



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

Stratégies d'Adaptation pour les infrastructures construites sur le permafrost dans les Alpes Françaises - STAAF -

Rapport d'activité pour la fondation d'entreprise FEREC
Appel à projets 2019 : Résilience et acceptation : quels outils pour les infrastructures ?



UNIVERSITÉ
SAVOIE
MONT BLANC



Dr. Duvillard Pierre-Allain
Laboratoire EDYTEM (CNRS / UNIV. SAVOIE MONT-BLANC)
OCTOBRE 2020

Sommaire

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Résumé | 2 |
| 2 | Contexte et objectifs du projet | 3 |
| 3 | Description des travaux effectués..... | 4 |
| 3.1 | Poursuite d'un inventaire des dommages géotechniques | 4 |
| 3.2 | Analyse des stratégies proactives ou réactives | 4 |
| 3.3 | Méthodes innovante pour le suivi de l'état thermique du permafrost | 4 |
| 4 | Utilisation de l'aide de la FEREC pour le projet | 5 |
| 5 | Principaux résultats obtenus..... | 6 |
| 5.1 | Poursuite de l'augmentation des dommages géotechniques | 6 |
| 5.2 | Des stratégies majoritairement réactives..... | 6 |
| 5.3 | Détection et suivi de l'état thermique du permafrost par méthode indirecte | 7 |
| 6 | Impacts | 11 |
| 6.1 | Apports et retombées pour la collectivité et les gestionnaires..... | 11 |
| 6.2 | Ouverture à l'international..... | 11 |
| 6.3 | Publications et communication des résultats techniques..... | 11 |
| 6.4 | Vulgarisation et diffusion des connaissances auprès du grand public | 12 |
| 7 | Perspectives ouvertes par le projet | 13 |
| 8 | Références..... | 15 |
| 9 | Remerciements | 16 |

1 Résumé

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, la haute montagne alpine est affectée par des changements majeurs tels que retrait glaciaire ou la dégradation du permafrost (réchauffement des terrains gelés en permanence). Cette dernière peut déclencher des mouvements de masses rocheuses à l'origine d'un risque direct de déstabilisation pour les infrastructures présentes en haute montagne (refuges, remontées mécaniques ; Figure 1). Les stratégies d'adaptations sont le plus souvent "réactives" face à des désordres géotechniques qui se multiplient.

Le projet STAAF a consisté à développer les connaissances et à proposer un meilleur suivi des terrains-supports afin d'aider les gestionnaires à favoriser les stratégies proactives (anticipation des futures déstabilisations). Trois axes de travail ont été mis en œuvre pour ce projet : (1) la poursuite d'un inventaire des dommages géotechniques sur les infrastructures construites sur du permafrost, (2) l'analyse des stratégies proactives ou réactives pour les infrastructures les plus à risques dans les Alpes françaises, et (3) l'amélioration/test de nouvelles méthodes pour la détection et le suivi de l'état thermique du permafrost grâce à des méthodes indirectes.

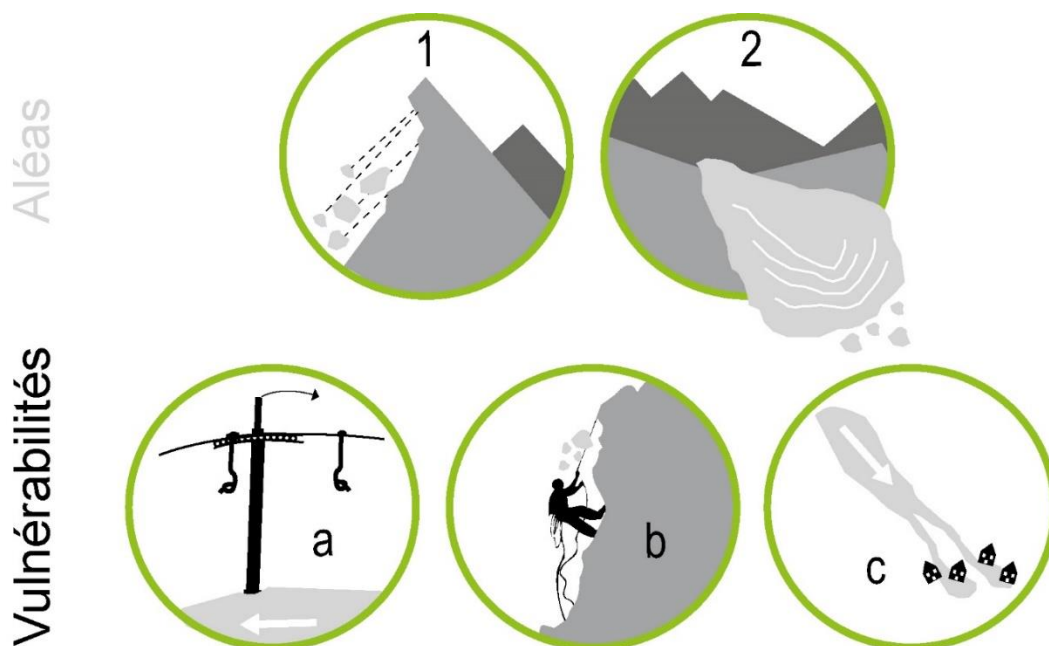


Figure 1 : Types de risques liés aux processus géomorphologiques associés à l'évolution du permafrost alpin (1 - éboulements/écroulements ; 2 - glissements/fluages) : (a) risques directs pour des infrastructures ; (b) risques indirects pour les personnes et les infrastructures situées sur le parcours de masses rocheuses en mouvement ; (c) risques en cascade (chaînes de processus).

2 Contexte et objectifs du projet

Le projet STAAF se situe dans la continuité de différents travaux de recherche portés par les laboratoires EDYTEM et PACTE depuis 15 ans visant à comprendre l'évolution de la stabilité des terrains porteurs d'infrastructures en contexte de permafrost à l'échelle des Alpes françaises : (1) projet MAIF entre 2007 et 2009 ; (2) projet ALCOTRA *PrévRisk Haute Montagne* entre 2016 et 2017, (3) projet FEDER POIA *PermaRisk* de 2017 à 2020, (4) et surtout la thèse CIFRE de PA Duvillard entre 2016 et 2019.

