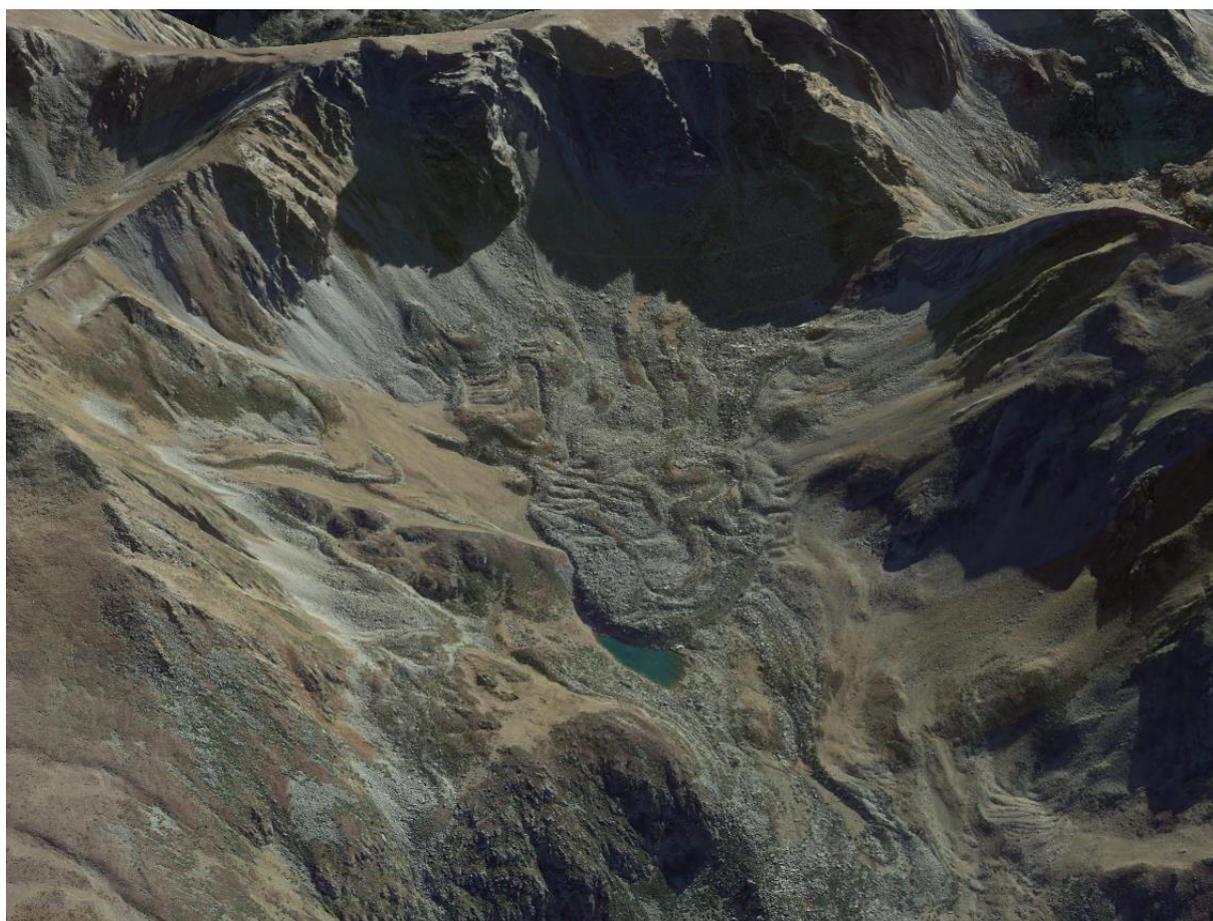


MEMOIRE DE STAGE :

Inventaire, cartographie et risques associés aux glaciers-rocheux des départements des Pyrénées-Orientales et de l'Ariège : des sentinelles du changement climatique ?



Source : Google Earth

ORIoT Gauthier

Master 2 GAED – Gestion et évaluation des environnements montagnards / Année 2021-22

Lieu de stage : Service RTM des Pyrénées-Orientales (66) de l'ONF

Maîtres de stage : CHOZNACKI Eric / Géologue au service RTM 66 (ONF) et

CHARVET Raphaële / Spécialiste expertise risques naturels RTM 05 (ONF)

Professeur référent : ANTOINE Jean-Marc / UT2J & Laboratoire GEODE UMR-5602 CNRS

Résumé :

Le changement climatique n'est aujourd'hui plus à prouver. L'ensemble des scientifiques du monde entier, porté par le GIEC, s'accordent sur ce point. L'augmentation des températures à l'échelle mondiale, qui s'accroît considérablement depuis la fin du XX^e siècle, entraîne de nombreux bouleversements auxquels il nous faut faire face. Et notamment dans nos montagnes, où ce réchauffement est particulièrement important et entraîne un fort recul des formations glaciaires, qui sont devenues le symbole de ce changement climatique. Cependant, les glaciers blancs ne représentent que la partie émergée de l'iceberg. Les formations périglaciaires, liées à la présence de pergélisol et très présentes en zone de montagne, subissent, elles aussi, un recul important et de grandes modifications. Face à ce constat, la communauté scientifique s'est saisie de ce sujet, afin d'analyser l'impact que pourrait avoir le réchauffement climatique sur l'ensemble des formations glaciaires et périglaciaires, notamment en termes de risques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude d'identification et de caractérisation des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, au sein du service RTM des Pyrénées-Orientales. Etude initiée par le Ministère de la Transition Ecologique, dans le cadre du Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaires et périglaciaires (PAPROG). Cet inventaire des glaciers-rocheux, qui est une forme caractéristique de pergélisol, est le dernier d'une longue série à l'échelle nationale qui a débuté en 2011 dans les Hautes-Alpes et qui se termine dans les Pyrénées (Pyrénées de l'Ouest en 2021 et Pyrénées de l'Est en 2022). L'objectif de ces inventaires est de cartographier l'ensemble des glaciers-rocheux observés à l'échelle nationale et surtout d'identifier ceux qui pourraient représenter un risque, notamment dans ce contexte de réchauffement climatique. Afin de mettre en place, par la suite, des ouvrages de protection ou autre afin de limiter au maximum les enjeux liés à ces aléas naturels.

Mots clés : glacier-rocheux, pergélisol, risques naturels, changement climatique, Pyrénées

Abstract :

Climate change is no longer an issue. Scientists from all over the world, supported by the IPCC, agree on this point. The increase in global temperatures, which has increased considerably since the end of the 20th century, is causing numerous upheavals that we must face. This is particularly true in our mountains, where this warming is particularly significant and is leading to a strong retreat of glacial formations, which have become the symbol of this climate change. However, white glaciers are only the tip of the iceberg. Periglacial formations, which are linked to the presence of permafrost and are very present in mountain areas, are also undergoing significant retreat and major changes. Faced with this observation, the scientific community has taken up this subject in order to analyse the impact that global warming could have on all glacial and periglacial formations, particularly in terms of risks.

It is in this context that this identification and characterisation study of the rocky glaciers of the Eastern Pyrenees is being carried out by the RTM service of the Eastern Pyrenees. This study was initiated by the Ministry of Ecological Transition, within the framework of the Action Plan for the Prevention of Risks of Glacial and Periglacial Origin. This inventory of rock glaciers, which is a characteristic form of permafrost, is the last in a long series on a national scale that began in 2011 in the Hautes-Alpes and will end in the Pyrenees (Western Pyrenees in 2021 and Eastern Pyrenees in 2022). The aim of these inventories is to map all the rocky glaciers observed on a national scale and above all to identify those that could represent a risk, particularly in this context of global warming. In order to set up, thereafter, protection works or other to limit to the maximum the stakes related to these natural hazards.

Keys words : rockglacier, permafrost, natural risks, climate change, Pyrenees

Remerciements :

La réalisation de ce mémoire a été rendu possible grâce à l'aide et au soutien de plusieurs personnes que je souhaite remercier ici.

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du personnel du service RTM des Pyrénées-Orientales pour leur accueil, leur gentillesse, ainsi que leur aide et leurs conseils précieux durant toute la durée de ce stage. Mon intégration au sein de l'équipe c'est fait très naturellement grâce à vous et je tenais à vous témoigner toute ma gratitude pour cela. D'autant plus que vous m'avez fait découvrir de nombreux aspects du travail réalisé au service RTM tout au long de ce stage en me permettant de vous accompagner à de nombreuses reprises lors de sorties qui n'avaient rien à voir avec mon stage (plan d'aménagement en forêt domaniale RTM, état d'ouvrage pour un EBR, tournée inter-massif...).

Je souhaite également remercier l'ensemble des collègues du RTM 09-31 (Carine, Nadège, Emmanuel, Benjamin) qui se sont libérés du temps afin de pouvoir m'accompagner lors des sorties terrains sur le département de l'Ariège. Ce fut à chaque fois de très belles journées très instructives où j'ai pu profiter de vos connaissances du terrain et des milieux montagnards pour développer les miennes.

Je voudrais aussi remercier les collègues RTM des Alpes qui font partie du PAPROG pour leur écoute et leurs commentaires durant les quelques réunions concernant l'avancée de mon stage, réunions qui m'ont également permis d'avoir un aperçu de l'ensemble des missions des services RTM concernant les risques glaciaires et périglaciaires.

Ensuite, je voudrai remercier chaleureusement et tout particulièrement Raphaële CHARVET qui m'a accompagné durant toute la durée de mon stage. Merci pour t'as bonne humeur quotidienne et pour tout ce temps que tu m'as consacré, que ce soit lors des visios ou pour corriger mes différents rendus. Merci également de t'être déplacé jusque dans les Pyrénées-Orientales afin de m'enseigner notamment quels sont les choses à faire lors d'une sortie terrain sur un glacier-rocheux ou encore les règles de sécurité à appliquer lors d'une sortie en montagne.

Je souhaite également remercier mon tuteur universitaire Jean-Marc Antoine, qui a accepté de me suivre et de m'encadrer au cours de ce stage.

Enfin, je remercie tous mes proches et mes amis, pour leur soutien dans mes études et pour me permettre de m'évader dès que j'en ressens le besoin. Et plus particulièrement Johanna, sans qui je n'en serai pas à ce stade aujourd'hui, pour son soutien inconditionnel qui m'aura énormément apporté tout au long de mes études universitaires.

Sommaire :

Introduction :	6
I. Contexte du stage :	7
1. Présentation de la structure :.....	7
2. Présentation des missions :.....	8
3. Présentation de la zone d'étude :	9
II. Etat de l'art.....	12
1. Le pergélisol, une particularité des environnements froids :	12
2. Les glaciers-rocheux, une forme caractéristique de la présence de permafrost :	18
3. Le contexte particulier des Pyrénées de l'Est :	29
III. Inventaire des glaciers-rocheux dans les Pyrénées de l'Est :.....	37
1. Déroulement de la mission de stage :.....	37
2. Méthodologie appliquée :.....	38
IV. Résultats :	49
1. Répartition d'activité :.....	49
2. Répartition géographique :	50
3. Répartition altitudinale :	52
4. Orientation des glaciers-rocheux :	55
5. Longueur des glaciers-rocheux :	57
6. Surface des glaciers-rocheux :.....	58
7. Risques associés aux glaciers-rocheux :.....	59
V. Discussions et mise en perspectives :	61
1. Discussions : en quoi les glaciers-rocheux peuvent être perçus comme des sentinelles du changement climatique ?	61
2. Retour d'expérience : Limites et suites à donner	62
3. Retour d'expérience : apport du stage	64
Conclusion :	65
Bibliographie :	67
Sitographie :	71

Liste de sigles :

BP : Before Present

EDYTEM : Laboratoire Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne

GR : Glacier-Rocheux

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

LGM : Last Glacial Maximum (dernier maximum glaciaire)

MTEC : Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires

MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

NRCC : National Research Council of Canada

ONF : Office National des Forêts

OSUG : Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

PAPROG : Plan d'Actions de Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et périglaciaire

P-O : Pyrénées-Orientales

RTM : Restauration des Terrains en Montagne

SIG : Système d'Information Géographique

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

Introduction :

Notre planète connaît une hausse des températures depuis la fin du petit âge glaciaire (qui a duré approximativement du début du XIV^e siècles à la fin du XIX^e), qui s'est accentuée de manière significative depuis la fin du XX^e siècles, en raison principalement des activités humaines comme l'ont démontré les derniers rapports du GIEC en date. Cette augmentation des températures est particulièrement importante dans les zones de montagne. En effet, au cours du XX^e siècles, l'augmentation des températures est évaluée à +2°C dans les Alpes et entre +0,9°C et +1,1°C dans les Pyrénées contre +0,74°C à l'échelle mondiale (UICN, 2016). Cette augmentation entraîne des répercussions directes sur l'état du pergélisol (ou permafrost en anglais) en zone de montagne. Qui peut être défini comme « *un matériau de la lithosphère (roche ou sol) qui reste à 0°C ou moins pendant minimum deux années consécutives* » (NRCC, 1988). Les glaciers-rocheux sont l'une des principales morphologies caractéristiques de présence de permafrost. Le réchauffement climatique actuel peut donc avoir un effet sur l'évolution de ces entités et éventuellement générer des risques dans certains cas. En effet, la dégradation du pergélisol, qui peut être considéré comme le ciment des montagnes, peut engendrer des aléas tels que des glissements de terrain, des éboulements rocheux ou encore des laves torrentielles. Principalement dans des zones de fortes pentes, ce qui peut induire des risques sur les populations locales installées à proximité de ces zones de pergélisol. Les milieux montagnards étant de plus en plus attractifs ces dernières années en termes de production d'énergie, d'exploitation des ressources, mais surtout de tourisme, cela accentue toujours plus la vulnérabilité de ces enjeux aux aléas naturels (Perrier, 2014).

Dans ce contexte, les services RTM (Restauration des Terrains en Montagne) se sont emparés de ce sujet et notamment du cas des glacier-rocheux. Un glacier-rocheux est « *un amas de blocs sursaturé en glace qui se déplace lentement vers l'aval, en présentant une forme de langue/lobe/spatule. Il représente la forme la plus typique du fluage de matériaux meubles soumis à des conditions de pergélisol en milieu alpin* » (Société Suisse de Géomorphologie). Depuis 2008, les services RTM travaillent sur ce sujet à travers notamment la réalisation d'une étude pour l'évaluation des risques liés à la dégradation des glaciers-rocheux dans les bassins torrentiels de Haute-Savoie (Garcia, 2008 et 2009). Suivi d'une méthodologie d'inventaire et d'analyses aléas/enjeux/risques réalisée en 2010-2011 dans le département des Hautes-Alpes. Méthodologie qui a par la suite été perfectionnée et généralisée à l'ensemble des départements alpins entre 2011 et 2017 (Alpes de Haute-Provence, Alpes Maritime, Isère, Savoie et Haute-Savoie). Avant d'être poursuivi dans la chaîne pyrénéenne dans le cadre du Plan d'Actions de Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et périglaciaire (PAPROG), financé par le Ministère de la Transition Ecologique, afin d'avoir un inventaire complet des glaciers-rocheux à l'échelle nationale.

La première partie de cet inventaire a été effectuée en 2021 au sein du service RTM 65-64, sur la partie Ouest des Pyrénées, regroupant les départements des Pyrénées-Atlantiques, des Hautes-Pyrénées et de la Haute-Garonne (Voisin, 2021). Ce stage consiste à finir cet inventaire au sein de la chaîne pyrénéenne en poursuivant ce-dernier sur la partie Est des Pyrénées

regroupant les départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. Ce stage se déroule dans l'agence RTM des Pyrénées-Orientales situé à Perpignan, en relation avec les autres services RTM français et notamment celui des Hautes-Alpes avec le soutien de Raphaële Charvet, experte en risques naturels et spécialiste des questions autour des glaciers-rocheux.

A travers ce travail d'identification et de caractérisation des glaciers-rocheux dans l'Est des Pyrénées. L'intérêt de ce mémoire a été d'établir un lien entre glacier-rocheux et réchauffement climatique à travers la question : **En quoi les glaciers-rocheux sont-ils des sentinelles du changement climatique ?**

Pour répondre à cette question, nous commencerons par établir le contexte du stage avant de réaliser un état de l'art de l'ensemble des connaissances scientifiques sur le pergélisol de montagne et notamment sur l'une de ses principales topographies ; les glaciers-rocheux. Ainsi que l'éventuelle corrélation entre forme de pergélisol et réchauffement climatique. Ensuite, nous détaillerons dans un second temps, le cadre méthodologique de cette mission d'inventaire dans l'Est des Pyrénées. Avant de présenter, pour finir, les résultats de cette étude qui pourront faire l'objet de discussions et nous aider à répondre à notre problématique.

I. Contexte du stage :

1. Présentation de la structure :

Les services de restauration des terrains en montagne sont issus des lois de 1860 et 1882 qui portent sur la restauration et la conservation des terrains de montagne. L'objectif initial de ces services est de lutter contre les risques d'érosion, les aléas naturels gravitaires et la régularisation du régime des eaux, à travers notamment des corrections torrentielles et des reboisements de bassin-versant (Lailly, 2010 – *irma-grenoble.com*). La création de ces services intervient à la suite d'une période de surpopulation des milieux montagnards, qui a eu comme principale conséquence le déboisement intensif des versants à des fins de construction d'ouvrages, de production de charbon via des charbonnières ou encore de bois de chauffe. Ce déboisement intensif a rendu les populations montagnardes vulnérables aux aléas naturels, présents en nombre dans ces milieux (glissement de terrain, chute de bloc, avalanche, lave torrentielle...). Cette situation problématique a donc mené aux lois de 1860 et 1882 et à la création des services RTM. Depuis sa création en 1966, ces services sont intégrés à l'Office national des forêts (ONF), dont les principales missions sont la protection et la gestion durable des forêts, la contribution au développement durable et à l'attractivité des territoires et donc la prévention et la gestion des risques naturels à travers les services RTM (*site officiel de l'ONF*).

Aujourd'hui, la demande sécuritaire a évolué et les missions des services RTM se sont élargies. Ils comprenaient 121 agents en 2014 (ce chiffre a depuis baissé en raison des politiques de

désengagement de l'Etat), répartis dans l'ensemble des départements des Alpes et des Pyrénées, à savoir onze départements (Arnould *et al*, 2016). L'activité de ces services est financée par le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires (MTEC), qui a la charge de la prévention des risques sur l'ensemble du territoire français et par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF), qui a lui la charge de l'espace forestier français. Les missions des services RTM s'étendent aujourd'hui à l'ensemble des thématiques relatives à la prévention des risques naturels en montagne. Ils incluent la caractérisation et l'expertise de ces risques, l'étude de diagnostic, la gestion et la construction d'ouvrages de protection et concernent une grande partie des risques naturels présents en montagne, à savoir les glissements de terrain, les phénomènes de crues et de laves torrentielles, les chutes de blocs et les avalanches (Lailly, 2010). Seuls les risques incendies et sismiques ne relèvent pas de l'autorité des services RTM.

Ce stage se déroule donc au service RTM des Pyrénées-Orientales, qui est l'un des neuf services RTM français (les quatre autres départements des Pyrénées Françaises étant regroupés en deux services RTM : le service RTM 64-65 et le service RTM 31-09) et dont les compétences décrites plus tôt s'étendent aux départements des Pyrénées-Orientales et de l'Aude. Ils ont également une mission d'expertise en forêt domaniale du Rouvergue dans le département du Gard.

2. Présentation des missions :

L'objectif de ce stage est donc de réaliser l'inventaire et la cartographie des glaciers-rocheux au sein des départements de l'Ariège (09) et des Pyrénées-Orientales (66), ainsi que de caractériser les éventuels risques associés à ces formations. Cette mission s'inscrit dans le cadre du PAPROG, financé par le ministère de la transition écologique, et consiste à évaluer les risques que pourraient générer la dégradation de ces formations de roche et de glace compactée dans le cadre du changement climatique actuel. Changement qui induit une hausse des températures particulièrement importante dans les zones de montagne – comme on l'a vu en introduction – et qui joue un rôle certain sur l'état de dégradation du pergélisol, dont l'une des formes les plus caractéristiques est le glacier-rocheux.

En tant que gestionnaire des risques naturels en montagne sur le département, le service RTM des Pyrénées-Orientales a logiquement été mis à contribution afin de finaliser l'inventaire de ces formes au sein du massif pyrénéen, et d'identifier l'ensemble des potentiels sites à risques sur le territoire. Inventaire qui a débuté en 2021 au sein du service RTM 64-65 sur les départements des Pyrénées-Atlantiques, des Hautes-Pyrénées et de la Haute-Garonne. Cette mission s'inscrit parfaitement dans le cadre de compétence des services RTM que l'on vient de décrire en termes de gestion des aléas naturels. Cependant, outre l'objectif de protection des populations et des infrastructures à d'éventuels risques qui pourraient provenir des glaciers-rocheux dans ce contexte de changement climatique, cette mission a également un volet recherche, à travers l'objectif de mieux connaître la montagne et les formes caractéristiques qui la composent. En effet, les glaciers-rocheux ne sont étudiés que depuis le

début du XX^e siècles à l'échelle mondiale, comme on le verra plus tard. Mais l'étude de ces derniers au sein du massif pyrénéen reste minime pour le moment et principalement en ce qui concerne la partie orientale des Pyrénées. La majorité des études ayant été réalisées sur les massifs des Hautes-Pyrénées où sont situés les plus hauts sommets de la chaîne. Seul quelques études espagnoles récentes centrées sur les glaciers-rocheux ont inventorié quelques individus dans la partie Est des Pyrénées, mais sinon les études réalisées jusqu'à présent se concentrent majoritairement sur les cycles glaciaires passés et les formes qui lui sont associées aujourd'hui, plutôt que sur les glaciers-rocheux en eux même. Comme c'est par exemple le cas de la thèse de Magalie Delmas qui traite des impacts géomorphologiques des dernières glaciations dans l'Est des Pyrénées au sein de laquelle les glaciers-rocheux sont rapidement évoqués, mais ne sont clairement pas le sujet principal. Cette étude d'inventaire et de caractérisation de l'ensemble des glaciers-rocheux dans l'Est des Pyrénées pourra donc servir de base par la suite à des études plus poussées sur le sujet. Et, dans le cadre des actions du service RTM, mené à d'éventuels systèmes de suivi ou d'alerte, des ouvrages de protection, etc., pour sécuriser des potentiels enjeux.

3. Présentation de la zone d'étude :

Cette mission de stage va donc se dérouler au sein des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales, et plus précisément sur les hauteurs de ces deux départements au sein de la chaîne pyrénéenne, dans le Sud de la France. Ces deux départements ont tous les deux des frontières communes avec l'Andorre et l'Espagne au Sud et font partie de la région Occitanie. Comme on peut le voir sur la carte ci-dessous, les Pyrénées-Orientales sont donc entourées par l'Espagne au Sud, l'Andorre à l'Ouest, l'Ariège et l'Aude au Nord et enfin la mer Méditerranée à l'Est. Tandis que l'Ariège est, elle, entouré par (de droite à gauche) les Pyrénées-Orientales, l'Andorre et l'Espagne au Sud, la Haute-Garonne à l'Ouest et au Nord et l'Aude à l'Est.



Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Source : d-maps.com

L'Ariège est un département à dominance rurale qui s'étend sur 4 837,7 km², qui compte 153 066 habitants en 2018 (*chiffres de l'Insee*), et dont la préfecture est Foix. Il tient son nom de la rivière éponyme qui s'étend sur toute sa longueur. Ce territoire est composé de trois grandes zones géographiques distinctes comme on peut le voir sur la figure 2 (*ariégeois.fr*) :

- La plaine d'Ariège qui s'étend au Nord du département, constituée de plaines, de petites collines et de faibles vallons. C'est une zone à forte dominance agricole composée principalement de culture de tournesol, de maïs et de prairies.
- Le piémont pyrénéen plus au Sud, qui regroupe les premières collines pré-pyrénéennes et le massif du Plantaurel qui dépasse que très rarement les 1000m d'altitude. Il forme un paysage contrasté composé de diverses structures géologiques granitiques et calcaires.
- Le haut pays ariégeois qui se compose des hautes montagnes pyrénéennes et qui s'étend sur toute la partie Sud du département, à la frontière avec l'Espagne, l'Andorre et les Pyrénées-Orientales (en allant de gauche à droite). Cette zone est donc entièrement composée de « moyennes montagnes » avec comme point culminant la pique d'Estats qui s'élève à 3 143m d'altitude. Mais globalement, les sommets qui vont au-delà des 3000m sont peu nombreux. C'est donc une zone à la morphologie très chaotique où la forêt domine à basse altitude pour laisser place à des amas de roches en hauteur.

C'est donc cette dernière zone qui va nous intéresser plus particulièrement ici, étant donné que comme on le verra plus tard, la présence des glaciers-rocheux s'observe à partir de 1800m d'altitude approximativement.

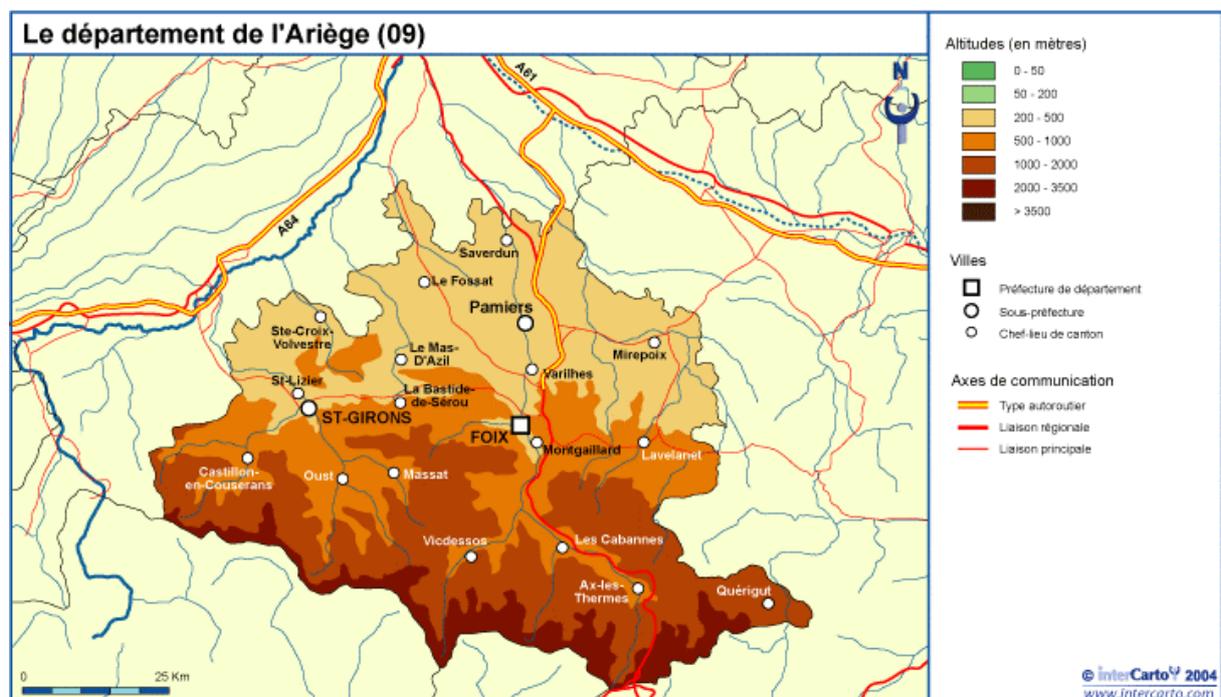


Figure 2 : Aire géographique du département de l'Ariège.

Source : intercarto

Les Pyrénées-Orientales sont quant à eux un département qui tient son nom de sa position géographique à l'extrême Est de la chaîne des Pyrénées, au bord de la Méditerranée. Il s'étend sur une superficie de 4 116 km² pour 476 357 habitants en 2018 (*Insee*), soit plus de trois fois la population de l'Ariège pour une superficie inférieure, et sa préfecture est Perpignan. Ce département est composé d'une très grande diversité de paysages avec, en allant de l'Est vers l'Ouest (figure 3) (*L'atlas des paysages du Languedoc-Roussillon*) :

- Le littoral du Roussillon le long de la côte méditerranéenne, qui est la zone la plus peuplée du département où se situent notamment les stations balnéaires d'Argelès-sur-Mer, Canet-en-Roussillon ou encore Port-Barcarès. Les reliefs y sont inexistant mis à part au Sud du département où on retrouve le massif des Albères et la côte Vermeille qui correspondent au lieu où les Pyrénées se jettent dans la mer.
- La plaine du Roussillon a majorité agricole avec notamment une arboriculture fruitière importante ou encore de nombreux espaces viticoles.
- Le piémont pyrénéen composé de trois vallées distinctes (les Fenouillèdes, le Conflent et le Vallespir du Nord au Sud) qui incisent les premières montagnes pyrénéennes. Cette région est majestueusement dominée par le massif du Canigou qui culmine à 2 784m et qui marque le début de la chaîne.
- Les hauts plateaux pyrénéens que sont la Cerdagne et le Capcir respectivement situés à 1200 et 1500 mètres d'altitude. Entouré de nombreux massif qui culminent pour la plupart à plus de 2900m (Puigmal, Campcardos, Carlit).

