fluage du sous-sol et ils peuvent être réadaptés si leur géométrie se modifie (fig. 50).

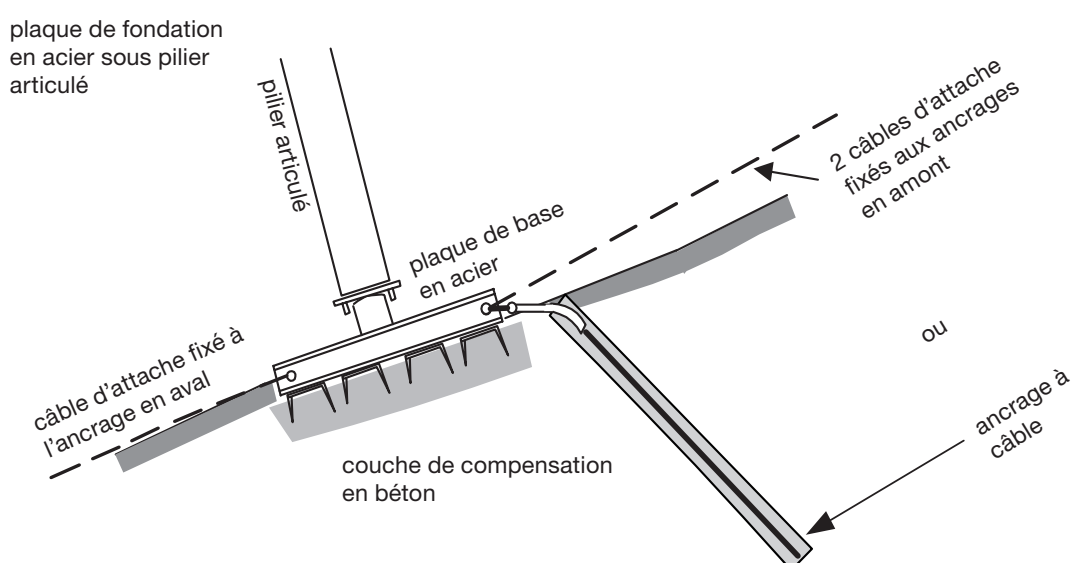


Figure 50: Ouvrage paravalanche, fondation sous les piliers articulés dans des conditions de pergélisol fluant (extrait de la Directive technique concernant la «Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement» MARGRETH 2007).

Dans un pergélisol stable, donc non fluant (principalement la roche), tous les ouvrages figurant sur la liste des types de paravalanches de l'OFEV (site web: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung) peuvent être exécutés. Les divers taux de reptation et les ouvrages réalisables dans ce contexte sont présentés au chapitre 7 de la Directive technique concernant la «Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement» (diffusion: OFEV, Office fédéral de l'environnement, Documentation, Berne). L'analyse de la structure porteuse, le dimensionnement, la construction, les contrôles d'exécution et la surveillance des paravalanches seront réalisés conformément à cette Directive.

8.5.4 Conduites d'eau

Pour prévenir les dégâts dus au gel, les conduites d'eau dans le pergélisol ou dans la couche active devraient être revêtues de matériaux résistant au gel et posées sur une fondation (chap. 8.4.4, Matériaux résistant au gel). On tiendra généralement compte de la profondeur maximale de pénétration du gel indiquée dans la norme SN 670 140b. Les joints des conduites devraient pouvoir se dilater en longueur sur plusieurs centimètres afin de compenser les mouvements. Les contrôles seront facilités si l'on installe des puits munis d'un couvercle avec isolation thermique à des distances régulières le long de la conduite.

Pour éviter les dégâts dus à l'englacement dans les conduites d'eau, l'eau usée chauffée devrait être vidangée par vagues et les conduites d'amenée d'eau potable ou d'eau pour canons à neige vidées et ventilées avec de l'air sec après utilisation. Des conduites d'eau souples sont présentées à la figure 51.



Fig. 51: Deux exemples de conduites d'eau souples; (à gauche) raccord souple utilisable à l'intérieur d'un bâtiment; (à droite) conduite d'eau souple suspendue au-dessus du sol.

8.6 Atténuation de l'apport de chaleur dans le sous-sol

8.6.1 Isolation contre la chaleur

Pour réduire au mieux l'apport de chaleur issue de la chaleur de prise, de locaux chauffés, de conduites d'eau, ou d'appareils et machines produisant de la chaleur, il convient d'installer une couche isolante entre les éléments structuraux en question et le sous-sol permagelé (fig. 52e). Les caractéristiques de résistance d'un isolant dépendent de la contrainte, c'est-à-dire de l'action exercée sur le sol. On utilise souvent un polystyrène extrudé ou un verre-mousse (en plaques ou concassé), car ces isolants présentent une forte résistance à la compression. Par contre, le polystyrène expansé, le polyuréthane, la laine de roche ou la laine de verre ne devraient pas être utilisés dans le sous-sol car ils ne disposent pas des résistances à la compression exigées ou ils perdent de leurs propriétés thermiques s'ils sont en contact avec de l'humidité.

Les caractéristiques des matériaux figurant au tableau 21 représentent des moyennes. Les valeurs exactes sont données par les fabricants de ces matériaux isolants.

Tab. 21: Conductivité thermique et résistance à la compression des matériaux isolants. * Charge permanente sous $\leq 2\%$ de compression après 50 ans.

Matériaux isolants	Conductivité thermique [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Résistance à la compression [kPa] (1 kPa = 1 kNm ⁻²)
Polystyrène expansé, mousse rigide	0,032–0,040	10–60*
Polystyrène extrudé	0,032–0,040	60–250*
Verre-mousse (en plaques ou concassé)	0,045–0,090	200–680, selon la marque
Gravier	0,520	300–700, selon le degré de compaction
Air	0,025	–

Une isolation thermique ne peut que réduire le flux de chaleur, mais pas l'empêcher. Les flux de chaleur, si minimes soient-ils, peuvent occasionner des dégâts à long terme. L'isolation durable contre la chaleur n'est réalisable qu'à l'aide d'un refroidissement actif ou passif.