Ce récent travail de thèse a permis de recenser 947 éléments d'infrastructures construites sur le permafrost. Parmi celles-ci, 24 éléments ont été reconnus comme ayant connu des dommages et désordres géotechniques (e.g. affaissement, basculements...) au cours de ces 15 dernières années, entraînant parfois de lourds travaux de confortement ou encore le déplacement ou la reconstruction de l'infrastructure ([Duvillard et al., 2019](#)). Cette étude a montré l'aspect cumulatif et très coûteux (entre 100 K€ et 1 000 K€) de ces travaux, parfois quelques années seulement après la construction de l'infrastructure. Dans certains cas, le déclenchement de l'instabilité est directement lié à des "mauvaises pratiques" de construction ou de maintenance, qui ont accéléré la dégradation du permafrost dans les terrains supports (e.g. [Duvillard et al., 2019](#)).

Afin de mieux anticiper ces problématiques géotechniques et d'éventuelles nouvelles déstabilisations d'infrastructures pouvant entraîner des travaux coûteux souvent accompagnés d'une impossibilité d'exploitation, deux types de stratégies d'adaptation ou d'atténuation peuvent être mises en place par les gestionnaires :

- (1) des stratégies proactives (« capacité de réponse ou d'anticipation ») comme la diminution des transferts de chaleur dans le sol pour préserver le permafrost (e.g. contrôle de l'eau dans le sous-sol, circulation d'air et isolation des fondations), ainsi que la surveillance des mouvements (e.g. à l'aide de fissuromètres ou inclinomètres) et/ou de l'état thermique par des programmes scientifiques ou par des bureaux d'étude ;
- (2) des stratégies réactives (« capacité d'adaptation ») par le biais par exemple de modifications des fondations de l'infrastructure (e.g. légers ajustements, systèmes de consolidation et d'ajustement) ou de renforcement du sol porteur (e.g. forage et pieux, remplacement de matériaux, dégradation artificielle du permafrost).

L'objectif du projet STAAF est centré sur les stratégies proactives afin d'anticiper ces déstabilisations. Trois axes de recherches ont été déployés afin (1) d'analyser les dommages géotechniques récents, (2) de quantifier les stratégies proactives ou réactives, et (3) de proposer des outils innovants pour la détection du permafrost et la modélisation de son évolution.

3 Description des travaux effectués

Les travaux menés à l'occasion du projet STAAF se sont articulés autour de 3 axes :

3.1 Poursuite d'un inventaire des dommages géotechniques

Un travail initial (2016-2018) avait permis d'identifier 12 infrastructures (*i.e.* 24 éléments d'infrastructures) ayant connu des dommages (*e.g.* affaissements, basculements, détérioration des fondations ou ancrages) puis des travaux (*i.e.* ajustements, consolidations ou reconstructions), parfois successifs, au cours des 30 dernières années dans les Alpes françaises ([Duvillard *et al.*, 2019](#)).

Le projet FEREC a permis d'obtenir des informations détaillées sur 4 infrastructures supplémentaires : Funiculaire du Dôme express (Les Deux-Alpes) ; télésiège du Marais (Tignes) ; télécabine de Bochart (Chamonix) ; télécabine du Mont Vallon (Méribel).

3.2 Analyse des stratégies proactives ou réactives

Ce travail a été possible en croisant l'inventaire des dommages géotechniques et les stratégies proactives ou réactives adoptées par les gestionnaires et exploitants. L'objectif de ce travail a été d'évaluer parmi les éléments d'infrastructures caractérisés par un risque fort de déstabilisation, en cas de dégradation du permafrost, les types des stratégies qui ont été mises en place.

En plus d'une synthèse faisant l'objet d'un article scientifique soumis en juin 2020, une note technique a été rédigée afin de discuter les stratégies et préconisations de suivi pour les infrastructures implantées sur permafrost. Cette note technique est une synthèse de guides techniques de construction existants pour les ingénieurs/exploitants sur le permafrost de montagne en Suisse ([Bommer *et al.*, 2010](#)) ou en Arctique ([ENR, 2015](#) ; [CSA, 2019](#)), enrichie par les retours d'expérience (« bonnes ou mauvaises » pratiques) à travers les Alpes françaises.

3.3 Méthodes innovante pour le suivi de l'état thermique du permafrost

L'analyse de l'état thermique du permafrost dans un terrain support est primordiale pour anticiper les éventuelles déstabilisations futures d'infrastructure. Pour ce projet, deux sites aux contextes géomorphologiques différents (paroi rocheuse et formation superficielle) avaient été retenus afin d'analyser la distribution actuelle du permafrost et l'évolution de celui-ci dans le temps : (1) le refuge des Cosmiques (Chamonix) construit sur une arête rocheuse (3613 m d'altitude) et en partie déstabilisé en 1998, et (2) la gare d'arrivée du télésiège de Bellecombes (2 Alpes) implantée dans un glacier rocheux (2710 m).

Pour ce faire, des acquisitions géophysiques ont été réalisées et des données thermiques ont été acquises. Le développement d'un modèle pétrophysique a permis d'analyser de manière quantitative les données géophysiques pour le cas du refuge des Cosmiques ([Duvillard *et al.*, en révision](#)). Dans le cas du télésiège de Bellecombes, une répétition des profils en géophysique acquis en 2007 et 2009 ([Bodin *et al.*, 2010](#)) a été réalisée dans le but d'observer la probable fonte de la glace du permafrost. En complément, des modélisations thermiques ont été réalisées en utilisant le modèle Cryogrid ([Westermann *et al.*, 2013](#)) afin d'observer l'évolution de la couche active sous le refuge des Cosmique grâce à des données acquises à l'aide de capteurs de température de subsurface.

