

PermaNET

Réseau d'observation du permafrost sur le long terme

RAPPORT DE SYNTHÈSE



Mentions légales

Auteurs

| | |
|------------------------------|--|
| Mair, Volkmar | Autonomous Province of Bolzano (Italy) |
| Zischg, Andreas | Abenis Alpinexpert GmbH/srl, Bolzano (Italy) |
| Lang, Kathrin | Autonomous Province of Bolzano (Italy) |
| Tonidandel, David | Autonomous Province of Bolzano (Italy) |
| Krainer, Karl | University of Innsbruck (Austria) |
| Kellerer-Pirklbauer, Andreas | University of Graz (Austria) |
| Deline, Philip | Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS, (France) |
| Schoeneich, Philippe | Université Joseph Fourier, Grenoble (France) |
| Cremonese, Edoardo | ARPA Valle d'Aosta, Aosta (Italy) |
| Pogliotti, Paolo | ARPA Valle d'Aosta, Aosta (Italy) |
| Gruber, Stephan | University of Zurich, Zurich (Switzerland) |
| Böckli, Lorenz | University of Zurich, Zurich (Switzerland)) |

Soutenu par

Le projet PermaNET est mené dans le cadre de la Coopération Territoriale Européenne et cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) dans le cadre du programme Espace Alpin. www.alpine-space.eu

Mise en page

Jörg Buchmann (standfotografie.com), INTERPRAEVENT

Impression

Centro duplicazioni della Provincia Autonoma di Trento

Citations

Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremonese, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L., (2011): PermaNET – Réseau d'observation du permafrost sur le long terme. Rapport de synthèse. INTERPRAEVENT Série de publications 1, Rapport 3. Klagenfurt.

A commander auprès de

International Research Society INTERPRAEVENT
Flatschacher Straße 70
A-9020 Klagenfurt (Autriche)
ISBN 978-3-901164-16-3

Téléchargement

www.interpraevent.at → service → publications

PermaNET

Réseau d'observation du permafrost sur le long terme

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Preface Lead Partner

Dans les discussions sur les effets du changement climatique dans les Alpes, la fonte du permafrost est souvent mentionnée comme conséquence négative, tout comme la fonte des glaciers et l'augmentation de l'intensité des précipitations. Contrairement à la fonte des glaciers, la dégradation du permafrost n'est pas directement visible dans le paysage. L'analyse de la répartition du permafrost et l'évaluation des conséquences du changement climatique sur le permafrost sont marquées par de grandes incertitudes. Le manque de connaissances sur ce sujet a souvent conduit à des spéculations. Les médias, en particulier, ont tendance soit à exagérer soit à négliger les conséquences de la dégradation du permafrost et les risques naturels qui y sont liés. L'objectif principal du projet PermaNET était de compiler toutes les données et toutes les observations sur la répartition du permafrost et son évolution dans un climat changeant, de créer ainsi une base de connaissances commune permettant des discussions plus objectives dans ce domaine. Il fallait pour cela réunir les scientifiques et les acteurs et décideurs de l'aménagement du territoire. Le Service géologique de la province autonome de Bolzano en Italie a initié le projet PermaNET, mettant en place un partenariat interdisciplinaire de 13 partenaires et 23 observateurs dans toutes les Alpes et s'est chargé de la gestion du projet. Les résultats de cette coopération intensive sont désormais connus et présentés dans ce rapport. Pour la première fois, un ensemble harmonisé et standardisé de données sur la répartition du permafrost dans les Alpes a pu être élaboré. L'évolution du permafrost peut désormais être suivie par un réseau d'observation couvrant toutes les Alpes, établi au sein du projet PermaNET. Regrouper toutes les données et les expériences d'étude du permafrost dans l'ensemble des Alpes a permis de faire un grand pas en avant dans la recherche sur le permafrost et la gestion des risques naturels. La base de décisions élaborée fournit des informations précieuses aux autorités et aux entreprises qui travaillent en haute-montagne. Cette brochure a pour but de résumer les découvertes les plus importantes et de présenter les cartes, les bases de données, les manuels et les recommandations élaborés par l'équipe PermaNET.

Volkmar Mair
Andreas Zischg

Lead Partner PermaNET

AUTONOME PROVINZ
BOZEN - SÜDTIROL



PROVINCIA AUTONOMA
DI BOLZANO - ALTO ADIGE

PROVINCIA AUTONOMA DE BULSAN - SÜDTIROL

Preface INTERPRAEVENT

Le permafrost de montagne est l'un des nombreux aspects à prendre en considération dans la gestion des aléas et des risques naturels dans les Alpes. L'évaluation des risques naturels et l'élaboration de cartes des zones de danger dans des régions où on trouve du permafrost est une tâche plutôt complexe car la dégradation du permafrost influence le déclenchement et l'évolution d'aléas naturels comme des éboulements, des glissements de terrain et des laves torrentielles. Ceci peut avoir des conséquences directes sur les infrastructures dans les zones affectées par le permafrost et des conséquences indirectes sur les autres risques naturels comme les inondations. L'augmentation de la température de l'air a un impact direct sur les propriétés thermiques et le comportement géomécanique des rochers et des sols gelés. Le changement climatique est donc un autre sujet qui doit être pris en compte.

Somme toute, le permafrost de montagne est un facteur supplémentaire du système complexe des bassins versants alpins. Ainsi, dans les zones de haute montagne, l'analyse du permafrost et des risques naturels qui y sont liés fait partie d'une approche intégrée des bassins versants et dans certains cas elle joue un rôle important dans la gestion intégrée du risque. INTERPRAEVENT soutient le partage des connaissances et des expériences entre les scientifiques et les acteurs dans le domaine de la gestion des aléas et des risques naturels. Cette brochure est donc la suite précieuse des précédentes brochures sur la documentation des risques en montagne (DOMODIS – disponible en anglais, français et allemand) et la brochure sur le bois flotté (disponible en allemand uniquement).

L'équipe PermaNET a tenté de synthétiser l'état actuel de la détection du permafrost, du suivi du permafrost et de la prise en considération du permafrost dans l'évaluation des risques naturels du point de vue des praticiens. Cette brochure est donc un outil qui sert les objectifs principaux d'INTERPRAEVENT : fournir des bases de décision pour les acteurs de la gestion des risques naturels et des aléas, présenter les découvertes scientifiques et les conclusions aux praticiens et créer des aides à la décision pour les aspects techniques, administratifs, économiques et d'aménagement liés à la prévention.

Kurt Rohner, Président
Gernot Koboltschnig, Directeur

Société de recherche internationale INTERPRAEVENT



INTERPRAEVENT

International
Research Society

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction | 4 |
| Le projet | 5 |
| Le partenariat | 6 |
| Le réseau d'observation du permafrost | 8 |
| La répartition du permafrost dans les Alpes | 10 |
| Le permafrost et les risques naturels associés | 16 |
| Le permafrost et le changement climatique | 18 |
| Le permafrost et la gestion des ressources en eau | 20 |
| Recommandations pour les décideurs | 22 |

Introduction

Le permafrost est défini comme un matériau de la lithosphère (sol ou rocher) qui reste à 0 °C ou moins pendant plus de deux ans. Le permafrost peut contenir de l'eau ou de la glace, mais ce n'est pas impératif. Par définition, les glaciers ne sont pas du permafrost. La couche superficielle qui recouvre le permafrost est appelée « couche active » car les températures peuvent dépasser à certaines saisons les 0 °C. Dans les Alpes, la couche active a une épaisseur d'environ 0,5 à 8 m.

Contrairement au permafrost des zones de faible altitude, le permafrost de montagne est largement influencé par la topographie très contrastée. La répartition du permafrost de montagne est donc très hétérogène, elle varie en fonction de la topographie, de la géomorphologie et des conditions climatiques dans les Alpes.

Le permafrost de montagne est extrêmement sensible aux changements climatiques. Ces derniers étés, on a pu observer une augmentation de l'intensité et de la fréquence des éboulements et des charriages de débris dans l'ensemble des Alpes. Citons par exemple l'effondrement d'une moraine à Mulinet, des écroulements au Cervin et au Thurwieser, des laves torrentielles à Guttannen et de nombreux petits phénomènes. Les risques liés au permafrost touchent les routes, les zones touristiques, les infrastructures et les habitations. Le principal défi est de savoir comment les autorités compétentes doivent considérer ces effets du changement climatique dans la prévention des risques et le développement régional. Dans certains endroits, le sujet doit être intégré aux pratiques de gestion des risques. Autre aspect de l'importance des zones de permafrost : la glace du permafrost contribue au régime hydrologique des bassins versants alpins.

En développant une stratégie commune pour gérer le permafrost et les risques qui y sont liés dans un contexte de changement climatique et en créant un réseau de suivi couvrant les Alpes entières, le projet a pour but de prévenir les risques naturels, de contribuer au développement durable des territoires et d'implémenter des pratiques de bonne gouvernance.



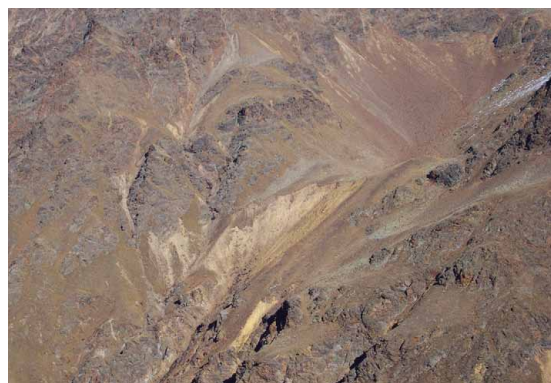
Glacier rocheux. Photo: A. Zischg



Fluage sur un versant. Photo: A. Zischg



Cicatrice d'écroulement. Photo: V. Mair



Erosion dans un glacier rocheux fossile. Photo: A. Zischg



Subsidence du sol et ajustement des fondations d'un pylône. Photo: A. Zischg

Le projet

L'objectif global de ce projet était de contribuer de manière significative à réduire les risques naturels liés au permafrost et à gérer leurs conséquences, en étudiant spécifiquement les impacts dus au changement climatique. Pour y parvenir, une stratégie commune de gestion du permafrost et des risques qui y sont liés dans un contexte de changement climatique a donc été développée et un réseau de suivi couvrant toutes les Alpes a été établi. Le projet PermaNET avait également pour objectif de favoriser un développement durable des territoires et d'implémenter des pratiques de bonne gouvernance en soutenant le développement de stratégies d'adaptation locales et régionales et en fournissant aux décideurs et aux autorités locales des aides à la décision et des stratégies pour intégrer ces éléments dans leur travail. Il fallait combler les lacunes apparues à certains endroits dans les données sur le permafrost et élaborer une carte et une base de données cohérentes du permafrost pour l'ensemble des Alpes. En testant de nouvelles technologies prometteuses et en trouvant des solutions conjointes pour adapter les pratiques de gestion des risques, le projet avait pour ambition de pousser l'Espace alpin à devenir l'une des régions modèles en matière de recherche sur le permafrost de montagne et de suivi du permafrost.

Le projet a été divisé en deux blocs de travail administratifs (WP), un bloc de travail Relations publiques et quatre blocs de travail scientifiques et techniques. Les blocs de travail techniques ont été soutenus par le WP1 « Préparation du projet », le WP2 « Gestion du projet » et par le WP3 « Information & relations publiques ». Ce dernier bloc se chargeait également de la diffusion des produits et des recommandations.