8.6.2 Isolation contre le froid

Certains bâtiments, comme les patinoires, peuvent refroidir le sous-sol à un tel point qu'il arrive que du pergélisol se forme en basse altitude. Dans une patinoire, l'apport de froid dans le sous-sol devrait être minimisé. Pour produire de la glace, la dalle de glace d'une patinoire doit être refroidie à moins 10 °C. Sous l'effet du froid introduit dans le sous-sol sur plusieurs années, du pergélisol peut s'y former. Des soulèvements s'ensuivent à cause de l'augmentation du volume d'eau gelée sous la dalle, compromettant ainsi l'utilisation de la patinoire. C'est pour cela qu'il faudrait poser, sous la dalle de glace d'une patinoire, une isolation résistant à la compression, elle-même posée sur une couche de gravier résistant au gel. L'isolation permet à la fois d'épargner l'énergie dépensée pour le refroidissement et de minimiser l'apport de froid dans le sous-sol. La couche de gravier résistant au gel homogénéise le sol de fondation et interrompt la formation de pergélisol ainsi que les soulèvements qui en résultent.

8.6.3 Mesures de construction

Espace d'air / espace vide

Divers travaux de construction permettent de protéger le pergélisol du réchauffement provoqué notamment par des locaux chauffés, des appareils ou des machines produisant de la chaleur. Un espace vide entre l'infrastructure chauffée et le sous-sol ou la paroi rocheuse contribue à réduire l'apport de chaleur dans le pergélisol (fig. 56a, b). Cet effet est renforcé par une libre circulation d'air. L'ombre du bâtiment projetée à la surface du terrain favorise aussi le maintien du pergélisol.

Caves

Les caves ne devraient si possible pas être chauffées et ne contenir aucun appareil produisant de la chaleur (fig. 56d). De tels locaux ne peuvent être destinés à une autre utilisation (chauffage, appareils produisant de la chaleur) que si l'on procède aux travaux de construction nécessaires (installation d'une isolation thermique).

Eaux usées

Les eaux usées provenant des cuisines et des WC produisent de la chaleur dans les fosses septiques. L'apport de chaleur dans le sous-sol peut être considérablement réduit par certaines installations, comme une isolation thermique de la fosse septique ou l'utilisation de toilettes sèches (toilettes à séparation gravitaire, toilettes sous vide).

8.6.4 Systèmes de refroidissement actif ou passif

La température du sous-sol peut être influencée par des systèmes de refroidissement. Ils ont pour but de stabiliser ou de réduire l'épaisseur de la couche active afin que le sol de fondation ne perde pas de sa résistance et qu'aucun soulèvement ne se produise. Les systèmes de refroidissement actif nécessitent un supplément d'énergie, ce qui n'est pas le cas des systèmes passifs, qui ne contiennent pas d'éléments actionnés mécaniquement. Les systèmes les plus courants, leur mode de fonctionnement et leur domaine d'application sont présentés au tableau 22 et à la figure 52. Les systèmes tels que les pieux réfrigérés ou les thermosiphons (fig. 53) sont encore peu utilisés dans le pergélisol de montagne.

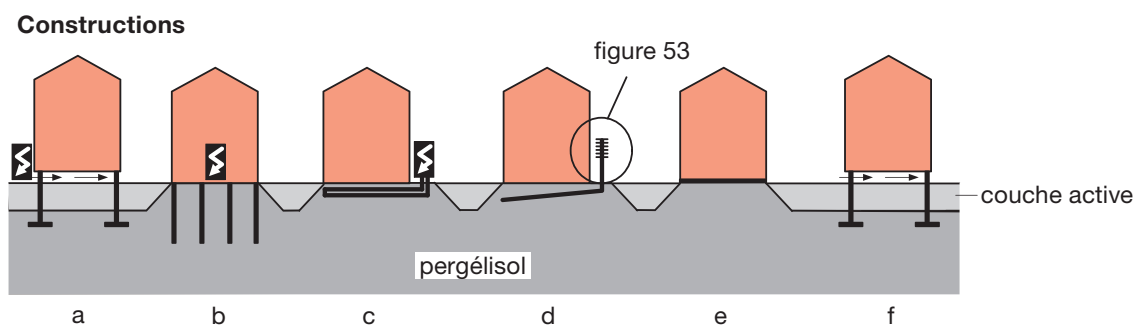


Fig. 52: Représentation schématique de systèmes de refroidissement actif et de refroidissement passif. Refroidissement actif: a) ventilation forcée, b) pieux réfrigérés, c) refroidissement artificiel, congélation à l'aide de liquides. Refroidissement passif: d) thermosiphon, e) isolation thermique, f) espace d'air (adapté selon ARENSON *et al.* 2009).

Tab. 22: Systèmes de refroidissement, modes de fonctionnement et domaine d'utilisation.

Systèmes de refroidissement actif	Mode de fonctionnement	Domaine d'utilisation
Ventilation forcée, figure 52 (a)	Des tuyaux ou des fentes d'aération sont aménagés dans un coffre de gravier posé sous la fondation et l'air chaud de l'intérieur est échangé avec l'air froid de l'extérieur à l'aide d'une ventilation active.	Sous fondations superficielles isolantes, routes, conduites d'eau. Variante: deuxième couche d'isolation thermique sous le coffre de gravier.
Pieux réfrigérés, figure 52 (b)	Une conduite fixée au pieu et contenant un liquide qui refroidit le sous-sol ou conserve le pergélisol. Variante: aération forcée à l'intérieur du pieu.	Pieux préfabriqués en acier ou en béton servant de fondations profondes. Variante: pieu constitué d'un tube à gaine d'acier servant de fondation profonde.
Refroidissement artificiel, congélation, figure 52 (c)	Système de conduite horizontale ou verticale avec liquide qui refroidit le sous-sol ou conserve le pergélisol.	Sous fondations, plaques de sol, routes, conduites d'eau qui présentent de hautes exigences concernant l'aptitude au service.
Systèmes de refroidissement passif		
Thermosiphon, pieu réfrigéré, figures 52 (d) et 53	Système de pompage de gaz ou de liquide à une ou deux phases, dans les tubes ou les pieux, et qui extrait la chaleur du sous-sol par un procédé de circulation et de convection.	Sous fondations superficielles isolées contre la chaleur, routes, conduites d'eau.
Isolation calorifique, figure 52 (e)	L'apport de chaleur dans le sous-sol et la remontée d'humidité sont réduits par un matériau contenant des pores remplis de gaz.	Sous fondations, plaques de sol, conduites d'eau. La fente d'air est aussi réalisable entre les parois extérieures et la roche.
Espace d'air, figure 52 (f)	L'infrastructure est construite à 1 m au moins au-dessus du sous-sol. L'espace d'air empêche l'apport de chaleur dans le sous-sol et contribue au maintien du pergélisol.	Sous fondations, plaques de sol, conduites d'eau. La fente d'air est aussi réalisable entre les parois extérieures et la roche.