4 Utilisation de l'aide de la FEREC pour le projet

Le budget alloué par la FEREC (30 000 €) a été principalement utilisé pour le financement du contrat post-doctoral de P.-A. Duvillard de mars à novembre 2020 qui a porté le projet et réalisé l'essentiel des travaux de recherche.

Ce contrat de chercheur post-doctorant a été réalisé au sein du laboratoire EDYTEM (CNRS / Univ. Savoie Mont-Blanc) en relation avec l'équipe *Morphodynamiques*.

Au-delà du soutien financier, la fondation FEREC a permis d'afficher un regard pertinent et de faciliter la mise en contact avec des gestionnaires et exploitants d'infrastructures. Une fondation d'entreprise a en effet permis d'affirmer le caractère opérationnel des axes de recherches du projet STAAF. Ainsi, la mise en contact avec la *Compagnie des Alpes* (1^{er} gestionnaires de remontées mécaniques dans les Alpes françaises) a été facilitée par la fondation FEREC.

5 Principaux résultats obtenus

Le projet STAAF a permis d'obtenir des résultats importants pour chacun des trois axes préalablement cités. Les résultats seront ici présentés de manière synthétique. Les publications scientifiques en cours ou rapports techniques cités permettent d'accéder à plus de détails sur la méthodologie et l'interprétation de ces résultats.

5.1 Poursuite de l'augmentation des dommages géotechniques

Les données géotechniques récentes collectées ont permis de compléter la base de données existante. L'augmentation du coût des désordres géotechniques est nette depuis les années 2010. Les interventions sont plus lourdes afin d'adapter ou consolider les infrastructures voire, dans certain cas, de les déplacer et de les reconstruire.

De plus, la majorité de ces dommages concerne des éléments d'infrastructures construits sur des terrains riches en glace. Ces dommages auraient ainsi pu être évités avec des diagnostics géotechniques adaptés au permafrost. Par exemple, la gare aval du funiculaire du Dôme express (2 Alpes) a nécessité une reprise des fondations et une stabilisation avec environ 60 micropieux durant l'été 2019. Cette gare avait été construite en partie sur une moraine à cœur de glace, expliquant son affaissement progressif. Ces travaux coûteux (250 K€) auraient sans doute pu être évités par une meilleure caractérisation du permafrost.

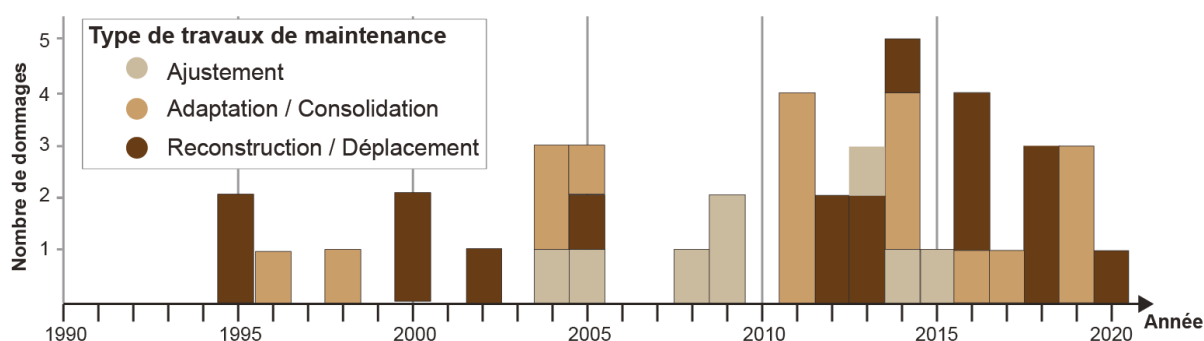


Figure 2 : Évolution des dommages et travaux de maintenance d'éléments d'infrastructure en contexte de permafrost dans les Alpes françaises.

5.2 Des stratégies majoritairement réactives

Parmi les 148 éléments d'infrastructure les plus à risque (risque « élevé » à « très élevé »), 27 éléments d'infrastructure (représentant 19 infrastructures) ont déjà été concernés par des stratégies d'adaptation ou d'atténuation. La plupart des stratégies sont réactives avec une adaptation des fondations ou un renforcement du terrain porteur par des travaux souvent très coûteux (Figure 3). À l'inverse, peu de stratégies proactives ont été mises en œuvre pour réduire les transferts de chaleur dans le sol ou pour surveiller l'état thermique du permafrost et les mouvements associés afin d'anticiper des instabilités dans les terrains supports. En d'autres termes, les stratégies sont mises en place pour gérer les conséquences de déstabilisation sur le court terme et non pour anticiper l'évolution des terrains selon une vision

à long terme malgré des surcoûts de maintenance non négligeables (souvent entre 50 et 1 000 K€).

Les différentes stratégies d'adaptation possibles seront résumées dans une note technique pour les gestionnaires et décideurs.

