

Regards croisés sur
la sécurité des transports par câble
en montagne
face aux évolutions du climat

**Impacts constatés du changement climatique
sur la stabilité des terrains.**

*Pierre-Alain DUVILLARD, Naga Géophysique ;
Ivan BRUNET, Alpes-Ingé ; Mathieu CAMUS,
SAGE.*

Impacts constatés du changement climatique sur la stabilité des terrains-supports d'infrastructures

Ivan BRUNET, Mathieu CAMUS, Pierre-Allain DUVILLARD



Alpes Ingé
Parc d'activités Eurékalp
38660 SAINT VINCENT DE
MERCUZE
www.alpes-inge.com
ivan.brunet@alpes-inge.com



**Société Alpine de
Géotechnique**
2 rue de la Condamine
38610 GIERES
www.sage-ingenierie.com
m.camus@sage-ingenierie.com



NAGA Geophysics
229 rue Joseph Fontanet
73000 Chambéry
<https://naga-geophysics.com/>
pierre-allain.duvillard@naga-
geophysics.com



Crée en 1999

Bureau d'ingénierie Civile et
Géotechnique indépendant

Ivan BRUNET

Ingénieur Géotechnicien - Directeur Général

Principaux domaines d'activités :

- **Risques naturels** : Chutes de blocs, glissements de terrains, Risques glaciaires & périglaciaires, Crues torrentielles...
- **Aménagements Montagne** : Remontées mécaniques, Pistes de ski, Retenues d'altitude, Passerelles himalayennes, Projets hydroélectriques...
- **Géotechnique & Travaux Spéciaux** : Soutènements, Fondations spéciales, Inspections détaillées d'ouvrages d'art, Investigations géotechniques accès difficiles...
- **Installations Classées** : Installations de stockage de déchets, Digues, Barrages, Cours d'eau, Mines & Carrières
- **Instrumentation et suivi à distance** : Extensomètres, Piezomètres, Inclinomètres, Capteurs de déplacements X,Y, Z...



Crée en 1981

Bureau d'études géotechniques
indépendant

Mathieu CAMUS

Res. Pole Infrastructures de Montagne

Principaux domaines d'activités :

- **Risques naturels** : glissements de terrains, éboulements rocheux...
- **Infrastructures de montagne** : remontées mécaniques, piste de ski, retenues collinaires...
- **Travaux publics** : bâtiments, Ouvrages d'Art, soutènements, terrassements, routes, conduites forcées,...
- **Digues, barrages et aménagement de cours d'eau**
- **Instrumentation/auscultation** : ouvrages et sites instables
- **Etudes géophysiques et de dynamique des sols.**
- Essais de mécanique des sols et roches en laboratoire



Crée en 2020

Recherche appliquée et conseil en
géosciences

Pierre-Allain DUVILLARD (PhD)

Res. Technique - Co-fondateur NAGA

Thèse en 2019 « Déstabilisation des terrains-supports d'infrastructures de haute montagne »

- *29 articles classés rang A*
- *3 citations dans le GIEC*



Hydro-géophysique



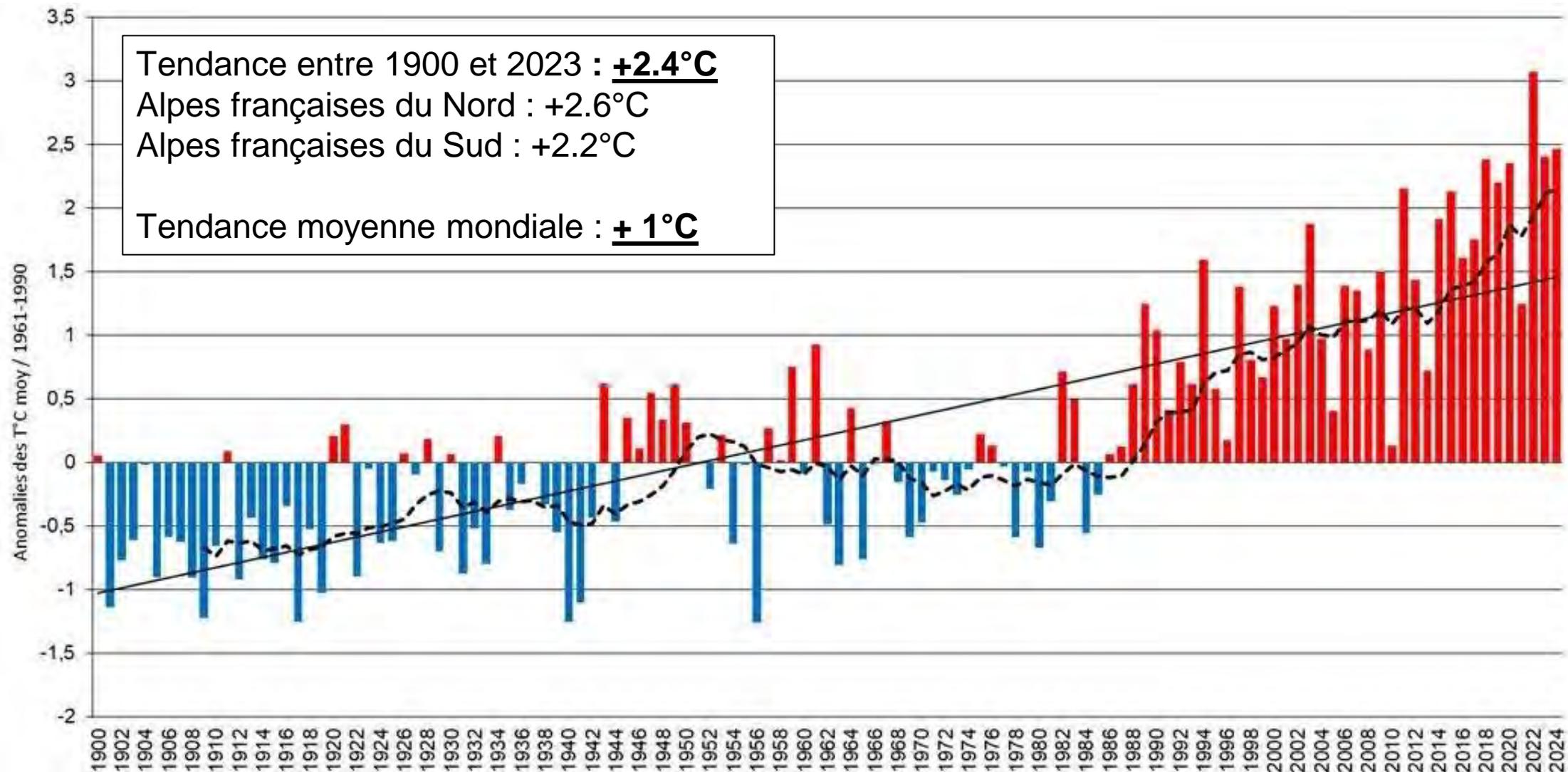
Risques naturels



Imagerie 3D - 4D

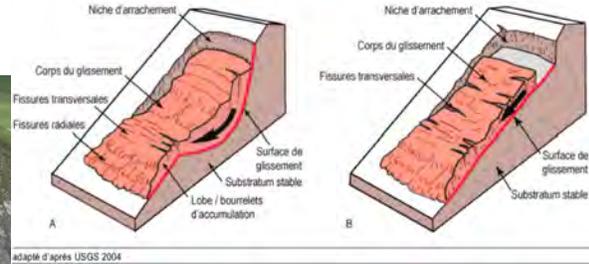


Infrastructures



Anomalie des températures moyennes annuelles (en °C) par rapport à la normale 1961-1990

Glissements de terrain



adapté d'après USGS 2004



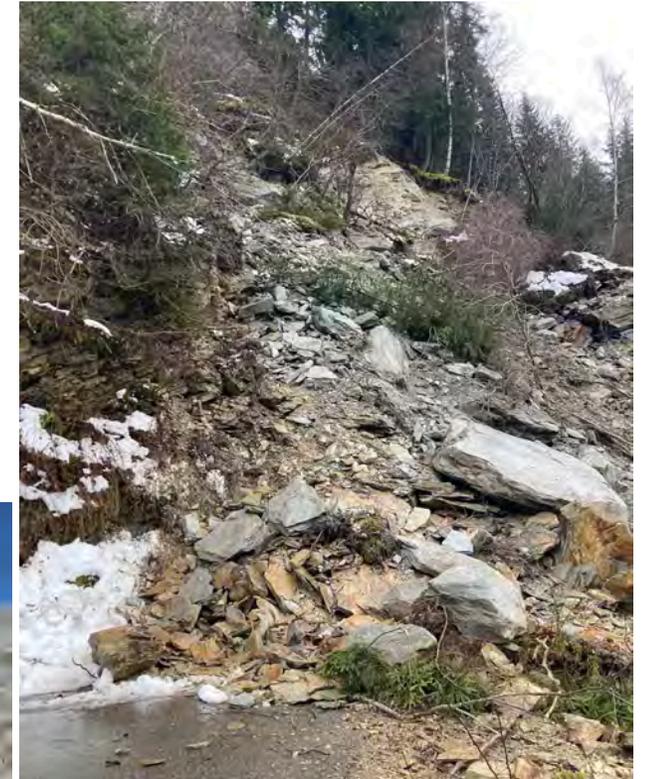
Erosion, ravinement



Affaissements effondrements



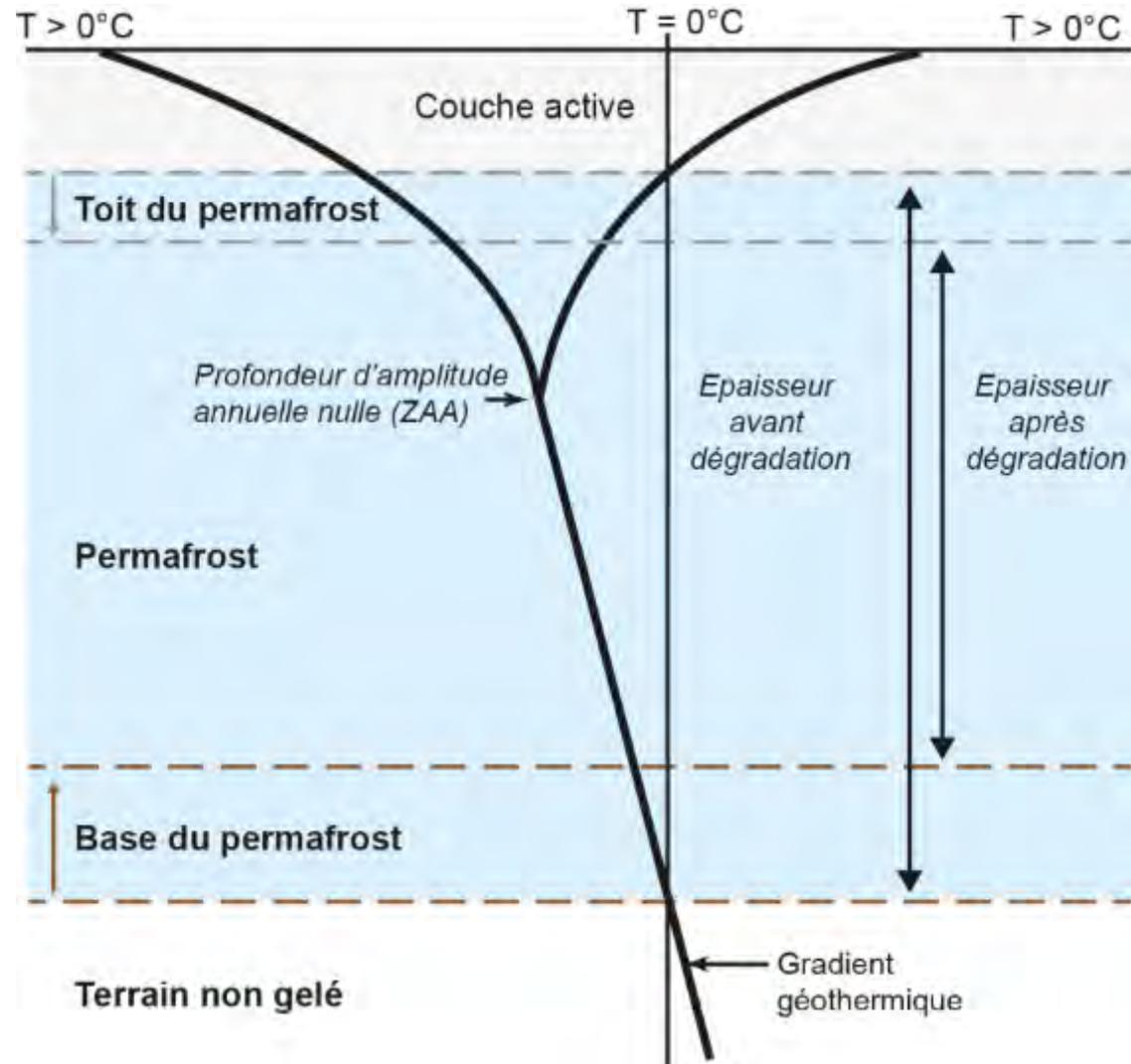
Chutes de pierres, de blocs Eboulements



Glaciers rocheux

Le permafrost de montagne

Déf. : **Tout matériel lithosphérique dont la température reste inférieure ou égale à 0°C pendant au moins deux années consécutives**



- ↳ Tout type de sol
- ↳ État thermique (avec présence ou non de glace)
- ↳ Dégradation = réchauffement



Réchauffement
 ≠
 Dégel / Fonte

Parois rocheuses / Versant rocheux



Aiguille du midi - Mt Blanc



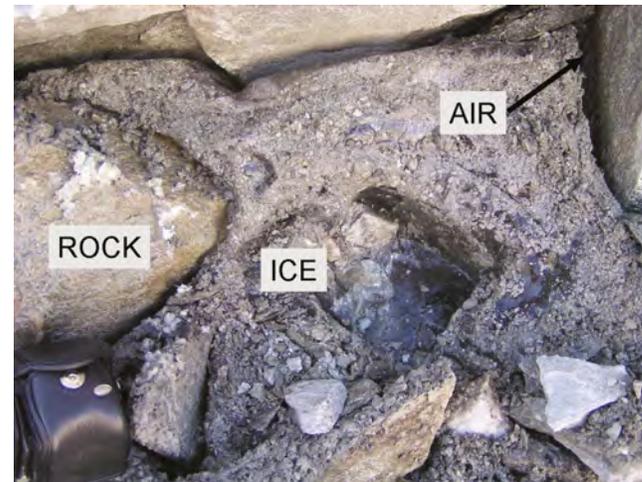
Glaciers Alpes fr. : 275 km² (2008)
212 km² (2022)

Gardent *et al.*, 2014
Rabatel *et al.*, 2022

Permafrost Alpes fr. : ~ 770 km²

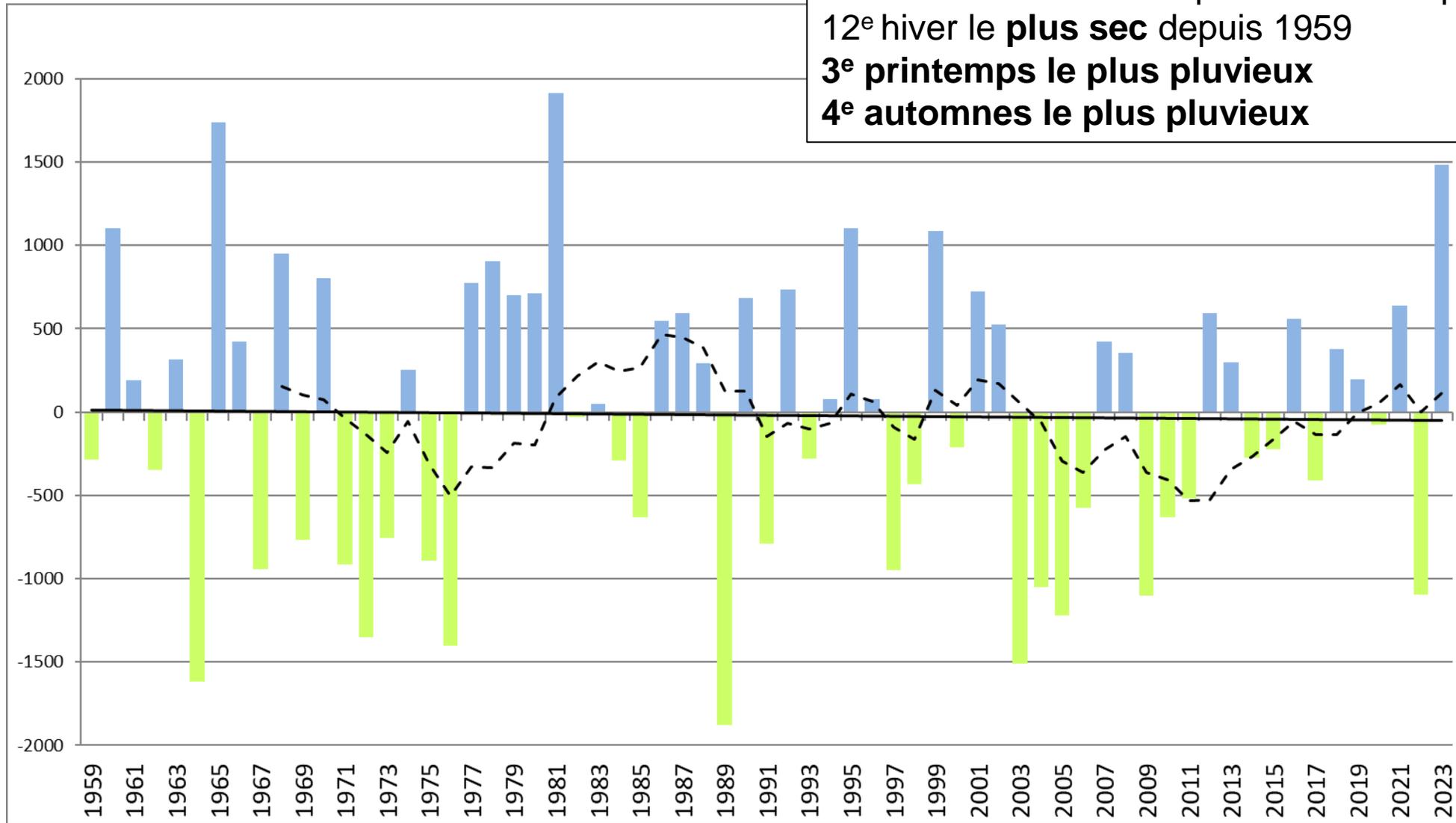
Marcer *et al.*, 2017

Formations non consolidées / sols



Glacier rocheux - Vanoise

2023 est la 3^e année la plus arrosée depuis 1959
12^e hiver le **plus sec** depuis 1959
3^e printemps le plus pluvieux
4^e automnes le plus pluvieux



Écarts des cumuls moyens annuelles de précipitations (en mm) par rapport à la normale 1961-1990 AGATE - C. Chaix

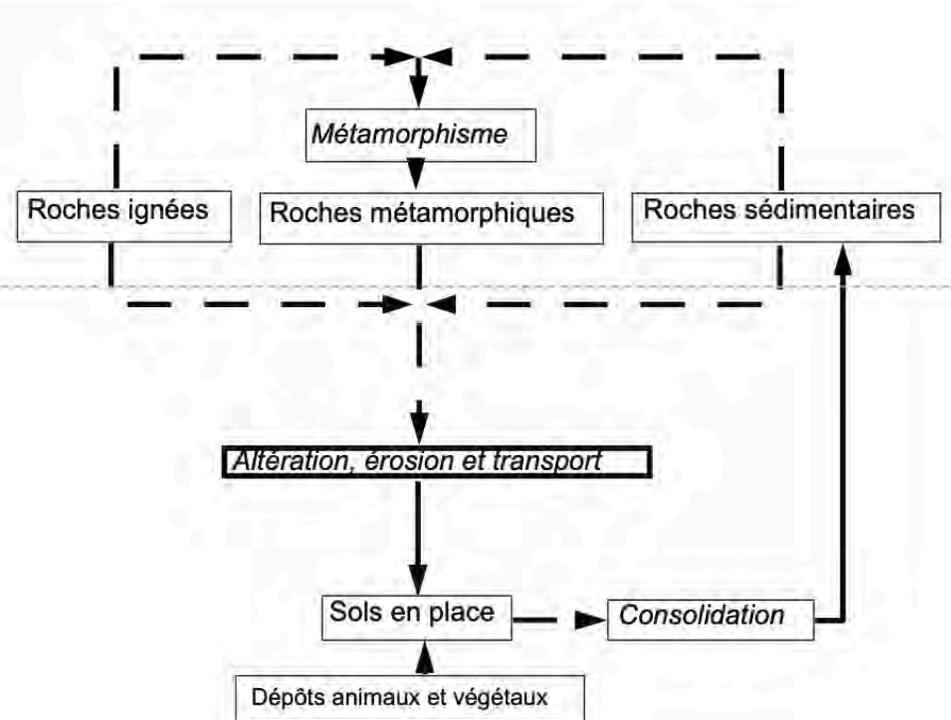
Apport d'eau brutal lié à un épisode pluvieux intense, pouvant affecter la stabilité des ouvrages



Roches cohérentes / dures :

Agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau

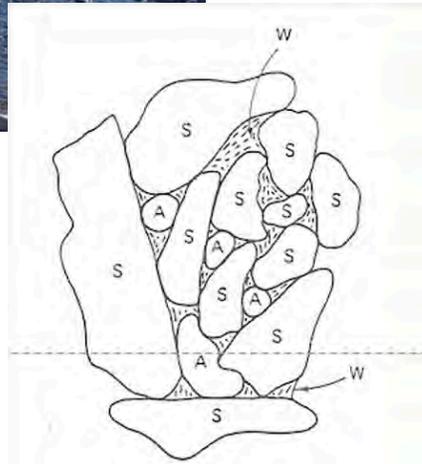
➤ Mécanique des roches



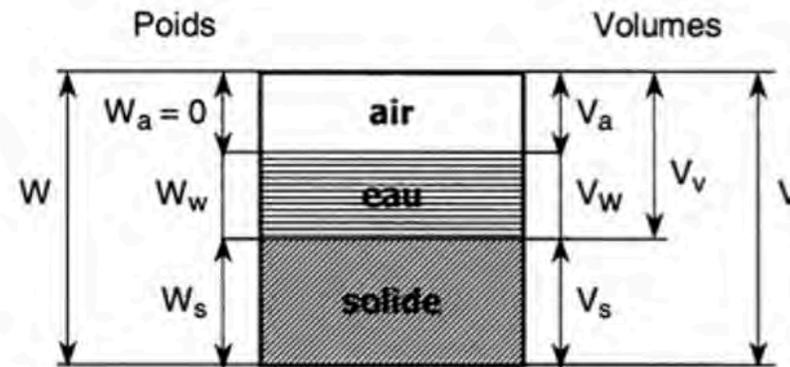
Roches meubles ou sols :

Agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles, provenant de l'altération des roches (mécanique ou chimique) = matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes.

Les matériaux minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables.