Le WP4 « Réseau de suivi du permafrost » avait pour but de collecter les métadonnées sur toutes les activités de suivi du permafrost existantes dans les Alpes, d'étendre les réseaux de suivi existants et de définir des directives pour les installations futures. Un ensemble de métadonnées des activités de suivi du permafrost dans les Alpes a été créé. Il comble les lacunes dans l'information et soutient l'établissement d'un réseau de suivi du permafrost dans les Alpes. Le WP4 a également permis d'établir et d'installer des stations supplémentaires de suivi du permafrost qui complètent les opérations d'observation existantes. Les nouvelles stations de suivi fournissent des données supplémentaires sur l'état thermique actuel du permafrost et son évolution dans le temps dans des sites sélectionnés.

Le WP5 « Le permafrost et le changement climatique » avait pour but de fournir des données sur la répartition du permafrost dans les Alpes. Un inventaire des indicateurs de permafrost et une carte de la répartition du permafrost dans l'ensemble des Alpes ont été compilés dans le WP5. Les cartes de répartition du permafrost servent de base pour évaluer les effets des changements climatiques sur le permafrost et



Conférence de lancement de PermaNET, Photo: Service géologique de la province autonome de Bolzano

les processus liés et pour élaborer des mesures d'adaptation pour les différentes activités économiques dans les zones de haute montagne. Un livre sur la réponse thermique et géomorphologique du permafrost aux changements climatiques actuels et futurs dans les Alpes européennes a été compilé. Il met en évidence les changements récents et les conséquences futures possibles du changement climatique sur le permafrost à travers des études de cas dans l'Espace alpin. De plus, un manuel de méthodologies et de techniques pour la cartographie et la détection du permafrost a été élaboré pour faciliter l'implémentation pratique des techniques.

Le WP6 « Risques naturels liés » sert de base pour l'élaboration d'une stratégie commune de gestion du permafrost et des risques qui y sont liés dans un contexte de changement climatique. Des recommandations pour les décideurs ont été développées, sur la base d'études de cas de risques liés au permafrost dans l'ensemble des Alpes.

Le WP7 « Ressources en eau » a fourni des informations sur l'importance de la glace de permafrost pour la gestion des ressources en eau. De plus, des recommandations ont été émises à l'intention des agences environnementales régionales concernant la meilleure manière d'analyser la qualité de l'eau de source en insistant particulièrement sur la pollution par les métaux lourds et les particules.

Le partenariat

De nombreuses autorités responsables des activités de gestion des risques sont confrontées à des problèmes de risques naturels liés au permafrost. Cependant, les connaissances et les données disponibles sur les problèmes liés au permafrost et leur prise en compte dans la gestion des aléas et des risques naturels diffèrent considérablement dans les Alpes selon les régions et les secteurs. Le permafrost est également un sujet d'actualité dans les activités de recherche. C'est pour cette raison que le Service géologique de la province autonome de Bolzano en Italie a initié le projet PermaNET et a mis en place un partenariat interdisciplinaire. Tous les états partenaires du programme Espace alpin concernés par des enjeux liés au permafrost ont été impliqués dans le projet. Les partenaires du projet étaient des organismes nationaux ou régionaux actifs dans la gestion des risques naturels, la protection de l'environnement, la gestion de la forêt, l'aménagement des cours d'eau, la météorologie, la protection civile et la gestion des ressources en eau. L'engagement des organismes scientifiques a permis de transférer les connaissances des chercheurs vers les décideurs. Pour des questions spécifiques, des observateurs, des acteurs importants venant d'ONG, de l'industrie du tourisme et des compagnies de production d'électricité ou des experts externes ont été invités à participer. Des ac-

teurs nationaux et transnationaux ont été consultés pour l'élaboration de stratégies communes. Les observateurs les plus importants du projet ont activement suivi les activités du projet et y ont considérablement contribué.

Comme la plupart des régions alpines seront concernées par le changement climatique et ses conséquences sur les zones de permafrost, la coopération entre les décideurs et les scientifiques dans l'ensemble des Alpes était essentielle pour l'implémentation de ce projet. L'implication des responsables, des autorités compétentes pour la gestion des risques et des instituts scientifiques a permis de trouver des solutions intégrées. Différents acteurs et secteurs ont collaboré, et des liens étroits ont été créés avec d'autres institutions clés (par exemple l'industrie du tourisme, l'alimentation en eau potable, les stations de ski, des experts externes) ce qui a fourni un vaste champ d'expériences et permis une approche interdisciplinaire et holistique. Cette coopération transnationale, par l'échange de connaissances, de données et de pratiques a réduit les coûts pour trouver des solutions pour adapter les pratiques de gouvernance aux effets spécifiques des changements climatiques.



Excursion de l'équipe PermaNET. Photo: Service géologique de la province autonome de Bolzano

Le partenariat

Les organismes suivants étaient partenaires du projet:

Partenaires du projet

Provincia Autonoma di Bolzano, Ufficio Geologia e Prove Materiali / Autonome Provinz Bozen - Südtirol, Amt für Geologie und Baustoffprüfung

Bayerisches Landesamt für Umwelt, Abteilung 10: Geologischer Dienst, Wirtschaftsgeologie, Bodenschutz

ARPA Piemonte - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, Dipartimento Geologia e Dissesto

Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato territorio e ambiente, Dipartimento territorio e ambiente, Direzione ambiente

Regione del Veneto, Direzione Geologia e Attività Estrattive, Servizio Geologia

Provincia Autonoma di Trento, Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture, Servizio Geologico

Österreichisches Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Universität Innsbruck, Institut für Geographie

Universität Graz, Institut für Geographie und Regionalforschung

Zentralanstalt f. Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Regionalstelle für Salzburg und Oberösterreich

Université Joseph Fourier - Grenoble I, Institut de Géographie Alpine, Laboratoire PACTE-Territoires

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie - CNRS

Grenoble INP, GIPSA-lab

Schweizerisches Bundesamt für Umwelt BAFU

Gestione transnazionale del progetto

Abenis Alpinexpert GmbH/srl

Osservatori attivi

Universität Zürich

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Osservatori

International Research Society INTERPRAEVENT

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare

Slovenian Torrent Erosion Control Service



Réunion des partenaires. Photo: Service géologique de la province autonome de Bolzano

Regione Piemonte, Direzione Ambiente, Settore Pianificazione Aree Protette

Seilbahnen Sulden

Dolomiti Superski

Skigebiet Ratschings-Jaufen

Confindustria Trento, Associazione Nazionale Esercenti Funiviaristi (A.N.E.F.), Sezione impianti a fune

Società degli Alpinisti Tridentini

Bayerische Zugspitzbahn Bergbahn AG

Alpenverein Südtirol

Parco Naturale Adamello Brenta

Direction Régionale de l'Environnement Rhône Alpes

Pôle Grenoblois Risques Naturels

Office National des Forêts – Délégation Nationale Risques Naturels – RTM, Direction Technique Restauration des Terrains en Montagne

Parc National des Ecrins

Compagnie des Guides de Chamonix

Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Geoinformation

Land Salzburg, Landesgeologischer Dienst

Land Steiermark, Landes-Umwelt-Information Steiermark (LUIS)

Land Kärnten, Hydrographischer Dienst

Land Vorarlberg, Landesvermessungsamt

Le réseau d'observation du permafrost

Au sein du projet PermaNET, un recensement détaillé des sites de suivi du permafrost a été effectué. Les données collectées ont été utilisées pour compiler une vue d'ensemble des activités de suivi existantes à l'échelle des Alpes entières, mettre en lumière les zones sans activités de suivi et formuler des directives pour l'installation d'autres stations de suivi. De nouvelles stations de suivi ont été installées et équipées sur certains sites sélectionnés.

Le réseau d'observation alpin a été complété par plus de 40 sites de suivi qui mesurent divers paramètres et caractéristiques du permafrost dans les rochers et les formations superficielles.

L'installation de nouvelles stations de suivi a été financée en partie par le projet PermaNET tandis que la maintenance à long terme est garantie par l'institut ou l'organisme qui a installé les instruments.

Suivant l'exemple du réseau de suivi du permafrost suisse PERMOS, des réseaux nationaux d'observation du permafrost ont été créés. En France, le réseau PermaFRANCE a été mis en place. En Italie et en Autriche, des réseaux de suivi nationaux sont en préparation. Les réseaux d'observation nationaux coordonnent les activités de suivi au niveau national. Tous les sites qui composent le réseau d'observation du permafrost sont inclus dans l'inventaire des indicateurs de permafrost (voir chapitre suivant) qui met périodiquement à jour les données des paramètres collectés. Les acti-

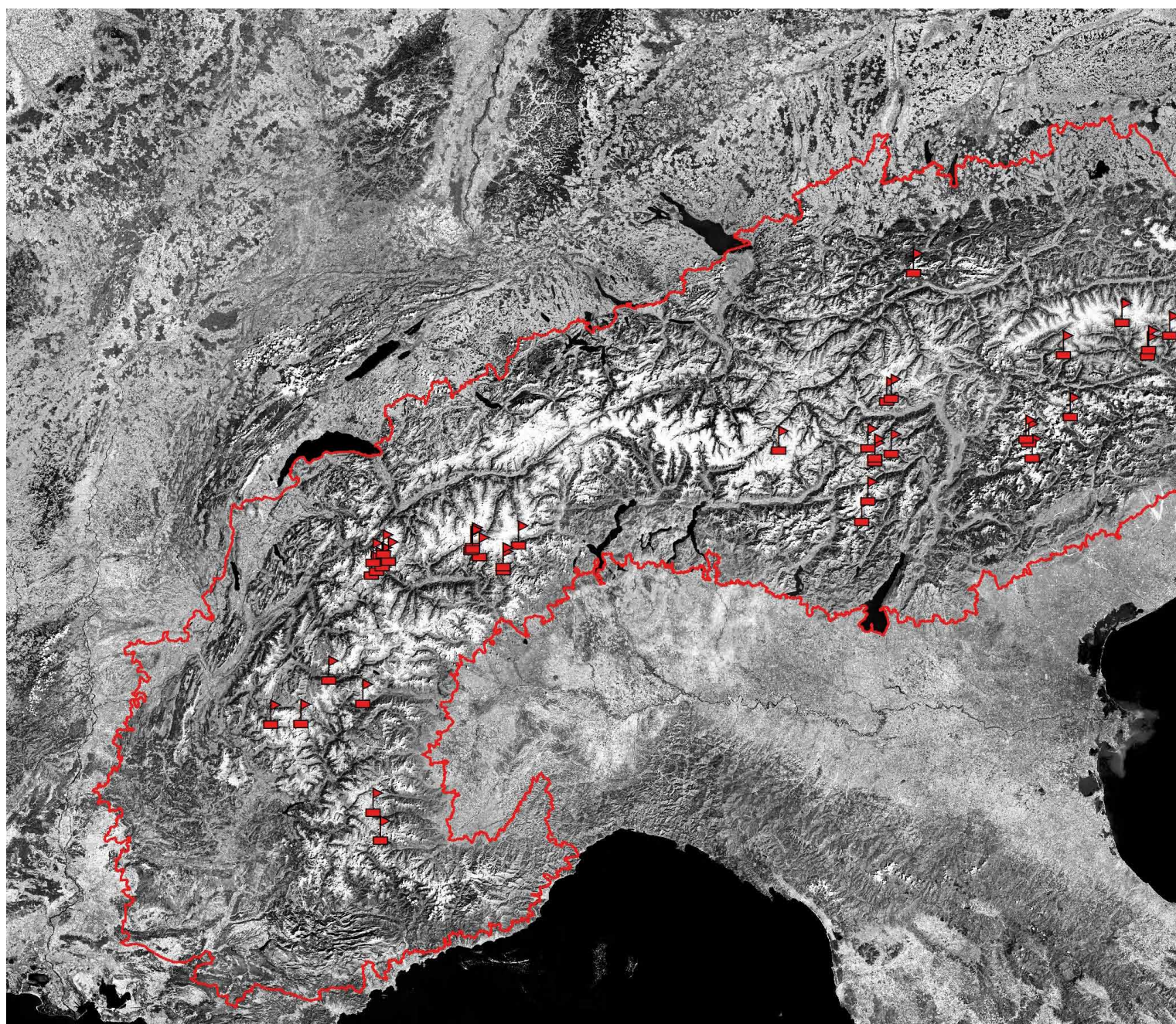


Fig. 1: Répartition dans les Alpes des stations de suivi du permafrost qui font partie du réseau d'observation PermaNET. Les métadonnées des stations de suivi du permafrost seront mises à jour en permanence en même temps que l'inventaire des indicateurs de permafrost.