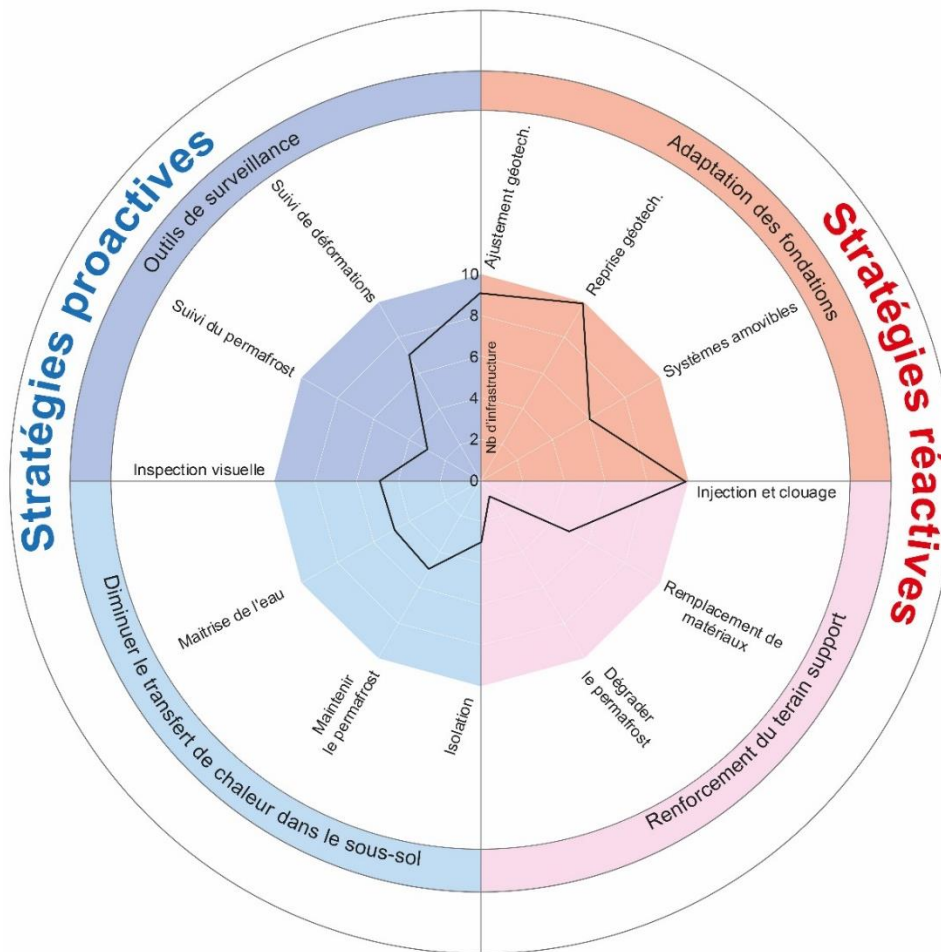


Figure 3 : Types de stratégies développées pour les infrastructures les plus à risque.

5.3 Détection et suivi de l'état thermique du permafrost par méthode indirecte

Les avancées et tests méthodologiques réalisés pour le projet STAAF sont présentés ci-dessous afin d'étudier la distribution et l'état du permafrost dans les terrains supports.

- **Détermination de l'état thermique du permafrost par méthode géoélectrique**

Le projet STAAF a permis la finalisation d'un travail méthodologique de conversion de données de tomographie géoélectriques en températures par l'utilisation d'un modèle pétrophysique (*i.e.* équation). Pour la première fois, des données en conductivité électrique ont pu être transformées directement en température pour des températures inférieures à 0°C (Figure 4). Ce travail a été basé sur des données acquises en laboratoire *via* des échantillons

de roches et deux campagnes de mesures sur le terrain (octobre 2016 et septembre 2019) au refuge des Cosmiques. Une publication scientifique est en cours pour valoriser ce travail dans *Geophysical Journal International*.

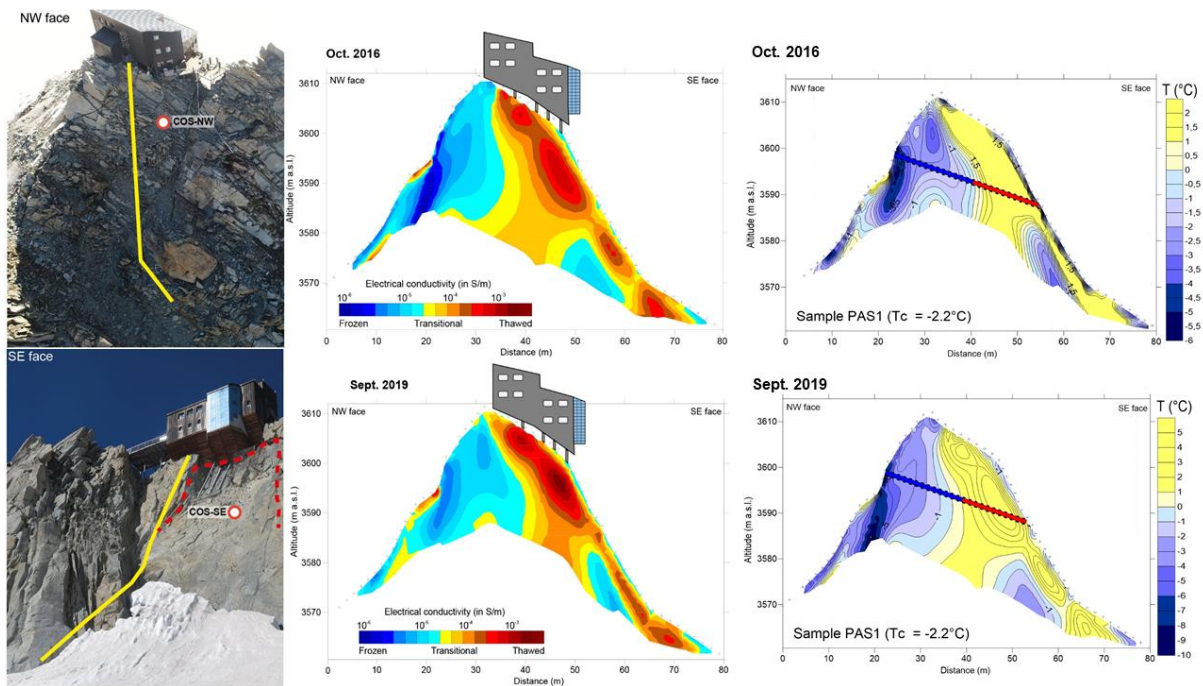


Figure 4 : Profil en résistivité électrique réalisé sous le refuge des Cosmiques en 2016 et 2019 et transformation en température.