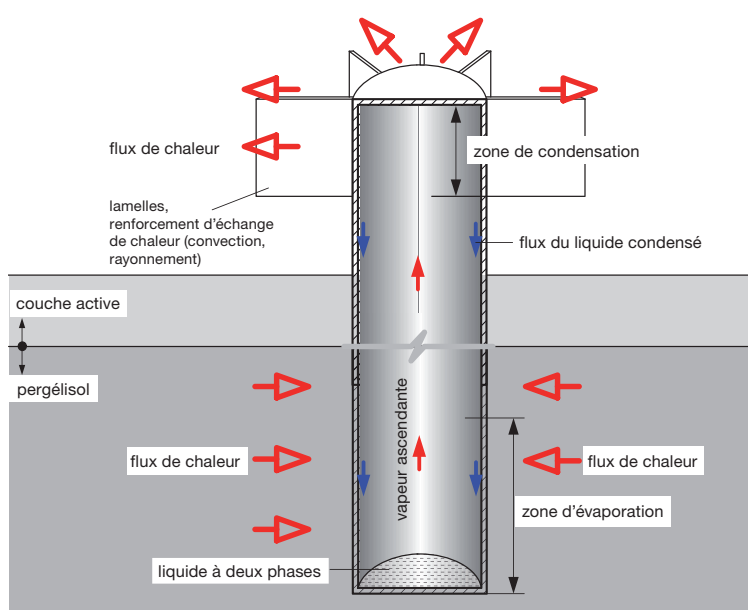


Figure 53: Représentation schématique (coupe transversale) d'un thermosiphon à deux phases (diamètre du tube entre 2 et 20 cm).

Il est recommandé d'évaluer le mode d'action de ces systèmes avant la réalisation. Dans la plupart des cas, on utilise à cet effet un modèle thermodynamique basé sur un programme de calcul (modèle numérique) des éléments finis (EF). Ce programme permet de modéliser le cycle thermique et le mode d'action du système de refroidissement dans le sous-sol, ce qui contribue à optimiser le dimensionnement.

8.6.5 Récolte d'eau de pluie et de fonte des neiges

Il convient en général d'éviter que de l'eau s'accumule autour d'un bâtiment, car elle induit de la chaleur dans le sous-sol. L'eau de pluie et de fonte des neiges s'écoulant sur le toit d'une construction devrait être récoltée, contrôlée et réinfiltrée à une distance suffisamment éloignée de l'objet pour éviter toute instabilité consécutive à une dégradation du pergélisol. En haute montagne, cette eau est souvent collectée et traitée pour en faire de l'eau potable.

8.6.6 Modification de la surface du sol de fondation

Recouvrement du sol par un textile non tissé

Le recouvrement temporaire du sol par un textile non tissé blanc (feutre) et isolant diminue l'apport de chaleur dans le sous-sol et freine le processus de fonte de la neige et de la glace. Le textile non tissé protège le sous-sol du rayonnement direct du soleil et des hautes températures, ce qui atténue le réchauffement et conserve ainsi le pergélisol. Cette nappe de protection devrait présenter une certaine résistance à la rupture et aux intempéries (comme un textile non tissé pour le recouvrement des glaciers $> 25 \text{ kN m}^{-2}$) afin de faire face aux diverses influences climatiques et aux chutes de pierres de moindre importance.

Remblaiement avec des matériaux à gros blocs

Un remblaiement de la surface du sol avec des matériaux à gros blocs conserve le pergélisol. L'air froid entre les blocs s'infiltre dans le sous-sol et refroidit le pergélisol.

Si les matériaux utilisés contiennent de la glace, ils peuvent perdre de leur volume si la glace fond et entraîner des tassements différentiels du remblaiement.

Modification du manteau neigeux

Une modification artificielle du manteau neigeux peut favoriser le maintien du pergélisol. Ainsi est-il possible de compresser la couche de neige autour des infrastructures au printemps, lorsque des machines sont disponibles à proximité des pistes. Cette intervention ciblée permet de refroidir le sous-sol à long terme, car la neige compressée se conserve plus longtemps. Par ailleurs, on peut déblayer la neige autour d'un bâtiment en hiver afin que les basses températures de l'air refroidissent le sous-sol. Ces effets favorisent le maintien du pergélisol.

8.7 Amélioration de la capacité portante du terrain

8.7.1 Remplacement de matériaux

Pour améliorer les conditions de la fondation, on excave les matériaux meubles mal structurés, ainsi que les roches fissurées et brisées, jusqu'à une profondeur où le sol de fondation résiste et on les remplace par un gravier sablonneux bien structuré et résistant au gel (chap. 8.3, fig. 54). Le sous-sol ainsi modifié aide à répartir régulièrement les charges sur un sous-sol non homogène. Les matériaux devraient être compactés par couches ayant une teneur en eau naturelle (la teneur en eau optimale w_{opt} sera déterminée par des essais Proctor (SN 670 3302)). L'épaisseur des couches dépend de la taille du grain maximal et ne devrait pas dépasser 0,50 m. La pose d'armatures en filet ou de géotextiles a pour effet d'augmenter la capacité portante du terrain. Celle-ci peut encore être renforcée par un épandage de ciment qui entraînera la formation d'une structure secondaire.

Sur place, l'examen de la résistance du remblai et des matériaux de remplacement se fait en procédant à un essai de charge à l'aide de plaques ou d'une sonde γ (densité).

