



**HAL**  
open science

# Les inventaires de glaciers rocheux en France et en Argentine : enjeux, démarche, exploitation

Damien Bornet

► **To cite this version:**

Damien Bornet. Les inventaires de glaciers rocheux en France et en Argentine : enjeux, démarche, exploitation. Ingénierie de l'environnement. 2014. dumas-01110525

**HAL Id: dumas-01110525**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01110525>**

Submitted on 28 Jan 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

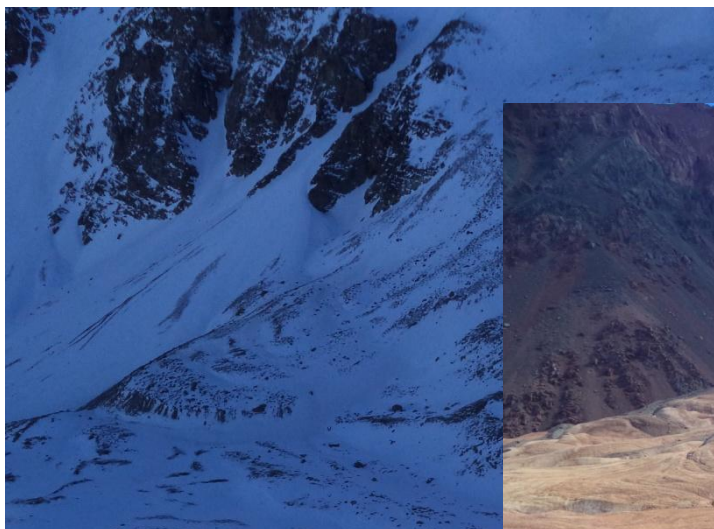
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Master 2 professionnel**  
Domaine : Sciences Humaines et Sociales  
Mention : Sciences du Territoire

**Spécialité :**  
Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement (STADE)

# Les inventaires de glaciers rocheux en France et en Argentine : Enjeux, démarche, exploitation.

*Stages réalisés au service RTM des Alpes-Maritimes (France) en 2013 et au laboratoire LANIGLA-CONICET de Mendoza (Argentine) en 2014*



*Glacier rocheux du Laurichard en hiver, Massif du Combeynot, France (Source : Damien Bornet)*



*Glacier rocheux Morenas Coloradas, Cordon Del Plata, Argentine (Source : Damien Bornet)*

Mémoire soutenu le 2 septembre 2014 à l'IGA  
Par **Damien Bornet**

**Devant un jury composé de :**

Philippe Schoeneich - Laboratoire PACTE, IGA/UJF, Grenoble  
Thomas Echelard - ATER - Laboratoire PACTE, IGA/UJF, Grenoble  
Xavier Bodin - Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, Chambéry

# Remerciements

Avant tout, Je tiens à remercier Ricardo Villalba, directeur du laboratoire IANIGLA en Argentine, de m'avoir accueilli dans ce Laboratoire, à Mendoza, me permettant ainsi de pouvoir effectuer mon stage dans un territoire tel que les Andes, avec des problématiques différentes et tout aussi intéressantes que dans les Alpes. Je remercie également Dario Trombotto, chercheur en géocryologie au IANIGLA et travaillant sur l'inventaire national des glaciers, pour m'avoir aidé lors de cette étude et d'avoir été présent pour répondre à mes questions tout au long de ce stage.

Je voudrais par ailleurs remercier Mariano Masiokas et Pierre Pitte, chercheur au IANIGLA, ainsi que Lidia Ferri Hidalgo, Laura Zalazar et Mariano Castro, ingénieurs travaillant sur l'inventaire national des glaciers, pour les informations et les données qu'ils m'ont fourni, me permettant de faire la comparaison des inventaires entre les Alpes du Sud et les Andes Centrales.

Par ailleurs, je sais gré à Xavier Bodin, chargé de recherche au laboratoire EDYTEM de Chambéry, et à Philippe Schoeneich, enseignant-chercheur au laboratoire PACTE de Grenoble, qui m'ont offert la possibilité de m'épanouir dans l'étude du pergélisol de montagne par ce présent stage, et pour les nombreux conseils qu'ils m'ont donné pour l'avancée de mon travail.

Je suis reconnaissant aux autres personnes du laboratoire IANIGLA, pour leur accueil et la sympathie dont ils ont fait part tout au long de mon séjour parmi eux.

Grâce à ces personnes, cette expérience professionnelle a été très intéressante et agréable, et m'a permis d'enrichir mes connaissances sur le permafrost, appliquée de plus à un territoire différent des Alpes.

# Index des Sigles

ALOS: Advanced Land Observing Satellite

APIM : Alpine Permafrost Index Map

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CBERS: China Brazil Earth Resources Satellite

CRYCIT: Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

DDT: Direction Départementale des Territoires

DGPS : Differential Global Positioning System

D-InSAR : Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

ERS: European Remote Sensing

GDEM : Global Digital Elevation Model

HRC : High-Resolution Panchromatic Camera

IANIGLA: Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales

IGA : Institut de Géographie Alpine

ING : Inventaire National des Glaciers

JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PACTE : Politiques publiques, ACTION politique, TERRITOIRES

RTM : Restauration des Terrains en Montagne

SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses

SRTM : Shuttle Radar Topographic Mission

UTM: Universal Transverse Mercator

WGMS: World Glacier Monitoring Service

PRISM : Pancromático Remoto con Sensor de Instrumento para Stereo Mapping

# Résumé

Le permafrost de montagne fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs décennies, afin de comprendre les mécanismes de formation et d'évolution du milieu périglaciaire, dans un contexte de changement climatique. Les glaciers rocheux, présent à haute altitude dans les Alpes et dans les Andes par exemple, sont les formes les plus visibles et les plus commune du permafrost, et présents en grande quantité dans les Alpes du Sud et les Andes Centrales.

L'inventaire dans les Alpes du Sud, rassemblant trois départements, est réalisé afin d'apporter des informations sur la distribution des glaciers rocheux ainsi que leur activité, permettant de compléter le projet de suivi PermaNet ainsi que la carte de distribution du permafrost dans les Alpes. Cet inventaire a été réalisé par le service RTM sur SIG, à l'aide de vues aériennes et fonds orthophotographiques, dans le but de cartographier les zones à risque dans les Alpes Française.

Par ailleurs, l'Inventaire National des Glaciers, en cours de réalisation dans les Andes argentine par le laboratoire IANIGLA, base ses travaux sur la loi 26.639 sur la protection des glaciers et des environnements périglaciaires, promulguée en 2011 qui a pour but de préserver ces milieux et d'estimer le volume d'eau potable présente dans les formes glaciaires et périglaciaires en les cartographiant et calculant leur surface. Pour cet inventaire, les logiciels Qgis, SAGA ou encore le programme KOSMO, ainsi que des images satellites (Landsat, Aster, Alos) sont utilisés. Le territoire à étudier est divisé par bassins versants pour informer le public des ressources en eau disponible par régions hydrologiques.

## *Abstract*

The mountain permafrost is studied since few decades to understand the mechanisms of formation and evolution of the periglacial environment, in the context of climate change. The rock glaciers, located in high altitude, for instance in the Alps and the Andes, are the most visible and common forms of the permafrost, and are abundant in the Southern Alps and the Central Andes.

The inventory of the Southern French Alps, gathering three departments, is realized to bring information about the distribution of the rock glaciers and also their activity, completing the Alpine-Space-Project PermaNET and the APIM (Alpine Permafrost Index Map) in all the Alps. This inventory is realized by the RTM service on a SIG, with aerial pictures and orthophotos, and aims to map the potential hazards zones in the French Alps.

Otherwise, the national inventory of glaciers, realized actually in the Argentina Andes by the IANIGLA laboratory, base this study on the law 26.639 on the protection of glaciers and periglacial environment, promulgated in 2010, and have the aim to preserve this environment and estimate the water volume present in the glacial and periglacial forms, mapping their distribution and calculating their surface. For this inventory, the software Qgis, SAGA and the Kosmo program, as satellite pictures (Landsat, Aster, Alos) are used. The territory is studied and divided by catchment to inform the public on the available water resources by hydrological regions.

## Table des matières

Remerciements .....	1
Index des Sigles.....	2
Résumé .....	3
Table des matières .....	4
I. Introduction .....	7
1.1. Contexte général de l'étude : les conséquences de l'évolution de la cryosphère pour les sociétés (Alpes et Andes).....	7
1.2. Présentation des organismes d'accueil .....	10
1.2.1. Le service RTM.....	10
1.2.2. Le laboratoire IANIGLA.....	11
1.3. Deux inventaires aux problématiques différentes : les Alpes du Sud et les Andes Centrales argentines .....	12
1.4. Présentation des zones d'étude .....	13
1.4.1. Localisation .....	13
1.4.2. Contexte climatique.....	15
II. Démarche et méthodes .....	17
2.1. L'inventaire des Alpes du Sud (France) .....	17
2.1.1. Objectifs .....	17
2.1.2. Etat de l'art sur le suivi des glaciers rocheux dans les Alpes.....	19
2.1.3. Comparaison entre inventaires et distribution du permafrost dans les Alpes ....	21
2.2. L'Inventaire National des Glaciers (Argentine) .....	22
2.2.1. Objectifs .....	22
2.2.2. Historique des recherches sur les glaciers rocheux en Argentine .....	24
2.3. Comparaison des méthodes d'inventaire .....	24
2.3.1. L'inventaire dans les Alpes du Sud.....	25
2.3.2. L'Inventaire National des Glaciers .....	28
2.4. Identification de l'activité - Vérifications de terrain .....	31
2.4.1. Identification de l'activité des glaciers rocheux.....	31
2.4.2. Vérifications et mesures sur le terrain.....	32
2.5. L'apport de l'interférométrie radar différentielle .....	34
III. Résultats et discussion.....	36
3.1. Analyses statistiques des Alpes du Sud .....	36
3.1.1. Niveau général.....	36
3.1.2. Statistiques régionales .....	41
3.2. Evolution des glaciers rocheux avec le changement climatique .....	44
3.2.1. Les risques dans les Alpes du Sud .....	44

3.2.2. Les risques dans les Andes Centrales.....	46
3.3. Les ressources en eau présentées par les glaciers rocheux : exemple des Andes semi-arides de la région de Mendoza.....	47
3.3.1. Le Rio Mendoza .....	47
3.3.2. Analyse du sous-bassin Rio Tunuyan Sur.....	49
3.4. Estimation du volume de glace.....	53
3.5. Analyse des Interférogrammes .....	54
3.5.1. Analyse géomorphologique.....	55
Conclusion et Perspectives .....	57
Bibliographie.....	59
Table des figures .....	64
Table des Tableaux.....	65
Annexes .....	66



# I. Introduction

## 1.1. Contexte général de l'étude : les conséquences de l'évolution de la cryosphère pour les sociétés (Alpes et Andes)

Depuis la fin du Petit Age Glaciaire, la hausse des températures enregistrée, plus marquée depuis les 30 dernières années, a des conséquences visibles sur le permafrost, ou pergélisol en français (sol gelé en permanence pendant au moins deux années consécutives, dont la température est généralement comprise entre  $-2^{\circ}\text{C}$  et  $0^{\circ}\text{C}$ ), dans les zones de haute altitude et haute latitude. Ce réchauffement est d'autant plus visible dans les milieux de montagne, notamment par les conséquences sur les zones glaciaires et périglaciaires.

Les effets du changement climatique sur le permafrost de hautes altitudes, comme celui de haute latitude (qui a en plus un effet de rétroaction positive sur le climat par la libération de gaz comme le méthane), implique sa dégradation. Conjugué à l'augmentation de la pression anthropique dans les milieux de montagne, cette altération induit des risques sur les populations et infrastructures proches par la libération de matériaux tenus entre eux par la présence de glace.

Étudié depuis les années 1970 (Haeberli & Gruber, 2008), le permafrost de montagne fait aujourd'hui l'objet de nombreuses études, afin d'améliorer les connaissances sur ce phénomène connu depuis peu de temps, et de le resituer dans le contexte de changement climatique. Les recherches dans ce domaine s'étendent aujourd'hui sur l'ensemble de l'arc alpin, mais aussi, entre autre, en Amérique du Nord (Millar & Westfall, 2008, Liu et al. 2013)- et dans la Cordillère des Andes (Trombotto et al.1997, Angillieri 2009, Falaschi et al. 2014)- territoires sur lesquels plusieurs études sont menées.

Une des formes les plus remarquables de la présence de permafrost, sur laquelle les conséquences du changement climatique sont bien visibles, sont les glaciers rocheux. Ces formes sont constituées d'un mélange de débris rocheux, en provenance des versants, et de glace, issue du regel en profondeur de l'eau de fonte venant des névés ou des glaciers en amont. Le développement de ces formes résulte d'un climat froid et sec, empêchant la formation de glaciers blancs et d'un apport de débris rocheux suffisant provenant des versants en amont et des moraines. La pente doit être relativement élevée afin de permettre une déformation plastique de ce mélange de glace et de débris par fluage (Harris et al., 2009). Les conditions climatiques permettant la présence des glaciers rocheux dans les Alpes sont des températures moyennes annuelles inférieures à  $-1$  à  $-2^{\circ}\text{C}$ , avec des précipitations inférieures à 2000 mm/an (Baroni et al., 2004). Ces formes ne sont pas à confondre avec les glaciers couverts ou les glaciers noirs, ces derniers étant recouverts de débris superficiels, les glaciers rocheux répondent à des processus d'origine périglaciaire.



Ces formes périglaciaires forment une sorte de lobe de débris rocheux et sont marqués en surface par de multiples bourrelets longitudinaux et transversaux. Pour les identifier, il faut tenir compte de la géométrie de l'ensemble de la forme, du modelé de sa surface ainsi que des caractéristiques à ses marges (fig.1).

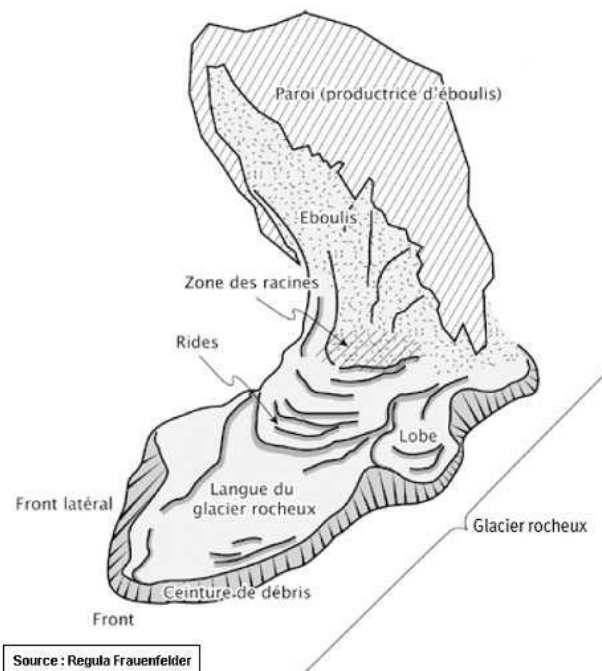


Figure 1: Schéma d'un glacier rocheux (source: Regula Frauenfelder)

Les glaciers rocheux se développent généralement à une altitude minimum définie par l'isotherme  $-1/-2^{\circ}\text{C}$  et une altitude maximum caractérisée par la ligne d'équilibre glaciaire (Haeberli, 1985). Or, la plupart sont aujourd'hui situés proches de la limite inférieure du permafrost discontinu, avoisinant des températures de  $0^{\circ}\text{C}$  (Gärtner-Roer et al., 2010). Ceci explique que la hausse des températures peut entraîner une déstabilisation de ces formes, présentant des risques par la libération de quantités importantes de blocs facilement mobilisables, suite à la fonte de la glace. Ces risques peuvent être caractérisés par des laves torrentielles, des éboulements et chutes de bloc, ou encore des mouvements de terrain. Les conséquences peuvent aller du simple tassement, par la fonte de la glace entre les blocs, jusqu'à une rupture d'une partie du glacier rocheux, comme il a été enregistré dans le vallon du Bérard (Krysiecki et al., 2008) en 2006 et qui est visible aujourd'hui sur le glacier rocheux de Pierre Brune, en Vanoise (Echelard et al., 2013).

Par ailleurs, connaître la distribution des glaciers rocheux permet de comprendre les principaux facteurs à l'origine de leur formation et de leur évolution, ainsi que de modéliser l'étendue passée et présente du permafrost continu et discontinu (Boeckli et al., 2012).

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, dont l'objectif principal est de contribuer à l'apport de connaissances scientifiques sur la répartition et l'activité des glaciers rocheux, ceci afin de détecter les risques potentiels que peuvent présenter ces formes pour les populations et les infrastructures proches. Afin de mieux comprendre les risques liés à la déstabilisation des glaciers rocheux, dans le contexte de réchauffement climatique, de nombreux travaux ont été menés afin d'établir un inventaire exhaustif sur l'ensemble de l'arc alpin depuis les dernières années. Le service RTM, en collaboration avec l'IGA et le laboratoire PACTE, a contribué à ces travaux en réalisant un inventaire visant à localiser les formes pouvant présenter des risques, cette initiative a été prise suite à l'enregistrement d'événements tels que des chutes de blocs ou des laves torrentielles, mis en relation avec la déstabilisation des glacier rocheux (Riguidel et al., 2011).

Plus spécifiquement, cette étude complète l'inventaire des glaciers rocheux des Alpes-Maritimes, réalisé l'année précédente (Bornet et al., 2014), et a pour objectif de réaliser une étude plus approfondie en réalisant une cartographie plus large regroupant les différents inventaires réalisés dans les Alpes du Sud. Ces inventaires ont été réalisés de façon indépendante entre les trois départements, dans l'optique de cartographier les zones à risques et de compléter la base de donnée des services RTM sur la répartition et l'activité des glaciers rocheux. La combinaison de ces travaux, élargie par des études statistiques, a pour but d'établir une vision plus large et plus homogène, intégrée par la suite au réseau de suivi du permafrost dans les Alpes (PermaNET). Il apportera une connaissance supplémentaire sur la répartition des glaciers rocheux, complétant la carte de distribution du permafrost dans l'arc Alpin (Boeckli et al., 2012) qui est basée sur les inventaires des glaciers rocheux et la mesure de la température de surface de la roche. Ce projet, dans lequel certains inventaires de glaciers rocheux sont encore à réaliser, focalise son étude sur la connaissance des formes du permafrost alpin.

L'objectif de ce travail est de présenter une cartographie de l'ensemble des glaciers rocheux dans les Alpes françaises du Sud, fournissant des données sur les formes inventoriées. Il se focalise ensuite sur les glaciers rocheux actifs et inactifs, afin de réaliser des analyses permettant de comprendre les processus de formation et d'évolution de ces formes dans le contexte de changement climatique et de risques en milieu de montagne.

Un autre point important est celui des ressources en eau présentes dans ces formes, faisant des territoires de haute montagne des zones stratégiques pour les sociétés, notamment dans les milieux désertiques ou arides telles que les Andes Désertiques et Centrales. En effet, certains pays d'Amérique du Sud s'intéressent à ces zones depuis quelques années, comme au Chili ou en Argentine, où l'Inventaire National des Glaciers est réalisé dans l'optique de connaître la part de ressources en eaux présente dans les formes glaciaires et périglaciaires. L'eau de fonte, provenant des milieux périglaciaires, transportée dans les rivières jusque dans les villes, est une ressource importante d'eau potable pour des millions de personnes ainsi que pour l'activité agricole et économique du pays.

Or il est important de constater que ces milieux fragiles ont été affectés par les activités humaines depuis le développement de l'industrie et l'implantation des mines. Ces zones sont peu connues car éloignées, l'inventaire des formes présentes est un moyen de mieux les connaître et d'assurer leur préservation à long terme.

Pour répondre à ce problème, le programme « Minería, Ambiente y Derechos Humanos » a été créé par le Centre des Droits Humains et l'Environnement, en Argentine, afin de protéger ces zones et de sensibiliser la population sur leur importance. Par ailleurs, les inventaires réalisés sont une source de connaissance de ces milieux par la diffusion des données au public. Pour cela, l'inventaire dans la région de Mendoza, dans les Andes Centrales, est abordé dans cette étude, afin de comprendre les enjeux différents dans ces milieux de haute montagne, entre les Alpes et les Andes.

## **1.2. Présentation des organismes d'accueil**

Cette étude est le résultat de deux années de travail au sein d'organismes différents. D'une part, au service RTM 06 en 2013, service public de l'Etat français s'intéressant aux risques naturels en milieux de montagne, où l'inventaire des Alpes du Sud a été effectué. D'autre part, au laboratoire IANIGLA, en 2014, en Argentine, qui, par la rencontre de personnes travaillant sur l'inventaire national des glaciers, a permis d'avoir les connaissances nécessaires pour établir une comparaison de ces deux inventaires bien différents.

### **1.2.1. Le service RTM**

Le travail de l'année dernière, durant lequel une première étude a été réalisée, s'est déroulé au service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) des Alpes-Maritimes, entre Mai et Août 2013. Le RTM est le service de l'Office national des Forêts (ONF) spécialisé dans la gestion des risques naturels en montagne. Il possède une expertise dans la mise en œuvre de prestations pour l'Etat, les collectivités territoriales et autres demandeurs.

Depuis plus de 100 ans, ce service a récolté diverses informations sur les différents départements alpins et pyrénéens, à partir de nombreuses observations de terrains et l'archivage des informations, que ce soit par photos aériennes, notes ou études. Ceci a pour intérêt de construire des bases de données et de permettre au service d'émettre des avis sur les événements historiques passés et présents (avalanches, chutes de pierres, glissements de terrains, inondations) aussi bien dans le domaine de la prévention des risques que dans la définition des dispositifs mis en œuvre.

Le rôle du service RTM est d'informer la population des aléas naturels actifs et potentiels qui peuvent présenter des risques vis-à-vis de la sécurité des personnes et des biens. C'est pourquoi le RTM agit comme service spécialisé à la demande de la Direction Départementale des Territoires (DDT), créée en 2010, afin d'élaborer des Plans de Prévention des Risques (PPR) pour les communes concernées. De façon complémentaire, ce service effectue des missions d'expertise et émet des avis sur certains projets d'aménagement.

Dans le cadre de cette étude, l'inventaire des glaciers rocheux a été réalisé au sein de ce service afin de cartographier et d'étudier ces formes géomorphologiques et de sélectionner celles qui peuvent présenter des risques afin de les intégrer dans les projets d'aménagement.

### 1.2.2. Le laboratoire IANIGLA

Le présent stage a été réalisé dans le laboratoire IANIGLA, situé dans le centre de recherches scientifiques et technologiques de Mendoza (CRYCIT), en Argentine, dans le but d'étudier les différents enjeux dans le territoire alpin et andin, par l'analyse des Alpes françaises du Sud et des Andes Centrales argentines, mais aussi de comparer les méthodes utilisées et les résultats obtenus dans les deux inventaires.

Ce laboratoire est une unité du CONICET ainsi que de l'Université Nationale de Cuyo et des gouvernements des provinces de San Juan et Mendoza. Son objectif est de faire des recherches dans différents domaines des sciences environnementales (Glaciologie, paléontologie, dendrologie, minéralogie,...) ainsi que l'enseignement supérieur et l'apport de services et de connaissances dans ces domaines.

Ce stage s'est effectué sous la direction de Xavier Bodin, chercheur CNRS au laboratoire EDYTEM de l'université de Savoie, présent au IANIGLA dans le cadre du projet ANDALP (qui étudie les réponses géomorphologiques des hautes montagnes andines et alpines au changement climatique) et de Philippe Schoeneich, chercheur au Laboratoire PACTE de l'Institut de Géographie Alpine de Grenoble.

La présence dans le IANIGLA a eu pour objectif de rencontrer les personnes travaillant sur l'inventaire National des glaciers argentins, afin d'échanger sur les enjeux des inventaires dans les Alpes et les Andes et de mettre en relation les différentes méthodes utilisées. Les chercheurs Dario Trombotto et Mariano Masiokas ont fait part d'une partie de leurs travaux sur les Andes afin de compléter les connaissances sur les types de mesures et les résultats obtenus à ce jour sur ce territoire. Les échanges avec Lidia Ferri Hidalgo, Laura Zalazar et Mariano Castro, entre autres, ingénieurs travaillant sur l'inventaire des glaciers argentins, ont permis de comparer et de discuter plus en détail les méthodes utilisées, donnant les outils nécessaires à la réalisation de cette étude.