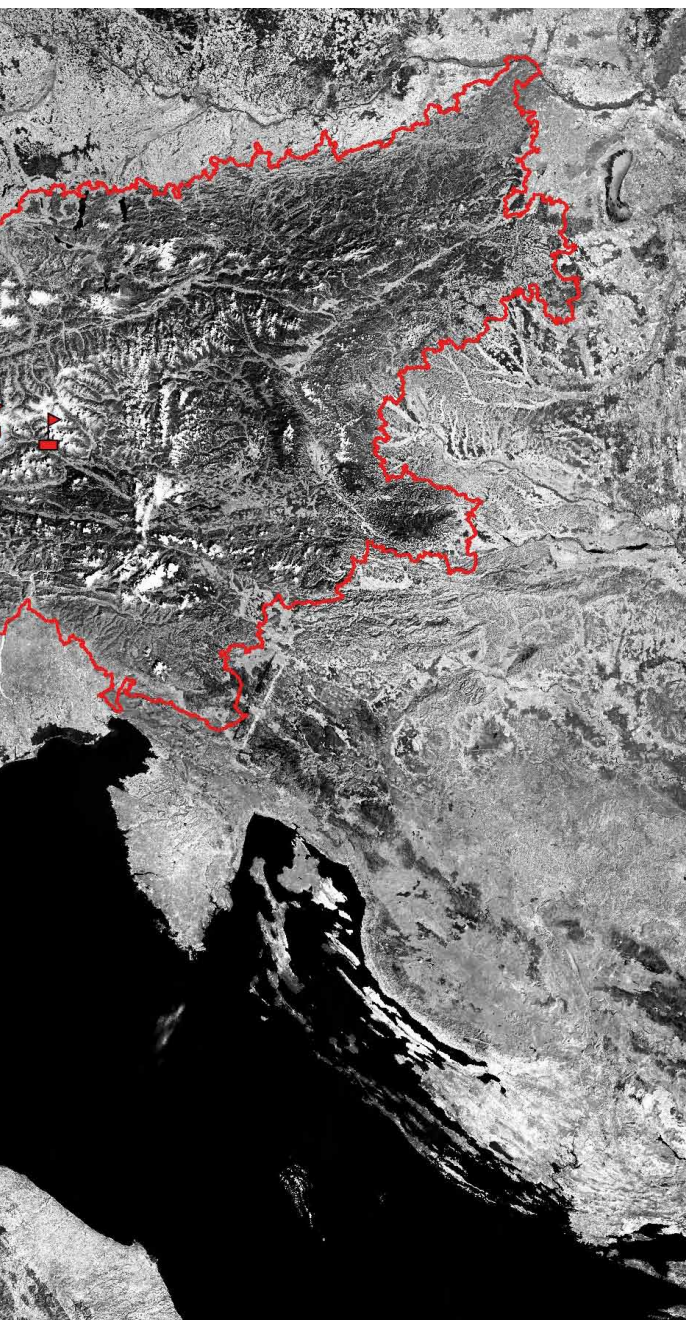
Le réseau d'observation du permafrost

tivités de suivi seront financées à long terme par les autorités environnementales régionales, nationales ou internationales.

Un ensemble de recommandations pour l'installation et la maintenance des stations de suivi a été développé afin de garantir la compatibilité des données mesurées en cas d'extension future du réseau d'observation.

Vous trouverez une liste des stations de suivi du permafrost installées et les directives pour l'installation des stations de suivi du permafrost ici:

www.permanet-alpinespace.eu/products/monitoring-network



Stations de suivi du permafrost établies ou ajoutées dans le cadre du projet PermaNET:

- A-1 Hinteres Langtal
- A-2 Weissen Cirque
- A-3 Dösen Valley
- A-4 Hoher Sonnblick
- A-5 Goldbergspitze
- A-6 Hochreichart
- F-1 Orelle
- F-2 Laurichard
- F-3 Deux Alpes
- F-4 Aiguille de Midi
- F-5 Les Drus
- F-6 Bérard
- F-7 Casse des Clausins
- F-8 Foréant
- F-9 Dérochoir
- D-1 Zugspitze
- I-1 Senales - Grawand
- I-2 Senales - Lazaun
- I-3 Ultimo - Rossbänk
- I-4 Riva di Tures - Napfen
- I-5 Braies - Croda Rossa "Cadin del Ghiacciaio"
- I-6 Braies - Croda Rossa "Cadin di Croda Rossa"
- I-7 Passo Gardena - Lech del Dragon
- I-8 Solda - Madritsch
- I-9 Cavaion (GST)
- I-10 Cavaion (borehole)
- I-11 Lobbie
- I-12 Presena
- I-13 Cima Uomo
- I-14 Matterhorn Carrel sud
- I-15 Matterhorn Carrel nord
- I-16 Matterhorn Cheminee new
- I-17 Matterhorn Cheminee old
- I-18 Matterhorn Oriondè - frac
- I-19 Matterhorn Oriondè – not frac
- I-20 Col d'Entreves South
- I-21 Col d'Entreves North
- I-22 Grandes Jorasses South-right
- I-23 Grandes Jorasses South-left
- I-24 Col Peuterey North
- I-25 Aiguille Marbrée
- I-26 Cime Bianche Pass – shallow
- I-27 Cime Bianche Pass - deep
- I-28 Piz Boè
- I-29 Mt. Moro Pass
- I-30 Salati Pass Mosso Inst.
- I-31 Salati Pass Corno dei Camosci
- I-32 Sommeiller Pass
- I-33 La Coletta Pass
- I-34 Gardetta Pass

La Suisse a été le premier pays dans les Alpes à coordonner les activités de suivi du permafrost au niveau national. Toutes les stations de suivi du permafrost en Suisse sont coordonnées par PERMOS (www.permos.ch)

PERMOS et PermaFRANCE publient périodiquement un résumé des données de suivi.

La répartition du permafrost dans les Alpes

L'un des principaux objectifs de PermaNET était de fournir une carte cohérente de la répartition du permafrost dans les Alpes. Un inventaire a été développé et compilé qui présente les sites où l'on a pu attester la présence ou l'absence de permafrost. Il a servi de base pour développer le modèle statistique pour l'élaboration de la carte de répartition du permafrost.

Inventaire des indicateurs de présence/absence de permafrost

Pour servir de base au modèle de permafrost couvrant l'ensemble des Alpes, les indicateurs de la présence ou de l'absence de permafrost venant de plusieurs pays et institutions

ont été standardisés et inventoriés. Cet inventaire ne possède que quelques variables pour permettre aux chercheurs de saisir facilement leurs données dans la base de données. Il contient des observations basées sur la température en forage, la température à la surface du sol, les cicatrices d'éboulements, les fosses ou chantiers de construction, les mouvements de surface, la prospection géophysique et les glaciers rocheux. L'inventaire des glaciers rocheux est géré séparément des informations de type ponctuel : les inventaires des différents glaciers rocheux sont fournis sous forme d'une collection de polygones qui sont fusionnés en un seul inventaire des glaciers rocheux.

Le développement de l'inventaire a été soutenu par les observateurs PermaNET « Université de Zurich » et « Institut FNP pour l'étude de la neige et des avalanches ENA ». En

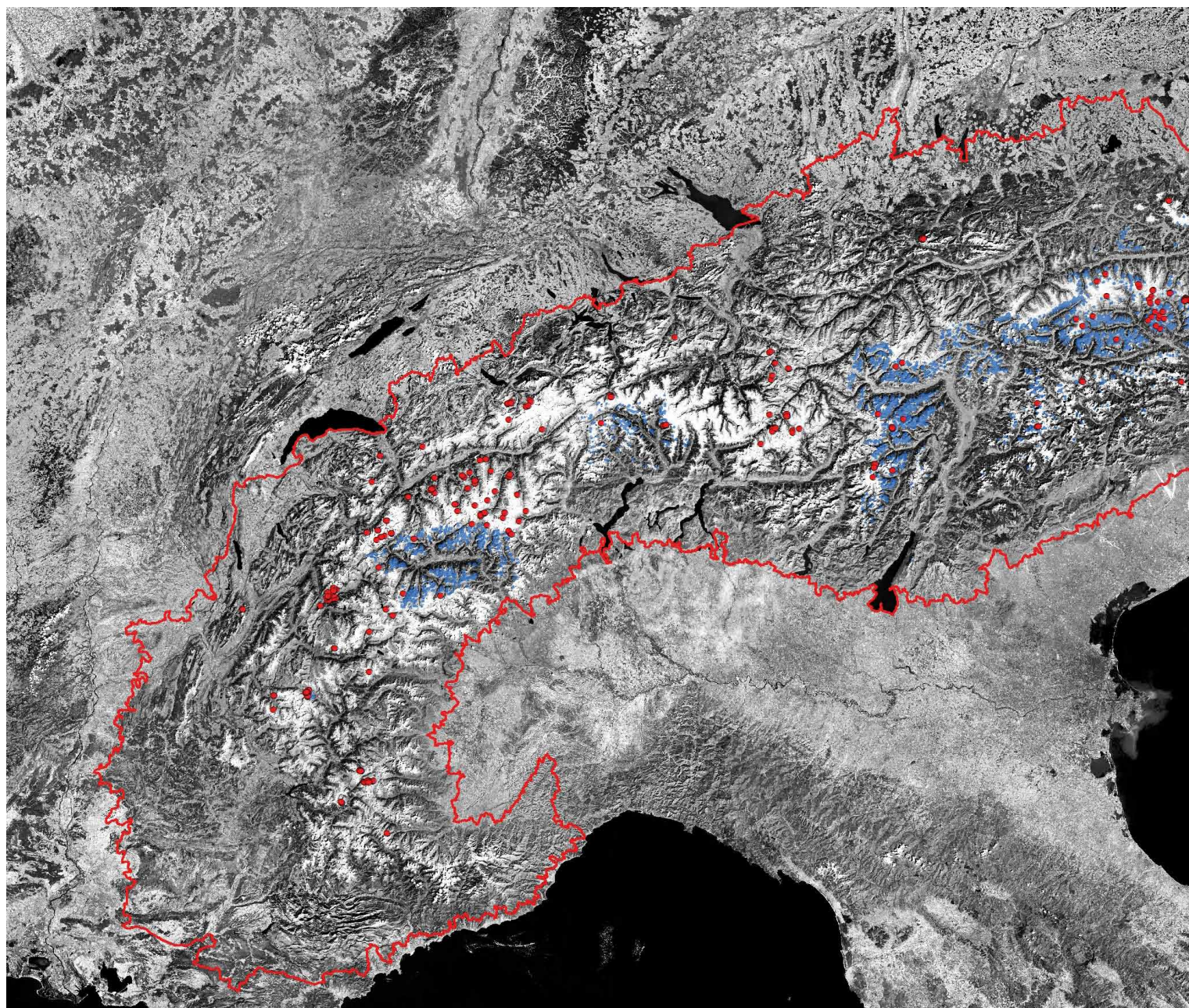


Fig. 2: Carte de l'inventaire des indicateurs de permafrost. Actuellement, l'inventaire homogénéisé contient plus de 400 données ponctuelles (points rouges) et près de 5000 glaciers rocheux (polygones bleus).