8.7.2 Injection et clouage

Les techniques d'injection et de clouage, spécialement utilisées dans les roches fissurées, ont pour but d'améliorer la stabilité globale et la capacité portante du terrain. Après avoir foré un trou vertical, on y introduit une tige (tige filetée) ou un tube à gaine en acier (micro-pieu, fig. 55). A l'aide de tuyaux d'injection, un coulis de ciment est injecté dans le trou de forage, si bien que les fissures et les cavités proches se remplissent. On peut limiter les pertes de mortier s'écoulant dans les fissures en adaptant ses propriétés d'écoulement (chap. 8.4) ou en utilisant des filets d'ancrage. La réduction de la quantité de mortier minimise aussi la chaleur émise dans le sous-sol pendant la prise du mortier. Le remplissage des fissures et des fentes avec du mortier d'injection redonne à la fondation des conditions homogènes. Les tiges en acier ou les tubes à gaine assurent un boulonnage du terrain; ils sont donc à prendre en considération dans la vérification géotechnique.

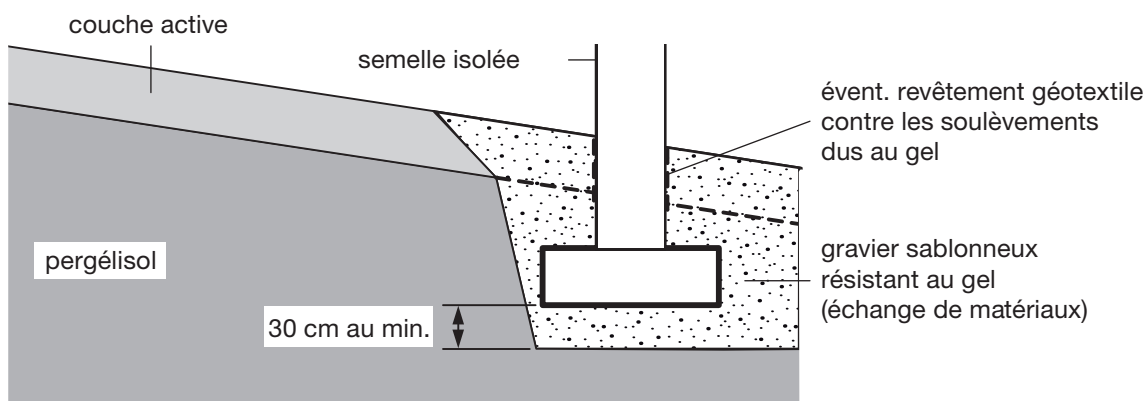


Fig. 54: Coupe transversale schématique d'un sol de fondation gelé en permanence avec remplacement de matériaux sous la semelle isolée afin d'améliorer les conditions de la fondation.

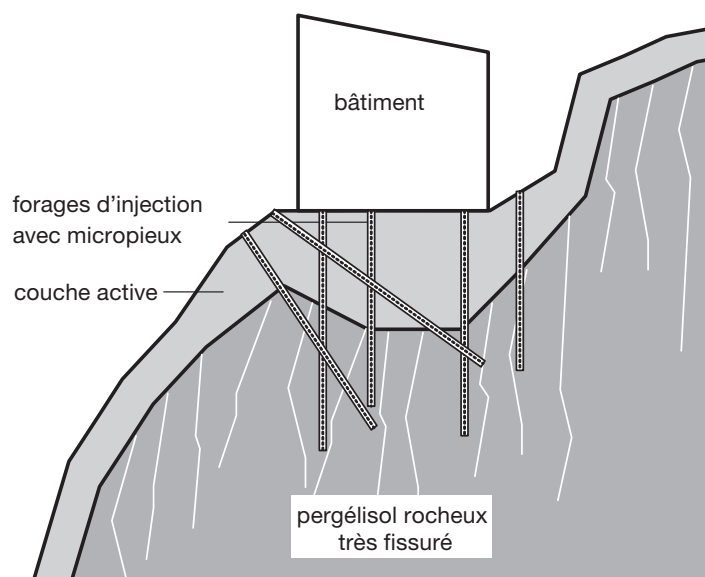


Fig. 55: Coupe transversale schématique d'un pergélisol rocheux fissuré, avec forage d'injection et micropieux pour améliorer la stabilité globale et la capacité portante du terrain.

La même technique est utilisée lors de forages horizontaux ou inclinés. Les tiges filetées ou les tubes à gaine en métal sont appelés tirants en rocher dans ce contexte. Mais le mode d'action et l'objectif de l'application de cette technique restent les mêmes (fig. 55).

8.7.3 Drainage

Il est difficile de poser un drainage efficace dans le pergélisol, car les conduites gèlent rapidement. Pour pouvoir les contrôler, on les équipera de regards de rinçage. Un forage de drainage permet de réduire localement, à court et à moyen terme, les pressions statique et dynamique, ce qui améliore la résistance et la stabilité du sol de fondation.

8.7.4 Procédés de dégellement du pergélisol

Pour améliorer ou homogénéiser la capacité portante du terrain, on peut aussi dégeler le pergélisol. Mais on n'appliquera ce procédé que si le pergélisol n'est présent que par endroits (pergélisol discontinu) et ne contient que peu de glace. Diverses méthodes s'y prêtent, selon le temps dont on dispose. La plus simple consiste à utiliser le rayonnement solaire et les températures élevées de l'air dans une excavation ouverte. Mais cette méthode prend beaucoup de temps. Des expériences faites en Alaska et en Russie ont montré qu'après avoir éliminé la couche végétale, la glace avait fondu à une profondeur de 1 à 4 m en l'espace d'un été (ESCH 2004, TSYTOVICH 1975). Ces profondeurs, dépendantes du site, doivent être confirmées par des études dans le pergélisol de montagne. En principe, il faut s'attendre à ce que la profondeur de dégel y soit inférieure, car la température estivale de l'air est plus basse.