### 1.3. Deux inventaires aux problématiques différentes : les Alpes du Sud et les Andes Centrales argentines

L'objectif général de cette étude est de comparer les inventaires dans les Alpes du Sud et dans les Andes Centrales argentines, qui comprend la cartographie de toutes les formes glaciaires et périglaciaires. Ce travail permettra d'identifier les zones de formation des glaciers rocheux et de comprendre en partie les facteurs d'évolution. Par cette approche, les problématiques liées au changement climatique, ainsi que les risques (dans les Alpes) et les ressources en eau (dans les Andes), seront abordées.

**→ Comment sont effectués les inventaires dans les deux territoires, leurs différences, leurs complémentarités, les types de suivis et les connaissances apportées par l'approche des enjeux différents ?**

Dans un premier temps, l'intérêt est de montrer quels sont les enjeux qui sont à la source de la réalisation des différents inventaires, et de voir pourquoi l'étude de la distribution des glaciers rocheux est importante aujourd'hui. Pour cela, ce travail s'intéressera à ce qui a conduit à réaliser ces inventaires, aux méthodes utilisées (logiciels, images, fonds cartographiques...) et aux contrôles de terrain.

Dans une deuxième partie, des analyses statistiques seront effectuées, au niveau général puis régional afin de comprendre les conditions climatiques et morphologiques de formation des glaciers rocheux. Ces analyses se basent sur les variables topo-climatique (rayonnement pour bilan radiatif, altitude, pente,...) afin de voir les réponses possibles des glaciers rocheux face au changement climatique.

Cette approche traitera des problématiques générales liées aux risques et aux ressources hydriques, qui sont à la base des inventaires, en partant des connaissances existantes sur ces enjeux et essaiera de comprendre comment les intégrer dans les prochains inventaires. La méthode d'interférométrie radar différentielle sera aussi expliquée et utilisée afin de voir l'intérêt d'un tel outil pour développer les connaissances sur les glaciers rocheux.



## 1.4. Présentation des zones d'étude

### 1.4.1. Localisation

La zone étudiée des Alpes françaises du Sud se situe dans la région Provence-Alpes-Côte-D'azur et s'étend depuis le massif des Cerces au Nord ( $5^{\circ}5' N$ ,  $6^{\circ}18' E$ ) jusqu'au massif du Mercantour au Sud ( $43^{\circ}59' N$ ,  $7^{\circ}27' E$ ). Elle comprend différents massifs qui sont, du Nord au Sud, les Cerces, le Sud-est des Ecrins, le Queyras, l'Ubaye et le Mercantour. Le point culminant de la zone d'étude est la barre des Ecrins, à 4102 mètres d'altitude. La zone d'étude est la partie à l'extrême Sud-ouest de l'arc alpin.

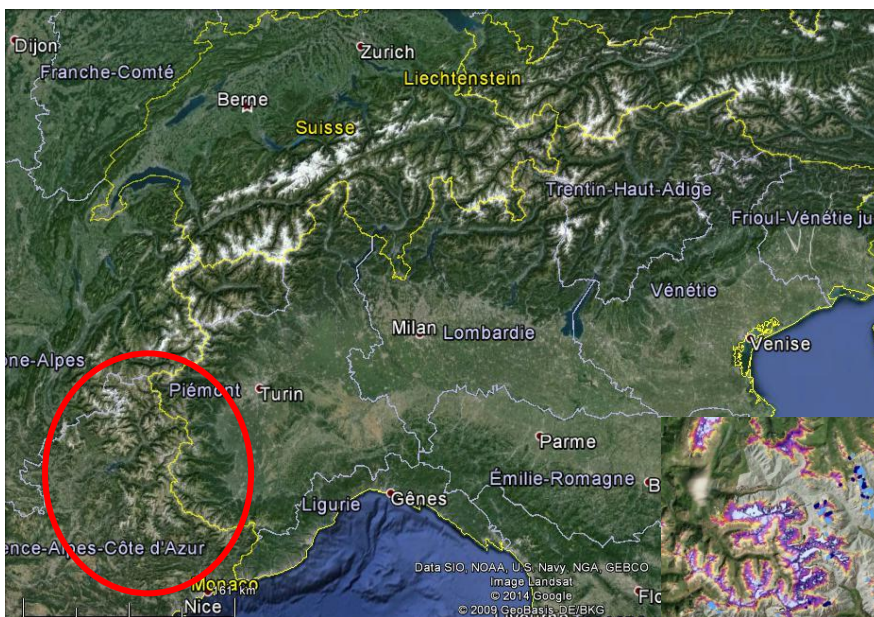


Figure 2: Carte de localisation de la zone d'étude dans l'arc alpin (source : Google Earth)

Cette zone se trouve à la frontière avec l'Italie (fig.2), qui forme la limite Est de la zone étudiée, le travail étant focalisé sur la partie française. De même que le département de l'Isère, dont l'inventaire est en cours, forme la limite Nord. Cette zone d'étude est constituée de trois vallées principales où sont présents la plupart des glaciers rocheux, la vallée de la Durance, de l'Ubaye et de la Tinée dans le Mercantour (fig.3).

La zone d'étude, couvre une surface totale de 8200 km<sup>2</sup>, dont 5743 km<sup>2</sup> sont situés au dessus de 1500 mètres d'altitude.

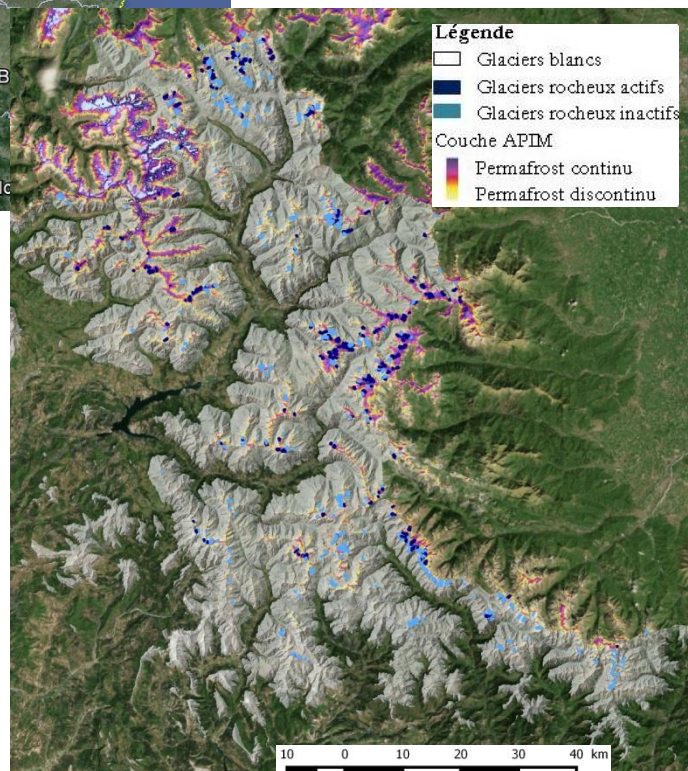


Figure 3: Localisation de la zone d'étude avec la distribution des glaciers rocheux, des glaciers blancs et du permafrost (source : Qgis)

## Site d'étude en Argentine

En vue de l'étendue et de la diversité des milieux dans la zone à cartographier, cinq grandes régions ont été définies, rassemblant des formes glaciaires et périglaciaires ayant des caractéristiques morphologiques et des environnements similaires. Ces régions ont été différenciées ainsi : les Andes désertiques, les Andes Centrales, la Patagonie Nord, la Patagonie Sud et la Terre de Feu (fig.4).

Dans les Andes Désertiques (entre 17,30°S et 31°S), au Nord de l'Argentine, allant des régions de Jujuy à La Rioja, les glaciers rocheux sont les seules formes de cryosphère actives, à des altitudes autour de 4000-5000 mètres, rencontrant très peu de précipitations et des températures élevées empêchant le développement des glaciers blancs. Dans les Andes Centrales (entre 31°S et 35°S), au niveau de la région de San Juan et Mendoza, les glaciers rocheux sont présents entre 3500 et 4500 mètres d'altitude, avec la présence de nombreux glaciers blancs et couverts, les précipitations sont plus élevées et proviennent du Pacifique, à l'Ouest. En allant dans les Andes patagoniennes (en dessous de 35°S), les glaciers rocheux laissent la place aux glaciers blancs.

Dans l'objectif de quantifier les ressources en eau, chaque province andine a été découpée suivant les bassins et les sous-bassins, nommés par le nom du principal cours d'eau de chaque bassin versant. Au total, 36 bassins versants sont étudiés dans l'inventaire national, et 80 sous-bassins.

Ce travail s'intéresse plus précisément au bassin versant de Mendoza, dans les Andes Centrales, qui, en plus d'être situé dans la province où est implanté le laboratoire IANIGLA, lieu du stage, est la province présentant le plus grand nombre d'études sur les glaciers rocheux, avec la province de San Juan (Arenson et al. 2010). De plus, l'inventaire national des glaciers a débuté sur cette région, permettant d'avoir un accès aux premières données.

Plus spécifiquement, la zone d'étude se focalise sur le bassin versant du Rio Mendoza (fig.5), vaste zone comprenant cinq sous-bassins d'une superficie totale de 8024 km<sup>2</sup> (Rio Las Cuevas, Rio Las Vacas, Rio Tupungato, Rios Blancos et Arroyo Uspallata).

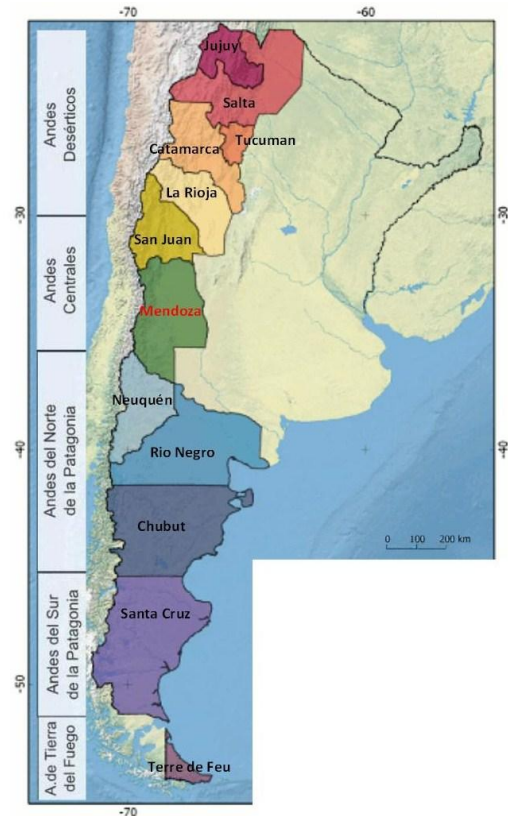


Figure 4: Liste des provinces andines d'Argentine (adaptée depuis site web ING - <http://www.glaciaresargentinos.gov.ar/index.php/provincias>)

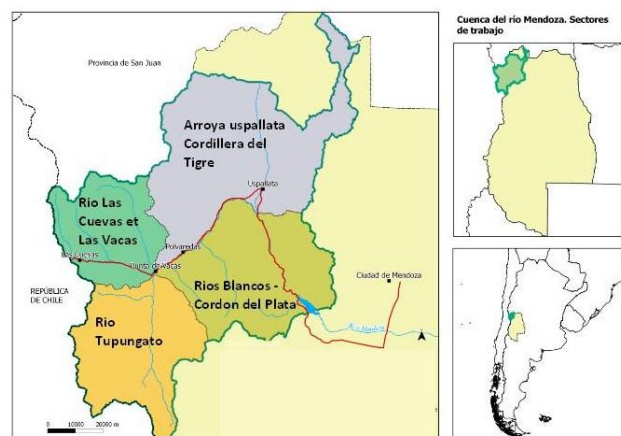


Figure 5: Localisation du bassin versant du Rio Mendoza et ses sous-bassins (adaptée depuis rapport ING-Tupungato)



constituent la partie interne des Andes Centrales, entre 31 et 33°S, et présentent des altitudes plus élevées, recevant plus de précipitations que les deux autres bassins, situés dans les Andes externes.

### 1.4.2. Contexte climatique

La partie alpine étudiée étant localisée au **Sud de l'Arc alpin**, elle bénéficie d'un climat plus doux que dans le reste de l'arc alpin, avec une influence méditerranéenne dans le massif du Mercantour. Ceci laisse penser que les glaciers rocheux seront situés plus haut en altitude en allant vers le Sud, ce que cette étude va chercher à vérifier. De plus, le nombre de glaciers blancs devient de plus en plus rare en allant vers le Sud, devenant même inexistant dans le massif du Mercantour (Gardent et al., 2014), laissant la place aux glaciers rocheux pour se développer en plus haute altitude et en plus grand nombre.

L'altitude moyenne de l'isotherme zéro (altitude à laquelle la température moyenne de l'air est égale à 0°C) dans les Alpes du Sud se situe entre 2500 et 2700 mètres. Les données des stations météorologiques permettent de situer l'isotherme 0 aux alentours de 2560 mètres dans le massif du Combeynot (Bodin et al., 2009), massif situé au Nord de la zone d'étude.

Les précipitations annuelles moyennes dans les Alpes du Sud sont entre 700 et 1500 mm sur les massifs et entre 600 et 900 mm dans les vallées. Les températures moyennes estivales sont aux alentours de 22 °C dans les vallées et 3°C en hiver, donnant une amplitude thermique de 19°C suivant les saisons. La limite de l'enneigement est entre 1000 et 1600 mètres en moyenne dans les Alpes du Sud et le gradient thermique est d'environ 0,6°C par 100 m.

Le climogramme ci-dessous (fig.6) montre les précipitations et les températures à Nice, situé au Sud de la zone d'étude, avec des températures moyennes plus chaudes que dans le reste de la zone d'étude, ce graphique renseigne surtout sur le climat du massif du Mercantour. L'accès aux données limité ne permet pas de présenter les résultats moyens sur l'ensemble des Alpes du Sud, mais une comparaison en est cependant possible avec les Andes Centrales de Mendoza.

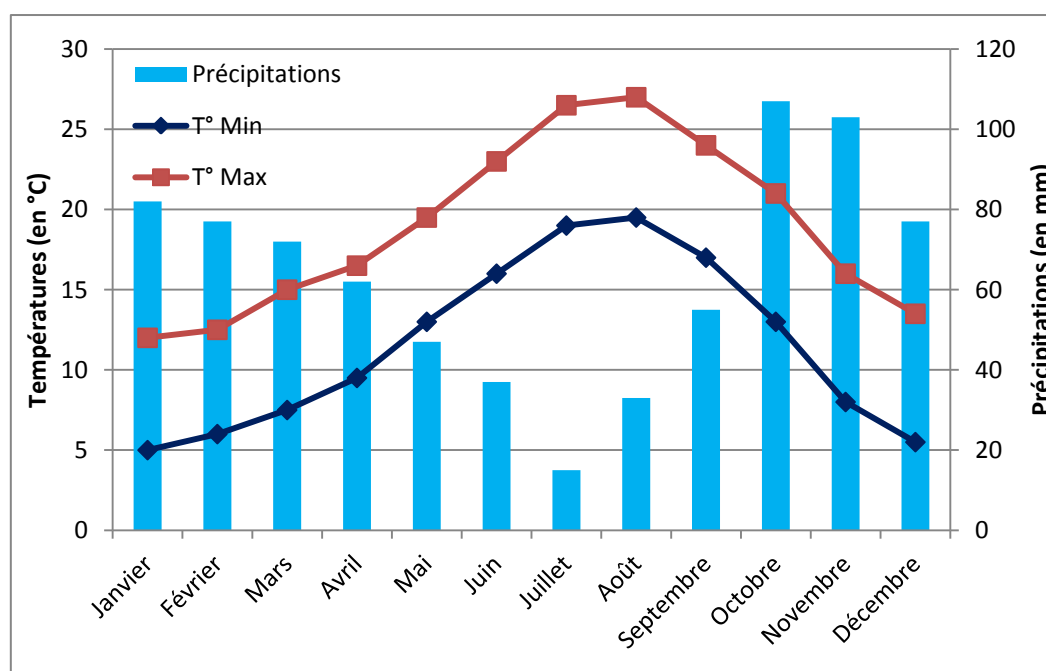


Figure 6: Climogramme mensuel des températures et des précipitations à Nice (Alpes du Sud)  
Graphique réalisé à partir des données de *allmestat.com*

Dans les **Andes Centrales**, caractérisées comme semi-arides, les glaciers rocheux sont très présents et sont situés entre 3500 et 4500 mètres d'altitude, limités en altitude par la présence de glaciers blancs au-delà de 4500 mètres, contrairement aux Andes désertiques, plus au Nord, où les glaciers rocheux peuvent aller jusqu'à 6000 mètres d'altitude, avec l'absence de glaciers blancs.

L'isotherme 0 se situe à environ 3860 mètres d'altitude dans les Andes Centrales en 1997 (Trombotto et al., 1997), permettant d'estimer son altitude actuelle à environ 4000 mètres.

Les précipitations annuelles moyennes dans les Andes Centrales ne dépassent pas 100 à 200 mm (Minetti et al., 1986), avec des températures hivernales douces (entre 1°C et 18°C) et estivales sèches et chaudes (entre 19°C et 35°C) sur le plateau de Mendoza (800 mètres d'altitude) (fig.7). Dans la région de San Juan, les températures hivernales sont froides, de 10 à -18°C entre 3500 et 4000 mètres d'altitude (Angillieri, 2009). Au dessus de 4000 mètres d'altitude, les précipitations sont principalement neigeuses. Le gradient thermique est compris entre 0,5°C et 1°C par 100 mètres et les températures moyennes sont rarement supérieures à 0°C au dessus de 4300 mètres (Perucca et al., 2011). Les températures chaudes en hiver sont l'effet du vent Zonda, venant du Chili, créant un effet de Foehn sur la partie argentine.

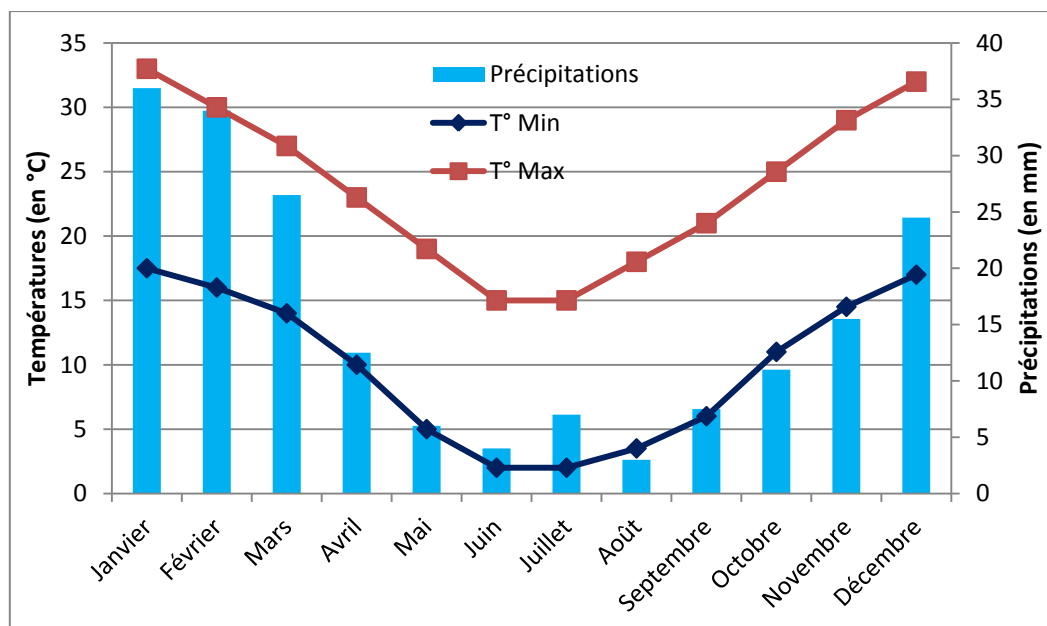


Figure 7: Climogramme mensuel des températures et des précipitations de la province de Mendoza (Andes Centrales)  
Graphique réalisé à partir des données de [allmestat.com](http://allmestat.com)

Suite à la description du contexte géographique et climatique, il est possible de voir les différences entre les deux territoires étudiés et ainsi comprendre les enjeux et les objectifs différents, mais aussi les méthodes mises en place pour y répondre.

## II. Démarche et méthodes

Cette partie s'intéresse aux objectifs et à l'histoire des travaux sur les glaciers rocheux réalisés dans les deux territoires. Il s'agit de montrer les différents enjeux relatifs à ces formes et au milieu périglaciaire en général et les approches divergentes que cela implique, entre l'estimation et la protection des ressources en eau dans les Andes et la gestion des risques dans les Alpes du Sud. De ces approches ainsi que du contexte géographique découlent des méthodes qu'il est intéressant de comparer.

### 2.1. L'inventaire des Alpes du Sud (France)

#### 2.1.1. Objectifs

Depuis 2000, le service RTM a observé à plusieurs reprises l'occurrence de phénomènes, résultant de l'action du réchauffement climatique sur la fonte de la glace présente dans les glaciers rocheux, tels que les laves torrentielles en Haute-Savoie. Ceci a impliqué, en 2008, la réalisation d'une étude visant à évaluer les risques liés à la dégradation de ces formes dans les « bassins torrentiels » de ce département (Garcia, 2009).

Dès 2011, le service RTM a entrepris d'établir un inventaire complet et systématique des glaciers rocheux des Alpes françaises, en collaboration avec l'IGA et le laboratoire PACTE, afin de représenter géographiquement leur implantation ainsi que d'effectuer une classification suivant leur activité, afin de proposer une ingénierie adaptée pour les différents types de situations. Le recensement inclut les lacs situés au contact ou à proximité de glaciers rocheux. Cet inventaire a débuté dans les départements des Hautes-Alpes en 2011 (Riguidel et al., 2011) et des Alpes-de-Haute-Provence en 2012 (Riguidel et al., 2012).

En 2013, l'inventaire a été poursuivi dans le département des Alpes-Maritimes (Bornet et al., 2014). Cette étude est complétée par une étude des mouvements par la méthode de multi-corrélation d'images, permettant de visualiser les déplacements potentiels des glaciers rocheux jugés actifs et pour ceux dont l'activité est imprécise. Ces inventaires ont permis de développer cette méthode de suivi des glaciers-rocheux ainsi que de mettre en évidence quelques cas particuliers (glaciers-rocheux du Bérard, du Tieouré ou les débâcles de Chauvet dans l'Ubaye) afin de mettre en place des techniques de surveillance et de suivis adaptés. D'autre part, ils complètent la recherche qui s'effectue sur le pergélisol dans l'arc alpin avec d'autres laboratoires tels que l'IRSTEA, le laboratoire PACTE à Grenoble ou encore EDYTEM à Chambéry.

L'objectif de cette étude est donc de prendre connaissance des risques potentiels induits par ces formes, par une cartographie et un suivi de leur évolution. Cet inventaire contribue à compléter le travail de suivi du permafrost qui est réalisé en ce moment dans les Alpes françaises (réseau PermaFRANCE), dont le but est de détecter les changements thermiques et dynamiques du permafrost et de gérer les risques qui y sont associés à long terme.

En effet, il s'agit de tenir compte de la dégradation plus ou moins rapides en fonction des élévations de température et des aléas qui sont induits, notamment par un refroidissement insuffisant en hiver ou la fonte des neiges accentuée au printemps. Cette hausse des températures entraîne un phénomène de lubrification du glacier rocheux qui se déplace plus vite. D'autre part, l'objectif est de tenir compte des domaines skiables (remontées mécaniques, pistes, retenues collinaires...) d'un point de vue administratif et géotechnique pour assurer une bonne gestion face à ces aléas potentiels.

Suite à ces inventaires, une liste des glaciers rocheux à surveiller sera établie par le service RTM, avec des propositions de protocoles de suivis simples ou plus complexes au sein du service ainsi qu'avec les chercheurs et ingénieurs ayant travaillé sur l'inventaire. Par ailleurs, la rédaction d'un document spécifique à destination des aménageurs qui peuvent être confrontés à la présence de glaciers rocheux sera effectuée.

Les différents objectifs de l'inventaire réalisé par le service RTM est de réaliser une base de données servant de référence en :

- Réalisant une cartographie directement opérationnelle et exhaustive sur tout le territoire.
- Cartographiant tous les glaciers rocheux des Alpes françaises, quelque soit leur activité.
- Etablissant une grille d'analyse permettant d'apprécier et de caractériser les risques potentiels associés aux glaciers rocheux.
- Décrivant chaque glacier rocheux localisé et en analysant les risques associés prévisibles.

Afin de répondre à ces objectifs, différentes stratégies sont mise en place :

- Expertiser les sites recensés comme présentant des risques avérés ou potentiels.
- Préciser les scénarios et les hypothèses pouvant conduire à une situation à risques pour chaque cas.
- Proposer une ingénierie adaptée (interventions, suivis, surveillances, ...) face à chaque type de situation.

