

APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉTUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN SUPPORT D'INFRASTRUCTURE SITUÉES EN CONTEXTE DE PERMAFROST RICHE EN GLACE DANS LES ALPES FRANÇAISES

Xavier Bodin, chargé de recherche CNRS, laboratoire EDYTEM

Diego Cusicanqui, post-doctorant CNES, laboratoire ISTerre

1	Contexte.....	2
1.1	Généralités sur le permafrost.....	2
1.2	La dynamique du permafrost alpin.....	3
2	Les glaciers rocheux.....	4
2.1	Structure interne et mouvements.....	4
2.2	La distribution des glaciers rocheux et du permafrost riche en glace.....	5
2.3	Les impacts du changement climatique.....	6
2.4	Le réseau de suivi PermaFrance.....	9
3	Ressources cartographiques.....	11
3.1	Imagerie optique.....	11
3.2	Imagerie radar et usage des interférogrammes.....	13
3.3	Ressources élaborées pour la recherche.....	14
4	Outils pour l'analyse et la production de données.....	21
4.1	Évaluation des dynamiques géomorphologiques.....	21
4.2	Outils pour le calcul des déplacements.....	24
4.3	Chaîne de traitement GeoMultiCorr.....	25

1 Contexte

Dans les Alpes françaises, les terrains situés au-dessus de ~2400 m d'altitude sont susceptibles de contenir du permafrost dit « riche en glace » (Marcer et al., 2017), notamment sous la forme de glaciers rocheux (langues de débris rocheux soudés par la glace et animées d'un mouvement de fluage). Or, les rares mesures effectuées dans le permafrost suggèrent qu'une tranche importante de ce permafrost est probablement proche du point de fusion, voire l'a déjà atteint (Magnin et al., 2023).

Lorsque le permafrost est riche en glace, les conséquences géomorphologiques de sa dégradation (c-à-d son réchauffement et la fusion de la glace qu'il contient) incluent l'accélération des vitesses de déformation des glaciers rocheux (Marcer et al., 2021) et localement la déstabilisation de ces formes, pouvant entraîner des risques (Bodin et al., 2021). Dans les Alpes françaises, près de 1000 éléments d'infrastructures ont été identifiés comme étant situés sur du permafrost (Duvillard et al., 2019), dont 16 % seraient caractérisées par un risque élevé d'être déstabilisées du fait de la dégradation du permafrost (Duvillard et al., 2021).

Ce rapport vise à dresser un panorama des outils et des données de télédétection disponibles actuellement. Ces derniers peuvent servir de base à une première estimation des conditions géomorphologiques (en particulier les mouvements du sol) régnant dans les terrains support d'infrastructure, dans les Alpes françaises.

1.1 Généralités sur le permafrost

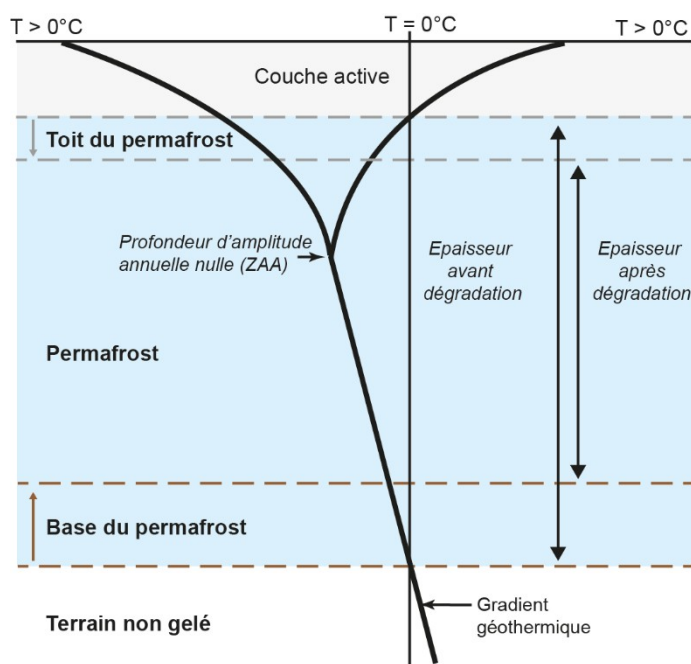


Figure 1: Structure verticale théorique du permafrost en fonction de sa température (les deux courbes présentent les températures minimales et maximales).

Sont considérés comme étant du permafrost tous les terrains (le sol, au sens très large de la portion superficielle de la croûte terrestre, à l'interface avec l'atmosphère) dont la température reste négative pendant au moins deux années consécutives : les conditions climatiques favorables à ce phénomène se rencontrent aux hautes latitudes mais également en altitude.

Comme l'illustre la figure 1, on distingue la **couche active**, qui est la portion superficielle du sol où un dégel saisonnier peut se produire, du **permafrost stricto sensu**, lequel conserve en permanence une température négative. Vers une vingtaine de mètres de profondeur, les variations saisonnières de température s'annulent (**Zero Annual Amplitude, ZAA**), du fait de la nature et de l'intensité des flux de chaleur.

Ces derniers sont conditionnés d'une part par l'apport constant de chaleur géothermique (depuis le noyau terrestre) et d'autre part par les apports et les pertes, en général saisonniers, qui ont lieu depuis la surface et qui sont liés aux conditions climatiques.

Les modifications dans le bilan énergétique, principalement causées par les variations

climatiques, entraînent des changements de la température du permafrost, qui deviennent significatifs en-deça de la ZAA lorsque la temporalité dépasse plusieurs décennies. Lorsqu'il se réchauffe, et *in fine* se contracte (en réduisant la surface couverte), le permafrost est dit en **dégradation** (à l'inverse, il est dit en aggradation lorsqu'il s'étend). La dégradation s'accompagne de l'épaississement de la couche active (qui abaisse le toit du permafrost) et de la remontée de la base du permafrost, et de la fonte de la glace contenue dans le terrain, ce qui produit alors les changements géomorphologiques majeurs en surface.

Du fait de son réchauffement (Biskaborn et al., 2019), la dégradation du permafrost des hautes latitudes sur ses marges entraîne ainsi la formation d'un paysage de lacs dits « thermokarstiques », alimentés par la fusion de masses de glace souterraines. Ce phénomène existe également sur le permafrost alpin, mais de façon plus localisée (Cusicanqui et al., 2023). Le relargage de méthane et de gaz anciennement piégés dans le permafrost circum-polaire est un des éléments clé, encore peu connu, de l'évolution future du climat à l'échelle globale : ce phénomène ne concerne pas le permafrost de montagne.

1.2 La dynamique du permafrost alpin

Dans une chaîne de montagne au climat tempéré comme les Alpes, la cryosphère (l'ensemble des milieux où l'eau se maintient, de façon temporaire ou permanente, à l'état solide) voit se côtoyer dans les paysages les glaciers et le permafrost. Ces deux éléments sont présents sur, ou dans, le sol, lequel est constitué soit de roche dite « en place » (c'est-à-dire la roche-mère, la partie supérieure de la croûte continentale, d'un point de vue géologique) massive et de nature et de propriétés très variées, soit de formations superficielles, c'est-à-dire des accumulations de débris rocheux issus de l'érosion de la roche en place, non consolidées et « mobilisables » par les processus de versant (dynamique glaciaire, avalanches, écoulements torrentiels, etc.).

Le permafrost de montagnes diffère de celui des hautes latitudes par les caractéristiques propres à ces milieux : fortes hétérogénéités du substrat géologique et de la topographie, grandes variations spatiales des conditions climatiques, influence de la pente sur les processus d'érosion et évolutions parfois rapides, influencées par l'énergie du relief.

Pour décrire cet élément spécifique de la cryosphère alpine qu'est le permafrost, deux domaines sont généralement distingués, plus particulièrement définis sous l'angle des dynamiques géomorphologiques qui s'y rattachent (Figure 2) :

- le **permafrost de paroi** d'une part (Figure 1a-c), qui se réfère aux massifs rocheux, « en place », consolidés et généralement raides ($> 30-40^\circ$), dont le gel profond peut induire la présence de glace au sein du réseau de fractures et de diaclases et des porosités. Les dynamiques géomorphologiques associées à la présence de ce type de permafrost sont essentiellement gravitaires (chute de blocs), amplifiées par l'approfondissement de la couche active et modulés par les caractéristiques de la structure géologique : éboulement, écroulements (Ravanel et al., 2020).
- le **permafrost des formations superficielles** d'autre part (Figure 1d-f), présent dans les accumulations de débris rocheux sur les versants et dans les fonds de vallée et pouvant contenir des proportions fortes (jusqu'à la saturation des vides) de glace. Les dynamiques associées à ce type de permafrost sont en particulier celles liées à la déformation visco-plastique du mélange glace-débris (dont la manifestation la plus visible sont les glaciers rocheux), laquelle est fortement modulée par les conditions thermo-hydriques du milieu.

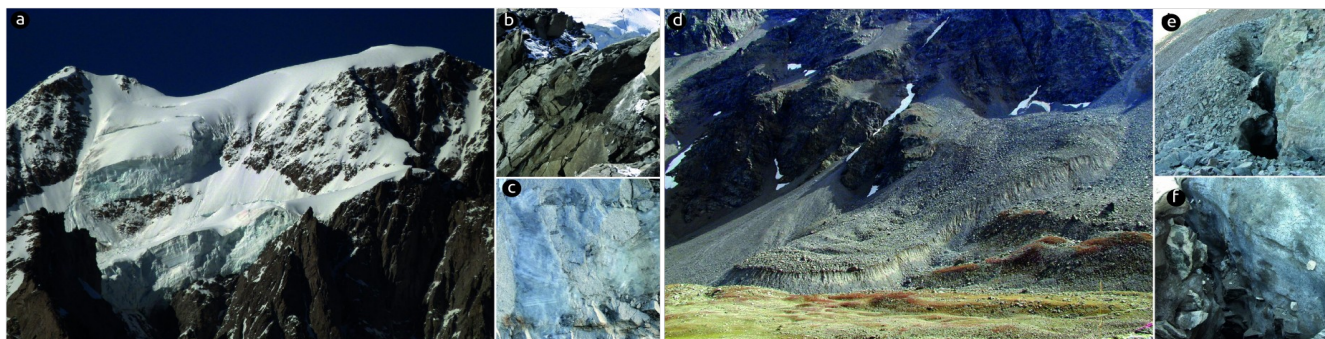


Figure 2: Principaux marqueurs de la présence du permafrost en montagne (illustration tirée de). a) glacier suspendu sur le sommet sud des Grandes Jorasses, dont le front se situe à 3980 m d'alt. (massif du Mont Blanc ; photo : P. Deline) ; b) glace dans des niches d'arrachement à l'Arête des Cosmiques à 3605 m d'alt. en 2006 (haut : au centre ; photo : L. Ravanel) et dans la face ouest du Petit Dru à 3530 m d'alt. en 2011 (bas ; largeur photo : ~ 50 cm ; photo : L. Ravanel), dans le massif du Mont Blanc ; c) glacier rocheux de Laurichard, dont le front atteint 2420 m d'alt. (massif du Combeynot ; photo : E. Thibert, 2004) ; d) structure interne du glacier rocheux de Laurichard dans le secteur de la rimaye (photo du bas : zoom dans la photo du haut ; largeur photo du bas : ~ 1 m ; photos : X. Bodin)

Le présent rapport traite plus spécifiquement des mouvements affectant le permafrost des formations superficielles, et en particulier les glaciers rocheux qui sont les formes les plus riches en glace et les plus mobiles, avec des impacts potentiellement forts de leurs dynamiques, et des changements de ces dernières, sur les infrastructures.

Du permafrost moins riche en glace peut être trouvé dans les formations superficielles sans que cela se traduise d'un point de vue géomorphologique (Lambiel and Pieracci, 2008) : autrement dit, des éboulis ou des moraines peuvent être gelés, et contenir de la glace, mais l'absence, ou la faiblesse, de mouvement du terrain (du fait de la teneur insuffisante en glace) fait qu'il n'y a pas de morphologie visible en surface.

2 Les glaciers rocheux

2.1 Structure interne et mouvements

Les glaciers rocheux sont constitués d'un mélange de débris rocheux et de glace, mais également d'air et d'eau liquide qui peuvent occuper les interstices (figure 3). La variété des contextes géologiques et géomorphologiques en montagne induit une grande variabilité latérale et verticale dans les caractéristiques des constituants des glaciers rocheux : taille et forme des débris rocheux, origine et caractéristiques de la glace, état thermo-hydrigue, relations avec les autres éléments glacio-géomorphologiques (glaciers, parois, moraines, mouvement de versants, etc.).

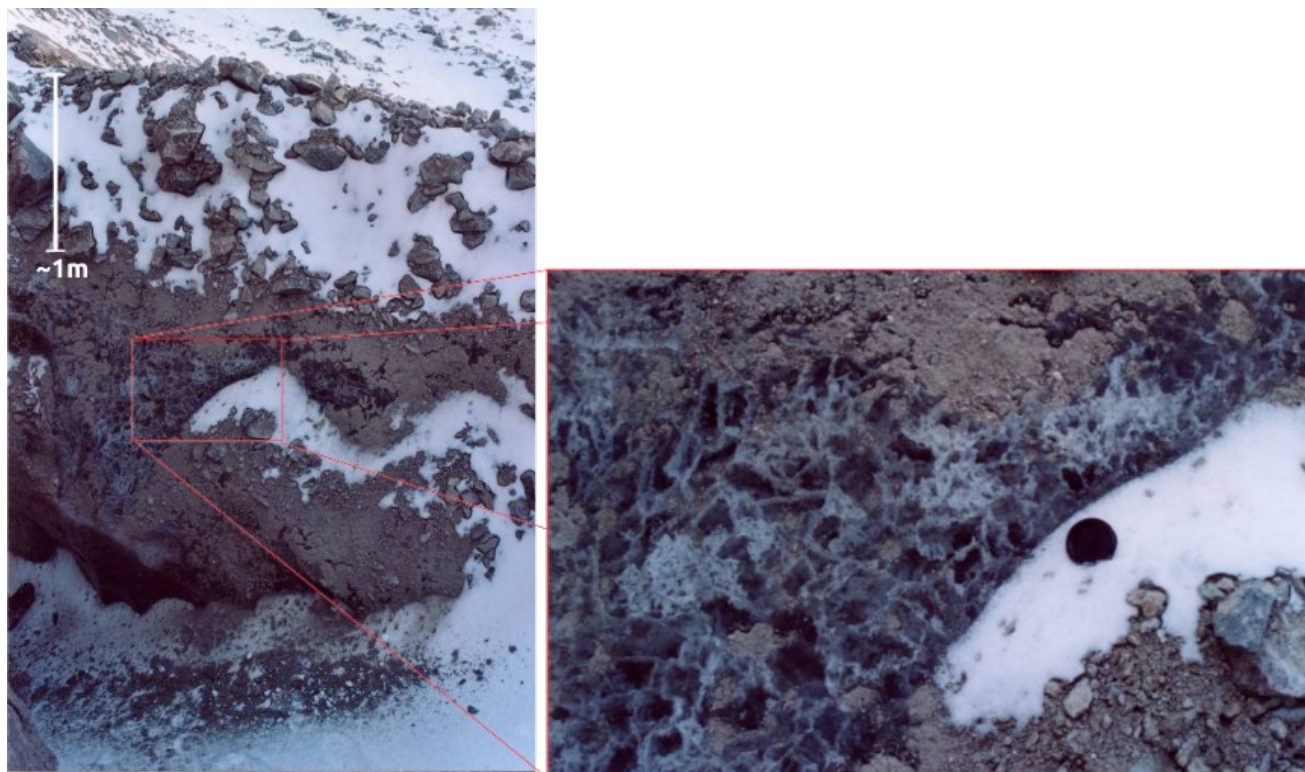


Figure 3: Structure interne du glacier rocheux de Laurichard (Hautes Alpes) observée à travers une coupe verticale produite par la rimage formée lors de l'été caniculaire 2003. Le cache d'objectif visible sur la photo de droite donne l'échelle. Photos : X. Bodin, 2003.