- **Modélisation de l’approfondissement de la couche active**

La caractérisation de l’évolution de la couche active (*i.e.* couche en subsurface qui dégelant chaque année) est primordiale pour apprécier l’état thermique d’un terrain. Si la couche active s’épaissit avec le temps, cela signifie que le permafrost est en train de se dégrader voire de disparaître (Figure 5).

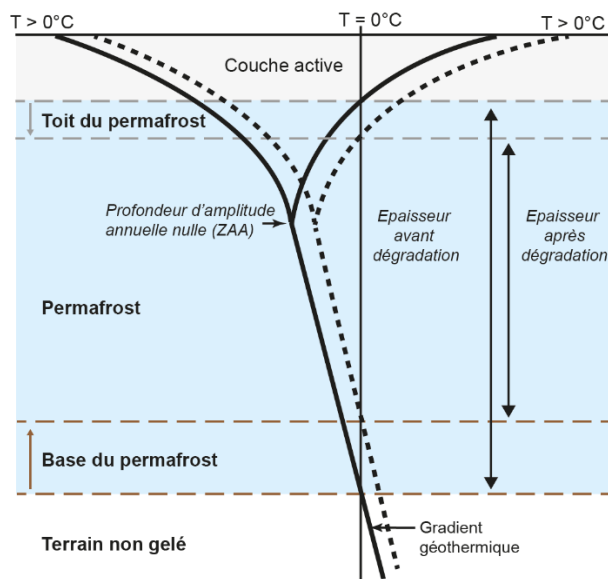


Figure 5 : Profil thermique théorique d’un terrain à permafrost et processus de dégradation.

Ces changements sont généralement observables *via* un suivi des températures dans un forage instrumenté ou par la répétition de profils géophysiques. Pour cette étude, nous avons testé le modèle *Cryogrid* (Westermann *et al.*, 2013) développé pour le permafrost arctique. Ce modèle permet de simuler la distribution du permafrost avec des données issues de capteurs de température à la surface de la roche. Ainsi, nous avons (1) mesuré l'évolution des températures de subsurface entre 2016 et 2019 sur différentes faces de l'arête inférieure des Cosmiques (nord-ouest, sud-est et au niveau des fondations du refuge), (2) simuler les températures à la surface de la roche entre 2007 et 2016 en utilisant une série de températures de l'air mesurées par *Météo France* au sommet de l'Aiguille du Midi (station à 3845 m d'altitude) et, enfin, (3) modéliser l'évolution de la couche active avec le modèle *Cryogrid* entre 2010 et 2020.

Les modélisations et comparaisons entre le capteur situé au niveau des fondations du refuge et la face nord-ouest montrent que le refuge protège localement le permafrost et en retarde la dégradation. En effet, la couche active semble s'être approfondie de 1 m sous le refuge contre 2.5 m en face nord-ouest sur la même période (Figure 6). L'effet refroidissant du refuge s'explique par un effet d'ombrage cumulé à une circulation d'air permanente grâce à une construction sur pilotis. Cette solution de refroidissement passif est souvent utilisée pour les constructions dans les régions arctiques (e.g. Shur et Goering, 2009) et préconisée pour le permafrost de montagne (Boomer *et al.*, 2010).

Cette méthodologie est relativement peu coûteuse et idéale dans le cadre d'un pré-projet d'implantation d'une infrastructure, en complément d'un forage de prospection. Elle peut être aussi utilisée, comme dans notre étude, pour caractériser l'effet refroidissant ou réchauffant d'une infrastructure sur le sous-sol. Les résultats de ces modélisations serviront d'exemple pour expliciter auprès des gestionnaires l'intérêt d'un suivi scientifique pour anticiper d'éventuelles déstabilisations.

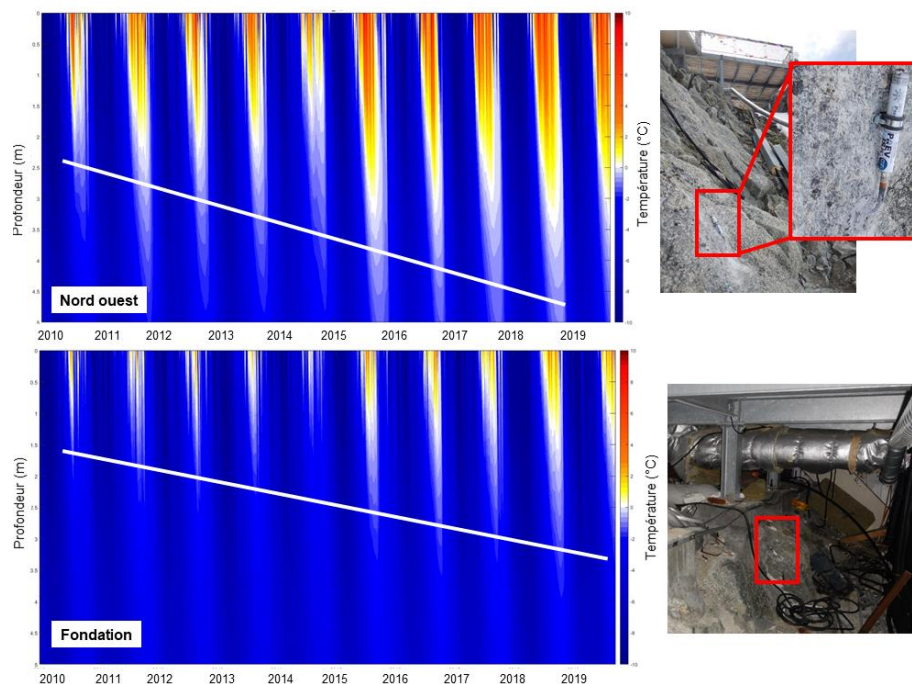


Figure 6 : Modélisation de l'évolution de la couche active entre 2010 et 2019 pour la face nord-ouest et au niveau des fondations du refuge.