### 2.1.2. Etat de l'art sur le suivi des glaciers rocheux dans les Alpes

Depuis quelques décennies, les recherches sur les glaciers rocheux dans les Alpes, comme formes les plus visibles de la présence du permafrost, se sont fortement développées. L'inventaire de ces formes est une des sources permettant de visualiser la distribution du permafrost dans les Alpes. Cette carte a pu être établie grâce au réseau de suivi PermaNET, entre la Suisse, la France, l'Italie et l'Autriche ; elle est visible sur la couche APIM (Alpine Permafrost Index Map, fig.8).

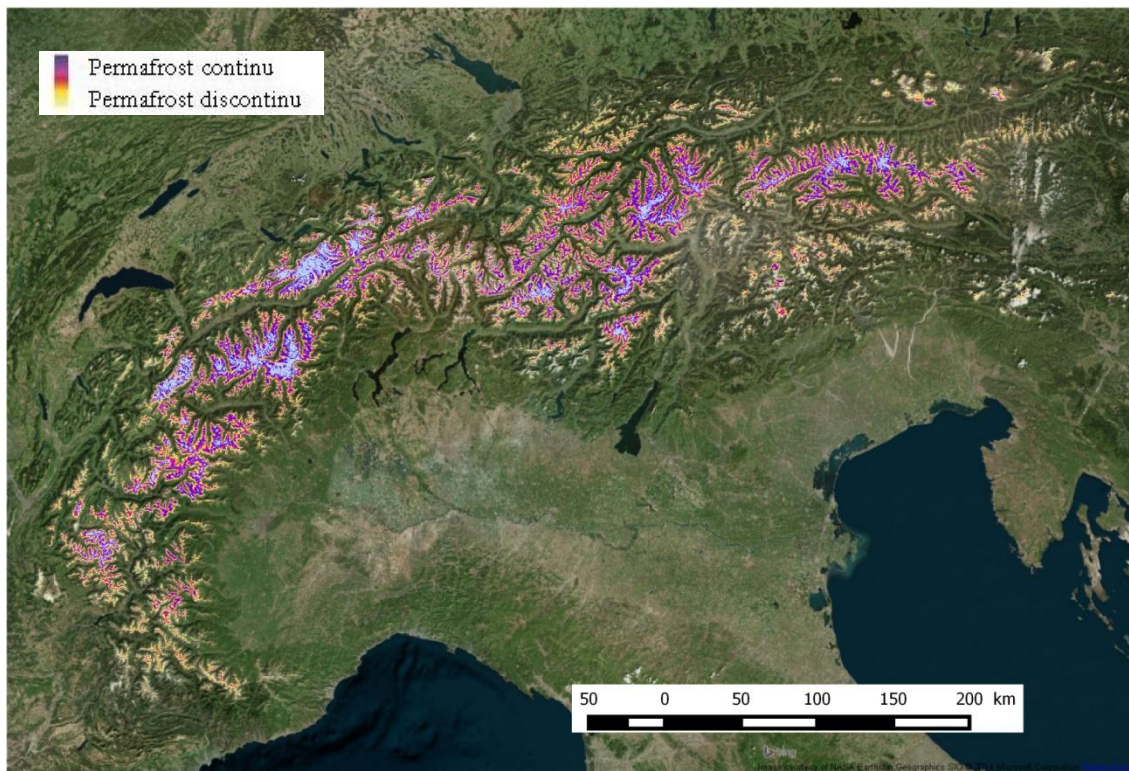


Figure 8: Carte de la probabilité de présence de permafrost (couche APIM) dans les Alpes, fond de carte Bing Aerial (source: Qgis)

Les inventaires des glaciers rocheux ainsi que les mesures de température ont débutés en **Suisse**, certaines formes font aujourd'hui l'objet de suivis pour mesurer les températures et modéliser la présence de glace à l'intérieur des formes. D'autres par, la méthode InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar) est utilisée pour mesurer les déplacements de glaciers rocheux dans le Valais (Delaloye et al., 2005), cette méthode a aussi permis de détecter certaines formes déstabilisées. Des mesures de transfert de sédiments sont effectuées sur le glacier rocheux Murtel dans les Grison et dans la vallée de Turtmann, dans le Valais. La relation entre les températures de surface et le fluage des glaciers rocheux sont aussi étudiés (Kääb et al., 2007). Un site de suivi des glaciers rocheux est installé à Muot da Barba Peider, dans la commune de Pontresina à 2980 mètres d'altitude, par l'université de Zurich (Mair et al., 2011).

Cinq glaciers rocheux déstabilisés, développés dans des pentes fortes, sont suivis dans la Vallée de Matternal, dans le Valais (Delaloye et al., 2011) pour comprendre leur évolution dans un contexte de risques liés à leur dégradation. Une simulation de la distribution du pergélisol a été effectuée dans le canton de Vaud, où du pergélisol a été visualisé dans le massif des Diablerets, le secteur du grand Muveran et de Dent de Morcles (Lambiel et al., 2008).



En **Autriche**, des inventaires ont récemment été réalisés dans la partie Centrale et Est (Kellerer et al., 2012), afin de compléter l'inventaire couvrant l'ensemble de l'arc alpin. L'altitude maximale et minimale, ainsi que la longueur, la largeur, l'aire et le degré d'activité sont renseignés dans les tables attributaires. En tout, 1647 glaciers rocheux ont été répertoriés.

Par ailleurs, un inventaire a aussi été effectué dans les Alpes Tyroliennes, cet inventaire est basé sur l'étude de photos aériennes de haute résolution. 3145 glaciers rocheux ont été répertoriés et l'altitude, la longueur, la largeur, l'aire, l'orientation, la stabilité, l'hydrologie et la lithologie ont été renseignés (Krainer et al., 2012). De nombreux glaciers rocheux ont fait l'objet de suivi sur leurs déplacements, les glaciers rocheux de Hinteres Langtal et Weissen ont été suivis dans les montagnes de Schober, ainsi que ceux de Dösen dans la montagne d'Ankogel (Mair et al., 2011 ; Krainer et al., 2012 ; Kellerer et al., 2012).

En **Italie**, de nombreux inventaires ont été réalisés dans le Nord du pays (Guglielmin et al., 1998 ; Baroni et al., 2004 ; Scotti et al., 2013). Par ailleurs, le suivi du glacier rocheux de *Murfreit* a été effectué en 2011 dans le centre des dolomites, dans le Tyrol Sud, au Nord de l'Italie, en partenariat avec plusieurs scientifiques de disciplines différentes, venant d'Autriche et des Etats-Unis (Krainer et al., 2012). Des mesures du permafrost dans le massif de l'Argentera ont été menées en 2004 et 2005 pour situer l'altitude et la profondeur de présence de pergélisol et estimer l'activité des glaciers rocheux répertoriés dans ce massif (Ribolini et al., 2006). Beaucoup d'autres sites de suivi sont présent sur l'ensemble des Alpes italiennes (Portail Web PermaNET).

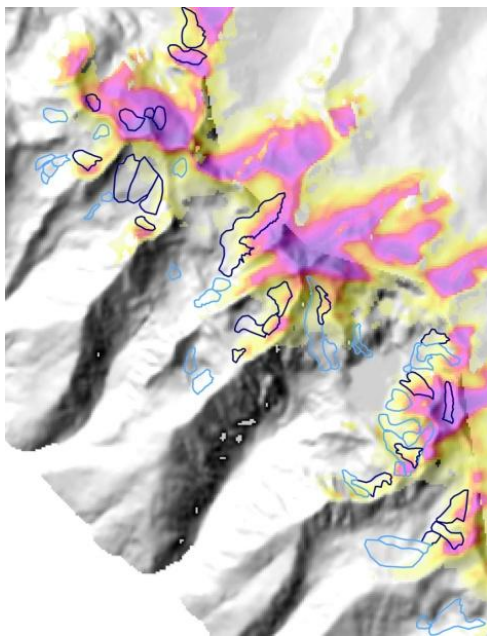
En **France**, un inventaire des glaciers rocheux a été effectué par Sébastien Monnier dans le massif de la Vanoise en 2006 (Monnier, 2006), ainsi que par Thomas Echelard dans le massif du Queyras en 2010.

Par ailleurs, des inventaires ont été lancés par le **service RTM** dans différents départements alpins. En effet, un inventaire des zones de permafrost a été effectué en Haute-Savoie en 2008 (Garcia, 2008), dans le but d'identifier les zones de risques liés à la dégradation. Dans les Hautes-Alpes, une étude a été menée précédemment par le service RTM en 2010 pour étudier les formes périglaciaires dans les bassins versants du Chardonnet, du torrent de la Moulette, du torrent de la Biaune et du vallon de Buffère. Ceci dans une optique de prévision des risques associés à ces formes géomorphologiques (Bonnetain, 2010). Ceci a été poursuivi par un inventaire dans les Hautes-Alpes en 2011 qui affine la méthode utilisée par Bonnetain en 2010, il couvre tout le département en reprenant le massif du Queyras déjà étudié par Thomas Echelard en 2010. Faisant suite, l'inventaire dans les Alpes-de-Haute-Provence a été effectué en 2012, puis en 2013, ce même service focalise son inventaire sur le département des Alpes-Maritimes. L'inventaire du département de l'Isère est en cours de réalisation (2014).

Le réseau **PermaFRANCE** suit 5 glaciers rocheux dans les Alpes françaises (Mair et al., 2011), dont le glacier rocheux du Laurichard, situé dans le massif du Combeynot, disposant de la plus longue série de donnée en France (depuis 1986) et la deuxième plus longue des Alpes, après le glacier rocheux de Hinteres Langtal en Autriche. Il est étudié afin de comprendre les réponses au changement climatique, par des mesures géodésiques (Bodin et al., 2009) ainsi que des photographies permettant de mesurer les déplacements. Par ailleurs, les mouvements du glacier rocheux du Dérochoir, dans le massif du mont Blanc, sont aussi étudiés (Bodin et al., 2013), ainsi que les glaciers rocheux du Bérard, en Ubaye, la Casse des Clausins et le Foréant, dans le Queyras.

Ces études, répondent aux objectifs du réseau **PermaNET**, en complétant d'une part les connaissances sur la distribution des glaciers rocheux et du permafrost par les inventaires, permettant de constituer une carte du permafrost dans les Alpes (couche APIM). D'autre part, en établissant un réseau de suivi coordonné et un état des lieux des risques liés au permafrost sur l'ensemble de l'arc alpin, depuis l'Autriche jusqu'à la France, en passant par l'Italie et la Suisse. Les sites de suivi du pergélisol sont homogènes sur les Alpes, si ce n'est dans le Sud des Alpes françaises où ils sont moins présents. C'est pourquoi cette étude porte en partie sur les Alpes du Sud.

### 2.1.3. Comparaison entre inventaires et distribution du permafrost dans les Alpes



**Figure 9: Comparaison entre la distribution des glaciers rocheux et l'indice de probabilité de permafrost dans la région de la Haute Tinée (Alpes-Maritimes)**

Cette étude permet de compléter la connaissance sur la distribution du permafrost dans les Alpes (réseau PermaNET) en identifiant la répartition des glaciers rocheux dans la partie Sud des Alpes françaises.

Cette cartographie est comparée avec la carte de répartition du permafrost (couche APIM : Alpine Permafrost Index Map), calibrée à partir des inventaires des glaciers rocheux pour les zones de formations superficielles et des mesures de température de la roche pour les zones de parois ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) (Boeckli et al., 2012). Elle présente un indice de permafrost, qui exprime la probabilité de rencontrer du permafrost, selon une clé d'interprétation qui tient compte du contexte géomorphologique et végétal.

Plusieurs problèmes se posent quant à la cohérence entre la couche APIM et la distribution des glaciers rocheux dans les Alpes du Sud (fig.9). D'une part, cette couche est calibrée sur l'ensemble de l'arc alpin, s'arrêtant en France dans le massif du Combeynot au Sud, le manque de données ne permettant pas de calibrer la couche dans les Alpes du Sud. D'autre part, un problème de géoréférencement, de projection ou MNT utilisé (Aster DEM), donne une sous estimation de la présence de permafrost sur les versants orientés au Sud et une surestimation sur les versants Nord, comme il est visible sur la figure 7, les vallons étant orientés généralement au Sud-ouest. Partant de ce constat, il semble important de corriger le décalage par un meilleur géoréférencement, ou recalculer l'indice avec un MNT correct.



## 2.2. L'Inventaire National des Glaciers (Argentine)

### 2.2.1. Objectifs

L'Argentine, notamment dans la partie centrale, est un territoire plus désertique et aride que les Alpes, et la cordillère des Andes a la principale caractéristique d'être un territoire plus vaste que l'arc alpin, impliquant un éloignement des risques liés à la montagne, et notamment ceux liés à la dégradation du permafrost, des enjeux anthropiques. Partant de ce constat, l'inventaire des glaciers dans les Andes argentines est réalisé suivant des objectifs bien différents de ceux étant à la source des inventaires et du suivi du permafrost dans les Alpes. Il est possible de résumer que l'objectif principal dans les Andes est de représenter la distribution des formes contenant de la glace afin d'étudier la part d'eau provenant de ces formes dans les cours d'eau andins, ainsi que de prendre connaissance des réserves d'eau potable qui sont présentes. Ceci présente un enjeu différent de celui des Alpes, porté sur les risques, ce territoire étant plus peuplé et moins vaste.

Cependant, il ne faut pas négliger que les problématiques liées au changement climatique s'appliquent au territoire andin aussi bien qu'au territoire alpin, cet inventaire national des glaciers cherche donc aussi à répondre aux enjeux liés au climat, qui sont semblables à ceux rencontrés dans les Alpes.

Pour répondre à cela, l'inventaire national des glaciers a pour objectif d'identifier, de caractériser et de faire le suivi de toutes les formes visibles de la cryosphère dans les Andes argentines, qui sont vues comme des réserves hydrologique stratégiques. D'après Bottero (2002) « Cette information (donnée par les inventaires des glaciers) est essentielle pour les planifications futures concernant les réserves régionales en eau, particulièrement en cette période d'importants changements climatiques, liés aux activités humaines sur terre. » Pour répondre à cette problématique, la **Loi 26.639**, sur la protection des milieux glaciaires et périglaciaires, est promulguée en octobre 2010, pour mettre en avant l'importance de ces milieux, leur préservation des activités humaines et assurer un suivi afin d'estimer l'évolution des réserves en eau. Cet inventaire comprend les glaciers blancs et couverts, les glaciers rocheux (actifs et inactifs), ainsi que les névés. Il permet d'identifier les facteurs environnementaux qui contrôlent la formation de ces formes, leur présence et leur évolution.

Il s'agit, à terme, de représenter la part de volume d'eau potable provenant de la fonte de ces entités de glace, en établissant un système d'observation qui permettra de voir l'influence du climat sur cette ressource, et donner la possibilité aux organisations provinciales et nationales de définir des stratégies politiques.

L'article 1 de la Loi de 2010 fait mention des objectifs de l'inventaire national des glaciers, mettant en avant la nécessité de préserver les réserves stratégiques en eau, pour la consommation et l'agriculture, présentes sous forme de glace. L'article 2 donne des définitions des glaciers afin de les reconnaître et de les cartographier. L'article 3 porte sur l'inventaire en lui-même et la constitution d'une base de données pour établir la protection de ces milieux.

En 2011, les objectifs de la loi 26.639 sont repris et détaillés dans les articles 4 et 5 (Annexe 1), la trame principale de ces objectifs est décrite ci-dessous :

- Mettre en place une méthodologie pour une cartographie et un suivi efficace de ces milieux ainsi que détailler les corps de glaces dans les différentes régions d'Argentine.
- Donner les moyens humains pour effectuer cet inventaire et assurer sa continuité au long terme.
- Faire en sorte que l'inventaire aide à préserver et à utiliser de manière adéquate les ressources en eau liées aux glaciers et aux formes périglaciaires.
- Organiser une base de données solide et la diffusion des données au public.
- Etablir un suivi de formes représentatives, soigneusement sélectionnées et déterminer les principaux facteurs climatiques qui contrôlent les ressources en eau présentes dans ces formes.
- Se servir de ces informations pour donner des outils nécessaires à la protection de ces ressources et développer la recherche universitaire.
- Etudier l'impact des activités humaines sur les ressources hydriques.
- Donner un libre accès aux données pour la sensibilisation des organisations privées et publiques aux ressources en eau, des universités et du public en général.

Les articles de la loi suivants font mention des activités interdites dans ces milieux (rejet de polluants, construction d'infrastructures, exploitation minière...) ainsi que de l'étude d'impact et précise les sanctions qu'implique le non-respect de ces interdictions.

Cet inventaire est réalisé par le laboratoire IANIGLA, dans les Andes désertiques, Centrales et la Patagonie, ainsi que le CADIC (Centro Austral de Investigaciones Científicas) qui s'occupe de l'inventaire à partir de la province de Santa Cruz jusqu'à la péninsule Antarctique. Ces deux instituts sont des unités du CONICET.

A partir de ces objectifs, la **problématique** à laquelle l'inventaire cherche à répondre se présente en trois questions principales :

- Combien y a-t-il de formes répertoriées et quelle est leur superficie ?
- Quelles ont été leurs réponses face au changement climatique ces dernières années ?
- Quels paramètres physiques contrôlent le comportement de ces formes dans les différentes régions ? Quel volume d'eau contiennent-ils, comment réagissent-ils aux conditions climatiques actuelles et quels scénarii futurs peuvent être déduits ?

Afin de répondre à ces questions, différents outils et stratégies sont développés par le laboratoire IANIGLA :

- Cartographie, utilisation de MNT et images satellites pour la cartographie, délimitation des bassins versants.
- Déterminer les différences de surface dans le temps, de vitesse de déplacement, consultation des sources historiques, étude des images satellite à différentes périodes ainsi que les contrôles et mesures de terrain.
- Estimation du volume de glace, étude dynamique, rhéologie, mesures géophysiques pour étudier la structure interne des formes, installation de stations nivo-météorologiques, photo des formes, mesures DGPS, radar de pénétration du sol.

### 2.2.2. Historique des recherches sur les glaciers rocheux en Argentine

Les glaciers rocheux des Andes Centrales ont commencé à être étudiés en détail en 1973, suite à la création du laboratoire IANIGLA à Mendoza. L'état actuel des systèmes cryogéniques a été étudié principalement dans les Andes Centrales, en surveillant la couche active du pergélisol et les glaciers rocheux, et utilisant l'analyse thermique des différentes méthodes géophysiques et des forages. Plusieurs sites sont suivis activement par le groupe de géocryologie du laboratoire IANIGLA depuis les années 1980.

Les principaux sites étudiés sont la Lagunita del Plata, dans le Cordon del Plata, notamment par des mesures de déplacement, sur le glacier rocheux de Morenas Coloradas et de El Salto (Trombotto et al., 1997 ; Trombotto et al., 2009), la Laguna del Diamante (Trombotto et al., 2010) et le Volcan Peteroa (Trombotto et al., 2009). D'autres études ont fait suite dans la province de San Juan (Arenson et al. 2010). Depuis l'an 2000, l'unité de Géocryologie du IANIGLA a établi un suivi de la couche active du glacier rocheux Morenas Coloradas, pour compléter le réseau de suivi du Système Mondial d'Observation du Climat (GCOS).

Dans la province de Mendoza, une relation a été mise en évidence entre l'écoulement des cours d'eau dans les bassins versants où de nombreux glaciers rocheux sont présents, et les différences de température du sol et de l'air. Ceci donne la possibilité de prévoir le comportement de ces bassins versant en lien avec le climat et de faire des pronostics pour le futur (Trombotto et al., 1999, 2009 ; Buk, 2002). En effet, les glaciers rocheux du Cordon del Plata ont commencé à être étudiés pour leur intérêt hydrologique (Buk, 1983). Des mesures géophysiques ont été démarrées sur les glacier rocheux de Morenas Coloradas et El Salto en 1989 pour détecter du permafrost et mesurer l'épaisseur des glaciers rocheux (Barsch et al., 1989).

Plus récemment, un premier inventaire a été réalisé dans la région de San Juan, dans les Andes Centrales (à 30°S), comptant 135 glaciers rocheux (dont 88 actifs) et couvrant une surface de 9,66 km<sup>2</sup> (Angillieri, 2009), ainsi qu'un inventaire des formes périglaciaires, entre les provinces de San Juan et La Rioja (28°S) (Perucca et al., 2008). Certaines des formes inventoriées sont étudiées plus en détail, comme les glaciers rocheux Barrancas et Vicuna. Par ailleurs, un inventaire a été réalisé dans la Valles Calchaquies, dans région de Salta, dans les Andes désertiques, à 25°S (Falaschi et al., 2014) à l'aide d'images satellites ALOS, disponibles par le partenariat avec le JAXA, au Japon. Cet inventaire a permis de recenser 488 glaciers rocheux dont 66 fossiles, couvrant une surface de 59 km<sup>2</sup>, à une altitude moyenne de 5000-5200 mètres.

### 2.3. Comparaison des méthodes d'inventaire

Le recensement, la localisation et la cartographie des glaciers rocheux dans les Hautes-Alpes ont débuté en 2010, (ils sont à ce jour achevés), puis ont été poursuivis en 2012 dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (en cours de validation) et dans les Alpes-Maritimes en 2013 (en cours d'achèvement). Ces inventaires ont été réalisés avec la même méthodologie, basée sur l'étude de photos aériennes par stéréoscopie et le recours à la photo-interprétation, avec vérifications sur le terrain pour les cas douteux. L'inventaire national des glaciers, en Argentine, suit une méthode similaire avec analyse d'images satellites, cartographie sur Qgis et des contrôles et photos sur le terrain.

### 2.3.1. L'inventaire dans les Alpes du Sud

#### 2.3.1.1. Outils utilisés pour la cartographie des Alpes du Sud

Les **vues aériennes**, numérotées par dalles sur des cartes IGN, sont étudiées par stéréoscopie, permettant de distinguer le relief et facilitant la visualisation des formes caractéristiques des glaciers rocheux ou les zones propices à leur présence. Les glaciers rocheux peuvent être alors délimités depuis les zones plus visibles (front où le relief est plus accentué) jusqu'à la racine, moins visible. Cependant, la campagne de données des vues aériennes empêche parfois d'avoir de bonnes visions de certains glaciers rocheux, ceux-ci étant parfois visibles sur le bord de l'image, rendant la vision en stéréoscopie difficile par la comparaison de deux vues aériennes.

Les **cartes topographiques** de l'Institut Géographique National (IGN) sont un outil important pour situer les glaciers rocheux. En effet, les courbes de niveaux permettent de situer les limites latérales et frontales, ainsi que la racine de la forme. On peut constater une diminution de la pente et donc une convexité des courbes de niveau vers l'aval là où est implanté un glacier rocheux. Les éboulis sont aussi visibles et permettent de situer ces zones, où les glaciers rocheux sont généralement implantés.

Sur les vues aériennes, la racine peut être localisée par rapport au début des bourrelets visibles sur le glacier rocheux. Ceci est une première approche pour l'inventaire, plus rapide et plus simple que les prospections sur le terrain car les zones de présence de ces glaciers rocheux sont souvent difficiles d'accès. Cette méthode permet par ailleurs de les cartographier en ayant une vision plus globale et plus exhaustive. Cependant, il faut tenir compte de la présence de la neige qui peut fausser l'interprétation, rendant la vue aérienne inutilisable.

Les **cartes géologiques** sont aussi un outil intéressant pour repérer et cartographier les glaciers rocheux. Sur la plupart des cartes, ces glaciers sont délimités par une nomination spéciale (EG) sur fond vert clair, il est même précisé sur certaines cartes si ces glaciers sont récents (z) ou anciens (y), ce qui est une information intéressante pour différencier un glacier rocheux fossile ou non fossile (fig.10).

L'inconvénient de ces cartes est la localisation peu précise de ces formes géomorphologiques et qu'elles ne présentent pas tous les glaciers rocheux. C'est pour cela que l'on ne peut pas baser l'inventaire sur leur simple étude, mais elles constituent un complément pour l'inventaire et permettent parfois de répondre à certains doutes lorsque le glacier rocheux n'est pas clairement identifiable sur carte IGN ou vue aérienne. En effet, même avec la stéréoscopie, certaines formes peuvent être confondues avec des éboulis.



Figure 10: Type de carte Géologique utilisée pour l'inventaire

### 2.3.1.2. *Données SIG et base de données*

La cartographie des trois différents inventaires est réalisée à l'aide du logiciel ArcGis, les corps et les fronts des glaciers rocheux ont été digitalisés à partir d'**orthophotographies** de l'IGN des années 1999, 2004 et 2009.