D'un point de vue mécanique, les rares mesures inclinométriques réalisées dans des glaciers rocheux (Arenson et al., 2002; Kenner et al., 2019) ont permis de préciser certaines des caractéristiques des mouvements qui animent le permafrost riche en glace (figure 4). Il est ainsi admis que le fluage (*creeping*) est le principal mode de déformation du mélange glace-débris, enclenché au-delà d'une certaine épaisseur de matériaux (typiquement une dizaine de mètres ; Cicoira et al., 2021) et au-delà d'un certain seuil de pente. Cette déformation visco-plastique, contrôlée notamment par l'état thermique du milieu, s'accompagne d'un cisaillement basal dans une mince strate (appelé horizon de cisaillement, ou *shearing horizon*) où se produisent, toujours d'après les mesures inclinométriques publiées, 50 à 80 % de la déformation totale enregistrée en surface.

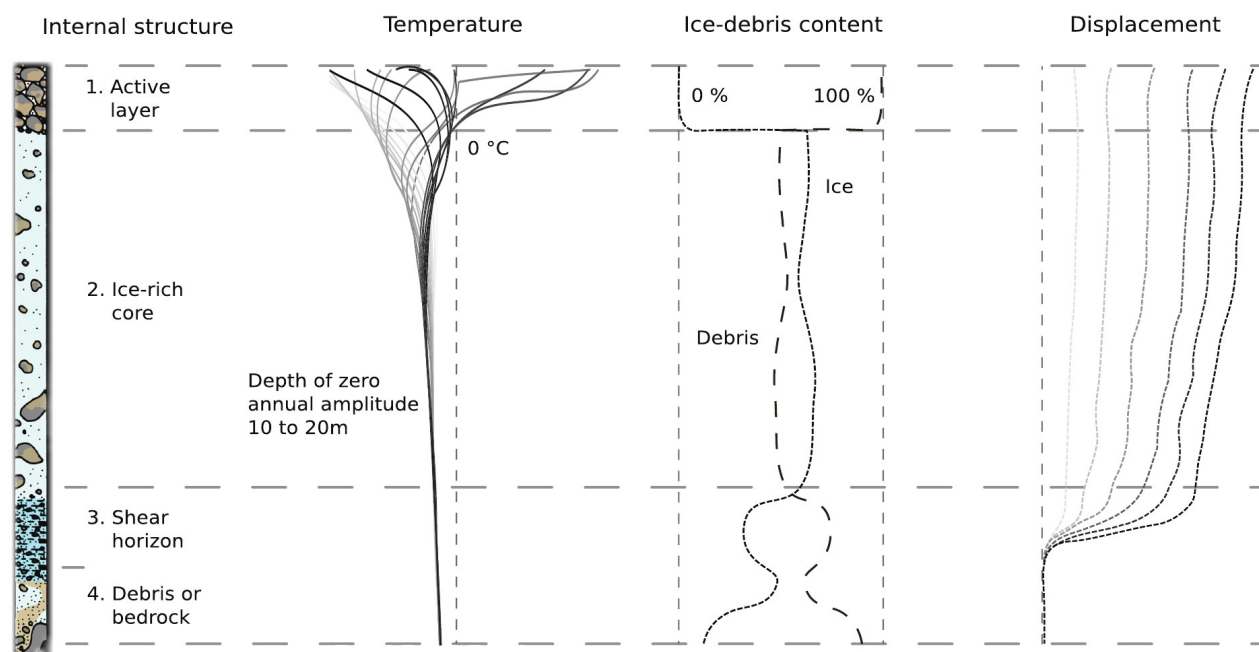


Figure 4: Variations verticales typiques des caractéristiques de la structure interne d'un glacier rocheux. D'après Cicoira et al. 2021

2.2 La distribution des glaciers rocheux et du permafrost riche en glace

En France, l'inventaire des glaciers rocheux, réalisé initialement entre 2010 et 2016, à la demande du service de la Restauration des Terrains de Montagne (RTM, service de l'Office National des Forêts) et sous la supervision des laboratoires PACTE et EDYTEM, a permis de dresser la cartographie complète des formes actives, inactives et fossiles présentes dans les départements alpins. (voir par ex. Roudnitska et al., 2017).

L'inventaire a été révisé partiellement par Marcer et al. (2017) et fait actuellement l'objet d'une révision complète, en deux phases : la 1ère, qui aboutira fin juillet 2023, pour affiner et corriger la géométrie des formes cartographiées (et éventuellement en supprimer ou en ajouter), et la 2nde, prévue pour fin 2023, pour assigner des attributs relatifs à la dynamique des formes, selon la méthodologie proposée par l'[Action group Rock Glacier Inventories and Kinematics](#)).

D'après ces données (inventaire non-révisé ; plus de détails dans la section 3.1), 3281 glaciers rocheux sont présents dans les Alpes françaises, couvrant une surface totale de 257 km² (le tableau 1 donne les détails par catégorie d'activité).

Tableau 1: Nombre et superficie des glaciers rocheux inventoriés dans les Alpes françaises

Type	nb	%	Total area [km ²]
Actifs	823	25	44
Inactifs	675	21	39
Reliques	1783	54	173

Sur la base de cet inventaire cartographique, notre équipe a proposé une modélisation statistique de la distribution spatiale du permafrost, décrite plus en détail dans la section 3.3 (Marcer et al., 2017). Parce qu'elle identifie les conditions topoclimatiques favorables à la présence du permafrost dans les formations superficielles, cette approche permet de mieux saisir l'extension de cet élément très peu connu, car pas directement visible ou accessible (figure 5).

Ainsi, il apparaît qu'entre 1000 et 1200 km² des départements alpins français seraient concernés par ce type de permafrost, à comparer aux 280 km² de glaciers « normaux » encore présents dans les Alpes (Gardent et al., 2014). Les deux départements de loin les plus pourvus en permafrost de ce type sont les Hautes Alpes (entre 240 et 300 km²) et la Savoie (entre 490 et 570 km²).

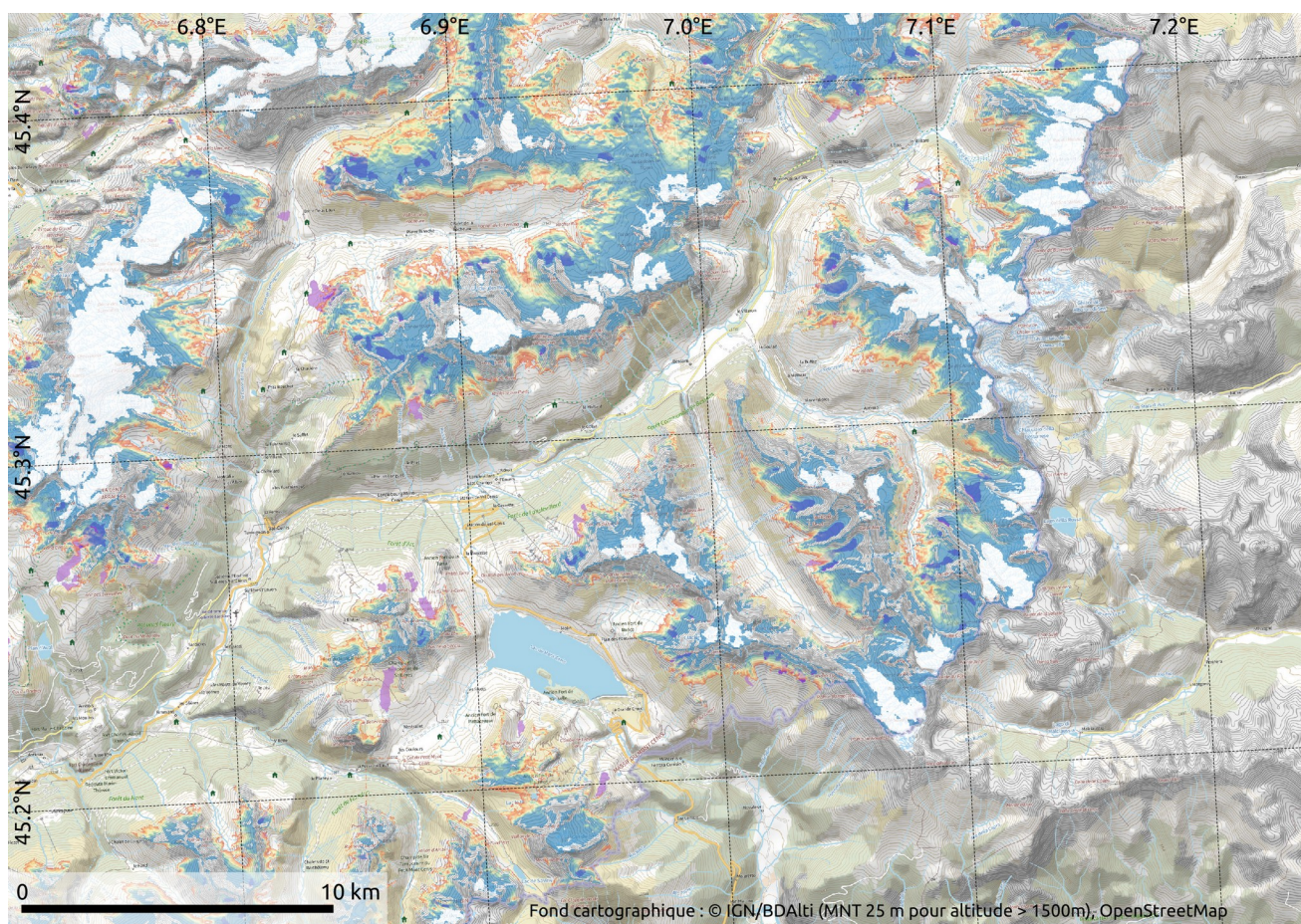


Figure 5: Emprise potentielle du permafrost de formation superficielle (rouge = peu probable, bleu = probable, d'après le Permafrost Zonation Index, ou PZI, de), localisation des glaciers (en blanc, d'après (Gardent et al., 2014)) et des glaciers rocheux (en violet) en haute Maurienne (Savoie).

2.3 Les impacts du changement climatique

L'évolution des glaciers rocheux et du permafrost présent dans les formations superficielles peut être appréhendée au travers de diverses observations et mesures réalisées au cours des dernières décennies. A ce titre, les variations des vitesses d'écoulement sont devenues, depuis peu, un paramètre de l'*Essential Climatic Variable* Permafrost (voir Streletskiy et al., 2021), démontrant la pertinence du suivi à long terme de ce paramètre pour mesurer les effets du climat sur le permafrost alpin et la haute montagne.

Il est ainsi acquis que l'accélération observée, depuis les années 90, sur de nombreux glaciers rocheux est une conséquence de l'augmentation des températures du permafrost (Pellet et al., 2021). En France, la série de mesures du glacier rocheux de Laurichard (près du col du Lautaret, dans les Hautes Alpes : voir Bodin et al., 2009; Thibert and Bodin, 2022) illustre cette tendance, et montre également l'ampleur des variations annuelles de vitesse (figure 6).

Ainsi, deux temporalités se superposent en général dans les séries observées (Kenner et al., 2019) : l'influence à long terme (plusieurs années à plusieurs décennies) du réchauffement climatique, qui conduit à augmenter les températures du sol, rendant la glace moins visqueuse et donc plus déformable, et les influences saisonnières et inter-annuelles, notamment fortement modulées par l'influence de l'enneigement sur la température du sol (un hiver peu enneigé conduisant à un fort refroidissement du sol, et donc un ralentissement des déformations, et vice-versa).

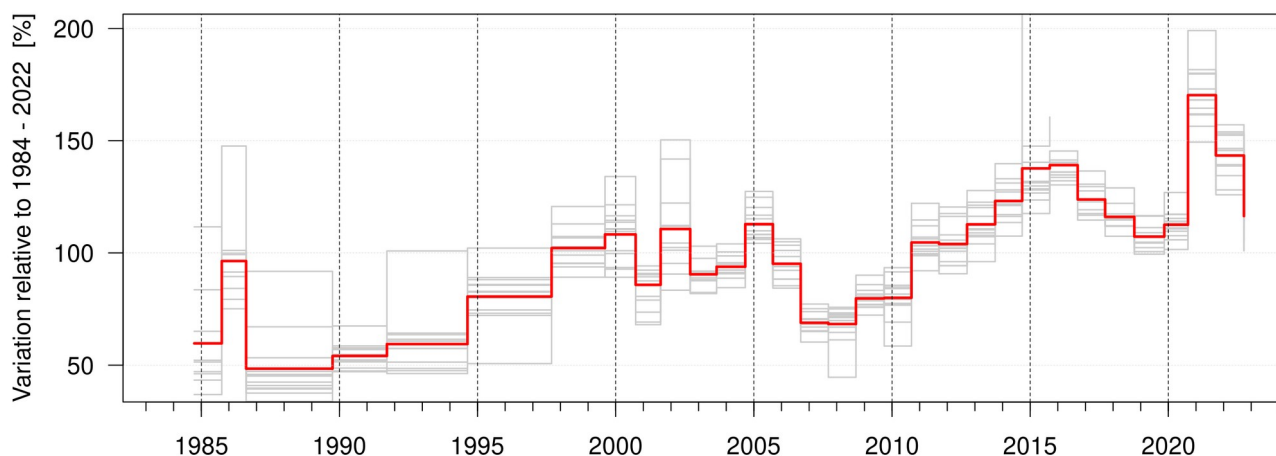


Figure 6: Variation relative des vitesses de surface du glacier rocheux de Laurichard depuis 1984.

Une autre évolution des glaciers rocheux, préoccupante en termes de risques naturels associés, est leur déstabilisation : Marcer et al. (2021) ont ainsi dénombré plusieurs dizaines de glaciers rocheux qui présentent des fissures, des crevasses ou des niches d'arrachement (figure 7). Ces modifications morphologiques importantes, apparues pour la plupart durant les dernières décennies et principalement observées dans des secteurs de convexité du terrain et toujours accompagnées de vitesses élevées, traduisent des changements rhéologiques, avec probablement une importance accrue de l'eau liquide dans les mécanismes de déformation (Cicoira et al., 2019).