Une méthode plus rapide pour dégeler le pergélisol consiste à creuser un trou de forage afin d'introduire de la chaleur dans le sous-sol. Les trous de forages sont exécutés dans un réseau quadrillé, en fonction des caractéristiques du sous-sol (p. ex. température du sol, teneur en glace). La chaleur peut être transmise dans le sous-sol à l'aide d'eau chaude, de vapeur, d'air chaud, de serpentins de chauffage électrique ou d'aiguilles en acier équipées de spirales de chauffage. En fonction des moyens disponibles sur place, l'une ou l'autre de ces variantes peut être plus efficace pour remplir cette fonction.

8.7.5 Procédés de maintien du pergélisol

L'un des procédés de maintien du pergélisol vise à empêcher l'épaisseur de la couche active et la température du pergélisol de se modifier au cours de la réalisation du projet de construction. Il est ainsi possible d'atténuer certains problèmes, comme les déformations ou les instabilités dues au changement des conditions du sous-sol. On peut aussi réduire les déplacements d'ouvrages en encastrant les éléments porteurs et les composants dans le pergélisol («non remanié»). Une autre intervention possible consiste à empêcher l'apport de chaleur dans le sous-sol ou à le refroidir activement. Ces interventions sont décrites en détail au chapitre 8.6 et au tableau 22. Ces procédés sont représentés à la figure 56. Une combinaison des divers procédés est également réalisable.

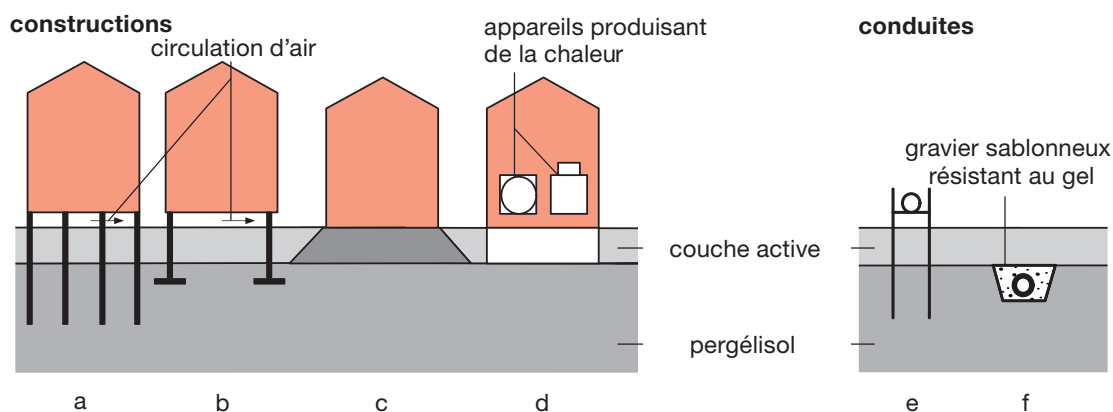


Fig. 56: Représentation schématique de divers procédés de maintien du pergélisol. Le bâtiment est a) surélevé par des pieux, b) surélevé par des semelles isolées, c) fondé sur un remblai (remplacement de matériaux), d) construit sur une cave (cave froide inutilisée). La conduite est e) surélevée par des pieux, f) enterrée et isolée (adapté selon ARENSON *et al.* 2009).

8.8 Galeries et tunnels

8.8.1 Roche stable, pauvre en glace

Dans une roche en bon état, pauvre en glace et contenant peu de fissures remplies de glace, le percement et le soutènement de galeries et de tunnels peuvent s'effectuer comme dans une roche non gelée. Mais les effets des températures négatives de l'air et de la roche sont toutefois à prendre en considération pendant toutes les étapes du projet. Pour conserver le pergélisol, la température moyenne annuelle de l'air dans la galerie ou le tunnel devrait être maintenue au-dessous de 0 °C. Un système de refroidissement actif, comme une aération forcée, peut permettre de maintenir cette température (chap. 8.6). Le minage de roches contenant de la glace et des terrains meubles devrait être mentionné dans l'appel d'offres, car le volume d'explosifs et donc les coûts sont plus élevés.

8.8.2 Roche et terrains meubles instables et riches en glace

Le percement et le soutènement de galeries et de tunnels est problématique lorsque la roche et les terrains meubles sont très fissurés et riches en glace, ou lorsqu'ils contiennent de la glace tempérée ou dégelée ($> -2^{\circ}\text{C}$). Suivant la stabilité des matériaux, le percement, le confortement et le soutènement sont exécutés comme dans un terrain meuble non gelé. Selon la stabilité de la voûte, la stabilité du front d'attaque et la pression de l'eau, on creusera l'ouvrage au bouclier ou à l'aide d'un autre engin en assurant son étanchéité. Les petits tunnels et galeries difficilement accessibles peuvent être creusés à l'explosif et confortés par un dispositif Marciavanti. Cette méthode très souple ne nécessite pas de gros engins de chantier.

L'essentiel en bref

Le chapitre 8 présente des solutions techniques applicables pendant la réalisation ou la réfection de constructions sur pergélisol. Les problèmes principaux et les solutions sont énumérés ci-dessous:

Fondations:

- Problème: Résistance d'un sol de fondation instable
- Solutions: Semelles isolées ou semelles filantes pour un sol de bonne portance (roche), radier ou fondation profonde pour une couche active non résistante et pour de très lourdes charges, mode de construction rigide

Ancrages:

- Problème: Réalisation et sécurité des ancrages dans un sol de fondation soumis à des conditions changeantes
- Solutions: Réalisation exigeant de l'expérience; galeries d'ancrage ou puits d'ancrage pour de lourdes charges liées à un potentiel de dégâts élevés; ancrage par frottement pour des charges moins lourdes et liées à un moindre potentiel de dégâts

Excavation:

- Problème: Excavation difficile de matrices de blocs, de roches et de glace dans un terrain meuble
- Solutions: Utilisation de pelles mécaniques de plus grande dimension, d'un marteau piqueur ou minage à l'explosif
- Problème: Excavation difficile dans les roches fissurées, minage de sols contenant de la glace
- Solutions: Excavation au marteau piqueur ou à l'explosif (quantité accrue de matière explosive)

Matériaux de construction:

- Problèmes: Prise des matériaux cimentés retardée par le froid; chaleur d'hydratation
- Solutions: Activer à l'aide d'adjuvants le processus de prise du mortier et du béton; préchauffer l'eau de gâchage, utiliser du mortier spécial; prendre en compte la chaleur de prise dans le dimensionnement et le choix du produit
- Problèmes: Actions exercées sur la structure porteuse par des soulèvements ou des tassements
- Solution: Utiliser du matériel résistant au gel pour les travaux de remblaiement et le remplacement de matériaux

Systèmes souples:

- Problème: Construire dans un pergélisol riche en glace et très fluant
- Solutions: Installation à câbles dotée de pylônes coulissant latéralement; système d'appui tripode, pas de déplacement d'efforts tranchants, correction des déformations possibles; ouvrages paravalanches, filets à neige avec fondation flottante et piliers articulés sur le pergélisol fluant

Interventions destinées à diminuer l'apport de chaleur dans le sous-sol:

- Problème: Apport de chaleur non souhaité dans le sous-sol
- Solutions: Isolation thermique résistant à la compression entre l'infrastructure chauffée et le sol de fondation; interventions structurales comme les espaces vides ou les caves non chauffées; systèmes de refroidissement actif ou passif; modification de la surface du sol, comme son recouvrement par un textile non tissé, modification du manteau neigeux pour maintenir le pergélisol

Amélioration de la capacité portante du terrain:

- Problème: Résistance amoindrie du sol et de la roche
- Solutions: Homogénéisation du sol de fondation à l'aide d'un remplacement de matériaux; injection de mortier dans la roche fissurée

Galeries et tunnels

- Problème: Réalisation de tunnels et de galeries dans un pergélisol contenant de la glace
- Solutions: Dans la roche et les terrains meubles instables et riches en glace, percement au bouclier ou à l'aide d'un autre engin en assurant l'étanchéité de l'ouvrage; pour les galeries et tunnels difficilement accessibles, avancement à l'explosif avec confortement par un dispositif Marciavanti

Annexes

- A Carte indicative du permafrost, OFEV Office fédéral de l'environnement, 2006
- B Exemple d'un plan de contrôle ou d'un plan de surveillance et d'entretien
- C Définition graphique de l'indice de gel et de dégel
- D Bibliographie
- E Liste des sources

Annexe A

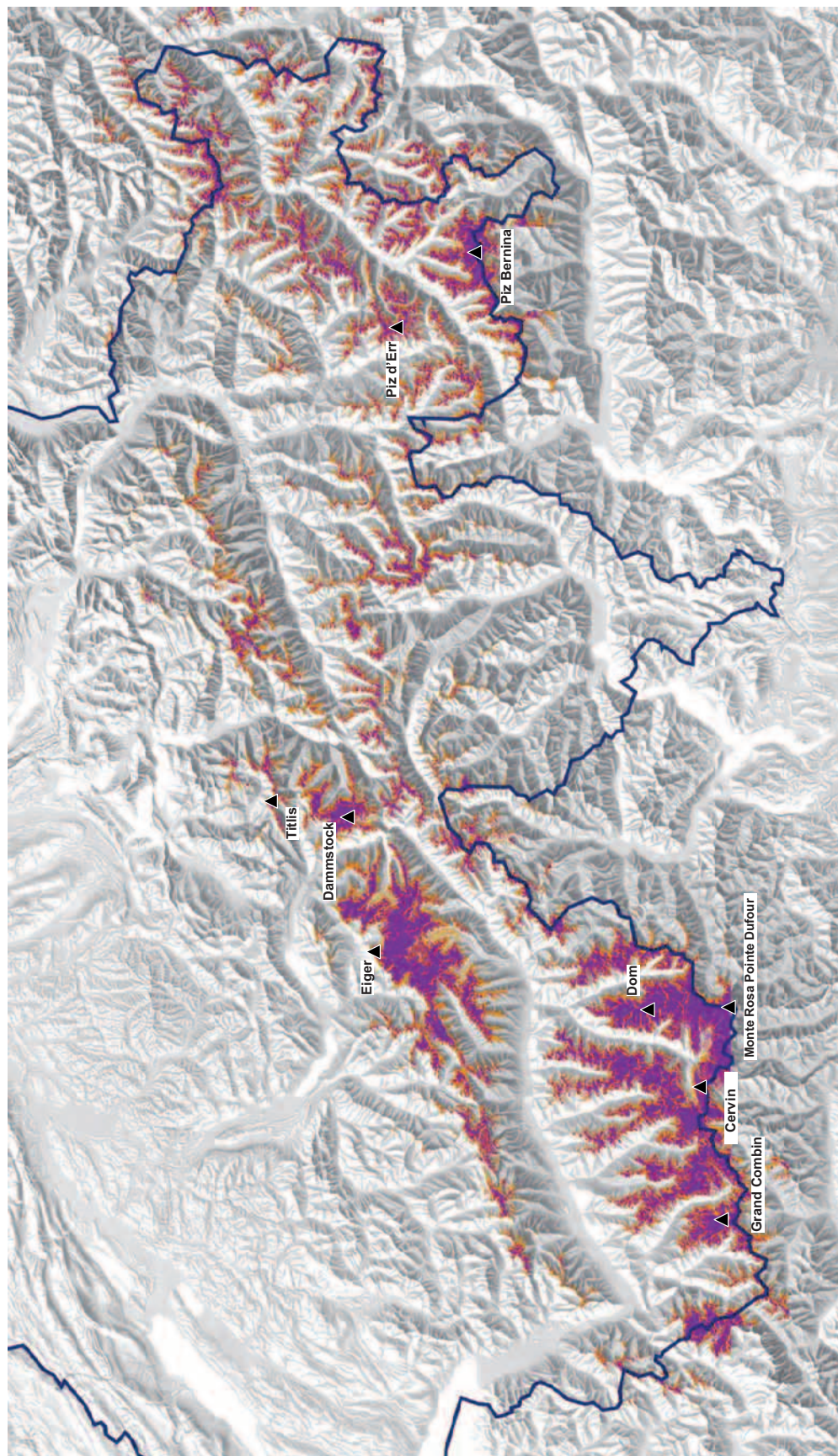
Carte indicative du permafrost en Suisse