- Vers un suivi en géophysique électrique des terrains-supports

Alors que les suivis scientifiques se multiplient et montrent l'approfondissement de la couche active et la dégradation du permafrost dans les Alpes (e.g. [Mollaret et al., 2019](#)), cette méthode n'est pas utilisée pour le suivi de terrains-supports. Le projet STAAF a permis de répéter des mesures en résistivité électriques déjà réalisées en 2007 et 2009 ([Bodin et al., 2010](#)) à proximité de la gare d'arrivée du télésiège de Bellecombe. La comparaison des profils montre un abaissement d'un ordre de grandeur des valeurs de conductivité électrique et un permafrost très proche du point de fusion (Figure 7). En d'autres termes, il faut s'attendre à un nouvel affaissement de la gare du télésiège alors que celle-ci a déjà bénéficié de travaux de stabilisation en 2013.

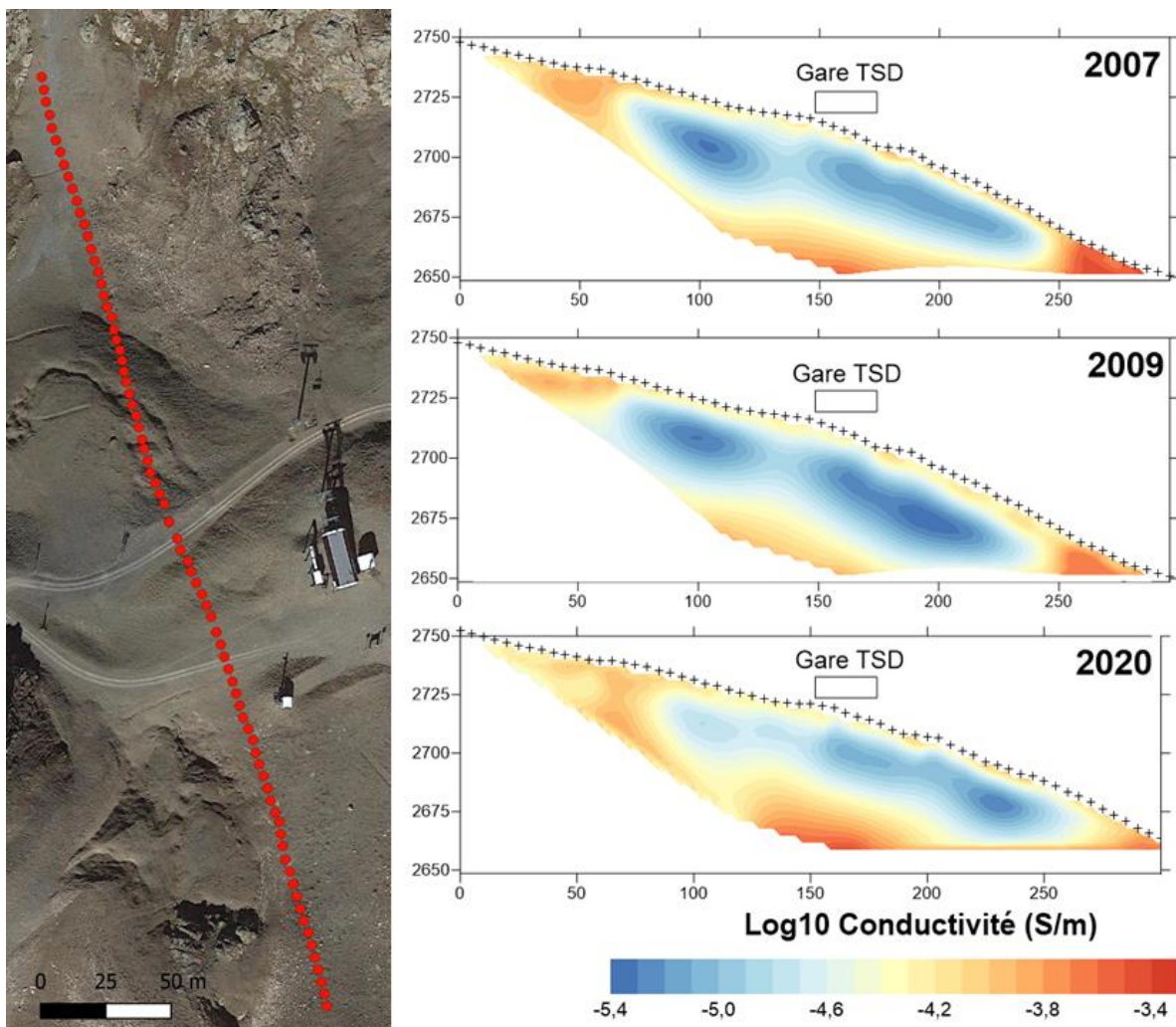


Figure 7: Évolution de la dégradation du permafrost dans le glacier rocheux de Bellecombès (2 Alpes) entre 2007 et 2020.

6 Impacts

6.1 Apports et retombées pour la collectivité et les gestionnaires

Le projet STAAF a dressé un inventaire des stratégies et préconisations de suivi pour les infrastructures construites sur le permafrost dans une note technique (Duvillard *et al.*, en cours). De plus, le projet STAAF a testé et développé de nouvelles méthodes indirectes de diagnostic du permafrost et de son état thermique. Ces nouvelles méthodes pourront être utilisées pour de futures études et diagnostics du permafrost dans des terrains-supports d'infrastructures.

6.2 Ouverture à l'international

Malgré des circonstances sanitaires peu favorables à une ouverture internationale, STAAF a d'ores-et-déjà été sollicité pour une expertise sur la présence de permafrost dans des parois du Groenland en octobre 2020 (§ 7). La méthodologie déployée au refuge des Cosmiques a été appliquée à cette nouvelle étude.

6.3 Publications et communication des résultats techniques

Les résultats techniques du projet STAAF ont donné lieu à quatre types de publications et communications. Seule une communication orale a été possible lors d'un webinaire du fait des contraintes sanitaires liées à la COVID 19.