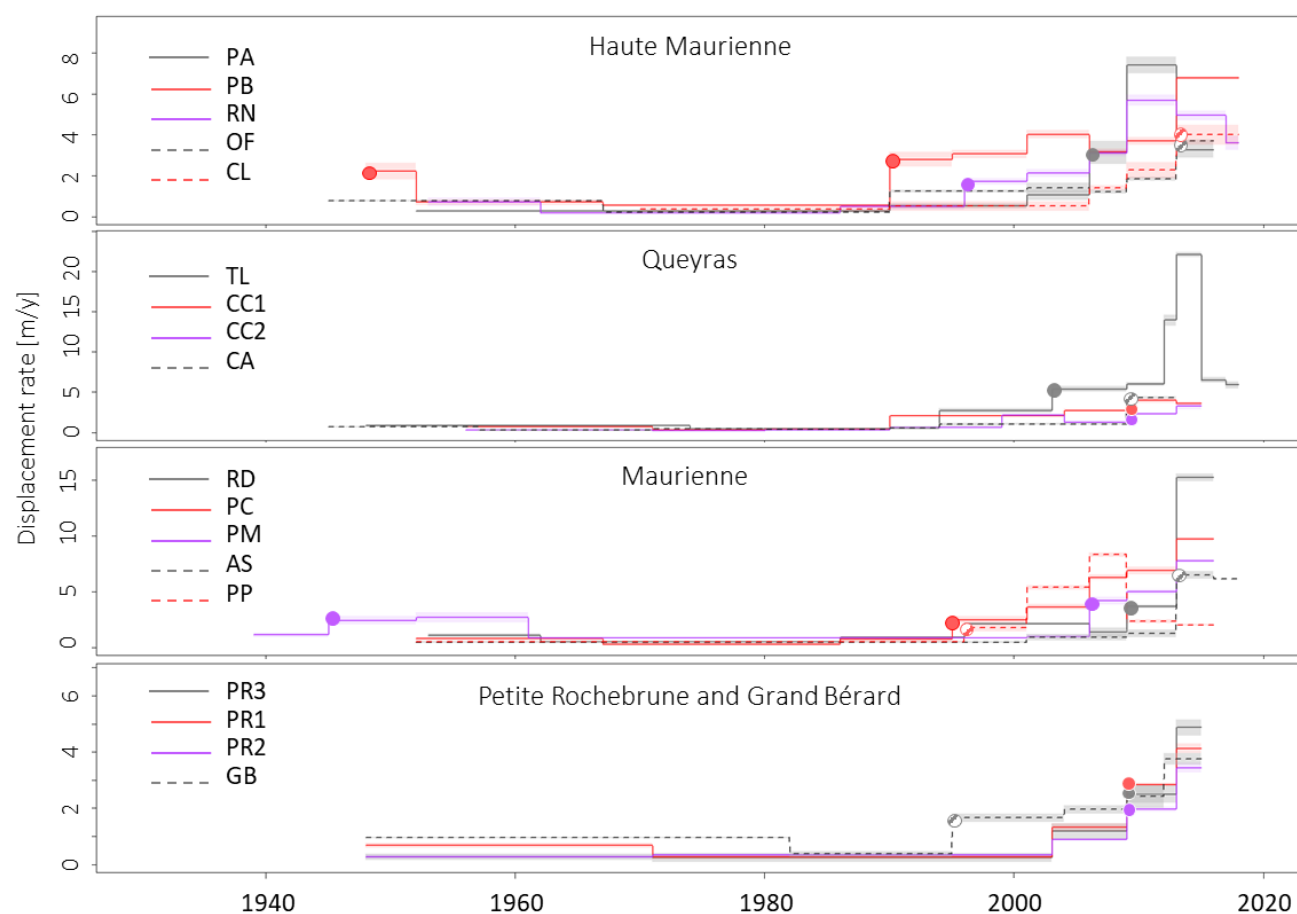


Figure 7: Reconstitution (par analyse des photographies aériennes IGN) de l'évolution des vitesses de glaciers rocheux déstabilisés dans différentes régions des Alpes françaises. Les cercles représentent les dates auxquelles les premières déstabilisations sont apparues pour chaque site. Tiré de Marcer et al. 2021.

Enfin, Kummert et al. (2021) ont montré que les glaciers rocheux peuvent apporter des quantités importantes de matériaux dans les systèmes torrentiels (figure 8), d'autant plus préoccupantes que l'accélération des vitesses des glaciers rocheux devraient nécessairement se traduire par une augmentation des volumes transférés.

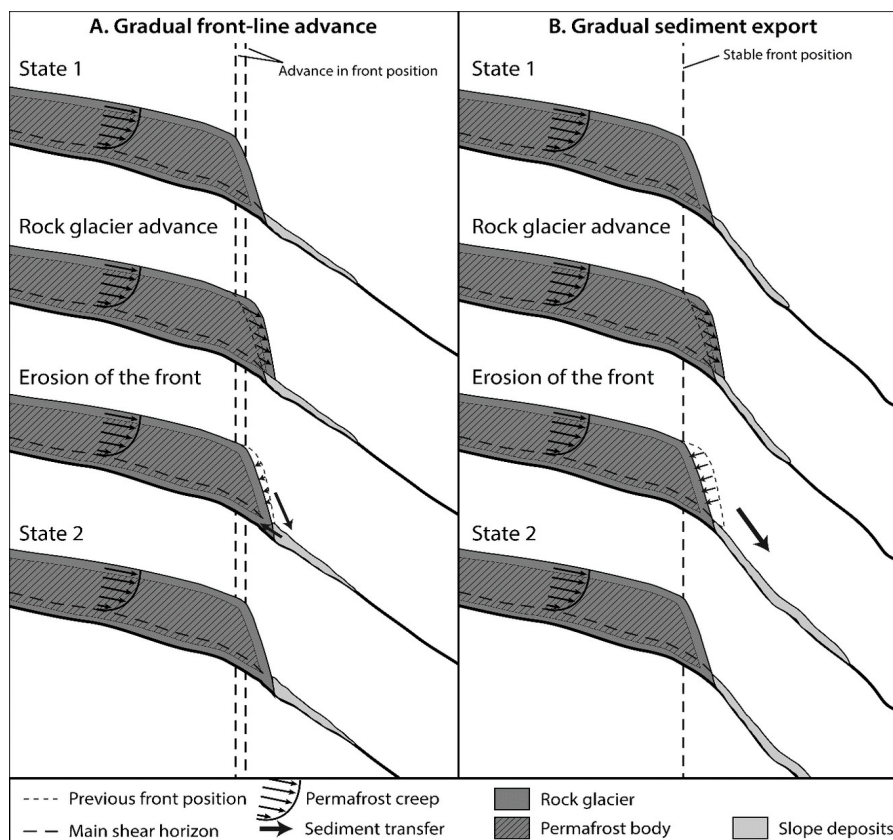


Figure 8: Modèles conceptuels de transferts de sédiments depuis le front de glaciers rocheux, selon la raideur du versant. D'après Kummert et al., (2021).

2.4 Le réseau de suivi PermaFrance

Depuis les années 2009-2010, des efforts ont été entrepris par notre équipe de recherche (répartie dans les laboratoires [EDYTEM](#) et [PACTE](#)) pour mettre en œuvre des dispositifs de suivi du permafrost, au travers de relevés réguliers ou de mesures en continu. Il s'agit à la fois de qualifier ou de quantifier certaines dynamiques géomorphologiques spécifiquement reliées au permafrost de montagne et son évolution (chutes de blocs depuis les parois, écoulement des glaciers rocheux) et de produire des données sur des phénomènes contrôlés plus ou moins directement par le climat, permettant ainsi d'apprécier les impacts du changement climatique sur le permafrost. La production de données répondant à ce dernier point est encadrée par des standards internationaux relatifs aux paramètres associés à l'*Essentiel Climate Variable* (ECV) Permafrost.

Bien qu'il soit encore en cours de consolidation¹, le réseau PermaFrance est soutenu par [l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble](#) (OSUG), et agrège les travaux d'observation et de mesures à long terme menés sur le permafrost (en paroi, en substratum rocheux et en glacier rocheux) par les laboratoires de recherche (EDYTEM, PACTE et, depuis peu, ISTERre). PermaFrance s'appuie sur des données collectées sur 3 sites de parois, 7 sur des glaciers rocheux et 1 dans le substratum (figure 9).

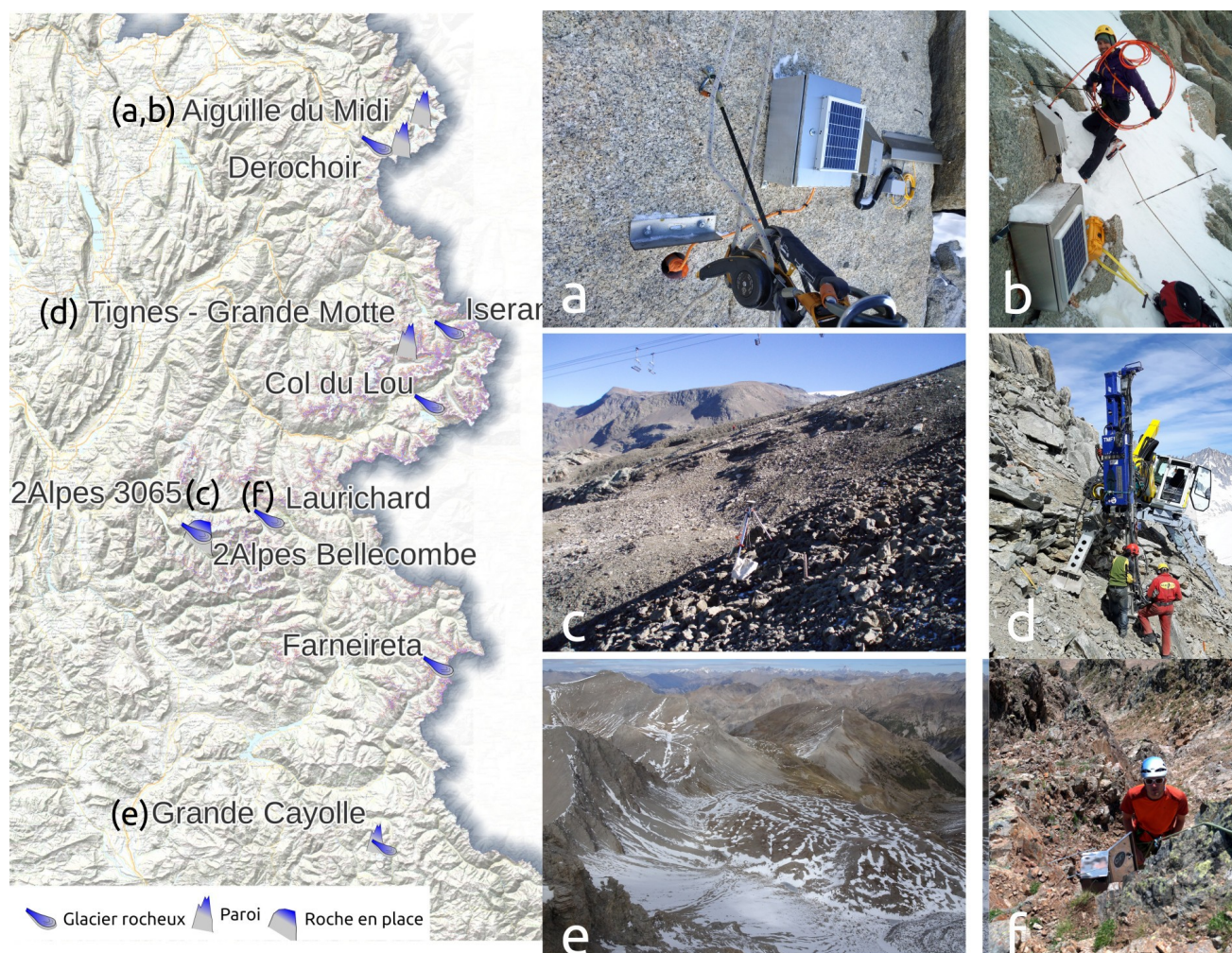


Figure 9: Localisation des sites de suivi du réseau PermaFrance (en gras les sites auxquels correspondent les photos).

¹ Notamment au travers de la mise en place d'un Plan de Gestion des Données et d'un portail de diffusion, prévus pour être finalisés courant 2024.

Les données collectées (et à terme distribuées) par PermaFrance sont structurées en deux catégories :

- les **données spatialisées**, qui décrivent l'état des connaissances du permafrost sur l'ensemble des territoires de montagne en France à un moment, notamment son étendu, mais aussi la localisation des phénomènes associés, et qui ont vocation à être actualisées au bout de plusieurs années, voire décennies ;
- les **séries temporelles**, qui quantifient l'évolution de paramètres associés (ou non, ou pas encore) à l'[ECV Permafrost](#), comme la température du sol en profondeur, la profondeur de la couche active, la vitesse des glaciers rocheux ou l'occurrence de chutes de blocs.

Visant à dresser un état des données potentiellement mobilisables pour répondre aux besoins du STRMTG, **le présent rapport détaille à la fois des données labellisées PermaFrance mais également des données de recherche non standardisées mais qui restent néanmoins utilisables.**

Les données et les outils mentionnés sont présentés, lorsque cela est utile, en utilisant le **cas d'étude du site du versant nord-ouest du Mont du Vallon** : un sommet du massif de la Vanoise où les dynamiques géomorphologiques typiques du permafrost riche en glace affectent une remontée mécanique de la station de Méribel (figure 10).

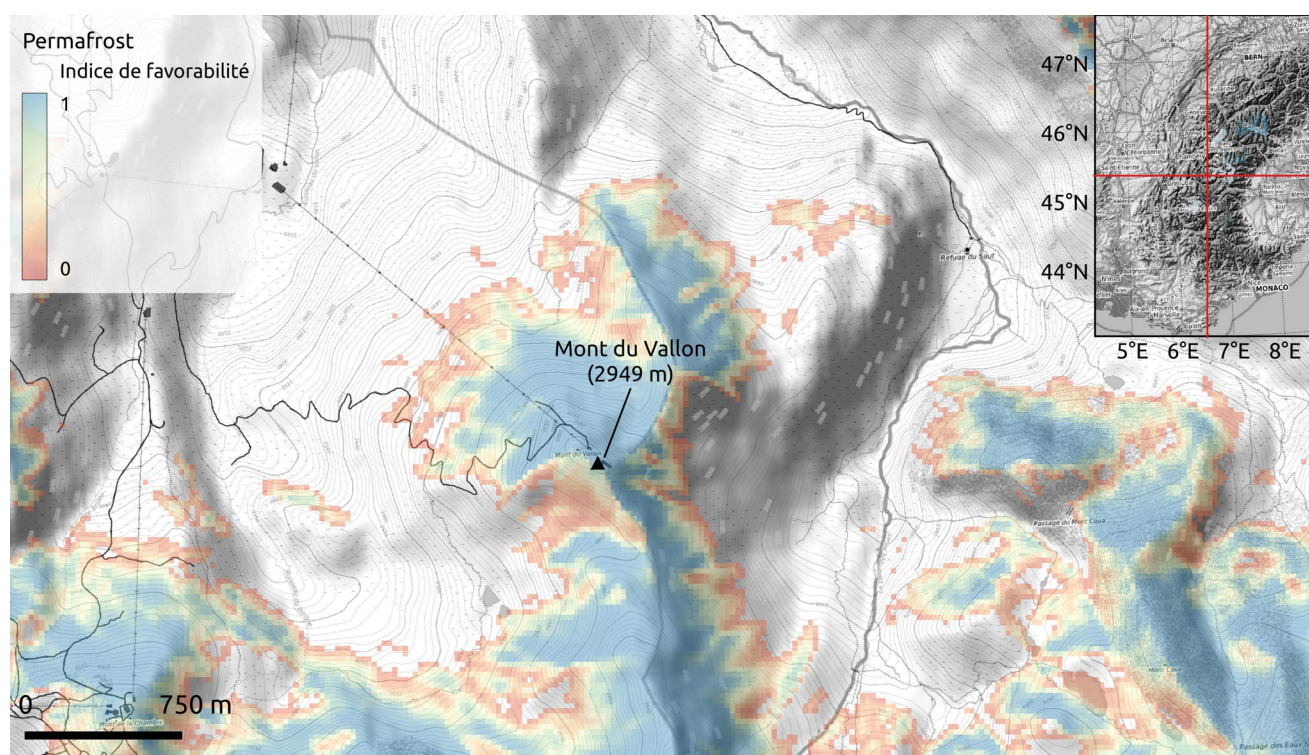


Figure 10: Localisation du site du Mont du Vallon, sur la commune de Méribel (Savoie), qui constitue le cas d'étude principal de ce rapport. Le fond de carte est issu des données OpenStreetMap, et l'indice de favorabilité du permafrost (PFI) est tiré de Marcer et al. (2017) : les tons bleus correspondent aux secteurs les plus favorables à la présence d'un permafrost riche en glace (voir section 3.3 de ce rapport).