Suite à la digitalisation des formes, les tables d'attributs sont remplies pour les fronts et corps des glaciers rocheux. Des critères morphologiques (longueur, largeur, surface) et topoclimatiques (pente, altitude minimum, maximum et moyenne) sont renseignés. L'activité, définie par les glaciers rocheux actifs (présentant des mouvements), inactifs (contenant de la glace mais ne se déplaçant plus) et fossiles (sans glace) est vérifiée par l'étude de la morphologie des formes et des contrôles sur le terrain quand ceux-ci sont nécessaires.

L'activité est un des attributs les plus importants, les glaciers rocheux actifs sont identifiables par la pente du front généralement supérieure à 35°-40°, la présence de bourrelets et de rides attestant du mouvement plastique du glacier rocheux par la présence abondante de glace à l'intérieur. Les glaciers rocheux inactifs ne présentent plus de mouvements suite à une fonte de la glace, leur front est moins haut et moins raide que ceux des glaciers rocheux actifs. La surface des glaciers rocheux fossiles est plus atténuée, présente moins de formes et des dépressions apparaissent souvent suite à la fonte des noyaux de glace interstitielle. Leur répartition altitudinale est moins élevée, atteignant souvent la limite de la forêt, ils peuvent être recouverts de végétation arborescente.

Le rassemblement des données a été effectué sur QGis 2.2, logiciel sur lequel une couche rassemblant les inventaires des trois départements a été réalisée et couplée avec le modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes à 25 mètres de résolution (BDalti IGN). Les inventaires ayant été réalisés dans des systèmes de projection différents, il a fallu reprojeter afin d'avoir une projection commune, Lambert 93, et les superposer au MNT.

A partir de ce MNT, les valeurs de pente, de rayonnement solaire et d'exposition sont calculées, grâce à l'outil « Raster/Analyse de terrain » de QGis. Les MNT obtenus ont ensuite permis de compléter les champs de la table attributaire des corps des glaciers rocheux qui étaient incomplets ou absents, telles que la valeur de la pente, les coordonnées du centroïde de chaque glacier rocheux, le périmètre, le rayonnement solaire et l'orientation, constituant une base solide pour effectuer les analyses statistiques. Les valeurs pour chaque glacier rocheux sont obtenues grâce à l'outil de SAGA « Grid statistics for polygons » dans la boîte à outil de QGis 2.2.

Suite à l'uniformisation des résultats, la cartographie a pu être partiellement vérifiée avec l'utilisation de l'image satellite « Bing layer », utilisée comme fond de carte, affichable par l'extension « Open Layer Plugin » de QGis. Cette image satellite permet d'avoir de meilleures images que les orthophotos utilisées dans les inventaires, d'autant plus que la neige est très peu présente. Le fond de carte permet d'avoir une approche complémentaire à celle des inventaires réalisés à partir des orthophotos, ces dernières n'étant pas toujours de bonne qualité (notamment celles de 1999) et certaines zones étant recouvertes de neige (sur les orthophotos de 2004 et 2009).

Dans cet inventaire, lorsque différentes formes ont été identifiées dans un même corps de glacier rocheux, elles sont différenciées (lorsque cela était possible), notamment pour visualiser les différents degrés d'activité présents dans un même complexe, donnant une vision de la distribution de la glace.

Afin d'effectuer les analyses statistiques, seuls les champs de l'orientation, les coordonnées géographiques, l'activité, la pente, l'attitude (min, max et moyenne), la surface et le rayonnement solaire sont gardées (tab.1).

**Tableau 1: Détail de la table attributaire de l'inventaire des glaciers rocheux**

Nom de l'attribut	Détails de l'attribut	Commentaires/Unités
ID	Numéro du glacier rocheux	
Activité	Activité du glacier rocheux	A: Actif ; I: Inactif ; F: Fossile
Rev_activité	Révision de l'activité de certains glaciers rocheux	Commentaire sur l'activité quand cela est nécessaire
longueur	Longueur maximale du glacier rocheux, de la racine au front	Unité en mètre (précision à 5 m)
largeur	Largeur maximale perpendiculaire à la longueur	Unité en mètre (précision à 5 m)
DEPARTEMENT	Département où le glacier rocheux est cartographié	
ALTI_MIN	Altitude du front du glacier rocheux	Valeur de pixel la moins élevée
ALTI_MAX	Altitude de la racine du glacier rocheux	Valeur de pixel la plus élevée
ALTI_MOY	Altitude moyenne du glacier rocheux	Valeur moyenne des pixels du glacier rocheux
Orientation	Orientation principale du glacier rocheux	8 valeurs: N, NE, E, SE, S, SO, O, NO
PSIR	Rayonnement solaire moyen	valeur en kw/h, moyenne sur les 4 mois estivaux
Pente	Pente du glacier rocheux	Degrés
AREA	Surface du glacier rocheux	km <sup>2</sup>
PERIMETER	Périmètre du glacier rocheux	m



X	Coordonnée Est du centroïde du glacier rocheux	en Lambert 93
Y	Coordonnée Nord du centroïde du glacier rocheux	en Lambert 93
Déplacements	Classes de déplacements détectées par les interférogrammes	de quelques cm/jour à quelques cm/an

### 2.3.2. L'Inventaire National des Glaciers

La stratégie de l'ING suit la norme internationale du WGMS (World Glacier Monitoring Service), son programme World Glacier Inventory (WGI), le Programme Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS; Racoviteanu et al. 2009) et les inventaires déjà réalisés dans les Andes argentines.

A ce jour, cet inventaire est en cours de réalisation, permettant d'établir une analyse de la méthode utilisée, mais limitant la possibilité d'étude des résultats, si ce n'est sur le bassin du Rio Mendoza et Tunuyan, dont une première version de l'inventaire est disponible.

#### 2.3.2.1. Fonds cartographiques utilisés

Les **MNT** ont été utilisés pour délimiter les bassins versants et sous-bassins, par la visualisation des courbes de niveau, ainsi que pour calculer les valeurs d'altitude, de pente, d'orientation et l'hyposométrie.

Afin d'identifier les sous-bassins de chaque région, le MNT SRTM V4.1 (de 2008), à 90m de résolution est utilisé. Ce MNT est basé sur l'interférométrie radar (Farr et al., 2007) et est très utilisé pour étudier les zones éloignées et difficile d'accès, et où les données sont faibles, voire inexistantes. Ceci permet de délimiter les bassins et de géoréférencer des images. Dans les zones sans données, le MNT GDEM2 (octobre 2011), provenant du satellite ASTER, est utilisé, c'est le premier MNT global à base d'images ASTER (15 mètres de résolution).

Dans les zones où de nombreux glaciers rocheux sont présents (Andes désertiques et Centrales), ainsi que pour différencier le mieux possibles les glaciers rocheux des glaciers couverts, des images PRISM et AVNIR du satellite ALOS et HRC du satellite CBERS 2B, développé par la NASA, de plus haute définition (2,5 mètres), des contrôles terrains ont aussi été effectués.

Les MNT permettent de détecter des paramètres morphologiques (pente, orientation...) qui sont utiles pour décrire la géomorphologie, permettant de différencier des formes difficiles à voir avec uniquement les images aériennes. Le système de référence national (POSGAR, WGS84) est utilisé comme base de géoréférencement sur tout le territoire, afin d'avoir des données corrélées.



## Digitalisation

Les bassins versants et les formes sont digitalisés sur les logiciels SAGA, puis Quantum Gis avec l'outil GRASS. Le programme Kosmo 2.01 est utilisé pour la digitalisation des glaciers rocheux. Les glaciers rocheux fossiles ne sont pas cartographiés et les formes sont digitalisées en ne prenant pas en compte le front, s'arrêtant au haut du talus (fig.11), car la glace y est absente.



Figure 11: Différence de méthode de cartographie des glaciers rocheux dans l'inventaire des Alpes et dans l'ING

Les variations planimétriques et les déplacements des glaciers rocheux sont étudiés à partir des images satellites (tab.2), avec l'appui de logiciels permettant une analyse comparative des images. Les valeurs de déplacements, sont aux alentours de quelques mètres par an. Ce paramètre est mis en relation avec la quantité de glace présente dans les glaciers rocheux et les conditions thermiques du permafrost. Ces résultats sont transmis à la communauté scientifique et au public en général avec l'objectif d'apporter des études complémentaires dans le futur.

Tableau 2: Liste des images utilisées pour l'inventaire, sur les différents secteurs

	Rio las Cuevas et Las Vacas		Rio Tupungato	
	Satellite-capteur	Dates	Satellite-capteur	Dates
<b>Géoréférencement</b>	LANDSAT 5 - TM (30m)	Février 2010 et Mars 2011	LANDSAT 5 - TM (30m)	Mars 2011
<b>Cartographie Bassins versants</b>	TERRA-ASTER (15 m)	Avril 2009 Mars 2010	TERRA-ASTER (15 m)	Mars 2010
<b>Différenciation glaciers rocheux et glaciers couverts</b>	ALOS-PRISM (2,5m)	Mars et Avril 2010	ALOS-PRISM (2,5m)	Mars et Avril 2010
<b>Délimitation glaciers rocheux</b>	CBERS 2B-HRC (2,5 m)	Avril 2009	CBERS 2B-HRC (2,5 m)	Avril 2009

	Arroyo Uspallata		Rios Blancos	
	Satellite-capteur	Dates	Satellite-capteur	Dates
<b>Géoréférencement</b>	LANDSAT 5 - TM (30m)	Février 2010 Mars 2011	LANDSAT 5 - TM (30m)	Février 2010 Mars 2011
<b>Cartographie Bassins versants</b>	TERRA-ASTER (15 m)	Avril 2009 Mars 2010	TERRA-ASTER (15 m)	Avril 2009 Mars-Avril 2010
<b>Différenciation glaciers rocheux et glaciers couverts</b>	ALOS-PRISM (2,5m)	Mars et Avril 2010	ALOS-PRISM (2,5m)	Mars 2010
<b>Délimitation glaciers rocheux</b>	CBERS 2B-HRC (2,5 m)	Avril 2009	CBERS 2B-HRC (2,5 m)	Avril 2009

### 2.3.2.2. Base de données

La base de données est construite sur le programme Kosmo et comprend les champs suivants (voir détail dans l'annexe 2):

- **ID\_Local** : Ce champ renseigne pour chaque glacier rocheux inventorié les coordonnées géographiques du centroïde du polygone de chaque forme, précisées en longitude Ouest et latitude Sud au 4<sup>ème</sup> décimal près.
- **Tipo\_geoforma** : Cette colonne décrit les différents types de forme inventoriées, glaciaires et périglaciaires, elles sont classées suivant cette nomenclature : GC (*glaciare cubierto* – glacier couvert), GD (*glaciare descubierta* – glacier blanc), GCGE (*Glaciare cubierto con glaciare de escombros* - Glacier couvert avec glacier rocheux) et GE (*glaciare de escombros* – glacier rocheux). Ces derniers sont séparés en deux catégories : GEA pour les actifs et GEI pour les inactifs, seules ces deux formes sont étudiés dans ce travail.
- **Forma** : Ce champ ne s'applique qu'aux formes autres que les glaciers rocheux et se divise en 10 catégories (voir annexe).
- **Origen\_GE** : Décrit l'origine de chaque glacier rocheux, classé sous 4 classes (0.incertaine, 1.cryogénique depuis des talus d'éboulis et des névés, 2.glaciogénique ou 3.les deux à la fois).
- **Act\_GE** : L'activité de chaque glacier rocheux est classée soit par 0.incertain, 1.actif (présentant un front d'une pente allant de 35 à 45°) ou 2.inactif, les glaciers rocheux fossiles ne sont pas pris en compte dans cet inventaire.
- **Forma\_GE** : La forme des glaciers rocheux est divisée en 5 types : 0.incertain, 1.en langue, 2. lobé, 3.spatule et 4.coalescent.
- **Area** : La surface des glaciers rocheux est indiquée en km<sup>2</sup>.
- **Comments** : La qualité des images, mais aussi les doutes concernant le type de forme ou l'activité est décrit dans ce champ.

## 2.4. Identification de l'activité - Vérifications de terrain

Un des critères important à prendre en compte dans un inventaire des glaciers rocheux est l'activité des formes. Cependant, cet aspect doit être défini précisément afin de savoir reconnaître ces activités, notamment entre glaciers rocheux actifs et inactifs. Ces critères sont décrits pour les deux inventaires, car similaires.

### 2.4.1. Identification de l'activité des glaciers rocheux

D'après Monnier (2006), les glaciers rocheux actifs se déplacent vers l'aval de la pente, les inactifs possèdent encore de la glace mais ne se déplacent plus. Les glaciers rocheux fossiles ne contiennent plus de glace et sont souvent recouverts de végétation, permettant parfois facilement leur classification à partir de la photo-interprétation. L'inactivité des glaciers rocheux peut naître d'une fonte de la glace, empêchant le fluage en aval, ou de la présence d'un obstacle, on peut donc discerner une cause climatique et une cause mécanique. L'activité des glaciers rocheux peut être en général difficile à visualiser sur orthophoto si ce n'est leur front plus ou moins haut et raide, ainsi que la forme bombée ou présentant des dépressions, visible par stéréoscopie.

Une liste des critères, établis précédemment par Scappoza (2008), permet d'avoir une idée sur l'activité d'un glacier rocheux :

Un glacier rocheux est **actif** si :

- le talus frontal est raide, sa pente entre 40 et 45°
- le relief est bombé, avec la présence de rides transversales et de sillons longitudinaux
- peu ou pas de lichens
- le front du glacier rocheux est composé de matériaux fins
- la température de l'eau de la source est inférieure à 2°C

Un glacier rocheux est **inactif** si :

- la pente du talus frontal est comprise entre 35 et 40°
- le relief est bombé, avec la présence de rides transversales et de sillons longitudinaux
- le front du glacier rocheux est composé de matériaux plus grossiers
- la température de l'eau de la source est inférieure à 2°C

Un glacier rocheux est **fossile** si :

- la pente du talus frontal est inférieure 35°
- la surface est marquée par des dépressions thermokarstiques
- la température de la source est supérieure à 2°C
- la couverture végétale est plus importante, présence de landes (petits arbustes)

Il est visible, par cette typologie, que l'analyse de terrain doit compléter l'analyse cartographique et des vues aériennes, afin de confirmer l'activité renseignée sur un glacier rocheux, complétant l'interprétation à partir des images satellites par une interprétation sur le terrain (tab.3). C'est pour cela que les visites terrains sont effectuées suite à la cartographie, pour répondre aux incertitudes sur la possibilité de déplacement de certains glaciers rocheux. Dans les Alpes, les mesures sur le terrain permettent donc de vérifier le statut des glaciers rocheux, par la mesure de la pente du front, mais aussi de la température de la source et de l'estimation de la stabilité du front. Cependant, il est important de signaler que certains glaciers rocheux actifs, formés dans des roches du type schistes par exemple, peuvent être classés comme fossiles car ne présentent pas forcément les critères décrits au dessus (front arrondi et peu pentu), il est donc important de prendre en compte la présence de végétation ou la stabilité des débris rocheux.

Tableau 3: Clé d'identification de l'activité des glaciers rocheux

Activité	Interprétation à partir d'images satellite		Interprétation sur le terrain	
	Forme générale	Front	Forme générale	Front
Actif	Forme bombée, sillon longitudinal, absence de lichen	Front haut et raide	Matériaux instables et plus fins, marques de fluage $T^{\circ}$ source $< 2^{\circ}\text{C}$	Pente de $40$ à $45^{\circ}$ , Front instable et plus haut
Inactif	Relief moins bombé, sillons moins marqués, présence de lichen	Front moins raide et moins haut	Matériaux plus stables et plus grossiers, $T^{\circ}$ source $< 2^{\circ}\text{C}$	Pente de $35$ à $40^{\circ}$ , Front moins haut et plus stable
Fossile	Présence de végétation, de dépressions, voire de thermokarstes, semblable à une moraine	Souvent recouvert de végétation, front peu visible	Végétation parfois arborée, herbacée Rides plus marquée en surface par le tassement, $T^{\circ}$ source $> 2^{\circ}\text{C}$	Pente $< 35^{\circ}$ , parfois difficile de voir le front, souvent recouvert de forêt

#### 2.4.2. Vérifications et mesures sur le terrain

Dans l'objectif de réaliser un inventaire le plus exhaustif possible et afin de répondre aux incertitudes concernant l'activité des glaciers rocheux, mais aussi sur le type de forme et la différenciation entre glaciers rocheux et glaciers couverts (notamment en Argentine), des contrôles de terrain sont effectués. Durant ces vérifications, des campagnes photographiques sont effectuées, afin de reconnaître les différentes formes et observer en détail la morphologie des formes inventoriées pour en déduire leur activité. Par ailleurs, des points GPS sont pris autour des formes, servant de référence pour avoir une délimitation plus précise, venant compléter celle de la cartographie, notamment quand les fonds cartographiques sont de mauvaise qualité. Enfin, une mesure de la pente du glacier rocheux ainsi qu'une estimation de la hauteur et



de la stabilité sont effectués afin de déduire une activité en tenant compte des critères détaillés ci-dessus. Une mesure de la température des sources en aval, permettant de savoir si de la glace est présente dans le glacier rocheux, ainsi qu'une estimation de la taille des matériaux au front peuvent aussi être effectuées.

Des mesures sur le terrain sont aussi effectuées sur certains glaciers rocheux représentatifs, étudiant la topographie, les déplacements, l'épaisseur et la structure interne des unités de glace (par des mesures géophysiques), afin d'estimer le volume de glace, et mettre ceci en relation avec leur dynamique interne et générale. Les résultats obtenus sur le terrain sont un apport précieux pour établir des projections futures à l'aide de modèles.

Ces mesures appliquées aux glaciers rocheux sont semblables dans les Andes et dans les Alpes françaises. En Argentine, un ou deux glaciers rocheux représentatifs et accessibles sont sélectionnés par bassin versant pour effectuer des mesures de déplacement dans le temps et étudier la structure interne de la forme, mis en lien avec le contexte climatique. Dans le cordon



**Figure 12: Mesures DGPS sur un glacier rocheux dans le Cordon del Plata, Mendoza, Argentine**

del Plata (Andes Centrales de Mendoza), des DGPS, utilisant un réseau de stations fixes de référence transmettant l'écart entre la position du satellite et la position réelle, sont utilisés pour mesurer les déplacements de surface sur les glaciers rocheux de Morenas Coloradas et El Salto (fig.12).

Des mesures géophysiques sont aussi effectuées pour étudier la structure interne des glaciers rocheux, renseignant sur la profondeur et l'épaisseur de glace, ces mesures sont effectuées sur des glaciers rocheux représentatifs afin de visualiser l'évolution du volume de glace mis en lien avec le changement climatique, notamment en Argentine où les glaciers rocheux constituent une partie des réserves d'eau dans les zones de haute montagne. Ces mesures permettent d'établir une balance entre l'altitude minimale

du permafrost discontinu et continu, avec les altitudes minimales où les glaciers rocheux fluent (altitude des fronts), comparé à l'altitude moyenne de l'isotherme 0°C.

L'intérêt de ces mesures, pour estimer les ressources en eau en Argentine, est d'étudier les variations de la structure cryogénique des glaciers rocheux causées par le changement climatique. Celles-ci ont une influence directe sur le volume de sédiments gelés et donc sur le régime hydrologique de toute la région, qui est à prendre en compte pour les futurs problèmes socio-économiques liés à ces ressources.

## 2.5. L'apport de l'interférométrie radar différentielle

L'analyse par interférométrie radar différentielle se base sur la différence de phase entre deux images satellites, permettant de détecter des mouvements de l'ordre de la fraction de longueur d'onde, visibles sur des interférogrammes. Dans cette étude, les résultats sont en partie repris de l'étude réalisée par Thomas Echelard sur l'ensemble des Alpes françaises (Echelard et al., 2013) et développant l'analyse des Alpes du Sud à partir des interférogrammes dérivés des archives satellitaires ERS 1 (European Remote Sensing). La résolution spatiale de ce satellite est de 25 mètres, une résolution permettant de voir les vitesses de déplacement à différents points d'un glacier rocheux quand ces derniers sont assez grands. Les formes d'une longueur inférieure à 300 mètres n'ont pas été prises en compte, le nombre de pixel définissant le glacier rocheux étant trop faible pour permettre une analyse pertinente.

L'acquisition des images satellite s'effectue en été, lorsque la couverture neigeuse est la plus basse (entre mi-juillet et mi-octobre). Les précipitations sont aussi à prendre en compte, le sol humide faussant le retour de l'onde émise par le satellite. Par ailleurs, la position différente du satellite entre les 2 acquisitions d'image (*Baseline*), doit être prise en compte, les *baselines* trop longues donnent des interférogrammes impossibles à analyser.

Afin d'être utilisables dans un inventaire, ces images brutes obtenues doivent être traitées en enlevant la différence orbitale entre les deux passages du satellite ainsi que la composante topographique (à l'aide d'un MNT), les distorsions atmosphériques (humidité, nébulosité) et le bruit doivent aussi être éliminés (Echelard et al., 2013).

Par ailleurs, l'angle de visée du satellite ERS est d'environ 23° (Echelard et al., 2013), donnant des distorsions géométriques, des zones d'ombre où les déplacements ne peuvent être détectés. Cette distorsion nécessite l'utilisation d'un MNT pour transformer les images obtenues en « géométrie sol », celles-ci sont ensuite analysées sur une SIG après avoir effectué une orthorectification et un géoréférencement.

Après le traitement, les interférogrammes géoréférencés et orthoréctifiés peuvent être analysés dans un SIG. Un masque permet de faire ressortir les zones utiles pour l'étude uniquement.

Suivant les **pas de temps** auxquels les déplacements des glaciers rocheux sont enregistrés (de 3 à 27 jours pour les Alpes du Sud), des classes de déplacement de l'ordre du centimètre par mois jusqu'à plusieurs centimètres par jours ont pu être détectés. Un glacier rocheux présentant des déplacements détectables sur un pas de temps de 9 jours se déplace plus rapidement qu'un glacier rocheux présentant des mouvements à partir de 15 jours.

Différentes informations sont visibles sur un interférogramme (fig.12) :

- Aucune variation de phase n'est visible (1), indiquant l'absence de déplacements.
- Une variation de phase avec frange d'interférence (2) montrant un déplacement qu'il sera possible d'estimer à l'aide de la valeur de demi-longueur d'onde et du pas de temps.
- Une variation de phase aléatoire (3) signifiant un mouvement trop rapide pour l'interférogramme, nécessitant de se reporter à un interférogramme au pas de temps supérieur.

Pour cette étude, seuls les glaciers rocheux orientés à l'Ouest ont pu être détectés, le satellite étant en phase descendante, les versants orientés à l'Est restent dans la zone d'ombre. Les images issues des passages ascendants ne sont pas interprétables.

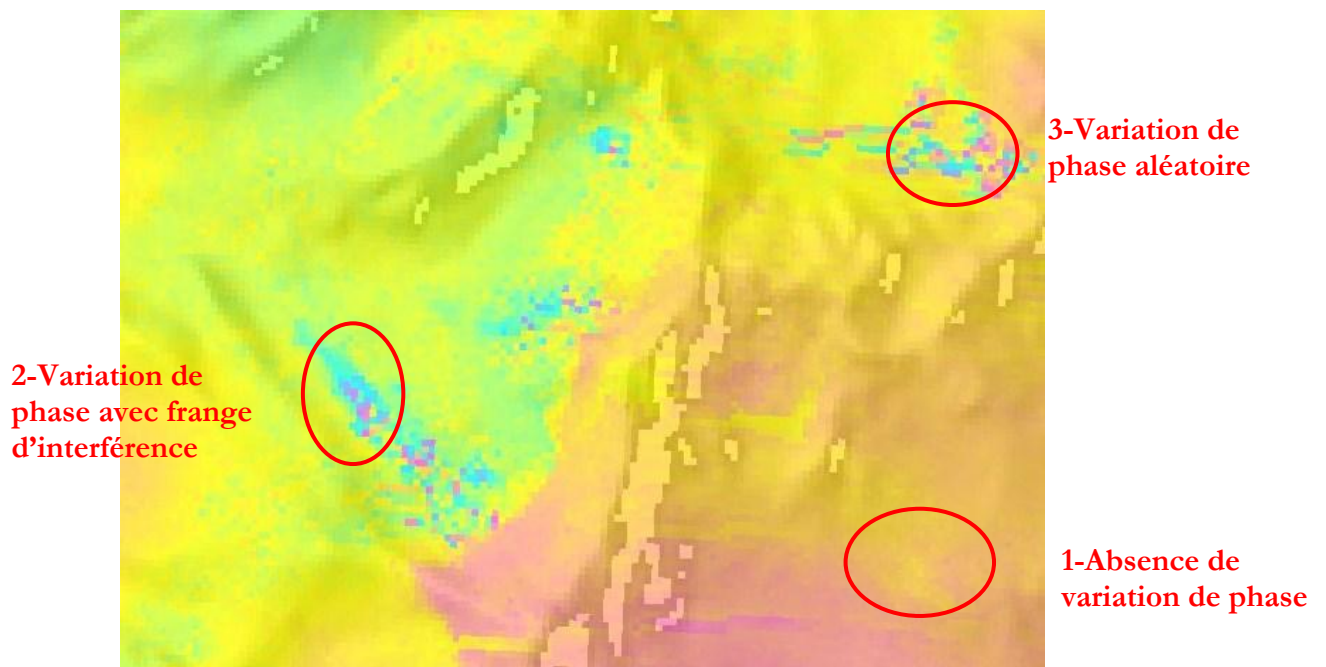


Figure 13: Interférogramme à 9 jours, sur lequel des mouvements sont visibles

Les images obtenues montrent des pixels de 25 mètres de résolution (résolution des images du satellite ERS) avec les valeurs de différence de phase entre les deux passages du satellite, issue d'un parcours de l'onde légèrement différent. Les interférogrammes, obtenus au départ en noir et blanc, sont affichés à l'aide d'une palette de couleur dans un SIG, permettant de mieux repérer les déplacements lors de l'analyse (fig.13). Les vitesses de déplacement sont centimétriques, allant du cm/jour, cm/semaine, cm/2 semaines, jusqu'au cm/mois.