Carte indicative du permafrost en Suisse

Évolution du permafrost –modélisations réalisées grâce
au MNT25 (OFEV, juillet 2006)

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Légende:



permafrost possible localement



permafrost probable sur toute la surface

Annexe B

Exemple d'un plan de contrôle ou d'un plan de surveillance et d'entretien (extrait)

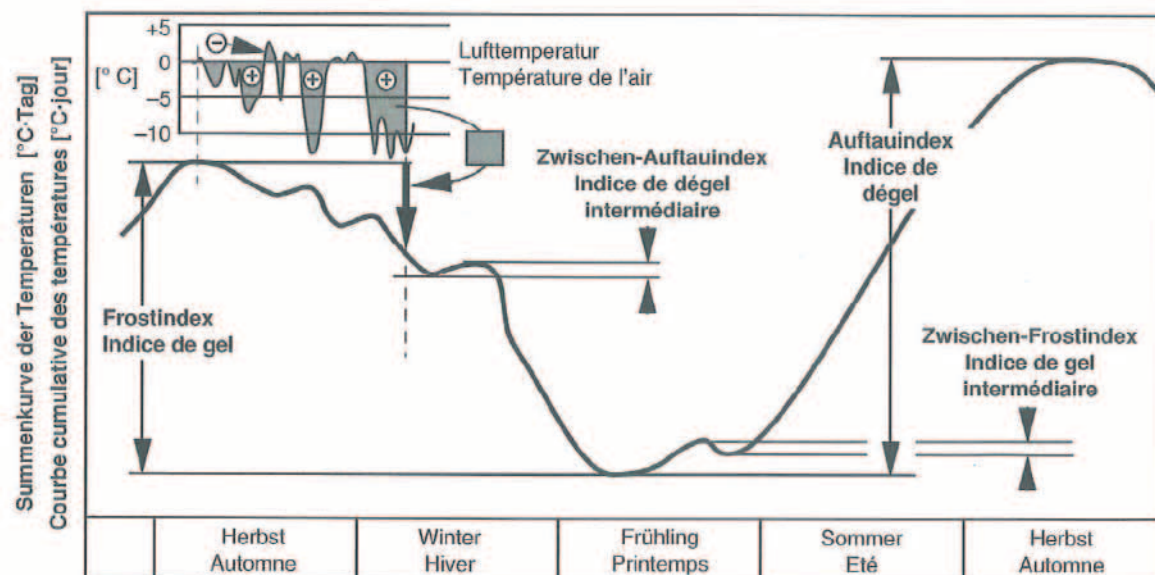
Désignation de l'objetLieu.....Description.....

Objet de contrôle/ Composant	Caractéristique à examiner	Système de surveillance	Fréquence des mesures	Valeur limite / tolérance	Valeur mesurée / atteinte	Date	Responsable des contrôles et des données	Compétences, flux d'informa- tion, données	Consignation
5. Réalisation (excavation)									
Talus	évaluation de l'état, résistance, lentilles de glace visibles, angle de talus, rejets d'eau, recouvrement, etc.	surveillance visuelle	journalière / hebdomadaire					direction des travaux	protocole des mesures
Confortement de la fouille	position de la tête d'ancrage et des clous de fondation	mesures géodésiques inclinomètre, de forage, Inkrex, extensomètre	Hebdomadaire / mensuelle hebdomadaire / mensuelle	10 mm / semaine				direction des travaux	protocole des mesures
Fond de la fosse d'excavation	relevé géologique, homogénéité, fissures, glace visible, compression du sol, température du sol	surveillance visuelle, captage des forces, (plaque de charge), thermomètre	unique					direction des travaux	protocole des mesures
6. Utilisation et maintenance									
Fondation de pylônes ou de piliers, bâtiments	déplacements en hauteur et position (surface) déplacement du sol de fondation	mesures géodésiques inclinomètre, de forage, Inkrex, extensomètre, température du sol	annuelle	10 mm / an				ingénieur / géologue	protocole des mesures
Ancrage	force d'ancrage	captage des forces	mensuelle à annuelle	diminution de la force d'ancrage > 10 % / an				ingénieur / géologue	protocole des mesures

Annexe C

Définition graphique de l'indice de gel et de dégel

Selon la norme SN 670 140b.