3 Ressources cartographiques

3.1 Imagerie optique

Pour un opérateur public comme le STRMTG, il existe actuellement 2 grands fournisseurs principaux de données de qualité appropriée pour des applications visant à connaître les mouvements affectant les terrains support d'infrastructure en haute montagne : le **portail de données de l'Institut Géographique National (IGN)** d'une part, et le **Dispositif Institutionnel National d'Accès Mutualisé en Imagerie Satellites (DINAMIS)** d'autre part.

L'accès aux données est libre pour l'IGN, et contrôlé par un compte pour DINAMIS (voir <https://dinamis.data-terra.org/utilisateurs-eligibles/>). Les données sont fournies, pour l'IGN, sous la forme d'ortho-images au format *.GeoTIFF* ou en flux de données (*WMS*, *WMTS*) directement utilisables dans un Système d'Information Géographique (SIG), et, pour DINAMIS, sous des formats spécifiques, propres aux produits issus de télédétection (notamment le format *DIMAP* contenant l'image en format GeoTIFF et les métadonnées en format XML).

Ces deux fournisseurs donnent en particulier accès à des images (optiques et radar) multi-temporelles de résolution suffisamment fines pour y déterminer des caractéristiques géomorphologiques importantes ou pour y détecter et mesurer des mouvements avec une précision appropriée.

Données distribuées par l'IGN

Via son [portail de distribution des données](#), l'IGN met à disposition, soit en téléchargement (voir extrait de l'interface ci-dessous, pour le téléchargement d'ortho-images sur le département de la Savoie) soit via des flux (*WMS*, *WFS*), des mosaïques d'ortho-images issues soit des couvertures de photographies aériennes. Le téléchargement se fait à l'échelle des départements, ce qui, pour l'exemple de la dernière couverture d'orthophotographie de la Savoie, amène à télécharger plus de 30 Go de données (au format GeoTIFF).

The screenshot shows the IGN data portal interface. At the top, there is a search bar labeled 'Rechercher un jeu de données' with a magnifying glass icon. To the right, there are links for 'Données libres' (with a checkmark) and 'Réinitialiser'. Below the search bar, there are three main filter sections: 'Données', 'Zone', and 'Edition'. The 'Données' section has a dropdown menu currently set to 'Ortho-images'. The 'Zone' section has a dropdown menu currently set to 'Savoie'. The 'Edition' section has a dropdown menu currently set to 'Ortho-images'. To the right of these sections, there is a '+ de filtres' link. Below the filter sections, there are two input fields: 'Producteur' and 'Format'. To the right of these fields, there is a 'Licence' dropdown menu. At the bottom, there are two blue buttons: 'Télécharger' and 'Flux'.

Concernant la mise en place de flux de données pour SIG, voilà ci-après les liens vers les pages² décrivant les accès aux 3 principales sources de données IGN d'intérêt :

- **données « ortho »** : <https://geoservices.ign.fr/services-web-experts-ortho>
 - ✓ produit d'intérêt principal : ortho-mosaïque « Ortho 20 cm » (issue de la dernière campagne de prises de vue aérienne – PVA –, du moins de la plus récemment traitée) ;
 - ✓ en fonction des dates de prise de vue (variable selon les départements), l'ombrage et l'enneigement peuvent être plus ou moins prononcés
 - ✓ des artefacts liés à l'ortho-rectification des images, notamment dans les plus fortes pentes, créent parfois des décalages locaux qui peuvent dégrader la qualité des images
 - ✓ la date des prises de vue aérienne est fournie dans le champs *date_vol* du WFS (« Graphe de mosaïquage BD ORTHO »)
- **données « ortho histo »** : <https://geoservices.ign.fr/services-web-experts-orthohisto>

² Attention, à partir du 31 décembre 2023, l'ensemble des Géoservices seront basculés vers la Géoplateforme. Voir cet article : <https://geoservices.ign.fr/bascule-vers-la-geoplateforme>

- ✓ trois mosaïques sont fournies à l'échelle de tout le territoire métropolitain, agrégeant plusieurs années : 1950-1965, 2000-2005, 2006-2010, 2011-2015
 - ✓ le produit « Ortho Historique 1980-1995 » n'est disponible, pour l'heure actuelle, que pour quelques départements³
 - ✓ il s'agit de couvertures de prises de vue aérienne acquises, selon les années, département par département, tel que décrit dans le tableau 2
- **données « satellite »** : <https://geoservices.ign.fr/services-web-experts-satellite>
 - ✓ mosaïque d'ortho-images annuelles **SPOT**, à 1,5 m de résolution, couvrant tout le territoire
 - ✓ les ortho-images SPOT de 2014 et 2018 sont, globalement pour les départements alpins, très similaires en terme d'ombrage et d'enneigement, et permettent donc une comparaison aisée de l'évolution sur 4 ans
 - ✓ ortho-images annuelles **Pléiades**, à 50 cm de résolution, ne couvrent que quelques zones (par ex. massif du Mont Blanc en 2013 et 2016, Ecrins, Galibier, Grandes Rousses en 2016, Pyrénées Atlantiques en 2022...)

Année	Alpes-de-haute-Provence (04)	Hautes-Alpes (05)	Alpes Maritimes (06)	Isère (38)	Savoie (73)	Haute-Savoie (74)	Pyrénées Atlantiques (64)	Hautes-Pyrénées (65)	Haute-Garonne (31)	Ariège (09)	Pyrénées Orientales (66)
2000						x					x
2001		x		x	x		x	x		x	
2002									x		
2003		x		x			x			x	
2004	x		x			x					x
2005											
2006					x			x	x		
2007											
2008						x	x			x	
2009	x	x	x	x	x						x
2010								x	x		
2011										x	
2012	x		x	x		x	x				x
2013		x			x			x	x	x	
2014			x								
2015	x	x		x		x	x				x
2016					x			x	x	x	
2017			x								
2018	x	x		x			x				x
2019								x	x	x	
2020			x			x					

Tableau 2: Disponibilité des ortho-photo aériennes IGN selon les années pour les départements de montagne

Bien que la résolution soit plus faible que celle des ortho-photo aériennes de l'IGN, les ortho-images SPOT, dont la mosaïque est disponible pour chaque année depuis 2014, permettent d'apprécier des dynamiques géomorphologiques intéressantes (voir section 4.1).

Données du CNES distribuées par le portail DINAMIS

La plateforme DINAMIS distribue sur son portail, aux utilisateurs institutionnels français (et étrangers sous conditions), les produits de télédétection (brutes et traités) issus des acquisitions faites, à la demande avec les capteurs SPOT et Pléiades. Sur le territoire français, une couverture annuelle avec des images SPOT existe depuis 2014 et mis à jours chaque année au milieu de l'été⁴. Ces deux satellites disposent de capteurs optiques produisant des images multi-spectrales dans la partie visible du spectre électromagnétique (canaux rouge, verte et bleu et proche infrarouge) à une résolution de 3 m pour le capteur SPOT et 2 m pour Pléiades. De même, une image dite « panchromatique » permet de voir le territoire à plus haute résolution (1.5 m au mieux pour les images SPOT et de 50 cm au mieux pour les images Pléiades).

3 On peut espérer, d'ici quelques années (?), qu'il ait été réalisé également pour les Alpes et les Pyrénées...

4 Voir <https://www.applisat.fr/fiches-produits/couverture-nationale-spot67>

La consultation du catalogue d'images se fait en sélectionnant une période temporelle et/ou une emprise géographique, et les vignettes ou l'affichage sur la carte permet d'apprécier la qualité de l'image (notamment l'enneigement et l'ombrage). Idéalement, les images doivent avoir le moins de neige possible et en surface et un ombrage relativement similaire (images acquises un peu près à la même époque de l'année). Certaines acquisitions faites en mode stéréo permettent de réaliser, après traitement stéréo-photogrammétrique (avec des logiciels commerciaux comme ENVI ou Catalyst, ou des logiciels libres comme Micmac ou Ames Stereo Pipeline), des modèles 3D desquels peuvent être dérivés des Modèles Numériques de Terrain (MNT) et des ortho-images (par ortho-rectification d'une des images brutes sur le MNT).

Données du CNES distribuées par le dispositif Kalideo Alpes

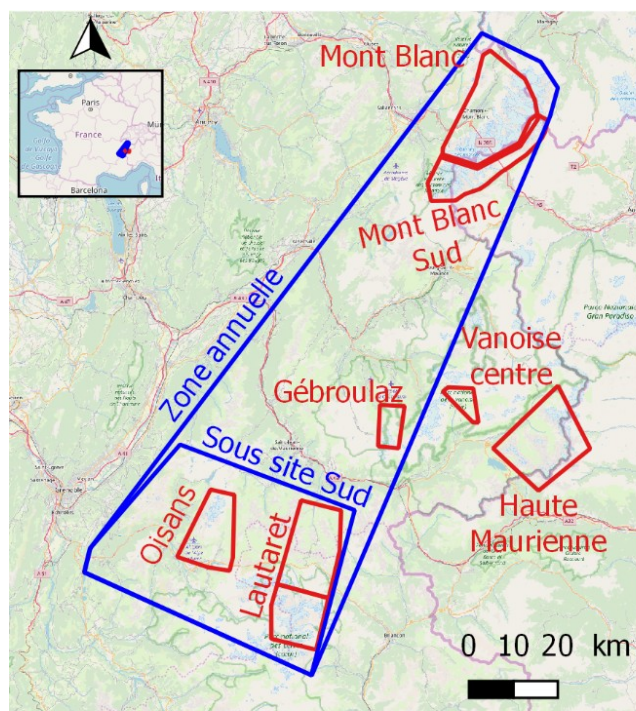


Figure 11: Les différentes zones couvertes par le dispositif Kalideos-Alpes.

Depuis 2000, le CNES (Centre National des Etudes Spatiales) propose un dispositif visant à promouvoir et à démontrer l'usage de la donnée spatiale en apportant un soutien aux actions de R&D, de prototypage, de démonstration des utilisateurs. Ceci passe notamment par une base de données satellitaires multicapteurs et multitemporelle, pré-traitée pour rendre les données inter-comparables, complétée par des données in-situ : pour les Alpes, elles sont accessibles (avec un identifiant) sur <https://alpes.kalideos.fr/drupal/fr>.

Entre 2012 et 2021, des acquisitions régulières ont été faites, par SPOT 6/7 en mode stéréoscopique sur la zone annuelle bleue (figure 11), par SPOT 6/7 également mais mensuellement sur le sous-site Sud, et par Pléiades, principalement en mode stéréoscopique, pour l'étude de la cryosphère (les sites Mont Blanc Sud, Vanoise centre, Haute Maurienne et Gébroulaz ayant été demandés à partir de 2018 seulement).

Les données sont accessibles via une interface cartographique diffusée sur la plateforme Kalideos Alpes, permettant également de cibler la période d'intérêt.

3.2 Imagerie radar et usage des interférogrammes

Les images acquises par des satellites équipés de capteurs radar (ou radar à synthèse d'ouverture, SAR), tel que TerraSAR-X (de l'agence spatiale allemande, DLR) ou Sentinel-1 (de l'agence spatiale européenne, ESA) constituent une source de données particulièrement intéressante pour l'étude des glaciers rocheux (voir par ex. Barboux et al., 2014; Strozzi et al., 2020). En effet, l'opération de comparaison du décalage de phase (interférométrie, ou InSAR) entre deux images successives (à 11 jours pour TSX ou 6 jours pour S1) permet de connaître le déplacement du terrain avec une sensibilité liée à la longueur d'onde du capteur, en général quelques cm (figure 12).

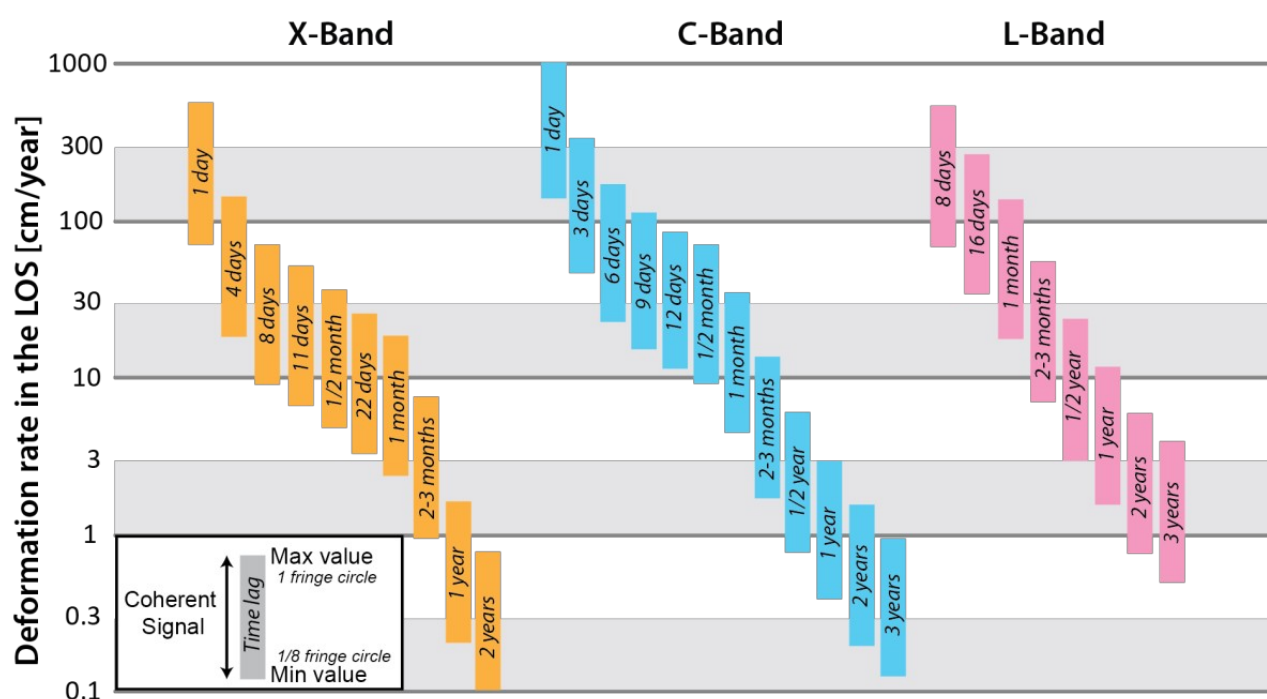


Figure 12: Valeurs de déformation observables par les principaux capteurs SAR. TerraSAR-X est en bande X ($\lambda = 3.1$ cm), et Sentinel-1 en bande C ($\lambda = 5.5$ cm). D'après Barboux et al., 2014; Bertone et al., 2022.

En France, le Service National d'Observation [ISDeform](#) a été récemment mis en place pour traiter et distribuer des données satellite utiles au suivi des déformations de surface. Les images Sentinel-1 sont ainsi ingérées en continu dans une chaîne de traitement automatique (NSBAS, voir Doin et al., 2011) permettant de produire des interférogrammes radar (InSAR) directement utilisables⁵ pour le suivi des mouvements de versant en haute montagne, tels que ceux liés à l'écoulement du permafrost riche en glace.