Pour l'inventaire, cet outil est précieux puisqu'il permet de détecter les glaciers rocheux en mouvement qui n'ont pas été identifiés comme actifs lors de la réalisation de l'inventaire. De plus, il est possible d'estimer leur vitesse de déplacement et éventuellement de localiser les formes déstabilisées qui peuvent présenter des risques. Il est donc intéressant d'utiliser cet outil pour établir une cartographie des risques (qui est l'objectif du service RTM) ainsi que pour informer sur le contexte topographique et géographique de formation et de développement des formes les plus actives, apportant une information supplémentaire aux analyses statistiques détaillées dans la partie suivante.



### III. Résultats et discussion

Cette partie a pour objectif de présenter une analyse de la distribution des glaciers rocheux, afin de comprendre leur contexte de formation et d'évolution, et de faire une étude comparative entre les différentes régions des Alpes du Sud dans un premier temps, puis avec les Andes Centrales dans un deuxième temps (à partir des données disponibles).

#### 3.1. Analyses statistiques des Alpes du Sud

##### 3.1.1. Niveau général

Les trois inventaires réalisés dans les Alpes du Sud ont permis de recenser 1864 glaciers rocheux, couvrant une surface de 158,99 km<sup>2</sup>, dont 728 dans le département des Hautes-Alpes, 566 dans les Alpes-de-Haute-Provence et 570 dans les Alpes Maritimes. 325 (18%) sont considérés comme actifs, couvrant une surface de 19,96 km<sup>2</sup>, 451 (24%) comme inactifs sur 30,26 km<sup>2</sup> et les 1088 (58%) restants sont fossiles, représentant une surface de 108,77 km<sup>2</sup> (tab.4). La part de glaciers rocheux actifs décroît en allant vers la Sud, dans le massif du Mercantour (Alpes-Maritimes).

Les glaciers rocheux actifs et inactifs sont situés, pour la plupart, au dessus de 2200 mètres d'altitude, à une altitude moyenne de 2650 m. 51,5% d'entre eux sont orientés vers le Nord et le Nord-Ouest.

**Tableau 4: Distribution et surface des glaciers rocheux, par département et par bassins versants, pour chaque catégorie d'activité**

		Nombre de glaciers rocheux	Surface	Glaciers rocheux Actifs	surface	Glaciers rocheux Inactifs	surface	Glaciers rocheux Fossiles	surface
<b>Départements</b>	Hautes Alpes	728	80,19	177	12,39	181	15,13	370	52,67
	Alpes-de-Haute-Provence	566	37,35	110	5,57	116	6,64	340	25,14
	Alpes-Maritimes	570	41,44	38	2,00	154	8,49	378	30,95
<b>Bassins versants</b>	Tinée	334	26,66	36	1,96	111	6,65	186	18,05
	Ubaye	439	31,17	101	5,38	89	5,62	251	20,17
	Le Verdon	123	5,83	9	0,21	28	1,05	86	4,57
	Durance	678	76,00	163	11,53	165	14,35	348	50,12
	le Drac	50	4,15	14	0,84	13	0,64	23	2,67
	Var	45	3,93	0	0,00	11	0,70	34	3,23
	Vésubie-Tende	195	11,24	2	0,04	34	1,25	160	9,95
<b>Total</b>		1864	158,99	325	19,96	451	30,26	1088	108,77

L'élévation moyenne des glaciers rocheux actifs est de 2723 mètres dans les Alpes du Sud. En comparaison, cette altitude se rapproche plus de 2500-2550 mètres d'altitude dans les Alpes Italiennes (Guglielmin et al., 1998) et Autichiennes (Kellerer et al., 2012 ; Krainer et al., 2012). 2518 mètres correspond dans les Alpes du Sud à l'altitude moyenne des glaciers rocheux inactifs et 2335 mètres à celle des glaciers rocheux fossiles (fig.14).

Dans les Carpates, un inventaire des glaciers rocheux a permis de situer les glaciers rocheux actifs à une altitude avoisinant les 2100-2200 mètres, avec un isotherme 0°C à cette même altitude. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'un climat continental avec des moyennes de température plus basses.

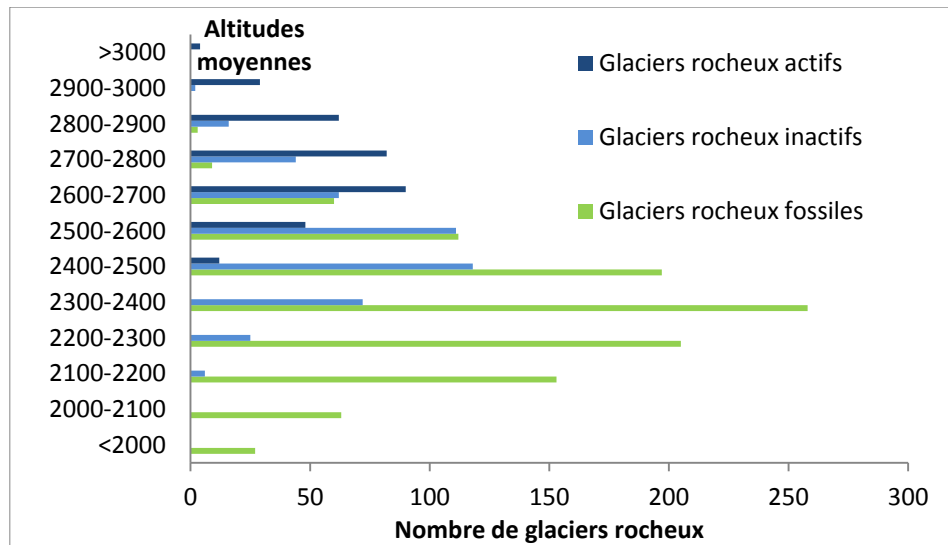


Figure 14: Distribution altitudinale des glaciers rocheux suivant leur activité

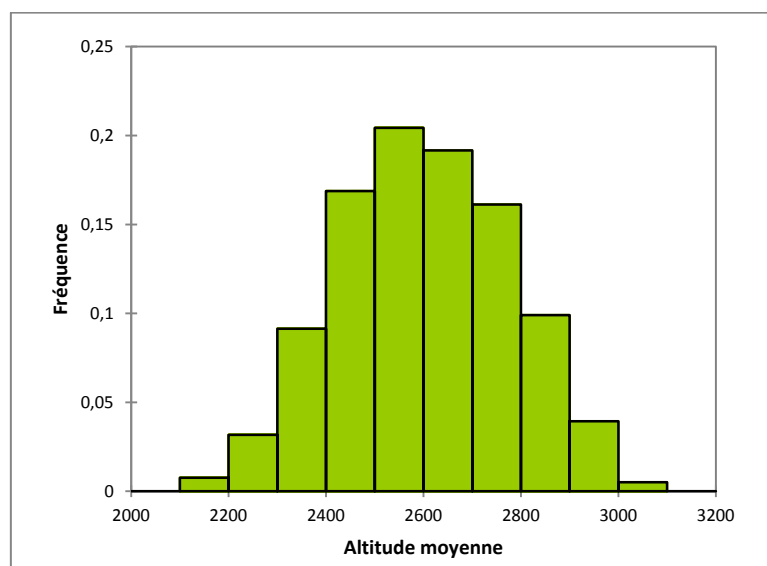


Figure 15: Diagramme de fréquence de l'altitude de l'ensemble des glaciers rocheux

La présence des glaciers rocheux à des altitudes plus élevées s'explique sûrement par la situation en plus basse latitude de la zone étudiée (entre 44° et 45°N), alors que les Alpes italiennes, dans la région du Cervin et du Mont Rose (zone comparée), ainsi que les Alpes autrichiennes se situent à des latitudes autour de 45,5° à 47,5°N. Par ailleurs, la faible part de glaciers blancs dans les Alpes du Sud entraîne le développement de glaciers rocheux à plus haute altitude dans cette région.

53% des glaciers rocheux ont une surface inférieure à 0,05 km<sup>2</sup>, presque aucun glacier rocheux actif et inactif n'a une surface supérieure à 0,3 km<sup>2</sup> (fig.16). La surface moyenne des glaciers rocheux actifs est de 0,04 km<sup>2</sup>, pour une surface de 0,05 et 0,8 respectivement pour les glaciers rocheux inactifs et fossiles.

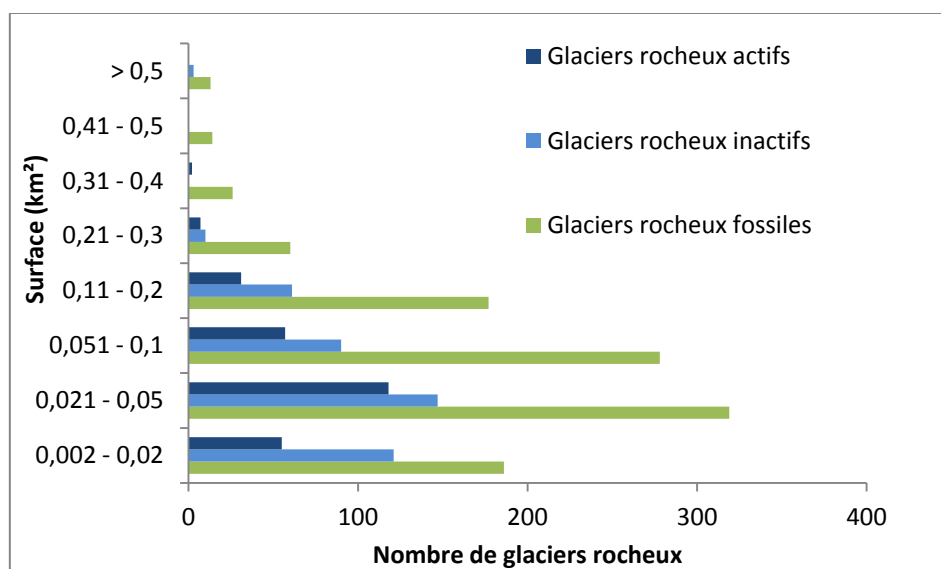


Figure 16: Distribution des glaciers rocheux par surface, pour chaque catégorie d'activité

La plupart des glaciers rocheux se développent dans une pente entre 20 et 29°, et la part des glaciers rocheux dans une pente inférieure à 10° et supérieure à 40° est presque inexistante. Ceci peut être interprété par la pente trop faible qui empêche le fluage et la déformation plastique permettant au glacier rocheux de se former. Par ailleurs, la pente trop forte empêche la cohésion des matériaux. Le graphique ci-dessous permet de constater que la pente optimale pour la formation des glaciers rocheux est entre 20 et 30° (fig.17). Cette limite de degré de pente peut aussi s'expliquer par la moyenne de pixel ne donnant pas de résultats trop faibles ou trop élevés alors que certaines zones peuvent avoir une pente inférieure à 10° ou supérieure à 40°. Afin de faire une comparaison et d'estimer la marge d'erreur des résultats obtenus par calcul du MNT, il est possible de considérer l'altitude maximale (racine du glacier rocheux) et minimale (haut du talus), mis en relation avec la longueur du glacier rocheux.

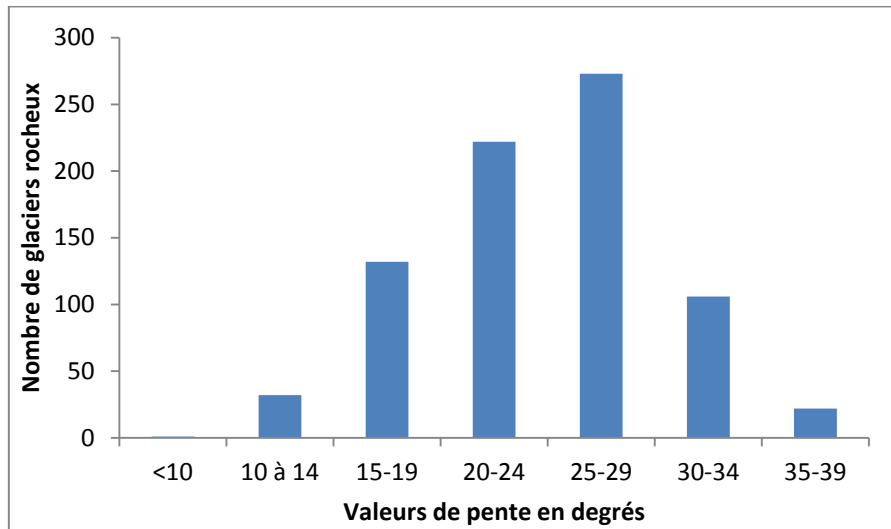


Figure 17: distribution des glaciers rocheux par rapport à la pente

*Statistiques de corrélation*

Concernant les statistiques de corrélation, les glaciers rocheux fossiles ne sont pas pris en compte dans certaines analyses. Ne contenant pas de glace, les variables conditionnant le développement des glaciers rocheux n’agissent pas sur ces formes, il est donc peu pertinent de les intégrer dans certaines analyses.

51,5% des glaciers rocheux sont orientés au Nord et au Nord-ouest. On peut remarquer une plus grande part de glaciers rocheux actifs orientés au Nord, ceux-ci sont très peu présents en versant Sud, contrairement aux inactifs (fig.18).

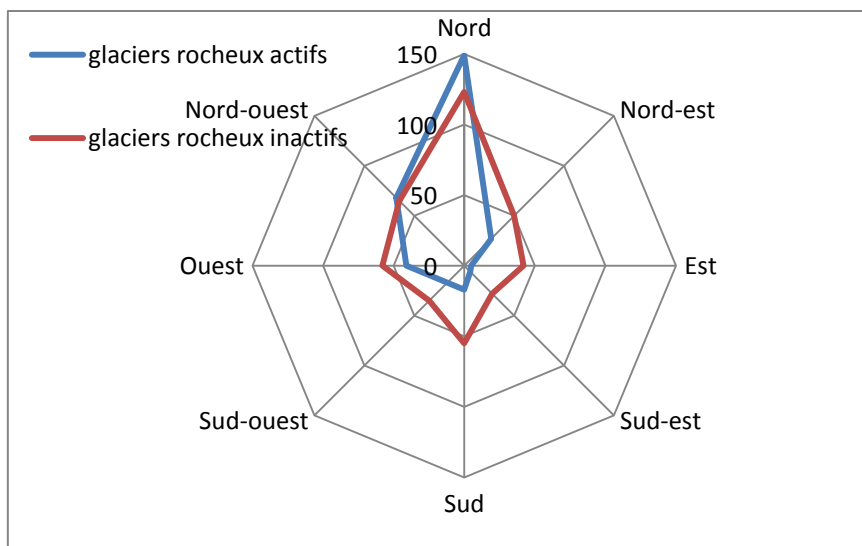


Figure 18: Orientation des glaciers rocheux actifs et inactifs

La figure 15 représente la distribution altitudinale des glaciers rocheux, du Nord au Sud. Contrairement à ce que l'on pourrait attendre, la tendance montre une légère hausse de l'altitude des glaciers rocheux en allant vers le Nord. Il faut néanmoins considérer que le massif du Mercantour est en général moins élevé que les autres massifs (aucun cirque ne se situe au dessus de 2800 mètres d'altitude) et le massif de l'Ubaye est légèrement plus élevé, comme il est expliqué plus en détail à la figure 17, expliquant cette répartition altitudinale. Cependant, cette distribution n'est pas représentative car la tranche latitudinale est trop faible, mais a l'avantage principal de faire ressortir les différents massifs (Cerces, Queyras, Ubaye, Mercantour) et la répartition altitudinale maximum et minimum pour chacun d'eux (fig.19).

Il serait intéressant de réaliser ce graphique avec plus de données, par exemple sur l'ensemble des Alpes françaises, voire sur tout l'arc alpin, pour se rendre compte de l'influence de la latitude sur l'altitude.

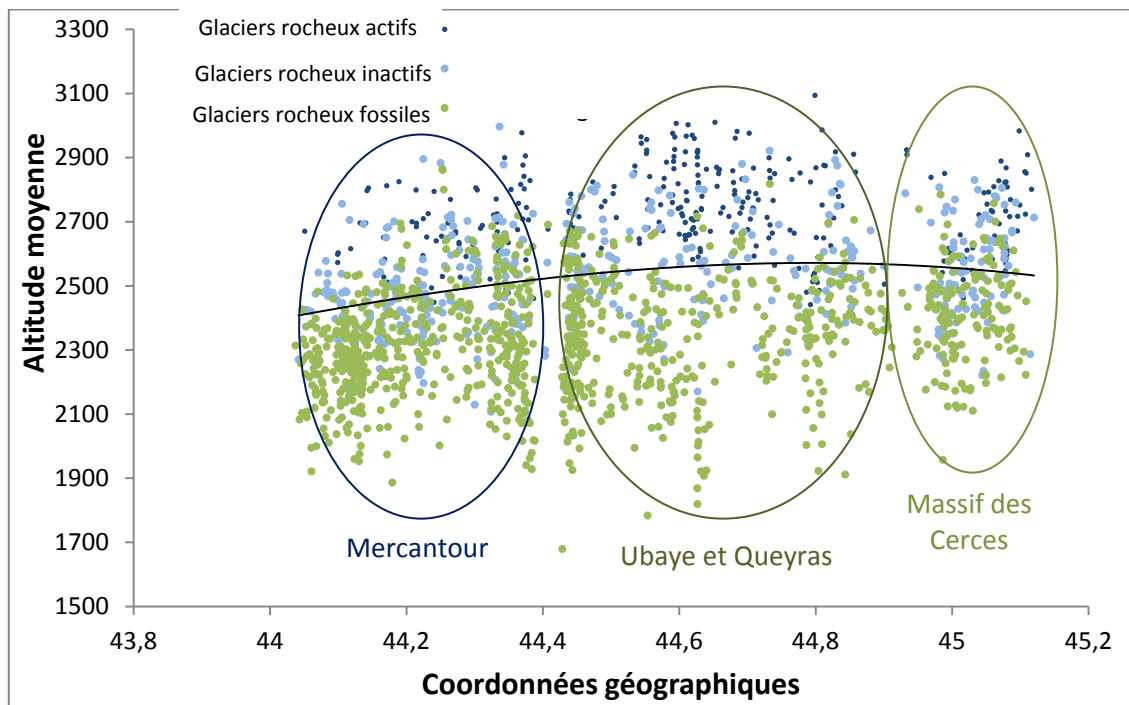


Figure 19: Distribution altitudinal des glaciers rocheux en fonction de la latitude



### 3.1.2. Statistiques régionales

Afin de discerner les différences climatiques aux différentes latitudes de la zone d'étude, trois bassins versants principaux (celui de la Durance au Nord, de l'Ubaye au centre et de la Tinée au Sud, dans le massif du Mercantour) ont été pris en compte, rassemblant la majorité des glaciers rocheux. Des analyses statistiques sont réalisées dans chacune de ces régions afin de visualiser plus clairement les éventuelles influences du climat.

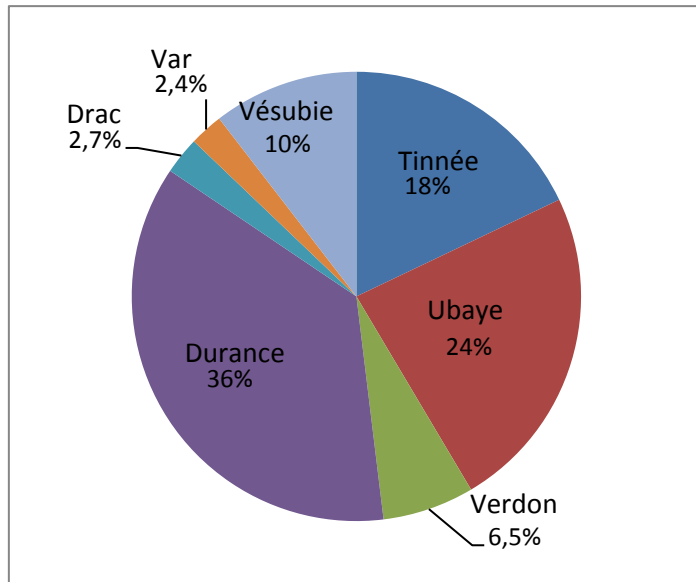


Figure 20: Distribution des glaciers rocheux par bassins versants

Le graphique ci-contre (fig.20) permet de visualiser le pourcentage de glaciers rocheux dans chaque bassin versant, faisant ressortir les trois bassins versants principaux qui ont été choisis pour les analyses statistiques.

Ils sont bien représentatifs car recourent toute la tranche latitudinale du Nord au Sud de la zone d'étude, étant localisés chacun dans un des trois départements de l'inventaire. Par ailleurs, ils présentent presque la totalité des glaciers rocheux actifs cartographiés.

Le bassin versant de la Durance, le plus au Nord, situé dans le département des Hautes-Alpes, présente plus d'un tiers de la totalité des glaciers rocheux inventoriés. Le bassin de la Vésubie compte une part significative des glaciers rocheux inventoriés, mais étant le bassin versant le plus au Sud de la zone d'étude, il ne présente presque aucun glacier rocheux actif et n'a donc pas été pris en compte dans l'analyse comparative.

Le graphique suivant (fig.21) montre la répartition altitudinale des glaciers rocheux par bassin versant, il vient compléter et confirmer ce qui a été vu dans la figure 15, notamment la distribution altitudinale moins élevée dans la Tinée, pouvant s'expliquer par la présence de sommets relativement moins hauts dans le Mercantour que dans les autres massifs (les sommets dans ce massifs dépassent rarement 3000 mètres, exceptés certains tel que le Mont Gélas, point culminant du massif). En effet, les glaciers rocheux ne sont présents au-delà de 2900 mètres d'altitude, alors que ceux-ci se développent jusqu'à plus de 3000 mètres dans les autres bassins versants, présents de nombreux sommets dépassant 3000 mètres d'altitude.

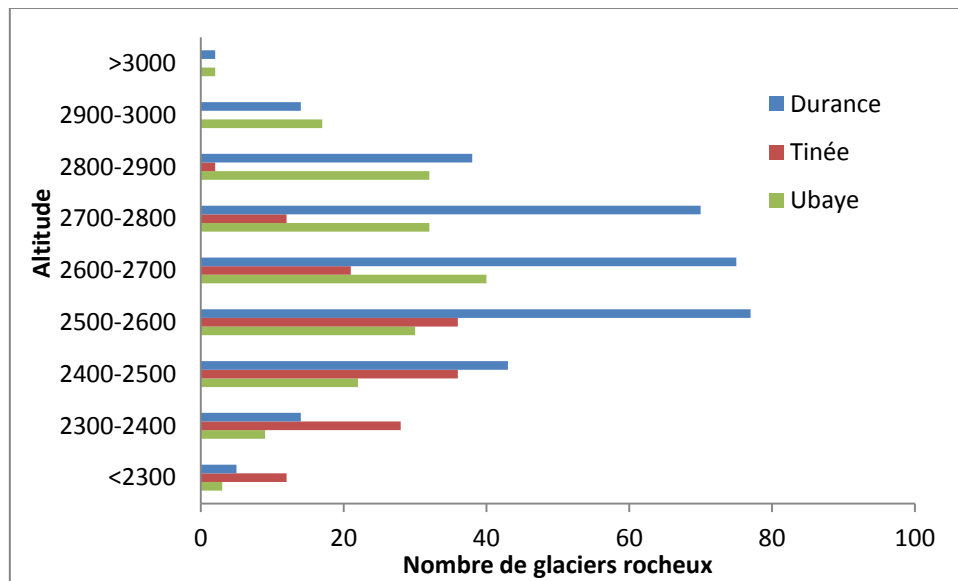


Figure 21: Répartition altitudinale des glaciers rocheux par bassins versants

L'analyse de la distribution selon l'activité des glaciers rocheux (fig.22) permet de remarquer que le nombre de formes actives devient faible comparé aux formes inactives et fossiles dans le bassin de la Tinée, contrairement aux deux autres bassins qui ont un nombre égal de glaciers rocheux actifs et inactifs. Ceci s'explique par la localisation du bassin de la Tinée au Sud de la zone d'étude, il est possible d'en conclure que la latitude influe sur l'activité des glaciers rocheux, mais pas sur la répartition altitudinale, qui elle sera influencée par l'altitude moyenne du massif, lorsque les glaciers blancs ne sont pas présents.