La répartition du permafrost dans les Alpes

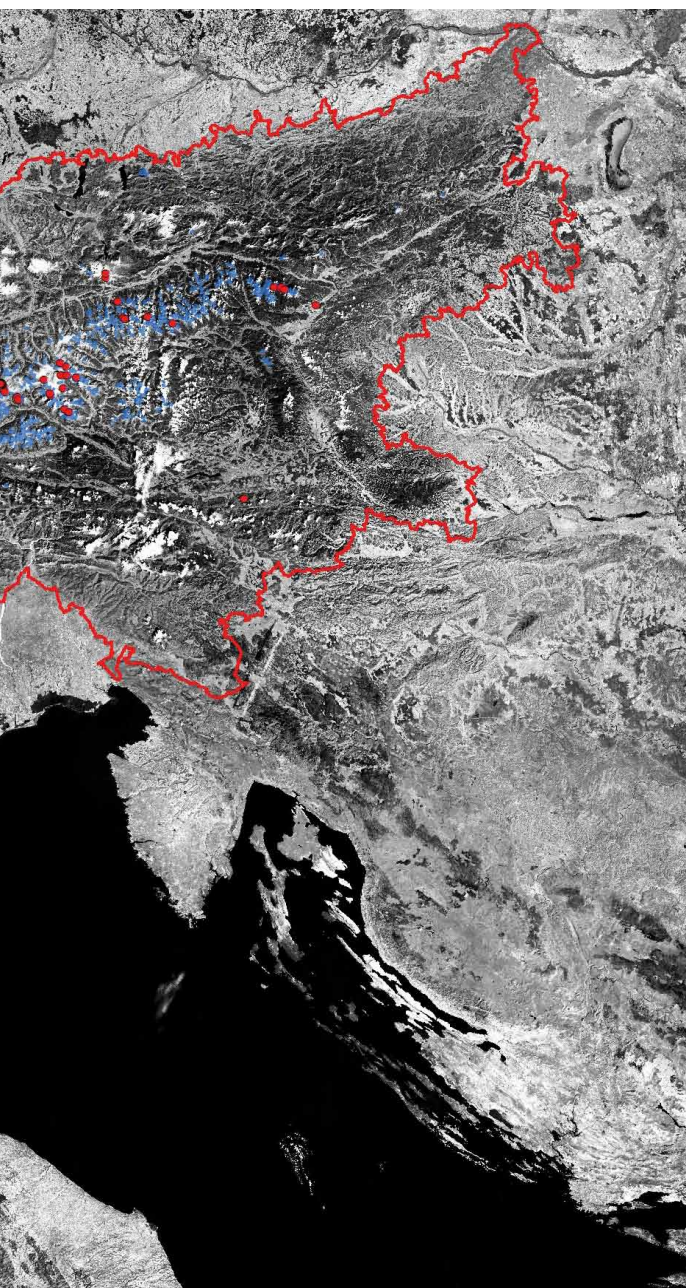
plus de l'équipe PermaNET, trente-cinq chercheurs et institutions ont fourni des données de qualité. Les contributeurs ont fourni des informations provenant de leurs propres domaines de recherche, des données et des connaissances qu'ils ont adaptées au format de données commun utilisé pour cet inventaire. Ces données ont été complétées par des enquêtes spécifiques menées en collaboration avec des services géologiques régionaux/locaux, des exploitants de stations de ski, des entreprises d'ingénierie et des associations de guides de montagne alpins.

Le nombre total d'indicateurs de permafrost de type ponctuel est de 408 (avril 2010), s'étendant de 44,29 à 47,47° N et de 5,91 à 14,88° E et couvrant tous les pays alpins sauf Monaco, le Liechtenstein et la Slovénie. Les données sur les glaciers rocheux comprennent sept inventaires provenant

d'Italie, d'Autriche, de Suisse et de France avec au total 4795 glaciers rocheux. Les sept inventaires sont régionaux (Val d'Aoste, Piémont, Vénétie, Trentin-Haut Adige en Italie, Massif du Combeynot en France, Ticino en Suisse et Autriche centrale et orientale) et ne couvrent donc pas l'ensemble des Alpes. Cet inventaire est néanmoins publié comme base de données sur Internet et les utilisateurs peuvent continuer à ajouter des observations sur le permafrost et des indicateurs de présence/absence après la fin du projet.

Vous trouverez **l'inventaire des indicateurs de permafrost** ici:

www.permanet-alpinespace.eu/products/PED



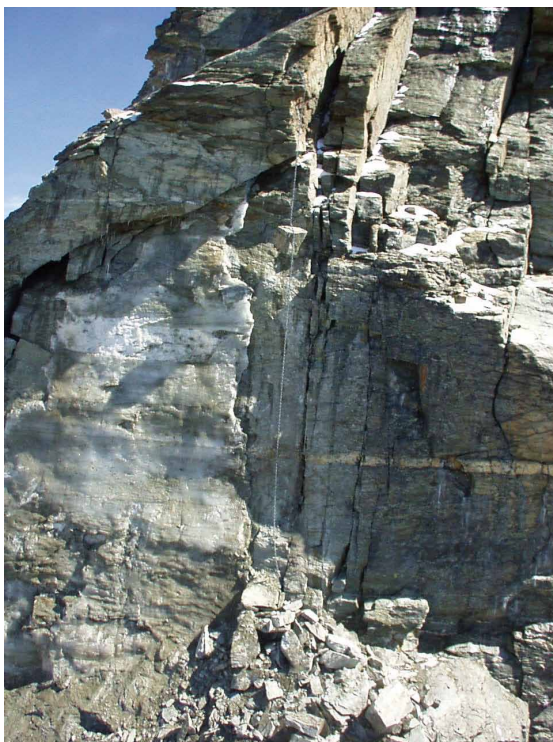
Exemples d'indicateurs de présence de permafrost:



Crevasse avec glace du sol visible. Photo: X. Bodin



Glacier rocheux. Photo: X. Bodin



Cicatrice d'éboulement avec glace mise au jour. Photo: L. Trucco.

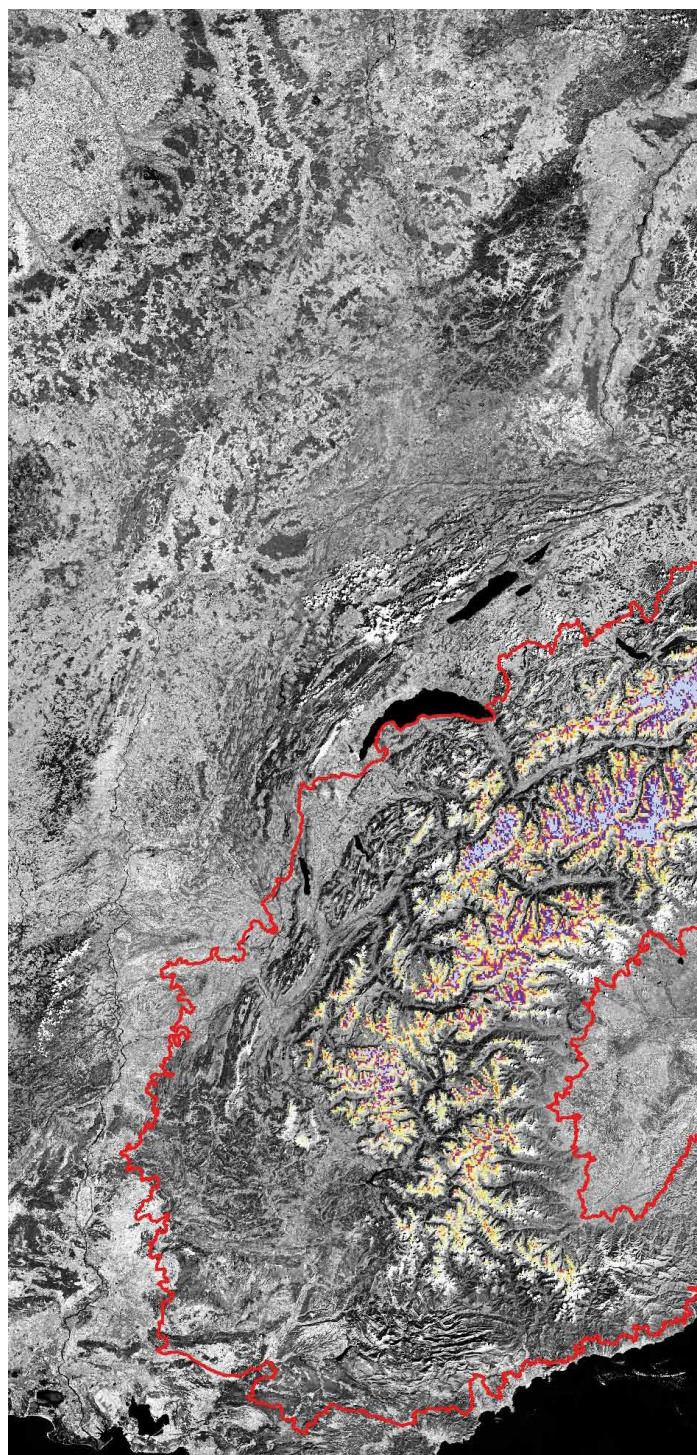


Forage. Photo: P. Deline

Modélisation de la répartition du permafrost

Le modèle statistique de répartition du permafrost qui a été développé possède deux sous-modèles, un pour les zones de formations superficielles et un pour les versants rocheux abrupts. Ils sont calibrés à l'aide des inventaires de glaciers rocheux et des mesures de température du rocher provenant de l'inventaire des indicateurs. Les variables explicatives sont la température de l'air moyenne annuelle, le rayonnement solaire potentiel et les précipitations annuelles moyennes. Celles-ci peuvent être calculées pour l'ensemble des Alpes et sont utilisées pour estimer la probabilité que des glaciers rocheux soient intacts ou que la

température superficielle des rochers soit inférieure à 0 °C. Ce modèle quantitatif a cependant besoin d'être complété par des informations supplémentaires car on aimerait aussi connaître les propriétés des zones qui ne sont pas des glaciers rocheux ou des versants rocheux abrupts. On introduit pour cela des valeurs de décalage déduites des recherches publiées et qui décrivent dans quelle mesure certains types de terrain peuvent être plus chauds ou plus froids que ce que le modèle prévoit. Comme la définition de ces décalages est dans une certaine mesure subjective, le résultat



La répartition du permafrost dans les Alpes

du modèle n'est plus considéré comme étant une probabilité mais comme un indice de permafrost.

Carte du permafrost

La carte finale du permafrost montre l'indice de permafrost selon une échelle de couleur, superposé à une carte de base servant de référence. Les glaciers, qui par définition ne sont pas du permafrost, sont distingués. La légende de la carte est toujours accompagnée d'une clé d'interprétation qui permet d'affiner les estimations avec les informations lo-

cales sur les caractéristiques du sol. La carte a été élaborée par l'Université de Zurich, observateur de PermaNET, en collaboration avec l'équipe PermaNET et elle est disponible gratuitement comme couche SIG ou en ligne pour les applications comme Google Earth avec une résolution spatiale d'environ 30 m.