3.3 Ressources élaborées pour la recherche

Dans le cadre du travail effectué pour le présent rapport, les données évoquées dans cette section sont mises à disposition sur un dossier partagé suivant :

<https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/NSeFeos36jYvUiT>

dans une architecture de répertoires aussi explicite que possible (un dossier par type de donnée, correspondant aux sous-sections ci-après).

L'inventaire cartographique des glaciers rocheux (Alpes françaises)

Grâce au travail de plusieurs stagiaires successifs, qui se sont succédés entre 2009 et 2016 au sein des différents services départementaux de la Restauration des Terrains en Montagne (ONF-RTM), l'ensemble des glaciers rocheux des Alpes françaises ont pu être cartographiés. L'approche a consisté à utiliser les ortho-photographies de l'IGN pour interpréter, sur la base de critères de reconnaissance géomorphologique, la présence, les contours et l'activité des glaciers rocheux. L'objectif était également de signaler les cas où des aléas pouvaient éventuellement être associés aux glaciers rocheux. L'harmonisation des différents inventaires départementaux a été effectuée par Marco Marcer, dans le cadre de sa thèse (UGA, 2015-2018), puis un travail de toilettage a été réalisé par S. Roudnitska (RTM 73).

Outre le contour des formes, le principal champs d'intérêt est `Activity` qui décrit le niveau d'activité estimé (en général par l'observation géomorphologique sur les ortho-photo IGN), selon la principale classification en vigueur (présentée dans les documents du [RGIK](#)) :

- **Active rock glacier** = glacier rocheux affecté de mouvement sur la majorité de sa surface (présence, en général, d'un talus frontal et latéral bien marqué et de bourrelets et sillons)
- **Transitional rock glacier** = glacier rocheux avec de faibles mouvements, et/ou sur une faible portion de la forme (peu de signes géomorphologiques de mouvement)

⁵ Ces données sont produites et distribuées de façon interne au laboratoire ISTerre, qui pilote l'opération dans le cadre du SNO ISDeform, notamment dans le cadre du post-doc de D. Cusicanqui (2022-2025).

- **Relict rock glacier** = glacier rocheux sans signe de mouvement (mais potentiellement avec des signes d'affaissement, du à la fonte de la glace, et/ou avec une végétation bien installée).

Inventaire cartographique des glaciers rocheux des Alpes françaises :

Métadonnées sur le fichier

Nom : FRoGI_v0.gpkg

Format : vecteur, Geopackage

Taille : 23 Mo

Métadonnées sur les données

Origine : digitalisation manuelle

Type d'entités : polygones

Informations géographiques

Extension spatiale : toutes les Alpes françaises

Système de coordonnées de référence : Lambert 93 (EPSG 2154)

Accès aux données : non défini à ce jour

Remarques : une version révisée sera disponible d'ici fin 2023

La révision complète de l'inventaire est actuellement (dernier trimestre 2023) en cours, effectuée dans un premier temps par 6 personnes en parallèle pour vérifier la présence et les contours : plus de 300 nouveaux glaciers rocheux (non détectés dans l'inventaire initial, du fait de la qualité des images ou des biais d'interprétation des opérateurs) ont ainsi pu être cartographiés (Bodin et al., 2023). Une seconde phase de révision sera complétée d'ici la fin 2023, centrée sur l'évaluation de l'activité des glaciers rocheux.

Les détections de mouvement à partir d'InSAR

Au travers d'un projet international financé par l'ESA, nous avons procédé à la détection manuelle des motifs InSAR (frange, partie de frange ou décorrélation) indiquant des secteurs en mouvement sur la zone test du Parc national de la Vanoise (Bodin, 2020).

A partir de 18 interférogrammes ascendants et 17 descendants couvrant les étés 2016 et 2019, nous avons ainsi détecté 358 motifs, essentiellement sur des glaciers rocheux mais également des glissements de terrain et des mouvements de versant profonds. Sur un peu plus de 80 de ces mouvements, des interrogations demeurent sur leur nature et leur dynamique.

Dans le fichier SIG fourni, le champs `Vel\_class` fourni l'estimation de la classe de vitesse du mouvement cartographié, valable pour la période couverte par les interférogrammes (étés 2016 et 2019), depuis l'absence de mouvement jusqu'au mètre par an et au-delà.

Détection de mouvements par InSAR sur la Vanoise :

Métadonnées sur le fichier

Nom : InSAR_detections_Vanoise_2016_2019.gpkg

Format : vecteur, Geopackage

Taille : 270 ko

Métadonnées sur les données

Origine : digitalisation manuelle

Type d'entités : polygones

Informations géographiques

Extension spatiale : aire d'adhésion du Parc national de la Vanoise

Système de coordonnées de référence : Lambert 93 (EPSG 2154)

Accès aux données : à la demande

Remarques : une version révisée sera disponible d'ici fin 2023

Le même travail, amplifié sur toutes les Alpes françaises (avec plus d'interférogrammes, voir également la section 4.1), est actuellement poursuivi par D. Cusicanqui, à ISTERre. Les résultats pourront être mis à disposition sur demande et sous réserve de sa distribution jusqu'à ce que la publication scientifique soit disponible.

La quantification des vitesses des glaciers rocheux sur les ortho-photo IGN

A partir des mosaïques d'ortho-photo produites par l'IGN (voir section 3.1), Marcer et al. (2021) ont pu calculer (en suivant la position des blocs les plus visibles, et en mesurant leur déplacement) les vitesses d'environ 300 glaciers rocheux, sur trois périodes différentes (de 1948–1952 à 2001–2004, de 2001–2004 à 2008–2009, de 2008–2009 à 2015–2017). Les valeurs de vitesses (champs `period1`, `period2`, `period3`) et leurs incertitudes associées (champs `uc1`, `uc2`, `uc3`) sont fournies pour chaque point correspondant au centroïde d'un glacier rocheux pour lequel cette approche a pu être employée.

Quantification des vitesses des glaciers rocheux des Alpes françaises :

Métadonnées sur le fichier

Nom : `rock_glaciers_centroids_MM.gpkg`

Format : vecteur, Geopackage

Taille : 463 ko

Métadonnées sur les données

Origine : digitalisation manuelle et calcul avec routine R

Type d'entités : point

Informations géographiques

Extension spatiale : ensemble des Alpes françaises

Système de coordonnées de référence : Lambert 93 (EPSG 2154)

Accès aux données : à la demande

Remarques : --

La modélisation de la distribution du permafrost alpin « riche en glace »

A partir de l'inventaire des glaciers rocheux, M. Marcer a réalisé une modélisation statistique (figure 13) visant à déterminer la « favorabilité » du terrain à la présence du permafrost de type glacier rocheux (*Permafrost Favorability Index*, PFI) : tous les détails sont fournis dans la publication associée, (Marcer et al., 2017). Le modèle choisi suppose que les racines des glaciers rocheux identifiés⁶ comme actifs présentent la plus haute probabilité d'avoir des conditions favorables au permafrost (PFI = 1) alors que le centre des glaciers rocheux fossiles constituent la borne limite de l'absence de conditions favorables (PFI = 0).

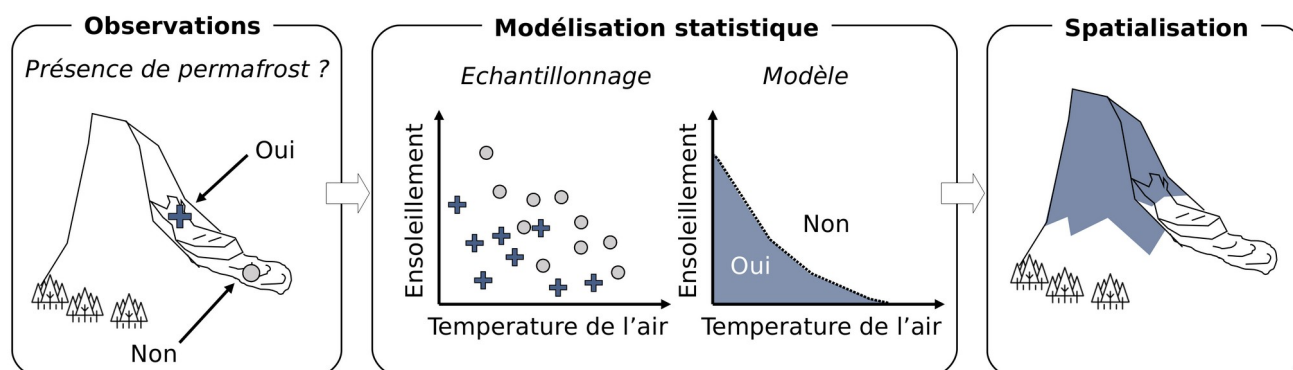


Figure 13: Principes de la modélisation statistique utilisée par Marcer et al. (2017) pour déterminer spatialement les conditions de favorabilité des terrains à la présence de permafrost riche en glace.

Cette modélisation spatiale permet d'estimer, pour n'importe quelle localisation dans les Alpes françaises, la présence, ou pas, de conditions du terrain (notamment liées à l'altitude et à l'ensoleillement) favorables à la présence d'un permafrost de « type glacier rocheux », c'est-à-dire dans des formations superficielles (éboulis, moraines). Ces dernières peuvent être riches en glace et fluer, c'est-à-dire se déformer de façon visco-plastique ce qui leur confère une morphologie spécifique⁷, ou bien contenir de la glace en quantité moins importante et sans expression morphologique particulière (Lambiel and Pieracci, 2008; Scapozza et al., 2011).

⁶ Grâce à l'observation, sur les ortho-photo IGN, des évidences géomorphologiques, comme un front raide ou des bourrelets bien visibles.

⁷ On parle de « *protales rampart* » pour les formes peu développées, et de glacier rocheux lorsque les caractéristiques morphologiques sont plus importantes.

L'influence de la dynamique des glaciers rocheux, qui peuvent être vus comme des « machines à exporter »⁸ vers l'aval le permafrost qui les constituent, suggèrent que la distribution du permafrost fournie par le PZI surestime les surfaces concernées, d'une part du fait que les racines des glaciers rocheux sont souvent également le produit de conditions géologiques, géomorphologiques et topographiques spécifiques et très localisées, et d'autre part car les conditions climatiques qui ont permis la mise en place des glaciers rocheux actuellement actifs ne sont très probablement plus les mêmes, en particulier depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1850).

Il est à noter que les zones englacées (cartographie des glaciers de la période 2006-09 par (Gardent et al., 2014)) et les pentes raides (supérieures à 35° sur le MNT 25 m de la BDAlti de l'IGN) ont été enlevées de la couche PFI initiale, car l'indice n'est pas interprétable sur ces secteurs spécifiques.

Modélisation de la distribution du permafrost alpin « riche en glace » :

Métadonnées sur le fichier

Nom : PFI_mask_glaciers_slope_sup35deg_FR.tif

Format : raster, geoTIFF

Taille : 109 Mo

Métadonnées sur les données

Origine : modélisation statistique (à partir du MNT IGN BD Alti)

Type et gamme de valeurs : sans unité, de 0 à 1

Valeur no-data : -9999

Fichier associé : fichier de style PFI_mask_glaciers_slope_sup35deg_FR.qml

Informations géographiques

Extension spatiale : toutes les Alpes françaises

Système de coordonnées de référence : Lambert 93 (EPSG 2154)

Résolution : pixel de 25 mètres

Accès aux données : sur demande

Remarques : --

La modélisation du permafrost en cours de dégradation

La morphologie des glaciers rocheux évolue lentement, et est le résultat de plusieurs siècles, et même millénaires, d'évolution (d'alimentation en glace et en débris, de fonte, de fluage). Or les conditions climatiques ayant fortement changé sur les périodes passées, on peut raisonnablement penser que la morphologie actuelle des glaciers rocheux est le reflet de la dernière période froide (le Petit Âge Glaciaire, ou PAG, qui a duré ~ 400 ans) et que l'état actuel du permafrost (notamment sa température) contenu dans les glaciers rocheux est en déséquilibre avec les conditions passées.

Sur la base du modèle statistique de distribution du permafrost présenté précédemment, lequel est contrôlé par deux paramètres principaux que sont la température de l'air et le rayonnement solaire, on peut donc estimer les conditions de la dernière période froide en appliquant un simple « décalage » vertical équivalent à ~ 1,6°C. En soustrayant le modèle « PAG » avec le modèle « actuel », on obtient une cartographie des secteurs potentiellement en cours de dégradation (ou *Potential Thawing Permafrost*, PTP ; voir figure 13). Cette modélisation pointe les secteurs de plus basse altitude où le permafrost est probablement à températures plus proches du point de fusion, plus riche en eau liquide et plus sensible aux variations climatiques.

⁸ Ce transport se fait par le fluage mécanique du mélange glace débris, et abouti, du fait de l'effet isolant de la couche superficielle de débris non-gelés (ou couche active), à déplacer le permafrost vers l'aval, dans des conditions topoclimatiques qui lui sont potentiellement défavorables (car à des altitudes plus basses, et souvent dans des conditions d'ensoleillement plus fort qu'aux racines).

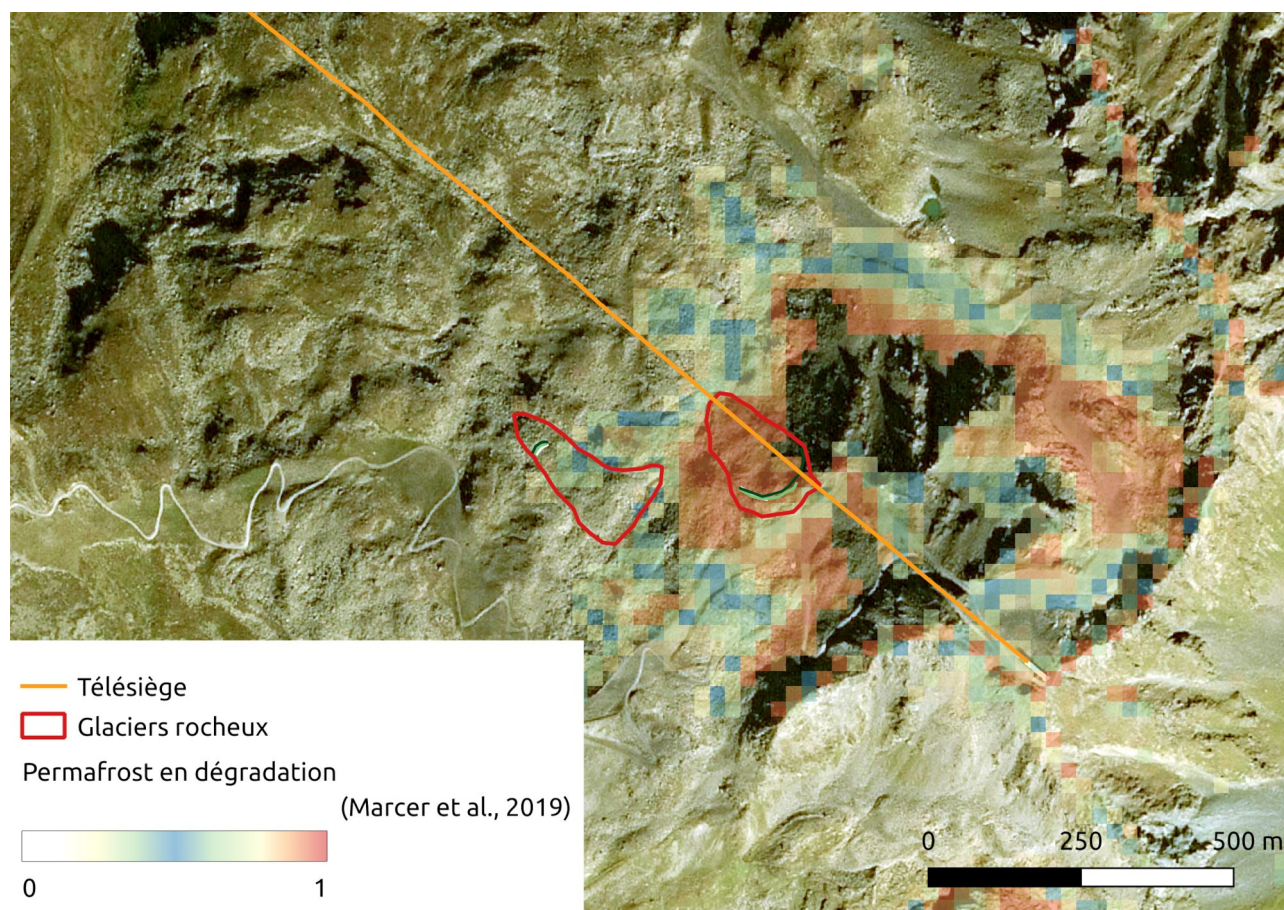


Figure 14: Valeurs de l'indice Potential Thawing Permafrost (PTP) sur le secteur du Mont Vallon.