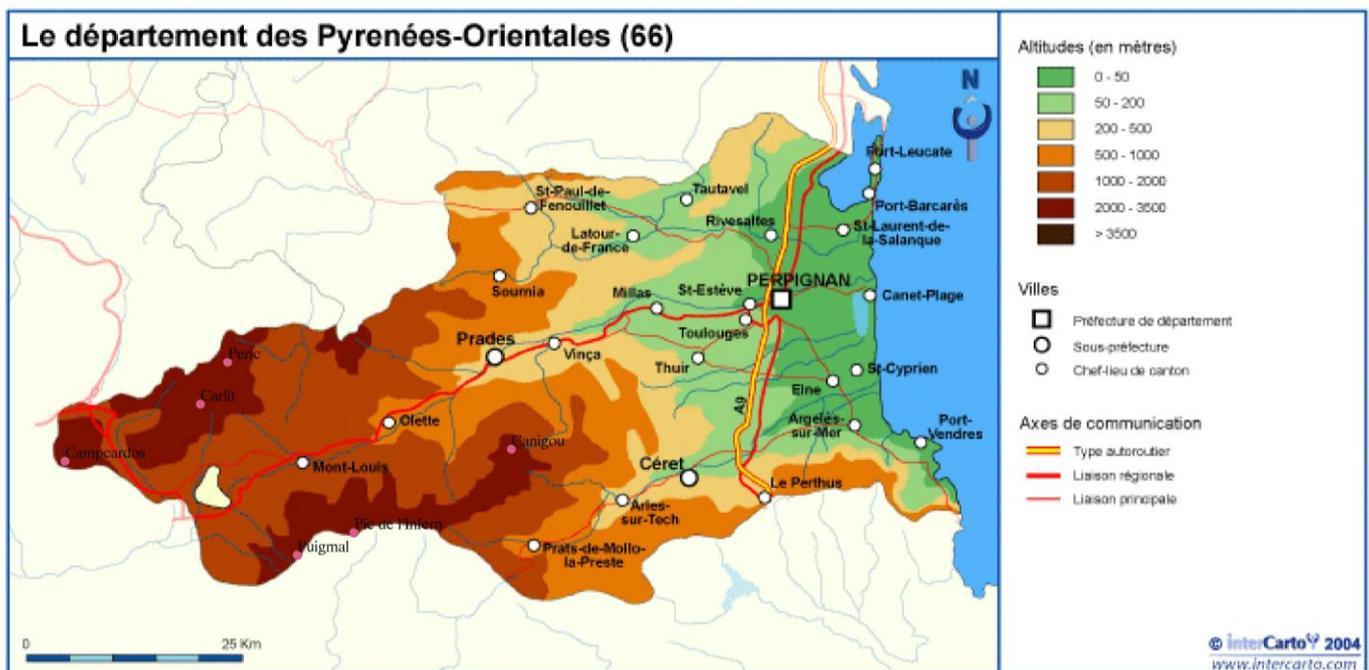


Figure 3 : Aire géographique du département des Pyrénées-Orientales.

Source : intercarto

Les territoires qui vont particulièrement nous intéresser dans ce département correspondent à l'ensemble des massifs de haute altitude, à savoir le massif du Campcardos, du Carlit, des

Camporells (Pic Péric), et du Puigmal qui sont tous situés dans la partie Ouest du département autour des hauts plateaux et qui culminent pour la plupart à plus de 2900m d'altitude. Mais également le massif du Canigou situé dans la zone du piémont pyrénéen (voir carte). Cette étude va donc porter sur les parties montagnardes de ces deux départements.

Maintenant qu'on a vu dans quel contexte s'inscrit ce stage à travers la présentation de la structure d'accueil, la présentation des missions de stage ainsi que la description de notre zone d'étude. Nous allons désormais pouvoir nous intéresser de manière plus approfondie au sujet de ce stage, à savoir les glaciers-rocheux. En commençant par réaliser un état de l'art autour de ce sujet.

II. Etat de l'art

Nous allons donc désormais nous intéresser plus particulièrement au sujet de ce stage, à travers un état de l'art autour du thème des glaciers-rocheux. Pour cela, il s'agira dans un premier temps de s'attarder sur la notion de pergélisol, comme particularité des environnements froids et notamment montagnards. Avant d'étudier en détail dans un deuxième temps, la forme caractéristique du pergélisol qui nous intéresse ici ; les glaciers-rocheux. Et enfin, pour finir, nous nous attarderons sur les caractéristiques et le contexte particulier des Pyrénées de l'Est sur l'ensemble de ces questions.

1. Le pergélisol, une particularité des environnements froids :

a) Définition :

Pour rappel, et comme on l'a déjà brièvement vu durant l'introduction, le pergélisol défini des « *matériaux de la lithosphère (sol ou roche) qui reste à 0°C ou moins pendant minimum deux années consécutives* » (NRCC, 1988). Cela représente donc une couche de sol qui est constamment gelé. Sa présence se limite à la surface de la terre, aux hautes altitudes et aux hautes latitudes en plaine (pergélisol circum-polaire). Selon le site internet de l'Université de Lausanne, « le pergélisol est un phénomène purement thermique, qui affecte tous les types de roches ou de sédiments, ce qui n'implique pas nécessairement la présence de glace. Celle-ci n'est possible que si la porosité des matériaux le permet » (Bonnetain, 2010).

Le pergélisol a un fonctionnement complexe dû à un bilan d'énergie de surface négatif, qui va refroidir durablement le sol. Au niveau de sa surface, le sol est soumis au rayonnement solaire ainsi qu'aux variations de températures saisonnières, qui vont venir réchauffer ou refroidir le sol et se propager en profondeur. Cependant, ces variations s'atténuent au bout d'un moment en raison de la faible conductivité thermique de ce-dernier. Au-delà d'une certaine profondeur, la température devient donc stable et la variation saisonnière est nulle, c'est ce

qu'on va appeler la profondeur d'amplitude annuelle nulle (ZAA en Anglais pour Zero Annual Amplitude), (figure 4). Lorsque les conditions climatiques en surface sont, en moyenne sur l'année, inférieures ou égales à 0°C, et que les autres caractéristiques du sol sont favorables, cette zone va être gelée en permanence ; c'est ce qu'on appelle le pergélisol. En-dessous de cette zone qui peut varier entre 10 et plus de 100m de profondeur comme on le voit sur la figure ci-dessous, la température augmente petit à petit avec la profondeur en raison du gradient géothermique. On appelle cette limite la base du pergélisol. Tandis que la zone supérieure du sol qui subit les variations de températures saisonnières est appelé la couche active en raison des nombreux processus géomorphologiques qui s'y déroulent dû notamment au cycle gel/dégel. Cette zone oscille généralement entre 3 et 5m de profondeur dans les Alpes (*PermaFRANCE*).

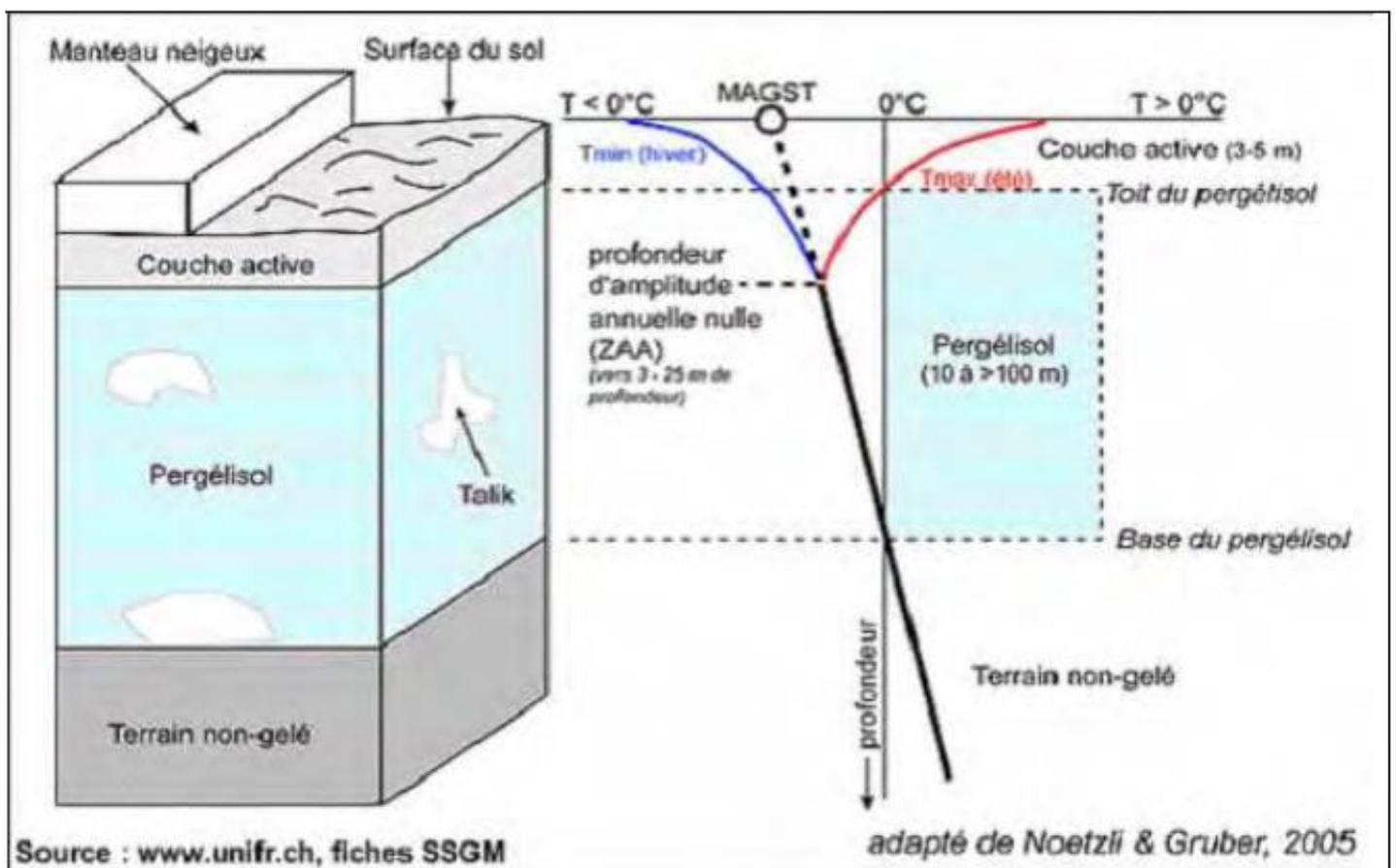


Figure 4 : Stratigraphie générale du pergélisol.

Source : unifr.ch, fiches SSGM

b) Caractérisation :

La présence de pergélisol est donc fortement liée au climat global et se retrouve dans des zones aux conditions extrêmes. Mais elle est également fortement influencée par des facteurs locaux tels que l'exposition, la végétation, l'humidité qui va favoriser le gonflement cryogénique ou encore la lithologie. En effet, les roches d'origine magmatique sont par

exemple favorables à l'extension du pergélisol, en raison notamment de la structure « openwork » de leurs régolites qui va venir faciliter la préservation de la glace (Feuillet, 2010).

En fonction de la surface occupée par le pergélisol, on distingue quatre types de permafrost (*PermaFRANCE*) :

- Le permafrost continu ; qui couvre plus de 80% de la surface (on peut retrouver au sein de ces espaces des zones non gelées que l'on appelle des taliks (figure 4)), notamment sous les rivières et les lacs ou encore au sein de secteur de microclimat chaud).
- Le permafrost discontinu ; qui lui couvre entre 30 et 80% de la surface en fonction des conditions climatiques et des caractéristiques locales.
- Le permafrost sporadique ; qui couvre moins de 30% de la surface, où là, on retrouve du pergélisol uniquement dans des zones favorables.
- Et enfin, le permafrost en taches ; où comme son nom l'indique, on retrouve seulement des taches isolées de pergélisol dû à des phénomènes particuliers qui refroidissent le sol localement, ou à des conditions climatiques locales particulières.

Ce-dernier type de pergélisol étant très particulier et assez peu répandu de manière globale et au sein de notre zone d'étude, on va le laisser de côté pour la suite de cette étude. En revanche, concernant les trois autres types de pergélisol que l'on vient de voir, le référentiel pédologique français retient en 1995 les isothermes annuels de (Feuillet *et al.*, 2008) :

- 0°C pour la limite inférieure du pergélisol sporadique
- -1°C pour celle du pergélisol discontinu
- -5°C pour celle du permafrost continu

Sachant que l'isotherme annuel 0°C se situe en moyenne vers 2750m d'alt en versant Nord sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne (Feuillet, 2010). On peut en déduire que notre zone d'étude, qui dépasse que très rarement les 3000m d'altitude, est principalement concerné par du pergélisol sporadique. A noter, que l'isotherme 0°C hivernal varie lui entre 1500 et 1700m d'alt selon les versants dans les Pyrénées (Del Barrio *et al.*, 1990).

Cependant, cette distinction s'applique principalement aux zones de haute latitude, et plus difficilement en zone de montagne où l'on préférera distinguer le pergélisol selon le type de terrain et la pente. On va alors retrouver (*PermaFRANCE*) :

- Le pergélisol en parois rocheuses (glace contenue dans les fissures de la roche dès 3000m d'alt environ dans les Alpes).
- Le pergélisol en formations superficielles (débris gelés pouvant être très riches en glace, la forme la plus répandue étant le glacier-rocheux).
- Les éboulis froids de basse et moyenne altitude (exemple de pergélisol en taches où des éboulis sont refroidis par une ventilation particulière qui alterne en fonction des saisons).

Enfin, les deux derniers paramètres déterminant le type de pergélisol auquel on a affaire, sont la température et le taux de glace dans le sol. En effet, lorsque la glace ne remplit pas entièrement les interstices de la roche où elle se trouve, on va parler de pergélisol sous-saturé,

tandis que si ce volume de glace est égal à celui des interstices, on parle alors de pergélisol saturé et enfin si le volume est supérieur à celui des interstices, on parle alors de pergélisol sursaturé (Bonnetain, 2010).

Pour finir, la température annuelle moyenne de la glace va déterminer si on parle d'un pergélisol :

- Froid (lorsque la glace est inférieure à 0°C et qu'aucune valeur instantanée n'atteint les 0°C)
- Semi-tempéré (glace proche de 0°C et valeur instantanée de 0°C enregistrées occasionnellement)
- Tempéré (glace constamment à 0°C)

A noter, que l'épaisseur de neige au niveau du sol durant la période hivernale va jouer un rôle important sur la température du sol et donc du pergélisol. En effet, cette présence de neige génère un effet isolant qui va limiter les cycles gel/dégel au niveau du sol (Feuillet, 2010). Un hiver peu neigeux va donc favoriser la perte de chaleur du sol et ainsi générer un refroidissement en profondeur, notamment au sein des glaciers-rocheux par exemple (Bodin *et al.*, 2015).

c) L'effet du réchauffement climatique sur le pergélisol :

Evoquées pour la première fois par Muller en 1947, les premières études françaises reconnaissant la présence de pergélisol et son rôle majeur dans les environnements alpins remontent elles au début des années 1980 par l'intermédiaire des thèses de chercheur comme B. Francou en 1981 ou encore M. Evin en 1983. Ce thème a ensuite été un peu oublié jusqu'en 2003 où il a retrouvé un regain d'intérêt auprès de la communauté scientifique (Monnier, 2006 ; Bodin, 2007 ; Ravel, 2010 ; Echelard et Perrier, 2014). Ces recherches ont révélé l'immense étendue potentielle de pergélisol au sein des Alpes françaises qui est estimée entre 700 et 1500 km² selon les chercheurs, soit entre 10 et 20% des terres au-dessus des 2000m d'altitude. Ainsi que son rôle très important de stabilisation des versants notamment. En effet, le pergélisol est en quelques sortes le ciment des montagnes, qui maintient le sol en place et les blocs entre eux sous l'effet de la gravité, grâce aux quantités importantes de glace qui le compose (UICN, 2016).

Sous l'influence du réchauffement climatique, la fonte du pergélisol s'est très fortement accentuée ces 20 dernières années. Déjà durant le XX^e siècles, le pergélisol alpin s'est réchauffé de 0,5 à 0,8°C dans les premières dizaines de mètre du sol (UICN, 2016). Et on estime aujourd'hui que le pergélisol se réchauffe de 0,04 à 0,08°C par décennies dans les Alpes (Bodin, 2007). Cette fonte du pergélisol a un effet dramatique sur l'environnement et engendre une sorte de cercle vicieux. En effet, cette fonte génère des émanations importantes de méthane, qui était jusqu'alors « emprisonné » dans le sol. On rappellera que le méthane est un gaz à effet de serre 20 fois plus actifs que le CO₂. Cette fonte aurait donc un impact dramatique sur l'environnement, notamment dans des régions froides tel que la Sibérie où la

surface de pergélisol est extrêmement importante. On pourrait assister dans les prochaines années à une libération de plusieurs tonnes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui ne ferai que renforcer le réchauffement de la planète et donc la fonte de pergélisol (*PermaFRANCE*).

L'autre impact important qu'engendre cette fonte du pergélisol, est l'accentuation et la multiplication des aléas naturels au sein des espaces montagnards. En effet, si le pergélisol fond et que le sol subit des cycles de gel/dégel, il n'assure donc plus cette fonction de « ciment des montagnes » et subit une hausse de la pression en eau. Ce qui peut donc générer des chutes de bloc ou d'autres aléas gravitaires similaires. On observe déjà aujourd'hui une recrudescence et une intensification de ces aléas au sein des montagnes alpines. Notamment dans le massif du Mont Blanc où comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous, la fréquence des écroulements rocheux aux Aiguilles de Chamonix s'est très fortement accentuée depuis le début des années 1990 avec un pic très important de 182 dépôts d'écroulements observés sur les glaciers du massif du Mont Blanc lors de l'été caniculaire de 2003 (Bodin *et al.*, 2015). Le rôle de la fonte du pergélisol dans le déclenchement des 350 écroulements relevés entre 2007 et 2014 sur le graphique b) (figure 5) est très fortement probable en raison, premièrement, des altitudes de déclenchement de ces écroulements qui correspondent à l'altitude du pergélisol tempérée, mais également en raison des observations faites d'écoulement d'eau dans des cicatrices de roches où les écroulements ont eu lieu entre autres (Bodin *et al.*, 2015).

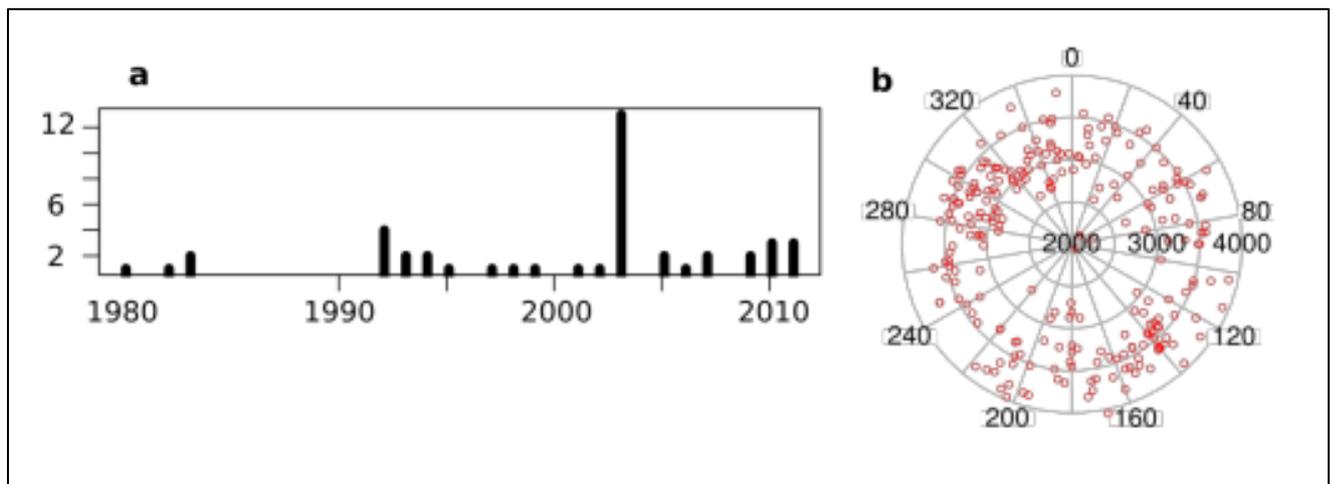


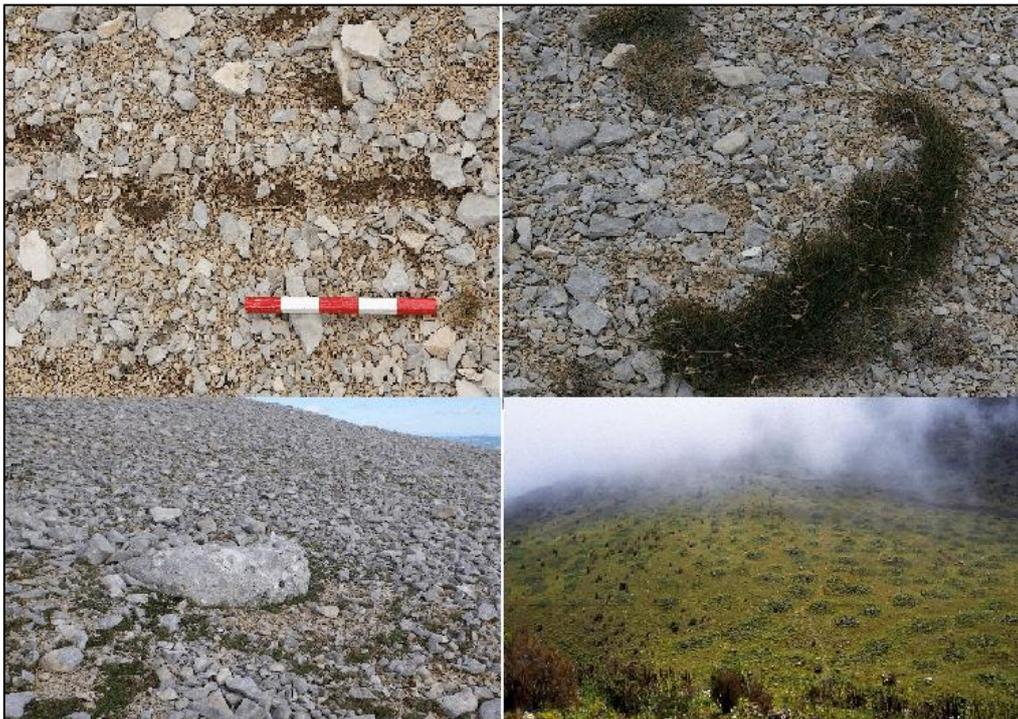
Figure 5 : a) Graphique du nombre annuel d'écroulements dans les Aiguilles de Chamonix depuis 1980, établi par photocomparaison ; b) Altitude (m) et orientation (°) de l'ensemble des écroulements recensés entre 2007 et 2011 dans le massif du Mont Blanc

Source : Bodin *et al.* 2015 ; Données : L. Ravanel

A noter que le cas du massif du Mont Blanc est loin d'être une exception, des observations réalisées par des chercheurs, randonneurs/skieurs et professionnels de la montagne sous l'impulsion du laboratoire EDYTEM, ont révélé une augmentation significative de phénomènes gravitaires dans l'ensemble de la chaîne alpine (*PermaFRANCE*).

De plus, on observe également d'autres phénomènes « nouveaux » dûs à cette fonte du pergélisol tel que des déplacements inhabituellement importants de glaciers-rocheux (sur lesquels on reviendra plus tard) ou encore l'apparition de lacs cryokarstiques (Bodin *et al.*, 2015). La dégradation actuelle du pergélisol dû principalement au réchauffement atmosphérique, mais également aux événements météorologiques extrêmes (canicules en été, enneigement important et tardif en hiver) est donc susceptible de générer des situations à risques durant les années futures.

Le pergélisol est donc un état du sol qui est très présent dans la grande majorité des montagnes du monde et aux plus hautes latitudes. Il peut générer des formes très diverses en surface telles que des sols structurés (figure 6), qui sont des sortes de bosses au niveau du sol qui ont pour origine un phénomène géomorphologique de cryoturbation. Mais également des ostioles, des blocs fluants, une discontinuité des strates de végétation ou encore des terrassettes de gélifluxion (Feuillet et Sellier, 2008). Cependant, la forme la plus caractéristique et la plus imposante de pergélisol dans les zones de montagne est le glacier-rocheux.



*Figure 6 : Terrassettes de gélifluxion (en haut à droite) ; Sols structurés (en bas à droite) ; Bloc fluant (en bas à gauche) ; Ostioles (en haut à droite)
Source : ResearchGate*

2. Les glaciers-rocheux, une forme caractéristique de la présence de permafrost :

a) Définition, Caractérisation et typologie des glaciers-rocheux :

Un glacier-rocheux (GR) peut être défini comme « *une accumulation de débris rocheux, achevées à l'aval par un front raide, présentant une forme de langue, ou de lobe, voire de spatule* » (Monnier, 2004, p. 140). Comme on l'a vu précédemment, c'est l'une des formes les plus caractéristiques du pergélisol. Celle-ci est spatialement bien délimitée, du moins dans sa partie aval par un talus frontal net qu'on appelle le front du GR, et sur les côtés par des pentes latérales raides appelées les fronts latéraux, comme on peut le voir sur la figure 7. Les fronts latéraux peuvent être atténués par des obstacles, éboulis ou autres dans certains cas, mais la présence d'un talus frontal est un critère indispensable. Sur sa surface, on distingue généralement des sillons transverses, lobes, rides, bourrelets longitudinaux (figure 7 et 8), qui sont autant de témoins du déplacement et du fluage de cette forme périglaciaire. Enfin, à l'amont, « l'origine » du glacier-rocheux est appelé la racine, qui fait la délimitation entre le GR et la zone d'éboulis qui peut être considéré comme la « zone de production » de ce dernier. Cette zone d'éboulis est généralement alimentée en matériaux plus ou moins grossiers par des parois rocheuses situés en amont.

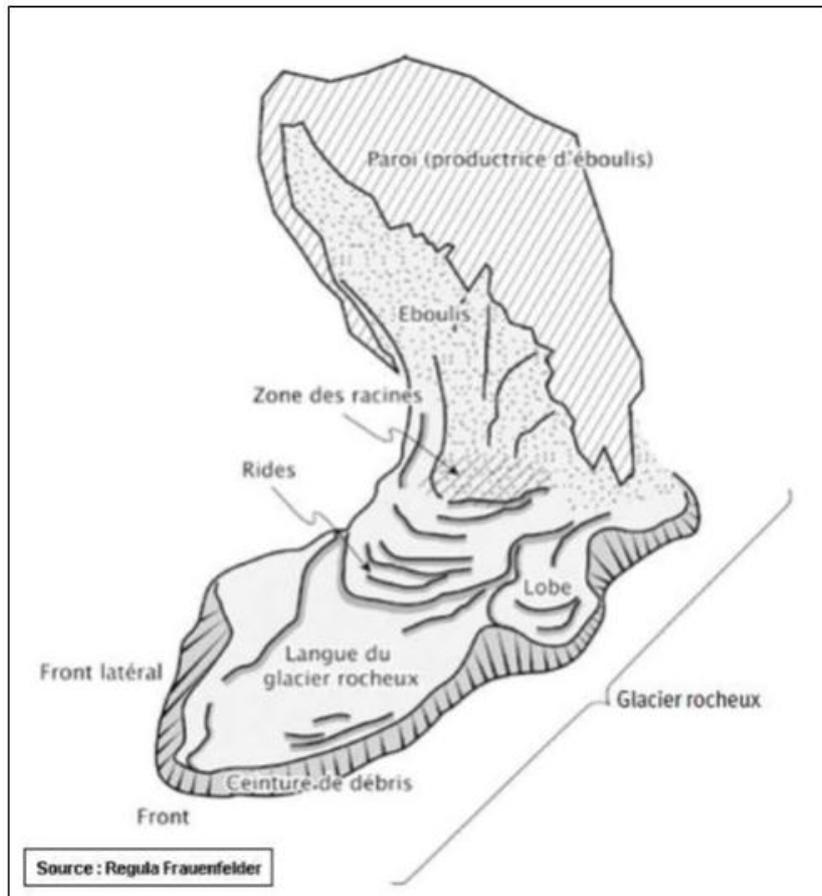


Figure 7 : Schéma d'un glacier-rocheux
Source : Bouvet et al., 2011

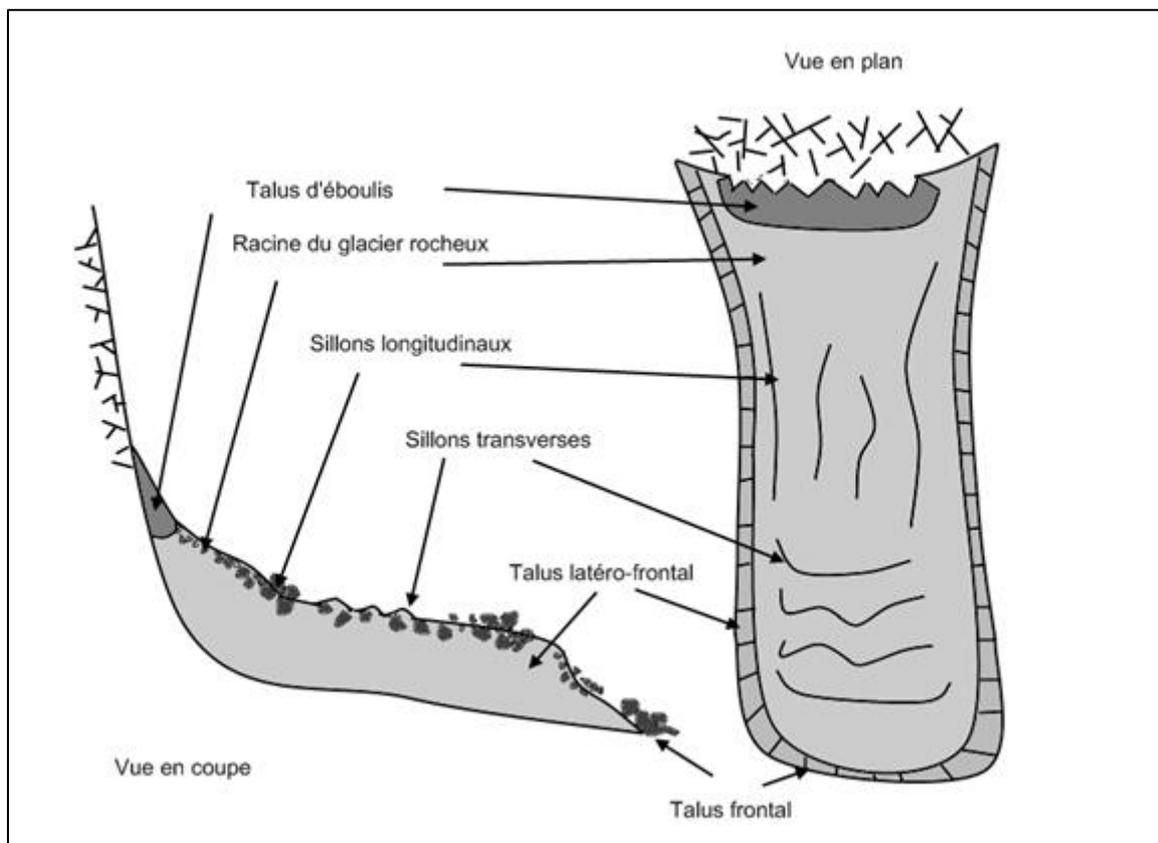


Figure 8 : Coupe longitudinale d'un glacier-rocheux
Source : Bodin, 2008

Afin d'identifier un glacier-rocheux, on distingue trois axes principaux :

- La géométrie d'ensemble
- Les caractéristiques à ses marges
- Le modèle de surface

L'un des facteurs importants lorsqu'on parle de glacier-rocheux concerne l'activité de ces derniers, qui est notamment déterminée par le taux de glace présent dans le GR. A partir de ce paramètre, on identifie trois types de GR dont les règles de distinctions ont été décrites par Wahrhaftig et Cox en 1959. On distingue donc (Bouvet *et al.*, 2011) :

- Les glaciers-rocheux actifs : qui contiennent des grandes quantités de glace en profondeur, invisible depuis la surface et qui sont en mouvement vers l'aval (pouvant aller généralement jusqu'à 2m par an). Leur corps central est bombé et composé de bourrelets marqués (figure 9).
- Les glaciers-rocheux inactifs : qui eux aussi contiennent de la glace, dans des quantités moindres, mais qui ne sont plus animés de mouvement.
- Les glaciers-rocheux fossiles : dont la totalité de la glace a fondu, qui sont donc immobiles et dont leur corps central est grandement affaissé. Ils sont souvent couverts de végétation.