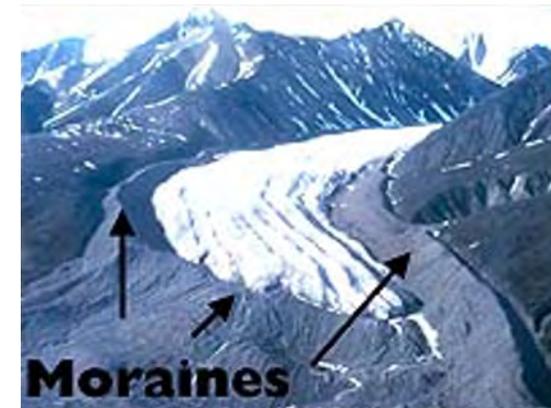


➤ Mécanique des sols

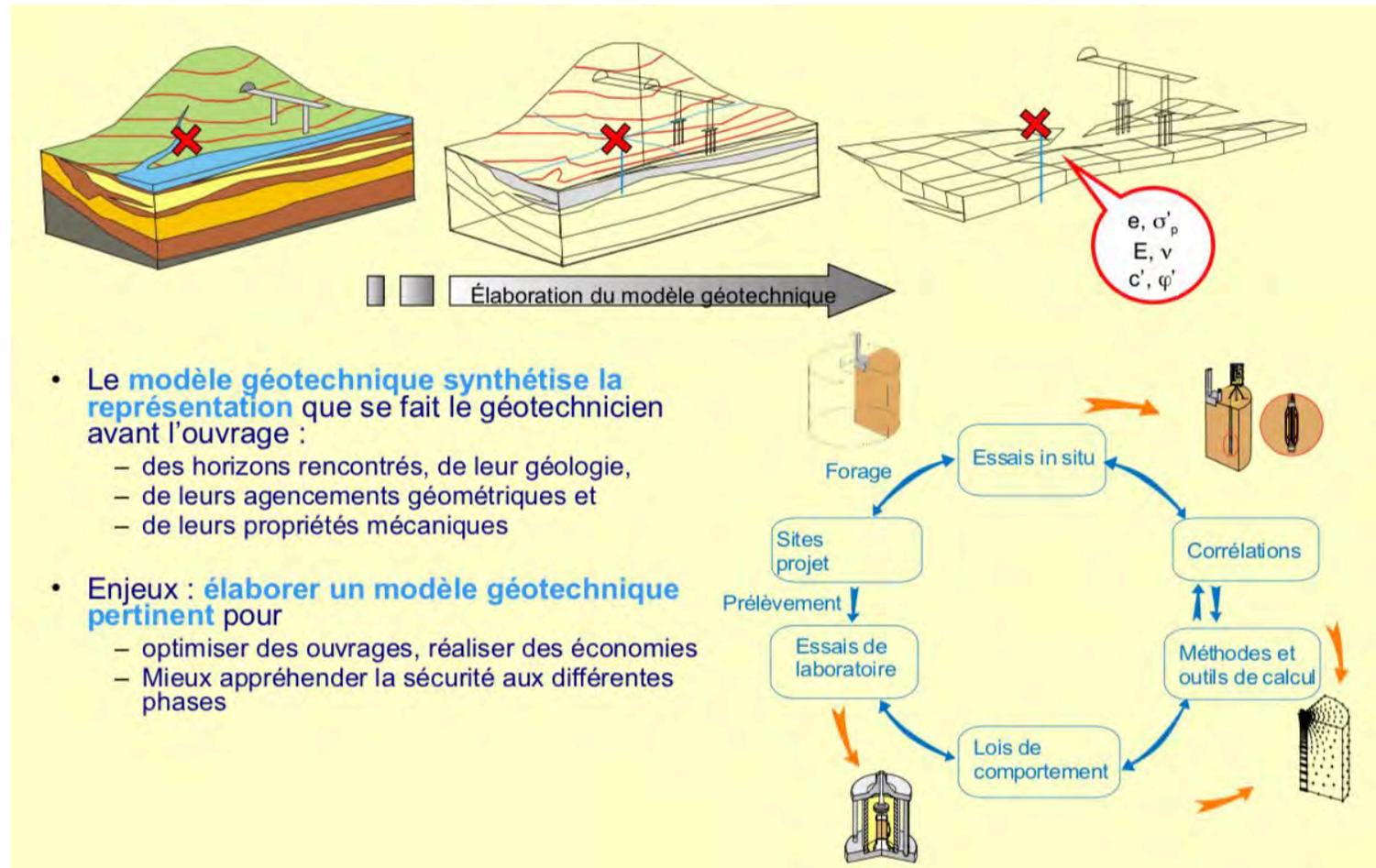


Représentation conventionnelle d'un volume de sol

Poids et volumes des différentes phases



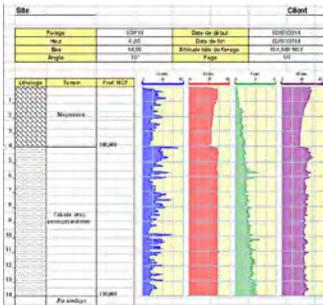
Enquête et analyse des données existantes / Reconnaissances / Synthèse & Modèle géotechnique



>>> Définition et dimensionnement des solutions techniques & Préconisations de réalisations

Reconnaitances géotechniques

- Sondages à la pelle mécanique
- Sondages destructifs
- Sondages carottés
- Sondages à la tarière



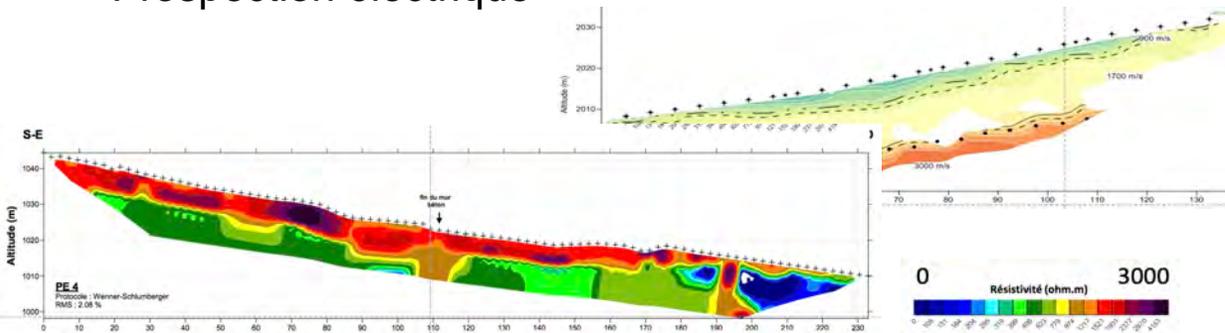
Essais in situ

- Sondages pénétrométriques
- Essais pressiométriques
- Essais d'eau (Lefranc, Matsuo, perméabilité,...)



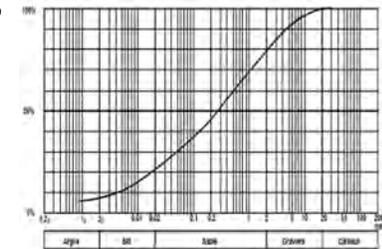
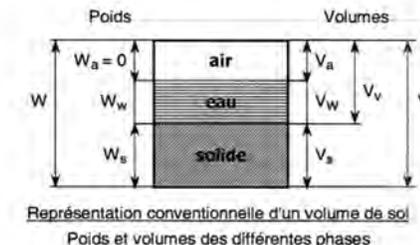
Reconnaitances géophysiques

- Prospection sismique par sismique réfraction
- Prospection électrique



Essais en laboratoire

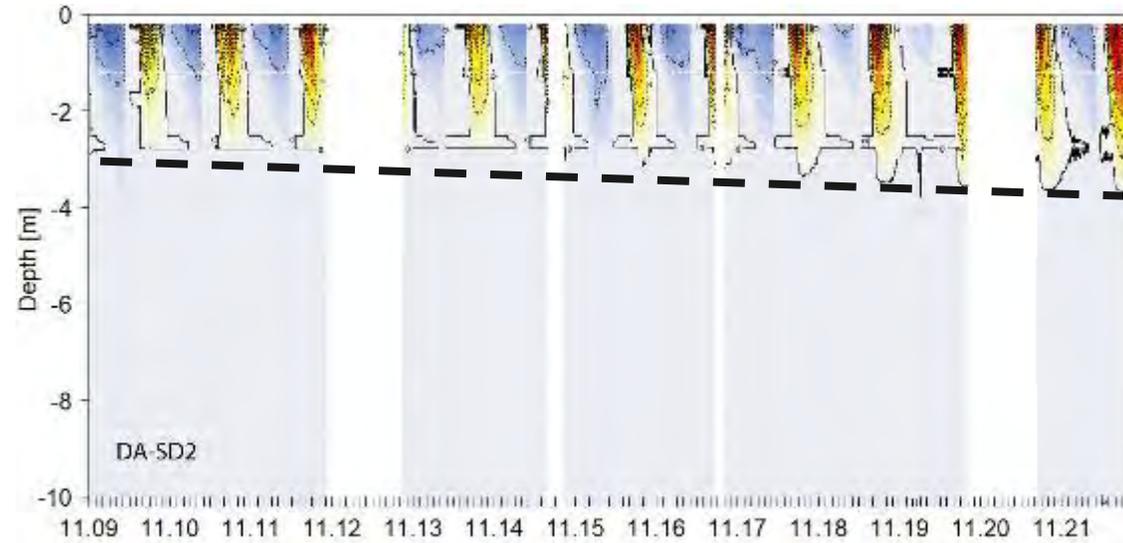
- Identification et classification des matériaux
- Essais mécaniques :
 - o Mécanique des sols
 - o Mécaniques des roches



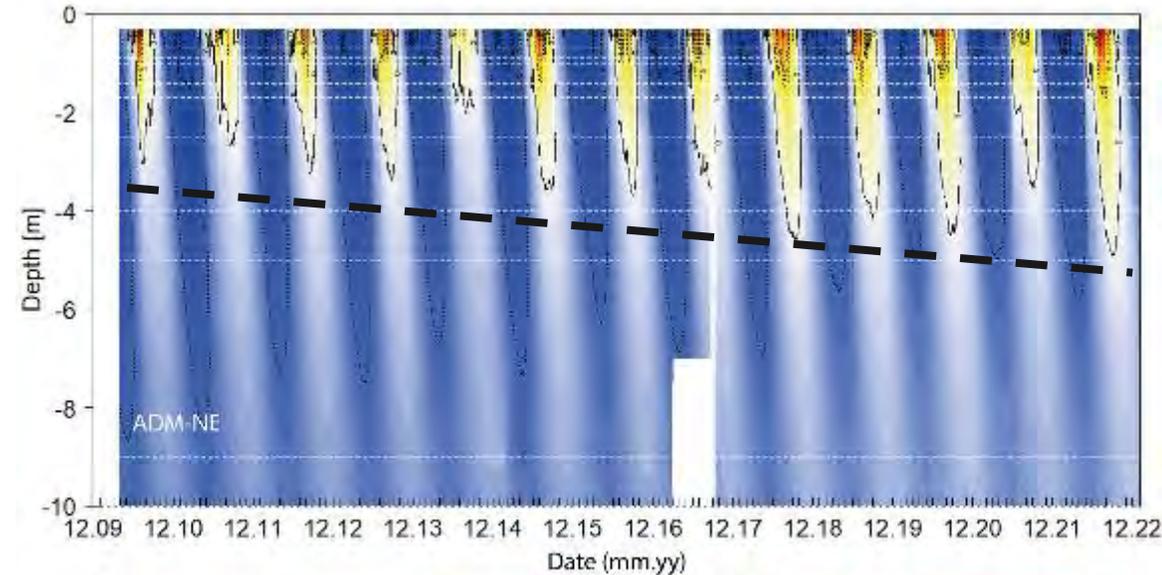
1 - Analyse des terrains supports en contexte de permafrost dans les Alpes Fr



9 forages instrumentés

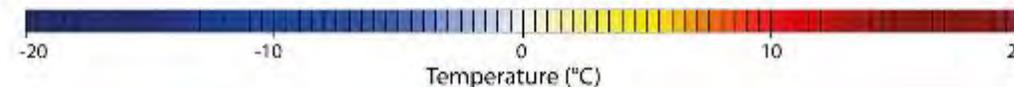


Formations non consolidées / sols riches en glace



Parois rocheuses / Versant rocheux pauvres en glace

→ Approfondissement plus rapide de la couche active

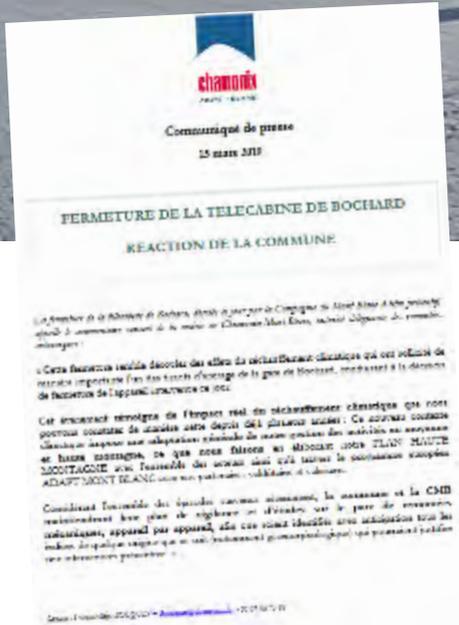


Magnin et al., 2024, *Perma. and Perigl. Proc.*

Télécabine de Bochard (mars 2019)

● AUVERGNE-RHÔNE-ALPES / HAUTE-SAVOIE

Chamonix (Haute-Savoie) : fermeture de la télécabine de Bochard, un effet du réchauffement climatique ?



Bivouac des Fourches (septembre 2022)



Bivouac des Périades (juillet 2019)



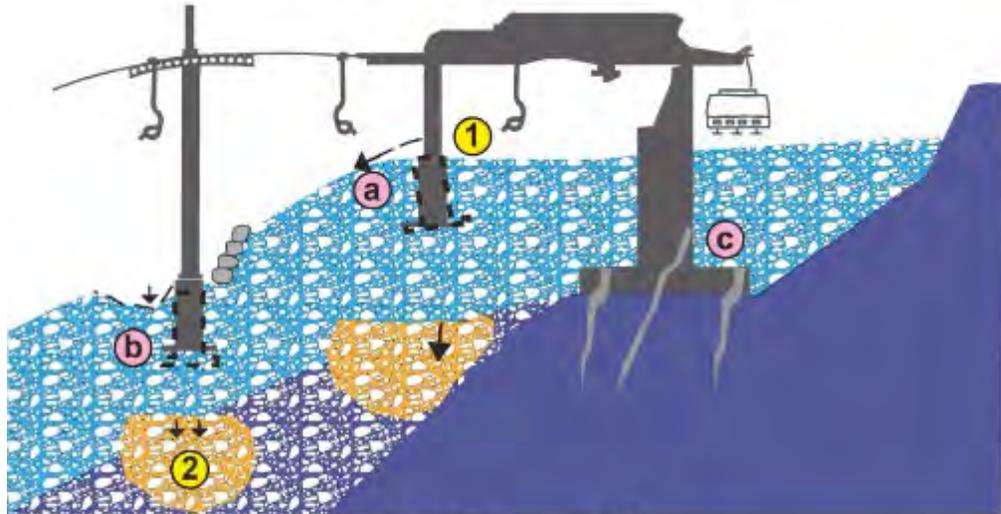
Funiculaire des 2 Alpes



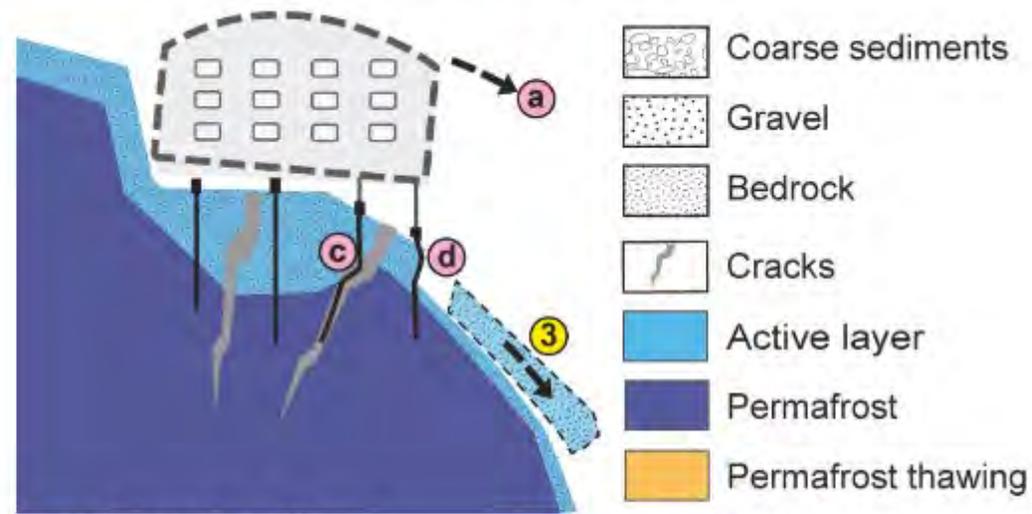
Chapelle du Thabord (octobre 2021)

De plus en plus de cas de déstabilisation ?

Surficial deposits (e.g. chair lift)



Bedrock & rock walls (e.g. hut)

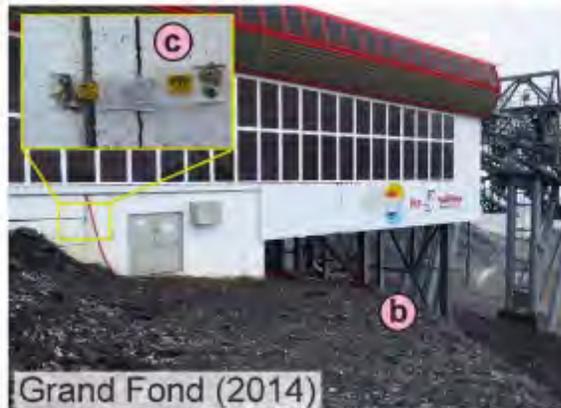


Geomorphological processes

Process	NB
① Creep movement	4
② Thermokarst	1
③ Rockfall - landslide	2

Deteriorations effects

Effect	NB
ⓐ Tilting	5
ⓑ Subsidence	9
ⓒ Cracking in foundations	3
ⓓ Deterioration of foundations and anchors	1



Duvillard et al.,
Reg. Env. Chang., 2019

Télesiège de Rosaël (Orelle, 2974 m)

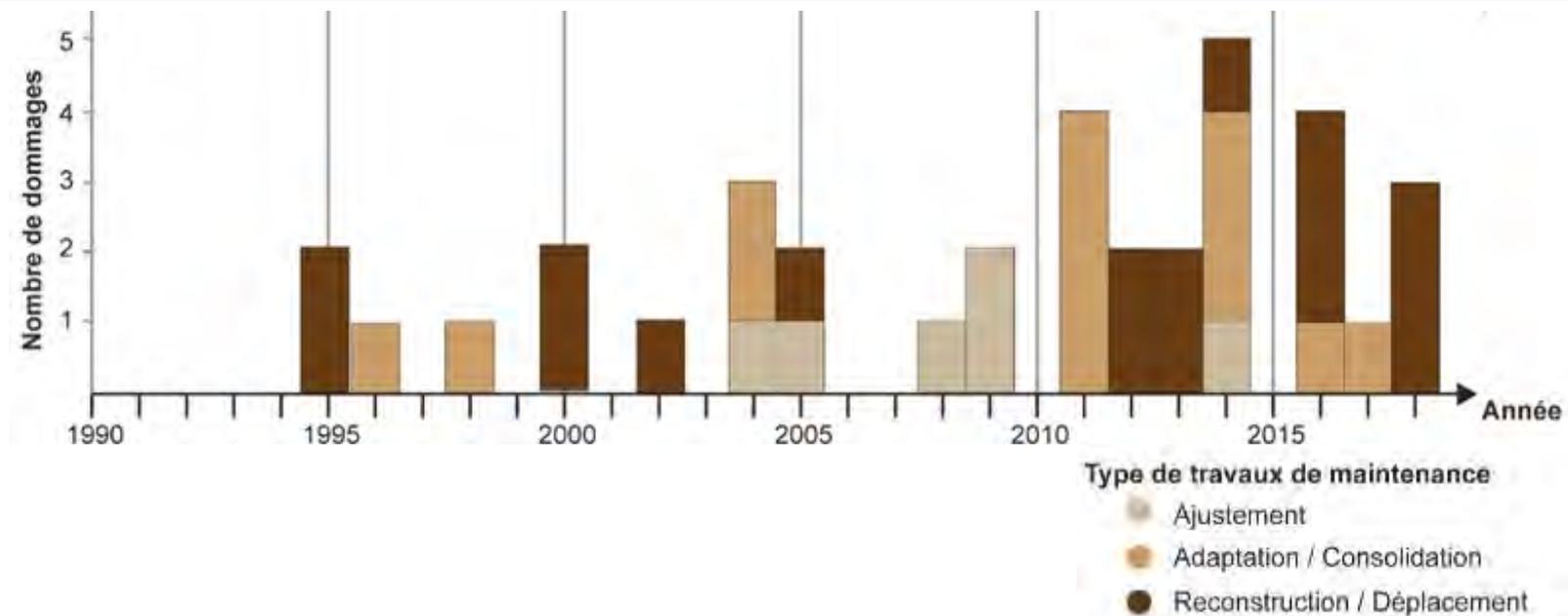
2^{ème} génération de TSD

2009 : Construction 2013 : Affaissement P26/27

2016 : Reconstruction GA/P20/21

→ Surcoûts de maintenance



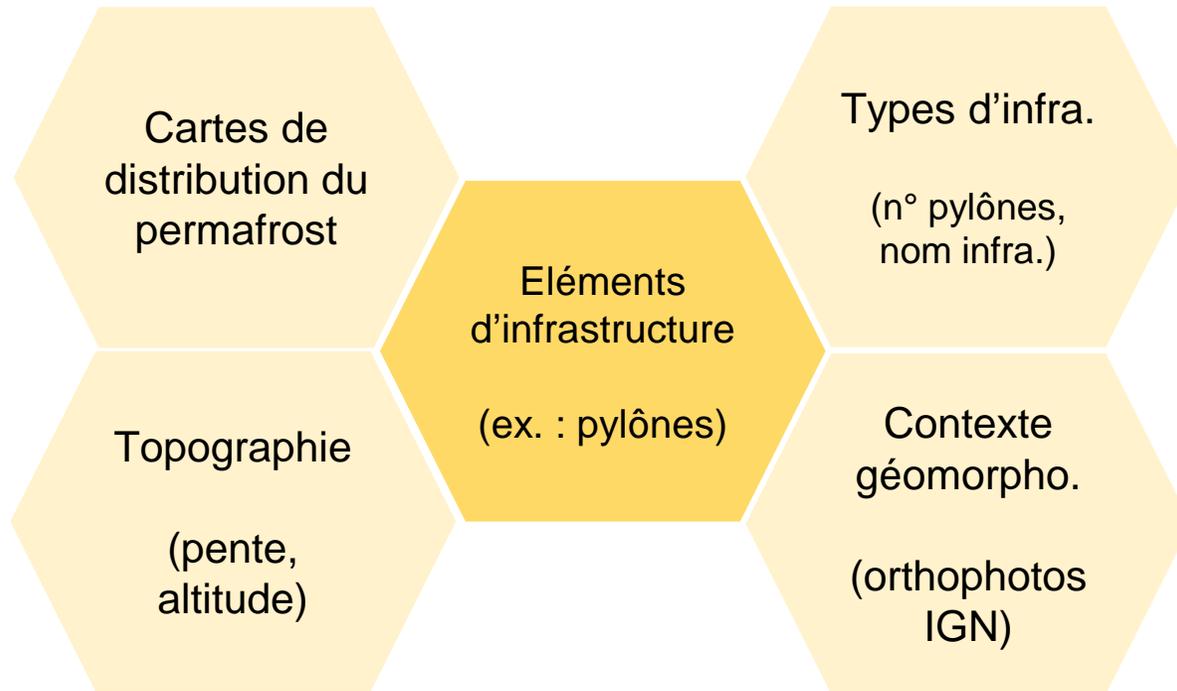


- Augmentation relative des dommages
- Majorité sur terrains riches en glace
- Différentes générations d'adaptations
- **Inventaire non exhaustif**