Modélisation du permafrost alpin en cours de dégradation :

Métadonnées sur le fichier

Nom : PTP_mask_glaciers_slope_sup35deg_FR.tif

Format : raster, geoTIFF

Taille : 347 Mo

Métadonnées sur les données

Origine : modélisation statistique (à partir du MNT IGN BD Alti)

Type et gamme de valeurs : sans unité, de 0 à 1

Valeur no-data : -9999

Fichier associé : fichier de style PTP_mask_glaciers_slope_sup35deg_FR.qml

Informations géographiques

Extension spatiale : toutes les Alpes françaises

Système de coordonnées de référence : Lambert 93 (EPSG 2154)

Résolution : pixel de 25 mètres

Accès aux données : sur demande

Remarques : --

La modélisation de la susceptibilité des glaciers rocheux à la déstabilisation

Comme évoqué dans la section 2.3, une des évolutions majeures de ces dernières décennies concernant les glaciers rocheux est le fait qu'un nombre croissant de formes se déstabilisent : il s'agit de mécanismes encore peu compris mais régulièrement observés (Bodin et al., 2016; Marcer et al., 2021) et qui se traduisent par des vitesses de déformation élevées et des perturbations morphologiques fortes (crevasses, fissures, niches d'arrachement...). Ces « crises » peuvent durer plusieurs décennies et une partie semblent s'être déclenchées durant la phase de réchauffement atmosphérique marquée des années 1980-90 (figure 7).

Sur la base de la présence d'éléments géomorphologiques spécifiques, tels que des crevasses, des fissures, des niches d'arrachement ou des coulées de débris, un inventaire des glaciers rocheux rocheux déstabilisés a été réalisé pour toutes les Alpes françaises (Marcer et al., 2019). Selon l'intensité de la déstabilisation (caractérisée par la présence de perturbations et par des vitesses élevées et discontinues dans l'espace), une classification des glaciers rocheux a été établie (il s'agit du champs `Dest\_Index` dans l'inventaire des glaciers rocheux) : 0 = pas de perturbations, 1 = perturbations visibles (154 glaciers rocheux), 2 = perturbations visibles et évoluant dans le temps (81 glaciers rocheux), 3 = perturbations visibles et évoluant et vitesses élevées (58 glaciers rocheux).

Une modélisation statistique a ensuite pu être proposée pour déterminer les secteurs de glaciers rocheux les plus susceptibles à la déstabilisation, en prenant en compte un ensemble de facteurs possibles, notamment la dégradation du permafrost (couche PTP ci-dessus), et la pente et la courbure du terrain. Les valeurs élevées d'indice signifient que le terrain considéré présente des caractéristiques proches de celles des glaciers rocheux effectivement déstabilisés.

Modélisation de la susceptibilité des glaciers rocheux à la déstabilisation :

Métadonnées sur le fichier

Nom : Marcer_etal_2019_Destabilization_Susceptibility_Map_Unclipped.tif.tif

Format : raster, geoTIFF

Taille : 542 Mo

Métadonnées sur les données

Origine : modélisation statistique (à partir du MNT IGN BD Alti)

Type et gamme de valeurs : sans unité, de 0 à 1

Valeur no-data : -9999

Fichier associé : Marcer_etal_2019_Destabilization_Susceptibility_Map_Unclipped.qml

Informations géographiques

Extension spatiale : toutes les Alpes françaises

Système de coordonnées de référence : Lambert 93 (EPSG 2154)

Résolution : pixel de 25 mètres

Accès aux données : sur demande

Remarques : --

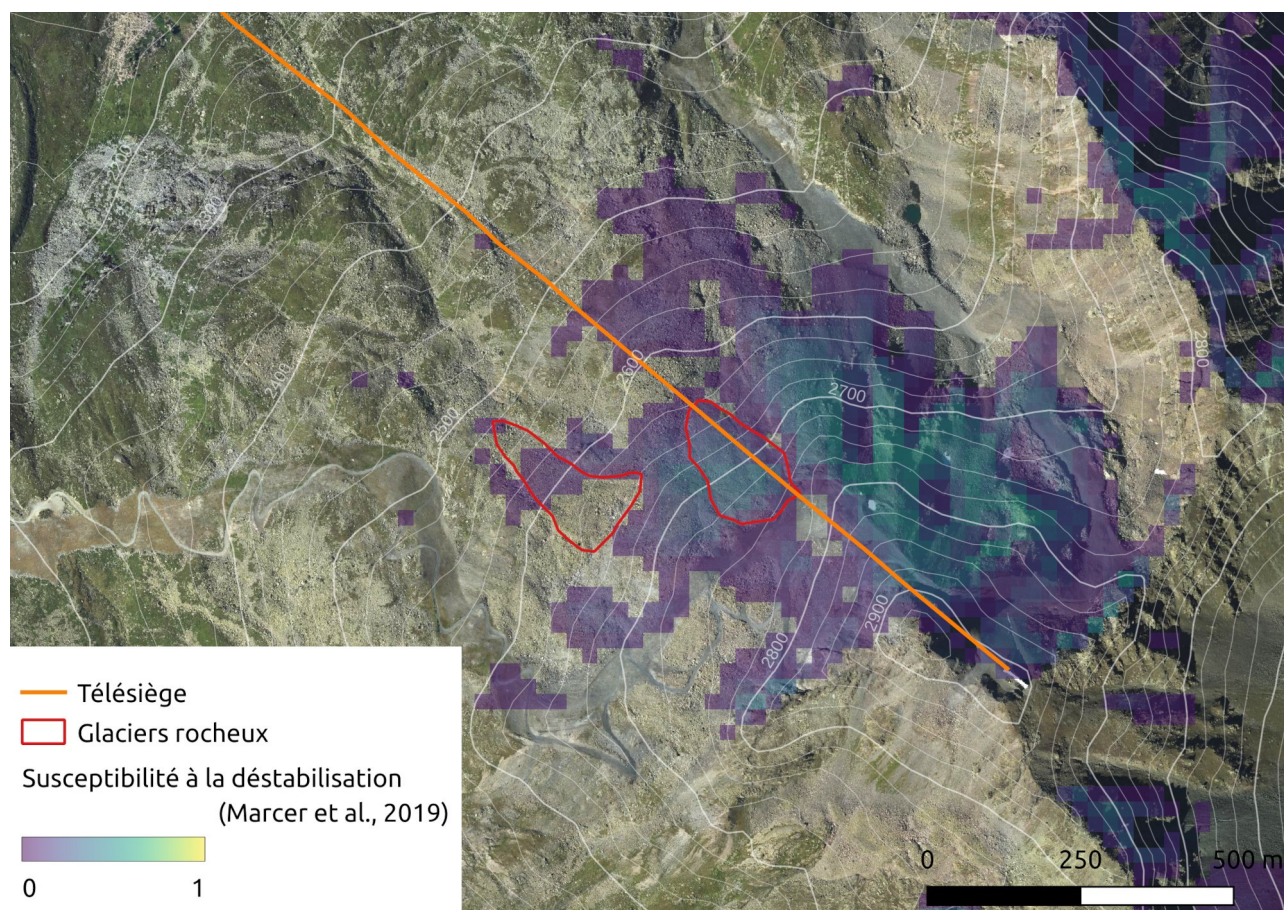


Figure 15: L'indice de susceptibilité à la déstabilisation du secteur du Mont Vallon. Le glacier rocheux le plus fortement déstabilisé (celui à l'est) présente des valeurs maximales aux alentours de 0.3. Ces valeurs faibles indiquent que la déstabilisation ne s'explique pas, ici, par les caractéristiques typiques des autres phénomènes similaires, utilisées dans le modèle statistique : l'impact des différents aménagements, notamment le tracé d'une piste ?

4 Outils pour l'analyse et la production de données

4.1 Évaluation des dynamiques géomorphologiques

A partir des images optiques multi-temporelles

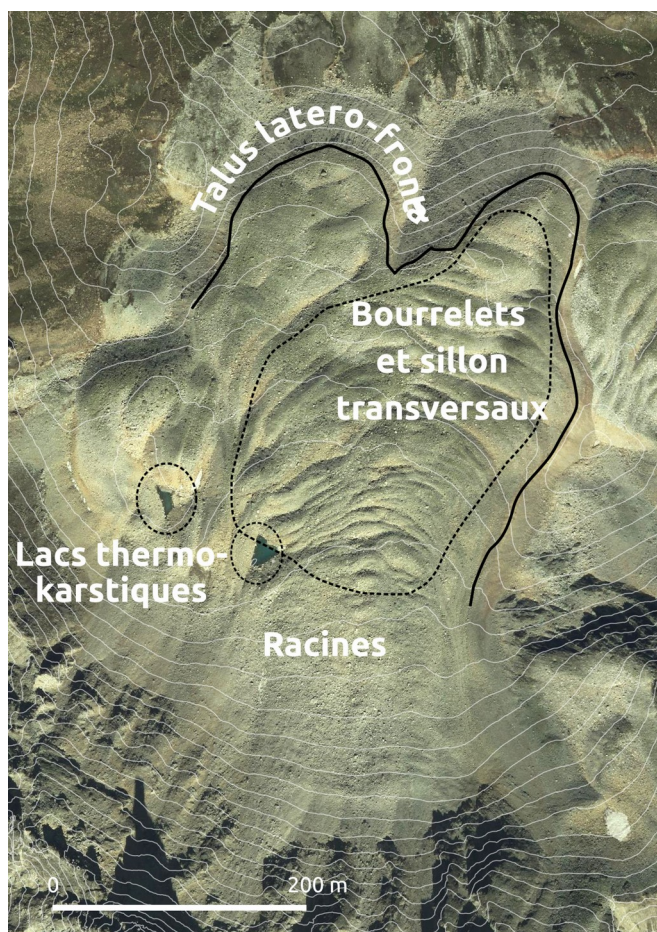


Figure 16: Interprétations géomorphologiques des éléments de base visibles sur l'ortho-photo IGN à 20 cm (glacier rocheux du versant nord de l'Aiguille du Dôme).

L'observation des indices morphologiques, sur le terrain ou plus souvent sur les ortho-images, permet de déduire des informations intéressantes sur les dynamiques géomorphologiques qui affectent le terrain.

Ainsi, les ortho-photo aériennes, notamment la plus récente à 20 cm, permet en général d'apprécier assez finement (figure 16) les caractéristiques telles que :

- la présence de talus latéraux et frontaux, souvent bien marqués par une limite supérieure nette,
- la présence de formes de fluage (bourrelets et sillons), expression visible de la déformation visco-plastique des glaciers rocheux,
- la granulométrie (taille des débris rocheux) des formations superficielles,
- leur végétalisation éventuelle (pour les glaciers rocheux, c'est en général une évidence de l'absence, ou de la faiblesse, de mouvements de fluage),
- la présence de crevasses, fissures ou ruptures, indicatrices d'une déstabilisation du terrain (Marcer et al., 2019),
- la présence de lacs dits « thermo-karstiques », lorsque de la fusion de glace massive se produit (Cusicanqui et al., 2023).

Le document « *Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers - Baseline concepts* » édité par l'IPA Action group RGIK⁹ est actuellement la description la plus complète et à jour des glaciers rocheux et de leurs caractéristiques géomorphologiques. Il est en outre le produit d'un travail d'écriture au consensus incluant une grande partie de la communauté scientifique impliquée sur le sujet. Le document est accompagné de liens vers des planches d'un atlas cartographique illustrant la plupart des caractéristiques évoquées, d'une grande richesse et qu'il est donc fortement conseillé de consulter.

⁹ Groupe « *Rock glaciers inventories and kinematics* » (RGIK, voir le [site web](#)), piloté par l'université de Fribourg et auquel nous contribuons activement à différents niveaux.

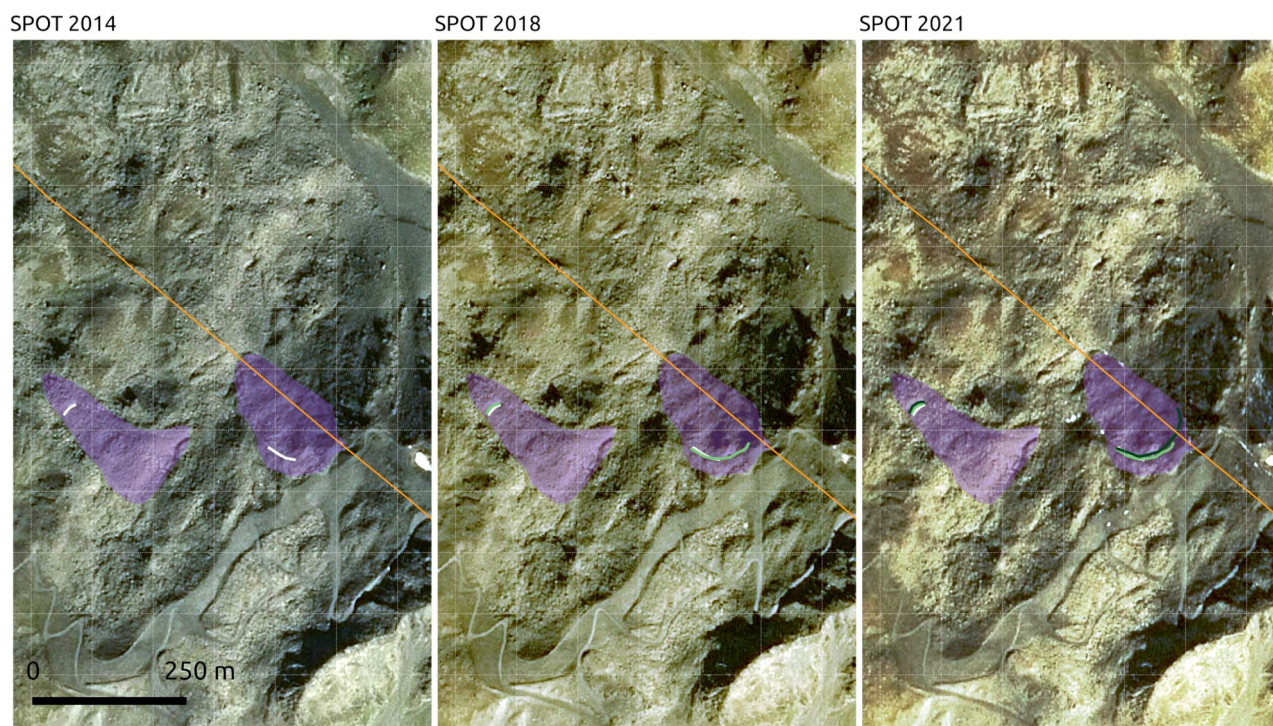


Figure 17: Dynamiques géomorphologiques associées aux glaciers rocheux du secteur amont du Mont du Vallon. Les polygones violets correspondent à l'emprise approximative des glaciers rocheux, les traits localisent la position de deux crevasses principales et leur propagation, entre 2014 et 2021, et la ligne orange correspond au tracé du télésiège. Ces cartes en haute résolution sont [disponibles au lien suivant](#).