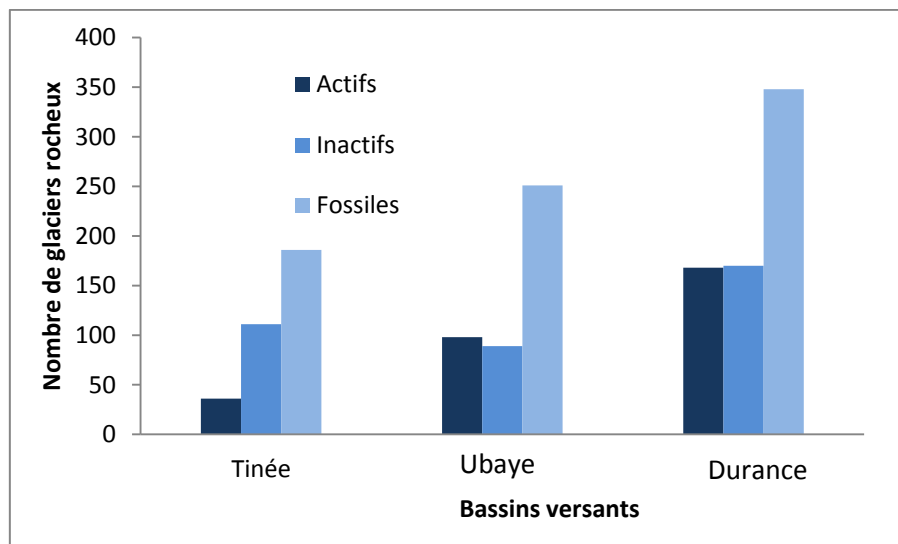


Figure 22: Distribution des glaciers rocheux par catégorie d'activité

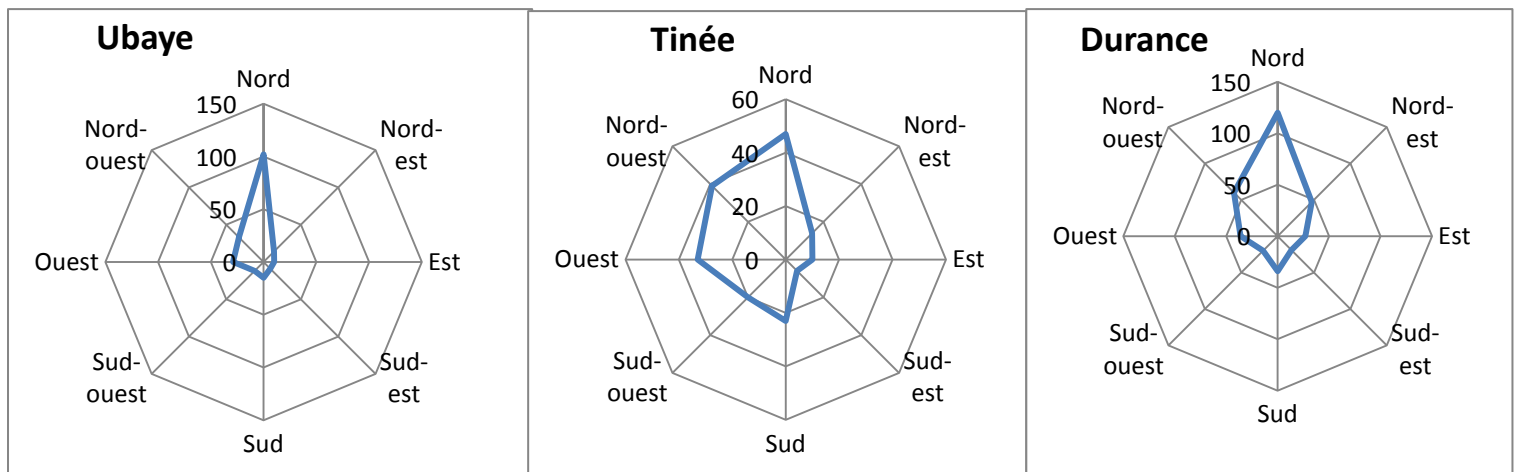


Figure 23: Orientation des glaciers rocheux actifs et inactifs par bassin versant

La représentation détaillée de l'exposition des glaciers rocheux par vallées (fig.23) permet de se rendre compte de l'orientation générale de celles-ci. En effet, si les glaciers rocheux ont une orientation semblable dans les vallées de la Durance et de l'Ubaye (la grande majorité orientée au Nord), l'orientation dans la vallée de la Tinée est quasiment équivalente à l'Ouest qu'au Nord, et très peu de formes sont orientées à l'Est car la plupart d'entre eux sont situés du côté italien. Le pourcentage plus élevé de glaciers rocheux orientés au Sud dans cette vallée peut être une des explications au nombre relativement plus faible de formes actives et inactives que dans l'Ubaye et la Durance.

## 3.2. Evolution des glaciers rocheux avec le changement climatique

### 3.2.1. Les risques dans les Alpes du Sud

Dans cette étude, l'approche des risques sera portée principalement sur les effets du changement climatique. Les rapports concernant les risques dans les différents départements étudiés font la liste de ceux-ci (Bouvet et al, 2011 ; Riguidel et al. 2012), ce travail ne reviendra donc pas dessus mais s'étendra à une question plus générale qui est celle de la déstabilisation des formes par la dégradation du permafrost tenant entre eux les matériaux rocheux.

De plus, mis à part quelques sites, l'inventaire réalisé par le service RTM n'a permis d'identifier que peu de risques, et les formes déstabilisées pouvant présenter des risques sont généralement situées loin des enjeux. Cependant, il est important de préciser qu'avec la hausse des températures enregistrée dans les Alpes, de plus en plus de glaciers rocheux actifs et inactifs pourront présenter des risques dans les décennies à venir. La montée en altitude de l'isotherme zéro et de la limite inférieure du permafrost implique la localisation de la plupart des glaciers rocheux sous cette limite.

C'est pour cela que cette étude s'oriente sur ce problème, en analysant les caractéristiques topo-climatiques des glaciers rocheux, leur pente, leur altitude, l'intensité du rayonnement solaire ou encore l'orientation, dans l'objectif de comprendre et d'essayer de prévoir quelles zones pourront être exposées aux risques dans le futur au vu des enjeux présents à proximité. Une étude de l'inventaire prenant en compte ces paramètres, ainsi que la localisation des glaciers rocheux par rapport aux infrastructures seraient intéressants pour faire ressortir les formes pouvant présenter des risques dans le futur, une fois que l'inventaire sera réalisé sur l'ensemble des Alpes françaises.

Le graphique ci-dessous (fig.24) a été obtenu à partir du MNT SRTM à 1 km de résolution, depuis le logiciel Qgis 2.2, la limite inférieure des altitudes a été fixée à 1500, sur la zone entre les trois départements étudiés, afin de limiter le nombre de pixels à traiter.

Il est possible de visualiser la tranche altitudinale où se situent les glaciers rocheux contenant de la glace (actifs et inactifs) pouvant être amenés à se dégrader, entre 2100 et 3000 mètres (48% de la surface totale). Il est important de prendre en considération la limite moyenne sur l'année de l'isotherme zéro. Celle-ci se situe aux alentours de 2560 m d'altitude dans la période 1961-1990 (Bodin et al., 2009), avec une augmentation enregistrée de 0,57°C par décennies dans les Alpes, cet isotherme monterait d'environ de 100m par décennies (le gradient altitudinal dans les Alpes est de -0,6°C tous les 100 mètres), amenant à une altitude aux alentours de 2850 mètres en 2020 dans les Alpes.

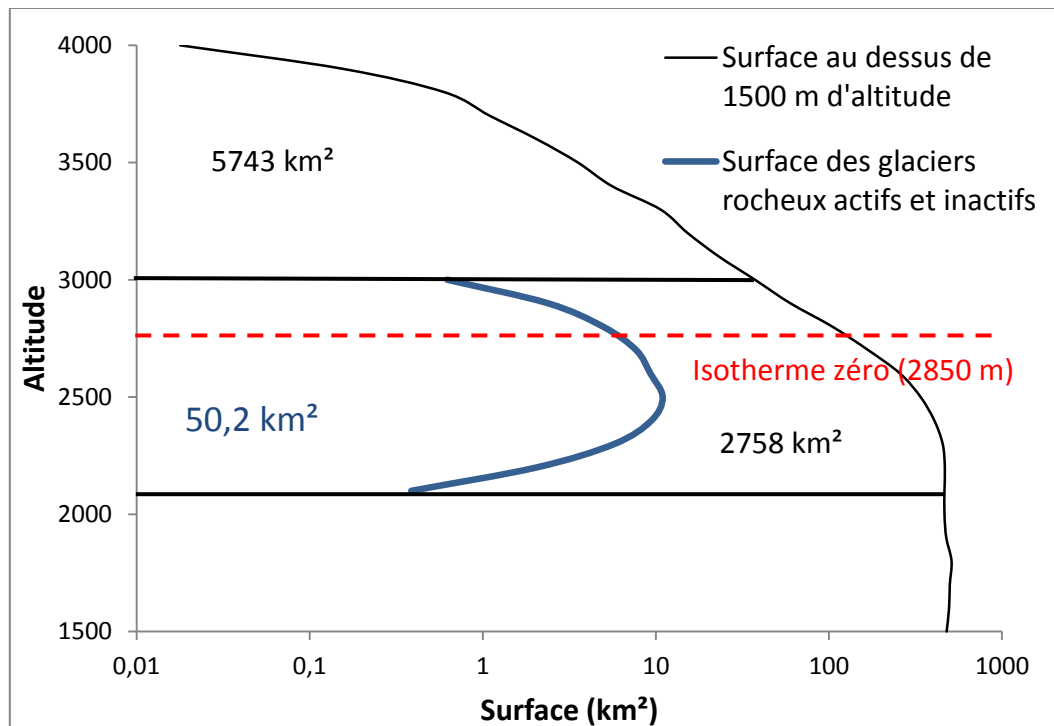


Figure 24: Surface des glaciers rocheux actifs et inactifs par rapport à la surface totale au dessus de 1500 m d'altitude

Pour une surface de 2758 km<sup>2</sup> entre 2100 et 3000 mètres d'altitude, 2% est composée de glaciers rocheux (50,2 km<sup>2</sup>) et seulement 5,4% de cette surface se situe au dessus de l'isotherme zéro (2,7 km<sup>2</sup>) si l'on retient que celui-ci se situe au alentour de 2850 mètres d'altitude en 2020. Pour une estimation effective, on peut noter que 27 glaciers rocheux ont leur front au dessus de l'isotherme 0°C, dont 5 inactifs, 185 ont leur racine au dessus de l'isotherme, dont 38 inactifs et 10 fossiles.

Les 95% de la surface des glaciers rocheux en dessous de l'isotherme sont susceptibles d'être déstabilisés dans les décennies à venir. Au vu de cette part significative, il semble important de vérifier la morphologie ainsi que le contexte topographique de ces glaciers rocheux et ainsi de voir les risques que ceux-ci peuvent présenter, en tenant compte des enjeux présents ou non à proximité.

Il est par ailleurs possible de considérer qu'avec la faible pente, la neige s'accumule plus facilement et a un impact sur le rayonnement solaire par l'albédo (au printemps et début de l'été) en plus de créer une couverture limitant la fonte de la glace en dessous (Lütschg et al. 2004). L'inclinaison de la pente, ainsi que la structure géologique, les conditions de formation du permafrost ainsi que la topographie sont les facteurs principaux à prendre en compte pour identifier les glaciers rocheux les plus sensibles au changement climatique (Fischer et al. 2006).



### 3.2.2. Les risques dans les Andes Centrales

Dans les Andes Centrales (33°S), la limite inférieure du permafrost continu se situe à 4500 mètres et la limite du permafrost discontinu est entre 3700 et 3800 mètres d'altitude en 1999 (Trombotto et al., 1997,1999). L'isotherme 0°C est quant à lui à 3860 mètres (Trombotto et al., 1997). Dans le bassin versant du Rio Tunuyan Sur, il est important de remarquer qu'une part non négligeable des glaciers rocheux est située sous cet isotherme (38% des glaciers rocheux actifs et 53% des inactifs) (fig.25). La totalité des glaciers rocheux se situe sous le permafrost continu, formant une limite avec les zones de formation des glaciers blancs et couverts. Il est important de signaler que 15% des glaciers rocheux actifs et 27% des inactifs est située sous la limite du permafrost discontinu.

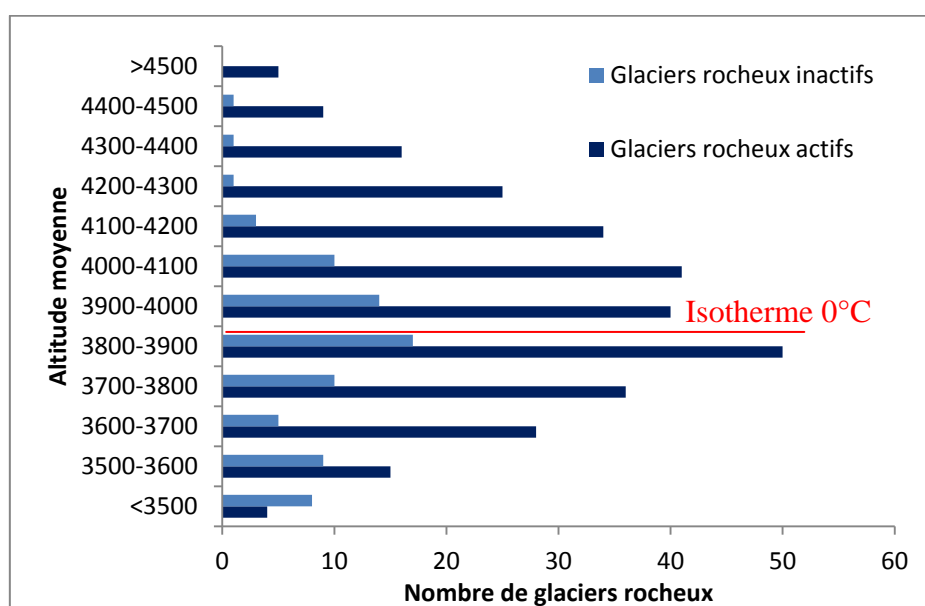


Figure 25: Distribution altitudinale des glaciers rocheux et altitude de l'isotherme 0°C

Cette part reste moins élevée que dans les Alpes du Sud. Cependant, si l'on considère l'altitude du front des glaciers rocheux, 208 formes se situent en dessous de l'isotherme 0, représentant 54,4% de l'ensemble des formes inventoriées. Les aléas impliqués par leur dégradation sont éloignés des infrastructures. Cependant, si l'on considère l'élévation progressive de l'isotherme 0, avec le changement climatique, et la probabilité croissante de dégradation des glaciers rocheux aux plus basses altitudes, on peut se demander combien de temps ces milieux (glaciaires et périglaciaires) seront préservés et fourniront de l'eau potable.

En effet, des mesures géophysiques ont montré que l'épaisseur de permafrost diminue de 25 cm par an depuis 1992 dans la partie frontale du glacier rocheux de Morenas Coloradas et 15 cm dans la partie plus amont (Balcon II) (Trombotto et al., 2009), montrant l'influence du changement climatique. Ces mesures ont été effectuées dans une partie du glacier rocheux située en dessous de l'isotherme 0°C, à 3770 mètres d'altitude et permet de se rendre compte de la vitesse de fonte de la glace à cette altitude.

Par ailleurs, à travers l'analyse de l'hydrologie de Mendoza, une relation importante a été identifiée entre les cours d'eau venant des bassins périglaciaires, la température de l'air et le régime thermique du sol. Ceci indique que le comportement hydrologique des bassins est prédictible (Trombotto et al., 1999; Buk, 2002). Ceci vient confirmer l'importance de préserver ces milieux et d'assurer le suivi de l'évolution de ces masses de glace, en lien avec le réchauffement des températures.

### **3.3. Les ressources en eau présentées par les glaciers rocheux : exemple des Andes semi-arides de la région de Mendoza**

Concernant l'inventaire dans les Andes, les analyses statistiques des résultats sont limitées par l'accès aux données, cet inventaire étant en cours de réalisation, les couches SIG n'ont pu être transmises. Les résultats se limitent donc aux données générales présentes dans les différents rapports du IANIGLA (superficie générale, altitude, orientation). Seuls les résultats de la région de Mendoza, et plus précisément des sous-bassins des rivières Tupungato, Tunuyan, Cuevas, Vacas, Arroyo Uspallata (Cordillera del Tigre) et Rios Blanco (Cordon del Plata), qui sont les affluents du Rio Mendoza, ainsi qu'une partie des résultats de certains sous-bassin du Rio Tunuyan, sont disponibles à ce jour.

#### **3.3.1. Le Rio Mendoza**

Le bassin versant du Rio Mendoza est situé dans les Andes Centrales, zone désertiques mais présentant de hautes altitudes et des précipitations permettant l'implantation des glaciers blancs. Plus au Nord, dans les Andes tropicales, les glaciers rocheux sont prédominants et peuvent se développer jusqu'à des altitudes de 6000 mètres. Vers le Sud, le climat plus froid et pluvieux implique le développement de glaciers blancs au profit des glaciers rocheux, bien que l'altitude soit en moyenne moins élevées.

Il semble intéressant de mettre en avant quelques remarques concernant cet inventaire. Premièrement, dans les Andes, le nombre glaciers rocheux actifs et inactifs est plus élevé que celui des glaciers rocheux fossiles, c'est pourquoi ces derniers non pas été pris en compte dans l'inventaire argentin. Par ailleurs, il est important de remarquer que les glaciers couverts se transformant peu à peu en glaciers rocheux sont différenciés dans les résultats et mentionnés par « glacier couvert avec glacier rocheux », puisqu'il est très difficile de voir la limite entre ces deux types de glaciers sans mesures sur le terrain.

L'analyse ci-dessous se veut générale, principalement par l'accès limité aux données, et décrit la distribution des glaciers rocheux ainsi que leur surface pour estimer la part d'eau potable renfermée dans ces formes. Une étude plus détaillée est effectuée dans le sous-bassin de Tunuyan Sur afin de comparer les résultats avec ceux des Alpes du Sud, qui est l'objet de cette étude.

La superficie totale de ces sous-bassins, ainsi que la surface des glaciers rocheux répertoriés est représentée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 5: Surface et distribution altitudinale des glaciers rocheux par rapport aux autres formes répertoriées, par bassin versant**

Surface (km <sup>2</sup> )	Rio las Cuevas	Rio las Vacas	Rio Tupungato	Arroyo Uspallata	Rios Blancos	Total
Sous-bassins	667	570	1776	2976	2035	8024
Glaciers blancs	14,4	34,58	140,77	14,79	29,09	233,63
Glaciers couverts	13,21	6,04	67,573	0,75	0,32	87,893
<b>Glaciers rocheux</b>	<b>17,6</b>	<b>7,57</b>	<b>44,44</b>	<b>41,7</b>	<b>24,98</b>	<b>136,29</b>
GR avec glacier couvert	11,9	4,47	34,35	9,74	37,75	98,21
Surface totale inventoriée	58,15	55,36	292,32	69,7	97,05	572,58
<b>Nombre</b> de formes inventoriées	190	165	600	319	351	1625
<b>Altitude</b> minimum des glaciers rocheux	3059	3360	3340	3292	3203	
<b>Altitude</b> maximum des glaciers rocheux	4826	5229	5000	4846	4830	

Les glaciers rocheux actifs et inactifs ne sont pas différenciés. La part de glaciers rocheux représente 1,7% de la surface totale étudiée, pour une part de 3% de glaciers blancs, les glaciers blancs représentent une surface deux fois plus importante que celle des glaciers rocheux dans les Andes Centrales. Dans les Alpes du Sud, la proportion de glaciers rocheux est de 0,87% de la superficie totale située à plus de 1500 m d'altitude, pour 0,94% de glaciers blancs, répartis principalement dans le massif des Ecrins.

La part de glaciers rocheux est plus faible dans le sous-bassin de Las Vacas que dans celui de Las Cuevas bien que ces deux bassins soient situés à proximité et présentent des altitudes similaires. Ceci s'explique sûrement par l'orientation du sous-bassin, exposé plus au Sud, la radiation solaire moins importante implique la présence plus importante de glaciers qui empêche la formation des glaciers rocheux. De plus ceci est confirmé par la répartition altitudinale plus élevée des glaciers rocheux dans le sous-bassin de Las Vacas.

La surface de glaciers rocheux dépasse ou est équivalente à celle des glaciers blancs dans les sous-bassins de Arroyo Uspallata et Rios Blancos, qui constituent la partie externe des Andes, avec des reliefs moins élevés et recevant moins de précipitations. C'est dans cette zone principalement que les glaciers rocheux sont étudiés, notamment dans le Cordon del Plata (Rios Blancos) afin d'estimer l'évolution du volume de glace.

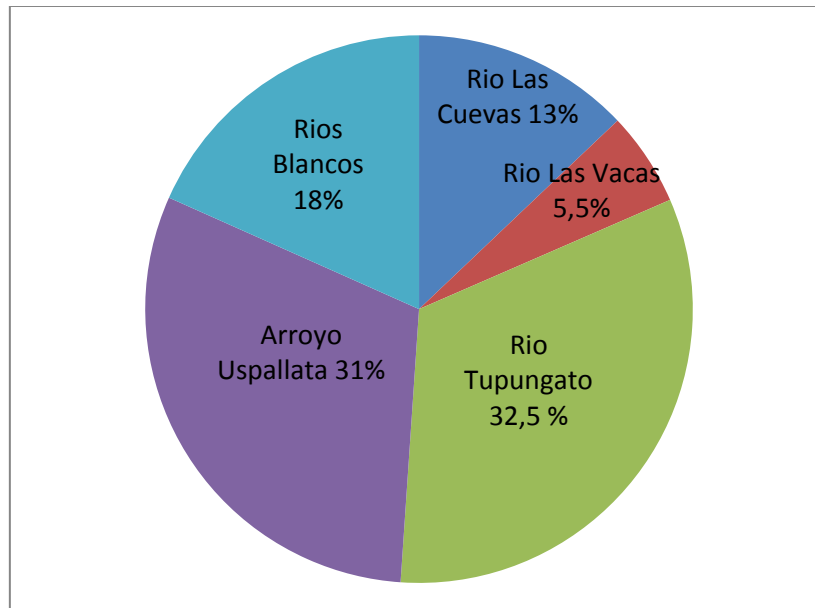


Figure 26: Distribution des glaciers rocheux par bassins versants

La figure 26 montre que les deux sous-bassins situés dans les Andes externes comptent 50% de la totalité des glaciers rocheux et le Rios Blancos contient une superficie égale à celle des deux sous-bassins de Rio Las Vacas et Las Cuevas. Le sous-bassin de Rio Tupungato présente plus de glaciers rocheux, mais ceci s'explique par la part plus abondante de formes glaciaires et périglaciaires, par l'orientation et la taille du sous-bassin.

### 3.3.2. Analyse du sous-bassin Rio Tunuyan Sur

Le sous-bassin du Rio Tunuyan Sur se situe au Nord du bassin versant du Rio Tunuyan, localisé au Sud du bassin versant du Rio Mendoza, ce sous-bassin est orienté au Sud, favorisant le développement de formes glaciaires et périglaciaires (fig.27). L'accès à des résultats plus détaillés sur ce bassin permet une comparaison plus approfondie avec l'inventaire des Alpes du Sud, par quelques analyses statistiques. La superficie de ce sous-bassin est de 6034 km<sup>2</sup>.