- **Rapport d'étude**

Duvillard P.-A., Ravanel L. (2020). *Évaluation du risque de déstabilisation des éléments d'infrastructures construites sur le permafrost dans les Alpes françaises : Extrait pour les domaines skiables de la Compagnie des Alpes*. Rapport technique, 39 p.

Duvillard P.-A., Ravanel L., Schoeneich P. (en cours). *Stratégies et préconisation de suivi pour les infrastructures sur du permafrost*. Rapport technique, 20 p.

- **Articles scientifiques (en cours)**

Duvillard P.-A., Magnin F., Revil A., Legay A., Ravanel L., Abdulsamad F., and A. Coperey A. (en révision). Temperature distribution in a permafrost-affected rock ridge from conductivity and induced polarization tomography. *Geophysical Journal International*.

Duvillard P.-A., Ravanel L., Schoeneich P., Deline P., Marcer M. and Magnin F. (soumis en juin 2020). Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*

- **Magazines spécialisés**

- *Montagne Leaders*, rubrique « Les experts », n°279, Mai-Aout 2020, page 91-92, « Quelle évolution pour la stabilité des infrastructures construites sur le permafrost dans les Alpes françaises ? »

<https://mozzoviewer.publishingcenter.net/dist/a9de19209b4a59799ff17e47f2271c1b/111855-u.web/#page/90>

- *Cahier de Tendances Montagne[s]*, n°2, 2021, « Évolution du permafrost et risques dans les Alpes françaises »

- **Webinaire**

- Webinaire Indura, le 30/04/2020, « Les conséquences de la fonte du permafrost sur les infrastructures »

<https://vimeo.com/showcase/7046286/video/415562554>

6.4 Vulgarisation et diffusion des connaissances auprès du grand public

- **Journaux et magazine grand public**

- *Le Dauphiné*, le 12/09/2019, « Refuges, remontées mécaniques : les dégâts du dégel du permafrost »

<https://www.ledauphine.com/montagne/2019/09/12/des-equipements-d-altitude-menaces-par-la-fonte-du-permafrost>

- *Outside*, le 15/10/2019, « Déjà 15% des refuges, pylônes et remontées fragilisés par le réchauffement climatique dans les Alpes françaises »

<https://www.outside.fr/deja-15-des-refuges-pylones-et-remontees-fragilises-par-le-rechauffement-climatique-dans-les-alpes-francaises/>

- *Le Figaro*, le 22/11/2019, « Quand le réchauffement climatique menace les infrastructures des stations de ski »

<https://www.lefigaro.fr/sciences/quand-le-rechauffement-climatique-menace-les-infrastructures-des-stations-de-ski-20191122>

- *The Telegraph*, le 24/11/2019, « *French ski resorts spend millions compensating for climate change* »

<https://www.telegraph.co.uk/news/2019/11/24/french-ski-resorts-spend-millions-compensating-climate-change/>

- **Télévisions**

- JT 20h de France 2, le 30/09/2019, « Réchauffement climatique : menace sur les remontées mécaniques »

https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/rechauffement-climatique-menace-sur-les-remontees-mecaniques_3638873.html

- JT 20h de TF1, le 07/10/2019, « Mont-Blanc la montagne qui s'effrite ? »

<https://www.lci.fr/planete/mont-blanc-la-montagne-qui-s-effrite-2134369.html>

- JT de France 3 Auvergne Rhône-Alpes, « Dans les Alpes, le réchauffement climatique met 148 infrastructures de montagne en péril »

<https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/alpes-rechauffement-climatique-met-148-infrastructures-montagne-peril-1733583.html>

- **Radios**

- Europe 1, le 06/12/2019, « La gare d'arrivée du télésiège a dû être reconstruite" : dans les Alpes, la chaleur affaisse les sols »

<https://www.europe1.fr/societe/cop-25-la-gare-darrivee-du-telesiege-a-du-etre-reconstruite-dans-les-alpes-la-chaaleur-affaisse-les-sols-3935759>

7 Perspectives ouvertes par le projet

Le projet STAAF a permis d'initier plusieurs collaborations à l'échelle nationale et internationale et d'ouvrir différentes perspectives de recherche.

- Collaborations avec la *Compagnie des Alpes*

Étant le premier gestionnaire de remontées mécaniques dans les Alpes françaises, la *Compagnie des Alpes* s'est avérée être un partenaire indispensable pour ce projet. Plusieurs rencontres et échanges ont ainsi été réalisés depuis avril 2020. Un rapport des éléments d'infrastructures les plus à risques construites sur le permafrost dans les Alpes françaises dans les domaines skiables de la *Compagnie des Alpes* (Tignes, Val d'Isère, Les Arcs, La Plagne, Les Ménuires, Méribel, Serre-Chevalier) a été transmis en août 2020. Un plan d'actions pourrait être discuté pour l'année 2021.

- Collaborations la communauté de commune de la vallée de Chamonix Mont Blanc

Avec un démarrage initialement prévu en 2020, en parallèle du projet STAAF, mais retardé pour diverses raisons (crise sanitaire, élections municipales, financement), le projet d'expertise des infrastructures construites sur du permafrost au sein de la CCVCMB devrait débuter en 2021. Ce projet aura pour objectif de (1) dresser un inventaire des éléments d'infrastructures construites sur le permafrost, (2) les hiérarchiser selon un degré de risque lié à l'évolution du permafrost, (3) d'analyser plusieurs sites d'étude quant à leur état thermique (géophysique combinée à une expertise géomorphologique).

- Collaborations avec l'*Arctic Technology Centre* (Sisimuit, Groenland)

Dans le cadre d'une collaboration scientifique avec le Danemark, le porteur du projet STAAF a été invité pour une expertise en géophysique électrique au cours du mois d'octobre 2020 dans des parois situées autour de la ville de Sisimuit. L'objectif était d'étudier la présence de permafrost dans les parois rocheuses et d'évaluer le potentiel de dégradation de celui-ci dans le cadre d'une étude des risques pour la municipalité de Sisimuit. Ce travail sera également valorisé par une publication scientifique au cours de l'année 2020. Il s'agit des premières données validant la présence de permafrost dans des parois groenlandaises (Figure 8). Cette collaboration montre le caractère unique des compétences développées à travers l'axe 3 du projet STAAF.