Vous trouverez la **carte du permafrost** ici : www.permanet-alpinespace.eu/products/pfmap

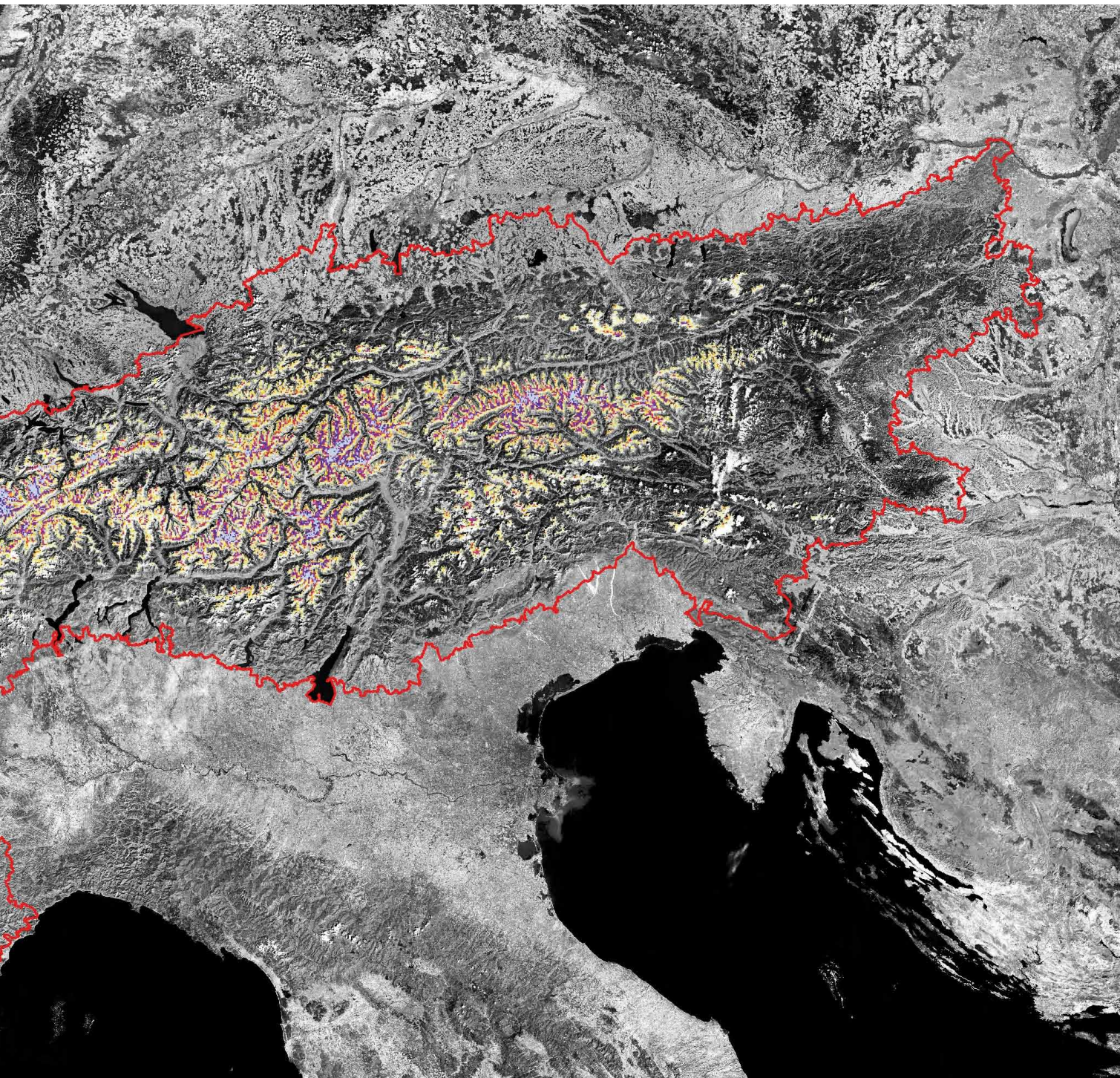


Fig. 3: Carte de la répartition modélisée du permafrost dans les Alpes.

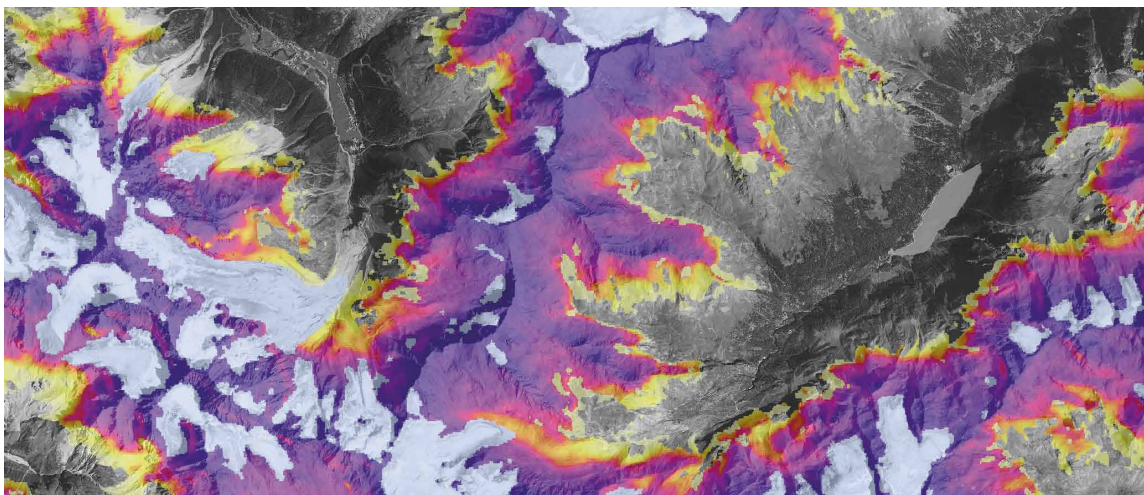






Fig. 4: Extrait de la carte finale du permafrost alpin. L'indice de permafrost codé en couleur est superposé à une carte de base servant de référence.

Légende de la carte

Cette carte présente un indice qualitatif décrivant la probabilité d'existence du permafrost. Elle est cohérente pour l'ensemble des Alpes et destinée à un usage pratique par exemple par les autorités publiques ou pour la planification et la maintenance d'infrastructures.

| | |
|---|--|
|  | Bleu: Permafrost dans presque toutes les conditions |
|  | Violet: Permafrost principalement dans des conditions froides |
|  | Jaune: Permafrost seulement dans des conditions très froides |
|  | Glacier |

Des facteurs locaux importants comme le matériau du sous-sol ou les conditions d'enneigement ne sont pas ou qu'approximativement pris en considération dans cette carte. Ils peuvent néanmoins être à l'origine de différences importantes dans la température du sol alors même que les conditions topographiques sont identiques. La légende de la carte est donc accompagnée de la **clé d'interprétation**, présentée à droite, qui peut être utilisée pour affiner davantage localement les estimations présentées sur la carte. Par exemple, il ne faut pas s'attendre à trouver du permafrost dans les matériaux fins (B) ou dans un rocher compact (H) quand la couleur jaune est affichée sur la carte. Dans certains cas, on peut trouver du permafrost hors de la zone colorée présentée. La carte présente une estimation des conditions; pour plus de certitude, des études locales (géophysiques ou forage) peuvent être réalisées sur place.

Cette carte a été élaborée par l'Université de Zurich, Suisse, dans le cadre du projet PermaNET.

Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. & Noetzli J. 2011: A statistical permafrost distribution model for the European Alps, *The Cryosphere Discussions*, 5, 1419-1459, www.the-cryosphere-discuss.net/5/1419

Paul, F., Frey, H. & Le Bris, R. (subm.): A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results. *Annals of Glaciology*, 52(59).

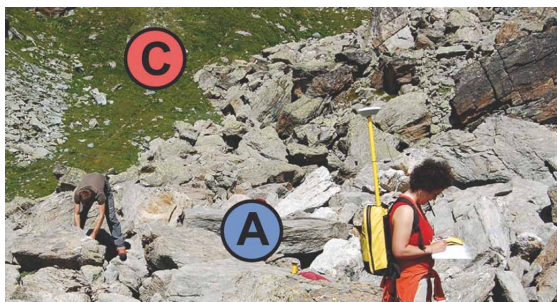


Photo: J. Fiddes



Photo: J. Fiddes



Photo: S. Gruber

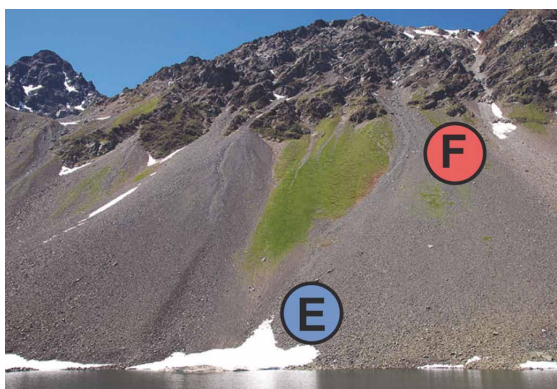


Photo: M. Phillips



Photo: S. Gruber

Clé d'interprétation

Taille des blocs, propriétés du sol et végétation

Un ensemble de gros blocs avec des vides ouverts non remplis de particules fines (A) indique des conditions froides. Un substrat rocheux, un sol à grains fins ou un sol avec des gros blocs mais rempli de particules fines (B) indique des conditions plus chaudes. Une couverture végétale dense (C) est généralement le signe d'une absence de permafrost.

Glaciers rocheux

Des glaciers rocheux actifs (intacts) (D) se repèrent par des signes de mouvement comme un front abrupt. Ce sont des indicateurs visuels fiables de permafrost au sein de leur masse mouvante de débris mais ils ne permettent pas de tirer des conclusions sur les zones voisines.

Position sur le versant et taches de neige durables

La position sur le versant peut affecter les températures du sol car la taille des blocs, la circulation de l'air dans le versant et la redistribution de la neige varient en fonction de la position. Souvent, les températures du sol sont plus froides au pied du versant (E). Il contient davantage de matériaux grossiers et reste recouvert longtemps par la neige des avalanches. De la même manière, d'autres taches de neige persistantes tardivement sont le signe de conditions localement froides. Le haut du versant (F) a souvent des conditions localement plutôt chaudes. Il contient fréquemment des plus petits blocs et des creux remplis de matériaux fins.

Versants rocheux abrupts

Les versants rocheux abrupts présentent des degrés d'hétérogénéité différents en raison de la microtopographie et de la fracturation. Une hétérogénéité élevée (G) permet souvent une fine couche de neige ainsi qu'une ventilation et un dépôt de neige dans les grandes fractures, signe de conditions locales froides. Un rocher abrupt, lisse et sans grandes fractures (H) indique des conditions plus chaudes. Cet effet est plus prononcé dans les zones exposées au soleil que dans les zones à l'ombre.

Le permafrost et les risques naturels associés

Le WP6 a étudié le lien entre le permafrost et les risques naturels dans des conditions de changement climatique. Le groupe de travail a évalué plusieurs méthodes de détection et de suivi des mouvements de terrain liés au permafrost et fait des recommandations pour la gestion des risques dans les zones affectées par la dégradation du permafrost.

Quels risques sont liés au permafrost?

Un état des connaissances sur les risques liés au permafrost et à la dégradation du permafrost a été élaboré. Ses quatre chapitres traitent des glaciers rocheux, des laves torrentielles, des écroulements rocheux et des mouvements locaux du sol et de leurs effets sur les infrastructures. Chaque chapitre résume les connaissances actuelles sur ces processus et leur lien avec le changement climatique et est illustré par plusieurs études de cas récentes réalisées dans les Alpes. Ces études de cas montrent la grande variété des effets sur les infrastructures dans les zones de haute montagne.

Que peut-il se passer si les changements climatiques modifient les régimes de permafrost?

Les glaciers rocheux sont des accumulations fluantes de débris, se déplaçant généralement à une vitesse de quelques cm ou dm par an. Sur les glaciers rocheux observés, on remarque des variations de vitesse dues au climat. Dans la plupart des cas, les modifications de vitesse sont modérées, en lien avec les variations de la température moyenne annuelle de surface du sol : une augmentation de la température du sol entraîne une accélération des mouvements, et inversement. Dans certains cas, une accélération très forte et irréversible, allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres par an,

a été observée. Ceci peut provoquer des éboulements sur le front du glacier rocheux, et la progression voire même la rupture et l'effondrement de sa partie aval (fig. 5 et 6).