La comparaison visuelle d'ortho-images acquises à des dates différentes permet quant à elle de suivre l'évolution du terrain. Ainsi, sur le site du Mont du Vallon, où les contours des glaciers rocheux sont difficiles à apprécier (du fait d'une morphologie peu marquée), le mouvement général de fluage de deux masses, qu'on peut associer à des glaciers rocheux, ainsi que l'apparition d'une crevasse majeure sont clairement visibles sur les différentes ortho-mosaïques SPOT, avec un déplacement qui semble atteindre¹⁰ une dizaine de mètres entre 2014 et 2021 (figure 17).

Comme évoqué précédemment (section 3.1), les ortho-images SPOT de 2014, 2018 et 2021 présentent en général un bon recalage (peu d'artefacts d'ortho-rectification), peu de neige et un ombrage proche, et sont donc particulièrement adaptées pour réaliser des observations visant à connaître la dynamique d'un site donné. Elles permettent en particulier d'apprécier de façon fiable les mouvements du terrain sur une période de 4 et 7 ans, lesquels peuvent être facilement quantifiés. Pour cela, une simple mesure, avec l'outil approprié dans un SIG, de la distance entre deux points peut suffire, ou bien de façon plus fine et éventuellement multipliée sur un nombre de points importants avec, par exemple, une routine telle que ``manual_tracking_computing_displacements.r``.

A partir d'interférogrammes

Démontrant tout l'intérêt de l'approche InSAR (voir section 3.2), son usage sur le site du Mont du Vallon a ainsi permis de détecter deux types de mouvement (figure 18), jusque là passés inaperçus : 1) des mouvements bien observables sur les interférogrammes à 6 jours, de l'ordre du dm/a au m/a, sur trois glaciers rocheux, localisés sur à l'amont du versant nord-ouest du sommet et qui n'avaient pas été cartographiés faute d'évidences géomorphologiques claires, et 2) un très grand mouvement de versant, sans doute profond, de plus de 2 km d'extension, visible sur les interférogrammes à 1 an, présentant donc des mouvements de l'ordre du cm/a.

¹⁰ Mesuré sur SIG, avec une marge d'erreur de quelques mètres.

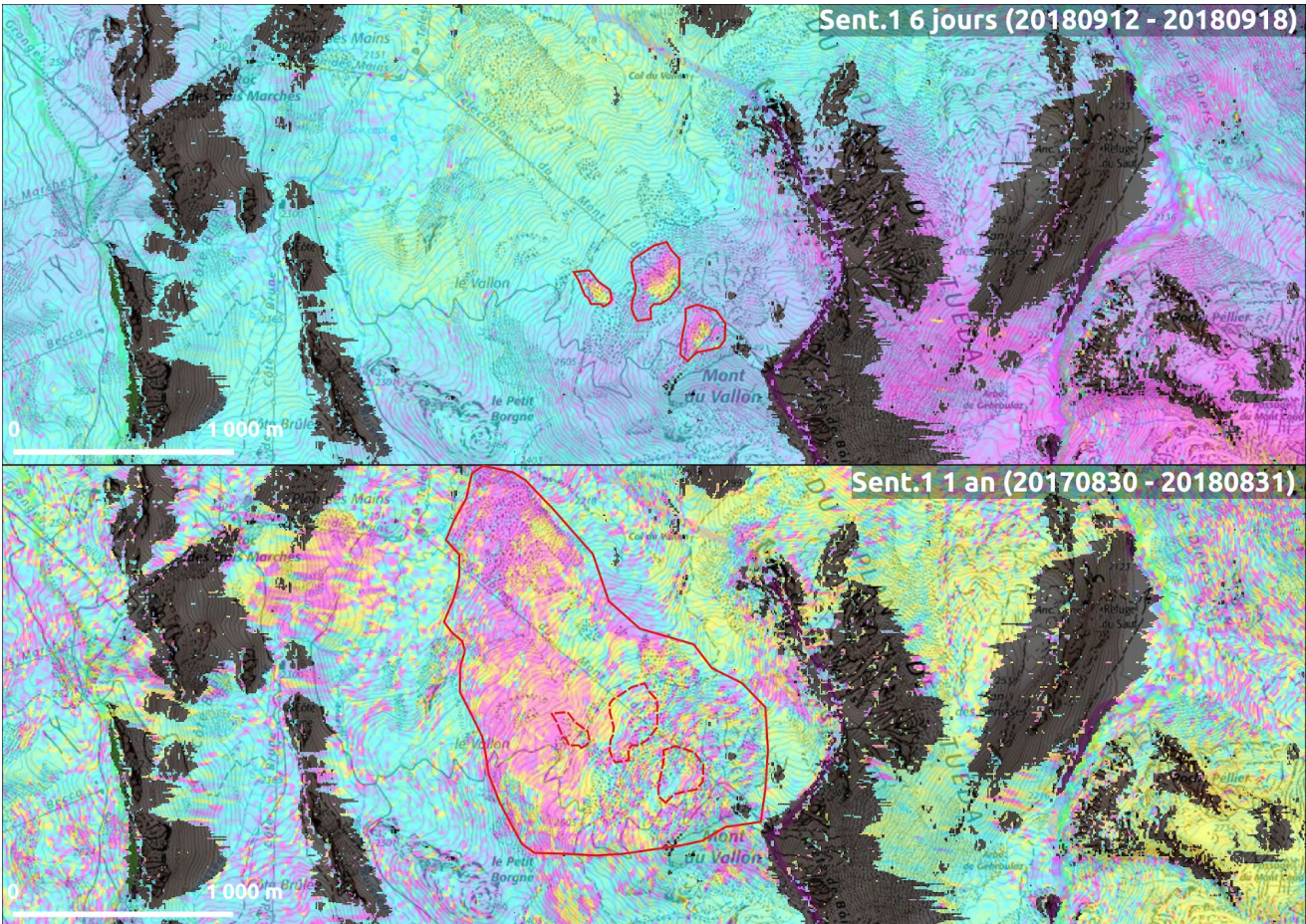


Figure 18: Interférogrammes réalisés à partir d'images Sentinel-1 sur le secteur du Mont du Vallon, à 6 jours d'intervalle en haut et un an en bas. En rouge les zones de détection de mouvements significatifs (et en dehors des zones de bruit). Les zones en noir représentent les secteurs non visibles par le satellite.

L'interprétation des « motifs » visibles sur les interférogrammes est une des approches privilégiées par le RGIK *Action group*. Les détails méthodologiques de cette approche de détection des mouvements sur les interférogrammes sont proposés dans [le document *InSAR-based kinematic attribute in rock glacier inventories - Practical InSAR Guidelines v.4.0*](#) du RGIK.

Le travail de détection manuelle (par l'observation des motifs InSAR) qui est actuellement réalisé par Diego Cusicanqui (dans le cadre de son post-doc à ISTERre, jusqu'en 2025), à partir d'interférogrammes Sentinel-1 produits par le Service National d'Observation [ISDeform](#), a déjà permis de détecter 924 zones en mouvement sur l'ensemble des Alpes françaises. Sur l'ensemble des motifs détectés, 524 concernent des glaciers rocheux, dont la majorité pour des formes actives (table 3).

	Active	Inactive	Relict
Undefined	4 %	1 %	13 %
< 1 cm/a	1 %	3 %	7 %
1-3 cm/a	2 %	1 %	7 %
3-10 cm/a	9 %	16 %	34 %
10-30 cm/a	24 %	30 %	19 %
30-100 cm/a	51 %	43 %	19 %
> 100 cm/a	10 %	6 %	0 %
Total nb	367	89	68

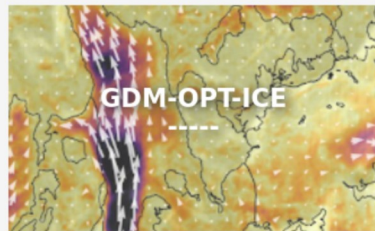
Tableau 3: Répartition des classes de vitesses détectées sur les interférogrammes Sentinel-1 au cours de l'été 2018 selon les niveaux d'activité des glaciers rocheux (travail de D. Cusicanqui, en cours).

4.2 Outils pour le calcul des déplacements

Les services de calcul du pôle ForMaTer

Un ensemble d'institutions (IGN, IPGP¹¹, ONERA, OSUG¹²) pilotées par l'EOST se sont associées pour mettre en place des services de calculs à la demande à partir des images satellite optiques (Pléiades, SPOT, Sentinel-2) et radar (Sentinel-1) accessibles à la communauté française. Parmi ces outils, trois concernent le traitement des images optiques Sentinel-2 et sont potentiellement d'intérêt pour les applications développées dans le présent rapport¹³ :

<https://www.poleterresolide.fr/services-de-calculs-a-la-demande/#/optic>

 GDM-OPT-SLIDE GDM-OPT signifie Ground Deformation Monitoring with OPTical image time series (Suivi de la déformation du sol à partir de séries temporelles d'images optiques). La version GDM-OPT-SLIDE du service est conçue pour suivre la cinématique de glissements de terrain. Il permet le traitement à la demande des séries temporelles d'images Sentinel-2.	 GDM-OPT-ETQ GDM-OPT signifie Ground Deformation Monitoring with OPTical image time series (Suivi des déformations du sol à partir de séries temporelles d'images optiques). La version GDM-OPT-ETQ du service est conçue pour quantifier les déformations co-sismiques déclenchées par des tremblements de terre de magnitude significative. Il permet le traitement à la demande d'images Sentinel-2.	 GDM-OPT-ICE GDM-OPT signifie Ground Deformation Monitoring with OPTical image time series (Suivi de la déformation du sol à partir de séries temporelles d'images optiques). La version GDM-OPT-ICE du service est conçue pour suivre la cinématique des glaciers et des calottes glaciaires. Il permet le traitement à la demande des séries temporelles d'images Sentinel-2.
---	---	---

Plus de détails sont données sur les pages web suivantes :

<https://formater.pages.in2p3.fr/webservices/index.html>

Le module Imcorr dans SAGA-GIS

Le logiciel (libre) de SIG orienté raster SAGA-GIS possède un outil de corrélation d'image, IMCORR, intégré à QGIS (via sa boîte à outils de traitements) et qui permet de déterminer, de façon simple et intuitive, les champs de déplacement entre deux images successives. La procédure nécessite d'avoir deux images découpées et recalées dans le même référentiel (même taille de pixel et même emprise). Trois paramètres peuvent être réglés :

- *Search Chip Size* = la taille de la fenêtre de corrélation
- *Reference Chip Size* = la taille du motif
- *Grid Spacing* = le pas d'incrément entre deux corrélations

Comme illustré à nouveau sur le site du Mont Vallon (figure 19), la méthode fonctionne bien pour des mouvements spatialement cohérents, comme le fluage des glaciers rocheux, mais est perturbée par les changements d'ombrage entre les deux images et les éventuelles déformations propres à chaque image.

¹¹ Institut de Physique du Globe de Paris

¹² Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble, <https://www.osug.fr>

¹³ Il ne nous a pas été possible, au moment de l'écriture de ce rapport, de tester les différents services proposés.

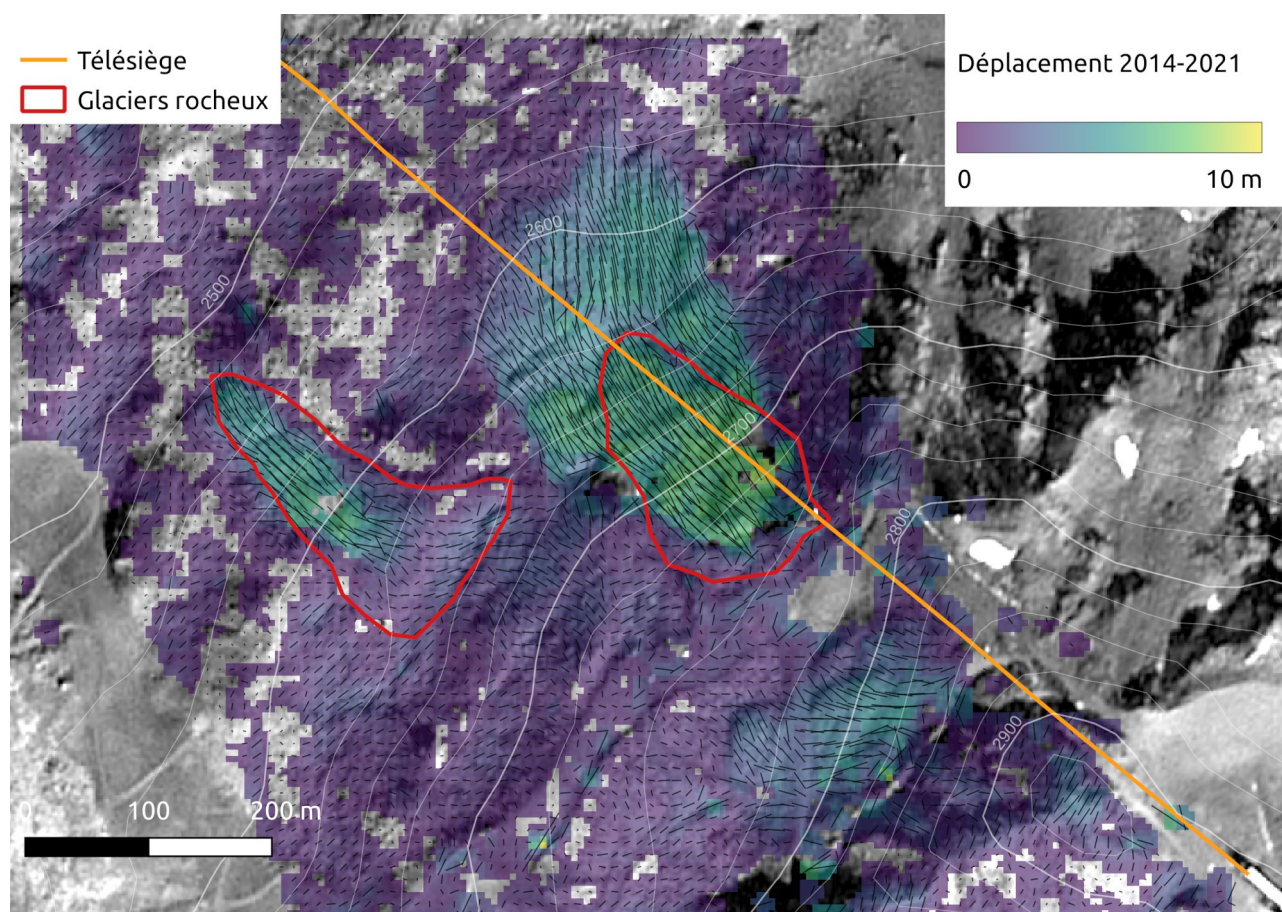


Figure 19: Champs de déplacement calculé par SAGA-Imcorr entre deux images SPOT de 2014 et 2021 (pixel de 1m, taille de l'image : 1196 x1107, temps de calcul de moins d'une minute avec les paramètres 32 – 16 – 10). Les champs de déplacement sont filtrés manuellement pour retirer les mouvements les moins cohérents (soit par leur orientation soit par leur magnitude), puis interpolés à un pas de 5 m (raster coloré).