La figure 9 ci-dessous permet d'avoir une idée visuelle représentative de ces trois types de formes distinctes. A noter, qu'il est parfois difficile d'identifier clairement le type de glacier-rocheux, notamment entre GR actif et inactif.

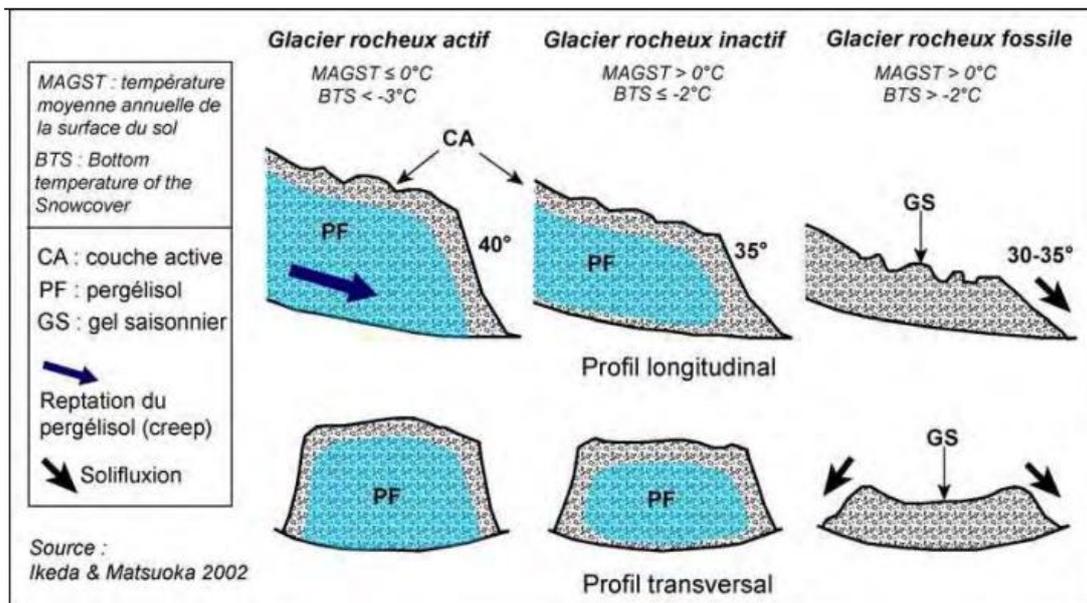


Figure 9 : Profils schématiques de glaciers-rocheux actifs, inactifs et fossiles
(adapté de Ikeda et Matsuoka, 2002)
Source : Bouvet et al., 2011)

En reprenant la typologie définie par Scappoza (2008 ; lui-même inspiré du travail de Barsch et Haerberli).

« Un glacier-rocheux est actif si :

- Le talus frontal est raide, 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 la source est inférieure à 2°C

Un glacier-rocheux est inactif si :

- La pente du talus frontale 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 frontale est <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) »

Les glaciers-rocheux sont donc des amas de roches provenant des versants, compactés par du pergélisol, qui ont des mouvements similaires aux glaciers blancs dû à cette glace interne qui

apporte une cohésion de l'ensemble de ces débris. Ils peuvent avoir des formes diverses en fonction de la topographie du milieu dans lequel ils se trouvent, de leur activité et de leur positionnement géographique, notamment en termes d'altitude (Feuillet, 2009).

En fonction de ces formes, on distingue trois types de GR (Bonnetain, 2010) :

- Les glaciers-rocheux lobés : qui sont des GR plus larges que longs en raison du volume réduit de débris rocheux produits par le versant. Les sillons et les rides présents en surface sont généralement peu marqués.
- Les glaciers-rocheux spatulés : qui ont des formes plus complexes, ils sont généralement plus longs que larges et forment un lobe dû à un apport de matériaux et une quantité de glace importante.
- Les glaciers-rocheux en langue : qui sont beaucoup plus longs que larges et généralement restreints aux fonds de vallée. C'est la forme la plus courante.

Les glaciers-rocheux sont donc des formes caractéristiques présentes dans la majorité des montagnes du monde à ne pas confondre avec des glaciers noirs qui sont des glaciers blancs entièrement recouvert de débris rocheux, ou encore avec d'autres formes présentes dans les zones de montagne tels que des protalus ramparts (figure 10), des moraines ou encore des langues de blocs.

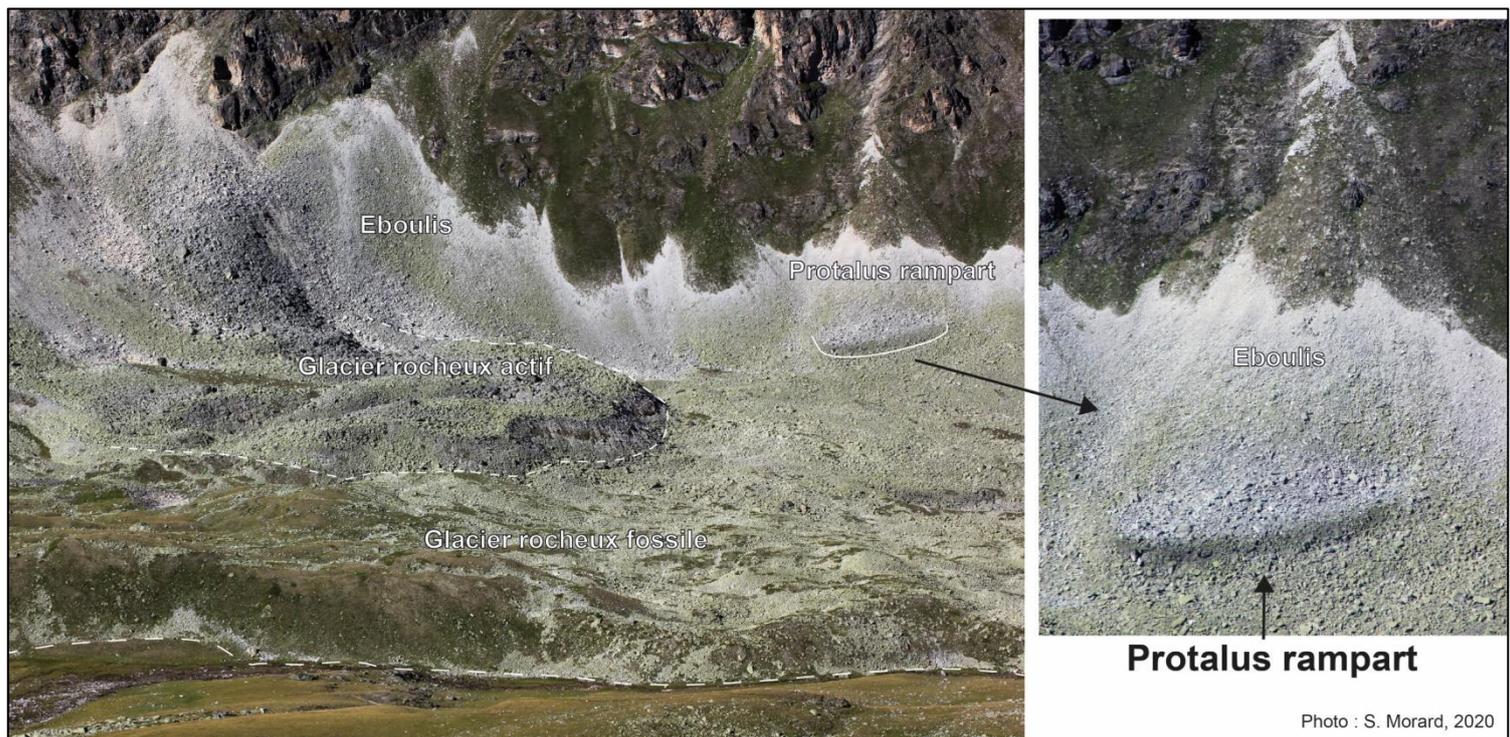


Figure 10 : Photographies de différentes formes de fluage de matériaux meubles soumis à des conditions de pergélisol dans le Val d'Anniviers (Suisse)

Source : Géomorphologie-montagne.ch

Après avoir défini et caractérisé les différentes sortes de glacier-rocheux, nous allons désormais nous intéresser à l'évolution de la recherche scientifique sur ces entités, ainsi qu'aux éventuels points de discordance les concernant.

b) Evolution de la recherche sur les glaciers-rocheux

Le premier scientifique à avoir employé le terme « rockglacier » est S.R. Capps Jr en 1910 lors d'une étude des glaciers-rocheux du Nizina Special Quadrangle dans les Wangell Mountains en Alaska réalisé en 1909 (Jorda, 1983). Cependant, la forme était déjà connue à cette date et décrite notamment par (Monnier, 2004) :

- K.J.V Steenstrup en 1883 au Groenland.
- A.C. Spencer en 1900 en Amérique du Nord qui parle d'une « *peculiar form of talus* » (*forme particulière de talus*)
- O. Rohn en 1900 évoquant des « *talus slopes that flow* » (*talus qui coulent*)
- C.W Cross et E. Howe en 1905 en Amérique du Nord également qui parlent eux de « *rock streams* » (*ruisseaux rocheux*)

L'utilisation du terme « *rockglacier* » par S.R. Capps Jr est pleinement justifiée et l'association de ces deux termes (« *rock* » et « *glacier* ») n'est en aucun cas une incohérence, il avait en effet dès cette époque remarquée des similitudes entre ces formes particulières et les glaciers blancs classiques notamment lié à la présence de sillons et de bourrelets en surface qui évoquent un mouvement de même nature que les glaciers blancs, d'où l'utilisation du terme « *glacier* ». Tandis que le terme « *rock* » fait évidemment référence au matériel principal qui compose ces entités (Monnier, 2004). C'est d'ailleurs pour cette raison que c'est le terme qui est resté jusqu'à aujourd'hui. Le seul bémol de cette expression, c'est que lorsqu'on l'entend, cela évoque forcément le fait glaciaire, alors que cela n'a pas grand-chose (voire rien) à voir avec un glacier blanc. N'importe quel non-initié, lorsqu'il entend cette expression, s'imagine un « vrai glacier » recouvert de roche ou enterré. C'est pour cela que certains auteurs ont souhaité modifier l'orthographe de cette expression afin de marquer une différence avec les glaciers blancs. C'est notamment le cas de D. Barsch qui l'écrit en un seul mot en langue anglaise dès 1988 (« *rockglacier* ») et qui note en 1992 : « *The term « rockglacier » is written as one word (...) to demonstrate that rockglaciers are not glaciers.* » (1992, note 1, p. 175), (Monnier, 2004). Ou encore B. Kaiser en 1983, qui joint les deux mots avec un tiret en langue française (« glacier-rocheux ») pour là aussi marquer la différence avec un glacier blanc.

Les recherches sur les glaciers-rocheux se sont par la suite multipliées sur l'ensemble du globe et une grosse divergence a animé la communauté scientifique durant la deuxième moitié du XX^e siècles sur la genèse de ces entités, et plus précisément l'origine de la glace interne, entre (Monnier, 2004) :

- L'école périglaciaire, principalement européenne, et selon laquelle un glacier-rocheux est un phénomène strictement périglaciaire et défini par un processus de « *permafrost creep* » (*fluage du pergélisol*) (Barsch, 1992). D'après eux, le noyau du GR est un mélange de débris rocheux et de pergélisol qui peut apparaître sous forme de lentilles, de veines ou sous forme interstitielle. Cette école est notamment composée des chercheurs Haerberli, Barsch, Vonder Mühl ...
- L'école glaciaire, majoritairement anglo-saxonne, selon laquelle la glace présente dans le GR serait d'origine glaciaire et proviendrait éventuellement d'une partie d'un glacier

blanc qui a été enfoui et conservé sous les débris. Au fur et à mesure, cette école s'est assouplie et a reconnu l'existence de deux sortes de glacier-rocheux, les GR d'origine glaciaire et les GR d'origine périglaciaire.

A l'origine, cette divergence d'opinions a eu comme impact de créer un engouement autour du sujet, mais qui s'est vite avéré être plutôt nocif, avec de nombreux chercheurs qui cherchaient plus à « *restreindre les glaciers-rocheux à l'expression de tel ou tel processus plutôt que de les définir comme des expressions morphologiques propres* » (Monnier, 2004, p. 142).

Aujourd'hui, il semble que ce soit l'école glaciaire qui ait eu raison, il existe bien des glaciers-rocheux à origine glaciaire et d'autres à origine périglaciaires. Ces-derniers étant cependant bien plus nombreux (Perrier, 2014) :

Pourcentage des GR d'origine glaciaire dans certains massifs :

- 9% dans les Alpes Centrales italiennes (Scotti *et al.*, 2013)
- 30% dans le massif de l'Adamello-Presanella (Italie) (Baroni *et al.*, 2004)
- 22% dans les Alpes autrichiennes du Tyrol (Krainer et Ribis, 2012)
- 45% au Nord de la Norvège (Lilleøren et Etzermüller, 2011)

Etant donné la très faible proportion de glaciers blancs dans les Pyrénées et notamment dans les Pyrénées de l'Est, il semblerait que la très grande majorité des glaciers-rocheux présents dans notre zone d'étude soit d'origine périglaciaire. Dans ce cas de figure, nous allons donc nous concentrer sur cette forme-là. L'illustration présente ci-dessous (figure 11) nous schématise les différentes étapes de formation d'un glacier-rocheux d'origine périglaciaire, afin de comprendre comment se créent ces entités.

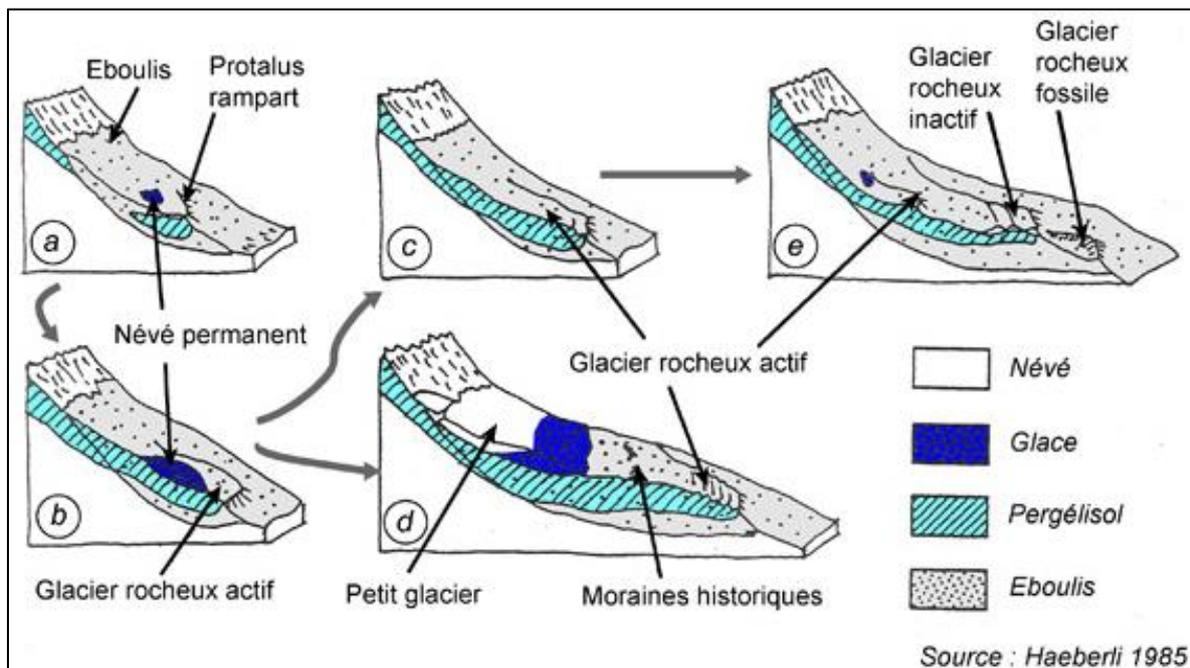


Figure 11 : Différentes étapes de formation d'un glacier-rocheux d'origine périglaciaire

Source : Haeberli, 1985 ; repris par Loïc Bonnetain, 2010

En France, les recherches sur les glaciers-rocheux ont réellement débuté dans les années 1980 et se sont accentués depuis le début du XXI^e siècles principalement dans les Alpes, mais également dans les Pyrénées par l'intermédiaire de chercheur comme Thierry Feuillet. On trouve cependant des études antérieures à 1980, telles que les études réalisées par Georges Angély en 1967 dans l'Est des Pyrénées centrales par exemple. Aujourd'hui, et depuis 2008, l'Etat français, dans le cadre du PAPROG, a pris conscience de l'éventuelle menace que pouvait représenter les glaciers-rocheux dans le cadre du réchauffement climatique, et a donc décidé de réaliser, par l'intermédiaire des différents services RTM français, un inventaire de l'ensemble des GR français, au sein du massif alpin dans un premier temps de 2010 à 2017, puis dans les Pyrénées depuis 2021, afin d'identifier l'ensemble des sites à risques sur le territoire.

L'étude des glaciers-rocheux est donc un sujet qui préoccupe de plus en plus les services publics dans le contexte actuel du changement climatique. Notamment en raison des risques accrus qu'ils pourraient générer comme on va le voir maintenant.

c) Aléas naturels associés aux glaciers-rocheux :

En effet, les glaciers-rocheux étant composés en grande partie de pergélisol, ils sont particulièrement affectés par le réchauffement climatique comme on a pu le voir dans la partie précédente. La dégradation du pergélisol, sous l'effet de la hausse des températures globales, peut entraîner différents phénomènes. Le principal phénomène et le plus courant d'entre eux est la chute de bloc depuis le haut du front ou depuis le corps du GR. En effet, si la glace interne fond, elle n'apporte plus de liant à l'ensemble des matériaux meubles qui constitue le glacier-rocheux, ce qui peut donc entraîner des chutes de blocs, mais pas seulement (Bodin *et al.*, 2015). L'une des principales caractéristiques du pergélisol présent dans les GR est d'être totalement imperméable (Monnier, 2006). Si cette glace fond, le GR perd donc son imperméabilité et comme on peut le voir sur la figure 12 qui suit, si la hausse des températures générant la fonte du pergélisol est associée à de fortes chutes de pluie ou à une infiltration d'eau quelconque, cela peut également générer une coulée de boue ou un glissement de terrain. Ces événements surviennent lorsque le sol arrive à saturation, et que la poussée hydrostatique dépasse un seuil critique au niveau du front (figure 12). Cette force va donc générer une rupture de ce-dernier, créant ainsi une coulée de boue ou un glissement de terrain à l'aval du glacier-rocheux (Roudnitska *et al.*, 2017).

Ces phénomènes gravitaires peuvent dans certains cas venir fournir en matériaux un système torrentiel situé en aval du GR et ainsi générer des laves torrentielles lors d'épisodes pluvieux intenses. Comme ce fut notamment le cas le 14 août 2015 sur la commune de Lanslevillard (Haute Maurienne, Savoie), où un orage a généré deux glissements de terrain au niveau d'un front de GR situé vers le col du Lou à environ 2800m d'altitude, qui ont ensuite alimenté deux laves torrentielles consécutives. Celles-ci ont atteint le village de Lanslevillard et causé des dégâts matériels importants, à hauteur de plusieurs milliers d'euros (Ribeyre, 2016).

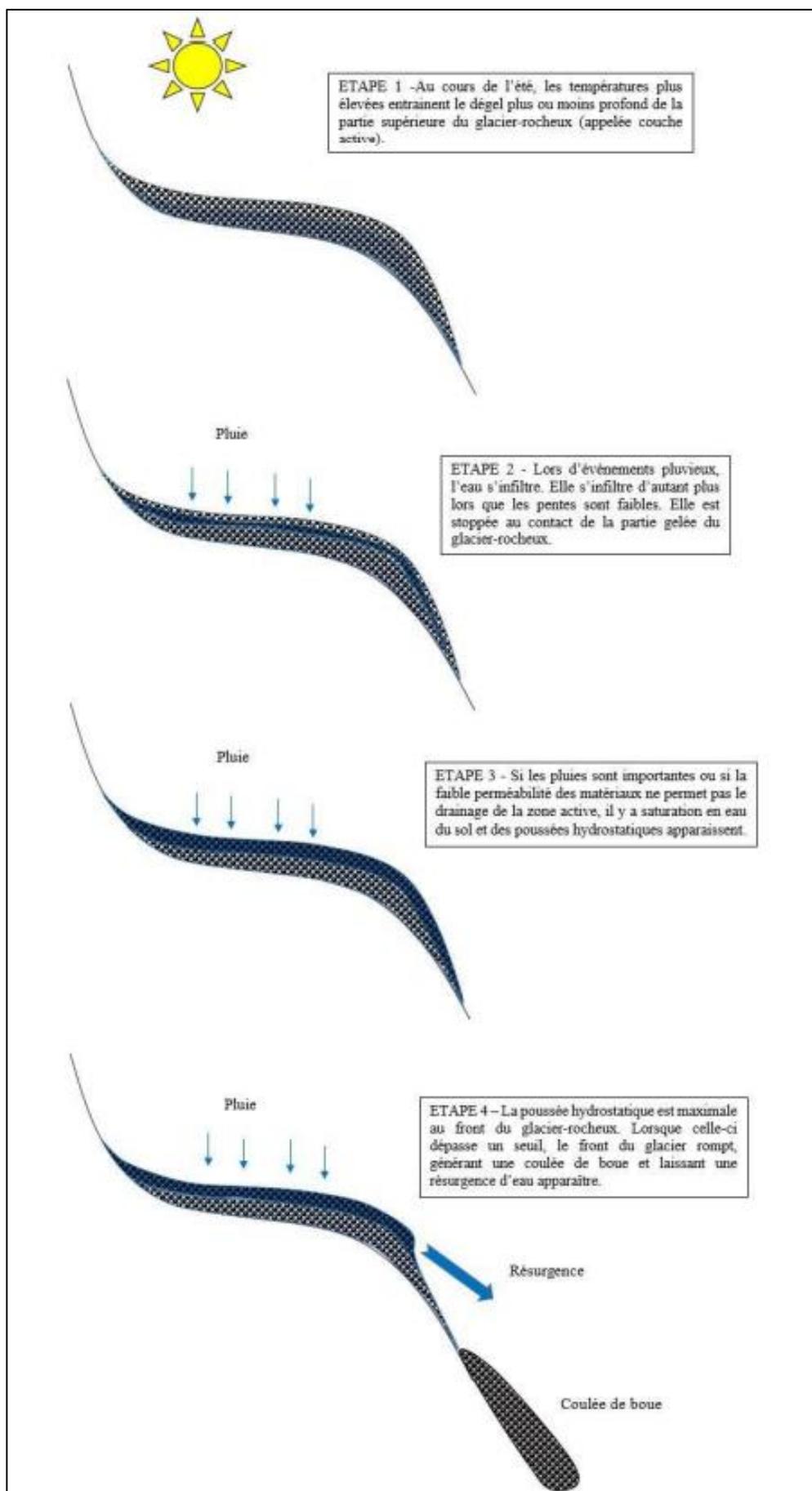


Figure 12 : Schéma des différents mécanismes mis en jeu lors d'une coulée de boue générée à partir d'un glacier-rocheux

Source : Roudnitska et al., 2017, Inventaire RTM des GR de Savoie (73)

En raison du réchauffement climatique, on observe également de nombreux glaciers-rocheux alpins qui ont récemment commencé à présenter des modalités de déplacements inhabituelles, qui se matérialise par une accélération de tout ou partie de ces formes et donc une déstabilisation du GR (Bodin *et al.*, 2015). En temps normal, un glacier-rocheux a un mouvement allant de quelques décimètres à pas plus de 2m par an. Avec la hausse des températures qui a un impact certain sur le pergélisol présent dans le sol comme on l'a déjà vu précédemment, certains glaciers-rocheux alpins ont enregistré depuis les années 1990 des vitesses de surface pouvant atteindre plus de 100m par an dans les cas les plus extrêmes, matérialisées par l'apparition de crevasses et d'arrachements sur le corps du GR dû à des mécanismes de glissement et de rupture (*OSUG.fr*).

C'est notamment le cas du glacier-rocheux du Grabengufier dans la vallée de Zermatt en Suisse qui a atteint une vitesse au niveau de front d'environ 30cm par jour, ce qui équivaut à plus de 100m par an dans les années 2010, avec une érosion intense même en hiver (*geomorphologie-montagne.ch*). Ou encore le glacier-rocheux du Petit-Vélan dans la région du Grand Saint-Bernard en Suisse qui a montré des signes de déstabilisation dès 1990 et a fini par se scinder en deux parties distinctes au niveau d'une rupture de pente (figure 13). Le pic de vitesse de ce GR a été atteint en 2009 – 2010 où il a atteint les 7m par an (Delaloye *et al.*, 2011).