Tous les **mouvements de surface** peuvent provoquer des dommages sur les infrastructures construites sur ce terrain instable. De petits mouvements peuvent être compensés en adaptant la conception, mais les accélérations potentielles dues au réchauffement climatique pourraient les mettre en péril. Dans tous les cas, construire sur du permafrost implique des frais de construction et de maintenance supplémentaires et réduit la durée de vie des infrastructures.

Les écroulements rocheux sont dangereux pour les activités montagnardes dans les Alpes et les infrastructures comme les téléphériques, les chemins de fer et les routes de montagne, ou les stations de ski. Les grands écroulements peuvent menacer les habitants de la vallée, même éloignés de la zone où ils se déclenchent. La dégradation du permafrost des parois rocheuses due au climat est probablement une des principales causes de déclenchement des écroulements actuels et futurs (fig. 6) comme le suggère la glace massive qui a été observée dans plusieurs zones de départ, et l'augmentation $> 1^\circ\text{C}$ de la température moyenne annuelle de l'air dans les Alpes au cours du XXe siècle, qui s'est accélérée depuis les années 80.

Lorsque les fronts des glaciers rocheux surplombent des versants abrupts, des processus secondaires peuvent mobiliser les débris libérés. Ce phénomène et l'activité d'éboulement dans les zones de permafrost peut augmenter, par exemple, l'alimentation en débris et donc le volume des charriages de débris. Le permafrost peut influencer l'activité des **laves torrentielles** de différentes manières, principalement en augmentant l'alimentation en débris vers le système torrentiel mais aussi en influençant les modalités d'écoulement de

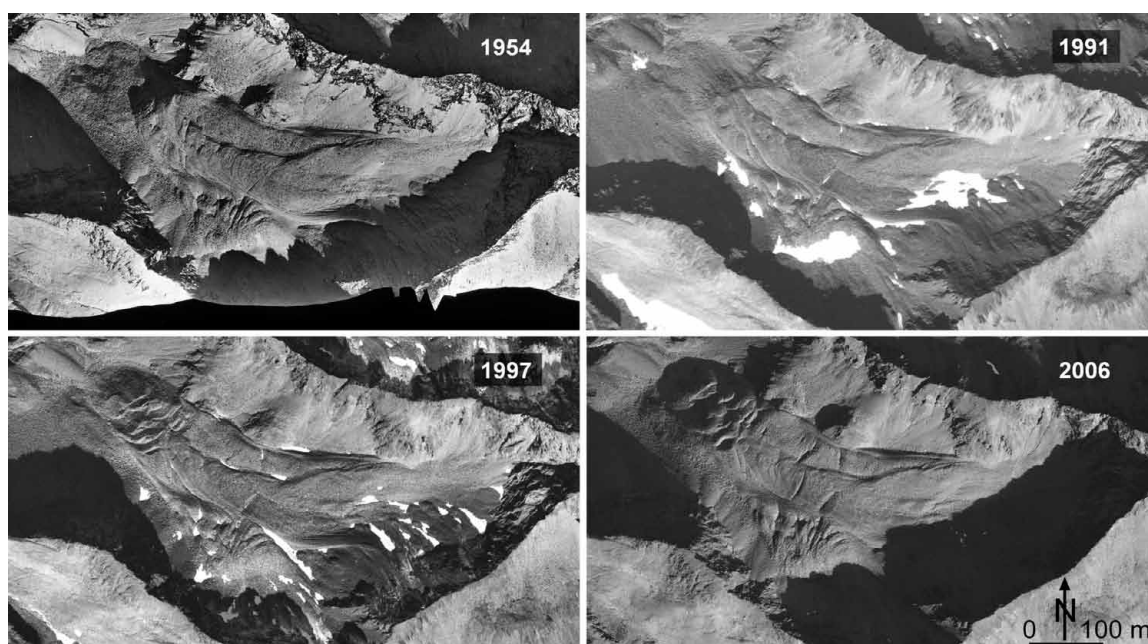


Fig. 5: Photographies aériennes du glacier rocheux de Hinteres Langtalkar (Autriche) entre 1954 et 2006. Formation de crevasses et désintégration due à des phénomènes de glissement actifs depuis 1994 sur la zone frontale. Photos aériennes de l'Office autrichien de météorologie et de topographie (BEV), autorisation de V. Kaufmann et R. Ladstädter.

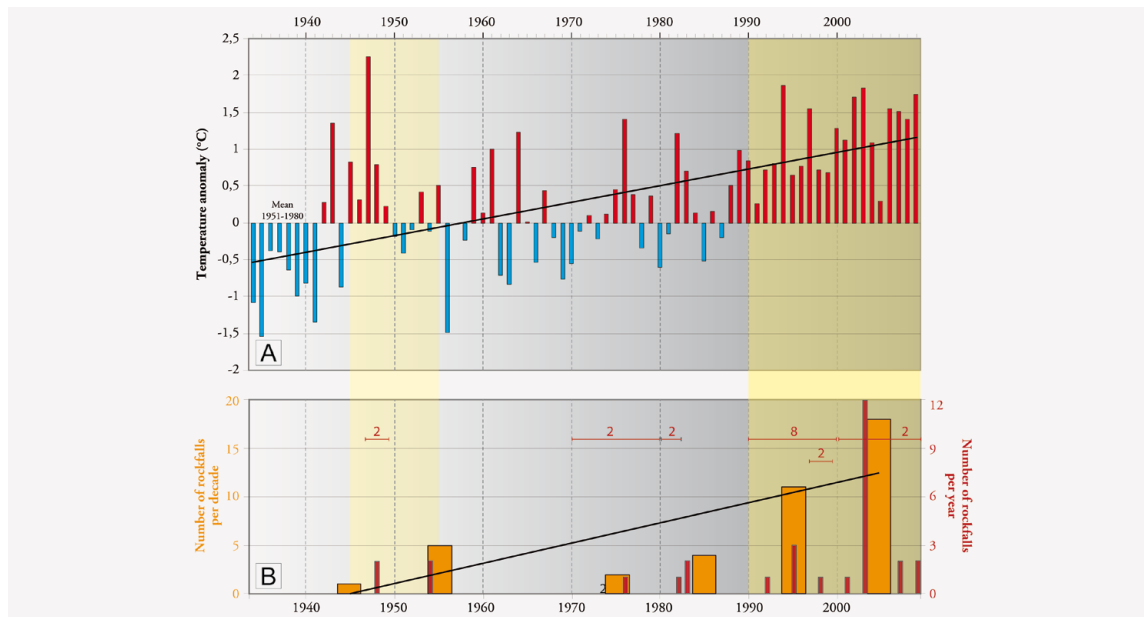


Fig. 6: Evolution comparative du climat à Chamonix (1040 m d'altitude) et éboulements sur la face nord des Aiguilles de Chamonix (massif du Mont Blanc, France). A: Température moyenne annuelle de l'air, écart à la moyenne 1951 – 1980; B: Nombre d'éboulements par décennie et par an. Ligne noire: tendance (régression linéaire, par décennie pour B); larges barres dans B: éboulements non datés avec précision. (données météorologiques: Météo France)

l'eau. Mais l'influence du permafrost sur le charriage des débris dépend principalement des caractéristiques spécifiques du bassin versant torrentiel. La fonte de la glace dans les sols gelés ou les versants d'éboulis suite à l'épaississement de la couche active peut entraîner la perte de la glace interstitielle qui stabilisait le matériau. Ceci peut augmenter la quantité de matériaux mobilisables, provoquer l'affaissement du sol dans les zones plates et des mouvements de terrains sur les versants en pente. Dans les versants abrupts, le permafrost influence la conductivité hydraulique et la stabilité générale du versant. En été, la couche active est souvent saturée car la couche de permafrost est un aquiclude. La capacité d'infiltration est de ce fait faible et le ruissellement superficiel élevé. Le toit du permafrost peut agir comme une surface de rupture favorisant les glissements de terrain dans la couche active. Conséquences possibles : glissement de la couverture de débris, subsidence dans les matériaux de surface et mouvements de terrain consécutifs. La fonte de la glace du sol contribue à la formation de phénomènes thermokarstiques et de lacs thermokarstiques suivie d'inondations dues à la vidange de ces lacs.

Quelles sont les actions nécessaires pour faire face aux risques sur les sites concernés?

Les processus décrits liés au permafrost et à la dégradation du permafrost ne génèrent pas des situations de risque sur de larges zones. Cependant, dans certains cas, ils peuvent nettement augmenter les aléas et les risques. La première étape dans tout projet de planification est de se reporter à la carte de répartition du permafrost. Si la carte montre la présence possible de permafrost sur le site étudié, il est recommandé d'utiliser des méthodes de détection du permafrost comme celles décrites dans le manuel PermaNET. Si le

permafrost doit être pris en considération, des méthodes de suivi adaptées permettent l'analyse des processus. Afin d'évaluer les approches opérationnelles pour la détection et le suivi des mouvements de pente et la présence de glace dans le sol dans les zones de permafrost, six fiches méthodiques ont été mises au point sur dGPS, GPR, DInSAR, ERT, TLS et la photogrammétrie terrestre. Les principes de base de chaque méthode sont résumés. Chaque fiche présente les applications possibles et les principaux résultats, les potentialités et les limites et est complétée par des références et illustrée par quelques chiffres. Certaines de ces méthodes ont été comparées, et une analyse avantages et désavantages a été menée en complément.

Vous trouverez **le rapport sur les risques naturels dans les zones de permafrost** et **le manuel pour la détection et la cartographie du permafrost de montagne** ici:

www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrosthazards



Fig. 7: Station de référence DGPS sur un point fixe face au glacier rocheux de Reichenkar (Autriche). Foto: K. Krainer

Le permafrost et le changement climatique

Les régions de haute altitude et de haute latitude sont généralement considérées comme particulièrement sensibles aux effets du changement climatique. Une grande partie du permafrost dans les Alpes, par exemple, est proche du point de fusion. Elle est donc très sensible au réchauffement atmosphérique.

Réponse thermique et géomorphologique du permafrost au changement climatique actuel et futur

Les effets thermiques et géomorphologiques possibles sont variés et les réponses thermiques du permafrost peuvent être les suivantes:

- a) Augmentation de la température du sol et donc réchauffement du permafrost;
- b) Fonte du permafrost avec trois effets : réduction de l'étendue des zones de permafrost, épaissement de la couche dégelée en saison chaude, et augmentation

- de la circulation et de la pression de l'eau dans le sol;
- c) Modifications du nombre et des caractéristiques des cycles gel-dégel.