4.3 Chaîne de traitement GeoMultiCorr

Comme évoqué précédemment (section 2.3), l'intérêt de la vitesse de déplacement des glaciers rocheux est maintenant une « variable essentielle climatique » (ECV) qui permet de quantifier l'état actuelle du permafrost dans le contexte du réchauffement climatique. Grâce aux différentes initiatives et dispositifs de laboratoire de recherche (IRD, ISTERre, IGE) et programme d'acquisitions des données (IGN, CNES, et d'autres) qui favorisent la distribution et accès aux données spatiale/satellitaire (section 3.1), aujourd'hui en France, nous disposons d'une base des données des images optiques multi-temporelle et multi-capteur à haute résolution spatiale (3 – 0.5 m) avec une fréquence relativement haute (acquisitions annuelle) depuis les années 2000. Cette base de données est suffisamment résolue pour étudier le permafrost en montagne, plus particulièrement la dynamique des glaciers rocheux.

La chaîne « GeoMultiCorr » se situe dans ce contexte dans lequel nous souhaitons tirer profit de : 1) toutes données disponibles et 2) des méthodes de corrélation d'images assez robustes pour 3) automatiser le traitement des données, avec un objectif d'étudier l'évolution du permafrost en montagne à une échelle régionale. GeoMultiCorr est un package Python, qui est capable de gérer une base des données spatiale multi-capteur et multi-résolution, et avec lequel on peut interagir via l'interface d'un logiciel SIG (QGIS, par ex.). Cette librairie Python sert de pont entre la base de données d'images optiques et des logiciels très puissants, notamment « Ames Stereo Pipeline », pour faire la corrélation d'images et ensuite, estimer les déplacements de surface ainsi qu'une série temporelle des vitesses.

Comme pour IMCORR (section 4.2), la procédure nécessite d'avoir deux images découpées et recalées dans le même référentiel (même taille de pixel et même emprise). Cependant, GeoMultiCorr peut traiter aussi une série d'images d'un même secteur. En utilisant ASP, une vingtaine de paramètres sont réglables car le logiciel fait un pré-traitement d'images ainsi qu'un filtrage des résultats pour enlever les artefacts. Les paramètres les plus importants sont :

- L'algorithme de corrélation : *Block Matching*, *Semi Global Matching*, parmi six autres.
- La taille de fenêtre de corrélation : à choisir en fonction du déplacement.

Comme illustré à nouveau sur le site du Mont Vallon (figure 20), cette méthode fonctionne bien pour des mouvements spatialement cohérents, comme le fluage des glaciers rocheux. A différence des résultats obtenus avec IMCORR (figure 19), les résultats avec ASP sont moins bruités, grâce aux traitements plus robustes (pré et post-traitement) effectués sur les images. Ceux-ci peuvent être constatés en regardant les zones stables (en violet autour du glacier rocheux) où les déplacements de surface sont proches de zéro. Cependant, malgré le traitement robuste, l'ombrage, la présence de neige a toujours une influence négative sur la corrélation d'images, ainsi que éventuelles déformations propres à chaque image (les crêtes des montagnes autour).

La chaîne de traitement GeoMultiCorr a été développée au sein de notre équipe par D. Cusicanqui (CNES | ISTerre) et T. Duvanel (CNRS | EDyTEM). Fonctionnelle à partir de la base de données que nous avons constituée pour les Alpes françaises, elle subit actuellement plusieurs améliorations pour la rendre plus accessible et utilisable. La mise à disposition de la chaîne complète ainsi que quelques exemples, est prévue pour la fin de l'année 2023.

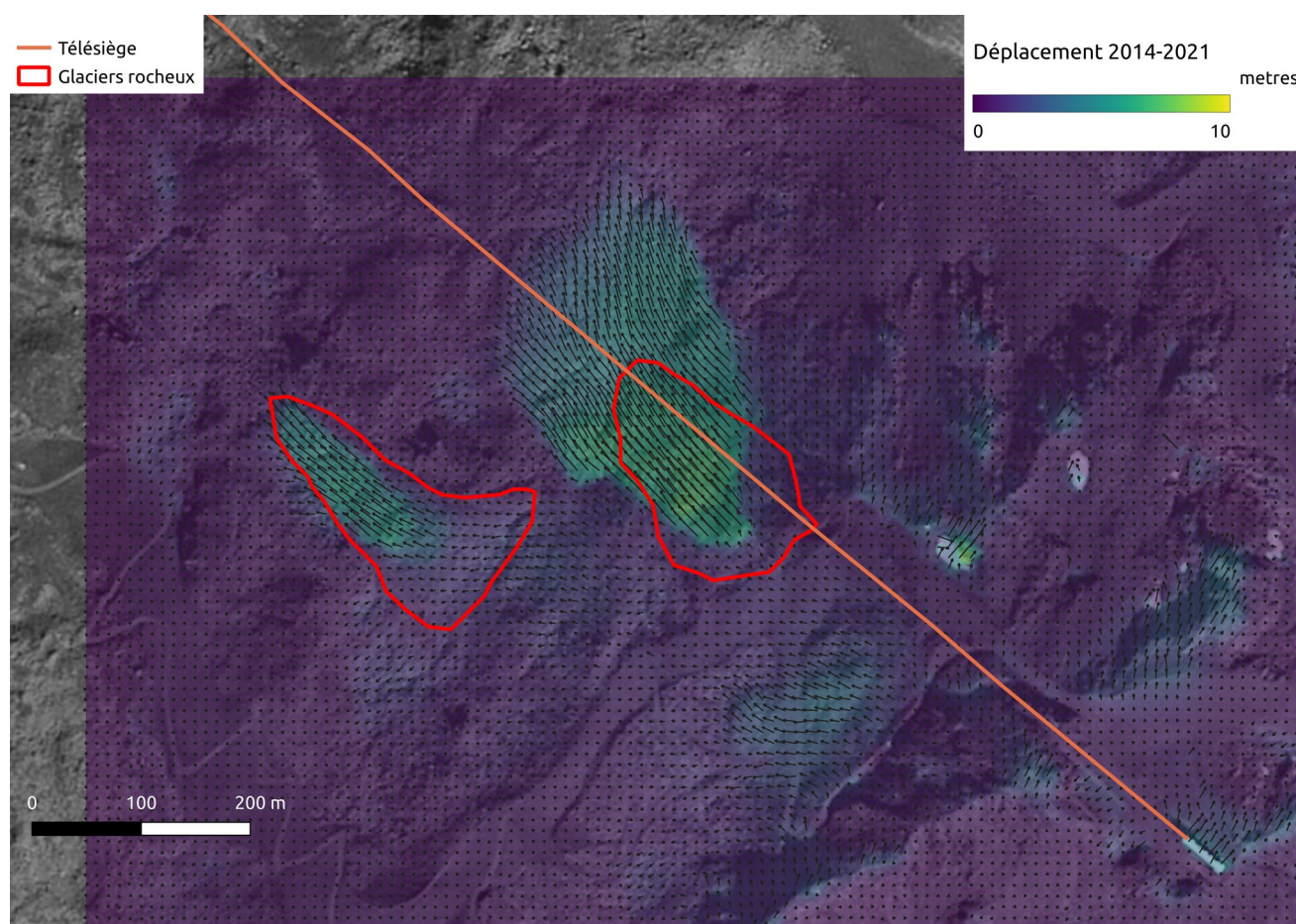


Figure 20: Champs de déplacement calculés par GeoMultiCorr (en utilisant ASP) entre deux images SPOT de 2014 et 2021 (pixel de 1m, taille de l'image : 1196 x 1107, temps de calcul de moins d'une minute avec les paramètres semi global matching et un fenêtrage de corrélation de 7 x 7 pixels). Les champs de déplacement n'ont pas été filtrés.

Références bibliographiques

- Arenson, L., Hoelzle, M., Springman, S., 2002. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 13, 117–135. <https://doi.org/10.1002/ppp.414>
- Barboux, C., Delaloye, R., Lambiel, C., 2014. Inventorying slope movements in an Alpine environment using DInSAR. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 2087–2099. <https://doi.org/10.1002/esp.3603>
- Bertone, A., Barboux, C., Bodin, X., Bolch, T., Brardinoni, F., Caduff, R., Christiansen, H.H., Darrow, M.M., Delaloye, R., Etzelmüller, B., Humlum, O., Lambiel, C., Lilleøren, K.S., Mair, V., Pellegrinon, G., Rouyet, L., Ruiz, L., Strozzi, T., 2022. Incorporating InSAR kinematics into rock glacier inventories: insights from 11 regions worldwide. *The Cryosphere* 16, 2769–2792. <https://doi.org/10.5194/tc-16-2769-2022>
- Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A., Schoeneich, P., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W.L., Christiansen, H.H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., Guglielmin, M., Ingeman-Nielsen, T., Isaksen, K., Ishikawa, M., Johansson, M.,

- Johannsson, H., Joo, A., Kaverin, D., Kholodov, A., Konstantinov, P., Kröger, T., Lambiel, C., Lanckman, J.-P., Luo, D., Malkova, G., Meiklejohn, I., Moskalenko, N., Oliva, M., Phillips, M., Ramos, M., Sannel, A.B.K., Sergeev, D., Seybold, C., Skryabin, P., Vasiliev, A., Wu, Q., Yoshikawa, K., Zheleznyak, M., Lantuit, H., 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Bodin, X., 2020. Rock glacier inventory of the Vanoise massif (French Alps) (ESA project CCI+ Permafrost). Laboratoire EDYTEM (CNRS/USMB).
- Bodin, X., Cusicanqui, D., Duvanel, T., Agziou, J., Echelard, T., Schoeneich, P., Routnidska, S., 2023. How kinematics attributes improve geomorphological interpretation of rock glacier?
- Bodin, X., Krysiecki, J.-M., Schoeneich, P., Le Roux, O., Lorier, L., Echelard, T., Peyron, M., Walpersdorf, A., 2016. The 2006 collapse of the Bérard Rock Glacier (Southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 28, 209–223. <https://doi.org/10.1002/ppp.1887>
- Bodin, X., Schoeneich, P., Marcer, M., 2021. Les glaciers rocheux déstabilisés des Alpes françaises : quelles réponses face au changement climatique ? *Risques info* 35–38.
- Bodin, X., Thibert, E., Fabre, D., Ribolini, A., Schoeneich, P., Francou, B., Reynaud, L., Fort, M., 2009. Two decades of responses (1986–2006) to climate by the Laurichard rock glacier, French Alps. *Permafrost Periglac. Process.* 20, 331–344. <https://doi.org/10.1002/ppp.665>
- Cicoira, A., Beutel, J., Faillietaz, J., Vieli, A., 2019. Water controls the seasonal rythm of rock glacier flow. *Earth and Planetary Science Letters* 528, 115844. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115844>
- Cicoira, A., Marcer, M., Gärtner-Roer, I., Bodin, X., Arenson, L.U., Vieli, A., 2021. A general theory of rock glacier creep based on in-situ and remote sensing observations. *Permafrost and Periglacial Processes* 32, 139–153. <https://doi.org/10.1002/ppp.2090>
- Cusicanqui, D., Bodin, X., Duvillard, P.-A., Schoeneich, P., Revil, A., Assier, A., Berthet, J., Peyron, M., Roudnitska, S., Rabatel, A., 2023. Glacier-permafrost interactions and GLOF's in Alpine terrain. Insights from seven decades of reconstructed dynamics of the Chauvet glacial and periglacial system, Southern French Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Doin, M.-P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., Grandin, R., Pathier, E., Pinel, V., 2011. Presentation of the Small Baseline NSBAS Processing Chain on a Case Example: The Etan Deformation Monitoring from 2003 to 2010 Using Envisat Data, in: *Fringe Symposium*. Frascati, Italy.
- Duvillard, P.-A., Ravanel, L., Marcer, M., Schoeneich, P., 2019. Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z>
- Duvillard, P.-A., Ravanel, L., Schoeneich, P., Deline, P., Marcer, M., Magnin, F., 2021. Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology* 189, 103311. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103311>
- Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J.-P., Deline, P., 2014. Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change* 120, 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.004>
- Kenner, R., Pruessner, L., Beutel, J., Limpach, P., Phillips, M., 2019. How rock glacier hydrology, deformation velocities and ground temperatures interact: Examples from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 31, 3–14. <https://doi.org/10.1002/ppp.2023>
- Kummert, M., Bodin, X., Braillard, L., Delaloye, R., 2021. Pluri-decadal evolution of rock glaciers surface velocity and its impact on sediment export rates towards high alpine torrents. *Earth Surface Processes and Landforms* n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.5231>
- Lambiel, C., Pieracci, K., 2008. Permafrost distribution in talus slopes located within the alpine periglacial belt, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, 293–304. <https://doi.org/10.1002/ppp.624>
- Marcer, M., Bodin, X., Brenning, A., Schoeneich, P., Charvet, R., Gottardi, F., 2017. Permafrost Favorability Index: Spatial Modeling in the French Alps Using a Rock Glacier Inventory. *Frontiers in Earth Science* 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00105>
- Marcer, M., Cicoira, A., Cusicanqui, D., Bodin, X., Echelard, T., Obregon, R., Schoeneich, P., 2021. Rock glaciers throughout the French Alps accelerated and destabilised since 1990 as air temperatures increased. *Nature Communications Earth & Environment* 2, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00150-6>
- Marcer, M., Serrano, C., Brenning, A., Bodin, X., Goetz, J., Schoeneich, P., 2019. Evaluating the destabilization susceptibility of active rock glaciers in the French Alps. *The Cryosphere* 13, 141–155. <https://doi.org/10.5194/tc-13-141-2019>
- Pellet, C., Bodin, X., Delaloye, R., Kaufmann, V., Noetzli, J., Thibert, E., Kellerer-Pirklbauer, A., 2021. Rock glacier kinematics. *BAMS - State of the climate in 2020* S44–S45. <https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1>
- Ravanel, L., Magnin, F., Gallach, X., Deline, P., 2020. Évolution des parois rocheuses gelées de haute montagne sous forçage climatique. *La Météorologie* 7.
- Roudnitska, S., Charvet, R., Ribeyre, C., Leprince-Favereaux, B., 2017. Les glaciers rocheux de Savoie : Inventaire,

cartographie et risques associés (Service RTM 73). RTM - ONF, Chambéry.

- Scapozza, C., Lambiel, C., Baron, L., Marescot, L., Reynard, E., 2011. Internal structure and permafrost distribution in two alpine periglacial talus slopes, Valais, Swiss Alps. *Geomorphology* 132, 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.010>
- Streletskiy, D., Noetzli, J., Smith, S.L., Vieira, G., Schoeneich, P., Hrbacek, F., Irrgang, A.M., 2021. Strategy and Implementation Plan for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) 2021-2024. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6075468>
- Strozzi, T., Caduff, R., Jones, N., Barboux, C., Delaloye, R., Bodin, X., Kääb, A., Mätzler, E., Schrott, L., 2020. Monitoring Rock Glacier Kinematics with Satellite Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing* 12, 559. <https://doi.org/10.3390/rs12030559>
- Thibert, E., Bodin, X., 2022. Changes in surface velocities over four decades on the Laurichard rock glacier (French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* n/a. <https://doi.org/10.1002/ppp.2159>