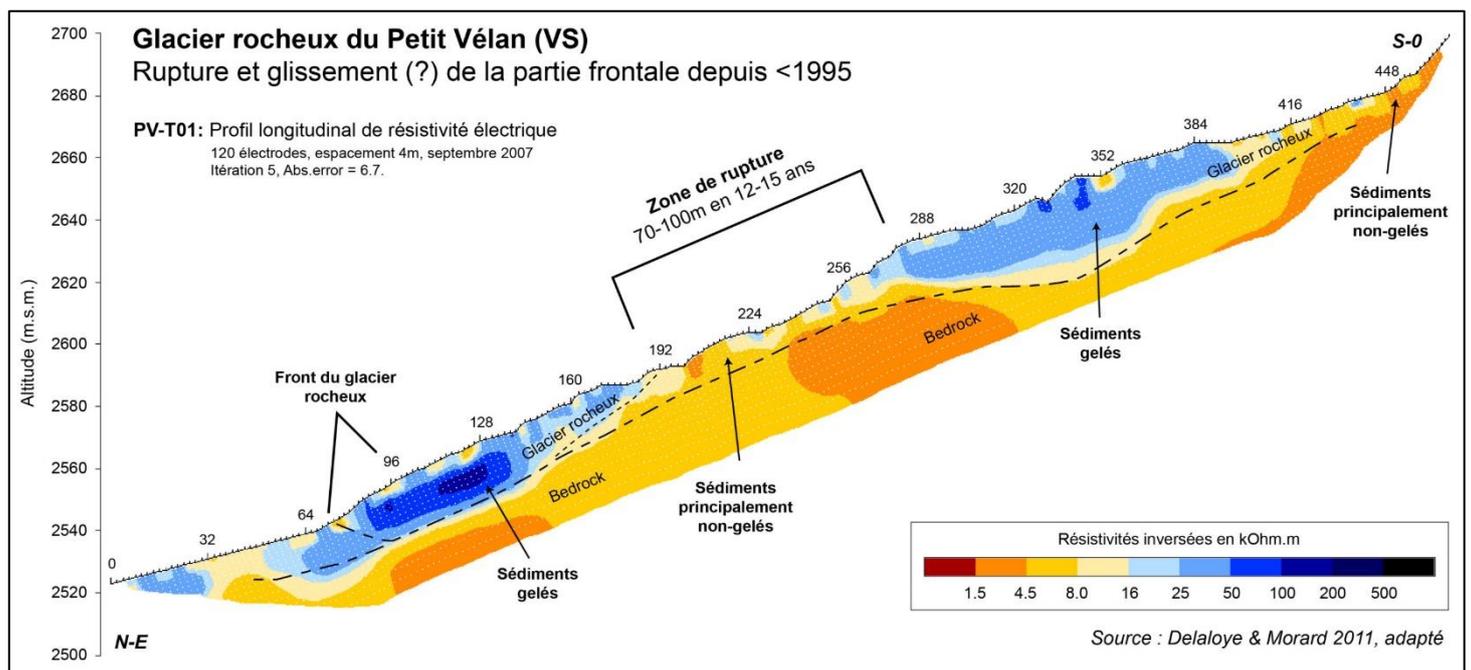


Figure 13 : Profil de tomographie électrique longitudinal du glacier-rocheux du Petit-Vélan (Suisse)

Source : Delaloye *et al.*, 2011

Ces mouvements très importants et rapides peuvent poser des gros problèmes, en plus des potentiels risques de glissement de terrain ou d'écroulement déjà évoqués, de destruction ou de déstabilisation d'infrastructure qui pourrait potentiellement se situer sur le glacier-rocheux. C'est notamment le cas, dans des circonstances bien moindres, de la gare d'arrivée du télésiège de Rosaël, au sein de la station de ski de Val Thorens, qui subit des désordres importants depuis sa création (tassements, cisaillements), en raison du mouvement d'un

glacier-rocheux sous la structure (Roudnitska *et al.*, 2017). Dans ce cas-là, cela pose problème alors que le GR en question est simplement actif, on peut alors imaginer les dégâts importants qui pourraient se produire si ce GR venait à se déstabiliser.

Enfin, l'un des derniers risques liés aux glaciers-rocheux est l'apparition de phénomènes cryokarstiques [« *affaissements superficiels par perte de volumes en profondeur* », (Bodin *et al.*, 2015, p. 12)] sur le corps d'un GR. En effet, le réchauffement climatique peut notamment engendrer l'apparition de lacs dits cryokarstiques, qui sont des lacs, plus ou moins grand, qui vont venir se former sur le corps du GR à la suite de la fonte du pergélisol. On en observe de plus en plus ces dernières années. Le risque avec ce genre de lac est qu'il se vidange brutalement et crée ainsi des crues torrentielles, comme ce fut le cas du lac du Plan de Chauvet, en Haute Ubaye (04), qui a subi pas moins de six vidanges depuis 1930 dont les plus récentes sont survenues en 1997 et en 2008 (figure 14), (Bodin *et al.*, 2015).



Figure 14 : Vidange du lac du Plan de Chauvet (04) en juillet 2008. a) Vue d'ensemble du site ; b) orifice de vidange ; c) crue quelques centaines de mètres à l'aval

Source : Bodin *et al.*, 2015 ; photos : M. Peyron, RTM 04

Les glaciers-rocheux peuvent donc générer une multitude d'aléas naturels qui peuvent avoir, en cas de présence d'enjeux à l'aval, des conséquences désastreuses. C'est pourquoi l'Etat a souhaité à partir de 2008 connaître les risques associés à l'ensemble des glaciers-rocheux présents sur le territoire français, afin de pouvoir anticiper au mieux l'apparition d'éventuels aléas naturels. Et ainsi pouvoir mettre en place, si nécessaire, des dispositifs de suivi ou d'alerte, des ouvrages de protection, etc. Le tableau ci-dessous (figure 15), extrait des inventaires ONF – RTM précédents, résume l'ensemble des aléas naturels pouvant être associé aux glaciers-rocheux, en fonction de leur intensité.

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Figure 15 : Phénomènes et cotations liés à la dégradation du pergélisol des glaciers-rocheux

Source : Rapports ONF – RTM des départements Alpains

Les glaciers-rocheux sont donc des entités particulières, présentent dans la majorité des montagnes du globe, directement liés à la présence de pergélisol. Il en existe trois types distincts, déterminés en fonction de leur morphologie, de leur composition en glace notamment et de leurs mouvements ; les GR actifs, inactifs et fossiles. Depuis leur découverte à la fin du XIX^e s. – début du XX^e s., les recherches les concernant n'ont cessé de s'accroître et notamment en France, afin de comprendre leur origine, leurs dynamiques, mais également pour cerner l'ensemble des aléas naturels qu'ils pourraient générer dans le contexte du changement climatique (chute de bloc, glissement de terrain, laves torrentielles, vidange de lac cryokarstiques, déstabilisation).

Maintenant que l'on a bien cerné le sujet d'étude de ce stage, nous allons désormais nous concentrer sur les particularités de notre zone d'étude, vis-à-vis de l'ensemble de ces questions.

3. Le contexte particulier des Pyrénées de l'Est :

Nous allons donc désormais nous intéresser dans cette partie aux particularités des Pyrénées de l'Est en commençant par analyser le contexte géographique et climatique de ce territoire. Ensuite, nous nous attarderons sur l'évolution glaciaire de ce secteur des Pyrénées et notamment sur sa déglaciation à la suite du dernier last glacial maximum (LGM). Enfin, nous étudierons pour finir l'état des recherches concernant les glaciers-rocheux dans ce secteur.

1. Un contexte géographique et climatique atypique :

Cette étude porte à la fois sur les secteurs montagnards des Pyrénées-Orientales (P-O) et des Pyrénées Ariégeoises, qui n'ont pas grand-chose à voir en terme climatique comme on va le voir. Il convient donc de bien différencier ces deux territoires vis-à-vis du climat. Géographiquement, en revanche, ces territoires ont certaines similitudes, avec des sommets qui culminent aux alentours des 3000m (2921m pour le Carlit qui est le plus haut sommet des Pyrénées-Orientales, et 3143m pour la pique d'Estats, plus haut sommet des Pyrénées Ariégeoises). Les sommets ariégeois sont légèrement plus haut que ceux des P-O en moyenne, qui marquent le début de la chaîne Pyrénéenne, mais on reste cependant dans le même ordre de grandeur. En termes d'orientation également, on retrouve des similitudes. En effet, ces territoires sont tous les deux situés sur le versant Nord des Pyrénées et sont composés de plusieurs sillons longitudinaux, ce qui est une particularité à l'échelle des Pyrénées où les vallées transversales dominant (Chatelard, 1930). Cette particularité joue un rôle sur les conditions climatiques qui varient en fonction de la configuration du relief et de l'exposition.

La grande différence géographique entre Pyrénées-Orientales et Pyrénées Ariégeoises est évidemment la proximité avec la mer Méditerranée qui a un impact considérable sur le climat. Mais également la présence de hauts plateaux au sein des P-O que sont la Cerdagne et le Capcir qui culminent respectivement à 1200 et 1500m d'altitude, dont on ne retrouve pas d'équivalent en Ariège. Les Pyrénées Ariégeoises sont donc bien plus encaissées que les massifs des Pyrénées-Orientales, qui sont eux beaucoup plus espacés et bien délimités par ces hauts plateaux et des vallées assez imposantes (vallée de la Têt, vallée du Carol, Vallespir...). Enfin, les Pyrénées Ariégeoises sont beaucoup plus étendues et font partie de la partie centrale des Pyrénées, on les retrouve sur la totalité du Sud du département. Tandis que dans les P-O les hauts sommets sont concentrés sur toute la partie Ouest du département.

En termes de climat désormais, de manière globale, le climat montagnard est généralement un climat rude, qui se caractérise par des étés frais et humides et des hivers froids et secs (*Pyrandonnées.fr*). Marqué par des gradients de précipitation, de pression et de températures (-0,6°C / 100m) en fonction de l'altitude, et des variations climatiques liés à l'exposition et à la topographie. Cependant, notre zone d'étude est sujette à des influences méditerranéennes pour le cas des Pyrénées-Orientales et océaniques dans le cas des Pyrénées Ariégeoises. Ce sont ces influences qui vont faire toute la différence entre ces deux territoires, climatiquement parlant. L'influence méditerranéenne apporte une douceur thermique au climat des P-O.

Cependant, contrairement à ce qu'on pourrait penser, au sein de ce département et notamment au sein du plateau de la Cerdagne et les massifs qui l'entoure (Puigmal et Campcardos), la pluviosité est relativement faible (environ 700mm par an), avec un minimum en hiver et un maximum au printemps (mai-juin) qui peut se prolonger jusqu'en août (figure 16), mais qui reste peu élevé et réparties sur un petit nombre de jours (Izard, 1988). Cette grande durée d'insolation combinée à une sécheresse atmosphérique favorise grandement l'évaporation. Ce climat n'est, en aucun cas, propice à la présence de pergélisol dans le sol, ce qui laisse donc présager qu'il n'y aura vraisemblablement pas de glacier-rocheux actifs dans cette région. En revanche, le plateau du Capcir et les massifs environnants (Carlit, Péric), sont eux soumis à un « climat de transition à dominante océanique » (*chambre-agriculture.fr*), qui entraîne une régularisation de la pluviométrie sur toute l'année (environ 800mm par an) (figure 16), ainsi qu'une baisse des températures. En effet, la température moyenne est de 6°C dans ce territoire contre environ 8°C en Cerdagne, avec des hivers froids et rigoureux qui comptent environ 150 jours de gel (*chambre-agriculture.fr*). C'est donc un climat beaucoup plus propice à la présence de pergélisol en haute altitude. Enfin, pour finir, le massif du Canigou, qui est lui bien plus proche de la mer et plus bas en altitude, subit des températures moyennes plus élevées ainsi qu'une pluviométrie pouvant être multiplié par deux par rapport à la Cerdagne sur l'année.

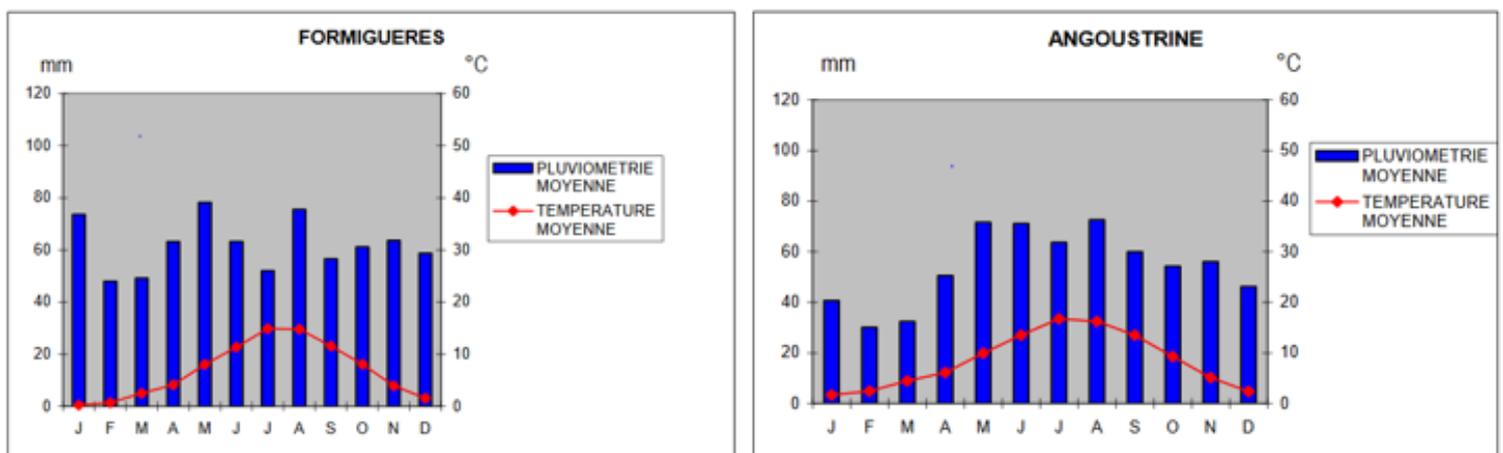


Figure 16 : Diagramme ombrothermique de Formiguères en Capcir (à gauche) et d'Angoustrine en Cerdagne (à droite)
Source : Chambre-d'agriculture.fr

Concernant désormais le climat au sein des Pyrénées Ariégeoises, celui-ci est donc sous forte influence océanique, ce qui se matérialise par une forte pluviométrie bien répartie sur la totalité de l'année (figure 17), de l'ordre de 1 000 à 1 800 mm par an dans les plus hautes vallées (qui est la zone qui nous concerne ici), sous forme orageuse majoritairement (*MétéoFrance*). Ce qui est donc bien plus élevé que dans les hautes montagnes des Pyrénées-Orientales. Les versants Nord étant évidemment les plus humides, tels que les vallées d'Orlu ou d'Aulus-les Bains par exemple. Mais également les crêtes frontalières avec l'Espagne exposés au flux de Sud-Ouest qui apporte une forte humidité sur le haut des versants. On note

également une forte amplitude thermique entre le jour et la nuit sur ce territoire (*climate-data*), ce qui va favoriser au cours de l'hiver les cycles de gel/dégel dans la couche active du sol. En ce qui concerne les températures, les contrastes sont très importants entre l'été où les températures moyennes avoisinent les 15°C, et l'hiver où celles-ci descendent en dessous de 0°C comme on peut le voir sur les diagrammes ombrométriques ci-dessous des communes d'Orlu et d'Auzat (figure 17). Ce territoire est donc soumis à un climat humide et relativement froid assez caractéristiques des climats montagnards, qui est plutôt favorable à la présence de pergélisol en haute altitude.

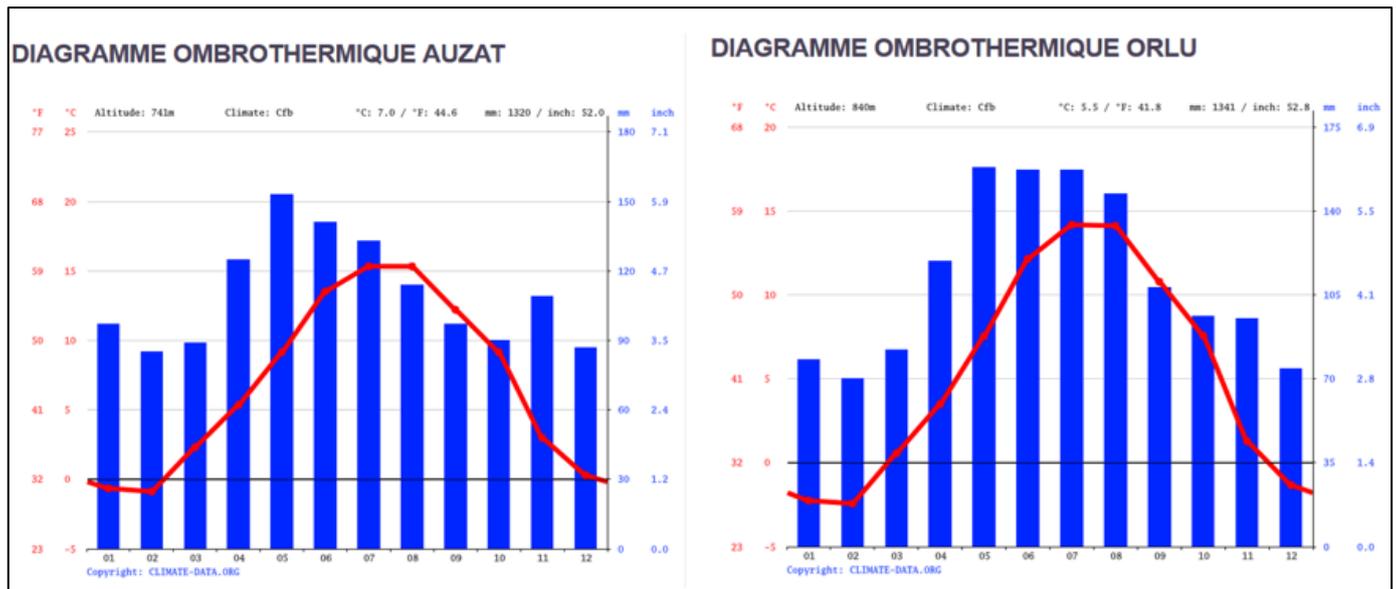


Figure 17 : Diagramme ombrométrique des communes d'Auzat et d'Orлу en Ariège

Source : Climate-data.org

Ces territoires ont donc des situations géographiques et climatiques atypiques caractéristiques des milieux montagnards, mais avec cependant quelques particularités dû aux influences méditerranéennes et océaniques qu'ils subissent, qui ont, et ont eu depuis le dernier maximum glaciaire, un impact fort sur l'évolution glaciaire de ces-derniers, comme on va le voir maintenant.

2. L'évolution glaciaire depuis le LGM :

Le dernier maximum glaciaire peut être défini comme la période de « *maximum de volume de glace, et minimum du niveau de la mer* » (Delaygue, *ens-lyon.fr*). Les scientifiques s'accordent à dater cette période à 21 000 BP (*before present*) \pm 2 000 ans à l'échelle mondiale. C'est également une période correspondant approximativement au « *minimum de température de surface des océans, ainsi qu'au minimum de température aux pôles* » (Delaygue, *ens-lyon.fr*). Globalement, c'est donc durant cette période que les conditions

climatiques sont les plus froides. Cependant, au sein de notre zone d'étude, il est possible que le LGM soit antérieur à 21 000 BP, d'après les observations glaciaires réalisées (Delmas, 2005).

Dans tous les cas, durant le LGM, les glaciers présents dans les vallées de la Garonne et de l'Ariège descendaient jusqu'au piémont des vallées jusqu'à une altitude comprise entre 350 et 400m d'altitude. Tandis que dans les Pyrénées-Orientales, l'extension était bien moindre, puisque les langues émises par le massif du Carlit, qui était à cette période le massif le plus englacé du département, n'allaient pas au-delà des dépressions de moyenne altitude comprise entre 1 200 et 1 600m d'altitude (Cerdagne, Capcir), (Andrieu-Ponel *et al.*, 1988). Ceci explique notamment la géographie particulière des Pyrénées-Orientales et la présence de ces hauts plateaux d'altitude relativement vastes. On observe donc une différence d'extension maximale glaciaire considérable entre ces deux territoires.

A la suite de ce dernier maximum glaciaire, la déglaciation de ces territoires a été extrêmement rapide, puisque dès le Dryas ancien, – qui s'étend de 18 000 à 15 000 BP environ –, la grande majorité des glaciers de cirque présents dans le massif du Carlit et dans les P-O en général ont disparu. En effet, d'après les diagrammes polliniques de ce territoire, la disparition totale et définitive de l'ensemble des grands glaciers de vallée du massif du Carlit est évaluée à 16 500 BP (Delmas, 2005). Ces observations montrent une forte précocité de la déglaciation pyrénéenne sur sa façade méditerranéenne, à l'image du reste de la chaîne et notamment des Pyrénées Centrales. Cela confirme, selon Magalie Delmas (2005), l'ancienneté du LGM au sein de ce territoire, qui aurait eu lieu durant le Pléniglaciaire inférieur, et aurait été suivi d'un recul modeste vers 30 000 – 25 000 BP, poursuivie d'une régression généralisée vers 26 000 – 24 000 BP, au sein d'un climat qui reste froid, mais de plus en plus sec. Cette hypothèse permettrait d'estimer l'apparition des premiers glaciers-rocheux de basse altitude dès le Dryas récent au sein de ce territoire. Dans un contexte climatique froid et sec, encore très vif, favorable au développement du pergélisol, mais également dans un contexte de détente des parois rocheuses qui entraîne une recrudescence de débris rocheux dans les fonds de vallée, permettant ainsi cette création de glaciers-rocheux (Viers, 1961).

Concernant les Pyrénées Ariégeoises, la déglaciation est également très rapide, mais étant donné l'extension maximale beaucoup plus importante, vis-à-vis des Pyrénées-Orientales, celle-ci va prendre un peu plus de temps. Cependant, « *dès le Dryas ancien, la plupart des fronts glaciaires sont cantonnés aux hautes vallées* », (Delmas *et al.*, 2012, p. 38) et l'ensemble des sous-bassins acquiert un comportement autonome qui va être contrôlé par le relief et l'exposition majoritairement. A cette période, la vallée de l'Ariège est encore occupée par un glacier de vallée qui s'étend sur une vingtaine de kilomètres, alors que la vallée du Suc, qui est un affluent du Vicdessos abrite elle un glacier d'environ 6 km (Delmas *et al.*, 2012). Cette comparaison illustre bien la variabilité et l'autonomie glaciaire présente au sein de ce territoire en fonction des différentes vallées. Vers 15 000 BP, la déglaciation de la quasi-totalité de la montagne pyrénéenne est pratiquement achevée. Seul quelques glaciers relictuels persistent dans des sites favorables. La déglaciation totale de la montagne ariégeoise intervient vers 14 000 BP (Andrieu-Ponel *et al.*, 1988). Soit plus de 2 000 ans après celle des Pyrénées-Orientales, ce qui représente une variation très importante pour deux territoires

situés l'un à côté de l'autre, qui s'explique notamment par les variations climatiques décrites lors de la partie précédente.

Aujourd'hui, il ne reste que très peu de formations glaciaires sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne, qui sont majoritairement concentré dans la zone centrale des Pyrénées. Depuis 1850 et la fin du petit âge glaciaire, qui a duré approximativement de 1550 à 1850, les glaciers pyrénéens ont connu un recul très important de l'ordre d'environ 85%, contre environ 40% en ce qui concerne les Alpes françaises sur la même période, qui en plus s'accroît depuis les années 1980 (René, 2010). Ce recul est dû principalement à une augmentation significative des températures dans les espaces montagnards de l'ordre de +0,9 à 1,1°C dans les Pyrénées et +2°C dans les Alpes durant le XX^e siècles en raison principalement du réchauffement climatique (UICN, 2016). Les glaciers présents dans les Pyrénées sont très réduits en comparaison avec ceux des Alpes notamment, en raison principalement des caractéristiques géographiques de ces deux massifs (altitude, climat régional, latitude). En effet, aucun d'entre eux ne dépasse les 1 km² (René, 2010). En cumulé, l'ensemble des glaciers de la chaîne représente 3,5 km² (UICN, 2016).

En ce qui concerne notre zone d'étude, on y retrouve aujourd'hui qu'un seul et unique glacier blanc situé sur le flanc Nord-Est du Mont Vallier (2838m) dans les Pyrénées Ariégeoises, au sein de la commune de Seix. C'est donc le glacier le plus Oriental de l'ensemble de la chaîne des Pyrénées, situé entre 2320 et 2520m d'altitude, sur une surface de 1,8 ha (contre 5 en 1850) répartie sur une longueur de 370m et une largeur de 90m (*ariège.com*). C'est un glacier modeste, l'un des plus petits de la chaîne, mais qui semble régresser de manière moins importante que les autres glaciers pyrénéens, en raison notamment de sa position géographique souvent à l'ombre et qui profite des chutes de neige hivernale. Aujourd'hui, l'isotherme annuel 0°C est estimé vers 2750m en versant Nord sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne (Feuillet, 2010). Ce qui limite considérablement la présence de glacier-rocheux actif au sein de notre étude.

A l'avenir, la disparition de l'ensemble des glaciers pyrénéens est estimée à l'horizon 2070. La hausse des températures qui n'est pas près de s'arrêter si on en croit les rapports du GIEC et d'après la situation mondiale actuelle qui semble plus préoccupée par la hausse des prix que par le réchauffement climatique, va entraîner la remontée de la limite pluie/neige d'environ 650m d'ici 2100, ce qui aura forcément un impact très important sur l'ensemble des formes glaciaires et périglaciaires présentes en montagnes (UICN, 2016).

Notre zone d'étude a donc connu une déglaciation très rapide à la suite du LGM, dès le Dryas ancien ou récent selon le territoire. Aujourd'hui, il ne reste plus qu'un seul glacier blanc sur l'ensemble de notre zone d'étude, qui est voué à disparaître au cours des prochaines décennies. Maintenant qu'on a fait le point sur l'évolution glaciaire de ce territoire depuis le LGM et rapidement décrit la situation glaciaire actuelle. Nous allons désormais pouvoir nous attarder sur l'état des recherches concernant les glaciers-rocheux au sein de ce même territoire.

c) Des recherches sur les glaciers-rocheux limitées :

Comme on l'a vu précédemment, les glaciers-rocheux ont été découvert et décrit dès la fin du XIX^e siècles – début du XX^e, par des chercheurs comme K.J.V Steenstrup, A.C Spencer ou encore S.R. Capps Jr, qui a été le premier à utiliser le terme de glacier-rocheux. Depuis cette période, les études portant sur ce sujet se sont multipliées dans l'ensemble des régions montagneuses du globe (Himalaya, Amérique du Nord, Alpes, Andes, Groenland, Scandinavie, Caucase, etc...). L'objectif de ces études varie en fonction de celles-ci, certaines vont par exemple porter sur la genèse de ces formes et leur évolution dans le temps, notamment dans le cadre du réchauffement climatique, tandis que d'autre vont simplement tenter d'identifier l'ensemble des formes présentes sur un territoire donnée et définir les risques qui pourrait être associés à ces formes périglaciaires.

En ce qui concerne les Pyrénées, et notamment l'Est des Pyrénées, qui est le territoire qui nous intéresse ici, les recherches scientifiques sur le sujet y sont extrêmement limitées. En effet, la grande majorité des recherches glaciaires et périglaciaires se concentrent sur l'évolution glaciaire des territoires depuis la dernière grande glaciation et les formes qui y sont associées types moraines principalement. C'est notamment le cas des travaux réalisés par Georges Viers en 1961 sur l'évolution glaciaire du massif du Carlit par exemple. Ou encore plus récemment des recherches réalisées par Magalie Delmas en 2005 et 2009 notamment, qui s'attardent sur les glaciations quaternaires et la déglaciation de ce territoire, en évoquant que très succinctement la présence de glacier-rocheux dans le secteur. Qui sont pourtant très présent sur celui-ci comme on le verra plus tard.

Les recherches qui portent spécifiquement sur les glaciers-rocheux sont donc extrêmement minoritaires et majoritairement concentrés sur la partie centrale des Pyrénées, où se situe les plus hauts sommets de la chaîne. C'est notamment le cas des différents travaux réalisés par Thierry Feuillet entre 2008 et 2010, qui traitent donc essentiellement de glacier-rocheux, mais qui se limitent aux Pyrénées Centrales françaises. On retrouve malgré tout quelques articles scientifiques traitant le sujet au sein de notre zone d'étude, comme par exemple l'article de Georges Angély paru en 1967 dans la *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* intitulé « *Anciens glaciers rocheux dans l'est des Pyrénées centrales* », qui s'attardent sur trois glacier-rocheux présent au sein de la chaîne pyrénéenne (dont le GR de Soula-Couloumé dans les Pyrénées ariégeoises) et décrit de manière précise les formes qui le composent. Ou encore quelques travaux récents de chercheurs espagnols (Ventura Roca, 2016 ; Serrano *et al.*, 2011) qui tentent d'identifier les glaciers-rocheux actifs présents dans l'ensemble de la chaîne pyrénéenne (Ventura Roca, 2016), dont certains sont situés au sein de notre zone d'étude. Ou qui tentent d'analyser leur dynamique et leur évolution (Serrano *et al.*, 2011).

Cependant, ces recherches restent encore à l'heure actuelle extrêmement limitées et peuvent se compter sur les doigts d'une main. On peut alors se questionner sur la raison de cette situation vis-à-vis des autres territoires montagnards tels que les Alpes notamment, au sein duquel les recherches sur cette thématique sont nombreuses et variées. On peut imaginer que ces formes périglaciaires étant dans leurs grandes majorités bien éloignées des différentes infrastructures humaines et pour la plupart fossile à l'heure actuelle et donc sans

risque pour l'homme. Il n'a pas semblé nécessaire d'étudier le sujet plus en détail au sein de ce territoire, malgré le fait qu'on en trouve quand même dans l'ensemble des hauts massifs des Pyrénées-Orientales et ariégeoises. Cela me semble être personnellement l'une des seules explications à cette situation. Les autorités et les habitants de ce territoire ne se sentant par vraiment concernés par l'ensemble des problématiques associés aux glaciers-rocheux, des recherches approfondies ne paraissent donc peut-être pas réellement utile au sein de cet espace. Afin de se rendre compte du désintérêt généralisé autour de cette question dans les Pyrénées de l'Est, même le président de l'association *Moraine*, qui est l'association pyrénéenne de glaciologie située dans le département de l'Ariège, n'a pas pu me donner la moindre indication ou aide dans mon travail d'identification et de caractérisation des glaciers-rocheux dans cette région.

C'est dans ce contexte, que le travail réalisé ici prend tout son sens et semble utile afin de bien cerner la situation de ce territoire vis-à-vis de ces formes périglaciaires particulières, qui sont le signe d'une activité périglaciaire importante dans le passé et du réchauffement actuellement en cours. Réchauffement qui pourrait entraîner la fonte du pergélisol au sein de certains glacier-rocheux encore actif ou inactif dans notre zone d'étude et générer ainsi des risques à la suite de la déstabilisation de ces formes.