En tout, 382 glaciers rocheux ont été cartographiés dans ce sous-bassin, représentant une surface de 50,37 km<sup>2</sup>, pour 324 glaciers blancs et couverts, recouvrant une surface de 230,06 km<sup>2</sup>, les glaciers rocheux représentent donc 54% de tous les glaciers inventoriés, pour seulement 21% de la surface totale des formes cartographiées et 0,83% de la surface du sous-bassin.

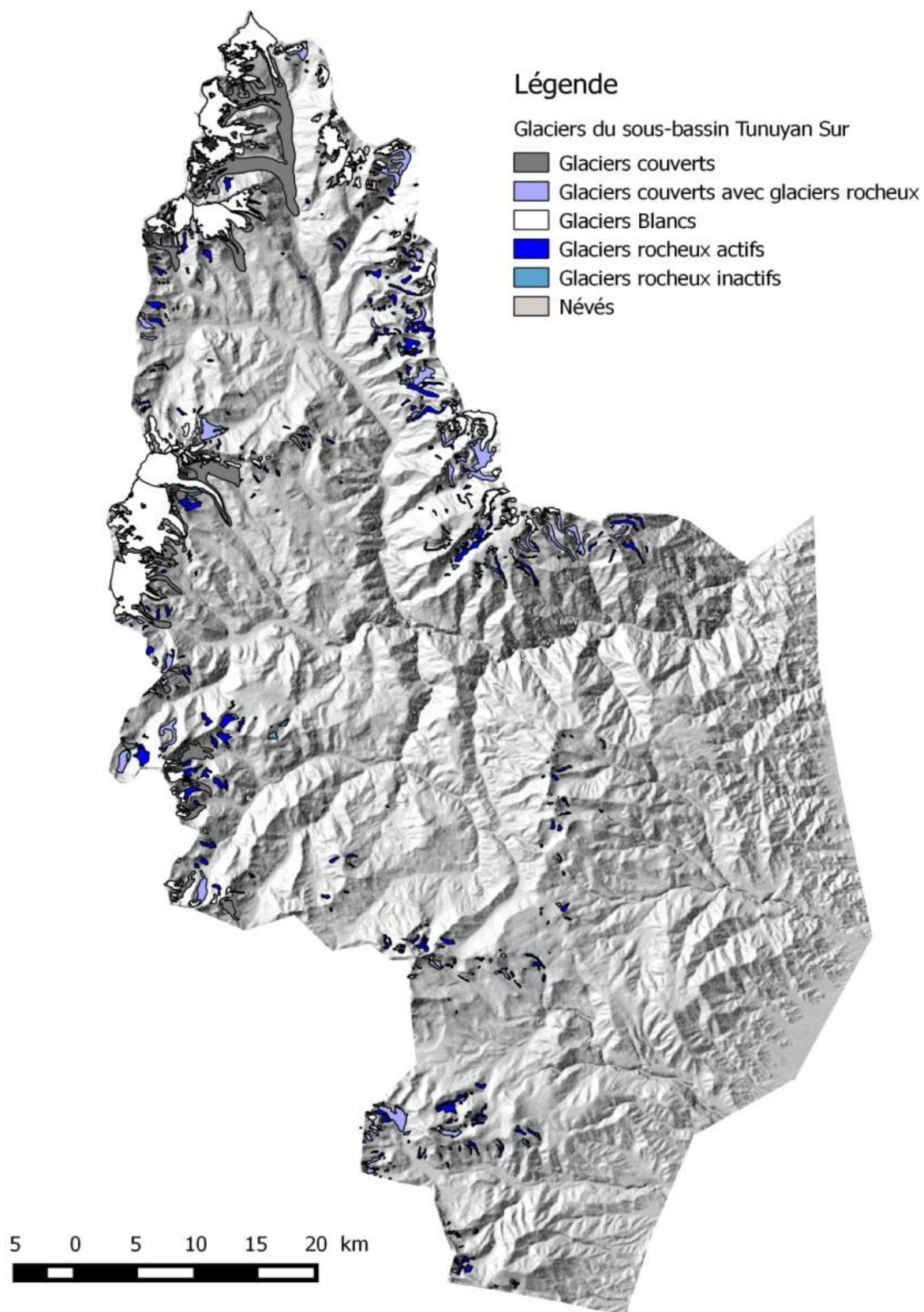


Figure 27: Délimitation du sous-bassin avec la distribution des formes inventoriées



La part de glaciers rocheux actifs est plus importante que celle des inactifs, 303 (79%) actifs pour 79 (21%) inactifs couvrant respectivement une surface de 41,61 km<sup>2</sup> et 8,76 km<sup>2</sup>. On peut constater que, contrairement au Alpes du Sud, la distribution altitudinale des glaciers rocheux n'est pas différente suivant l'activité (fig.28), étant le plus présent entre 3800 et 4000 mètres d'altitude, l'activité doit donc dépendre de l'exposition et du rayonnement solaire qui est peut être plus élevé sur les glaciers rocheux inactifs, accélérant la fonte de la glace.

Cependant, l'analyse des valeurs de rayonnement solaire permet de calculer un ratio moyen de 0,68 pour les glaciers rocheux actifs et de 0,67 pour les inactifs, l'activité ne dépend donc pas du rayonnement solaire.

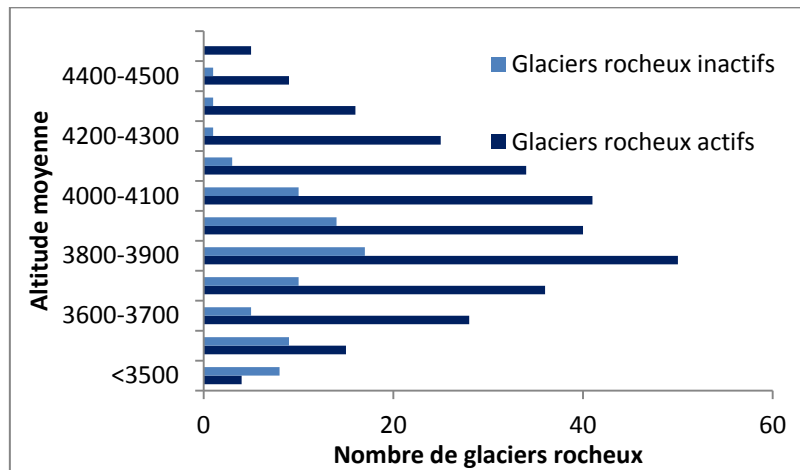


Figure 28: Distribution altitudinale des glaciers rocheux dans les Andes Centrales

Concernant l'exposition, il n'y a pas de différence visible entre actifs et inactifs, hormis l'exposition plus à l'Est des glaciers rocheux inactifs (fig.29). La différence d'activité peut donc s'expliquer par les apports en matériaux, or, si l'on s'intéresse à l'origine des glaciers rocheux, on peut constater que 93% des glaciers rocheux actifs ont une origine cryogénique, contre 84 % des glaciers rocheux inactifs, montrant ici encore une différence faible.

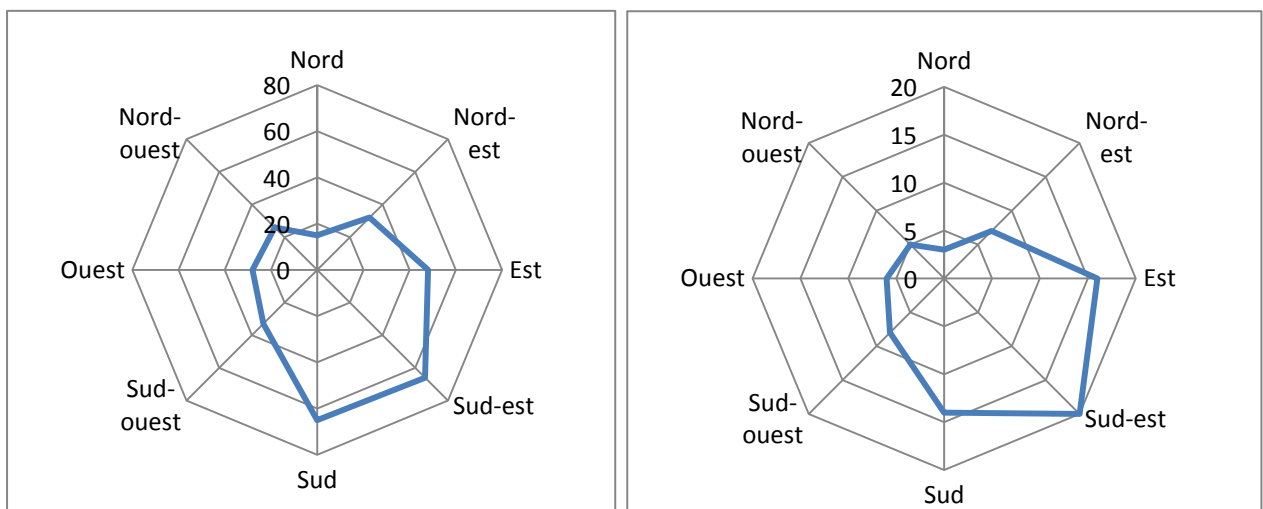


Figure 29: Exposition des glaciers rocheux actifs (à gauche) et inactifs (à droite)

Bien que les glaciers rocheux représentent une faible superficie comparés aux glaciers blancs et couverts, ils sont en général plus grands que ceux présents dans les Alpes du Sud. 22% des glaciers rocheux ont une surface inférieure à 0,03 km<sup>2</sup> (fig.30) alors que ce pourcentage correspond à la quasi-totalité des glaciers rocheux actifs et inactifs dans les Alpes du Sud. Comme pour la distribution altitudinale, aucune différence de surface n'est visible suivant l'activité, si ce n'est le nombre moins élevé de glaciers rocheux inactifs. La surface moyenne est de 0,066 km<sup>2</sup>, contre 0,045 km<sup>2</sup> concernant les glaciers rocheux actifs et inactifs.

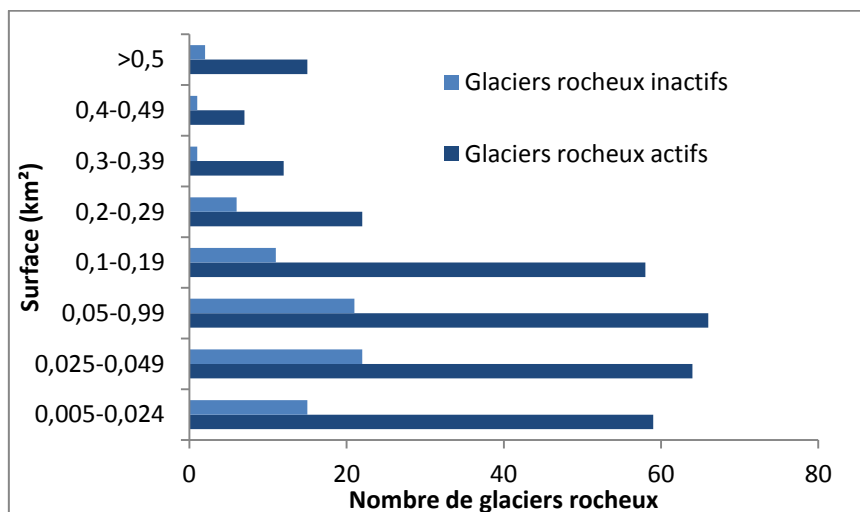


Figure 30: Distribution des glaciers rocheux par classes de surface

Il est intéressant de remarquer que les degrés de pente où se développent les glaciers rocheux sont semblables à ceux rencontrés dans les Alpes du Sud, entre 10 et 40° (fig.31), les glaciers rocheux actifs et inactifs ont une distribution semblable, montrant que la pente ne contrôle pas la part de glace présente dans les formes. Cependant, le plus grand nombre de glaciers rocheux se situe dans une pente allant de 15 à 25°, contrairement aux Alpes où ils se développent sur des pentes en général plus élevées, entre 20 et 30°. Cette constatation permet d'émettre l'hypothèse que le plus grand apport de matériaux, ainsi que l'apport de glace des glaciers blancs et couverts en amont a pour effet de rendre le fluage des glaciers rocheux possible sur des pentes plus faibles.

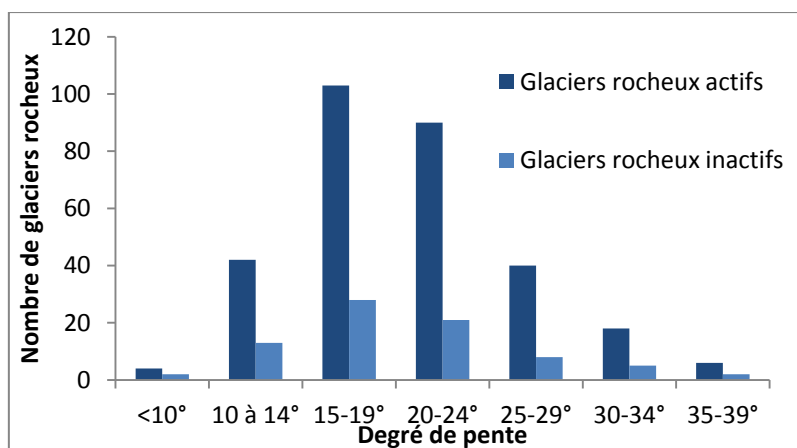


Figure 31: Distribution des glaciers rocheux suivant la pente

### 3.4. Estimation du volume de glace

Les mesures géophysiques permettent de connaître la constitution des glaciers rocheux et l'épaisseur de glace, afin d'estimer le pourcentage de glace dans les formes. En se basant sur les mesures géophysiques de Hausmann et al. (2007, 2012), réalisées dans les Alpes autrichiennes, un volume de glace d'environ 30 à 40% serait présent dans les glaciers rocheux actifs, pour une part de 10 à 15% dans les glaciers rocheux inactifs (Krainer et al., 2012).

Si les mêmes valeurs de volume de glace sont utilisées pour les Andes Centrales, et que l'épaisseur des glaciers rocheux actifs est d'environ 12 mètres et de 8 mètres pour les inactifs (valeurs estimées à partir des valeurs de surfaces et de volume détaillées dans l'inventaire de Krainer et al. (2012) dans les Alpes Tyrolienne), les valeurs obtenues sur les deux zones étudiées sont décrites dans le tableau ci-dessous (tab.6).

Tableau 6: Détail du calcul du volume de glace dans les deux zones étudiées

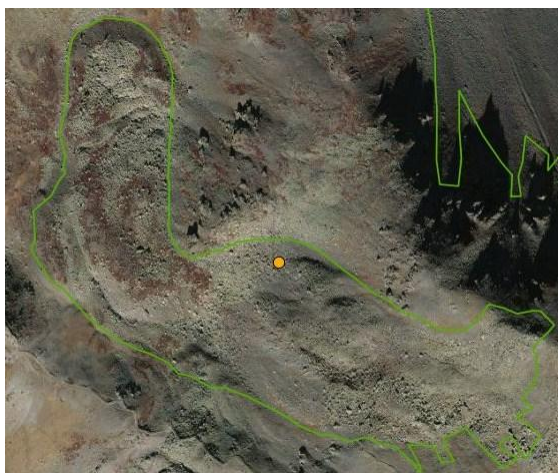
	Alpes du Sud			Andes Centrales (Sous-bassin de Tunuyan Sur)		
<b>Surface du terrain étudié (km<sup>2</sup>)</b>	<b>5743</b> (au dessus de 1500 mètre d'altitude)			<b>6034</b>		
	Surface (km <sup>2</sup> )	Hauteur (km)	Volume (km <sup>3</sup> )	Surface (km <sup>2</sup> )	Hauteur (km)	Volume (km <sup>3</sup> )
<b>Glaciers rocheux actifs</b>	19,96	0,012	0,24	41,6	0,012	0,5
<b>Glaciers rocheux inactifs</b>	30,26	0,008	0,24	8,76	0,008	0,07
<b>Volume d'eau</b>	$(0,24 \times 0,35) + (0,242 \times 0,125)$ <b>= 0,114 km<sup>3</sup></b>			$(0,5 \times 0,35) + (0,07 \times 0,125)$ <b>= 0,184 km<sup>3</sup></b>		

. Par ailleurs, d'après Perruca et al. (2008), les glaciers rocheux actifs ont une teneur en glace d'environ 40% à 60% du volume total dans les Andes, si l'on prend ces valeurs, le volume de glace serait d'environ 0,25 km<sup>3</sup> en considérant seulement les glaciers rocheux actifs.

Calculer la part de glace permet d'estimer le volume de glace d'eau disponible à l'intérieur des glaciers rocheux, dans chaque bassin versant étudié, à partir de la superficie qu'ils représentent et de l'épaisseur moyenne des glaciers rocheux actifs et inactifs. Le volume presque deux fois supérieur de glace dans les Andes Centrales confirme l'intérêt de s'intéresser aux ressources en eau, dans un territoire semi-aride où la majorité de l'eau potable provient des milieux glaciaires et périglaciaires de haute altitude.

### 3.5. Analyse des Interférogrammes

L'interférométrie radar a permis de détecter 46 glaciers rocheux présentant des déplacements dans les Alpes du Sud (fig.33), dont certains étaient classés comme inactifs, voire fossiles dans l'inventaire sur la base des photos aériennes (tab.5). Cette erreur est sûrement due à la présence de plusieurs corps de glaciers rocheux, avec une langue active, mais le tout classé en fossile (Fig.32).



Sur l'image ci-contre, un déplacement de plusieurs cm/mois a été détecté sur une partie d'un glacier rocheux qui a été cartographié comme fossile. En effet, si l'on regarde plus attentivement, il est possible de remarquer une morphologie différente dans la partie supérieure. Cette méthode est donc un outil supplémentaire à prendre en compte pour les inventaires, sans lequel, la partie amont de ce glacier rocheux n'aurait pas été vue comme active.

Figure 32: Exemple de glacier rocheux fossile détecté par l'interférométrie radar

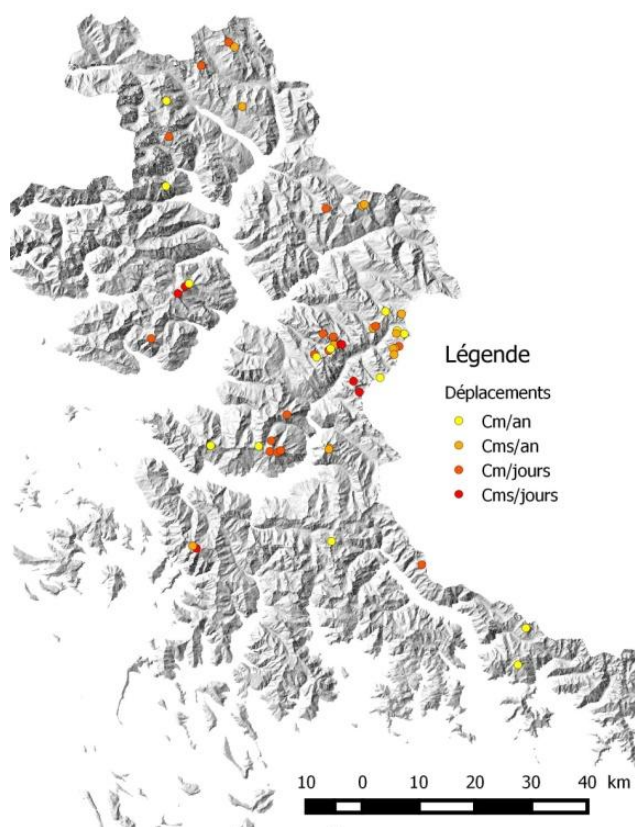


Figure 33: Distribution des glaciers rocheux dont les interférogrammes ont montré des déplacements

Sur 325 glaciers rocheux classés au départ comme actifs, seuls 38 ont été détectés par l'interférométrie, ce nombre très différent peut s'expliquer par plusieurs paramètres. Premièrement, les interférogrammes utilisés ne permettent que de visualiser les déplacements des glaciers rocheux dont l'azimut se situe entre  $180^\circ$  et  $360^\circ$ , tous les glaciers rocheux situés entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  ne sont pas analysables, or, sur la totalité des glaciers rocheux cartographiés comme actifs, environ 120 (37%) sont situés dans la zone d'ombre.

Par ailleurs, le pas de temps le plus grand entre 2 passages du satellite est de 27 jours dans les Alpes du Sud, des déplacements inférieurs à 1 centimètre par mois n'ont donc certainement pas été détectés. Enfin, la résolution de 25 mètres des interférogrammes analysés ne permet pas de détecter des déplacements pour les glaciers rocheux inférieurs à  $0,05 \text{ km}^2$ , bien que cette part reste négligeable.

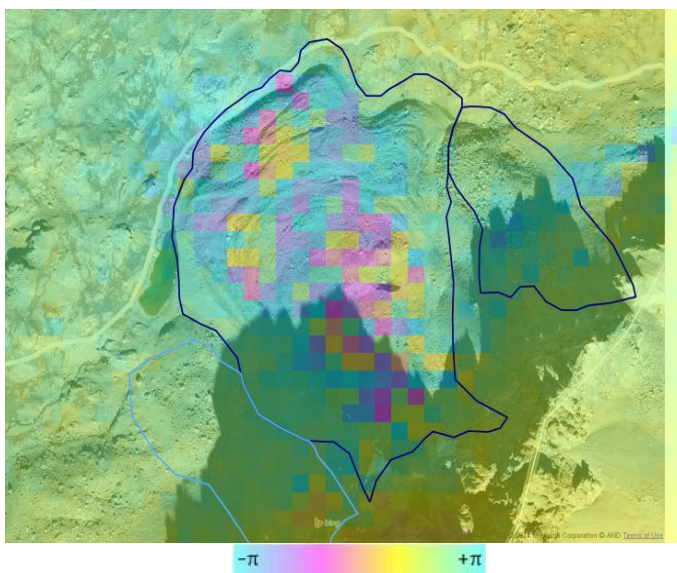
**Tableau 7: Tableau des glaciers rocheux, au départ cartographiés comme fossiles ou inactifs, dont les déplacements ont été identifiés par l'interférométrie radar**

ID	Activité	rev_activité	déplacements
218	I	A	1 cm/mois
664	I	A	1 cm/mois
910	F	A	1 cm/mois
953	F	A	1 cm/mois
1229	F	A	Plusieurs cms/mois
221	I	A	1 cm/jour
684	I	A	1 cm/jour
129	I	A	Plusieurs cms/jours

Ceci ne prend pas en compte les oublis lors de l'interprétation des interférogrammes sur SIG, une personne n'ayant pas forcément l'habitude de voir les différences de phase peut oublier certains glaciers rocheux actifs. Cependant, les quelques glaciers rocheux détectés peuvent servir de référence pour visualiser la morphologie des formes dont les déplacements sont avérés.

### 3.5.1. Analyse géomorphologique

Les glaciers rocheux ayant les plus grandes vitesses de déplacement (plusieurs cms par jour) peuvent être étudiés pour faire une analyse morphologique. Les glaciers rocheux détectés par interférométrie radar servent de référence pour reconnaître les glaciers rocheux actifs et pouvoir les différencier des inactifs par photo-interprétation.



La demi-longueur d'onde (entre violet et jaune sur la figure ci-contre – fig.34) est égale à 2,8 centimètres (Echelard, 2014). En considérant le pas de temps entre les 2 images satellite, il est possible d'estimer approximativement la vitesse de déplacement d'un glacier rocheux. Par exemple, un pixel jaune (environ 3 cm de déplacement) sur un interférogramme de 9 jours d'intervalle permet d'estimer un déplacement de 0,33 cm par jour, soit une dizaine de centimètres par mois.

**Figure 34: Exemple d'interférogramme pour un pas de temps de 9 jours**

Le tableau ci-dessous (tab.8) donne la liste des glaciers rocheux détectés, 7 d'entre eux ont des vitesses de déplacement de l'ordre de plusieurs centimètres par jour. Ces formes déstabilisées peuvent servir de référence, par leur structure morphologique, pour cartographier plus facilement les formes actives et aussi voir les formes les plus susceptibles de se dégrader avec le changement climatique.

**Tableau 8: récapitulatif des glaciers rocheux détectés par interférométrie radar, et leur vitesse de déplacement**

Déplacements	nombre de glaciers rocheux	altitude moyenne	PSIR moyen
1 cm/mois	13	2735	174
Plusieurs cms/mois	12	2737	146
1 cm/jour	14	2707	155
Plusieurs cms/jours	7	2731	158



# Conclusion et Perspectives

L'homogénéisation des inventaires des trois départements des Alpes Sud a permis d'établir une étude globale de la distribution des glaciers rocheux de cette zone des Alpes, correspondant environ à la moitié du territoire alpin français. Cette étude des glaciers rocheux sur une région étendue est intéressante pour comprendre les mécanismes de formation et d'évolution de ces formes, d'autant plus dans un contexte de changement climatique ayant une influence sur leur dégradation.