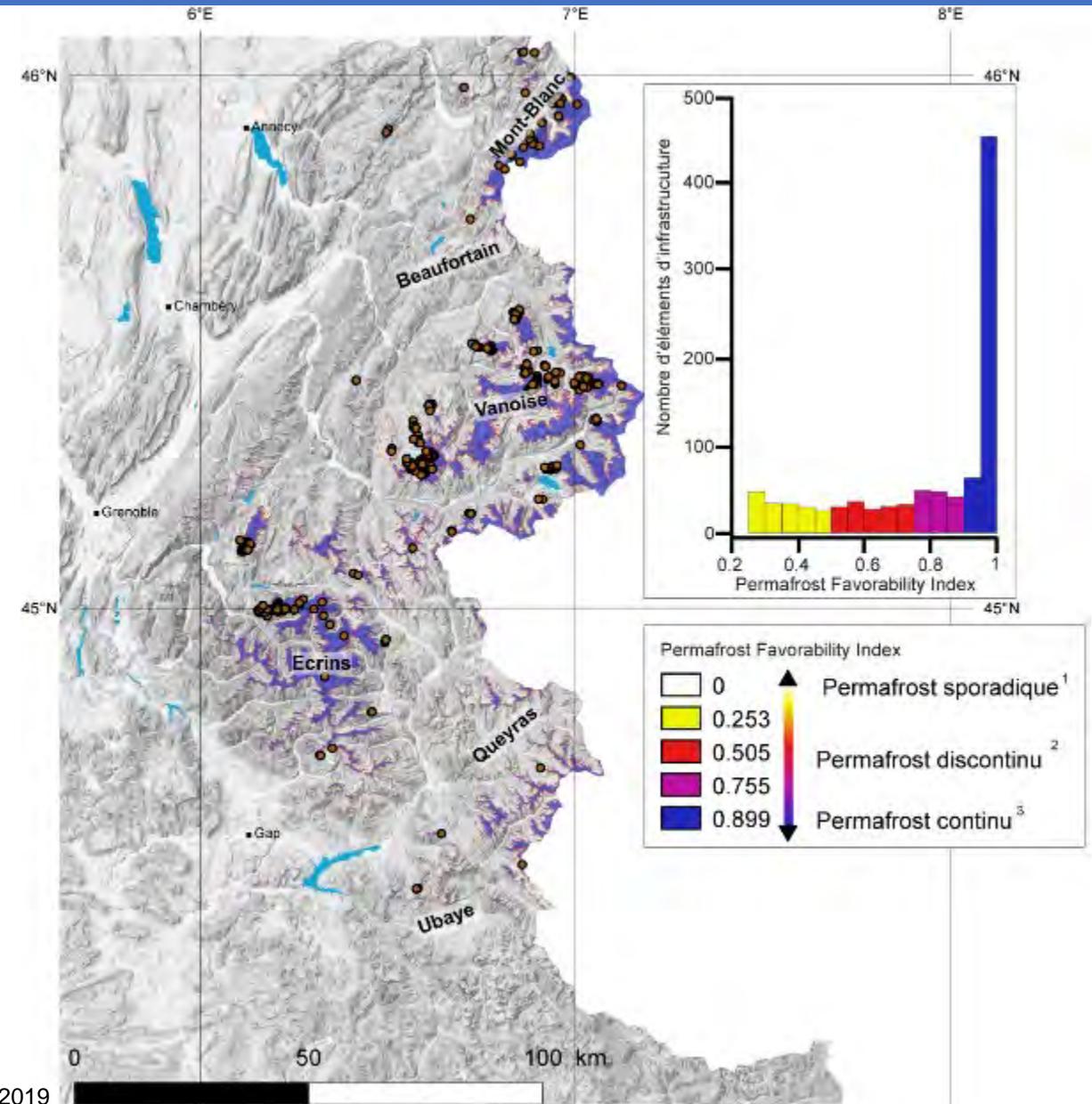


Exemple des adaptations successive du Télésiège du Col des Vés (Tignes)

Duvillard et al., *Reg. Env. Chang.*, 2019



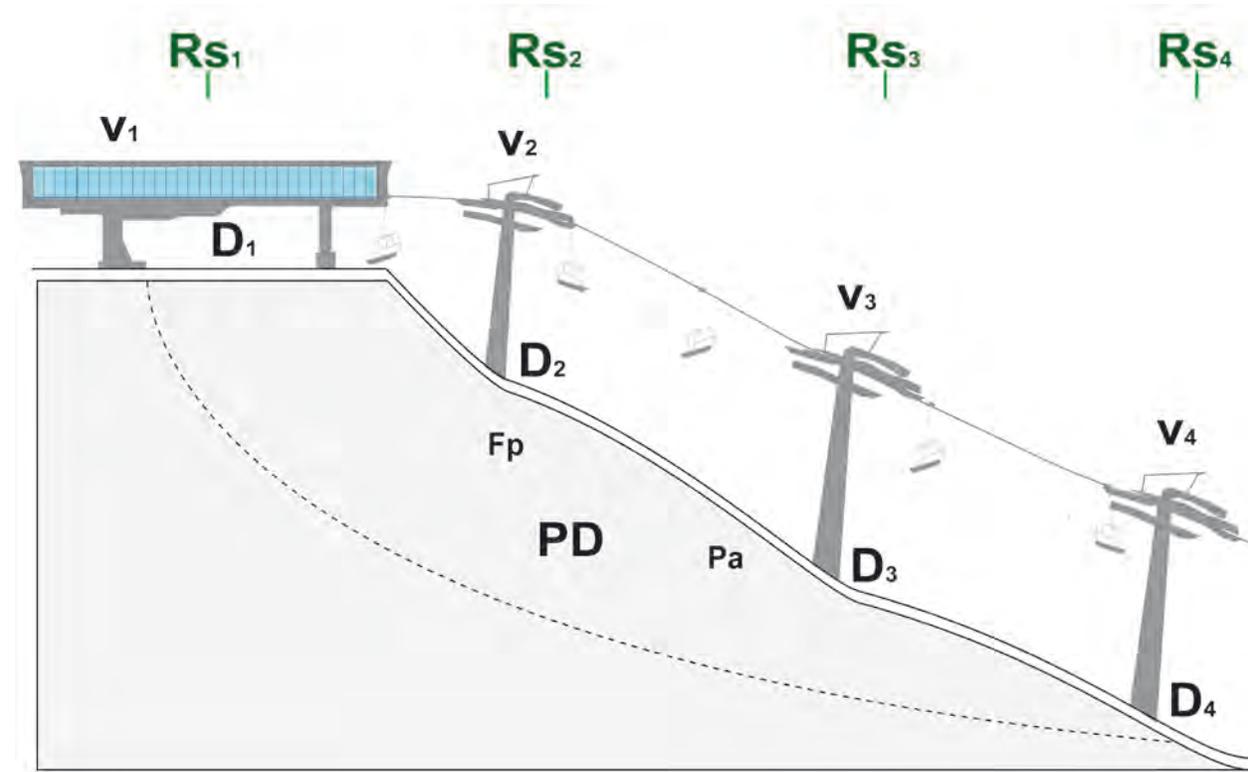
- 947 éléments d'infrastructures
- 74 % de remontées mécaniques



Risque = Aléa × (Vulnérabilité × Enjeux)

$$Rs = (PD \times DV)^1 \quad \text{avec } PD = (Fp \times Pa)$$

Leone, 1996 ; Bell *et al.*, 2004 ; Westen *et al.*, 2005



Risque spécifique (RS)

Probabilité de déstabilisation (PD)

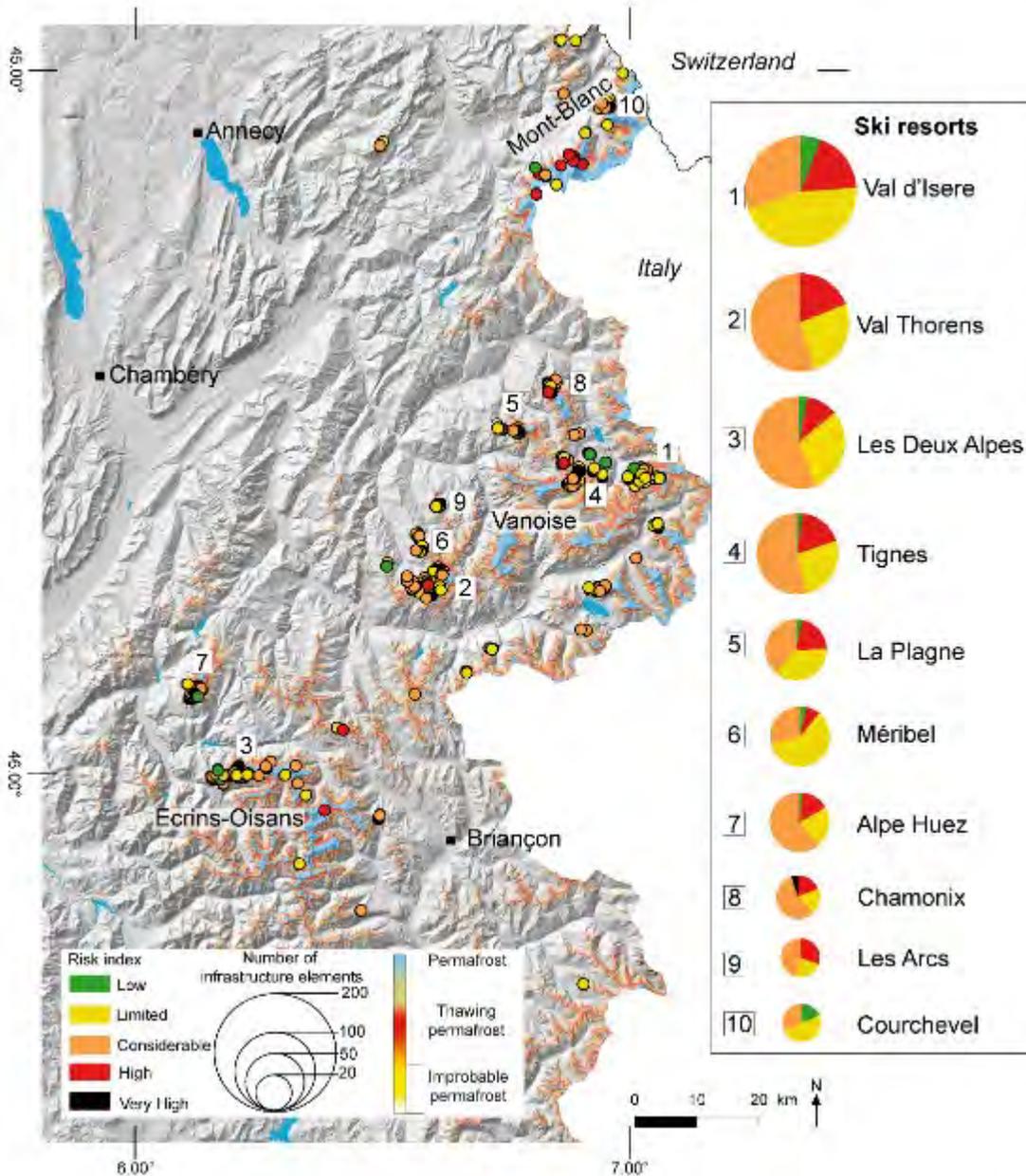
Vulnérabilité (s.l.)

Facteurs passifs (Fp)

Facteurs Actifs (Pa)

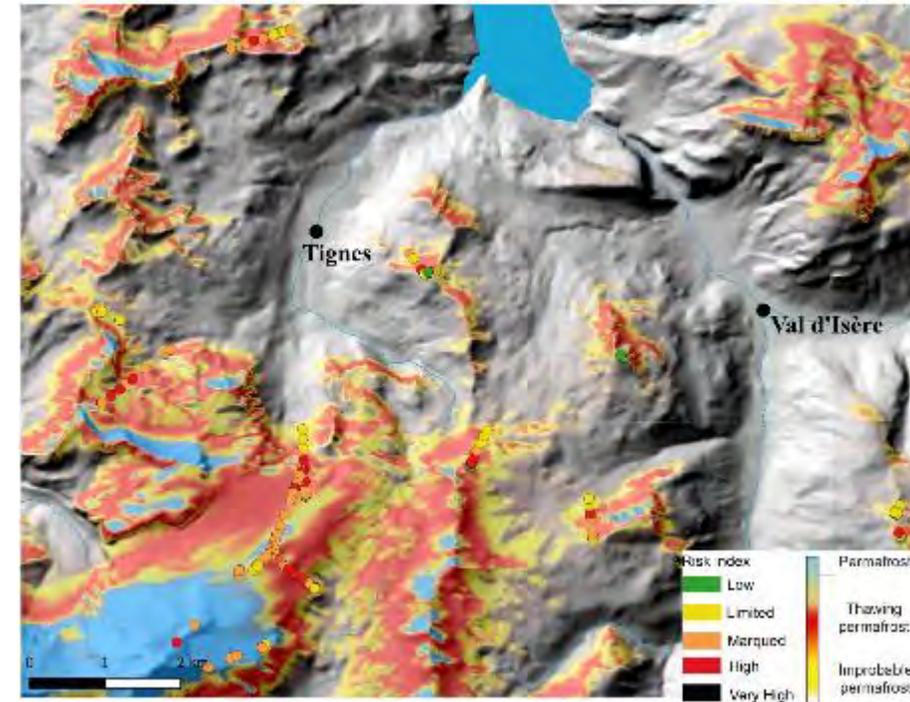
Niveau d'endommagement (D)

Enjeux Valeurs (V)



Sur les 947 composantes d'infrastructures

16 % à risque fort / très fort (148 éléments)



101 éléments d'infrastructures à Tignes

Réactives

Adaptation des fondations

- Ajustements géotech.
- Systèmes amovibles
- Reprises géotech.



Renforcement des terrains-supports

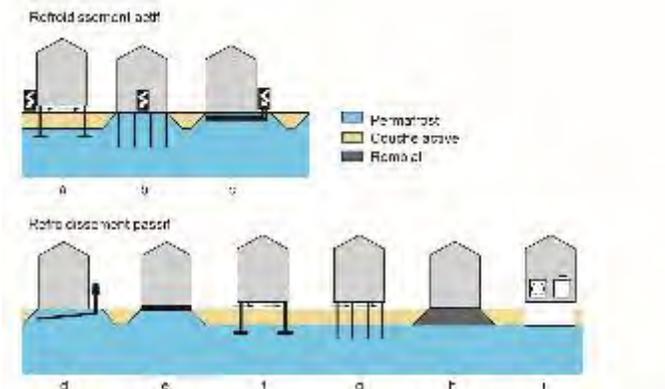
- Clouage / micropieux
- Remplacement de matériaux
- Dégradation du permafrost



Proactives

Diminuer la chaleur dans le sol

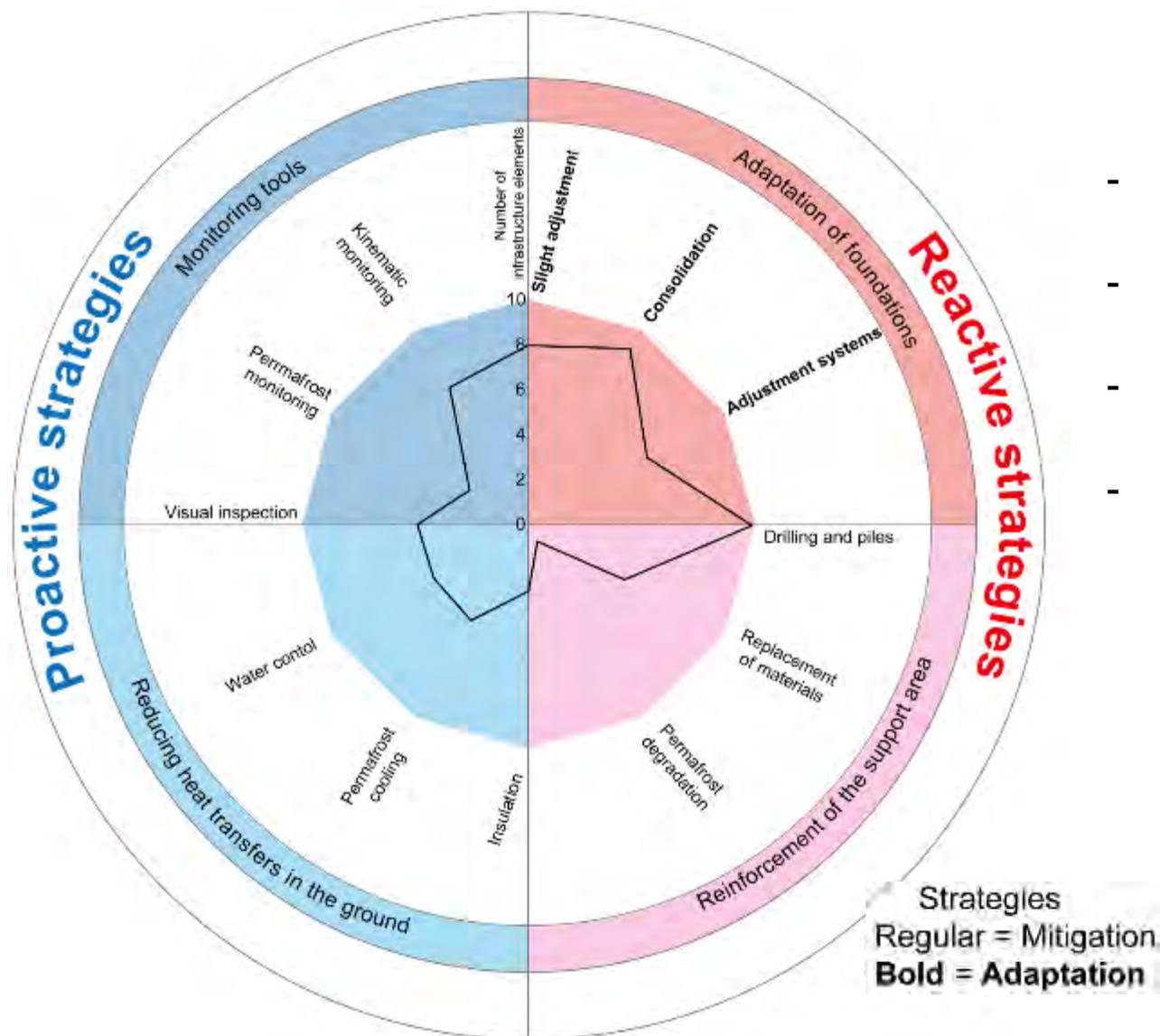
- Maitrise de l'eau
- Isolation des fondations
- Maintenir le permafrost (par ex. systèmes de refroidissement actif / passif)



Boomer et Phillips, 2010, *Construire sur le permafrost*

Outils de surveillance

- Suivi des déformations
- Suivi du permafrost par méthodes directes ou indirectes
- Inspection
- Modélisation thermique



Parmi les 148 infrastructures les plus à risques :

- **26 infrastructures** ont (déjà !) déployé des stratégies
- (majoritairement réactives et coûteuses)
- Peu de surveillance sur le long terme (et non scientifique)
- Peu d'efforts pour diminuer les apports de chaleurs dans le sous-sol

2 - Retour d'expérience sur des appareils existants



2 - Retour d'expérience sur des appareils existants

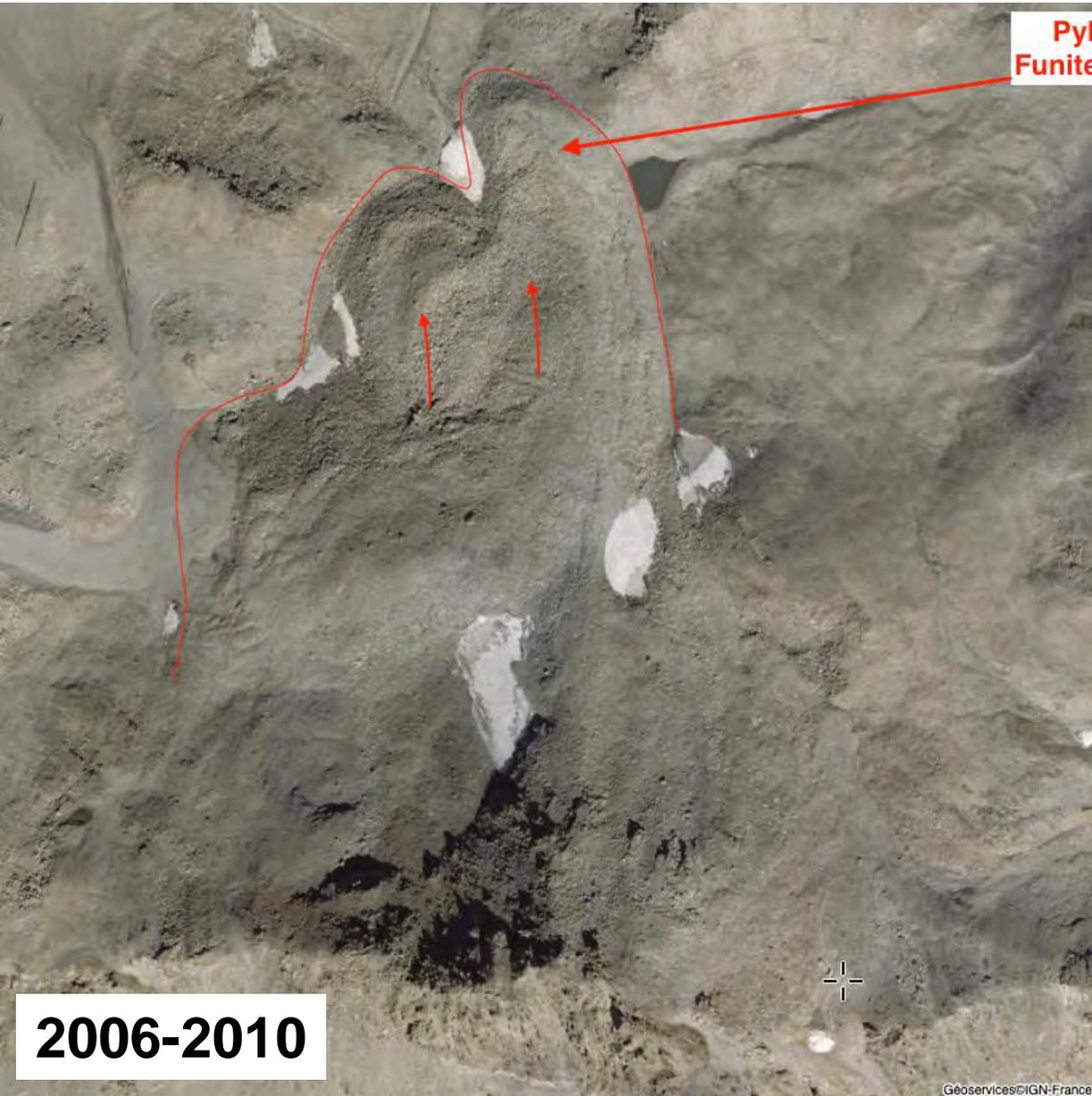
Un certain nombre d'ouvrages de remontées mécaniques existants, parfois construits depuis plusieurs décennies, présentent aujourd'hui des désordres liés au changement climatique.

En tant que bureau d'études spécialisé en géotechnique et géophysique de montagne, nous intervenons pour :

- Diagnostiquer les désordres,
- Proposer des solutions techniques de renforcement ou de stabilisation,
- Envisager, si nécessaire, la reconstruction ou le déplacement des ouvrages vers des emplacements plus adaptés.

Une **augmentation significative des sollicitations** par les exploitants de domaines skiables a été observée ces dernières années sur ces problématiques.