Nous nous sommes donc attardés au sein de cette partie au contexte particulier des Pyrénées de l'Est afin de bien cerner notre zone d'étude et pouvoir ainsi interpréter nos résultats futurs de la meilleure des manières avec le plus d'éléments possibles. Nous avons tout d'abord vu que la situation géographique et climatique de ce territoire était caractéristique des milieux montagnards. Mais comportait également des particularités en raison des influences méditerranéennes et océaniques qu'elle subit, qui entraînent notamment une certaine douceur thermique dans le cas des influences méditerranéennes et une pluviométrie élevée en ce qui concerne les influences océaniques. Nous avons ensuite vu que ce territoire a connu une déglaciation très importante et soudaine à la suite du LGM, vis-à-vis des Alpes notamment, puisque dès le Dryas ancien ou récent, celle-ci était quasiment achevée. Cette situation a pu être favorable au développement de glacier-rocheux dès cette période. A noter qu'aujourd'hui, il ne reste plus qu'un seul glacier blanc au sein de notre zone d'étude. Enfin, nous avons vu que les recherches concernant les glaciers-rocheux étaient très limitées au sein des Pyrénées de l'Est en raison certainement du peu de risque qui y sont associé au sein de ce même territoire.

Conclusion :

Au cours de cette partie, nous avons donc réalisé un état de l'art complet autour du thème de ce mémoire ; les glaciers-rocheux. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au pergélisol, qui est un état thermique du sol qui reste en-dessous de 0°C durant au moins deux années consécutives (NRCC, 1988), très présent à haute altitude dans la quasi-totalité

des montagnes du monde, mais également aux plus hautes latitudes. C'est un phénomène qui est extrêmement sensible au réchauffement climatique, et sa dégradation pourrait avoir des impacts dramatiques, notamment en termes d'accroissement des risques naturels type éboulement, chute de bloc, glissement de terrain... On a vu qu'on distingue plusieurs sortes de pergélisol en fonction de la surface qu'il occupe (continu, discontinu, sporadique, en tache), du type de terrain sur lequel il se trouve et de la température annuelle moyenne de la glace (froid, semi-tempéré, tempéré). Ce pergélisol peut prendre des formes très diverses et variées (sols structurés, terrassettes de gélifluxion, blocs fluant...) dont la plus caractéristique et la plus imposante d'entre elles est le glacier-rocheux.

Comme on l'a vu durant la seconde partie de cet état de l'art, un glacier-rocheux est « *une accumulation de débris rocheux, achevée à l'aval par un front raide, présentant une forme de langue, ou de lobe, voire de spatule* » (Monnier, 2004, p. 140). Notamment composé d'un front raide à l'aval, d'un corps composé de sillons et de rides, de front latéral et d'une racine à l'amont qui précède la zone de production des matériaux. Cette forme particulière de pergélisol a été découverte au début du XX^e siècle et a depuis fait l'objet de multiples recherches sur l'ensemble de la planète, afin de déterminer notamment leur origine et leurs dynamiques. On distingue trois types de glacier-rocheux selon leur activité, déterminée par leur composition (taux de glace présent notamment), leur morphologie et leurs mouvements ; les GR actifs, inactifs et fossiles. En fonction de cette activité, ces GR vont être plus ou moins susceptibles d'engendrer des aléas naturels (glissement de terrain, chute de bloc, lave torrentielle) qui peuvent éventuellement générer des risques s'ils sont situés à proximité d'enjeux.

Enfin, pour finir, nous nous sommes penchés au cours de la troisième partie de cet état de l'art, sur le contexte particulier que l'on retrouve dans les Pyrénées de l'Est. Et notamment d'un point de vue géographique et climatique marqué par des influences méditerranéennes dû à l'extrême proximité avec la mer Méditerranée, qui apporte une certaine douceur thermique. Mais également marqué par des influences océaniques en ce qui concerne la partie ariégeoise de notre zone d'étude principalement, qui elles apportent une pluviométrie élevée. Ces particularités géographiques et surtout climatiques sont à l'origine de la déglaciation très importante et précoce qu'a connu ce territoire à la suite du LGM. Les chercheurs estiment que dès le Dryas ancien (Pyrénées-Orientales) ou récent (Pyrénées ariégeoises), la déglaciation était quasiment achevée (Delmas, 2009). Cette déglaciation a pu être favorable à l'apparition de glacier-rocheux dès cette période. Cependant, aujourd'hui, ces particularités climatiques et géographiques, accentués par le réchauffement climatique, rendent ce territoire de moins en moins propice à la présence de pergélisol et donc à la présence de glacier-rocheux actif voire inactif.

Maintenant qu'on a bien cerné le sujet de ce mémoire à travers cet état de l'art, nous allons pouvoir nous intéresser plus en détail à la mission de stage qui m'a été confié. A savoir l'identification et la caractérisation des glaciers-rocheux au sein des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales.

III. Inventaire des glaciers-rocheux dans les Pyrénées de l'Est :

Au cours de cette partie, nous allons donc revenir en détail sur ce stage d'inventaire des glaciers-rocheux dans les Pyrénées de l'Est au sein du service RTM des Pyrénées-Orientales. Nous verrons dans un premier temps les différentes étapes du déroulement de ce stage, avant de nous pencher, dans un deuxième temps, sur son cadre méthodologique. Les résultats de cet inventaire seront quant à eux présentés dans la partie suivante.

1. Déroulement de la mission de stage :

Le déroulement de ce stage s'est basé sur la même méthode que les précédents inventaires réalisés, également par des stagiaires, au sein de la totalité des départements alpins et dans les Pyrénées de l'Ouest dans le cadre du PAPROG. Concrètement, on peut diviser ce stage en quatre parties :

- Une première partie de recherche bibliographique durant le mois de mars, qui pourrait s'apparenter à un état de l'art autour du sujet des glaciers-rocheux, du pergélisol et des risques associés, afin de bien cerner toutes les subtilités du sujet. La lecture de l'ensemble des précédents inventaires réalisés dans les autres départements français aura notamment permis de bien saisir la méthodologie à mettre en place et les étapes à suivre pour réaliser cet inventaire. Certains documents qui faisaient état de glacier-rocheux au sein de notre zone d'étude auront également permis de commencer dès cette première phase à identifier des GR et ainsi à débiter cet inventaire.
- Une deuxième phase d'avril à juin, d'identification et de cartographie de l'ensemble des formes observées. L'identification s'est faite sur ordinateur par photo-interprétation selon plusieurs méthodes que l'on détaillera dans la partie qui suit, tandis que la cartographie, s'est, elle, déroulée sur le logiciel Arcgis et consistait non seulement à polygoniser l'ensemble des formes observées, mais également à remplir les tables attributaires correspondantes, comme on le verra là aussi plus en détail dans la partie suivante. Toute la difficulté de cette phase a été de se faire l'œil afin de différencier les glaciers-rocheux d'autres formes glaciaires ou périglaciaires (moraines, protalus rempart, éboulis, blocs fluants...) qui peuvent parfois prendre des formes assez similaires et être confondus, mais également afin de déterminer l'activité du glacier-rocheux à partir de photo aérienne, ce qui peut dans certains cas s'avérer très délicat et subjectif.
- Une troisième partie de juin à mi-août, qu'on pourrait qualifier de phase de terrain afin de vérifier les observations réalisées sur ordinateur. Cette phase d'observation sur le terrain se fait préférentiellement quand la couverture neigeuse s'est retirée. En

contexte de pergélisol, en haute altitude, la neige peut perdurer une partie de l'été, c'est pourquoi les visites de terrain se font le plus souvent en 2ème partie d'été. L'objectif de cette partie est donc de valider nos observations, de prendre des mesures (pentes du front, granulométrie, stabilité...), et d'analyser les aléas en lien avec les GR pour réaliser une analyse ALEA/ENJEU/RISQUE, afin de déterminer les éventuels sites à risque potentiel ou avéré en lien avec la dégradation du pergélisol. Le but n'est pas d'aller voir tous les glaciers-rocheux (cela prendrait beaucoup trop de temps), mais seulement ceux sur lesquels on a des doutes et surtout ceux où l'on observe des aléas issus des GR avec des potentiels enjeux exposés.

- Enfin, la quatrième partie de mi-août à fin août consiste à finaliser la cartographie SIG et la rédaction des différents rapports (un par département) qui a débuté durant la phase précédente. L'objectif de ces rapports est de dresser un état des lieux de la situation départementale vis-à-vis des glaciers-rocheux, mais surtout d'identifier l'ensemble des sites à risques potentiels ou avérés en lien avec la dégradation du pergélisol. Ces études pourront par la suite servir de base à des études plus approfondies ou donner lieu à des suivis, observations particulières, mesures de sauvegarde, mise en place de système d'alerte, et éventuellement à des constructions d'ouvrage de protection si opportun et réalisable, dans le cas d'identification de site à risque important. L'un des objectifs de la part des services RTM est également de générer, à partir de l'inventaire des GR sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne, une carte de présence potentielle de permafrost à l'échelle des Pyrénées, comme cela a déjà été fait dans les Alpes à la suite de l'inventaire complet des GR des Alpes (carte APIM pour Alpine Permafrost Index Map).

Maintenant que l'on a vu comment s'est déroulé ce stage, nous allons désormais pouvoir nous intéresser à la méthodologie appliquée pour réaliser ces différentes étapes.

2. Méthodologie appliquée :

a) Partie bibliographie :

Concernant la recherche bibliographique, celle-ci s'est dans un premier temps basée sur une sélection diverse et variée d'articles scientifiques, de thèses ou d'ouvrages qui traitent de glacier-rocheux ou de pergélisol afin de bien cerner le sujet dans son ensemble et comprendre les bases en quelques sortes. Les bibliographies de l'ensemble des précédents rapports des autres services RTM m'ont été très utiles dans cette sélection. J'ai sélectionné de préférence des documents qui traitent de ces sujets au sein de montagnes tempérées afin qu'il y est une certaine cohérence avec mon étude. Dans un second temps, cette recherche bibliographique s'est basée sur l'ensemble des études réalisés dans le cadre du PAPROG depuis 2008 et sur la totalité des inventaires ONF – RTM réalisés dans les Alpes et les Pyrénées de l'Ouest. Cette phase m'a permis de bien comprendre la méthode à mettre en place afin de réaliser l'inventaire sur les Pyrénées de l'Est du mieux possible, mais également de prendre

connaissance de l'ensemble des difficultés que je pouvais rencontrer. Comme par exemple, les possibles erreurs d'identification vis-à-vis d'autres formes glaciaires et périglaciaires. Enfin, ces différents inventaires décrivent également de manière précise comment doit être réalisée la cartographie SIG de ces entités et comment doivent être organisées les tables attributaires, ce qui m'a été très utile par la suite. Pour finir, la troisième phase de cette recherche bibliographique s'est centrée sur l'étude de notre zone d'étude, afin de prendre connaissance de l'ensemble des études qui avaient déjà été réalisées sur ce territoire sur le thème des formes glaciaires et périglaciaire, du pergélisol ou des glaciers-rocheux. Les différents articles réalisés ou co-réalisés par Magalie Delmas m'ont notamment été très utiles pour cette phase-là, et notamment sa thèse :

DELMAS M. (2009) – « Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'est des Pyrénées », *Thèse de doctorat en géographie*, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 430p.

Cette phase m'a notamment permis de savoir où pouvait être situé vraisemblablement des glaciers-rocheux, mais également de connaître la cartographie des autres formes glaciaires ou périglaciaires du type moraine notamment, pour ne pas les confondre avec des GR par la suite. Dans cet objectif, l'article qui m'a également beaucoup aidé est :

VIERS G. (1968) – « La carte du relief glaciaire des Pyrénées. Feuille de Mont-Louis au 50 000^e (Pyrénées-Orientales) », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 39, fascicule 4, pp. 429-434.

Article dans lequel on retrouve des cartes du relief glaciaire des Pyrénées-Orientales comme son nom l'indique, où sont identifiés un très grand nombre de modelés glaciaires comme on peut le voir sur l'extrait qui suit (figure 18).

Certains articles m'ont également permis de débiter mon inventaire comme par exemple :

- **VENTURA ROCA J.** (2016) – « Identificación e inventario de potenciales glaciares rocosos activos en los Pirineos mediante fotointerpretación en visores cartográficos 2D y 3D : primeros resultados », *Revista de Geografía*, n°28, pp. 95-122

Qui est un article au sein duquel l'auteur identifie et répertorie grâce à la photo-interprétation 69 glaciers-rocheux potentiellement actifs à l'échelle des Pyrénées dont 9 sont situés dans notre zone d'étude.

- Ou encore **ANGELY G.** (1967) – « Anciens glaciers rocheux dans l'Est des Pyrénées centrales », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 38, fascicule 1, pp. 5-28

Qui lui est un article qui analyse et interprète la morphologie présente sur trois glaciers-rocheux présent dans les Pyrénées françaises dont un d'entre eux se situe en Ariège.

Cette première partie bibliographique indispensable m'a donc permis de mieux appréhender mon sujet et le travail à réaliser par la suite, mais également de débiter mon inventaire.

b) Partie identification :

Afin de réaliser l'identification par photo-interprétation la plus exhaustive possible des glaciers-rocheux des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales, de nombreux outils et fonds de carte ont été nécessaires. A commencer par les ortho-photographies notamment disponibles sur le site internet Géoportail de l'IGN (figure 19), qui permettent de visualiser les principales formes visibles à la surface du sol, dont les glaciers-rocheux, et qui m'ont été très utiles dans cette phase d'identification. Ces ortho-photographies ont également été utilisées en tant que fond de carte dans le logiciel SIG.



Figure 19 : Extrait d'une ortho-photographie (versant Nord du Carlit)

Source : Géoportail

Le principal inconvénient de ces ortho-photos, c'est le manque de perception du relief, ce qui peut notamment poser problème pour différencier un glacier-rocheux d'une autre forme périglaciaire, identifier les limites latérales et frontales du GR, ou encore pour déterminer l'activité de ce dernier à travers ses modelés de surface. Les seules ortho-photos ne suffisent donc pas pour réaliser cet inventaire. Afin de faciliter cette perception du relief, on peut notamment utiliser des cartes topographiques SCAN25 (figure 20), également disponibles sur Géoportail, à travers les courbes de niveau qui peuvent nous donner ces informations de relief, mais sur lesquelles on retrouve également d'autres informations qui peuvent être utiles

pour ce travail, comme les altitudes, la toponymie et la présence d'éboulis et de dépressions thermo-karstiques identifiés par des figurés spécifiques...

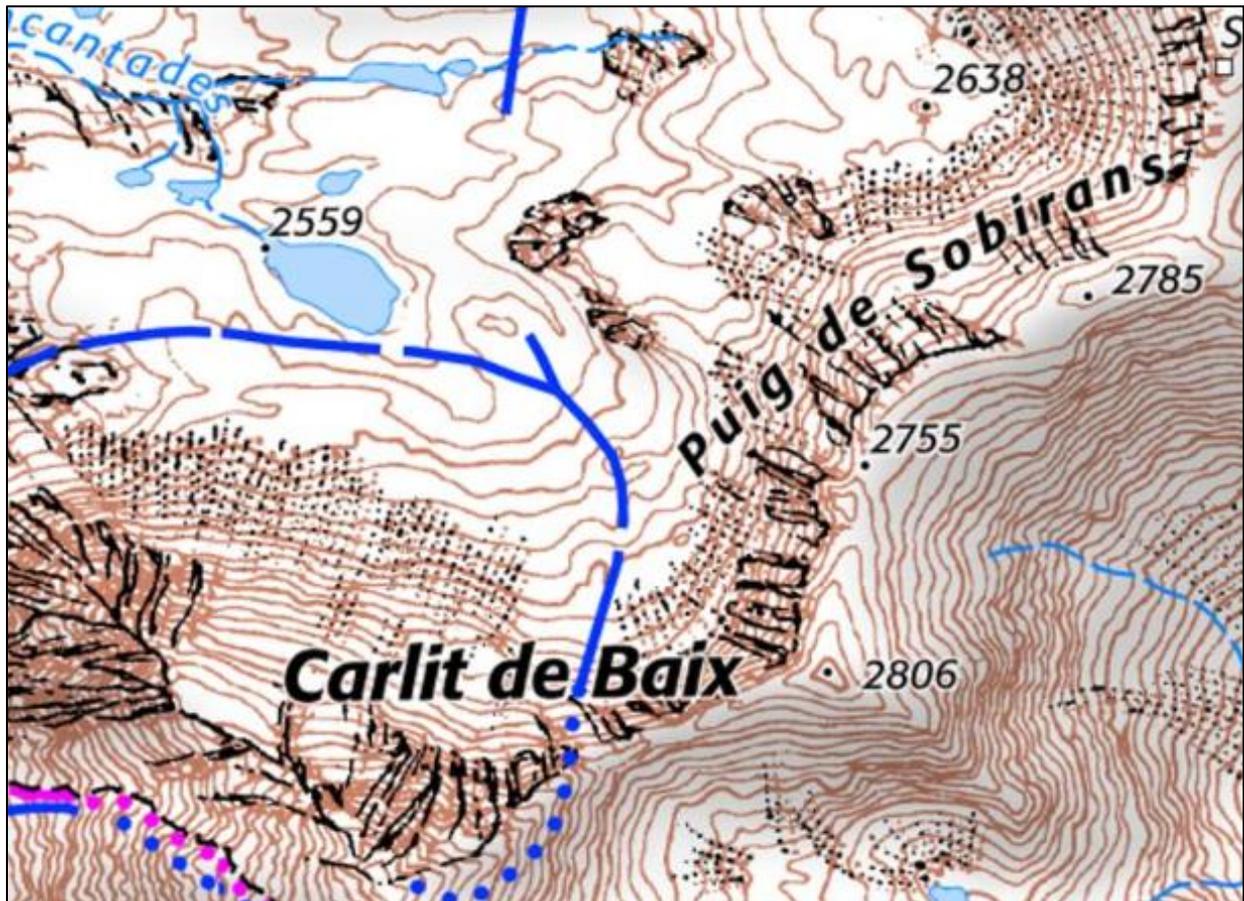


Figure 20 : Extrait de la carte topographique SCAN25 de l'IGN (Versant Nord du Carlit)

Source : Géoportail

Le logiciel Google Earth (figure 21) peut également être un bon outil ici pour identifier les glaciers-rocheux et percevoir le relief. En effet, la navigation en vision 3D permet une bonne appréhension du relief au sein d'une chaîne de montagne, et un repérage rapide des formes caractéristiques d'un GR (front, sillons, rides...). De plus, la fonction *afficher des images d'archives* permet, elle, de visualiser une multitude de séries d'images à différentes dates qui peuvent être utiles pour ne pas être gêné par la neige, ou dans certains rares cas, pour observer potentiellement des mouvements au cours du temps. Cependant, la définition et la résolution parfois faible des images, ainsi que l'absence d'une véritable vue 3D lorsqu'on zoom rend parfois difficile l'identification et la caractérisation de certaines formes, et notamment la différenciation entre moraine et glacier-rocheux. Google Earth est donc un logiciel très pratique dans ce travail qui permet de faire un premier travail d'identification et de recensement rapide à l'échelle de notre zone d'étude, mais pas suffisamment précis dans certains cas pour être le seul outil utilisé.

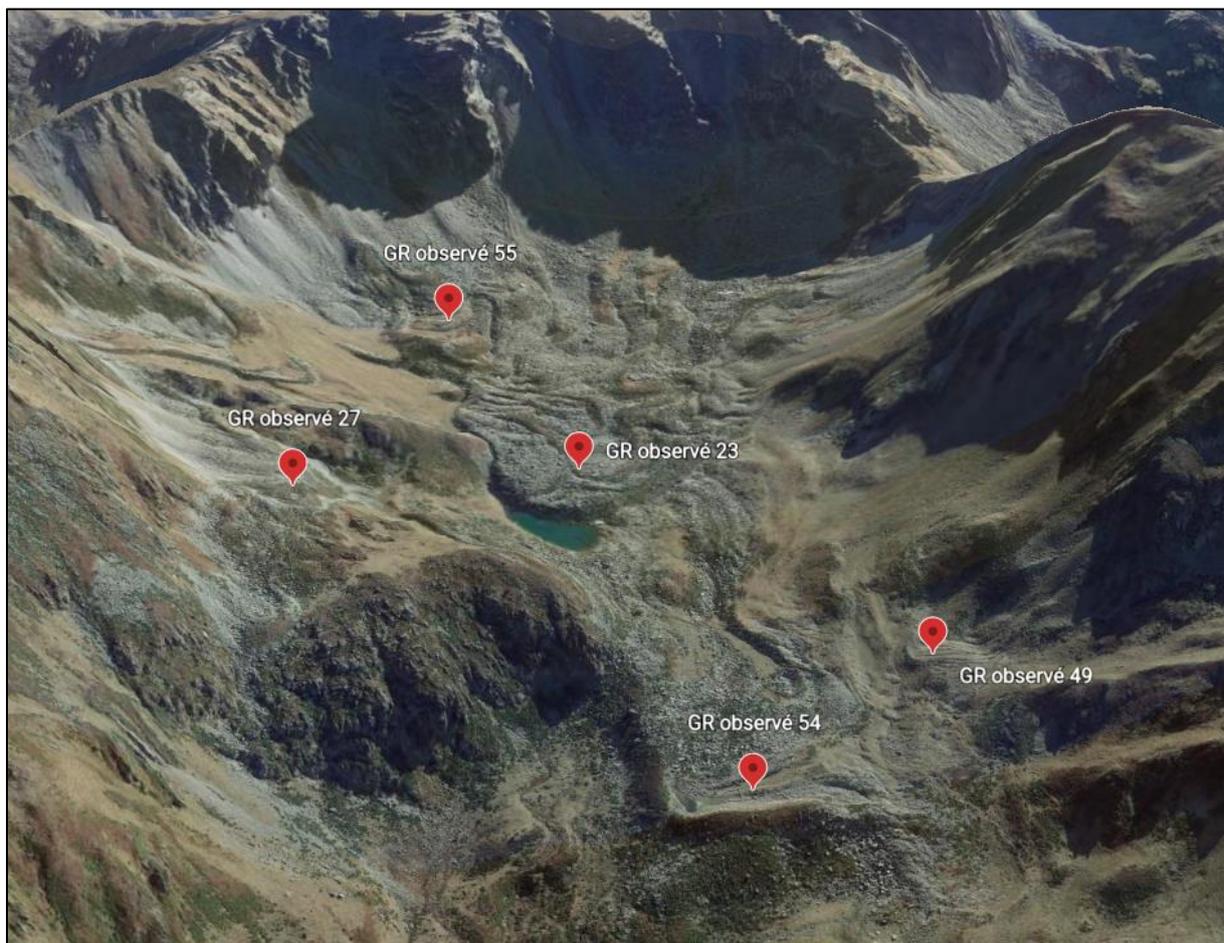


Figure 21 : Pointage de glacier-rocheux sur Google Earth

Afin de percevoir au mieux le relief, la méthode la plus efficace qui a été retenue a été la photo-interprétation en stéréoscopie. Cette technique consiste à faire ressortir le relief à travers un instrument optique (le stéréoscope) ou un logiciel informatique (*stereoPhoto Maker 64* par exemple), à partir de deux photographies aériennes qui se superposent en partie. Lorsqu'on observe ces deux photographies aériennes de la même zone géographique, mais avec un angle différent, à travers le stéréoscope, cela fait donc ressortir le relief de manière importante. Ce qui peut donc permettre de visualiser des éléments non-visibles à travers les autres fonds de cartes ou logiciel vu précédemment. L'intérêt de cette méthode dans ce type de recensements a été mis en évidence par Bonnetain Loïc en 2010 lors de son rapport de stage. Cette méthode permet à la fois de repérer les formes caractéristiques des glaciers-rocheux et d'identifier ces entités, mais également de les délimiter avec une précision importante. C'est donc l'outil indispensable dans ce genre de travail, même si les contrôles terrains restent primordiaux pour valider les informations observées. Il est cependant important d'être vigilant sur certains points, et notamment sur le fait que la grande majorité des stéréoscopes exagèrent la perception du relief, il faut donc y être habitué pour ne pas sur-interpréter les formes observées. De plus, cette technique ne fonctionne pas lorsque l'enneigement du sol est trop important, il faut donc avoir à disposition des photos propices à cet examen.

Enfin, pour finir, les cartes géologiques peuvent également s'avérer utiles dans ce travail de recensement et notamment certaines d'entre elles sur lesquelles on peut retrouver des figurés correspondants aux glaciers-rocheux (figure 22). Ce qui facilite donc grandement le recensement, cependant seule une des cartes géologiques auxquelles j'ai eu accès dispose de ces figurés sur la zone d'étude étudiée. Mais malgré tout, ces cartes peuvent dans tous les cas être utiles afin de confirmer ou d'infirmer la présence d'un glacier-rocheux lorsqu'on a un doute avec une autre forme glaciaire ou périglaciaire qui pourrait éventuellement être identifiée sur la carte géologique. Par exemple, si on a un doute sur l'identité d'une forme entre un glacier-rocheux et une moraine et que sur la carte géologique, il est indiqué que c'est une moraine, cela permet de clore le débat.

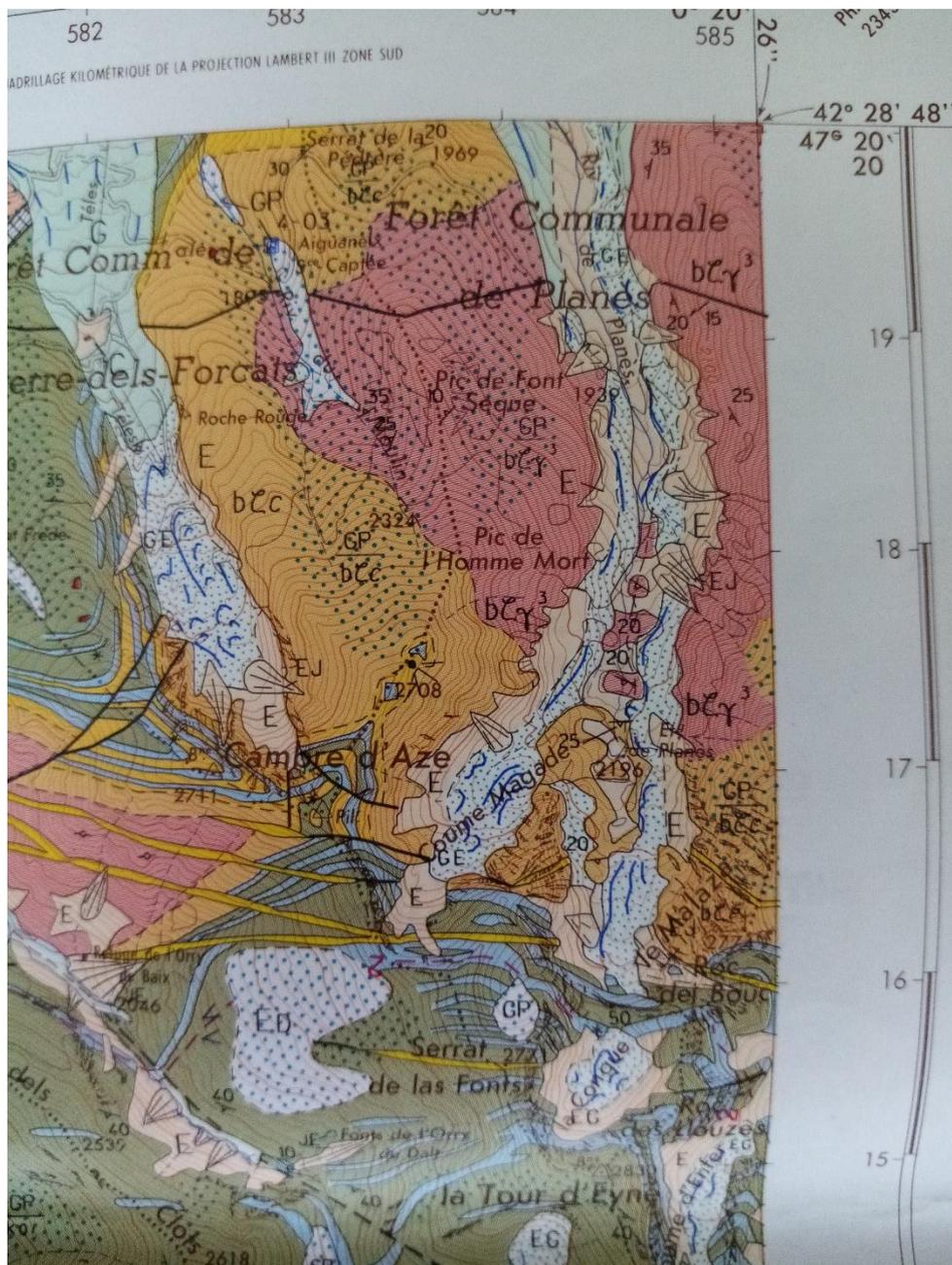


Figure 22 : Extrait de la carte géologique 1/50 000 de Saillagouse, n° 1098

Sur cette carte ci-dessus (figure 22), les figurés sur lesquels il est inscrit les lettres « GE », correspondent aux « glaciers-rocheux tardi-glaciaires ». Tandis que ceux où il est inscrit « EG » correspondent eux à des « éboulis et moraines de névés associés ».

L'ensemble de ces outils/logiciels/fonds de carte m'ont donc permis de réaliser le recensement le plus exhaustif possible. Chacun à sa façon avec ses qualités et ses défauts, mais l'union de l'ensemble de ces techniques et de ces données cartographiques semble être un bon équilibre et une bonne solution pour réaliser ce travail du mieux possible.

c) Partie cartographie :

Après avoir réalisé cette identification de l'ensemble des glaciers-rocheux présents au sein de notre zone d'étude, il a par la suite fallu les cartographier avec l'aide du logiciel ArcMap du pack ArcGis d'Esri, version 10.8. Cette cartographie a été réalisée selon la même méthode que pour les inventaires réalisés dans les Alpes et les Pyrénées de l'Ouest (figure 23). Le fond de carte utilisé est l'ortho-photographie IGN de 2021.