Les réactions géomorphologiques du permafrost peuvent être:

- a) Modifications de la vitesse de déplacement des glaciers rocheux (verticalement et horizontalement);
- b) Modifications du mode de déplacement des glaciers rocheux (passant du fluage à un glissement basal, voire un effondrement);
- c) Modifications dans les processus d'altération cryogénique;
- d) Modifications du volume et de l'étendue des versants instables;
- e) Modifications de la fréquence et de la magnitude des mouvements de masse comme les écoulements, les glissements rocheux ou les laves torrentielles

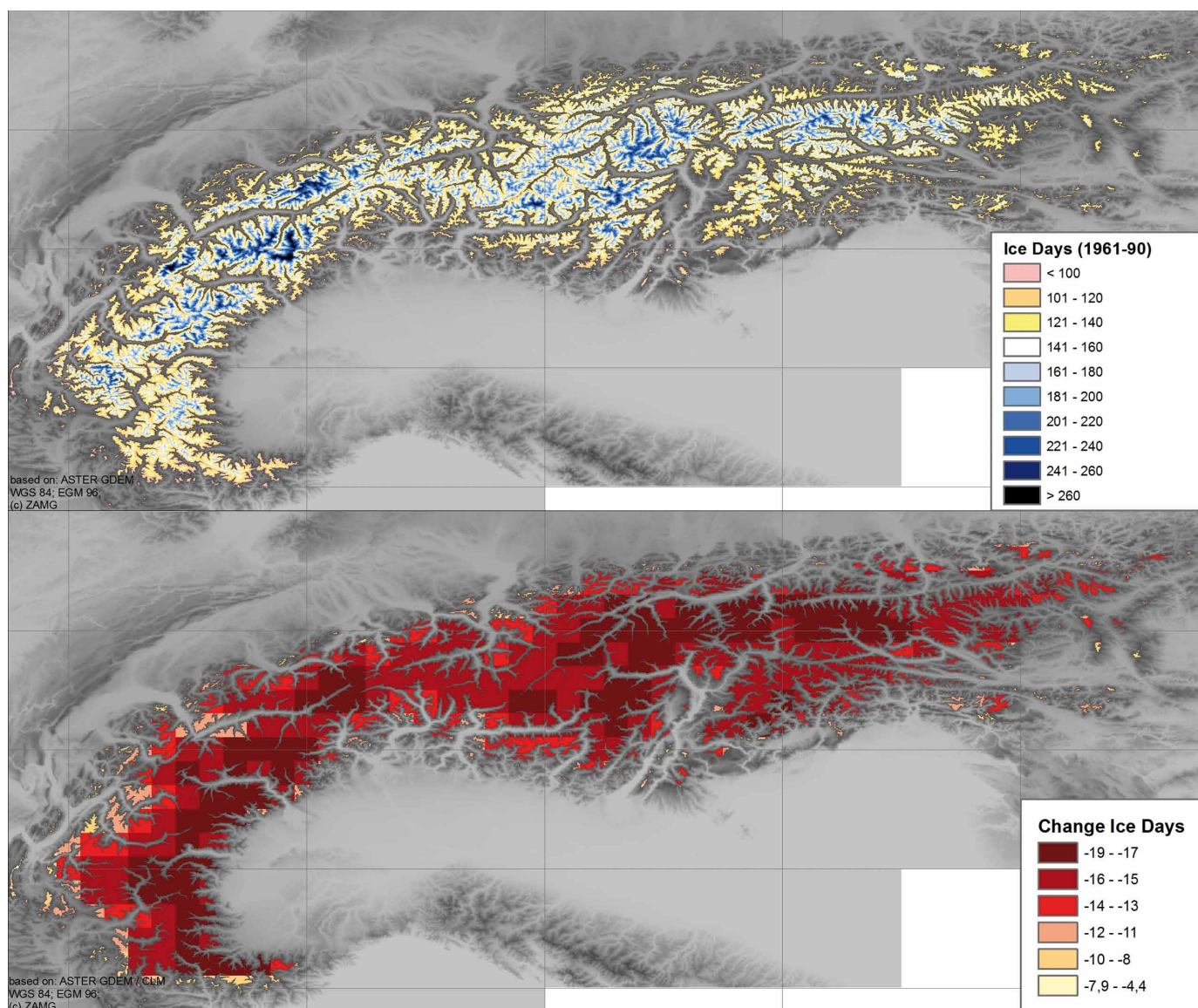


Fig. 8: Jours sans dégel (1961 – 90) et différence estimée du nombre de jours sans dégel entre 1961 – 90 et 2021 – 2050 à plus de 1800 m d'altitude. Source: ZAMG.

Etudes de cas dans les Alpes européennes

PermaNET a essayé de comprendre la réaction thermique et géomorphologique du permafrost aux changements climatiques actuels et futurs. Pour y parvenir, des études ont été menées dans plus de 10 sites différents répartis dans l'ensemble des Alpes en Autriche, en Suisse, en France et en Italie. Dans une première étape, les changements climatiques actuels et futurs ont été analysés et modélisés en se concentrant sur les jours de gel, les jours sans dégel et les jours avec gel-dégel entre deux périodes 1961–1990 et 2021–2050 dans l'espace alpin (fig. 8). Ensuite, les résultats de l'analyse des changements climatiques ont été combinés aux données provenant des sites d'études en analysant l'évolution thermique et/ou géomorphologique des formes concernées et leur réaction future possible à un changement climatique prévisible. L'étude a montré le grand nombre de possibilités de réaction du permafrost avec le réchauffement du climat. Deux exemples sont brièvement présentés ici :

Exemple 1: Ecoulements dans le massif du Mont Blanc

Au total, 139 écoulements ont été constatés entre 2007 et 2009 dans la zone centrale du massif du Mont Blanc, dont 53 ont été datés avec précision. Parmi eux, 51 éboulements ont eu lieu pendant les mois les plus chauds de l'année et 38 se sont produits après une période de hausse des températures moyennes diurnes de l'air pendant au moins deux jours (fig. 9). Il est important de noter que plus l'été est chaud, plus les zones de détachement des écoulements sont en altitude. Ceci indique pour l'avenir que les écoulements se produiront à des altitudes plus élevées, auparavant non concernées par ce phénomène. Ils toucheront des gens et des infrastructures dans des zones de départ, de transport et de dépôt nouvelles.

Exemple 2: Vitesse des glaciers rocheux en Autriche centrale

Les glaciers rocheux actifs sont des phénomènes de fluage du permafrost. Leur mouvement est fortement lié aux conditions climatiques et donc aux températures du sol. Comme le montrent différentes études, les mouvements des glaciers rocheux suivis dans les Alpes européennes relevés pendant les dernières années et décennies présentent des variations semblables. Par exemple, sur le glacier rocheux Dösen en Autriche centrale, deux pics de vitesse élevée ont été détectés en 2003-2004 et 2008-2010 (fig. 10). Les mesures de vitesse montrent que ce glacier rocheux réagit plus rapidement à une période froide en décélérant. Au contraire, le glacier rocheux a besoin de plus de temps pour réagir aux périodes plus chaudes en accélérant le mouvement. Ceci est lié à l'inertie du système du glacier rocheux face au réchauffement du sol et aux changements de vitesse. Cela signifie que pour l'avenir, le réchauffement climatique prévisible aura d'abord pour conséquence une augmentation des vitesses de déplacement des glaciers rocheux. Cependant, à plus longue échéance, cela entraînera une inactivation de

nombreux glaciers rocheux actuellement actifs. Certains glaciers rocheux dégradés peuvent même complètement s'effondrer et sont donc des sources de risques naturels.

Vous trouverez le **rapport sur la réponse thermique et géomorphologique du permafrost aux changements climatiques actuels et futurs dans les Alpes européennes** ici :

www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrostresponse

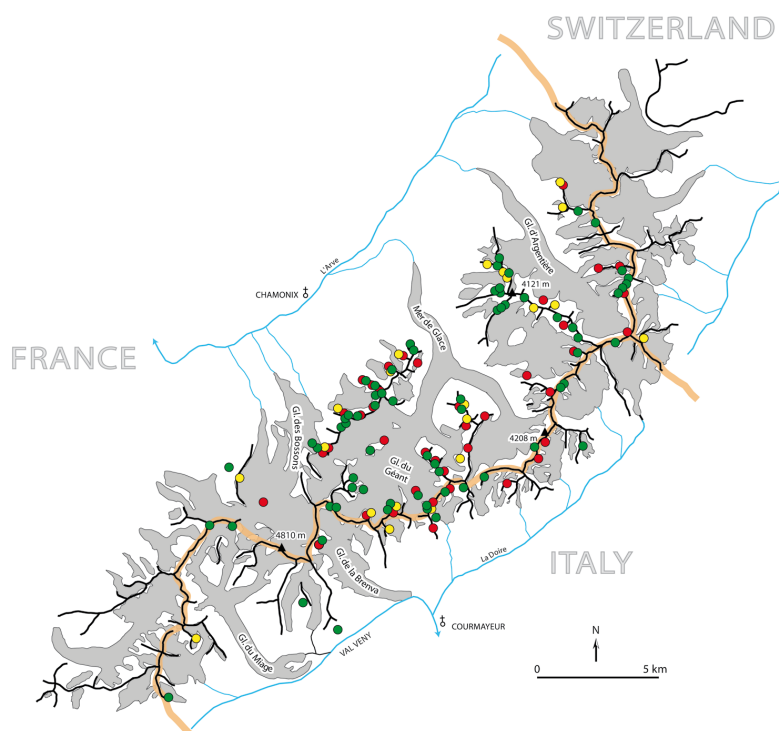


Fig. 9: Ecoulements relevés dans le massif du Mont Blanc en 2007 (points rouges), en 2008 (points jaunes) et en 2009 (points verts).

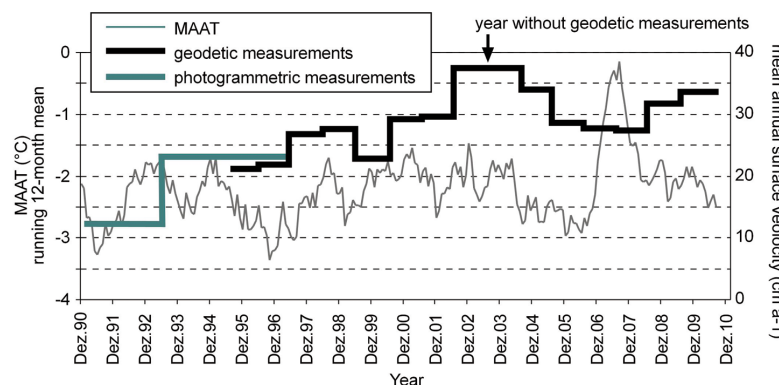


Fig. 10: Température moyenne annuelle de l'air (moyenne mobile sur 12 mois) et déplacements superficiels du glacier rocheux de Dösen entre 1990 et 2010.

Le permafrost et la gestion des ressources en eau

Les connaissances sur l'impact du changement climatique sur le permafrost alpin sont encore incomplètes, tout comme sur la manière dont la fonte accélérée des glaces du permafrost affecte le débit et la qualité de l'eau des sources alpines. L'augmentation de la température de l'air a provoqué la libération d'eau de fonte fortement concentrée en provenance des glaciers rocheux. Face à l'augmentation en ions et en métaux lourds, la composition chimique de l'eau des lacs de haute altitude qui sont alimentés par l'eau de fonte des glaciers rocheux peut changer de manière significative. Les fortes concentrations en nickel (Ni) peuvent notamment fortement dépasser la limite pour l'eau potable, comme on a pu le constater dans l'eau de fonte provenant des glaciers rocheux actifs et des glaciers dans le Schnalstal (Alpes de l'Ötztal).

La teneur en glace du permafrost alpin et des glaciers rocheux est encore inconnue. Cependant, le régime hydrologique des glaciers rocheux actifs est fortement influencé par la quantité d'eau stockée sous forme de glace dans le sol du permafrost. Pour étudier le régime hydrologique des glaciers rocheux actifs et leur réaction au changement climatique, le débit, la température de l'eau, la conductivité électrique et la composition chimique (anions, cations, métaux lourds) des sources de glaciers rocheux ont été mesurés à Lazaun (Schnalstal) et comparés aux sources et aux cours d'eau de fonte de glaciers non concernés par le permafrost. Des carottages ont été réalisés sur deux glaciers rocheux actifs (Lazaun – Schnalstal et Rossbänk – Ultental). Les carottes ont été étudiées en détails et sont actuellement analysées. Cette analyse permettra de déterminer la teneur en glace, la composition chimique de la glace, les isotopes stables et le contenu en pollens fossiles. Les trous de forage ont été équipés de sondes de température et d'inclinomètres qui permettront d'obtenir des informations sur les caractéristiques thermiques et la dynamique des glaciers rocheux. Le carottage et les mesures hydrologiques et chimiques sont complétées par une analyse sédimentologique du manteau de débris des glaciers rocheux:

types de clastes, taille des grains, répartition de la taille des grains (tri), degré d'arrondi et orientation des clastes sur la surface, teneur en sédiments fins, épaisseur et structure du manteau de débris, composition minéralogique et géochimique et teneur en glace de la couche gelée supérieure. Des méthodes géophysiques comme le géoradar fournissent des informations supplémentaires sur l'épaisseur, la structure interne et la teneur en glace des glaciers rocheux actifs et du permafrost.