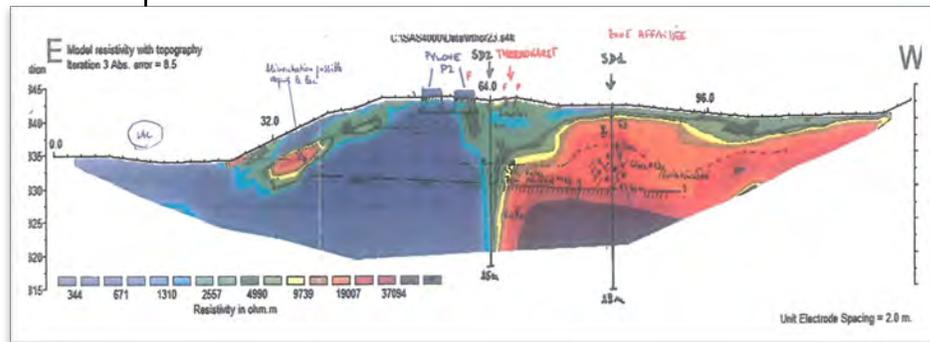
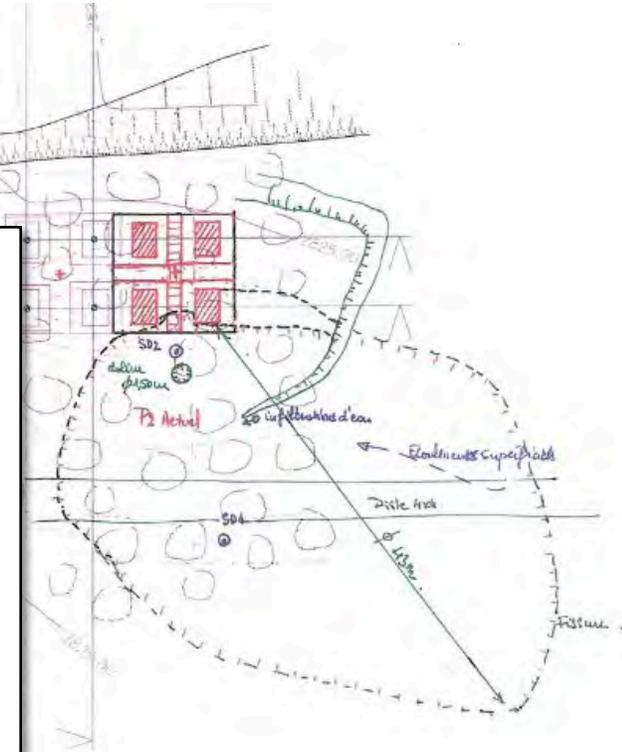
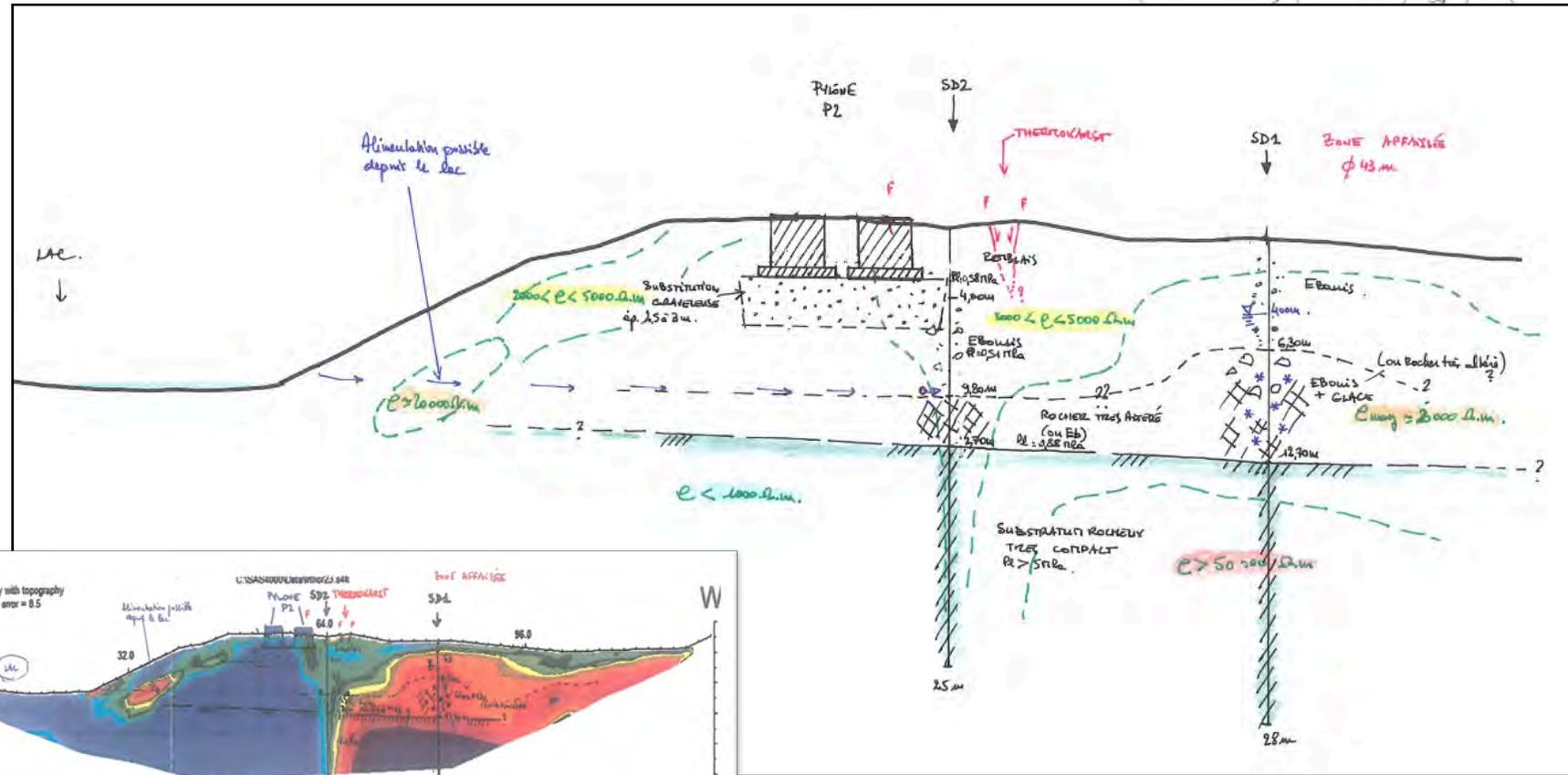
Pylône P2
Funitel Thorens



2010 et 2016

Alt. 2800 m

Reconnaitances géotechniques et géophysiques
Diagnostic géotechnique et étude de stabilisation



2016

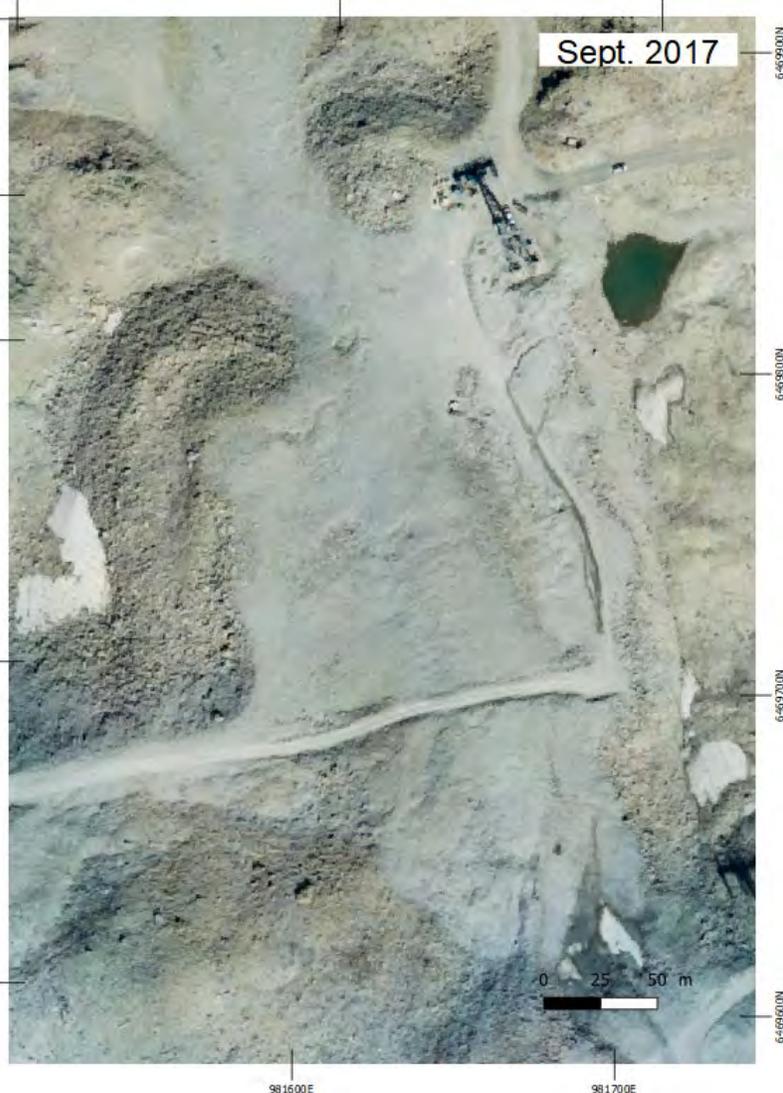


2016

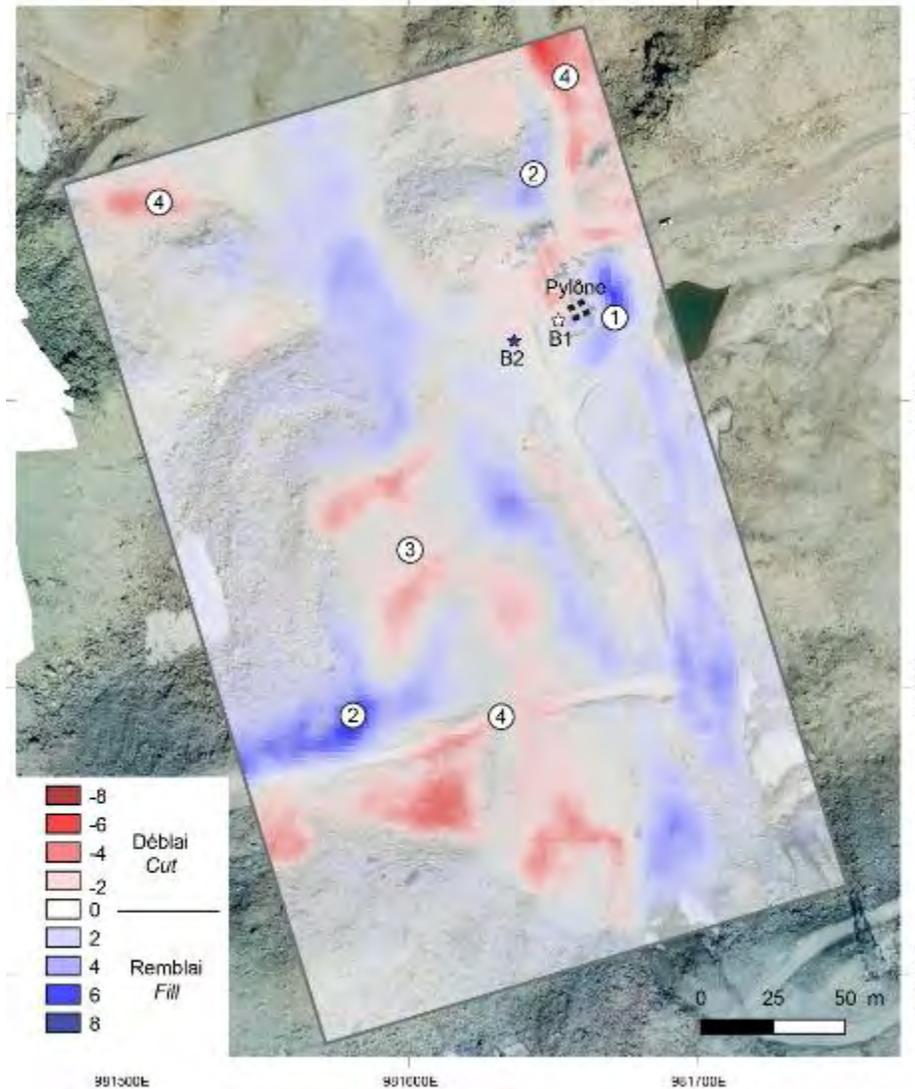


Facteurs préparatoires

Évolution géomorphologique



Reconstruction en 3D de la topographie



- Modification de la pente
- Variations d'altitude de la surface du glacier rocheux (± 2 à 6 m)
- Dégradation accentuée du permafrost



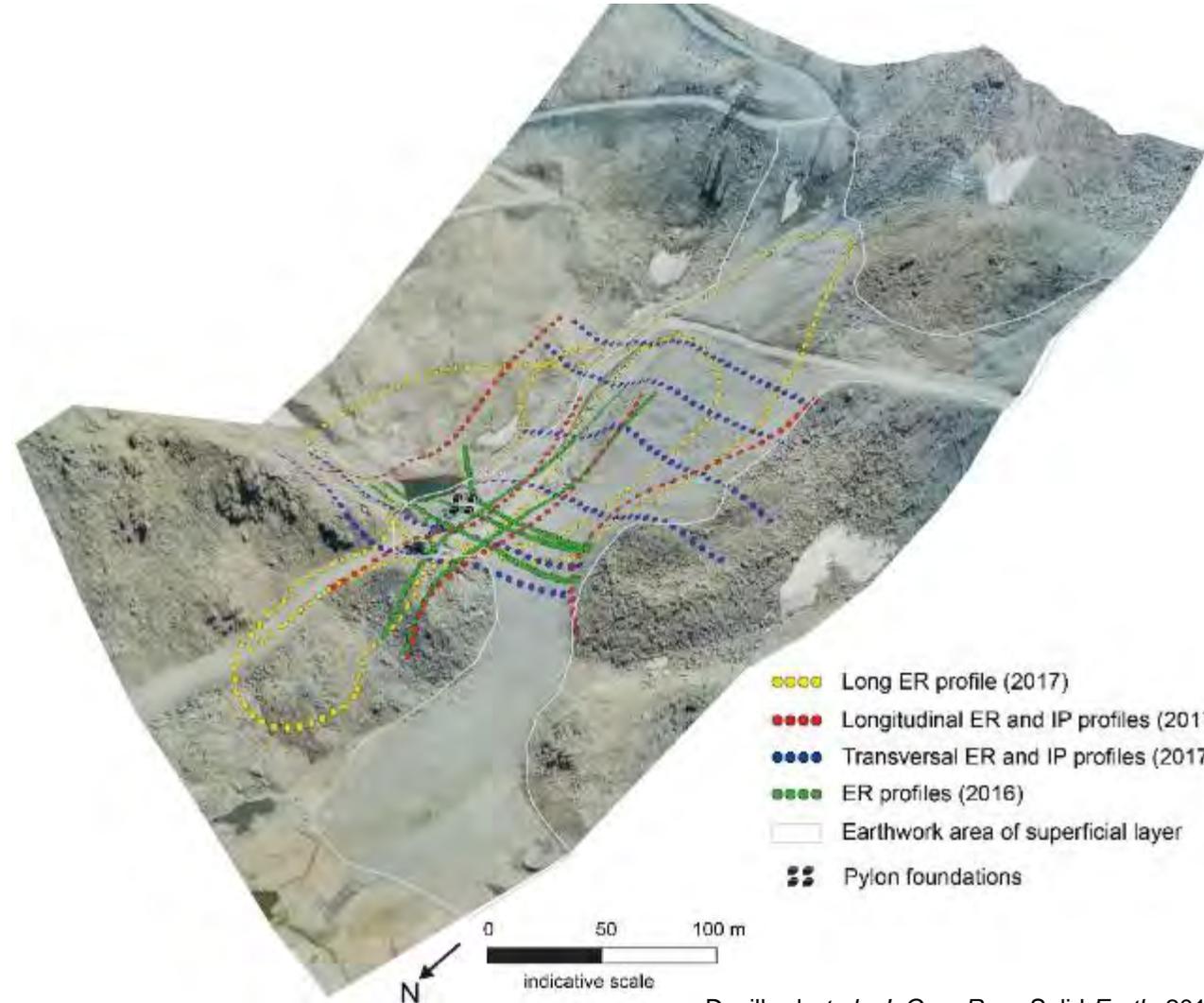
Duvillard *et al.*, GRPE, 2019

Le Funitel de Thorens (Val Thorens)

Facteurs préparatoires

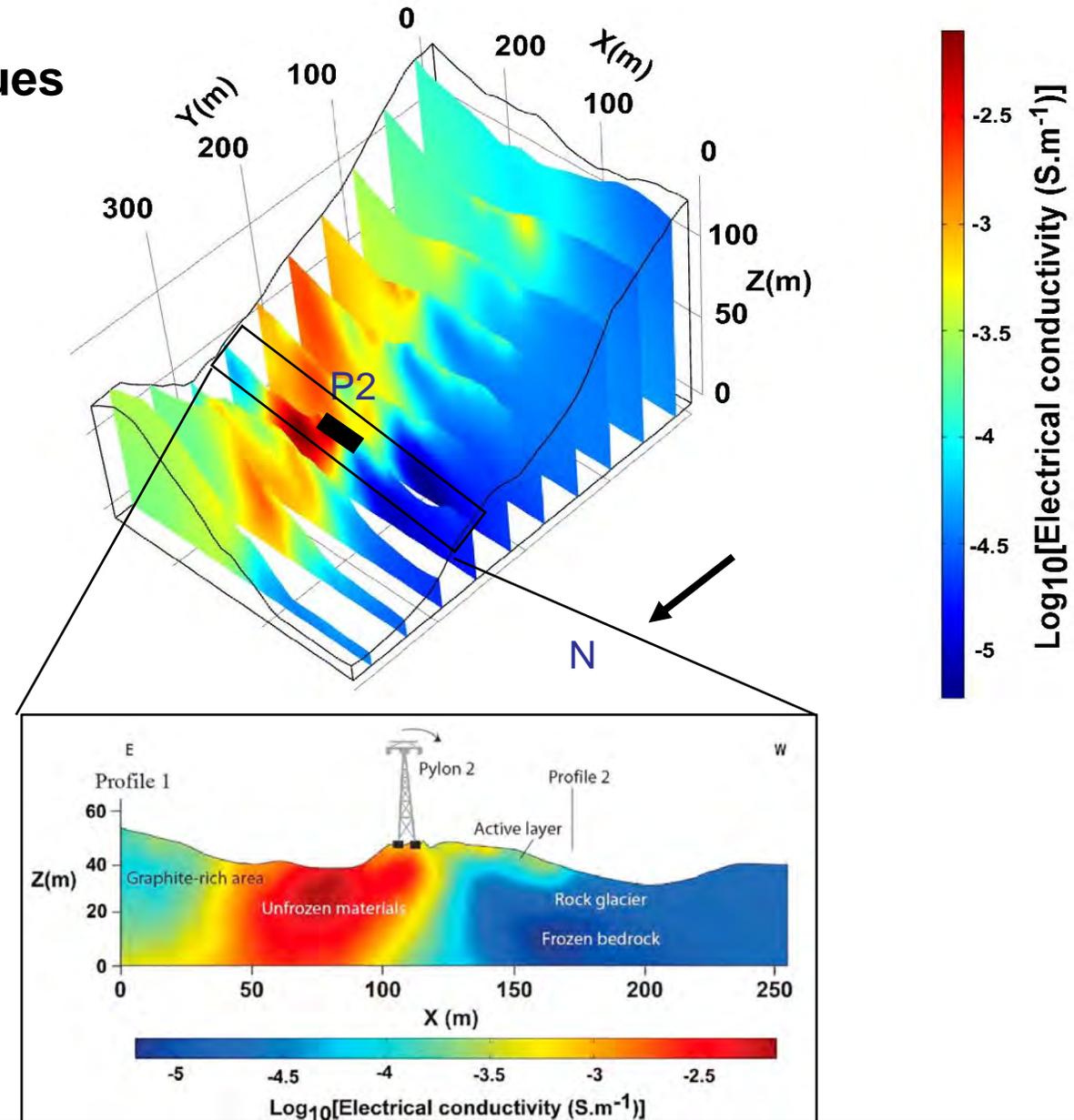
Distribution du permafrost

Mesures géophysiques



- Long ER profile (2017)
- Longitudinal ER and IP profiles (2017)
- Transversal ER and IP profiles (2017)
- ER profiles (2016)
- Earthwork area of superficial layer
- Pylon foundations

Duvillard et al., J. Geo. Res. Solid Earth, 2018



Facteurs de déclenchement

Rôle prépondérant de l'eau

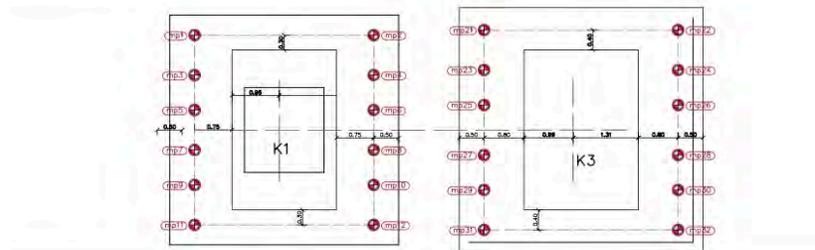
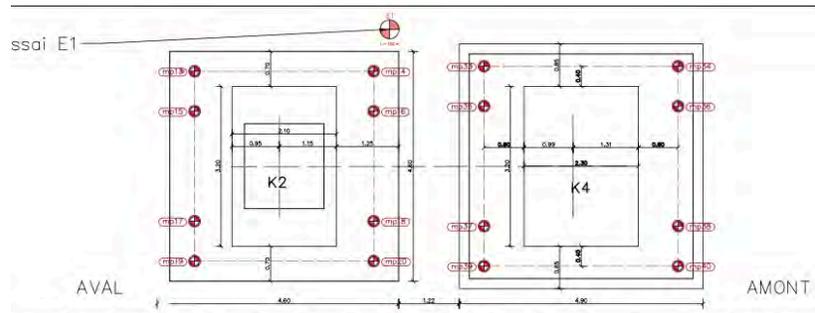


Duvillard *et al.*, GRPE, 2019



2017

Renforcement des 4 massifs à l'aide de 40 micropieux diam. 139,7 ép12,5 de 20 m



Glissement de terrain à la suite des fortes précipitations survenues en Novembre 2023 sur un manteau neigeux récent :

Cumul fonte + précipitations

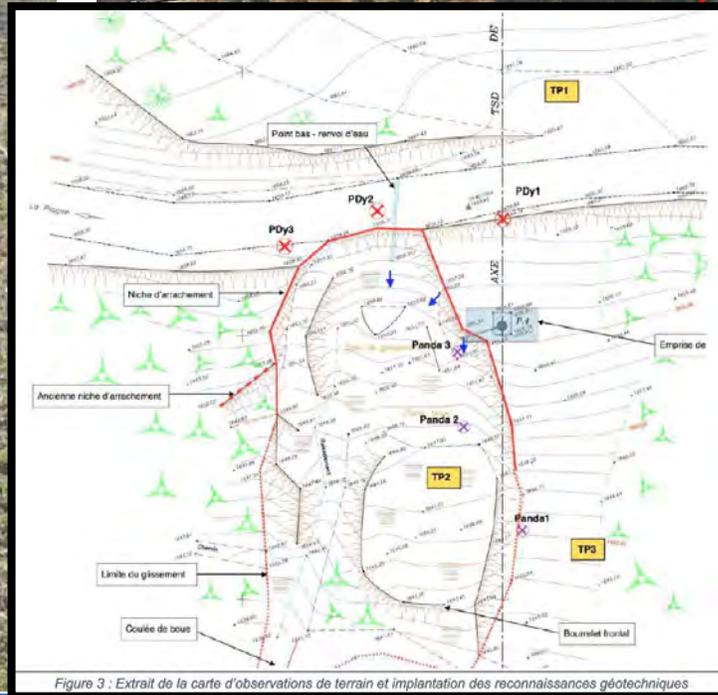
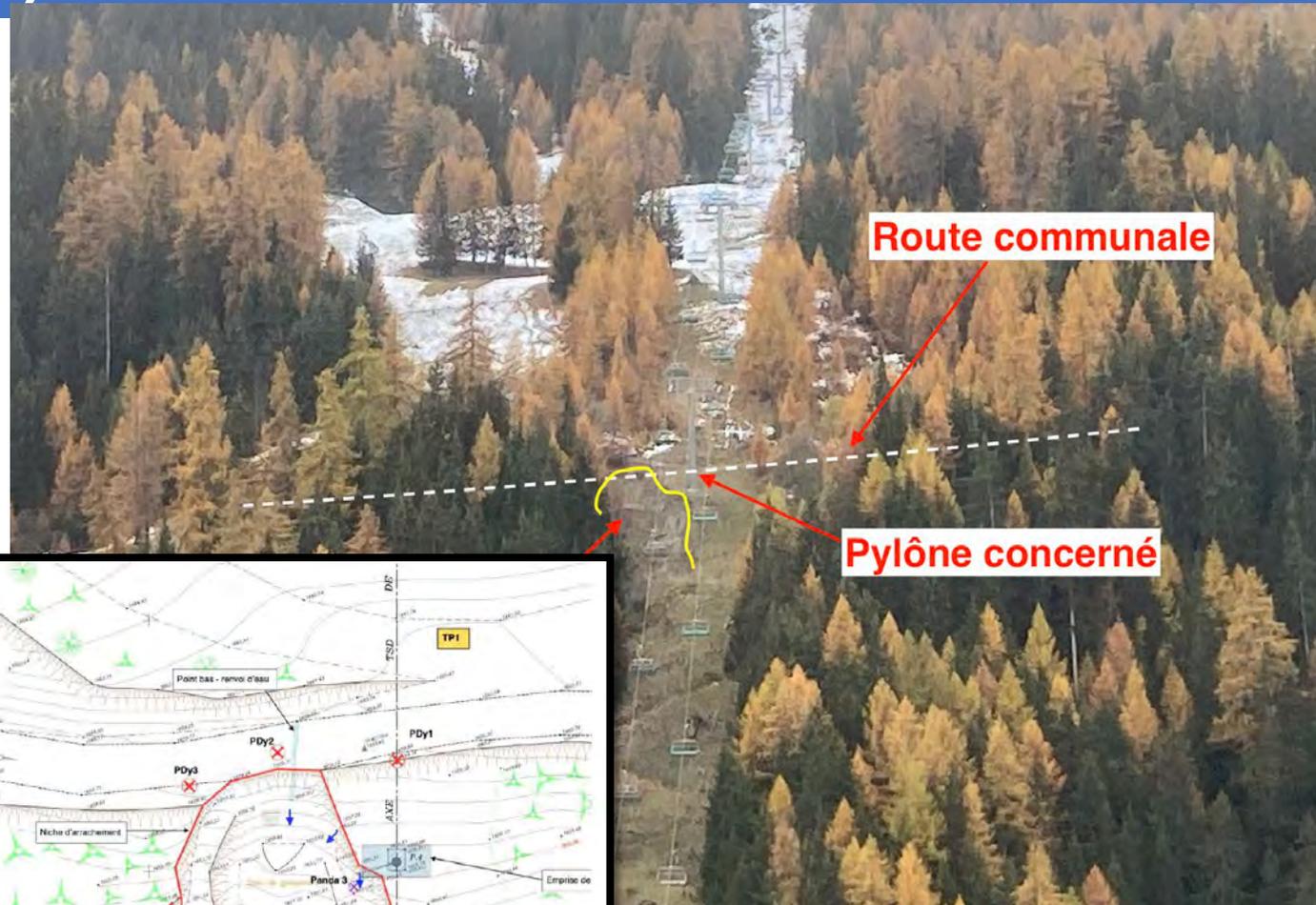