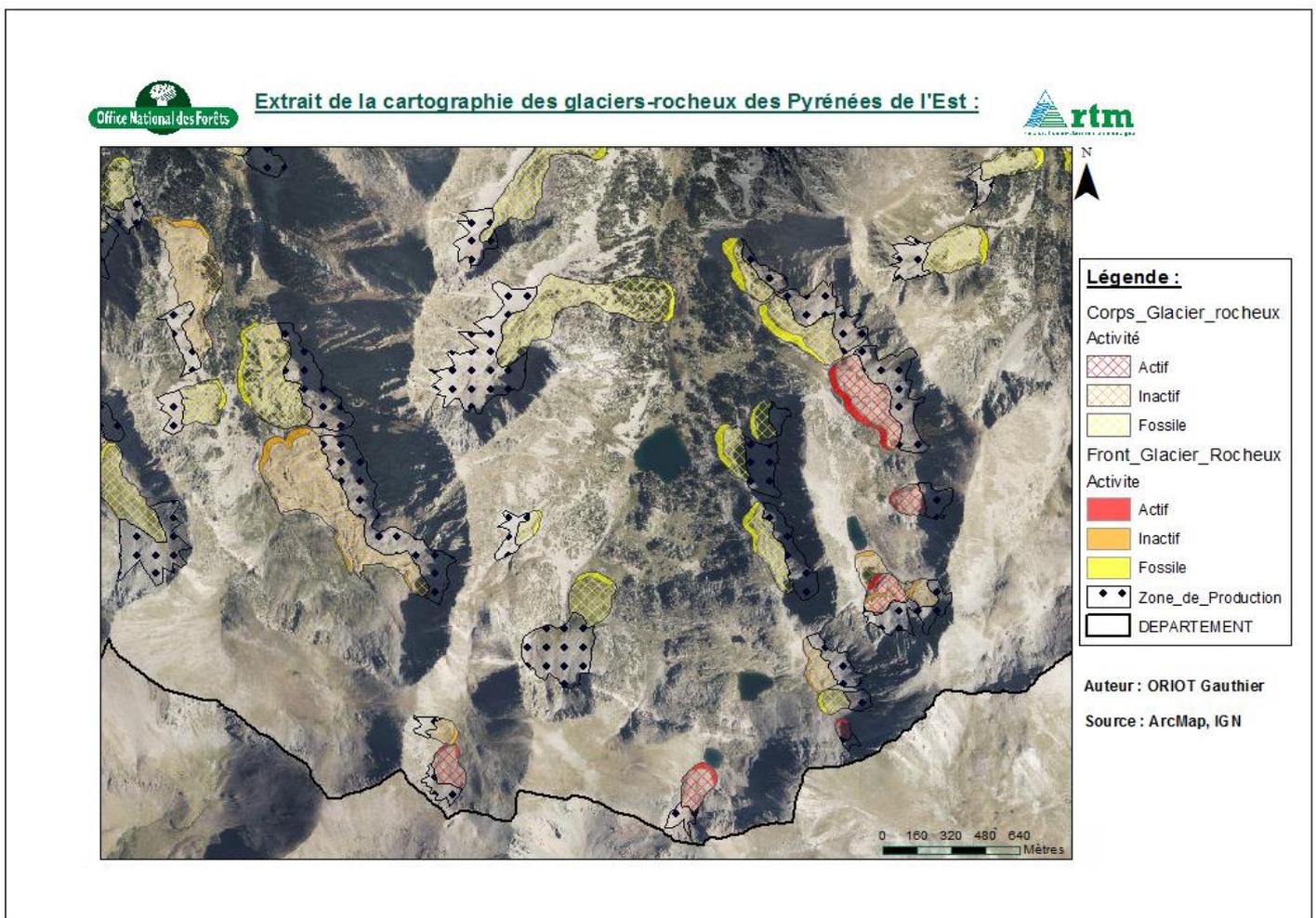


Figure 23 : Extrait de la cartographie des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est

Source : ArcMap, IGN (fond de carte)

Cette cartographie comprend les couches (cf. légende figure 23) :

- Corps du glacier-rocheux ; qui délimite l'ensemble du GR, du front à la racine. La symbologie de cette couche varie en fonction de l'activité du glacier-rocheux comme on peut le voir sur la légende de la figure 23 : quadrillage rouge pour un GR actif, orange pour un inactif et jaune pour un GR fossile. Cette symbologie (tout comme celle des autres couches) se base sur celle réalisée dans les départements alpins pour avoir une homogénéité de ces inventaires à l'échelle nationale.
- Front du glacier-rocheux ; qui elle délimite donc le front du GR comme son nom l'indique. La symbologie de cette couche varie de la même façon que celle du corps du GR en fonction de l'activité, sauf qu'ici, c'est en couleur pleine. A noter que dans certains cas, un même GR peut être composé de plusieurs fronts.
- Zone de production ; qui délimite donc la zone de production du GR, c'est-à-dire la zone d'éboulis situé à l'amont du GR et qui va venir fournir ce-dernier en matériaux. Cette couche a été ajoutée lors de l'inventaire des GR de l'Isère en 2014. Ici, la symbologie reste identique sur l'ensemble des GR et est représentée par des points noirs. Là aussi, un même GR peut avoir plusieurs zones de production.

L'ensemble des délimitations de ces couches ont été réalisées par photo-interprétation et peuvent donc être soumises à débat dans certains cas.

Après avoir polygoniser l'ensemble des glaciers-rocheux recensés, il a fallu remplir les tables attributaires de l'ensemble de ces couches. En ce qui concerne la couche « corps du glacier-rocheux », celle-ci est composée des champs :

- Identifiant du GR
- Département du GR
- Commune du GR
- Numéro INSEE de la commune
- Massif où se situe le GR
- Activité (actif, inactif ou fossile)
- Certitude ; qui va de 1 à 3 et qui symbolise le niveau de certitude que l'on a vis-à-vis de l'activité du glacier-rocheux définie
- Orientation du GR
- Surface en mètre carré
- Altitude minimale, maximale et moyenne
- La largeur et la longueur du GR
- Visite terrain ; oui ou non en fonction de si on est allé voir le GR sur le terrain ou pas
- Enjeux : dans ce champ, on identifie les potentiels enjeux situés sur ou à proximité du GR (remontée mécanique, refuge, route, habitation...)
- Cotation des enjeux ; qui va de 0 à 3 en fonction de « l'importance » de l'enjeu, un village étant un enjeu plus important qu'une route par exemple.

La couche « front du glacier-rocheux » est quant à elle composée des champs :

- Identifiant du front

- Activité du front ; qui peut parfois varier de l'activité du GR sur lequel il se trouve dans certains cas où un même GR est composé de plusieurs fronts.
- Végétation ; qui stipule si le front est composé de végétation ou non, ce qui peut être un paramètre important pour juger de l'activité et de la stabilité d'un GR.
- Stabilité du front (bonne, moyenne ou mauvaise)
- Dimension des matériaux présents dans le front (fins, moyens, grossiers)
- Pente du front (concernent là aussi uniquement les GR vus sur le terrain)
- PATM (Probabilité d'Alimentation du Torrent en Matériaux) : ce champ détermine donc la probabilité que le GR vienne alimenter un torrent en matériaux en cas d'épisode de forte pluie ou de glissement de terrain, ce qui pourrait donc éventuellement générer une lave torrentielle.
- Cotation du PATM ; qui va de 0 à 3 selon la même logique que la cotation des enjeux dans la table attributaire du corps du GR.

Et enfin, la couche « zone de production » est, elle, composée des champs :

- Identifiant de la zone de production
- Origine ; qui détermine l'origine des matériaux fournis au glacier-rocheux et donc indirectement l'origine du GR en lui-même. L'origine de ces matériaux peut être des éboulis (E) ou glaciaire (G).

Là encore, la composition de l'ensemble de ces tables attributaires a été établi et au fur et à mesure étoffée lors des inventaires réalisés dans les Alpes. A noter que pour un glacier-rocheux donné, le ou les front(s) qui le compose(nt), ainsi que la ou les zone(s) de production ont le même identifiant afin d'avoir une cohérence entre ces trois tables. De plus, encore une fois, une partie de ces tables (activité, stabilité, dimension des matériaux, PATM) a été remplie par photo-interprétation et peut donc, là aussi, être soumise à débat. Les sortis terrains doivent permettre de gommer ces incertitudes, mais comme on l'a déjà dit précédemment, il n'est pas possible de se rendre sur l'ensemble des GR recensés.

Certains champs ont nécessité l'utilisation d'autres couches fournies par l'IGN pour être remplis. Comme par exemple les champs « PATM » et « enjeux », pour lesquels il a fallu utiliser les couches départementales « tronçon hydrographique » et/ou « plan d'eau ». Les couches MNT ont également servi à déterminer l'orientation des GR et les altitudes minimales, maximales et moyennes.

Ce travail de cartographie a donc été méthodique, et s'est en grande partie reposé sur les précédents inventaires réalisés.

d) Partie visite sur le terrain :

Lorsque l'on réalise une sortie terrain sur un glacier-rocheux, l'objectif est de vérifier les données saisies lors de la photo-interprétation. Dans cet objectif, la première chose que l'on observe c'est la forme générale du GR, son front, le taux de végétation présent, la

granulométrie des blocs qui le compose, etc., afin de déterminer si l'activité que l'on a donnée auparavant correspond bien à la réalité du terrain. On va notamment s'attarder sur l'inclinaison du front et l'aspect général du corps (s'il est bombé ou bien composé de dépressions thermokarstiques, présence ou non de rides et de sillons ...). Si après ces observations on a toujours des doutes, ou tout simplement pour confirmer notre hypothèse et apporter de la donnée supplémentaire, on peut réaliser quelques mesures sur le terrain. Les principales mesures réalisées sont le calcul de la pente du front à l'aide d'un inclinomètre (figure 24), la prise de température d'une éventuelle source au niveau du front du GR et les relevés précis d'altitude au niveau du corps et du front. On peut également s'intéresser à la stabilité du front qui peut être une indication pour déterminer l'activité du GR (le front d'un GR actif n'est généralement pas stable, contrairement à un GR fossile notamment). L'ensemble de ces observations et de ces mesures nous permettent donc par la suite de déterminer l'activité du GR avec une certitude assez élevée.

L'objectif d'une sortie terrain est également de vérifier les contours du GR réalisés sur ordinateur, pour voir si cela correspond bien à la réalité du terrain, autant au niveau des fronts latéraux et frontaux, que de la racine. Enfin, la dernière chose à faire et l'une des plus importante lorsqu'on est sur le terrain, est de réaliser une analyse ALEA/ENJEU/RISQUE. Cette analyse consiste à examiner dans un premier temps quels aléas avérés ou potentiels sont en lien avec la présence du GR. Ensuite, à partir de cette observation, on détermine dans un second temps si des enjeux sont présents dans une zone plus ou moins proche du GR, en fonction du type d'aléa identifié (par exemple, pour un aléa « chute de bloc », un village situé 3km à l'aval ne représentera pas un enjeu, tandis que pour un aléa « alimentation torrentielle » si). Enfin, à partir de ces deux critères, on détermine s'il y a risque ou pas, sachant qu'un risque = aléa + enjeu. A noter qu'un risque avéré signifie que le risque a déjà été observé et qu'il pourrait se reproduire alors qu'un risque potentiel va plutôt caractériser un site où le risque est possible mais n'a jamais été observé.

Les sorties terrains sont donc une partie importante de ce travail qui permet de compléter les analyses faites sur ordinateur et peuvent parfois s'avérer indispensables dans certains cas où il est difficile de trancher entre un GR actif et inactif ou entre un GR inactif et fossile notamment.

(Compte rendu de l'ensemble des sorties terrains en annexe)



Figure 24 : Photo d'un inclinomètre qui sert à calculer la pente du front des GR

Maintenant qu'on a bien détaillé les différentes méthodologies appliquées aux différentes étapes de ce stage. Nous allons désormais pouvoir nous concentrer sur les résultats de cet inventaire des glaciers-rocheux au sein des Pyrénées de l'Est.

IV. Résultats :

Au cours de cet inventaire, nous avons répertorié **445 glaciers-rocheux**, répartis entre l'Ariège et les Pyrénées-Orientales.

1. Répartition d'activité :

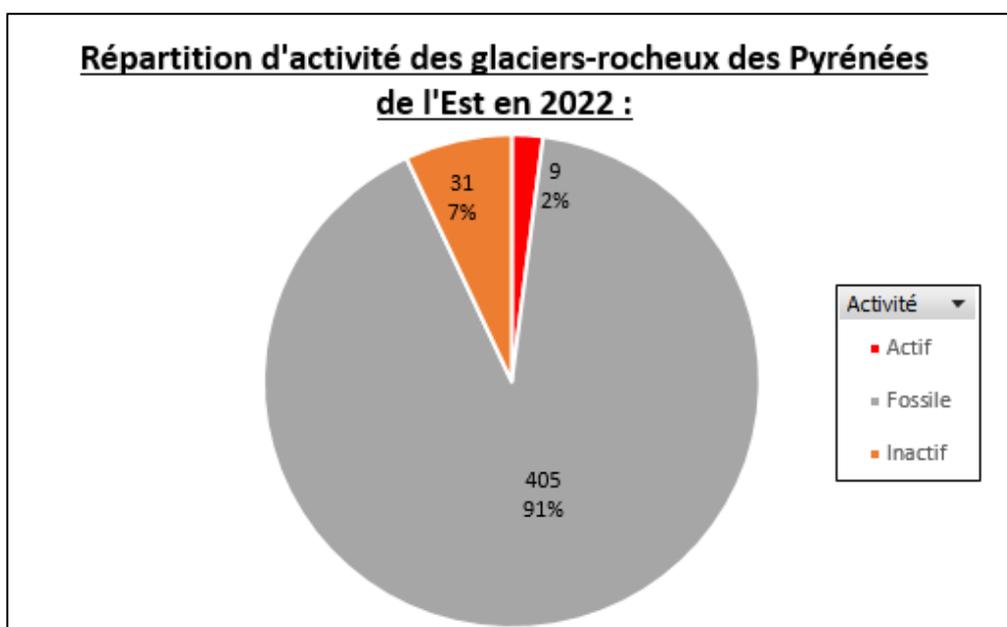
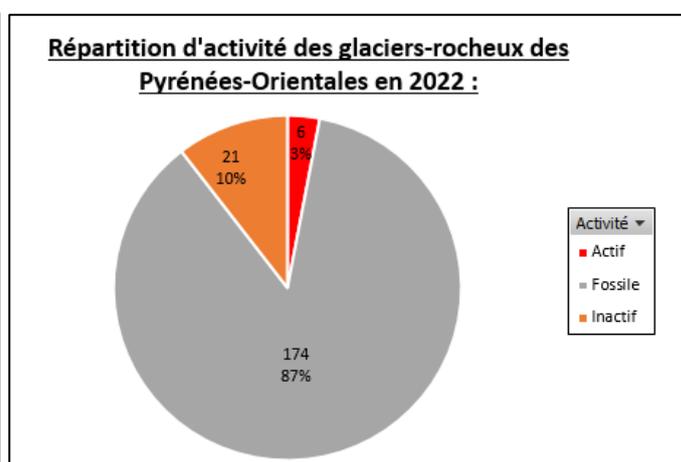
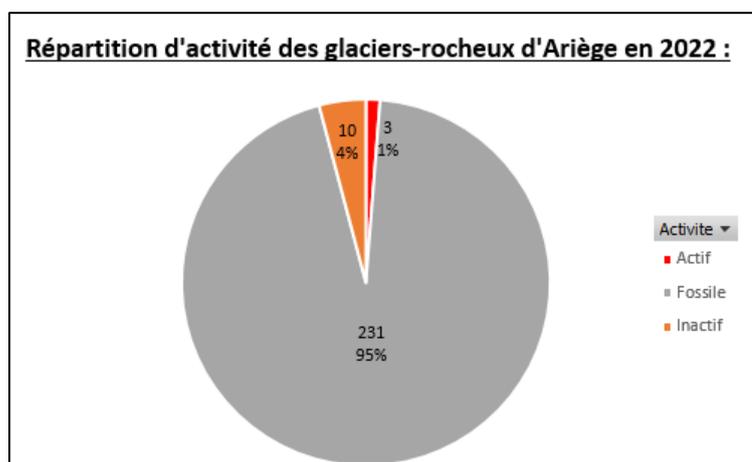


Figure 25 : Répartition de l'ensemble des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est en fonction de leur activité :



Comme on peut le voir sur la figure 25, sur l'ensemble des formes répertoriées, une très grande majorité est aujourd'hui fossiles (91%), tandis que les formes inactives représentées, elles, 7% de l'ensemble des formes identifiées et les formes actives seulement 2% avec 9 entités observées sur l'ensemble de notre zone d'étude. L'ensemble de ces données est la preuve de la très faible présence de pergélisol au sein de ce territoire, qui se limite à des zones isolées probablement à haute altitude. Cependant, le nombre important de formes identifiées à l'échelle de ces deux départements (445 au total), mais qui sont pour la plupart fossiles aujourd'hui, prouve que l'activité périglaciaire liée à la présence ancienne de pergélisol a été très importante par le passé.

A travers les graphiques de la figure 26, on observe que la majorité des glaciers-rocheux identifiés se trouve en Ariège avec 244 unités contre 201 dans les Pyrénées-Orientales. Cependant, c'est dans le département des Pyrénées-Orientales qu'on retrouve le plus d'entités contenant encore de la glace à l'heure actuelle. Autant en termes de formes inactives (21 glaciers-rocheux inactifs inventoriés dans les P-O contre seulement 10 en Ariège), que de formes actives (6 dans les P-O contre 3 en Ariège). C'est un constat qui peut sembler étonnant étant donné que les sommets les plus hauts des Pyrénées de l'Est sont situés en Ariège, ou encore au vu de la proximité des Pyrénées-Orientales avec la Méditerranée qui apporte une certaine douceur climatique (Partie II, 3). Cette situation s'explique vraisemblablement par la présence de contexte de géographie locale plus favorable à la présence de pergélisol dans les Pyrénées-Orientales qu'en Ariège, au sein des plus hautes altitudes.

2. Répartition géographique :

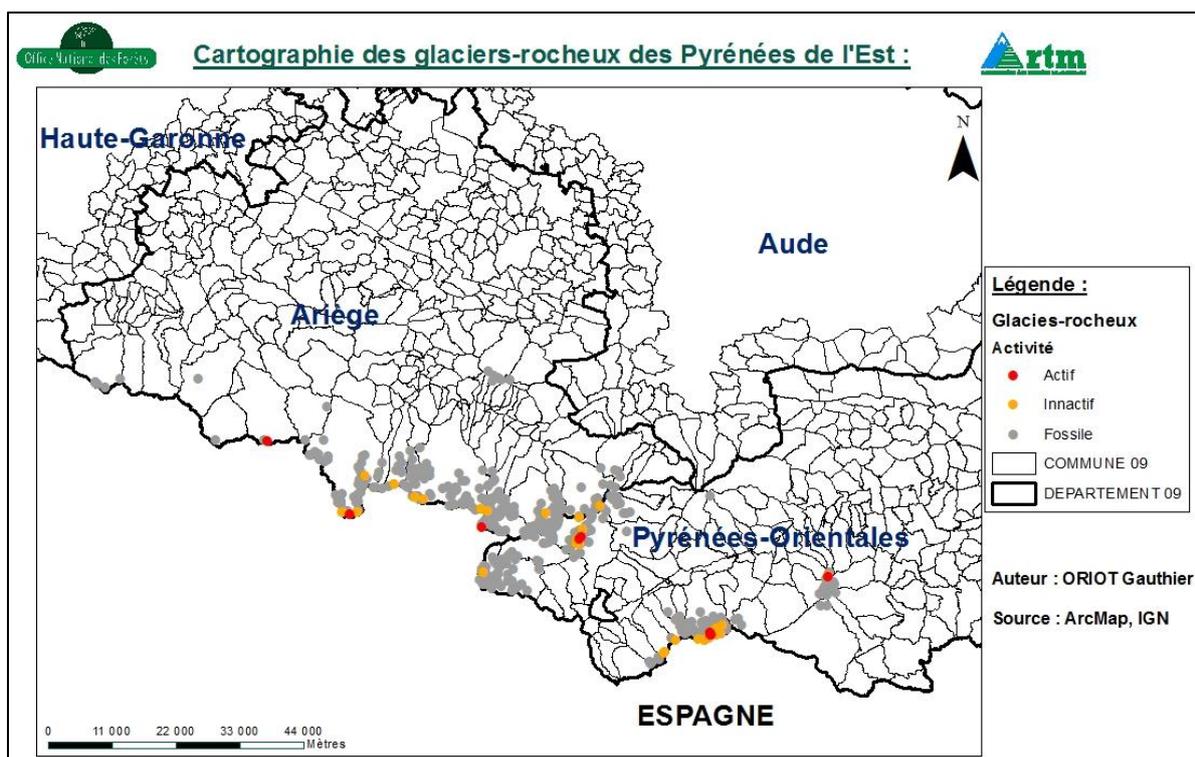


Figure 27 : Cartographie des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est :

On voit sur cette carte ci-dessus que l'ensemble des glaciers-rocheux répertoriés au sein des Pyrénées de l'Est se situe logiquement sur les zones de haute montagne de cette région. A savoir à l'Ouest des Pyrénées-Orientales et notamment au sein des massifs du Puigmal, du Carlit, du Campcardos et de Font Negra (on en retrouve aussi quelques-uns sur le massif du Canigou dont notamment un actif). Ainsi qu'au Sud du département de l'Ariège et notamment au Sud-Est le long de la frontière avec l'Andorre et les Pyrénées-Orientales au sein des massifs du Montcalm, d'Aston, du Vicdessos et du Carlit (figure 28).

Le massif qui contient le plus de formes contenant encore du pergélisol à l'intérieur (actives et inactives) est le massif du Puigmal (figure 28) situé le long de la frontière espagnole dans les Pyrénées-Orientales avec 14 formes inactives et 3 formes actives répertoriées. Derrière on retrouve le massif du Carlit avec 6 formes inactives et une active réparties sur les deux départements. Enfin, les massifs du Canigou, de Bassies, de l'Aston et du Montcalm contiennent tous une forme active comme on peut le voir sur les graphiques ci-dessous.

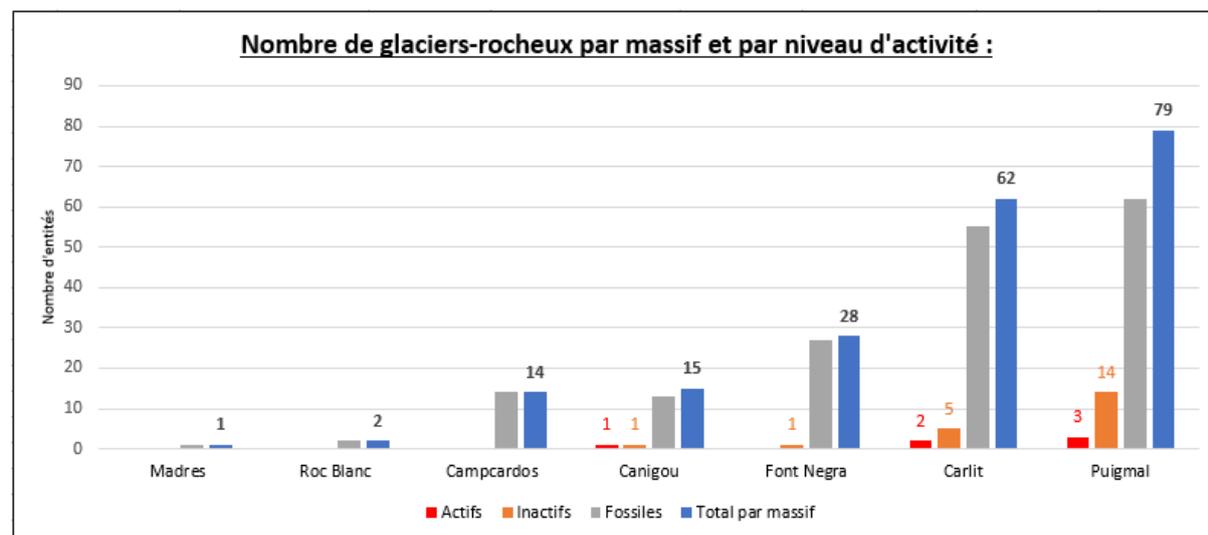
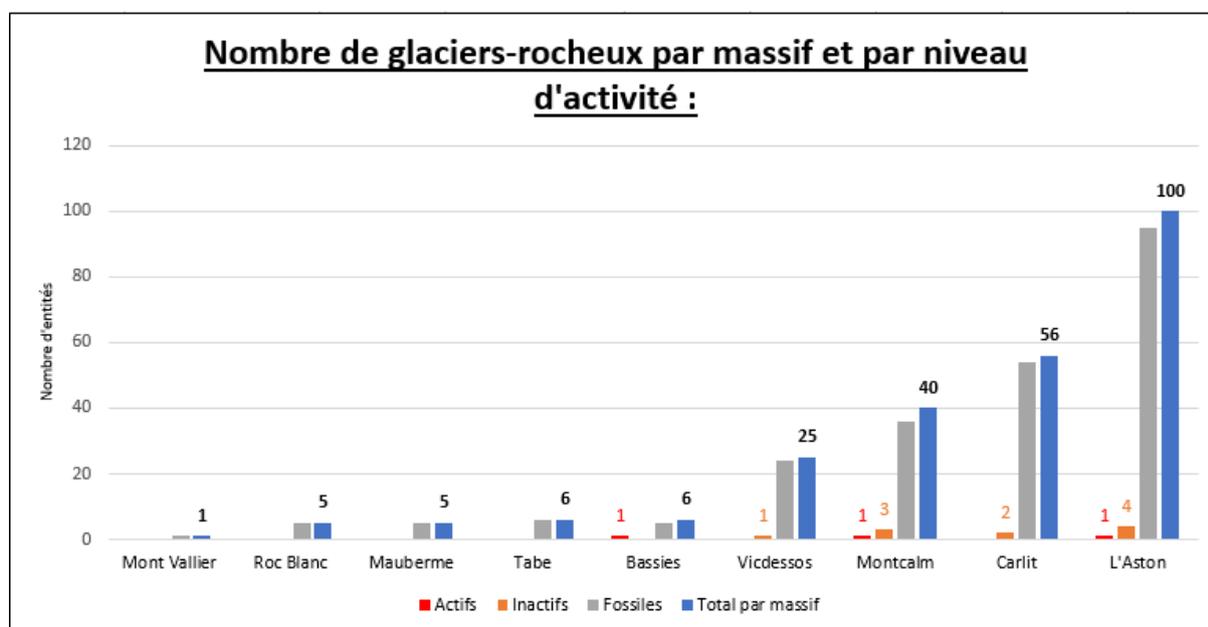


Figure 28 : Répartition des glaciers-rocheux d'Ariège (graphique du haut) et des Pyrénées-Orientales (graphique du bas) par massif et par niveau d'activité :

A noter que le massif où l'on a répertorié le plus de glaciers-rocheux est le massif du Carlit avec 118 formes identifiées sur les deux départements, devant de massif de l'Aston (100), du Puigmal (79) et du Montcalm (40) pour les plus importants (figure 28). Ces massifs ressortent logiquement du lot car ce sont les plus vastes en haute altitude présent dans notre zone d'étude.

3. Répartition altitudinale :

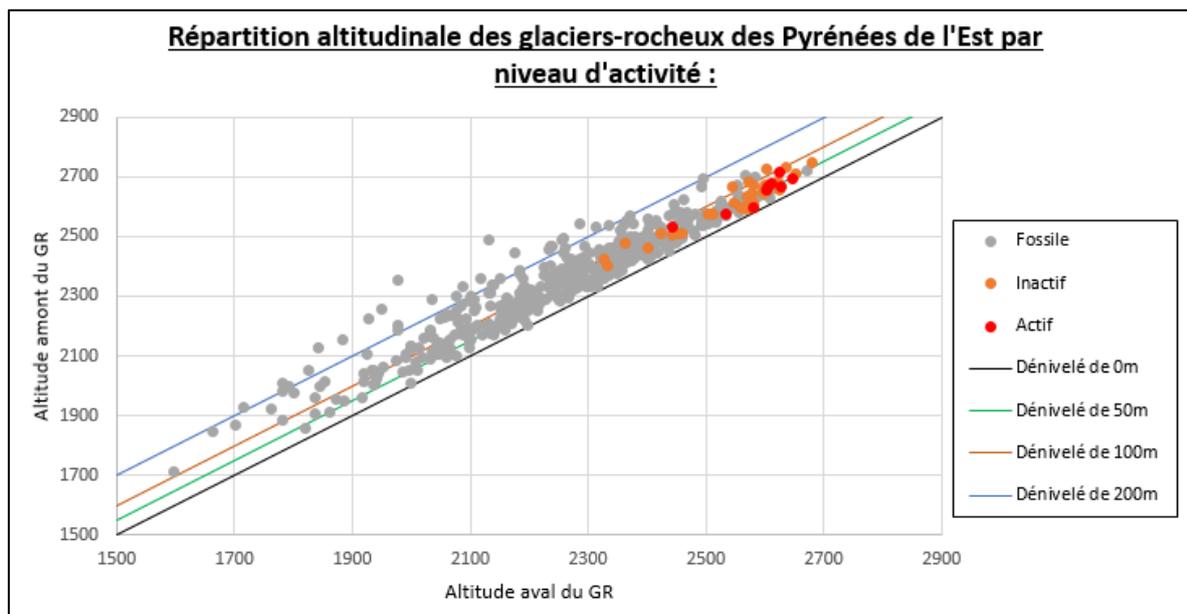


Figure 29 : Répartition altitudinale des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est par niveau d'activité (ci-dessus) et dénivelée moyen (ci-dessous)

	Actifs	Inactifs	Fossiles
Nombres d'entités	9 entités	31 entités	405 entités
Dénivelé moyen	61 mètres	72 mètres	105 mètres

Cette figure 29 révèle que les formes actives sont dépendantes de la haute altitude avec des altitudes amont que ne descendent pas en-dessous des 2500m et des altitudes aval au-dessus des 2400m. Ce sont également des formes que ne s'étendent pas sur beaucoup de dénivelé, comme on peut le voir sur le tableau, avec 61m de dénivelé moyen. Ce qui est légèrement inférieur au dénivelé moyen des formes inactives (72m) qui sont, elles aussi, dans une moindre mesure, dépendantes de la haute altitude dans l'ensemble puisqu'elle ne descendent pas en-dessous des 2300m d'altitude. Ce qui est en réalité très bas pour une forme inactive étant donné qu'on estime la limite de présence de pergélisol à 2500m environ dans les Pyrénées. En revanche, les formes fossiles peuvent, elles, descendre en-dessous des 1700m et s'étendre sur plus de 100m de dénivelé en moyenne. Certaines formes dépassent même les 200m de dénivelé, voire les 300m.