La dégradation du permafrost due au changement climatique peut avoir des conséquences importantes sur les écosystèmes, la stabilité des paysages et sur les gens et leurs moyens de subsistance.

Nous recommandons d'étudier avec soin les sources provenant de glaciers ou de permafrost alpin pendant au moins une année hydrologique afin de déterminer la qualité (anions, cations, métaux lourds, bactéries), la turbidité, la température et le débit de l'eau avant d'utiliser de telles sources pour l'alimentation en eau potable.

Vous trouverez le **rapport sur « Le permafrost et la gestion des ressources en eau »** ici:

<http://www.permanet-alpinespace.eu/products/pfwaterressources>



Mesures de débit. Photo: K. Krainer



Echantillon de glace provenant d'un glacier rocheux. Photo: D. Tonidandel



Carottage sur un glacier rocheux. Photo: D. Tonidandel

Recommandations pour les décideurs

L'approche interdisciplinaire et intégrée pour compiler les connaissances existantes sur le permafrost dans les Alpes européennes a permis de créer de nombreux produits de grande valeur qui peuvent être utilisés dans la gestion pratique des risques naturels et dans l'aménagement des territoires.

Les principaux produits du projet PermaNET sont les suivants:

- le réseau d'observation du permafrost dans l'Espace alpin et les manuels associés,
- l'inventaire des indicateurs de permafrost,
- la carte de la répartition du permafrost dans les Alpes,
- des directives pour la prise en compte du permafrost dans la gestion des risques.

Le réseau d'observation du permafrost étend les bases de connaissances de l'état thermique du permafrost dans les Alpes et permet de suivre la réponse thermique future du permafrost aux changements climatiques. D'une part, ce réseau de suivi sur le long terme permet d'enregistrer les signes existants du réchauffement global et d'autre part, il fournit des données fondamentales pour évaluer les conséquences des changements climatiques sur le permafrost et les risques naturels qui y sont liés.

Les données élaborées sur la répartition du permafrost fournissent une base de décision pour interpréter les changements observés dans le paysage. Pour le secteur de l'aménagement, l'inventaire et la carte du permafrost fournissent une base de décision dans le choix de méthodes adéquates pour des études de terrain détaillées.

Si la carte indique la présence possible de permafrost à un endroit spécifique où des problèmes d'instabilité du sol existent ou bien où des infrastructures sont prévues, les manuels élaborés pour la détection et le suivi du permafrost pourraient servir de base pour décider quelles techniques utiliser.

Avec ces produits, PermaNET a contribué à optimiser les bases de décision dans l'aménagement du territoire, la gestion des risques naturels et la gestion des ressources en eau.

Pour résumer les principaux résultats de PermaNET, nous pouvons formuler les recommandations suivantes:

1. Les connaissances sur le permafrost et les effets du changement climatique sur le phénomène du permafrost et les risques liés sont fragmentées et ne sont pas au même stade de développement partout dans les Alpes. Le regroupement de toutes les expériences et mesures en une seule base de connaissances fournit une base de décision très complète et a permis d'élaborer une carte cohérente de la répartition du permafrost dans les Alpes. Il est impératif de poursuivre la collaboration interdisciplinaire et transnationale

pour continuer à compléter cette base de connaissances.

2. Le phénomène du permafrost et la dégradation du permafrost varient considérablement selon les endroits des Alpes. Les rapports de PermaNET sur l'état actuel présentent les différents aspects du sujet. Le phénomène du permafrost et les dangers naturels qui y sont liés (y compris les effets du changement climatique) doivent être pris en compte dans la gestion des aléas et des risques naturels d'une manière coordonnée dans tout l'espace alpin. Les risques naturels liés au permafrost et à la dégradation du permafrost sont limités localement à des cas spécifiques et ne doivent être ni surestimés ni négligés. Le phénomène doit être étudié en détails sur le site avant de tirer toute conclusion ou de prendre toute décision dans la gestion des risques. Certaines conclusions s'appliquent à de nombreux sites: (i) éviter de construire des infrastructures sur un glacier rocheux actif et devant son front; (ii) respecter une zone de sécurité en dessous d'un glacier rocheux; (iii) contrôler régulièrement les sentiers et pistes traversant un glacier rocheux ou passant devant son front.

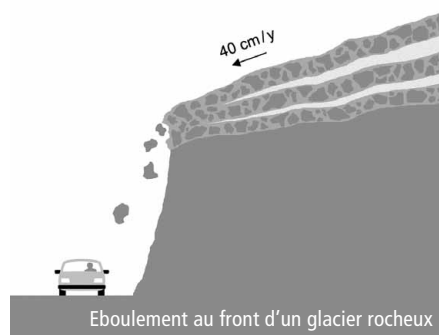
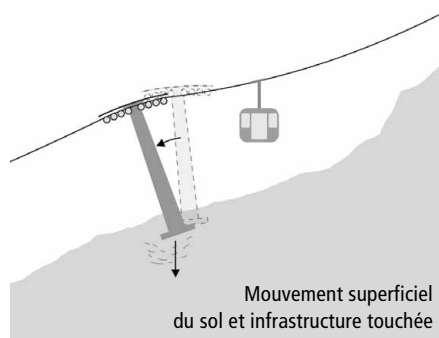
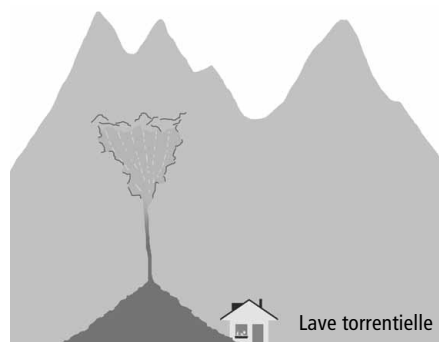
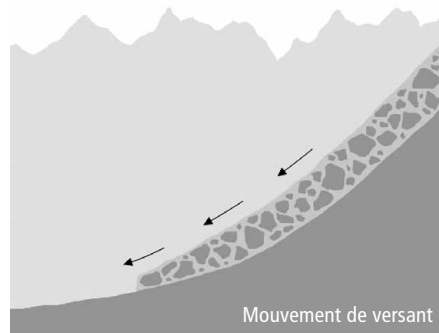
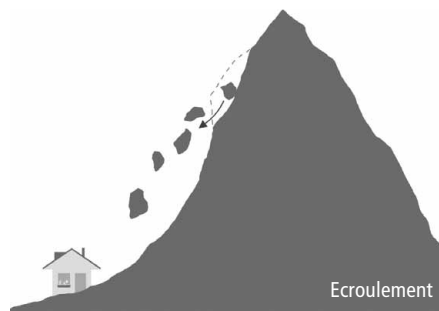
3. Pour tous les travaux d'aménagement en haute montagne, il est important de savoir s'il est possible que du permafrost existe, et si c'est le cas quels sont les effets potentiels sur l'activité prévue. Il est utile d'être davantage conscient de l'existence du permafrost de montagne et de ses effets négatifs possibles sur les activités économiques afin d'améliorer l'efficacité et la durabilité des investissements. Tous les acteurs sont invités à utiliser la carte du permafrost élaborée et à ajouter leurs propres observations à l'inventaire des indicateurs de permafrost. Grâce à cette aide, les bases de données pourront être complétées et les connaissances sur la répartition du permafrost pourront être améliorées.

4. Dans le cas de déformations de versants dans des zones de permafrost, des techniques de surveillance des versants sont primordiales pour évaluer les risques et les prévenir. Il faut encourager l'usage. Il faut prendre suffisamment de temps pour analyser le problème en détail. Le suivi des mouvements de pente dans les zones de permafrost exige des méthodes adaptées et doit répondre à des besoins spécifiques. Tous les acteurs sont invités à utiliser le manuel élaboré pour la détection et le suivi du permafrost. Il donne des conseils pour choisir la technique de suivi appropriée.

5. Afin de partager les expériences, d'élargir la base de données et de favoriser l'harmonisation, il est nécessaire de maintenir le réseau transnational de chercheurs et de praticiens impliqués dans le suivi du permafrost. Nous recommandons aux autorités environnementales nationales de soutenir le développement de ce réseau de personnes et d'institutions et de financer la maintenance des stations de suivi. Les effets du changement climatique sur le permafrost ne peuvent être quantifiés que par un suivi sur le long terme de l'évolution du permafrost sur une large zone.

Perspectives

Le projet PermaNET a posé les bases pour l'établissement d'un réseau transnational de suivi du permafrost dans les Alpes. Désormais, c'est aux acteurs et aux décideurs de construire sur ces bases et de garantir la continuité du suivi du permafrost. Les partenaires du projet PermaNET et les institutions partenaires continueront à entretenir et à améliorer le réseau de suivi. L'étape suivante consiste à définir un moyen de coordonner le réseau transnational d'observation du permafrost, de compiler et d'analyser les données de suivi du permafrost dans un rapport périodique sur l'état thermique du permafrost dans les Alpes européennes.



Les personnes suivantes ont contribué au projet PermaNET et aux activités liées:

Lorenz Böckli,
Xavier Bodin,
Lucia Borasi,
Laurence Bourjot,
Fulvio Bovet,
Jörg Buchmann,
Anselmo Cagnati,
Alberto Carton,
Edoardo Cremonese,
Andrea Crepaz,
Michèle Curtaz,
Matteo Dall'Amico,
Valentina Defendi,
Philip Deline,
Thomas Echelard,
Simone Frigerio,
Jacopo Gabrieli,
Anna Galuppo,
Michel Gay,
Stephan Gruber,
Mauro Guglielmin,
Viktor Kaufmann,
Andreas Kellerer-Pirklbauer,
Alexander Klee,
Gernot Koboltschnig,
Karl Krainer,
Christine Kroisleitner,
Jean-Michel Krysiecki,
Kathrin Lang,
Stéphanie Letey,
Gerhard Lieb,
Laura Magnabosco,
Volkmar Mair,

Matteo Mantovani,
Markus Maukisch,
Joanne Moar,
Matthias Monreal,
Umberto Morra di Cella,
Stefania Muti,
Caterina Naldi,
Jeannette Noetzli,
Luca Paro,
Christine Pasquettaz,
Alessandro Pasuto,
Marcia Phillips,
Paolo Pogliotti,
Andreas von Poschinger,
Hugo Raetzo,
Ludovic Ravel,
Claudia Riedl,
Riccardo Rigon,
Simonetta Riva,
Philippe Schoeneich,
Wolfgang Schöner,
Hubert Siegel,
Roberto Seppi,
Johann Stötter,
Christoph Suter,
David Tonidandel,
Marco Vagliasindi,
Jean-Marc Vengeon,
Iris Voyat,
Giorgio Zampedri,
Andreas Zischg,
Matteo Zumiani

Informations supplémentaires:

Le site Internet du projet PermaNET présente les rapports détaillés sur les sujets décrits dans cette brochure. Les rapports détaillés, les manuels et les directives disponibles sur le site Internet fournissent en outre des bibliographies pour plus d'informations.

Le site Internet PermaNET offre des services web pour visualiser et analyser l'inventaire compilé des indicateurs de permafrost et la carte de répartition du permafrost. Pour plus d'informations, allez voir:

www.permanet-alpinespace.eu