Figure 3 : Extrait de la carte d'observations de terrain et implantation des reconnaissances géotechniques

Effet de concentration des écoulements au niveau d'un renvoi d'eau :

- Saturation des terrains (anciens remblais)
- Glissement des matériaux et coulées de boues



Solution de confortement "en urgence" avant le début d'exploitation hivernal :

Soutènement en module rigide (type Acrosols)

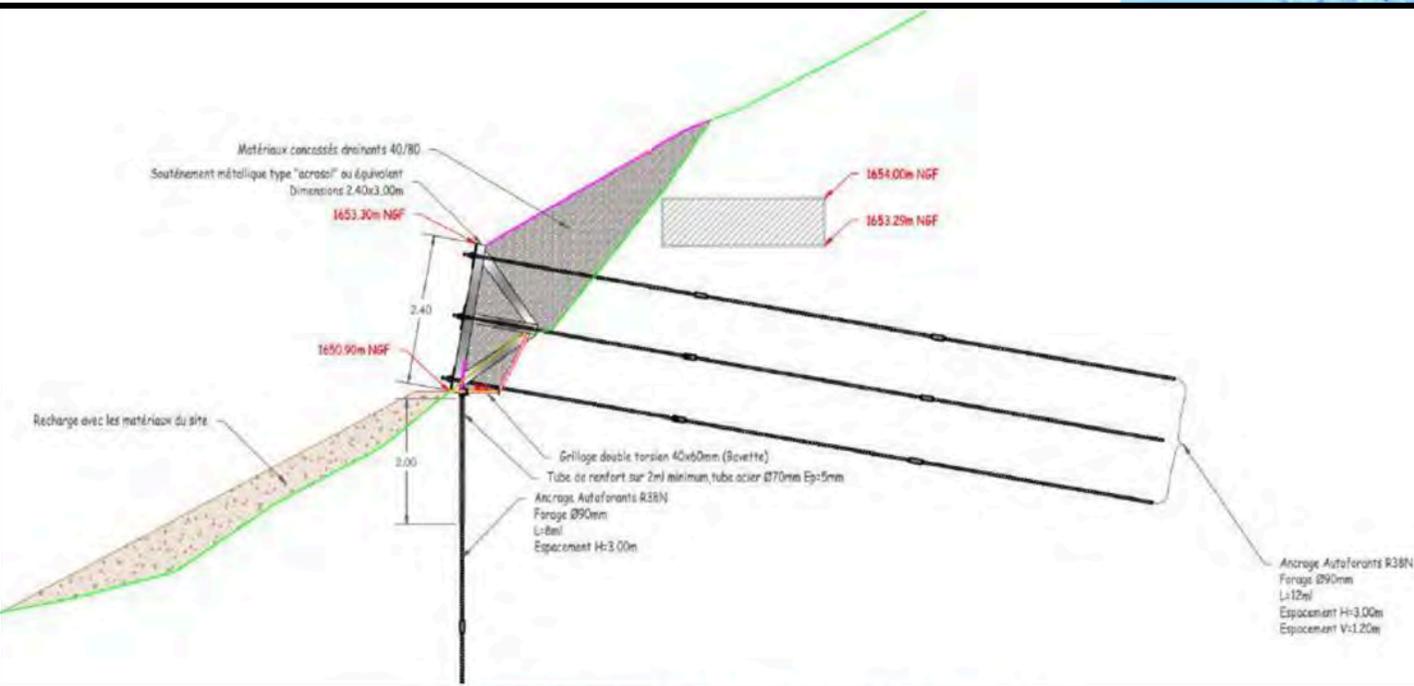
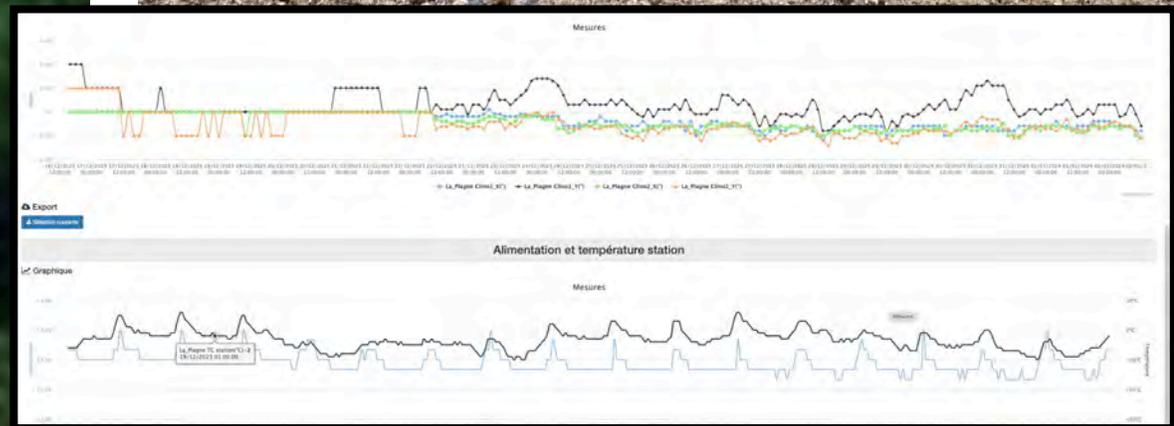
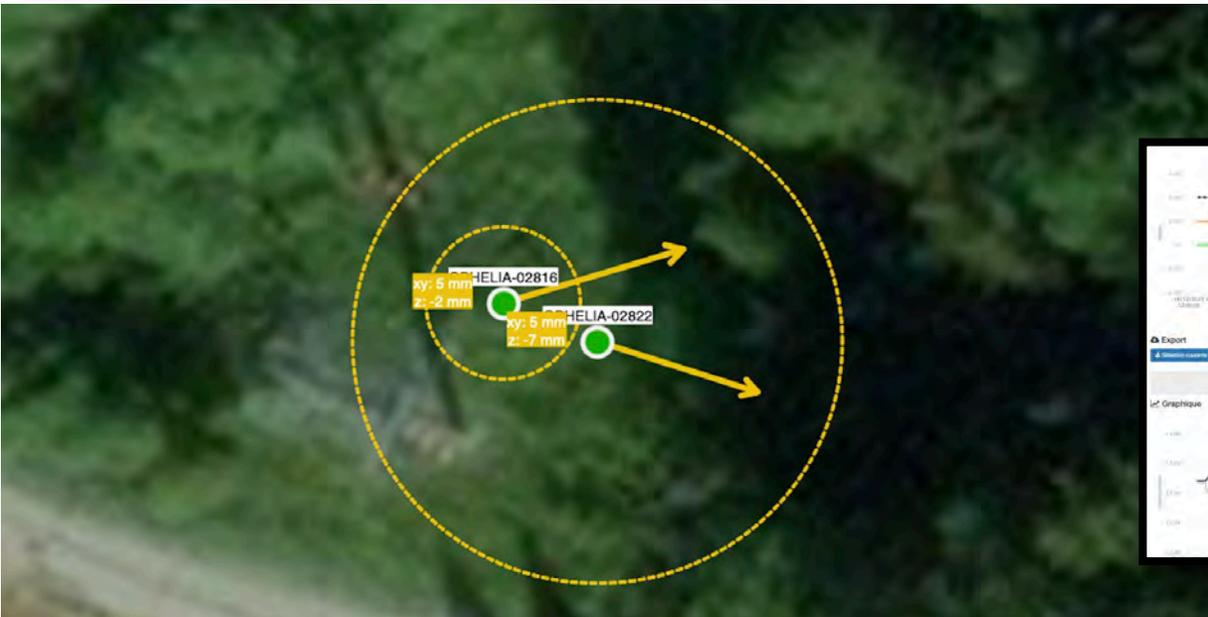
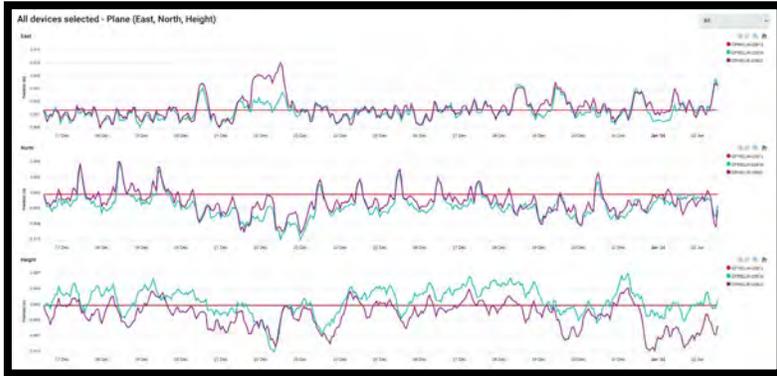


Figure 6 : Coupe type du confortement par Acrosols

Surveillance durant la saison hivernale :

- Suivi topographique ponctuel
- Suivi automatisé par clinomètre et capteurs GPS



Glissement de terrain en amont du pylône P2

- Fortes intempéries / terrains morainiques argileux très sensibles à l'eau / nombreuses circulations d'eau visibles en amont
- Glissement des terrains entre une piste et la sortie de gare > basculement du pylône P2 vers l'aval (30 cm selon la ligne)



Investigations et diagnostic géotechnique

Substratum schisteux à pendage défavorable recouvert de moraines argileuses complètement saturées à l'interface

>>> dégradation des sols supports à la faveur des circulations souterraines et glissement plan



Solution mise en œuvre : stabilisation glissement et assainissement sol fondation pylône

- Purge et drainage profond du talus et de la piste amont (tranchée et masque drainant en 40/80), collecte et évacuation des eaux en dehors de la ZIG du pylône)
- Système de contrôle du bon fonctionnement des drains et réseaux avec dispositif d'entretien et de maintenance



3 - Prise en compte lors de la conception d'un nouvel appareil

Intégrer dès la conception les retours d'expérience des ouvrages existants.

Anticiper les risques naturels : glissements, chutes de blocs, érosion...

Adapter les ouvrages :

- Tracé et position optimisée ;
- Fondations spécifiques (micropieux, ancrages...)
- Protections et dispositifs réglables ;
- Suivi et surveillance dans le temps ;



Remplacement du TSF3 de 1980 par une TSD6 en 2025

Historique du TSF3 :

- Confortement par micropieux de la gare amont en 1995 (premiers effets de la fonte / fluage du permafrost)
- Suivi topographique des massifs P21 à P25 situés au sein de glaciers rocheux

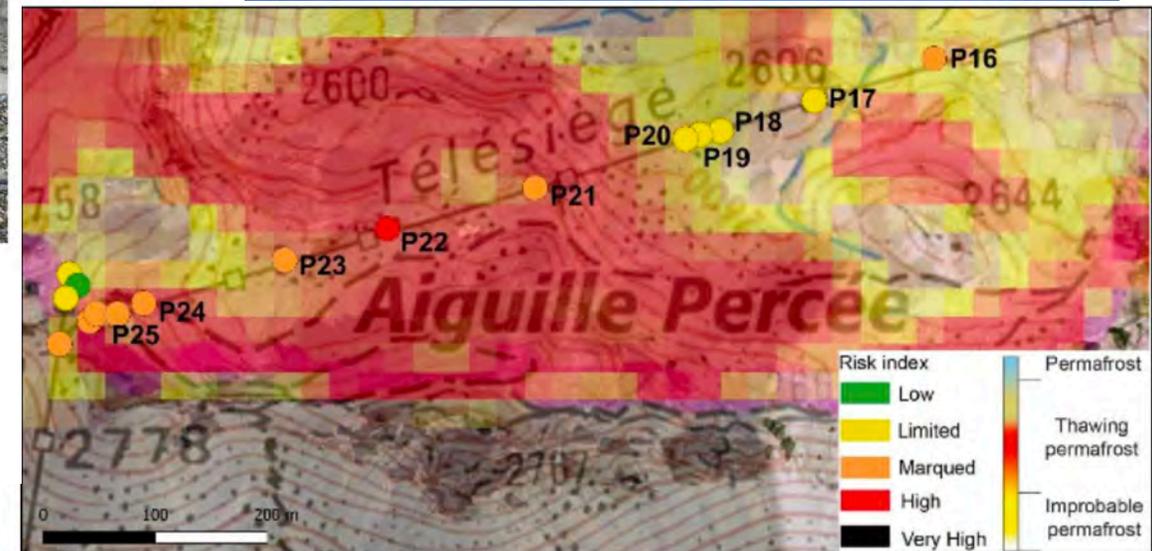
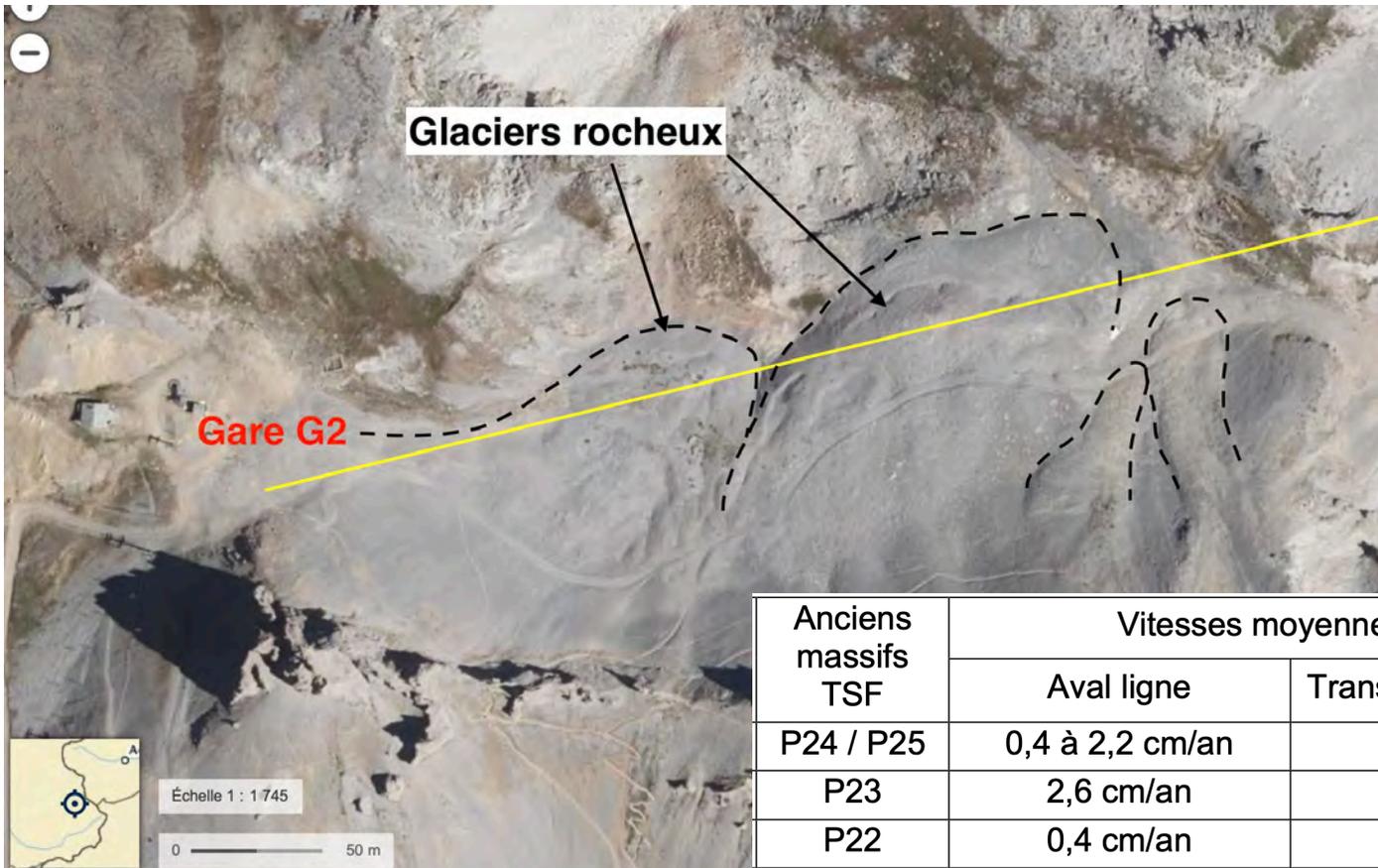


Figure 4 : Linéaire des pylônes implanté potentiellement sur du permafrost du télésiège du Marais d'après la carte de distribution du permafrost de Marcer et al. (2019). Extrait rapport NAGA Géophysics – 11/2020.

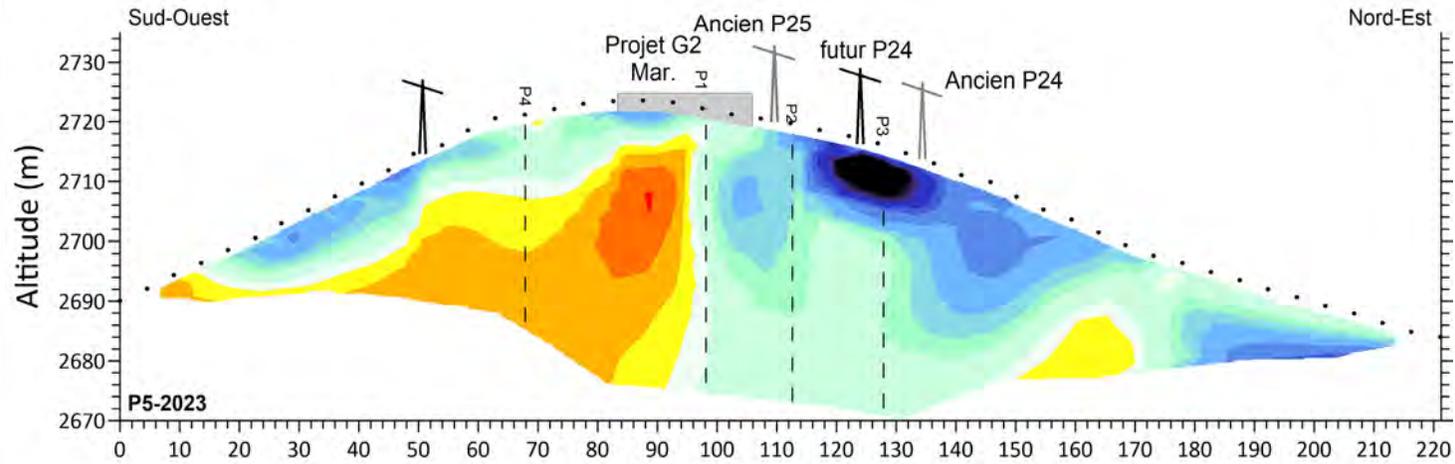
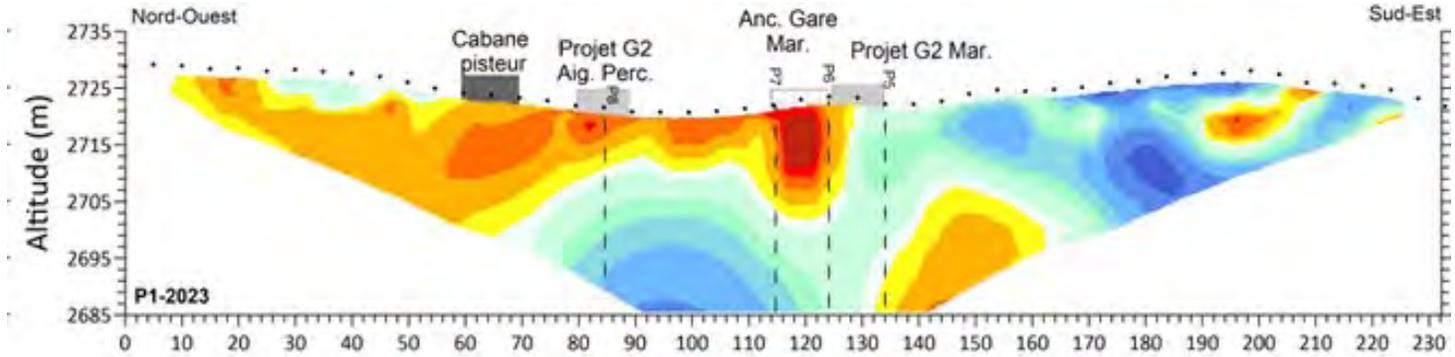
L'analyse du suivi topographique entre 2014 et 2018 sur le TSF3 a permis de déduire des vitesses "moyennes" utiles à l'anticipation des mouvements et directions futures



Anciens massifs TSF	Vitesses moyennes déduites du suivi topo 2014/2018		
	Aval ligne	Transversal (vers la droite)	Tassement
P24 / P25	0,4 à 2,2 cm/an	0,2 à 1 cm/an	1,2 à 2,4 cm/an
P23	2,6 cm/an	0,6 à 0,8 cm/an	3,5 cm/an
P22	0,4 cm/an	1,2 à 1,4 cm/an	0,4 cm/an