Cette grande différence en termes de dénivelé est dû au fait que les formes fossiles ont eu le temps de s'étendre durant une période longue, plus froide que la période actuelle et n'ont donc pas été limitée par des « altitudes seuils », comme c'est le cas pour les formes actives et inactives aujourd'hui.

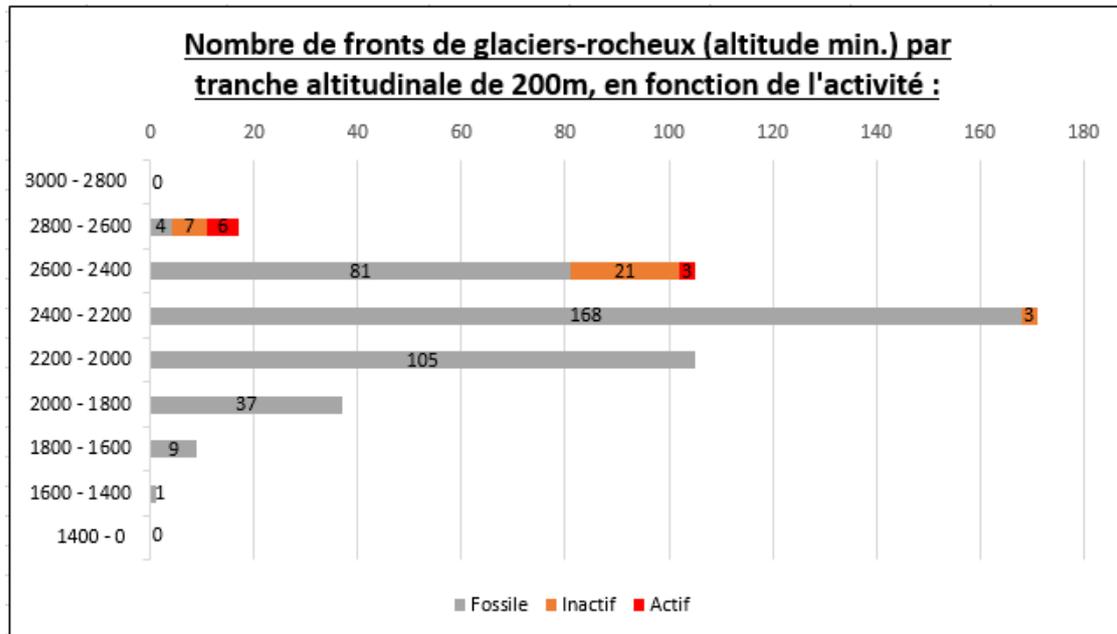


Figure 30 : Répartition altitudinale des fronts des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction de l'activité :

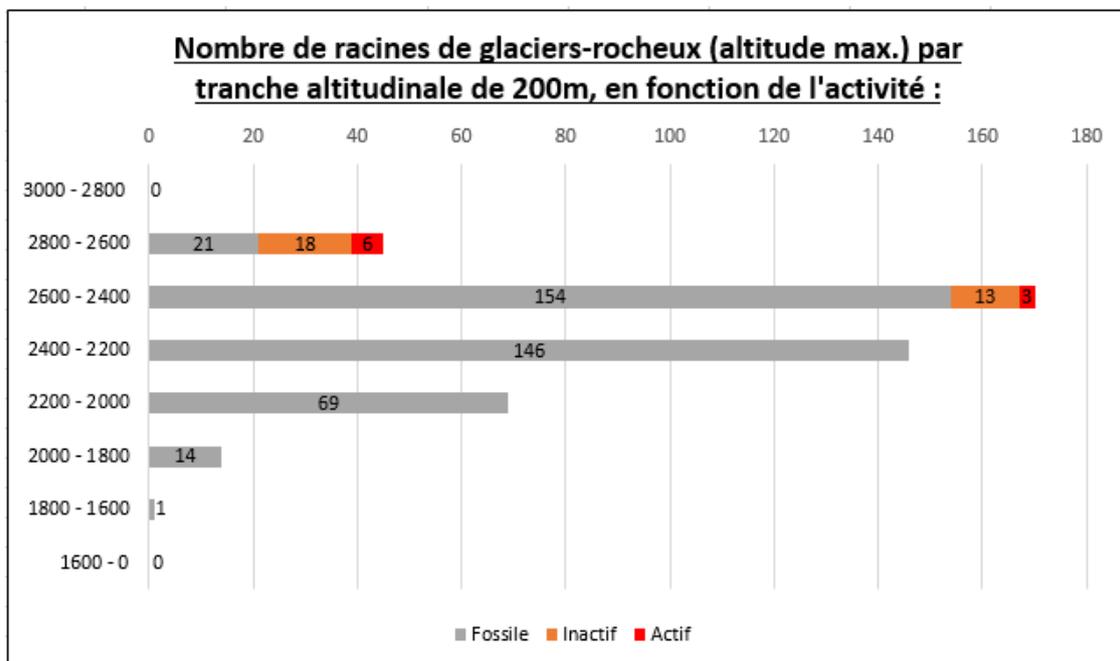


Figure 31 : Répartition altitudinale des racines des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction de l'activité :

Ces figures 30 et 31 viennent confirmer les observations faites de la figure 29, à savoir que les glaciers-rocheux actifs et inactifs sont dépendants de la haute altitude. On voit ici que l'ensemble des formes actives répertoriées sont exclusivement situés entre 2400m et 2800m

d'altitude, preuve que c'est dans cette tranche altitudinale là qu'on retrouve les plus importantes zones de pergélisol. En ce qui concerne les formes inactives, celles-ci se retrouvent légèrement plus bas en altitude que les formes actives, au sein de zones géographiques particulières, aux conditions climatiques favorables à la présence de pergélisol (combe encaissée versant Nord, zone humide où l'accumulation de neige en hiver est importante, etc...). Mais la présence majoritaire de forme fossiles à ces altitudes (entre 2600m et 2200m) montre que ces tranches altitudinales sont majoritairement dépourvues de pergélisol.

Ces données nous permettent d'affirmer qu'au sein de notre zone d'étude, le pergélisol est surtout présent au-dessus de 2400m d'altitude, mais on peut observer des poches de permafrost à partir de 2300m environ dans des zones particulièrement favorables. Tandis que les formes fossiles sont, elles, présentes à des altitudes beaucoup plus faibles, preuve que par le passé les conditions étaient beaucoup plus froides.

Le fait qu'aucunes formes ne soient observées au-dessus des 2800m d'altitude est dû au fait que premièrement, cela ne représente pas beaucoup de surface à l'échelle des Pyrénées de l'Est. Et deuxièmement, pour qu'un glacier-rocheux se forme, il faut qu'il y est une zone de production de matériaux à l'amont qui vienne alimenter cette forme périglaciaire. Généralement sous forme de parois rocheuses plus ou moins importantes. Cependant, les zones supérieures à 2800m d'altitude dans les Pyrénées de l'Est sont majoritairement des sommets raides qui ne réunissent pas ces caractéristiques.

	GR actifs	GR inactifs	GR fossiles	Tous
Moyenne	2584	2533	2242	2269
Médiane	2604	2567	2265	2285
Valeur minimale	2441	2327	1594	1594
Valeur Maximale	2644	2678	2669	2678
Ecart type	63	94	192	204

Figure 32 : Valeurs extrêmes et statistiques sur les altitudes des fronts des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, par niveau d'activité :

Ce tableau vient résumer l'ensemble des observations réalisées en ce qui concerne les altitudes des glaciers-rocheux. A noter que l'altitude n'est pas le seul paramètre qui rentre en compte même s'il est très important, l'orientation, la géographie locale et les éventuels microclimats présents en zone de montagne peuvent également favoriser ou non la présence de pergélisol à l'échelle locale. C'est ce qui peut expliquer la présence de formes inactives si bas en altitude et inversement la présence de formes fossiles et inactives à des altitudes élevées.

4. Orientation des glaciers-rocheux :

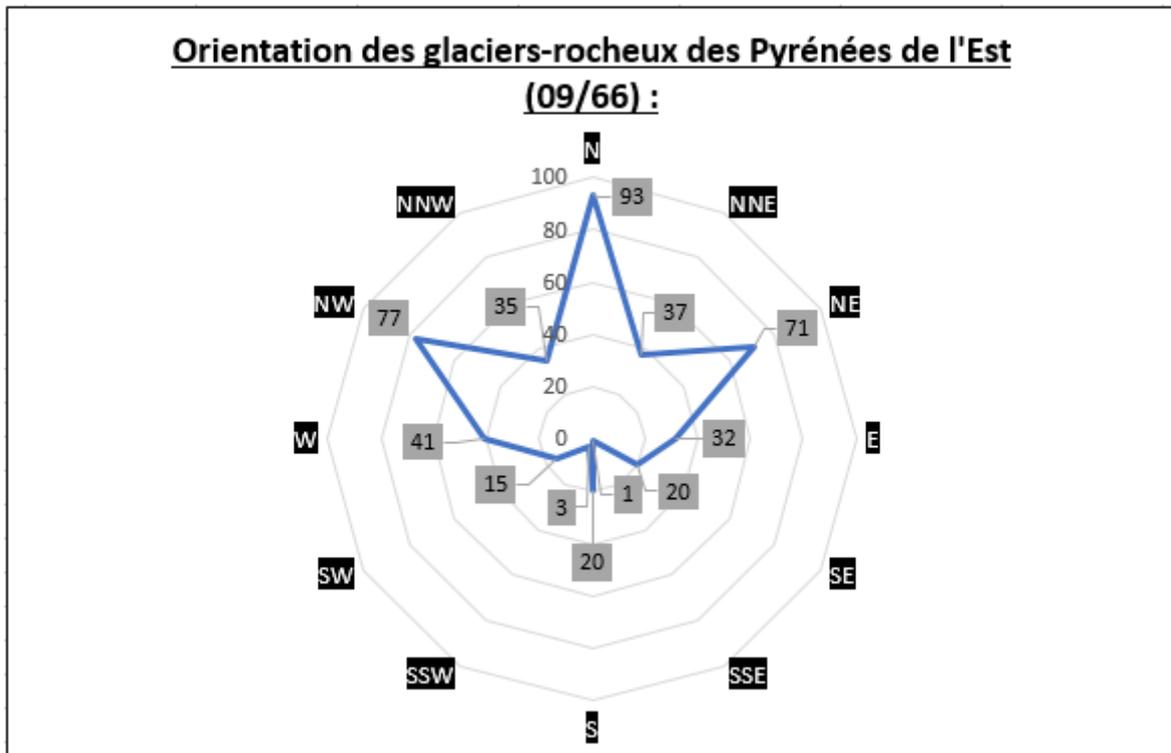


Figure 33 : Orientation de l'ensemble des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est :

Sans grande surprise, on observe sur cette figure 33 que les glaciers-rocheux se retrouvent majoritairement en versant Nord, Nord-Est et Nord-Ouest (70% des formes répertoriées), qui sont des versants à l'abri du soleil une bonne partie de la journée, ce qui permet des conditions favorables au maintien du sol à une température basse et donc à la présence de pergélisol. Ces résultats sont similaires à l'ensemble des autres inventaires réalisées dans les Alpes et les Pyrénées de l'Ouest.

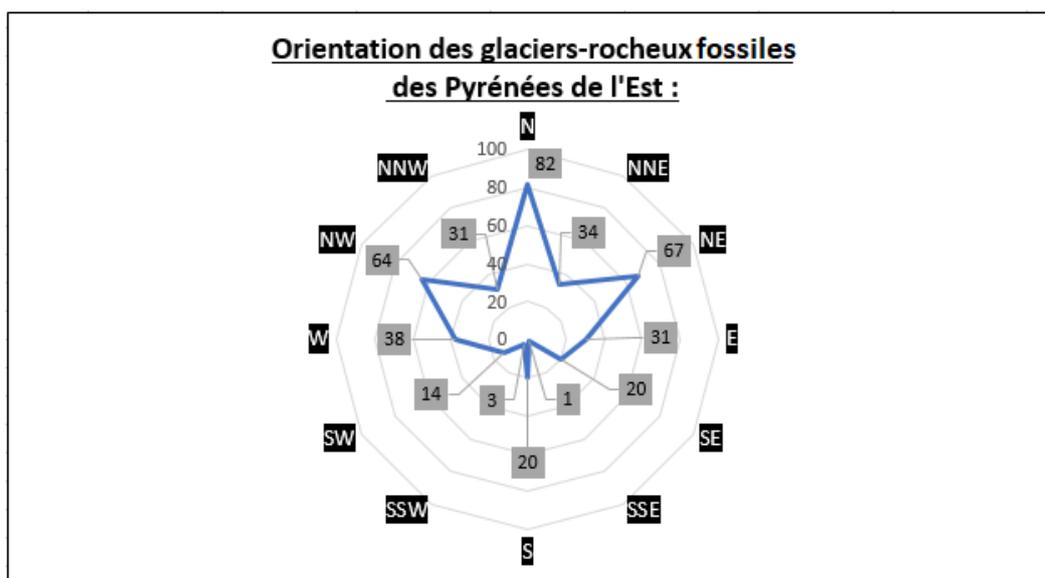


Figure 34 : Orientation des glaciers-rocheux fossiles des Pyrénées de l'Est :

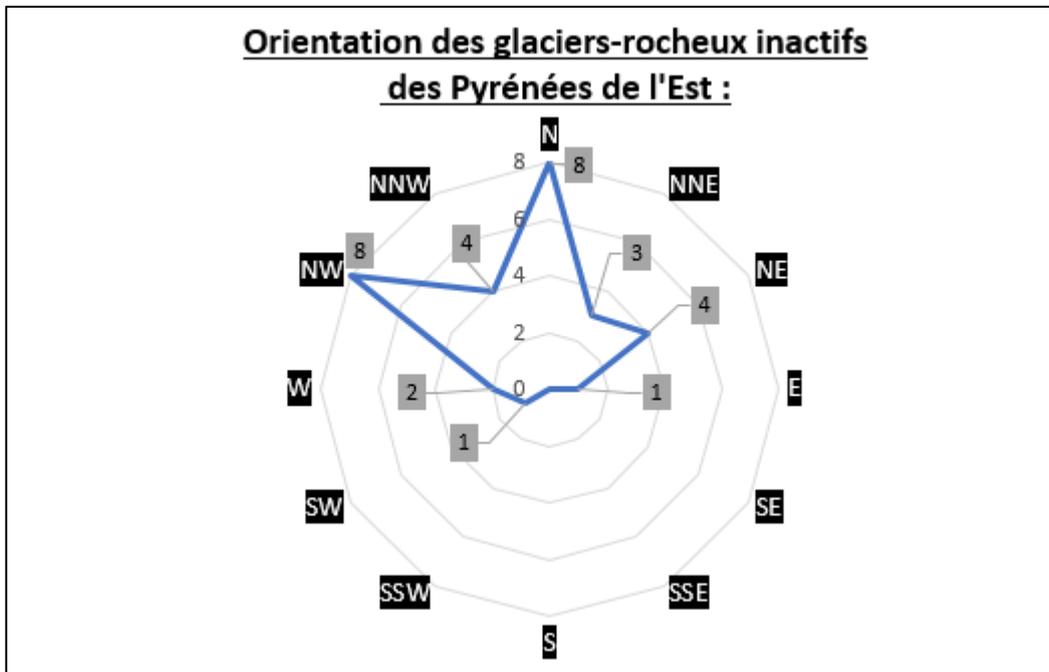


Figure 35 : Orientation des glaciers-rocheux inactifs des Pyrénées de l'Est :

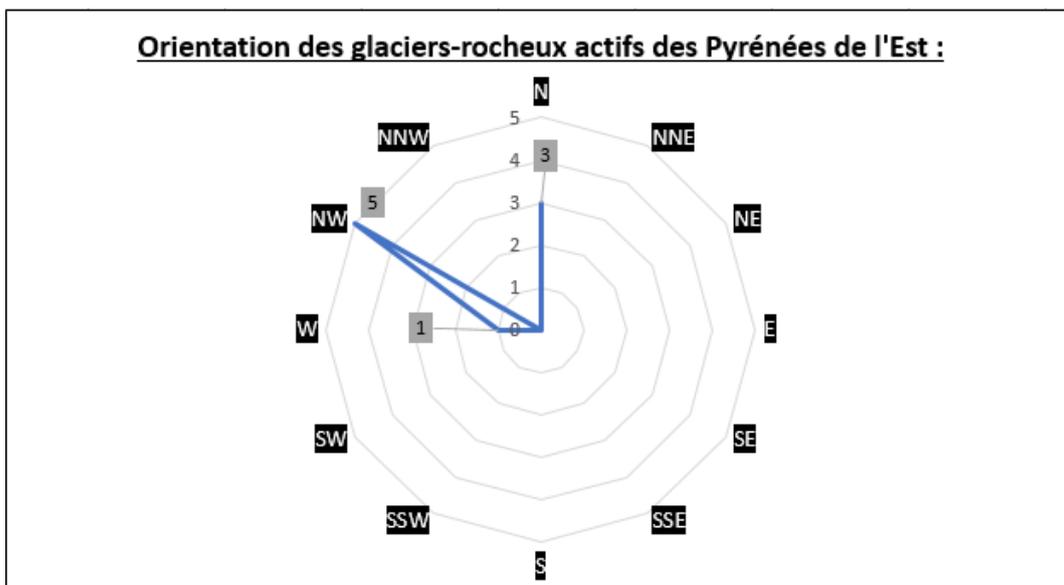


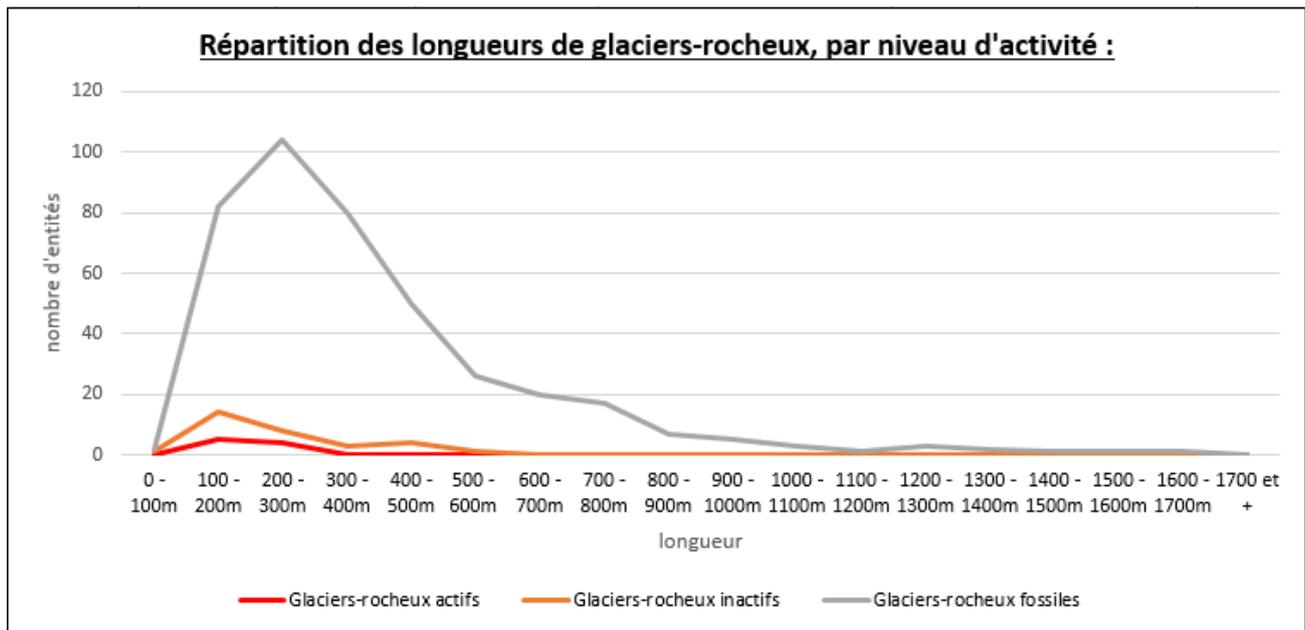
Figure 36 : Orientation des glaciers-rocheux actifs des Pyrénées de l'Est :

Les graphiques présents ci-dessus (figure 34 à 36), qui représentent l'orientation des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est en fonction de leur activité, nous montre que la quasi-totalité des glaciers-rocheux situés en versant Sud, Sud-Est ou Sud-Ouest sont aujourd'hui fossiles (mise à part une forme inactive orientée Sud-Ouest). Preuve que les conditions favorables à la présence de pergélisol aujourd'hui sont logiquement situées en versant Nord, à l'abri du soleil. Même la quasi-totalité des glaciers-rocheux répertoriés ayant une orientation Est ou Ouest sont également fossiles. Là encore, ces observations se retrouvent dans l'ensemble des inventaires de glaciers-rocheux à l'échelle nationale.

De plus, on observe également sur la figure 36 que les formes actives sont plutôt exposées Nord-Ouest que Nord-Est. Cette situation est très vraisemblablement due à l'influence du

climat méditerranéen, en ce qui concerne le département des Pyrénées-Orientales notamment, qui est un climat doux, qui arrive de l'Est et qui réchauffe donc les versants Est, tandis que les versants Ouest sont plutôt épargnés par ce phénomène. Cette situation explique donc en partie pourquoi la totalité des glaciers-rocheux actifs sont exposés Nord-Ouest, Ouest ou Nord et qu'aucun n'est exposé Nord-Est.

5. Longueur des glaciers-rocheux :



	Actifs	Inactifs	Fossiles	Tous
Nombre d'entités	9 entités	31 entités	405 entités	445 entités
Longueur moyenne	193m	246m	382m	368m
Longueur médiane	170m	206m	317m	302m
Longueur minimale	106m	98m	95m	95m
Longueur maximale	295m	523m	1621m	1621m

Figure 37 : Distribution et statistiques des longueurs des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction du niveau d'activité :

Ce graphique de la figure 37 et le tableau qui lui est associé nous montre des différences assez significatives de longueur des glaciers-rocheux en fonction de leur activité. En effet, la longueur moyenne des formes actives ne dépasse pas les 200m, pour une longueur maximale de 295m, tandis que celle des formes inactives est de 246m avec certaines entités qui atteignent même les 500m de long. Les formes fossiles ont, quant à elles, une longueur

moyenne de 382m, soit 100m de plus que les formes inactives et peuvent atteindre plus de 1600m de long, preuve de la longue évolution au cours du temps de ces formes-là dans des conditions favorables. Le graphique de cette figure illustre bien ces différences importantes selon l'activité.

A noter que les racines de glaciers-rocheux sont difficilement perceptibles, d'autant plus par photo-interprétation sur ordinateur. Ces longueurs sont donc par conséquent peu précises et peuvent contenir des erreurs. Cette remarque concerne également les relevés d'altitudes évoquées précédemment.

6. Surface des glaciers-rocheux :

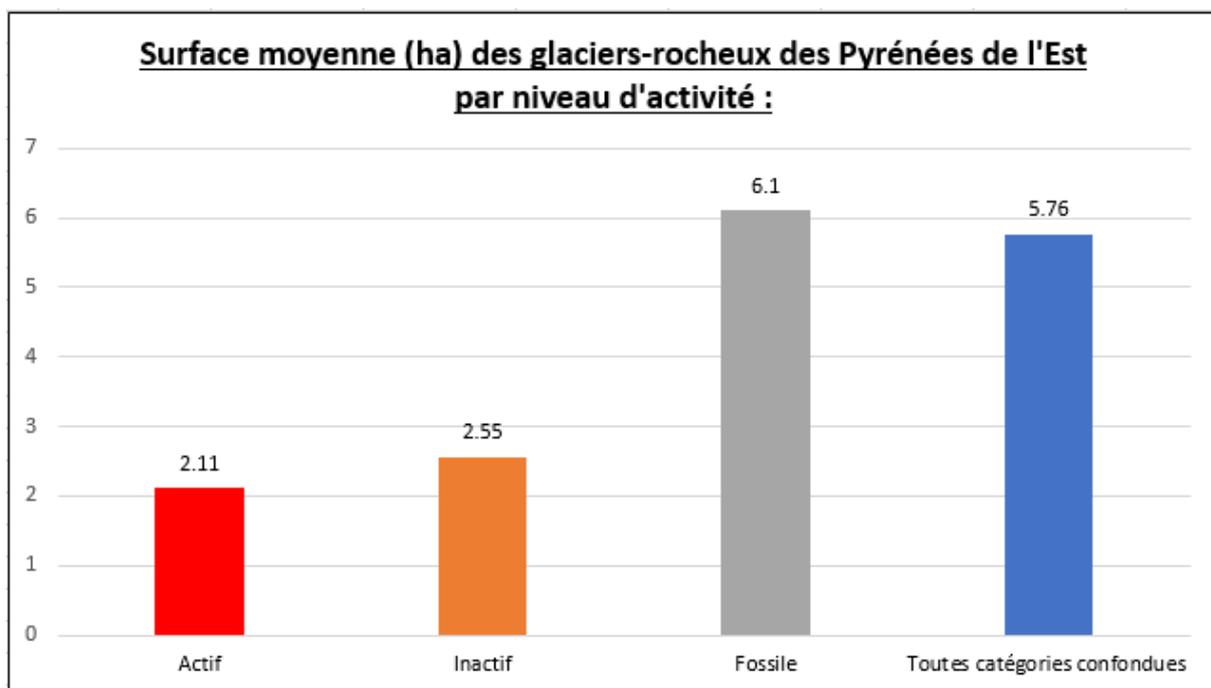


Figure 38 : Surface moyenne en hectares des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction du niveau d'activité :

Pour conclure cette partie, on s'intéresse ici aux surfaces moyennes des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction de leur niveau d'activité. On observe sur ce graphique qu'entre glaciers-rocheux actifs et inactifs, la différence est faible et la valeur moyenne est quasi égale. Cependant, la surface moyenne des formes fossiles est, elle, beaucoup plus importante avec un rapport de x2,5 par rapport aux formes contenant du pergélisol. Ces valeurs viennent corroborer les statistiques que l'on vient de voir sur la longueur des glaciers-rocheux, qui plaçaient également les formes fossiles en avant. Ces formes anciennes ont eu des milliers d'années pour se développer et s'étendre vers les vallées, durant une période au climat plus rude qu'aujourd'hui, ce qui explique cette différence importante. Les formes inactives et actives étant bien plus récentes et limitées aujourd'hui par une altitude seuil en-deçà de laquelle elles se fossilisent, fixée aux alentours de 2400m dans les Pyrénées de l'Est comme on l'a vu précédemment.

7. Risques associés aux glaciers-rocheux :

Comme on l'a vu dans la partie précédente, la dernière étape de cet inventaire consistait à réaliser des visites sur le terrain de certains glaciers-rocheux. Il n'était évidemment pas possible de visiter la totalité des GR inventoriés, l'objectif a donc été de visiter en priorité les glaciers-rocheux identifiés comme actif ou inactif proche de potentiels enjeux et qui pouvait par conséquent représenter un risque. En tout, grâce à l'accompagnement de l'ensemble des personnels des services RTM des Pyrénées-Orientales et du 09-31 qui s'est mobilisé pour m'accompagner. Nous avons pu réaliser 4 sorties sur le département de l'Ariège et 4 sorties sur le département des Pyrénées-Orientales, dont une sur deux jours au sein du massif du Puigmal durant laquelle nous avons pu observer plus d'une vingtaine de glacier-rocheux. [L'ensemble des comptes rendus de ces sorties terrains qui porte sur des glaciers-rocheux bien précis est disponibles en annexe.]

L'objectif de ces sorties sur le terrain, était de vérifier l'activité des glaciers-rocheux en question, ce qui a par la suite pu me permettre de rectifier l'activité d'autres GR à partir des observations faites. Mais surtout de réaliser des analyses ALEA/ENJEUX/RISQUES qui consistaient à observer les potentiels aléas que pouvaient engendrer les glaciers-rocheux visités, ainsi que les enjeux situés à proximité et à partir de ces observations définir si le GR en question représente un risque ou non.