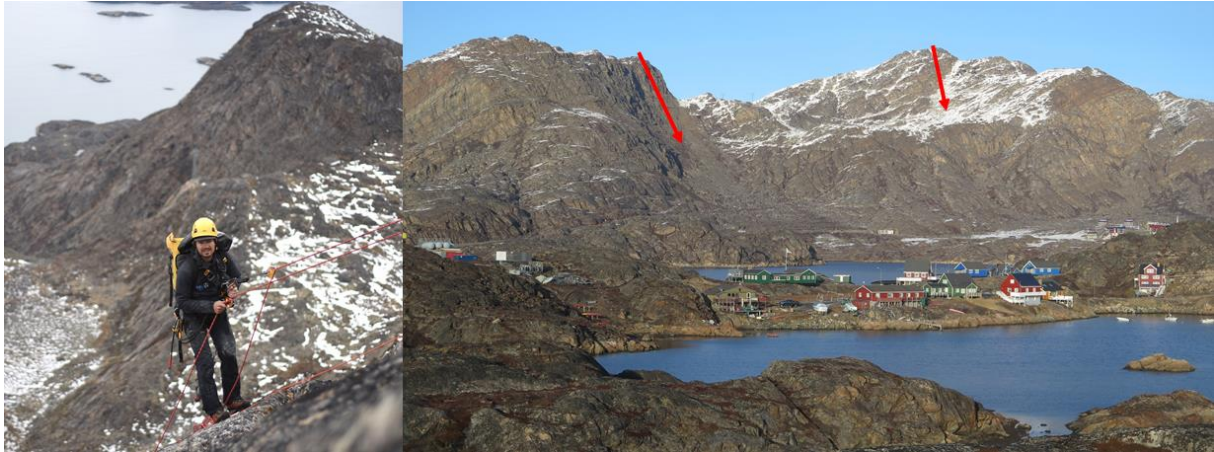


Figure 8 : Profils géophysiques acquis sur les faces nord-sud de Nattoralinnguaq (à gauche) et Nulia (à droite).

- Création du bureau d'expertise *NAGA geophysics*

De plus, le projet STAAF a permis d'initier le transfert de l'expertise sur la détection du permafrost depuis un laboratoire public vers un bureau d'expertise privé en géophysique en cours de création ([NAGA geophysics](#)). Ce bureau d'expertise aura pour objectif l'étude géophysique quantitative environnementale, et toutes prestations de service, de conseil et d'assistance appliquées à l'étude du sol et du sous-sol, avec une forte dimension de recherche et développement.

NAGA geophysics gardera des liens étroits le laboratoire EDYTEM (CNRS / Univ. Savoie Mont-Blanc).

8 Références

- Bodin X., Desvarreux P., Fabre D., Krysiecki JM., Gay M., Marie R., Lorier L., Schoeneich P., Vallon M. (2010). Analyse des risques induits par la dégradation du permafrost alpin. *Projet Fondation MAIF, Rapport final*, 227 pages.
- Bommer C., Phillips M., Keusen H.-R., Teyssiere P. (2010). *Construire sur le pergélisol: guide pratique*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf.
- Cadet H., Brenguier O. (2015). The Bellecombès Rock Glacier Case Study, 2 Alpes, France, in: Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1*. Springer International Publishing, Cham, pp. 249–253. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_47
- CSA (2019). *Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation*. Technical Guide of the Canadian Standards Association, 96 p.
- Duvillard P.-A., Ravanel L., Schoeneich P., Marcer M., Piard J.F. (2019). Analyse multi-méthodes de la déstabilisation d'un pylône de remontée mécanique implanté sur un glacier rocheux des Alpes françaises. *Géomorphologie. Relief. Processus. Environnement*. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12945>
- Duvillard P.-A., Ravanel L., Marcer M., Schoeneich P. (2019). Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps, *Regional Environmental Change*, 19, 1281-1293, <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z>
- ENR (2015). *Homeowner's guide to permafrost in Northwest Territories*. Environment division department of environment and natural resources government of the Northwest Territories. 28 p. <https://www.enr.gov.nt.ca/sites/enr/files/permafrost-homeowners-guide.pdf>
- Mollaret C., Hilbich C., Pellet C., Flores-Orozco A., Delaloye R., Hauck C. (2019). Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites, *The Cryosphere*, 13, 2557–2578, <https://doi.org/10.5194/tc-13-2557-2019>
- Shur Y., Goering D.J. (2009). Climate Change and Foundations of Buildings in Permafrost Regions, in: Margesin, R. (Ed.), *Permafrost soils*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 251–260. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69371-0>
- Westermann, S, Schuler, TV, Gislén, K & Etzelmüller, B (2013). Transient thermal modeling of permafrost conditions in Southern Norway, *The Cryosphere*, 7(2), 719–739, 814 <https://doi.org/10.5194/tc-7-719-2013>

9 Remerciements

La réussite du projet STAAF n'aurait pas été possible sans l'implication directe de L. Ravanel, P. Schoeneich, F. Magnin et A. Revil des laboratoires EDYTEM et PACTE sur le volet scientifique. Nous remercions également C. Casotti (EOST), D. Cusicanqui (IGE) et M. Rameau pour leur aide dans l'acquisition de données.

De plus, le bon déroulement de ce projet n'a été possible que grâce aux conseils et remarques des « parrains » de ce projet : C. Clergue (EIFFAGE) et G. Saussine (SNCF RESEAU). Ces regards extérieurs ont permis de donner du poids et de l'envergure au projet STAAF.

Enfin, la fondation FEREC est très chaleureusement remerciée pour sa confiance et son aide à la réalisation du projet.