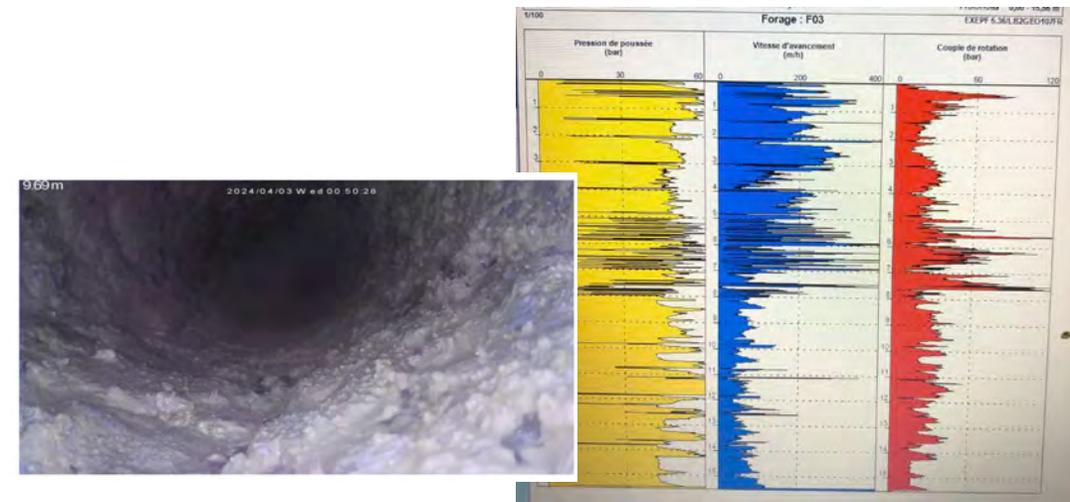
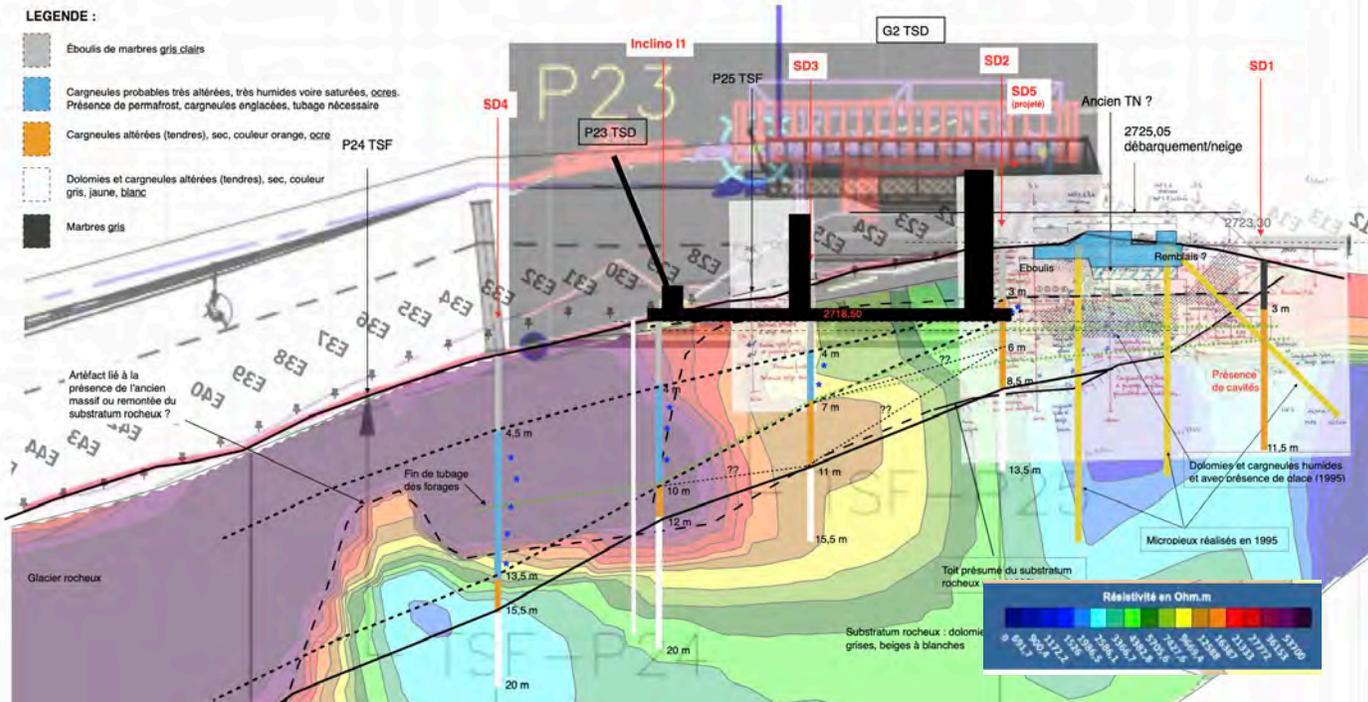
Mesures géophysiques comparatives en 2020 / 2023



Réalisation d'une campagne de reconnaissances géotechniques et géophysiques :

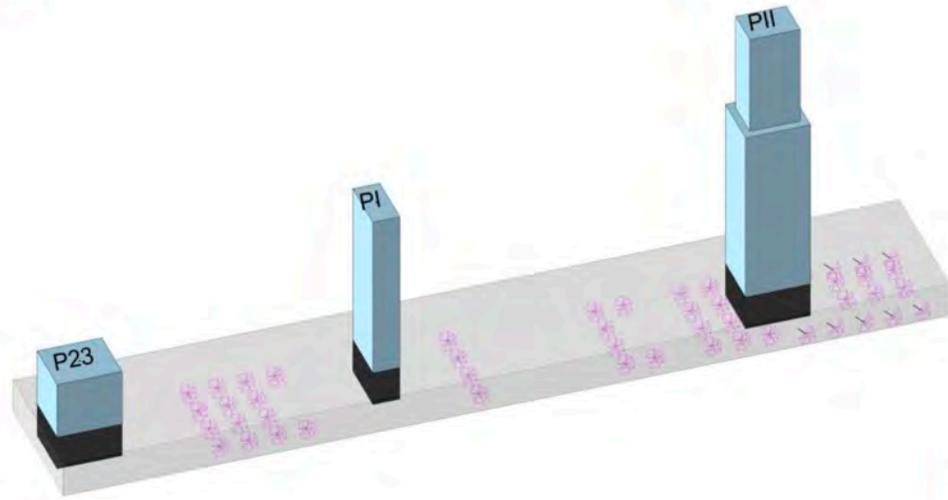
- plusieurs campagnes de reconnaissances géophysiques (SAGE, NAGA)
- Sondages géotechniques : forages destructifs avec passage caméra, essais d'arrachement sur ancrages
- + prise en compte des données existantes (sondages 1995,...)

visant à établir un modèle géotechnique du site permettant d'orienter les choix techniques pour les fondations



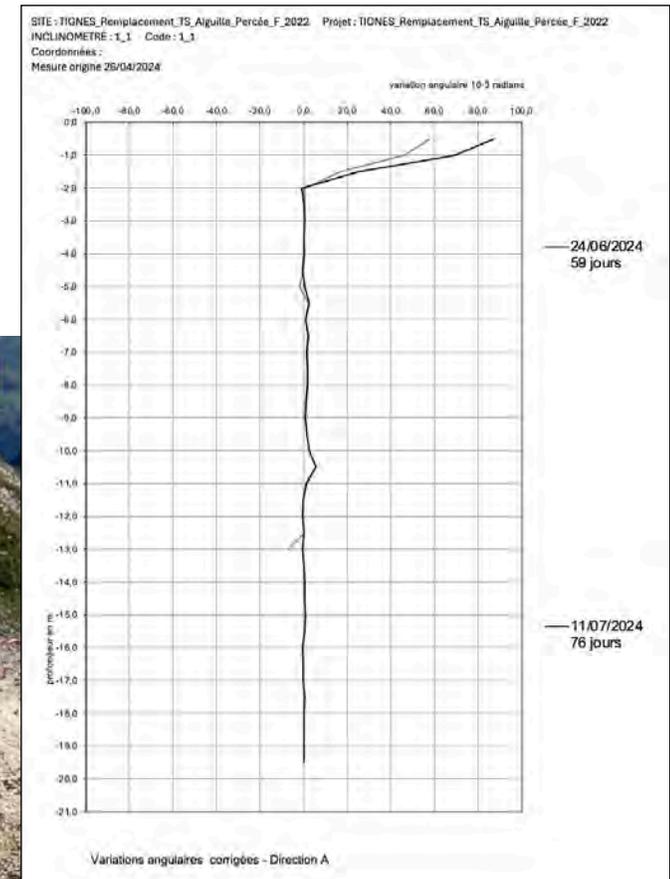
Conception retenue, adaptée au contexte géotechnique et aux évolutions futures :

- Gare amont + P23 (en console) fondés sur un massif commun sur pieux verticaux + micropieux inclinés
- Pylônes P21 et P22 fondés au sein du glacier rocheux : intégration de réglage supplémentaire sur la structure métallique pour accompagnement durant la vie de l'ouvrage



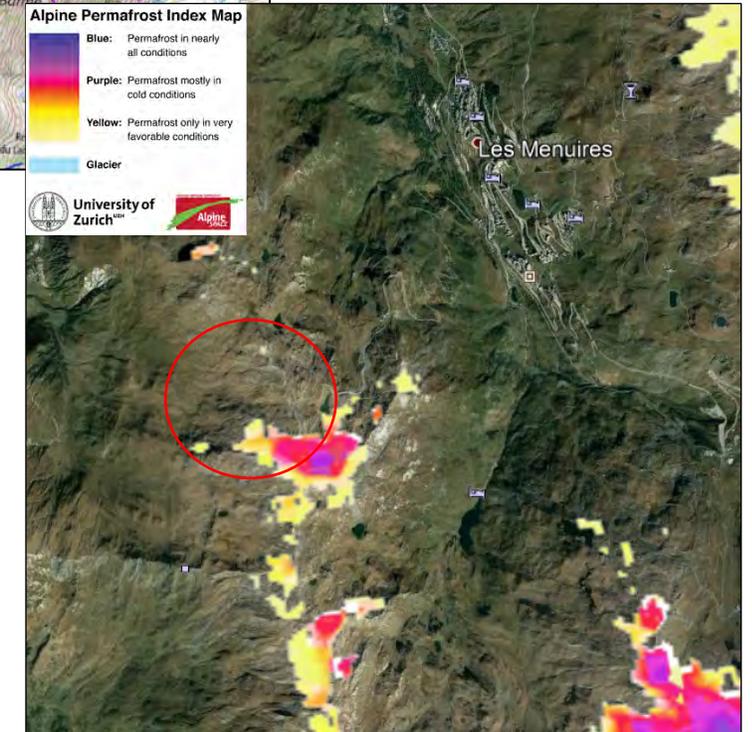
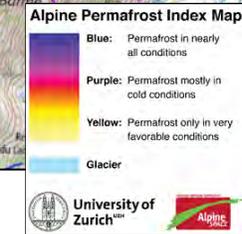
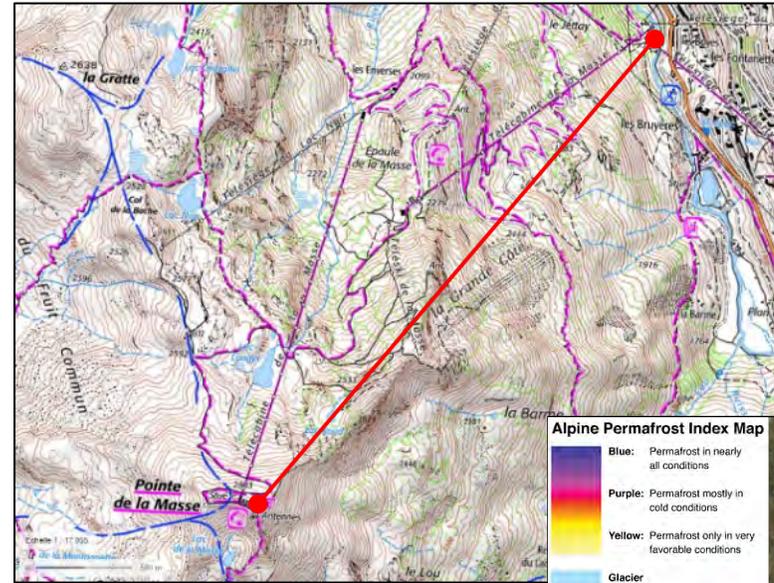
Suivi ultérieur mis en place :

- Suivi topographique : contrôle d'alignement des massifs béton
- Suivi inclinométrique : en aval de la gare et au sein des pieux
- Sondes de température : suivi de l'évolution et dégradation du permafrost



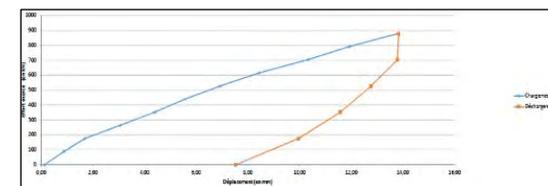
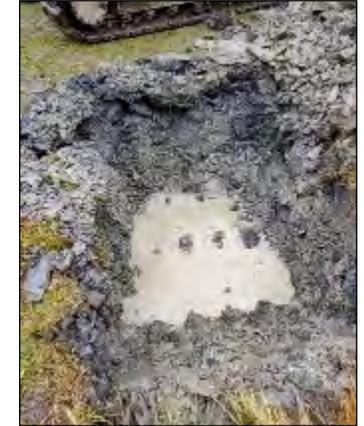
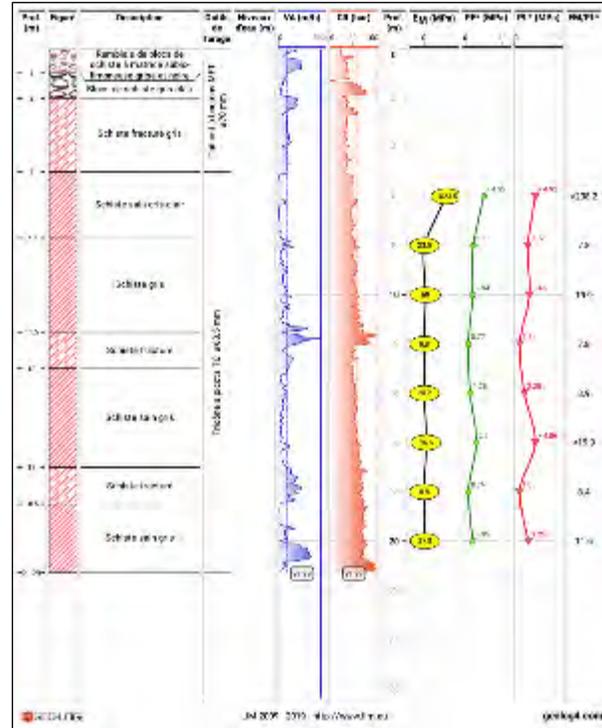
Pointe de la Masse (2787 m)

- Télécabine de plus de 3 km sur 24 pylônes,
- D.D.C. très élevées sur les gares
- Présence d'une nappe en gare aval
- Présence très probable de permafrost alpin au sommet (APIM, Boeckli et al., 2012)



Campagnes d'investigations géotechniques :

Sondages à la pelle et terrassements profonds, sondages destructifs profonds avec passages caméra, essais pressiométriques, essais d'arrachement sur ancrages, mesures piézométriques



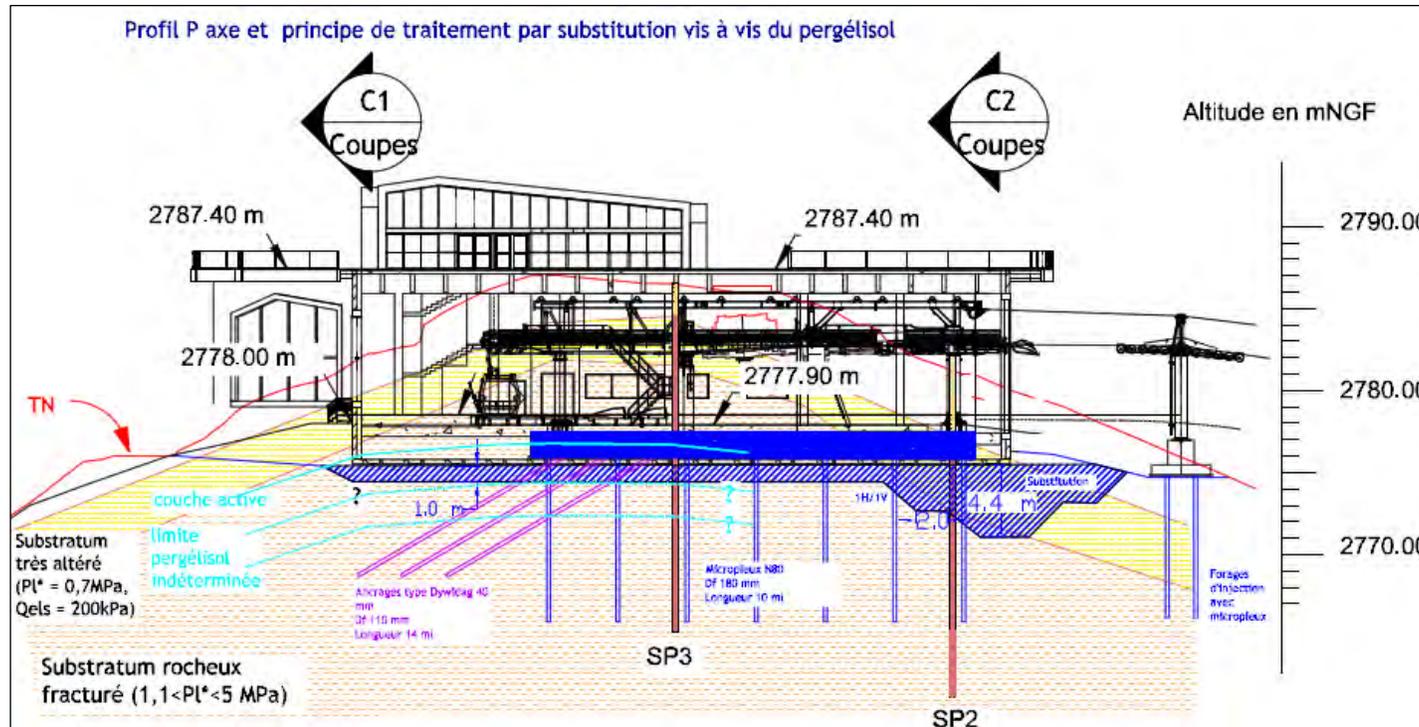
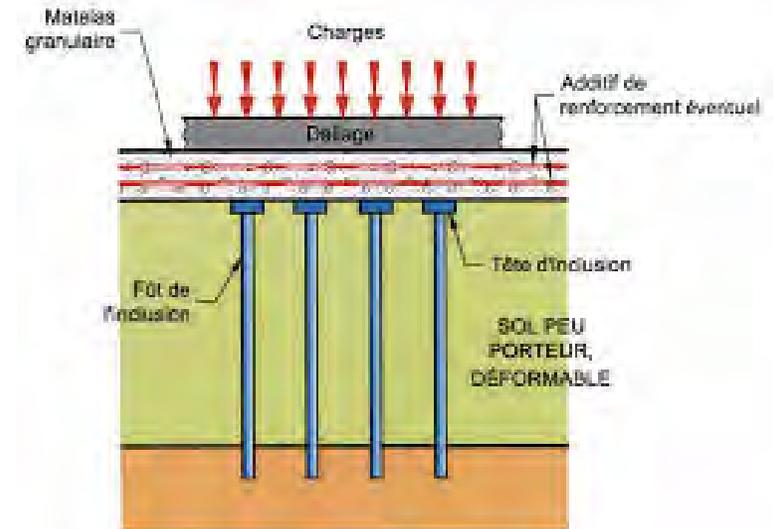
**Etablissement des modèles géotechniques des gares et du garage
pour définir les choix techniques de fondations**

Gare G2 & P24

Gare G1 & Garage

Conception et dimensionnement des fondations et dispositifs constructifs en cohérence avec les modèles géotechniques actuels et leur évolution prévisionnelle

- Gare amont + P24 fondés sur substitution et pieux verticaux + micropieux inclinés
- Gare aval fondée sur substitution jusqu'au rocher,
- Garage aval fondé sur inclusions rigides



3 - Prise en compte lors de la conception d'un nouvel appareil

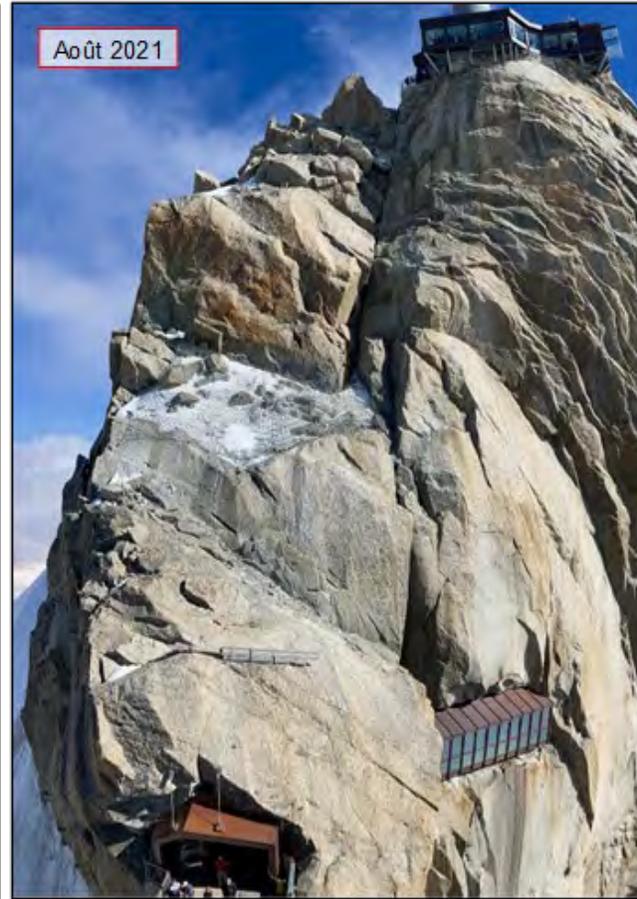
En conclusion, on retiendra l'importance de disposer :

- De reconnaissances géotechniques et géophysiques précises et suffisamment nombreuses
- De données de suivi topographique antérieur
- De données de suivi inclinométrique
- ...

Il est donc important d'intégrer ces sujets suffisamment en amont pour avoir une meilleure connaissance du site et mieux adapter les solutions techniques dans la conception des ouvrages

4 - Suivi des ouvrages et instrumentation associée





Problématiques observées sur le site de l'Aiguille du Midi

- ✓ Fonte précoce du couvert neigeux ► Mise à nu de nouvelles zones d'accumulation ► Risque de chutes de pierres accru,
- ✓ Réchauffement climatique ► Fonte du permafrost ► Risque d'écroulement lié à la suppression du « lien glace ».