La connaissance sur leur distribution pourra être complétée par les inventaires réalisés par la suite dans les Alpes françaises du Nord, notamment dans les départements de l'Isère (en cours de réalisation) et dans la Savoie, complétant ainsi l'inventaire réalisé par Sébastien Monnier dans la Vanoise (Monnier, 2006), en suivant une méthodologie similaire à celle utilisée pour les inventaires dans les Alpes du Sud. Un inventaire complet sur l'ensemble des Alpes sera important pour avoir une vue générale de la distribution des glaciers rocheux et une source d'information importante pour mettre à jour une carte du permafrost dans l'ensemble des Alpes françaises.

Par ailleurs, l'utilisation de la méthode d'interférométrie radar différentielle, appliquée par Thomas Echelard dans les Alpes françaises, est un outil important pour détecter des formes actives qui n'avaient pas été cartographiées comme actives lors de la réalisation de l'inventaire. Par ailleurs, cet outil reste à développer pour situer plus de glaciers rocheux présentant des déplacements, et voir l'évolution des formes actives dans le temps, afin de prévoir les risques pour les infrastructures proches, causés par la libération de la glace et des matériaux présents dans ces formes.

Partant de ces constatations, il paraît intéressant de reprendre l'inventaire, une fois l'ensemble des Alpes françaises cartographiées, en faisant ressortir les glaciers rocheux pouvant présenter des risques par leur potentielle dégradation future. Cette sélection peut être faite à partir de plusieurs critères mis en avant tout au long de cette étude :

- Prendre les glaciers rocheux détectés comme déstabilisés, ou présentant des vitesses de déplacement rapide, par la méthode d'interférométrie radar.
- Considérer les glaciers rocheux situés en dessous de l'isotherme 0°C, voire à la limite du permafrost discontinu, sur une forte pente et ayant un ensoleillement élevé.
- Voir la distance de ces glaciers rocheux par rapport aux infrastructures humaines (villages, route,...) susceptibles d'être endommagés par des aléas tels que les éboulements, les laves torrentielles, provenant des glaciers rocheux.

Concernant l'inventaire national des glaciers, en cours de réalisation en Argentine, les enjeux liés aux ressources donnent des problématiques différentes, influant sur le type d'inventaire et de suivi qui en découle, les risques n'étant pas pris en compte dans ce territoire plus vaste. La méthode d'interférométrie radar, en cours de traitement sur le Cordon del Plata, serait à développer sur l'ensemble des Andes Centrales, permettant de résoudre les questions portant sur l'activité des glaciers rocheux, car aucun paramètre topo-climatique n'a permis de faire la différence entre formes actives et inactives (pente, exposition, altitude), si ce n'est leur morphologie lors de la digitalisation, avec les résultats disponibles dans le sous-bassin du Rio Tunuyan Sur.

Les résultats qu'il a été possible d'analyser dans les Andes Centrales ont permis d'établir une comparaison avec les Alpes du Sud. D'une part sur les champs utilisés, notamment la forme et l'origine des glaciers rocheux, mais aussi leur comparaison avec les formes glaciaires, chose qui n'a pas pu être effectuée dans les Alpes du Sud par le faible nombre de glaciers blancs et couverts. Cette comparaison pourra être appliquée dans les Alpes du Nord puisque les formes glaciaires y sont plus présentes. D'autre part, sur les glaciers rocheux eux même, leur taille plus grande, leur altitude plus élevée, à mettre en lien avec le climat semi-aride dans les Andes Centrales, ainsi que la faible part de glaciers rocheux fossiles, sont des paramètres à prendre en compte pour comprendre l'approche et les outils utilisés dans ce territoire.

Cette comparaison pourra être développée à l'aide d'inventaires réalisés dans d'autres zones du globe, afin d'assurer une complémentarité et étudier des enjeux plus ou moins différents suivant les régions.

# Bibliographie

- Angillieri M. (2009). *A preliminary inventory of rock glaciers at 30°S latitude, Cordillera Frontal of San Juan, Argentina*. Quaternary International 195, pp151-157.
- Arenson L., Jakob M. (2010). *The Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes – A Discussion of Azócar and Brenning (2010) and Brenning and Azócar (2010)*. Permafrost and Periglacial Processes 21, pp 286-288.
- Barsch, D., King, L. (1989). *Origin and geoelectrical resistivity of rock glaciers in semi-arid subtropical mountains (Andes of Mendoza, Argentina)*. Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. 33 (2), pp. 151-163.
- Baroni C., Carton A., Seppi R. (2004). *Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello–Presanella Massif (Italian Alps)*. Permafrost and Periglacial Processes 15, pp 243-259.
- 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 and Periglacial Processes 20, pp. 331–344.
- Bodin X., Krysiecki J.M., Schoeneich P. (2013). Past and present dynamics of a potentially hazardous rock glacier, Mont Blanc Massif, France. Poster.
- Boeckli L., Brenning A., Gruber S., Noetzli J. (2012). *A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges*. The Cryosphere, 6, pp. 125-140.
- Boeckli L., Brenning A., Gruber S., Noetzli J. (2012). *Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of the index map and summary statistics*. The Cryosphere, 6, pp. 807-820.
- Bonnetain L. (2010), *Le Pergélisol de montagne : bilan, méthodes dans l'évaluation des risques. Etudes de cas dans la vallée de la Guisane et de la Claree*. Rapport de stage.
- Bornet D., Andréis N., Segel V. (2014). *Les glaciers rocheux dans les Alpes Maritimes : Inventaire, cartographie et risques associés*. Rapport provisoire, RTM Alpes Maritimes, ONF, 90 pages.
- Bottero R. (2002). *Inventario de glaciares de Mendoza y San Juan*. IANIGLA
- Buk E. (1983). *Glaciares de escombros y su significación hidrológica*. Acta Geocriogénica1, pp. 22-38.

- Buk E. (2002). *Hidrología de ambientes periglaciales Cuenca morenas Coloradas-Vallecitos, Cordón del Plata, Cordillera Frontal, Mendoza. LANIGLA, 30 años de Investigación básica y aplicada en ciencias Ambientales*. Editores Darío Trombotto y Ricardo Villalba, pp.73-76.
- Delaloye R., Lambiel C., Lugon R. (2005). *ESA SLAM project, phase 2, Bas-Valais - Validation of InSAR data in permafrost zone*. For the Federal Office of Water and Geology, pp.34-43.
- Delaloye R., Morard S., Barboux C., Abbet D., Gruber V., Riedo M., Gachet S. (2011). *Rapidly moving rock glaciers in Mattertal*. Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, pp. 21-32.
- Echelard T. (2010), *Détection de mouvements par interférométrie radar dans les zones a permafrost : applications aux glaciers-rocheux du Queyras*. Mémoire de master, Université de Grenoble, France.
- Echelard T., Krysiecki J-M., Gay M., Schoeneich P. (2013). *Détection des mouvements de glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR) dérivée des archives satellitaires ERS (European Remote Sensing)*. Géomorphologie n°3, pp. 231-242.
- Echelard T. (2014). *Contribution à l'étude de la dynamique des glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR)*. Thèse, Université de Grenoble, 208 pages.
- Falaschi D., Castro M., Masiokas M., Tadono T., Ahumada A. (2014). *Rock Glacier Inventory of the Valles Calchaquíes Region (~ 25°S), Salta, Argentina, Derived from ALOS Data*. Permafrost and Periglacial Processes, DOI: 10.1002, ppp.1801.
- Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. (2007). *The Shuttle Radar Topography Mission*. Rev. Geophys. 45.
- Fischer L., Käab A., Huggel C., Noetzli J. (2006). *Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high mountain rock wall: the Monte Rosa east face*. Nat Hazard Earth Sys 6, pp. 761-772.
- Gabriel A.K., Goldstein E.M., Zebker H.A. (1989). *Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry*. Journal of geophysical research 94, pp.9183-9191.
- Garcia S. (2008). *Rapport d'étude sur les risques liés à la dégradation du pergélisol dans les bassins torrentiels du département de la Haute-Savoie*. Mémoire de M1, 86 pages.
- Garcia S. (2009), *Analyse de l'évolution du glacier rocheux du Dérochoir depuis la fin du XIXe siècle*. Mémoire de Master 2, 121 pages.

- 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 vol 120, pp 24-37.
- Gärtner-Roer I., Christiansen H.H., Etzelmüller B., Farbroth H., Gruber S., Isaksen K., Kellerer-Pirklbauer A., Krainer K., Noetzli J. (2010). *Primary impacts of climate change on the cryosphere – Permafrost: In: Voigt T., Füssler H-M., Gärtner-Roer I., Huggel Ch., Marty Ch. & Zemp M. (eds.) Impacts of climate change on snow, ice, and permafrost in Europe: Observed trends, future projections, and socio-economic relevance*. Technical Paper of the European Environment Agency, pp 66-76
- Guglielmin M., Smiraglia C. (1998). *The rock glacier inventory of the Italian Alps*. Permafrost - Seventh International Conference, Yellowknife (Canada), Collection Nordicana n° 55, 8 pages.
- Haerberli W. (1985). *Creep of Mountain Permafrost: Internal Structure and Flow of Alpine Rock Glaciers*. Mitteilung der VAW/ETH Zürich, No. 77.
- Haerberli, W. & Gruber, S. (2008). *Mountain permafrost - research challenges for steep and cold terrain, Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost 2008*, Fairbanks, Alaska, USA, pp 597-605.
- Harris C., Arenson L., Christiansen H., Etzelmüller B., Frauenfelder B., Gruber S., Haerberli W., Hauck C., Hoelzle M., Humlum O., Isaksen K., Kääb A., Kern-Lütschg M., Lehning M., Matsuoka N., Murton J., Noetzli J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springmann S., Vonder Mühll D. (2009). *Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses*. Earth-Science Reviews 92, pp 117-171.
- Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Mostler, W. (2007). *Internal Structure and Ice Content of Reichenkar Rock Glacier (Stubai Alps, Austria) Assessed by Geophysical Investigations*. Permafrost and Periglacial Processes, 18, pp 351-367.
- Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E. and Ullrich, C. (2012). *Internal structure, ice content and dynamics of Ölgrube and Kaiserberg rock glaciers (Ötztal Alps, Austria) determined from geophysical surveys*. Austrian Journal of Earth Sciences, 105/2, pp 12-31.
- Kääb A., Frauenfelder R., Roer I. (2007). *On the response of rock glacier creep to surface temperature increase*. GLOBAL-01142; 16 pages.
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G., Kleinfelchner H. (2012). *A new rock glacier inventory in the eastern European Alps*. Austrian journal of earth sciences, vol.105/2, pp 78-93.

- Krainer K., Ribis M. (2012). *A rock glacier inventory of the Tyrolean Alps (Austria)*. Austrian journal of earth sciences, vol.105/2, pp 32-47.
- Krysiński J.M., Bodin X., Schoeneich P. (2008). *Collapse of the Berard rock glacier*. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, pp. 153-154
- Lambiel C., Bardou E., Reynald Delaloye R., Schoeneich P., Philippe Schütz P. (2008). *Permafrost Vaud*, Rapport d'étude, Université de Lausanne, 29 pages.
- Liu L., Millar C. I., Westfall R. D., Zebker H. A. (2013). *Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: inventory and a case study using InSAR*. The Cryosphere, 7, 1109–1119, 2013
- Lütchg M., Stoeckli V., Lehning M., Haeberli W., Ammann W. (2004). *Temperatures in two boreholes at Flüela Pass, eastern Swiss Alps: the effect of snow redistribution on permafrost distribution patterns in high mountain areas*. Permafrost and Periglacial Processes 15, pp283-297.
- Mair V., Zischg A., Lang K., Tonidandel D., Krainer K., Kellerer-Pirklbauer A., Deline P., Schoeneich P., Cremonese E., Pogliotti P., Gruber S., Böckli L. (2011). *PermaNET – Réseau d'observation du permafrost sur le long terme. Rapport de synthèse*. INTERPRAEVENT Série de publications 1, Rapport 3, Klagenfurt, 24 pages.
- Millar C. I., Westfall R. D. (2008). *Rock glaciers and related periglacial landforms in the Sierra Nevada, CA, USA; inventory, distribution and climatic relationships*. ScienceDirect, Quaternary International 188, pp 90-104.
- Minetti, J., Barbieri, P., Carleto, M., Poblete, A., Sierra, E. (1986). *El régimen de precipitación de la provincia de San Juan*. Informe técnico 8. CIRSAJ-CONICET, San Juan.
- Monnier S. (2006). *Les glaciers-rocheux, objets géographiques. Analyse spatiale multiscalaire et investigations environnementales. Application aux Alpes de Vanoise*. Thèse, 330 pages.
- Perucca L., Angillieri Y. (2008). *A preliminary inventory of periglacial landforms in the Andes of La Rioja and San Juan, Argentina, at about 28°S*. Quaternary International 190, pp. 171-197.
- Perucca L., Angillieri Y. (2011). *Glaciers and rock glaciers' distribution at 28° SL, Dry Andes of Argentina, and some considerations about their hydrological significance*. Environ Earth Science 64, pp. 2079-2089.
- Racoviteanu A.E., Paul F., Raup B., Khalsa S.J.S., Armstrong, R. (2009). *Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA*. Annals of Glaciology 50, 53 p.
- Riguidel A., Bouvet P., Charvet R. (2011). *Les glaciers-rocheux dans les Hautes-Alpes : inventaire, cartographie et risques associés*. RTM Hautes-Alpes, ONF, 121 pages.



- Rapport RiskNat (2012), *Aléas engendrés par la dégradation du pergélisol*, Types d'analyse et méthodes d'investigation expérimentés dans le cadre du projet RiskNat, 54 pages.
- Scotti R., Brardinoni F., Alberti S., Frattini P., Crosta G. (2013). *A regional inventory of rock glaciers and protalus ramparts in the central Italian Alps*. *Geomorphology* 186, pp. 136-149
- Schoeneich P., Dall'Amico M., Deline P., Zischg A., eds (2011). *Hazards related to permafrost and to permafrost degradation*. PermaNET project, State-of-the-art report 6.2.
- Trombotto D., Buk E., Hernandez J. (1997). *Monitoring of Mountain Permafrost in the Central Andes, Cordón del Plata, Mendoza, Argentina*. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 8, pp 123-129.
- Trombotto D., Buk E., Hernández J. (1999). *Rock glaciers in the Southern Central Andes (appr. 33 S.L.), Mendoza, Argentina*. *Bamberger Geographische Schriften* 19, pp 145-173.
- Trombotto D., Penas P., Blöthe J. (2009). *Análisis térmico inicial de la caldera y cumbre del complejo volcánico Peteroa, Mendoza – Argentina*. T J.H. *Acta de Resúmenes*, pp 126-128.
- Trombotto D., Alonso V. (2010). *Maqueta del mapa geomorfológico del entorno de la Laguna del Diamante (Andes Centrales, Argentina)*. XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén 2011. Sesión Especial: Ciencias de la Criósfera.

**Webographie :**

- <http://www.permanet-alpinespace.eu/products/monitoringnetwork/tablesites.htm>
- <http://en.allmetsat.com/climate>

# Table des figures

Figure 1: Schéma d'un glacier rocheux (source: Regula Frauenfelder) .....	8
Figure 2: Carte de localisation de la zone d'étude dans l'arc alpin (source : Google Earth) ...	13
Figure 3: Localisation de la zone d'étude avec la distribution des glaciers rocheux, des glaciers blancs et du permafrost .....	13
Figure 4: Liste des provinces andines d'Argentine (adaptée depuis site web ING - <a href="http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/index.php/provincias">http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/index.php/provincias</a> ).....	14
Figure 5: Localisation du bassin versant du Rio Mendoza et ses sous-bassins (adaptée depuis rapport ING-Tupungato) .....	14
Figure 6: Climogramme mensuel des températures et des précipitations à Nice (Alpes du Sud) .....	15
Figure 7: Climogramme mensuel des températures et des précipitations de la province de Mendoza (Andes Centrales) .....	16
Figure 8: Carte de la probabilité de présence de permafrost (couche APIM) dans les Alpes,..	19
Figure 9: Comparaison entre la distribution des glaciers rocheux et l'indice de probabilité de permafrost dans la région de la Haute Tinée (Alpes-Maritimes) .....	21
Figure 10: Type de carte Géologique utilisée pour l'inventaire .....	25
Figure 11: Différence de méthode de cartographie des glaciers rocheux dans l'inventaire des Alpes et dans l'ING .....	29
Figure 12: Mesures DGPS sur un glacier rocheux dans le Cordon del Plata, Mendoza, Argentine .....	33
Figure 13: Interférogramme à 9 jours, sur lequel des mouvements sont visibles .....	35
Figure 14: Distribution altitudinale des glaciers rocheux suivant leur activité .....	37
Figure 15: Diagramme de fréquence de l'altitude de l'ensemble des glaciers rocheux .....	37
Figure 16: Distribution des glaciers rocheux par surface, pour chaque catégorie d'activité ...	38
Figure 17: distribution des glaciers rocheux par rapport à la pente .....	39
Figure 18: Orientation des glaciers rocheux actifs et inactifs .....	39
Figure 19: Distribution altitudinal des glaciers rocheux en fonction de la latitude .....	40
Figure 20: Distribution des glaciers rocheux par bassins versants.....	41
Figure 21: Répartition altitudinale des glaciers rocheux par bassins versants .....	42
Figure 22: Distribution des glaciers rocheux par catégorie d'activité .....	42
Figure 23: Orientation des glaciers rocheux actifs et inactifs par bassin versant .....	43
Figure 24: Surface des glaciers rocheux actifs et inactifs par rapport à la surface totale au dessus de 1500 m d'altitude .....	45
Figure 25: Distribution altitudinale des glaciers rocheux et altitude de l'isotherme 0°C .....	46
Figure 26: Distribution des glaciers rocheux par bassins versants.....	49
Figure 27: Délimitation du sous-bassin avec la distribution des formes inventoriées .....	50
Figure 28: Distribution altitudinale des glaciers rocheux dans les Andes Centrales .....	51
Figure 29: Exposition des glaciers rocheux actifs (à gauche) et inactifs (à droite) .....	51
Figure 30: Distribution des glaciers rocheux par classes de surface .....	52
Figure 31: Distribution des glaciers rocheux suivant la pente .....	52
Figure 32: Exemple de glacier rocheux fossile détecté par l'interférométrie radar.....	54
Figure 33: Distribution des glaciers rocheux dont les interférogrammes ont montré des déplacements .....	54
Figure 34: Exemple d'interférogramme pour un pas de temps de 9 jours.....	55

# Table des Tableaux

Tableau 1: Détail de la table attributaire de l'inventaire des glaciers rocheux .....	27
Tableau 2: Liste des images utilisées pour l'inventaire, sur les différents secteurs .....	29
Tableau 3: Clé d'identification de l'activité des glaciers rocheux .....	32
Tableau 4: Distribution et surface des glaciers rocheux, par département et par bassins versants, pour chaque catégorie d'activité .....	36
Tableau 5: Surface et distribution altitudinale des glaciers rocheux par rapport aux autres formes répertoriées, par bassin versant .....	48
Tableau 6: Détail du calcul du volume de glace dans les deux zones étudiées.....	53
Tableau 7: Tableau des glaciers rocheux, au départ cartographiés comme fossiles ou inactifs, .....	55
Tableau 8: récapitulatif des glaciers rocheux détectés par interférométrie radar, et leur vitesse de déplacement.....	56

# **Annexes**

- **Annexe 1 : Loi 26.639 sur la protection des milieux périglaciaires**
- **Annexe 2 : Comparaison tables attributaires des glaciers rocheux des Alpes et des Andes**

## Extrait de la Loi 26.639 « Medio Ambiente » - Articles 4 et 5

ARTICULOS 4º y 5º.- A los efectos de los artículos que se reglamentan, se establece que los objetivos específicos del Inventario Nacional de Glaciares atiende a los siguientes fines:

- 1) Implementar metodologías apropiadas para un mapeo y monitoreo eficiente y detallado de los cuerpos de hielo en las distintas regiones del país;
- 2) Desarrollar recursos humanos en la República Argentina a fin de abordar la implementación y ejecución de dicho Inventario y asegurar su continuidad en el tiempo;
- 3) Definir el tipo y nivel de detalle necesario para que la información glaciológica y geocriológica obtenida permita un manejo adecuado de las reservas estratégicas de recursos hídricos;
- 4) Organizar la base de datos del Inventario Nacional de Glaciares de manera eficiente y ordenada utilizando un sistema de informática "on line" de almacenamiento, intercambio y publicación de los resultados parciales y/o finales;
- 5) Establecer un sistema integrado de observaciones de "cuerpos de hielo / clima" que permita a través de un monitoreo periódico y en sitios cuidadosamente seleccionados, determinar los principales factores climáticos que afectan la evolución de las reservas estratégicas de recursos hídricos en el corto y largo plazo;
- 6) Sentar las bases que permitan continuar con el monitoreo, análisis e integración de la información referente a los glaciares y crioformas en las provincias cordilleranas de manera que las instituciones provinciales y nacionales puedan definir estrategias y políticas adecuadas de protección, control y monitoreo de sus reservas de agua en estado sólido y que las Instituciones Universitarias puedan usar esta información como herramientas para la investigación científica;
- 7) Identificar posibles impactos por la pérdida de las masas de hielo que podría tener sobre el manejo de los recursos hídricos y otras actividades humanas asociadas; y
- 8) Establecer un Programa de Difusión de la información resultante del Inventario Nacional de Glaciares, a través de una política de datos abierta y

de libre acceso a la información, con el fin de promover los conocimientos adquiridos e incentivar su uso por parte de organismos públicos y privados, los tomadores de decisiones, educadores, científicos y el público en general. El Inventario Nacional de Glaciares se organizará geográficamente por grandes Regiones que agrupan cuerpos de hielo con características morfológicas y medioambientales relativamente similares, a cuyo fin se incluye la siguiente clasificación:

- A) Andes Desérticos, que incluye todo el Noroeste Argentino y el sector norte de la Provincia de San Juan, incorporando la cuenca del Río Jachal;
- B) Andes Centrales, que incluye la Región desde la cuenca del Río San Juan en la Provincia del mismo nombre hasta la cuenca del Río Colorado de la Provincia del Neuquén;
- C) Andes del Norte de la Patagonia, que incluye desde la cuenca del Río Neuquén hasta las Cuencas de los Ríos Simpson, Senguerr y Chico en la provincia de Santa Cruz;
- D) Andes del Sur de la Patagonia, que incluye las cuencas del Río Deseado y los Lagos Buenos Aires y Pueyrredón, hasta las cuencas del Río Gallegos y Río Chico en la Provincia de Santa Cruz;
- E) Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur.

Dentro de estas regiones y cuencas principales, los trabajos de Inventario se focalizarán en las subcuencas hídricas que posean aporte de cuerpos de hielo permanentes. El Inventario Nacional de Glaciares se implementará mediante una estrategia de observación jerárquica de todos los glaciares y crioformas del país, consistente en aplicar TRES (3) sistemas escalonados de estudio o niveles:

Nivel 1: Identificación, mapeo y caracterización de los glaciares y geoformas periglaciales que actúan como reservas hídricas en el territorio Nacional.

Nivel 2: Estudio de fluctuaciones recientes en las últimas décadas y años, de cuerpos de hielo seleccionados.

Nivel 3: Estudios detallados de cuerpos de hielo seleccionados en las distintas Regiones del país.

ID_local	Tipo_geof	Forma	Origen_GE	Act_GE	Forma_GE	Area	Comments
G6985300338106S	GEA		1	1	2	0,0707	ok
G6987620338211S	GC	6				0,9772	ok
G6982380338122S	GEA		1	1	1	0,0431	ok
G6967940334879S	GD	5				1,4115	ok
G6984560338405S	GEI		1	2	1	0,0145	changed to inactive, morphological criteria
G6968830335014S	GD	5				1,3073	ok
G6984910338419S	GEA		1	1	1	0,1919	ok
G6966980334818S	MN					0,2576	ok
G6985810338441S	GEA		1	1	1	0,1922	ok
G6986560338723S	GEA		1	1	4	0,2987	ok
G6986030338812S	GCGE	4				0,1437	changed to GCGE based on morphological criteria

**Forma:**

0. Incierto
1. Cuencas compuestas
2. Cuenca compuesta
3. Cuenca simple
4. Circo
5. Nicho
6. Cráter
7. Colgante
8. Grupo
9. Remanente