Annexe D

Bibliographie

- ANDERSLAND OB, LADANYI B. 2004. Frozen Ground Engineering. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- ARENSEN L. 2002. Unstable Alpine Permafrost: A potentially important natural hazard – Variation of geotechnical behavior with time and temperature. PhD Thesis, ETH, Zurich.
- ARENSEN L, PHILLIPS M, SPRINGMAN SM. 2009. Geotechnical Considerations and Technical Solutions for Infrastructure in Mountain Permafrost. In: MI Krugger and HP Stern (Editors), New Permafrost and Glacier Research.
- ARENSEN L, SPRINGMAN SM, SEGO DC. 2007. The Rheology of Frozen Soils. *Applied Rheology*, 17, 1: 12147–1 – 12147–14.
- BERG R, SMITH M. 1976. Observations along the Pipeline Haul Road between Livengood and the Yukon River, US Army CRREL.
- DAVIES MCR, HAMZA O, HARRIS C. 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 137–144.
- DEERE DU. 1963. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.*: 18.
- DELALOYE R, LAMBIEL C, LUGON R, RAETZO H, STROZZI T. 2007. Typical ERS InSAR signature of slope movements in a periglacial mountain environment (Swiss Alps). ESA (SP-636).
- ESCH DC (Editor). 2004. Thermal analysis, construction and monitoring methods for frozen ground. Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 492 pp.
- GIORGI F, HURRELL JW, MARINUCCI MR. 1997. Elevation dependency of the surface climate change signal: a model study. *Journal of Climate*, 10: 288–296.
- HAEBERLI W. 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialletsch (Graubünden), Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zurich.
- HAEFELI R. 1954. Kriechprobleme im Boden, Schnee und Eis. *Wasser- und Energiewirtschaft* 3: 19.
- HARRIS C, DAVIES MCR, ETZELMÜLLER B. 2001. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 145–156.
- HAUCK C, KNEISEL C. 2008. Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007. Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger: vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4)/deutsche Übersetzung hrsg. von ProClim – Forum for Climate and Global Change, ProClim-, Bern.
- JOHNSTON GH. 1981. Permafrost engineering design and construction. John Wiley & Sons, 540 pp.
- KÄÄB A. 2001. Digitale Fotogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Fotogrammetrie und Fernerkundung* 10: 451–458.
- KEUSEN HR, AMIGUET JL. 1987. Die Neubauten auf dem Jungfrauoch. *Geologie, Felseigenschaften, Permafrost. Schweizer Ingenieur und Architekt* 30–31: 905–906.
- KEUSEN HR, HAEBERLI W. 1983. Site investigation and foundation design aspects of cable car construction in alpine permafrost at the «Chli Matterhorn», Wallis, Swiss Alps, Permafrost Fourth International Conference, pp. 601–604.
- KRUMMENACHER B, BUMANN D. 2004. Handbuch zur lokalen Abschätzung des Permafrostvorkommens im Alpenraum, Geotest.
- MARGRETH S. 2007. Defense structures in avalanche starting zones. Technical Guideline as an aid to enforcement. *Environment in Practice*. FOEN, SLF, Bern and Davos, 134 pp.
- MARINOS V, MARINOS P, HOEK E. 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bull Geol Environ*, 64: 55–65.
- MARTY C, PHILLIPS M, LEHNING M, WILHELM C, BAUDER A. 2009. Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden. *Schweiz Z Forstwes* 160 7: 201–209.
- NOETZLI J, GRUBER S. 2005. Alpiner Permafrost – ein Überblick. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt (München)* 70: 111–121.
- LUETSCHG M, LEHNING M, HAEBERLI W. 2008. A sensitivity study of factors influencing warm / thin permafrost in the Swiss Alps. *Journal of Glaciology* 54: 696–704.

- PERD. 1998. Climate change impacts on permafrost engineering design, Environment Canada.
- PHILLIPS M, LADNER F, MULLER M, SAMBETH U, SORG J, TEYSSEIRE P. 2007. Monitoring and reconstruction of a chairlift midway station in creeping permafrost terrain, Grächen, Swiss Alps. Cold Regions Science and Technology. A Selection of papers presented at the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, Wyoming, September 19–24, 2004, 47, 1–2: 32–42.
- RIEDER U, KEUSEN HR, AMIGUET JL. 1980. Geotechnische Probleme beim Bau der Luftseilbahn Trockener Steg-Klein Matterhorn. Schweizer Ingenieur und Architekt 18: 428–431.
- TSYTOVICH NA. 1975. The mechanics of frozen ground. Scripta Book Company; McGraw-Hill Book Company, 426 pp.
- VONDER MÜHLL D. 1993. Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Unterengadins, Eigenössische Technische Hochschule Zürich, Zurich, 222 pp.
- WATSON GH, SLUSARCHUK WA, ROWLEY RK. 1973. Determination of Some Frozen and Thawed Properties of Permafrost Soils. Canadian Geotechnical Journal, 10, 4: 592–606.
- WILLIAMS PJ. 1967. Properties and behaviour of freezing soils. Oslo.

Annexe E

Liste des sources

Normes suisses

- SN EN 206-1. Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité.
SN EN 934-1 à 6. Adjuvants pour mortier, béton et coulis.
SN EN 1097-5. Détermination de la teneur en eau de granulats par séchage à l'étuve ventilée.
- SN 670 004-1a. Recherches et essais géotechniques – Identification et classification des sols – Partie 1: Identification et description.
SN 670 004-2a. Reconnaissance et essais géotechniques – Dénomination, description et classification des sols – Partie 2: Principes pour une classification.
SN 670 140b. Gel.
SN 670 320. Essai CBR.
SN 670 321. Essai sur les sols – Essai de gonflement au gel et essai CBR après dégel
SN 670 330-2. Méthode d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau (mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques) – compactage proctor.
SN 670 335. Détermination de la masse volumique du sol (pycnomètre, pesage sous immersion).
SN 670 340. Détermination de la teneur en eau des sols.
SN 670 352. Détermination de la résistance à la compression simple (sols).
SN 670 903-5. Détermination de la teneur en eau de granulats par séchage à l'étuve ventilée.

- SIA 260, 2003. Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses
SIA 261, 2003. Actions sur les structures porteuses.
SIA 261/1, 2003. Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires.
SIA 262, 2003. Construction en béton.
SIA 262/1, 2003. Construction en béton – Spécifications complémentaires.
SIA 263, 2003. Construction en acier.
SIA 264, 2003. Construction mixte acier-béton.
SIA 265, 2003. Construction en bois.
SIA 266, 2003. Construction en maçonnerie.
SIA 267, 2003. Géotechnique.
SIA 267/1, 2003. Géotechnique – Spécifications complémentaires
SIA 430 Recommandation, 1993. Elimination des déchets de chantier de construction, de transformation et de démolition

Normes internationales

- ASTM D 2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
ASTM D 2850. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
ASTM D 4767. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
ASTM D 5334-00. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
ASTM D 6032. Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core.

- DIN 18137-3. Sol de fondation, analyse d'échantillons de sol – Détermination de la résistance au cisaillement – Partie 3: Essai de cisaillement direct

Livre spécialisé

- Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke.

Sites web

Office fédéral de topographie swisstopo: www.swisstopo.ch

Office fédéral de l'environnement OFEV, Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement: www.umwelt-schweiz.ch/uv-0704-f

Office fédéral de l'environnement OFEV, Liste des types de mortier spéciaux: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung

Hochschulverlag AG de l'EPF Zurich vdf: www.vdf.ethz.ch

International Permafrost Association IPA (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms: <http://nsidc.org/fgdc/glossary/>

Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse: www.meteoschweiz.ch

Permafrost Monitoring Switzerland Permos: www.permos.ch

Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA: www.sia.ch

Universal Temperature Datenlogger: www.utl.ch

WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Davos: www.slf.ch