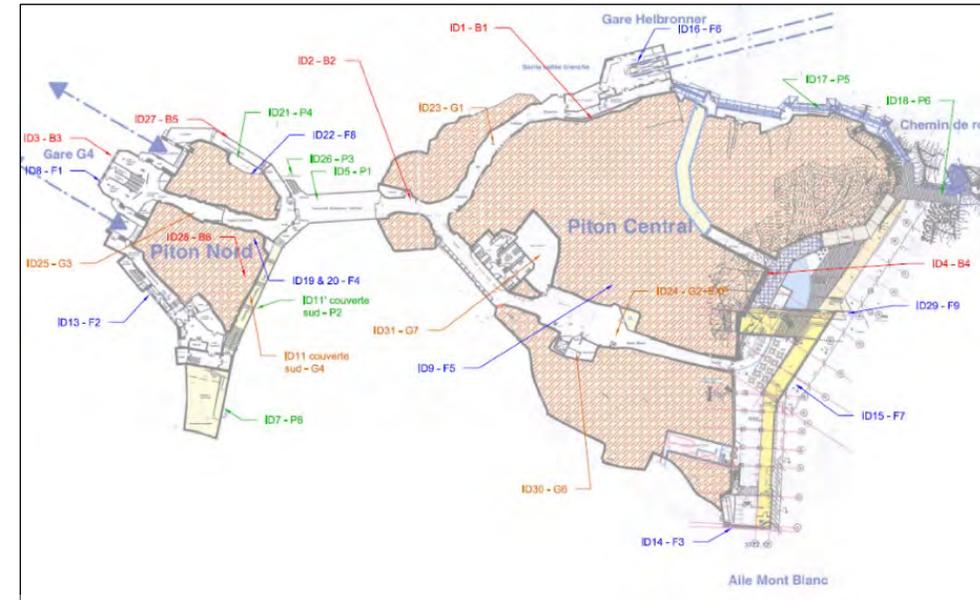
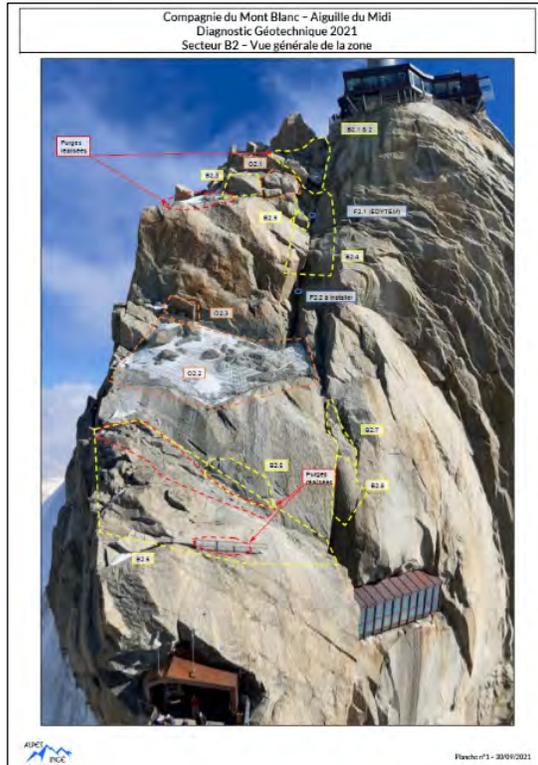


Suivi Alpes Ingé depuis 2003 :

Diagnostics tous les 3 ans :

- ✓ Chutes de blocs sur les zones surplombant du public ou des ouvrages,
- ✓ Fondations (y compris les massifs rocheux de fondation),
- ✓ Ouvrages extérieurs (structure et fondations),
- ✓ Galeries.

>>> Travaux de sécurisation ou d'entretien proposés à la suite des différents diagnostics



Depuis 2020 réorganisation du suivi :

- ✓ Suivi exhaustif des événements par le personnel CMB (cahier de suivi site G4 et quadrillage face Nord Aiguille),
- ✓ Diagnostic exhaustif chutes de blocs tous les 2 ans,
- ✓ Visites annuelles de sécurité à la demande de la CMB (1 à 2 en moyenne),
- ✓ Mise en place d'un système d'auscultation automatique avec consultation à distance,
- ✓ Diagnostics fondations, Ouvrages extérieurs et Galeries tous les 3 ans,
- ✓ Rapport de synthèse annuel des diagnostics et travaux réalisés.

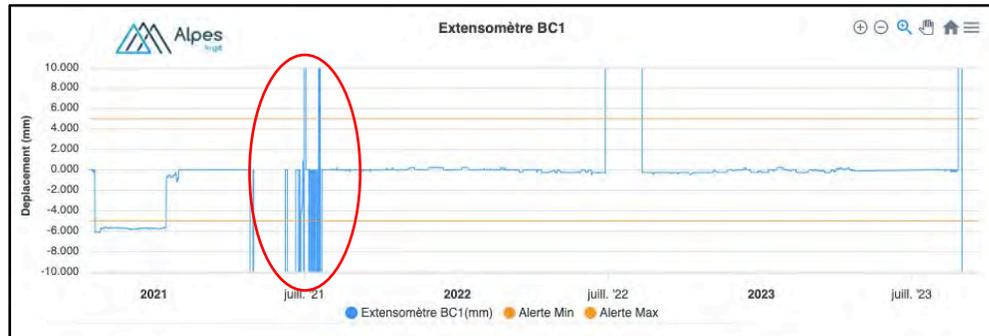
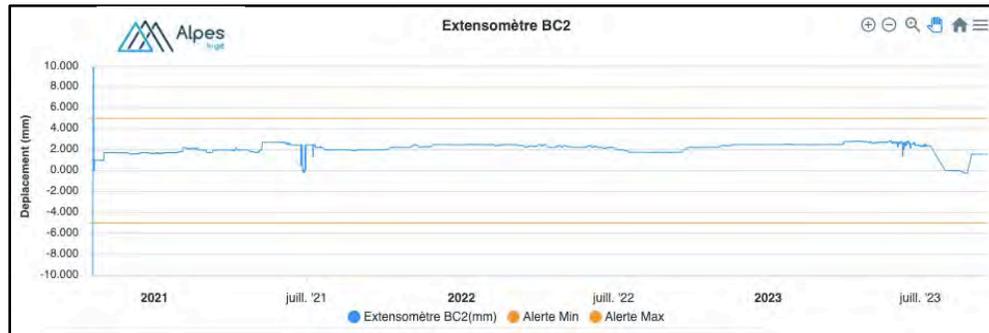


Solutions : Surveillance, Observations & Confortements

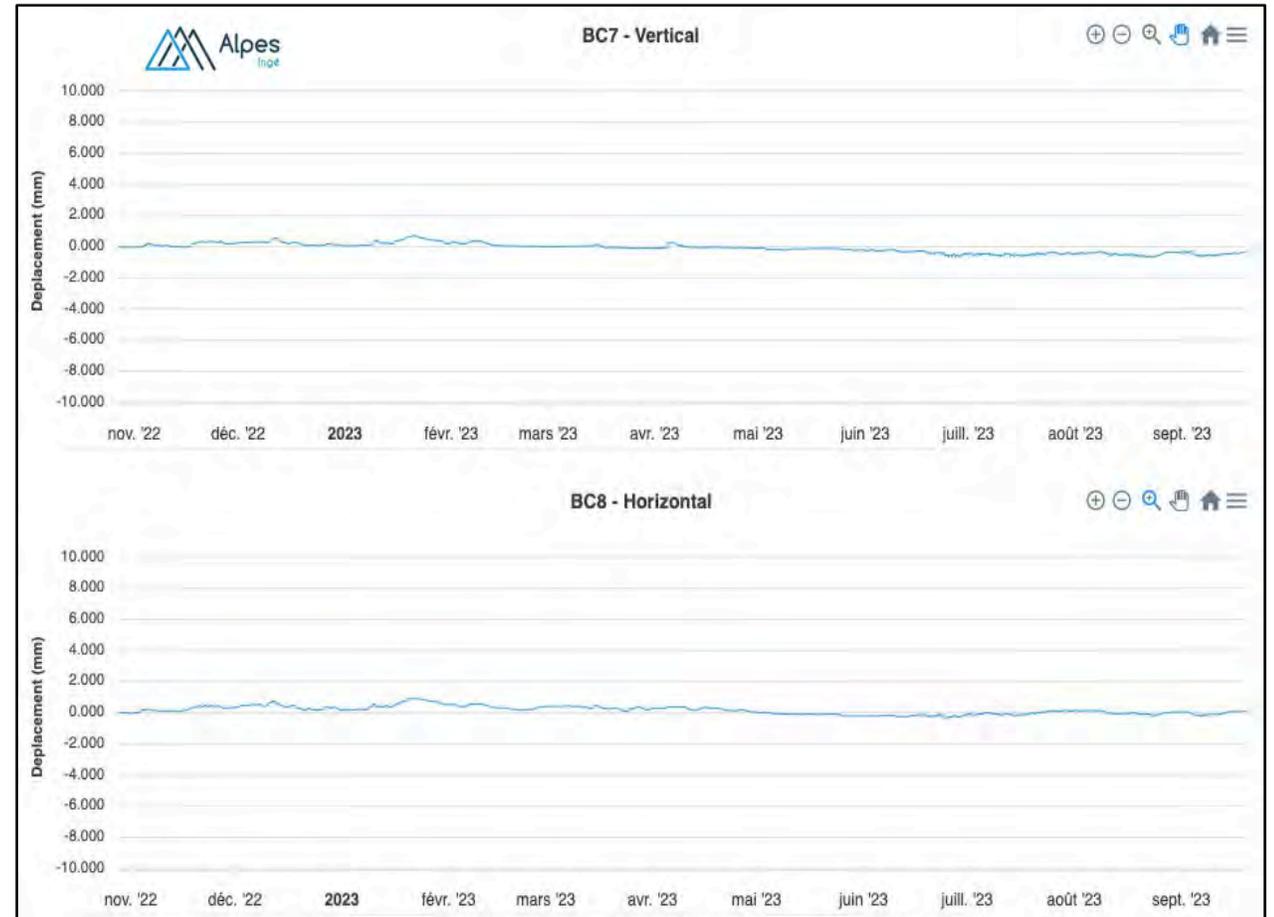
- ✓ Travail en collaboration avec le laboratoire EDYTEM qui surveille et réalise de nombreuses mesures depuis plus de 15 ans (températures en surface et en profondeur selon les expositions des faces, respiration du massif, modélisation fonte permafrost, surveillance fonte et retrait des glaciers périphériques...),
- ✓ Confortement actif de nombreux compartiments plus ou moins volumineux (jusqu'à 500 m³) pour limiter l'érosion du massif et ralentir l'altération et le réchauffement du permafrost en profondeur >>> maintien de l'épaisseur.
- ✓ Mise en place d'un système d'auscultation automatisé, consultable en ligne et calibré avec des seuils d'alertes qui sont réajustés au fur et à mesure >>> Objectif : détecter d'éventuels signes précurseurs.



Extraits des courbes de suivi observables en temps réel



Exemple d'un dysfonctionnement > Alerte > Intervention sur site
> Rupture d'une gaine électrique d'un capteur > Réparation et remise en service

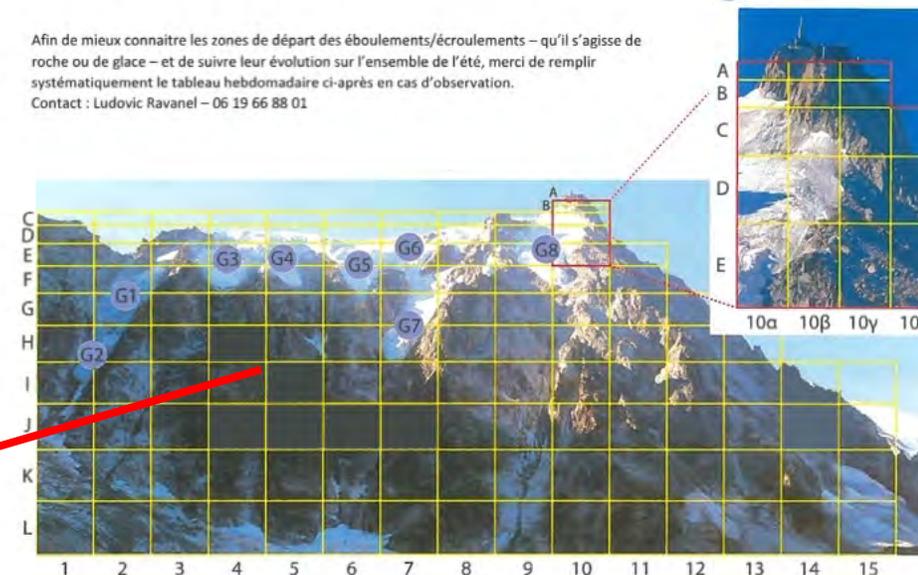


- ✓ Quadrillage de la face Nord de l'Aiguille fourni par EDYTEM dans le but de quantifier et qualifier les zones de départ de glace ou roche du massif,
- ✓ Remplissage systématique par le personnel CMB en période estivale et transmission de manière hebdomadaire au laboratoire pour analyse.

Recensement/documentation des déstabilisations rocheuses et glaciaires Face nord de l'Aiguille du Midi – Été 2023



Afin de mieux connaître les zones de départ des éboulements/écroulements – qu'il s'agisse de roche ou de glace – et de suivre leur évolution sur l'ensemble de l'été, merci de remplir systématiquement le tableau hebdomadaire ci-après en cas d'observation.
Contact : Ludovic Ravanel – 06 19 66 88 01



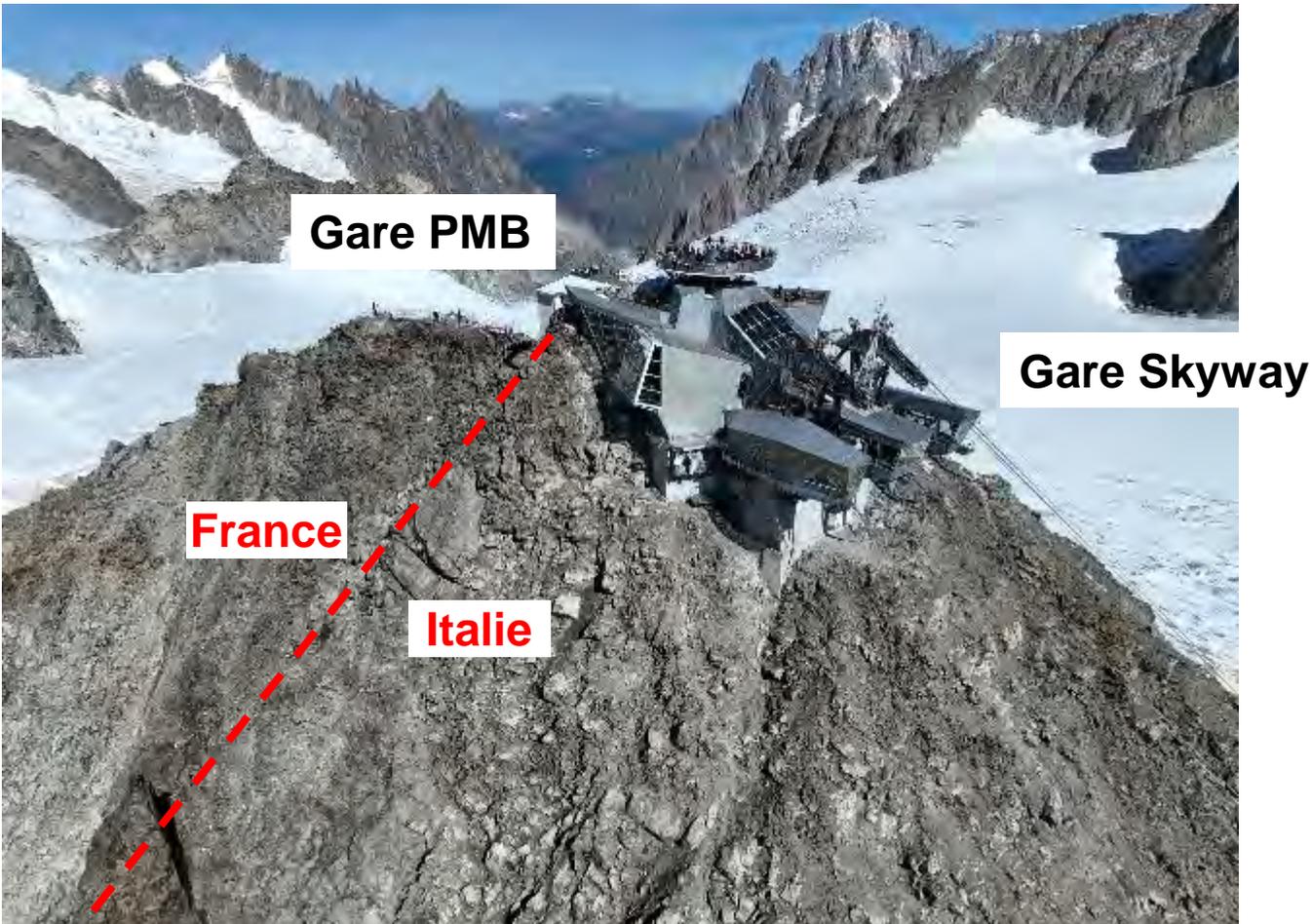
Semaine du au

N.	Date	Heure	Type Glace / Roche	Source Ex. : H9 pour roche ou G13 pour glace	Remarques Ex. : volume d'une 'voiture' / écoulements d'eau / glace dans la zone de détachement	Photo Oui / Non	Nom de l'observateur	Contact de l'observateur
1	21/08	16h30	Roche	I3	Blacs moyens	OUI	DESTACHE	07-78-63-7452
2	23/08	10 ^h 40	R	G8 G9	Tringros volume	OUI	Kuentz	0672340209
3	24/08	16 ^h 45	R	D E 10β 10γ	Gras blacs	OUI	Kuentz	"
4	26/08	7h50	roche	H9	Blacs moyens	Non	Vanneu/ Zannoni	0660837304
5	29/08	17 ^h 30	roche	H9	moyens	Non	ZANNONI	
6	08/09	16 ^h 45	R	I 10	Moyens	Non	Kuentz	
7								
8								

La gare Helbronner du TC PMB est située à 3462 m et date de 1957.

Le site présente des déformations qui font l'objet de suivi depuis plusieurs années.

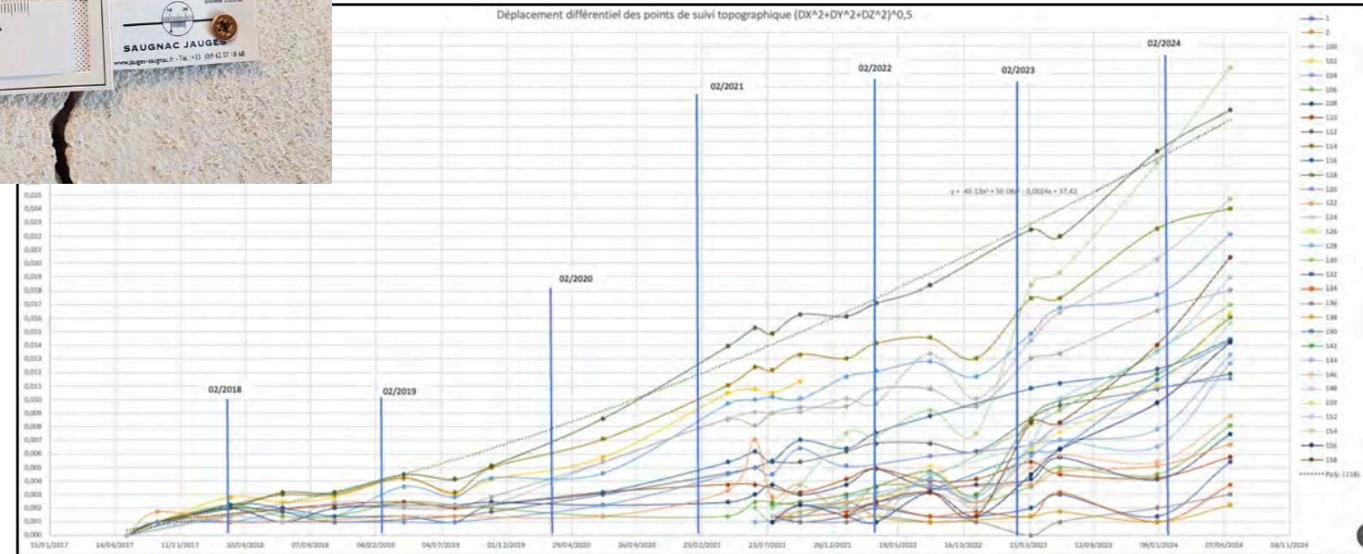
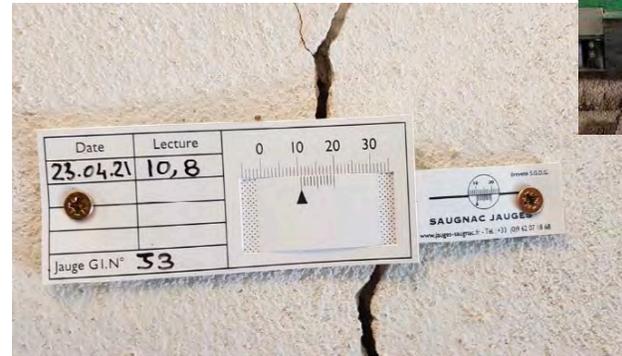
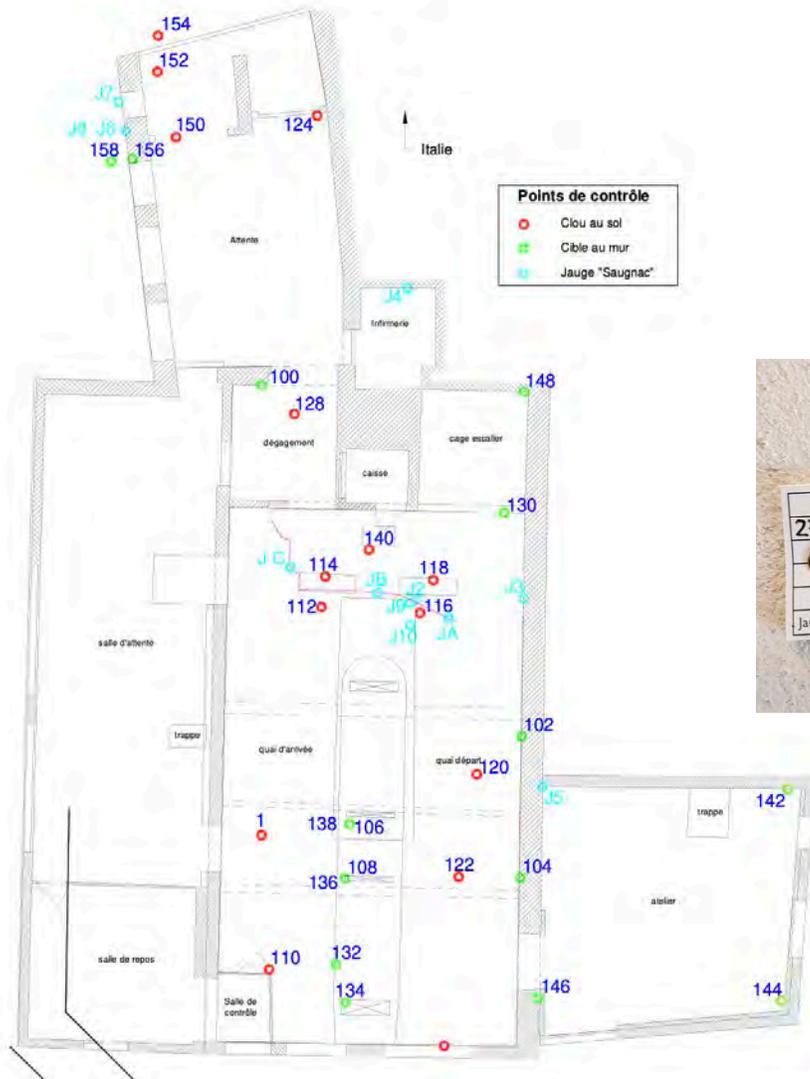
Site fortement remaniée lors de la construction du Skyway côté italien en 2015



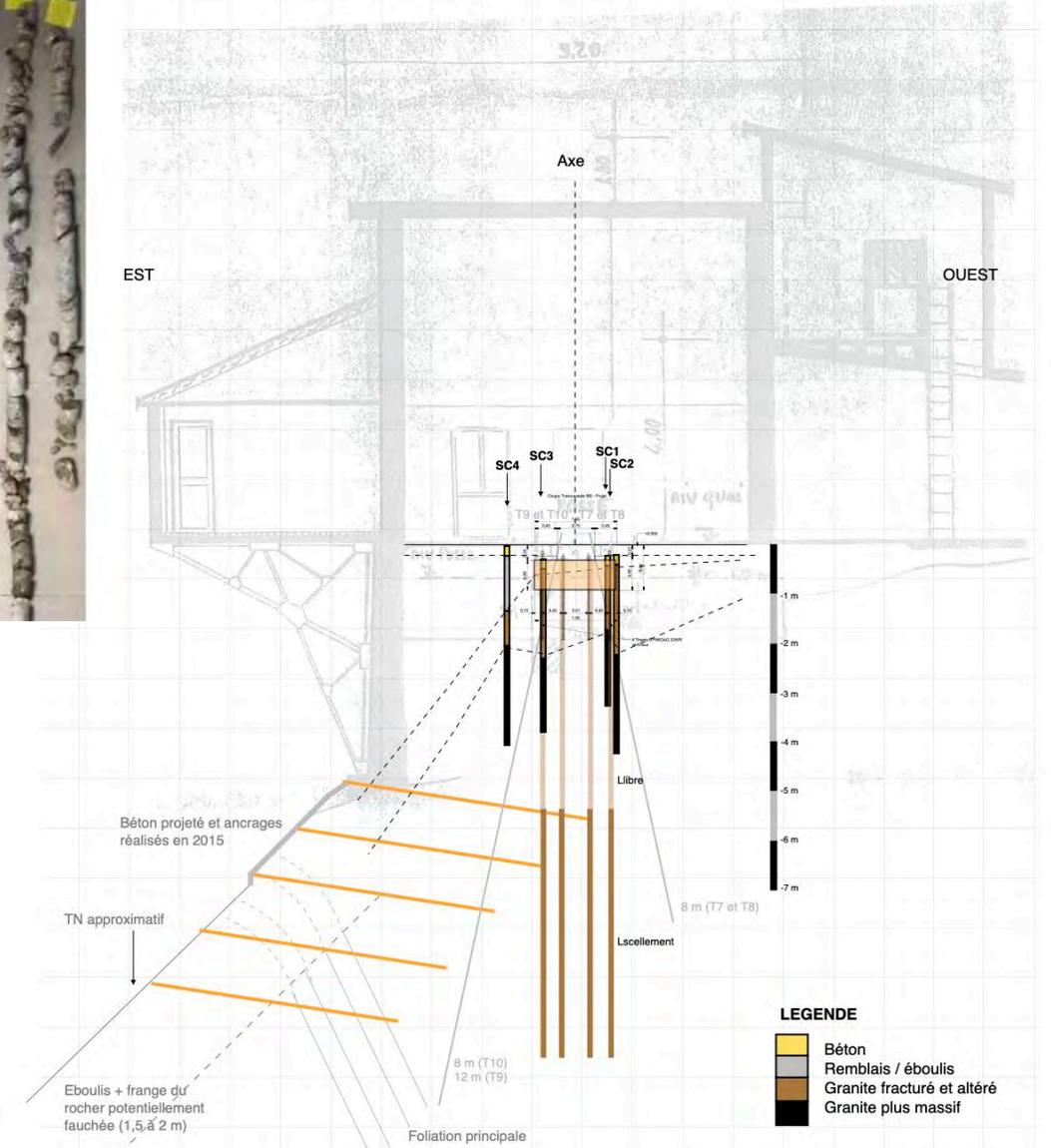
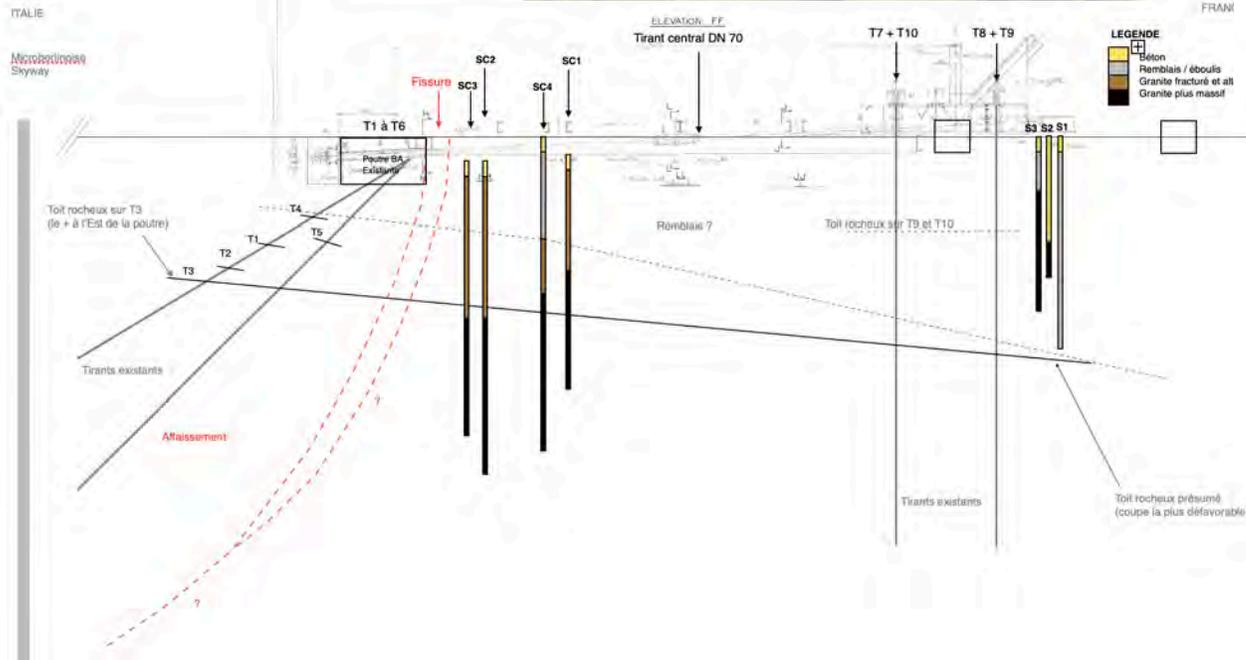
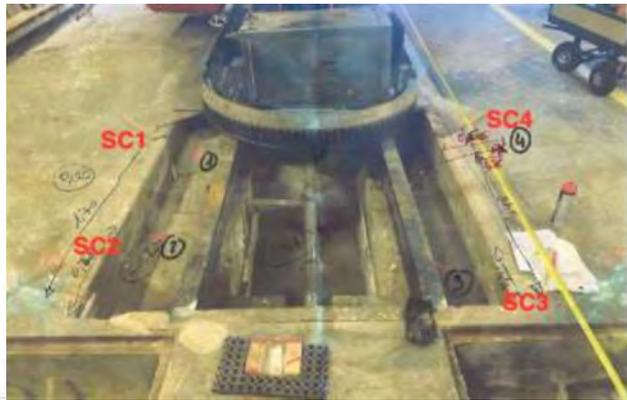
Travaux de terrassement en 2012-2013

Suivi topographique et jauges

Croquis planimétrique des points de contrôle



Reconnaitances géotechniques

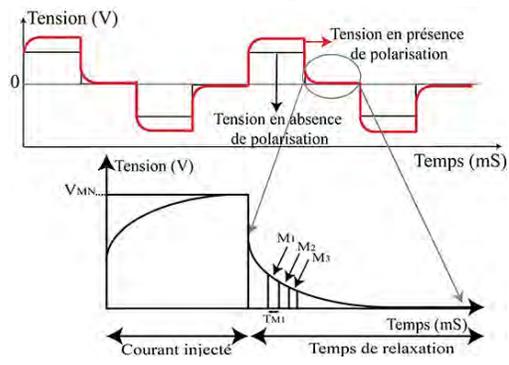


5 - Pistes de travail et perspectives pour le suivi des remontées mécaniques

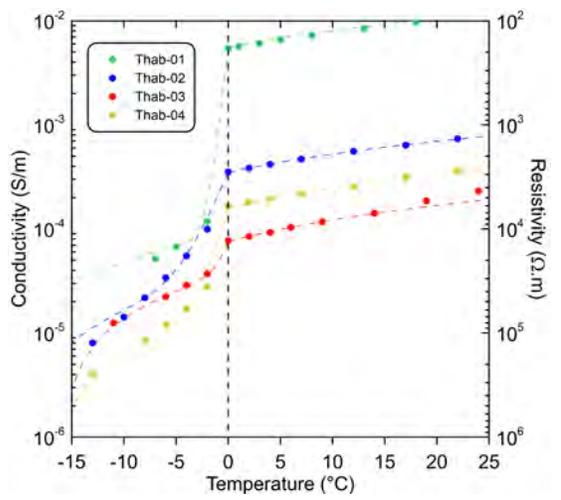
- **Analyse multi-échelle**
(satellites, drone, LiDAR)
- **Géophysique quantitative**
et de suivi
- **Modélisation numérique**

Méthode de prospection géophysique quantitative

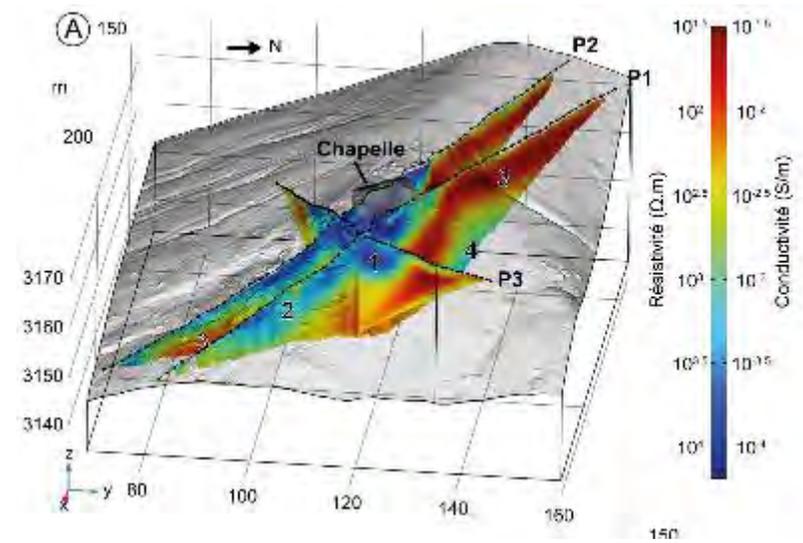
→ Combinaison de méthodes géophysiques électriques et sismiques



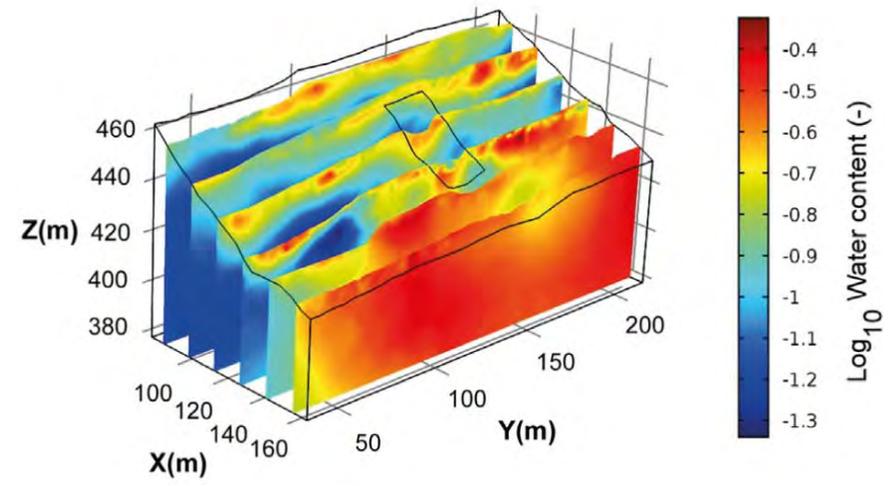
→ Mesure en laboratoire et paramètres pétrophysiques



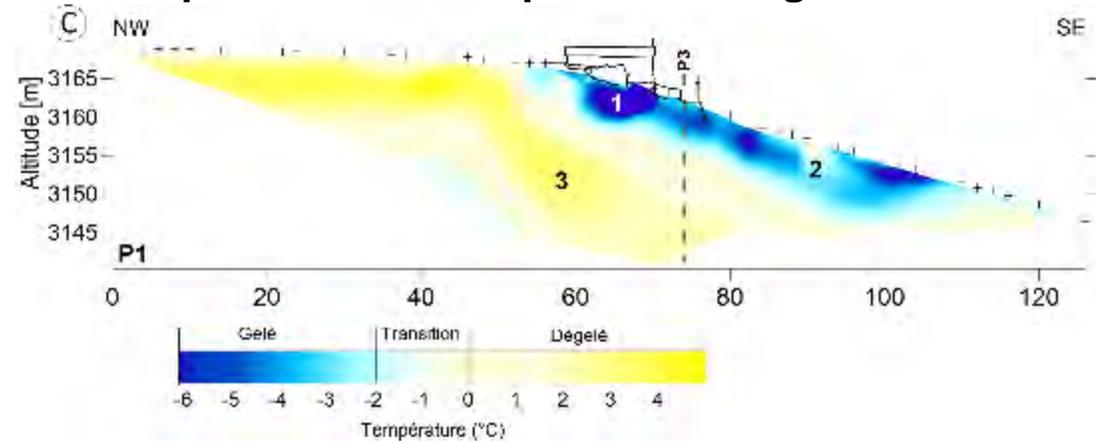
→ Imagerie 3D



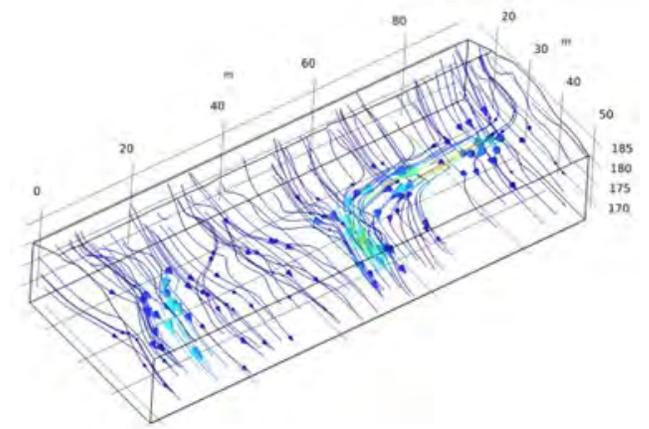
→ Evaluation teneur en argile, teneur en eau, perméabilité



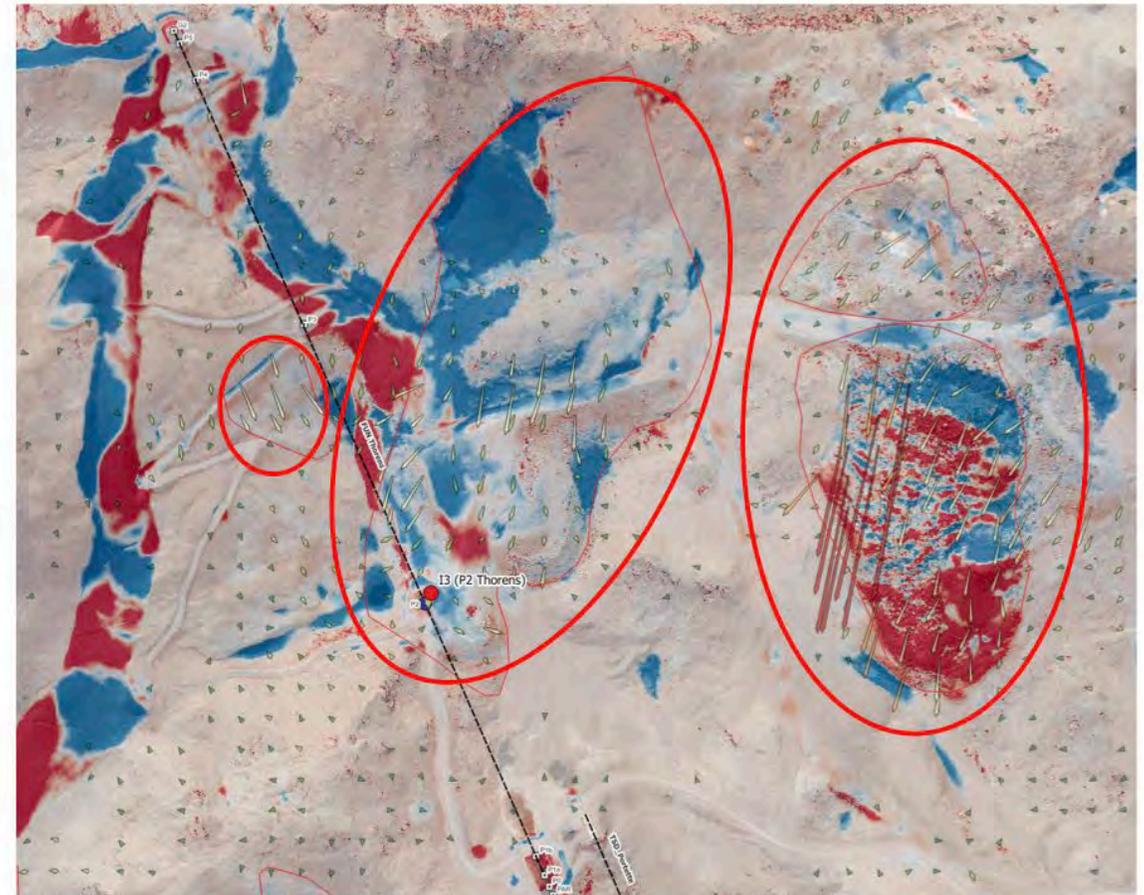
→ Détermination indirecte de la température et de la présence de glace

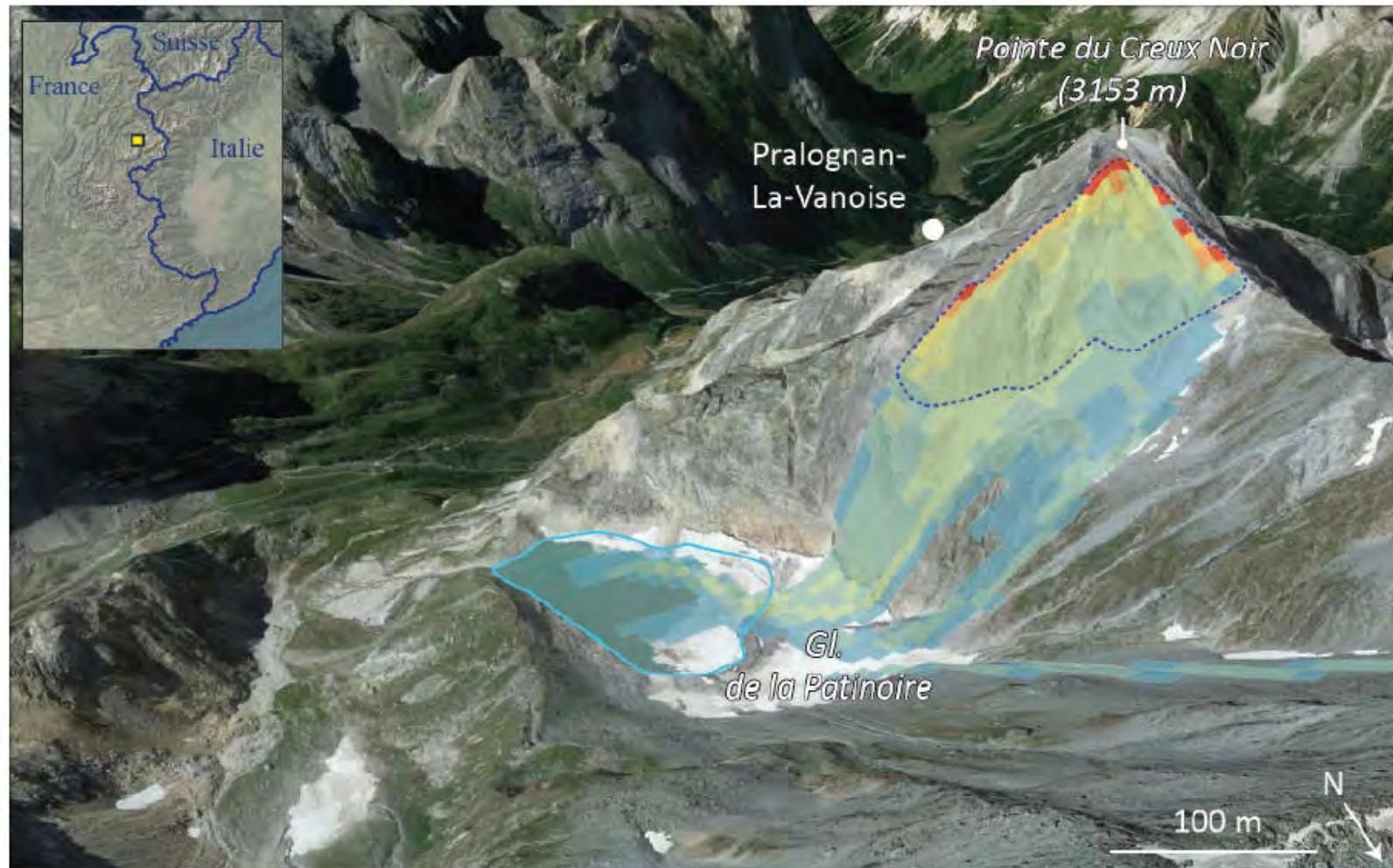


→ Suivi temporel et visualisation des circulations d'eau

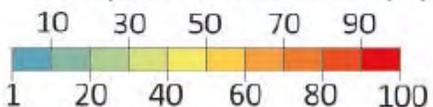


Méthode de traitement automatisé d'analyse de différentes images temporelles (MNT issus de Lidar) et de détermination des champs de déplacements associés





Susceptibilité d'atteinte (%) :



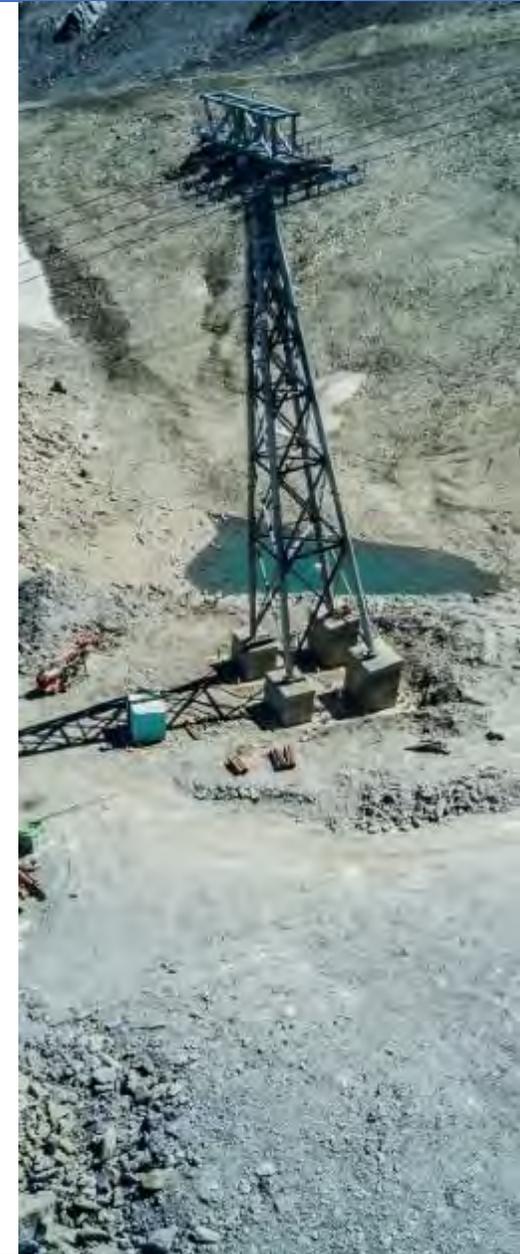
Zone de départ

Contour du lac

- 139 surcreusements détectés (MMB : 50 % ; Vanoise : 30 % ; Écrins : 16 %).
- 59 surcreusements prédits ont un niveau de confiance $\geq 3/5$.
- 17 lacs se sont déjà formés dans les surcreusements prédits depuis la période 2006-2009.

Conclusion

- Augmentation relative des désordres depuis 30 ans, liée au dégel du permafrost et aux glissements de terrain ;
- Intégrer ces évolutions dès la conception des nouveaux téléportés ;
- Anticiper les risques naturels : instabilités de terrain, chutes de blocs, érosion...
- Adapter les ouvrages existants : tracé, fondations spécifiques, protections, dispositifs réglables.
- Assurer un suivi et une surveillance continue avec méthodes récentes développées



Merci de votre attention

Ivan BRUNET, Mathieu CAMUS, Pierre-Allain DUVILLARD



Alpes Ingé
Parc d'activités Eurékalp
38660 SAINT VINCENT DE
MERCUZE
www.alpes-inge.com
ivan.brunet@alpes-inge.com



**Société Alpine de
Géotechnique**
2 rue de la Condamine
38610 GIERES
www.sage-ingenierie.com
m.camus@sage-ingenierie.com



NAGA Geophysics
229 rue Joseph Fontanet
73000 Chambéry
<https://naga-geophysics.com/>
pierre-allain.duvillard@naga-
geophysics.com