A noter que la très grande majorité des glaciers-rocheux fossiles sont végétalisés et stables et n'engendrent donc aucuns aléas. C'est pourquoi notre attention c'est principalement tournée vers les formes inactives et surtout actives. Sur l'ensemble de notre zone d'étude, seul deux glaciers-rocheux actifs n'ont pas pu être visités :

- Le GR n°66187 situé sur le versant Nord du pic du Canigou dans les Pyrénées-Orientales
- Le GR n°09236 du versant Nord-Ouest du pic de Médécourbe situé au sein du massif de Bassies en Ariège.

Ainsi que quelques glaciers-rocheux inactifs très isolés et loin de tout enjeux, qui ne représentent donc aucuns risques selon toute vraisemblance.

A partir de l'ensemble de ces visites et du travail de photo-interprétation réalisé au bureau, cet inventaire élaboré de mars à août 2022 sur les massifs des Pyrénées de l'Est a permis d'identifier qu'un seul et unique glacier-rocheux à risque potentiel. Ceci s'explique par plusieurs raisons :

- L'essentiel des formes identifiées sont fossiles. Les éboulis se sont vidés de leur glace et se sont stabilisés. Ils n'interagissent plus, avec les lacs et torrents, ou en tous cas pas davantage qu'un éboulis commun.
- Les formes inactives sont peu nombreuses et très éloignées des enjeux. Dans le cas de contact avec des lacs ou des torrents, aucun risque d'éboulement majeur dans le lac n'a été identifié, ni au niveau de transport solide aggravé dans les torrents jusqu'aux enjeux, du fait notamment de larges zones intermédiaires de régulation.

- Les formes actives sont rares (neuf au total) et de faibles surfaces. Elles ne concernent aucuns domaines skiables et sont généralement situés dans des fonds de combes, loin des torrents et très loin des enjeux de vallée.
- Aucuns lacs, ni aucunes dépressions thermokarstique, n'ont été relevés sur l'ensemble des glaciers-rocheux de notre zone d'étude.

Le seul glacier-rocheux qui représente un risque potentiel est le GR n°09214 du versant Nord du pic de Racofret, au sein du massif du Montcalm, dont le compte rendu est disponible en Annexe. Ce glacier-rocheux serait potentiellement susceptible d'alimenter un torrent en matériaux qui atteindrait le sentier dans la vallée aval. C'est donc un risque potentiel qui impacterait un enjeu de faible importance, sans grande conséquence (hormis si des personnes sont présentes à ce moment-là sur le sentier évidemment).

Conclusion :

Cet inventaire aura permis de répertorier un grand nombre de glaciers-rocheux à l'échelle de notre zone d'étude avec 445 glaciers-rocheux répartis entre l'Ariège et les Pyrénées-Orientales :

- L'Ariège en compte 244 dont 231 fossiles, 10 inactifs et 3 actifs
- Tandis que les Pyrénées-Orientales en compte 201 dont 174 fossiles, 21 inactifs et 6 actifs.

Une étude concernant ces formes périglaciaires au sein des Pyrénées de l'Est n'avait jamais été réalisée auparavant et pourra servir de support à d'éventuelles études complémentaires à l'avenir.

De plus, ce travail ne s'est pas limité à un simple inventaire des formes observées. Pour chacune d'entre elles, un front a été délimité ainsi qu'une zone de production sous SIG et de nombreuses caractéristiques ont été inscrits dans les tables attributaires correspondantes (activité, altitudes, surface, longueur, largeur, orientation, stabilité, dimension des matériaux, pente du front).

La grande majorité des formes observées est aujourd'hui fossiles et une bonne partie des formes inactives est actuellement en cours de fossilisation. On a vu au cours de cette partie, que les formes actives présentes au sein de notre zone d'étude sont situées au-dessus des 2400m d'altitude en versant Nord / Nord-Ouest ; pour une longueur moyenne de 193m sur un dénivelé de 61m et pour une surface moyenne de 2,11 hectares.

Les formes inactives sont, quant à elles, présentes entre 2300 et 2700m d'altitude en versant Nord également ; pour une longueur moyenne de 246m sur un dénivelé de 72m et pour une surface moyenne de 2,55 hectares.

Enfin, on observe des formes fossiles à partir de 1600m d'altitude environ dans les cas les plus bas. Ces formes anciennes se sont développées sur le temps long, au cours d'une période favorable à leur développement et plus froide qu'aujourd'hui. Ces conditions climatiques de formation font que ces formes sont beaucoup plus imposantes avec une longueur moyenne de 382m sur un dénivelé de 105m, qui peuvent même atteindre les 300m de dénivelé dans certains cas, pour une surface moyenne de 6,1 hectares. Les formes fossiles sont donc beaucoup plus imposantes que celles inactives, elles-mêmes légèrement plus imposantes que les formes actives.

L'objectif de cet inventaire était également d'identifier d'éventuels risques avérés ou potentiels associés à ces glaciers-rocheux. Ce travail aura donc permis d'identifier un seul et unique site à risque potentiel au sein du massif du Montcalm, au niveau du versant Nord du pic de Racofret (GR n°09214).

Enfin, à partir de ce travail, il est possible de déterminer les zones de présence potentielle de pergélisol à l'échelle des Pyrénées de l'Est. On peut aussi en déduire que celles-ci se situent au-dessus de 2400m d'altitude en versant Nord, dans des zones favorables encaissées et isolées.

V. Discussions et mise en perspectives :

Au cours de cette cinquième et dernière partie nous allons dresser un bilan de ce stage en commençant par répondre à notre problématique initiale, à savoir si les glaciers-rocheux sont réellement des sentinelles du changement climatique ou non, à partir des observations faites tout au long de ce stage. Ensuite nous nous intéresserons aux limites et aux suites à donner à cette étude avant de finir par un bilan personnel sur ce stage de 6 mois au sein du service RTM des Pyrénées-Orientales.

1. Discussions : en quoi les glaciers-rocheux peuvent être perçus comme des sentinelles du changement climatique ?

Au cours de cet inventaire des glaciers-rocheux dans les Pyrénées de l'Est, nous nous sommes aperçus que la très grande majorité des formes observées est aujourd'hui fossile (91%) et donc que les formes contenant encore du pergélisol sont extrêmement minoritaires. De plus, une bonne partie des glaciers-rocheux identifiés ici comme inactif est actuellement en cours de fossilisation et de végétalisation, preuve que le pergélisol est petit à petit en train de disparaître de ces formes-là. L'ensemble de ces informations nous permet d'affirmer que le climat actuel est plus chaud que le climat passé, puisque l'ensemble des formes fossiles inventoriées sont apparues dans des conditions favorables à la présence de pergélisol. Cela veut donc dire que depuis la période de création de ces glaciers-rocheux fossiles, qui est estimée au tardiglaciaire pour la plupart, la présence de pergélisol est passé d'environ 1600-

1800m d'altitude à 2400m aujourd'hui, soit une remontée en altitude de 600 à 800m. Ces observations sont la preuve d'un réchauffement climatique considérable durant cette période.

Cependant, comme on vient de le dire, de nombreux glaciers-rocheux inactifs et même actifs situés entre 2400 et 2600m d'altitude sont aujourd'hui en cours de fossilisation. Ce qui montre que la limite de pergélisol est encore aujourd'hui en train de monter en altitude, preuve d'un réchauffement climatique encore actif à l'heure actuelle comme le prouve de très nombreuses études scientifiques. On peut alors imaginer qu'à l'avenir, l'ensemble des glaciers-rocheux des Pyrénées seront fossiles et qu'il n'y aura plus de trace de pergélisol dans ces massifs.

Réaliser un suivi de l'évolution des formes identifiées comme actives ou inactives dans l'avenir pourrait être un très bon moyen de surveiller l'évolution de la présence de pergélisol à haute altitude et ainsi nous donner des indications et des données concernant l'impact du changement climatique au sein des milieux montagnards et notamment du massif des Pyrénées dans ce cas-là. On peut donc en conclure que les glaciers-rocheux sont bel et bien des sentinelles du changement climatique qui nous renseignent sur les effets du réchauffement global en cours sur les zones de montagnes.

2. Retour d'expérience : Limites et suites à donner

a) Limites :

La priorité de cette étude était de réaliser l'inventaire le plus exhaustif possible des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est. Pour se faire, la navigation 3D sur Google Earth, ainsi que sur le site de l'IGN « Géoportail » et l'observation stéréoscopique de photographies aériennes précises de l'IGN a été la base de notre travail. La partie sur le terrain a également eu comme apport une validation et un complément de mesures quantitatives, qui ont permis d'apporter une meilleure réflexion quant à la présence d'enjeux, d'aléas et donc de risques induits par les glaciers-rocheux face au changement climatique. Ces visites auront permis de confirmer ou d'infirmer certaines activités, mais aussi d'écarter des hypothèses de connectivités aux enjeux à l'aval. Cependant, seule une petite partie des glaciers-rocheux répertoriés a pu faire l'objet d'une visite. Cet inventaire est donc essentiellement basé sur une analyse experte de la géomorphologie à partir de vues aériennes.

Il est évident qu'il existe une part d'interprétation non négligeable dans la constitution de cet inventaire : (ROUDNITSKA S. *et al.*, 2017)

- Aucun inventaire de ce type ne peut être considéré comme réellement exhaustif.
- Il paraît évident que des formes de petite taille ou discrètes ont pu être oubliées, de même que certaines formes fossiles masquées par la végétation.

- Si plusieurs experts géomorphologues réalisaient le même travail, il est peu probable que leurs cartes soient strictement identiques.
- Sur quelques cas complexes, nous avons fait des choix (considérer qu'il s'agissait ou pas d'un glacier-rocheux, définir son activité alors qu'on pouvait hésiter entre 2 classes...), sans mettre en œuvre de méthode d'investigation plus poussée (pas de mesures de déplacement, pas de géotechnique...).

Nos interprétations, nos choix les plus délicats ou même nos oublis probables ont surtout concerné :

- Des formes ambiguës, où la distinction entre complexe morainique et glacier-rocheux fossile reste difficile sans contrôle de terrain. Plusieurs formes ont été intégrées à notre inventaire compte tenu de leur morphologie et de leur environnement (alimentation, glaciers-rocheux à proximité...).
- Des formes discrètes, notamment des glaciers-rocheux qui se développent au sein d'une lithologie fine (volume apparemment modeste, fronts moins raides et de faible ampleur...).
- La distinction qu'il a fallu faire entre les glaciers-rocheux recensés et d'autres formes : formes de fluages dues à la glace à l'intérieur d'éboulis, bourrelets de névé ou moraines de névé, moraines de poussée, protalus ramparts...

Enfin, les racines des glaciers-rocheux étant difficilement perceptibles, les statistiques concernant les longueurs des glaciers-rocheux, leur surface, ou encore les altitudes maximales peuvent comporter de légères erreurs.

b) Suites à donner :

En complément de cet inventaire il pourrait être intéressant de réaliser une visite de terrain sur le glacier-rocheux n°09236 du versant Nord du pic de Médécourbe au sein du massif de Bassies en Ariège ainsi que sur le glacier-rocheux n°66187 au sein du versant Nord du pic du Canigou dans les Pyrénées-Orientales, qui sont les deux seuls glaciers-rocheux actifs que je n'ai pas pu visiter durant ce stage. Dans le but de confirmer l'activité de ce-dernier et de réaliser une analyse aléa – enjeux – risques afin de s'assurer qu'il ne représente aucun risque, notamment pour le refuge des Cortalets en ce qui concerne le GR n°66187.

Des visites de terrain sur les autres formes identifiées comme inactives qui n'ont pas été réalisés au cours de cet inventaire pourraient également s'avérer être intéressantes pour les mêmes raisons que les glacier-rocheux n°09236 et 66187.

Ensuite, cet inventaire pourrait servir de base à la modélisation d'une couche SIG de présence potentielle de pergélisol à l'échelle du département, voire de la chaîne des Pyrénées, comme cela a été fait dans les Alpes. Je sais que c'est l'une des volontés des services RTM français de créer cette couche à l'échelle des Pyrénées.

Enfin, un suivi des formes identifiées comme actives ou inactives au cours de cet inventaire pourrait être intéressant afin d'observer l'évolution du pergélisol dans les Pyrénées dans le contexte actuel du réchauffement climatique.

3. Retour d'expérience : apport du stage

Ce stage au sein du service RTM des Pyrénées-Orientales m'aura notamment permis d'avoir un aperçu du monde professionnel dans le domaine de l'environnement et de la gestion des risques naturels qui me sera très utile dans la suite de ma carrière. Les différents personnels du service RTM m'ont fait découvrir différentes facettes du métier, qui est très diversifié et qui concerne une zone géographique importante. Ce vécu professionnel ne pourra qu'être un plus pour moi à l'avenir.

J'ai également pu développer mes connaissances sur la gestion des risques naturels en zone de montagne, qui n'est pas spécialement le thème principal de mon master. Les risques naturels étant un sujet qui m'intéresse particulièrement et sur lequel j'aimerais beaucoup travailler à l'avenir, cette acquisition de connaissance sur le terrain, dans le cadre professionnel était pour moi indispensable et me sera très utile. D'autant plus qu'au cours de mon stage j'ai été amené à participer à quelques sorties sur le terrain qui s'éloignaient du thème de mon stage, afin de me faire découvrir les différentes facettes du métier. J'ai notamment participé à des sorties terrain au sein d'un bassin versant torrentiel dans les Pyrénées-Orientales dans le but de réaliser une étude de bassin de risque, ou encore dans une forêt domaniale RTM dans le département de l'Aude afin de réaliser un plan d'aménagement ONF nécessitant une expertise RTM.

Ensuite, ce stage m'a également permis de développer considérablement mes connaissances en termes de géomorphologie et notamment sur tout ce qui concerne le pergélisol et les formes périglaciaires. Je dois avouer qu'avant ce stage je n'avais aucune connaissance sur les glaciers-rocheux et j'étais très loin de penser qu'il y en avait autant dans les Pyrénées de l'Est. Je suis même très souvent passé à côté de ces formes périglaciaires lors de multiples randonnées sans même le savoir. Ce stage m'aura donc permis de mieux connaître les milieux montagnards et de mieux appréhender les mécanismes en place dans ces milieux, qui façonnent le paysage depuis des milliers d'années.

Ce stage m'a aussi permis de développer mes capacités en termes d'utilisation du logiciel SIG ArcMap. En effet, malgré le fait qu'on est travaillé sur ArcMap au cours de mon master 1, j'avais jusqu'ici principalement utilisé le logiciel Qgis dont l'interface est très différente. Ce stage a donc été un très bon moyen pour moi de me familiariser avec l'utilisation de ce logiciel. Toutes ses compétences nouvellement acquises seront un plus dans mes futures recherches d'emplois.

Enfin, j'aurais appris à travailler en équipe dans un cadre professionnel :

- En planifiant par exemple des sorties avec des personnels RTM d'autres services

- En demandant de l'aide ou des conseils à des collègues spécialistes en SIG ou en géomorphologie par exemple ou encore
- En élaborant des comptes rendus réguliers à mon maître de stage et le chef de service pour qu'ils puissent évaluer mon avancé.

J'ai travaillé au cours de ce stage de manière autonome et l'objectif pour la structure était de me faire évoluer dans un réel cadre professionnel comme si j'étais un salarié. Cette façon de faire, a été, je pense, très bénéfique pour moi afin de me préparer du mieux possible au monde professionnel.

Conclusion :

L'objectif de cet inventaire des glaciers-rocheux au sein des Pyrénées de l'Est était de boucler l'inventaire de ces formes périglaciaires au niveau national après l'avoir réalisé sur la totalité du massif alpin ainsi que dans les Pyrénées de l'Ouest. L'ensemble des précédents inventaires réalisées aura servi de modèle à ce travail. On rappellera qu'un glacier-rocheux est « *une accumulation de débris rocheux, achevée à l'aval par un front raide, présentant une forme de langue, ou de lobe, voire de spatule* » (Monnier, 2004, p. 140). Du point de vue local, l'objectif de ce stage était d'améliorer les connaissances sur ces formations périglaciaires encore très peu connues et qui n'avait quasiment jamais été étudiées au sein de notre zone d'étude. La volonté des services RTM était donc de réaliser un inventaire, le plus exhaustif possible, de l'ensemble des glaciers-rocheux observés au sein des départements des Pyrénées-Orientales et de l'Ariège afin de pouvoir par la suite déterminer si ces formations sont associées à des aléas qui pourraient venir menacer des enjeux et donc représenter un risque.

Pour réaliser cette mission, la première étape a été de réaliser une recherche bibliographique importante afin de s'imprégner du sujet. Ensuite, la deuxième étape a été une phase de photo-interprétation à travers différentes techniques (stéréoscopie, IGN, Google Earth...) afin de repérer le maximum de glaciers-rocheux et de pouvoir les cartographier du mieux possible sous SIG. Et enfin, la troisième étape consistait à réaliser des sorties sur le terrain, sur certaines formes particulièrement intéressantes afin de confirmer nos interprétations lors de la deuxième étape et de réaliser des analyses aléas – enjeux – risques pour déterminer si ces glaciers-rocheux pouvaient générer des risques ou non.

Ce travail nous aura permis d'identifier 445 glaciers-rocheux à l'échelle des Pyrénées de l'Est dont 405 fossiles, 31 inactifs et 9 actifs (201 dans les Pyrénées-Orientales et 244 en Ariège). La très grande majorité de ces formations est donc aujourd'hui fossiles (91%) et les formations contenant encore du pergélisol aujourd'hui sont situées à haute altitude (au-dessus de 2400m d'altitude environ pour la plupart) dans des versants Nord isolés et encaissés. Ces résultats sont similaires aux résultats des inventaires des départements Alpains, mais sont en revanche

beaucoup plus important vis-à-vis de l'inventaire des Pyrénées de l'Ouest ou seulement 141 glaciers-rocheux ont été identifiés. Cette différence considérable est difficilement explicable et provient vraisemblablement d'une erreur humaine. A noter que sur l'ensemble des glaciers-rocheux inventoriés, seul un d'entre eux représente un risque potentiel. C'est un risque d'alimentation en matériaux d'un système torrentiel susceptible d'atteindre un sentier dans la vallée aval au niveau de la vallée de Soulcem au sein du massif du Montcalm en Ariège.

L'ensemble des glaciers-rocheux des Pyrénées contenant encore du pergélisol à l'heure actuelle sont voués à se fossiliser dans les prochaines années en raison du réchauffement climatique actuel qui ne cesse de s'accroître. Beaucoup de formes identifiées comme inactives ou actives au cours de cet inventaire sont déjà actuellement en cours de végétalisation et de fossilisation. Réaliser un suivi de ces formes contenant encore du pergélisol pourrait être un bon moyen pour suivre l'impact du réchauffement climatique sur les milieux de haute montagne et ainsi suivre la limite inférieure de pergélisol. En ce sens, les glaciers-rocheux peuvent être perçus comme des sentinelles du réchauffement climatique, qui nous renseignent sur les effets de ce phénomène en haute altitude.

Bibliographie :

- ANDRIEU-PONEL V., HUBSCHMAN J., JALUT G., HERAIL G. (1988) – « Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs ; application à l'interprétation du retrait glaciaire », *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, vol.25, n°2-3, pp. 55-67
- ANGELY G. (1967) – « Anciens glaciers rocheux dans l'Est des Pyrénées centrales », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 38, fascicule 1, pp. 5-28
- ARNOULD B., DEMOLIS C., DOUARD P., MEIGNIEN X. (2016) – « La restauration des terrains en montagne (RTM) Mise en œuvre de la politique de prévention des risques par les services RTM », Rapport CGEDD n°010240-01, CGAAER n° 15061
- BARONI C., CARTON A., SEPPI R. (2004) – « Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello–Presanella Massif (Italian Alps). », *Permafrost. Periglac. Process*, 15, pp. 243–259.
- BARSCH D. (1988) – « Rockglaciers. » In Clark M.J. (Ed.) : « Advances in periglacial geomorphology. », *John Wiley and Sons*, New York, pp. 69-87
- BARSCH D. (1992) – « Permafrost creep and rockglaciers. », *Permafrost and Periglacial Processes* 3, pp. 175-188
- BODIN X. (2007) – « Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente. L'exemple du massif du Combeynot (Hautes-Alpes) », *Thèse de doctorat en géographie mention géomorphologie*, Université Paris-Diderot – Institut de Géographie alpine, 273p.
- BODIN X., SCHOENEICH P., DELINE P., RAVANEL L., MAGNIN F., KRYSIECKI J-M., ECHELARD T. (2015) – « Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : évolutions récentes dans les Alpes françaises », *Revue de géographie alpine*, n° 103-2
- BONNETAIN L. (2010) – « Rapport de stage sur le pergélisol de montagne : Bilan, méthodes dans l'évaluation des risques. Etudes de cas dans la vallée de la Guisane et la Clarée », *Service RTM des Hautes-Alpes (ONF)*
- BORNET D. (2014) – « Les inventaires de glaciers rocheux en France et en Argentine : enjeux, démarche, exploitation », *Mémoire de master 2*, Ingénierie de l'environnement, 63p.
- BOUVET P., CHARVET R., RIGUIDEL A. (2011) – « Les glaciers-rocheux dans les Hautes-Alpes : inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM des Hautes-Alpes (ONF)*
- CAPPS S.R. Jr. (1910) – « Rock glaciers in Alaska. », *Journal of Geology*, 18, pp. 359-375
- CHATELARD M. (1930) – « Climat des Pyrénées de l'Ariège et du Salat », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, pp. 41-57

CAUBET D., RIGUIDEL A., SOURDOT G. (2012) – « Les glaciers-rocheux dans les Alpes de Haute-Provence : inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM des Alpes de Haute-Provence (ONF)*

DELALOYE R., MORARD S. (2011) – « Le glacier rocheux déstabilisé du Petit-Vélan (Val d'Entremont, Valais) : morphologie de surface, vitesses de déplacement et structure interne », *Département des Géosciences, Université de Fribourg*

DEL BARRIO G., CREUS J., PUIGDEFÁBREGAS J. (1990) – « Thermal seasonality on the high mountain belts of the Pyrenees. », *Mountain research and development*, 130 : pp. 227-233.

DELMAS M. (2005) – « La déglaciation dans le massif du Carlit (Pyrénées-Orientales) : approches géomorphologique et géochronologique nouvelles », *Quaternaire*, vol.16, n°1, pp. 45-55

DELMAS M. (2009) – « Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'est des Pyrénées », *Thèse de doctorat en géographie*, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 430p.

DELMAS M., CALVET M., GUNNELL Y., BRAUCHER R., BOURLES D. (2012) – « Les glaciations quaternaires dans les Pyrénées ariégeoises : approche historiographique, données paléogéographiques et chronologiques nouvelles », *Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol.23, n°1, pp. 61-85

EVIN M. (1983) – « Structure et mouvement des glaciers rocheux des Alpes du Sud. », *Thèse de doctorat en géographie*, Université Joseph Fourier

FEUILLET T., PORTAL C. (2008) – « Les glaciers rocheux des Pyrénées Centrales, un patrimoine à découvrir », *Revue Pyrénées*, n° 235, pp. 267-280

FEUILLET T., SELLIER D. (2008) – « Observations sur la limite inférieure de l'étage périglaciaire dans les Pyrénées Centrales françaises (Bigorre) », *Environnements Périglaciaires*, n°15

FEUILLET T. (2009) – RAPPORT D'ACTIVITES, « Etude et valorisation de l'étage cryonival dans le Parc National des Pyrénées. », *Laboratoire Géolittomer, LETG – UMR 6554 – CNRS*

FEUILLET T. (2010) – « Les formes périglaciaires dans les Pyrénées Centrales françaises : analyse spatiale, chronologique et valorisation », *Thèse de doctorat en géographie mention géomorphologie*, Université de Nantes (IGARUN), 323p.

FRANCOU B. (1981) – « Géodynamique des éboulis et formes associées de la Combe de Laurichard. », *Thèse de doctorat en géographie*, Université Joseph Fourier.

GARCIA S. (2008) – « Proposition d'une méthodologie d'évaluation des risques naturels liés à la dégradation du pergélisol de montagne dans le département de la Haute-Savoie (74) », *Mémoire de master 1, Service RTM de Haute-Savoie*

GARCIA S. (2009) – « Analyse de l'évolution du glacier rocheux du Dérochoir depuis la fin du XIX^e siècles », *Mémoire de master 2, Service RTM de Haute-Savoie*, 121p.

IZARD M. (1988) – « Continentalité dans les Pyrénées et impact sur la végétation », extrait de « Homenaje », MONTERRAT P., *Instituto de Estudios Altoaragoneses*, pp. 597-602

JORDA M. (1983) – « Eboulis et glaciers rocheux (Talus and rock-glaciers) », *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 491 pp. 15-24

KAISER B. (1983) – « Morphodynamique périglaciaire en Vanoise. Observations et mesures sur deux formes : talus d'éboulis et glacier-rocheux. », *Travaux scientifiques du Parc national de la Vanoise*, Chambéry, XIII, 55-80.

KRAINER K., RIBIS M. (2012) – « A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). », *Austrian J. Earth Sci.*, 105, 32–47.

KRYSIECKI J.-M. (2008) – « La rupture du glacier-rocheux du Bérard (Massif du Parpaillon, Alpes de haute Provence, 04) : un cas de dégradation du pergélisol de montagne ? », *Mémoire de master 2*, Université de Grenoble

LECHEMIA T. (2014) – « Les glaciers-rocheux de l'Isère : Inventaire, cartographie et risques associés », *PACTE, Rapport du service RTM de l'Isère (ONF)*

LILLEØREN K.S., ETZELMULLER B. (2011) – « A Regional Inventory of Rock Glaciers and Ice Cored Moraines in Norway. », *Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr.*, vol. 93, pp. 175–191.

MONGELLAZ L. (2017) – « Les glaciers-rocheux de la Haute-Savoie : Inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM de Haute-Savoie (ONF)*

MONNIER S. (2004) – « Identification, caractérisation et distribution spatiale des glaciers-rocheux dans la haute vallée de l'Arc (Alpes françaises du Nord) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 10, n°2, avril-juin, pp. 139-155

MONNIER S. (2006) – « Les glaciers-rocheux, objets géographiques. Analyse spatiale multiscalaire et investigations environnementales. Application aux Alpes de Vanoise. », *Thèse de doctorat en géographie mention géomorphologie, dynamique des milieux et environnement*, Université Paris XII – Val de Marne, 293p.

NRCC (Permafrost Subcommittee), (1988). « Glossary of permafrost and related ground-ice terms. Technical Memorandum », 142. *National Research Council of Canada*, 156 p

PERRIER R. (2014) – « Suivi local et régional du pergélisol dans le cadre du changement climatique contemporain : Application aux vallées de la Clarée et de l'Ubaye (Alpes du Sud, France) », *Thèse de doctorat en géographie mention dynamique des milieux et risques*, Université Paris Denis-Diderot, 347p.

RENE P. (2010) – « Les glaciers des Pyrénées françaises », *Association Pyrénéenne de Glaciologie*, Rapport d'étude 2009-10

RIBEYRE C. (2016) – « La lave torrentielle du 24 août 2015 (Lanslevillars, Savoie) : un cas de dégradation du pergélisol dans le contexte du réchauffement climatique ? Étude de l'évolution des dynamiques du glacier-rocheux du col du Lou entre 1970 et 2016 : approche par photogrammétrie. », *Géographie*. 2016. dumas-01520648

- ROUDNITSKA S., CHARVET R., RIBEYRE C., LEPRINCE FAVEREAUX B. (2017) – « Les glaciers-rocheux de Savoie : Inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM de Savoie (ONF)*
- SCAPPOZA C. (2008) – « Contribution à l'étude géomorphologique et géodésique des éléments périglaciaire des Alpes tessinoise orientales. », *Maîtrise des sciences en géographie*, Université de Lausanne, Suisse.
- SCOTTI R., BRARDINONI F., ALBERTI S., FRATTINI P., CROSTA G.B. (2013) – « A regional inventory of rock glaciers and protalus ramparts in the central Italian Alps. », *Geomorphology* 186, 136– 149.
- SERRANO E., GONZALEZ TRUEBA J-J., SANJOSE J-J. (2011) – « Dinamica, evolucion y estructura de los glaciares rocosos de los Pirineos », *Cuadernos de Investigacion Geografica*, n°37-2, pp. 145-170
- UICN France (2015) – « Changement climatique et risques naturels dans les montagnes tempérées », Paris, France
- VENTURA ROCA J. (2016) – « Identificacion e inventario de potenciales glaciares rocosos activos en los Pirineos mediante fotointepretacion en visores cartograficos 2D y 3D : primeros resultados », *Revista de Geografia*, n°28, pp. 95-122
- VIERS G. (1961) – « Le glaciaire du massif du Carlit (Pyrénées-Orientales) et ses enseignements », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 32, fascicule 1, pp. 5-33
- VIERS G. (1968) – « La carte du relief glaciaire des Pyrénées. Feuille de Mont-Louis au 50 000^e (Pyrénées-Orientales) », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 39, fascicule 4, pp. 429-434
- VOISIN L. (2021) – « L'inventaire des glaciers-rocheux des Pyrénées françaises : pour une meilleure gestion intégrée des risques naturels en montagne », *Mémoire de stage de master 2 GAED-TRENT*, Service RTM 64-65 (ONF), 71p.
- VOISIN L. (2021) – « Les glaciers rocheux des Pyrénées-Atlantiques : inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM 64-65 (ONF)*
- VOISIN L. (2022) – « Les glaciers rocheux des Hautes-Pyrénées : inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM 64-65 (ONF)*
- VOISIN L. (2022) – « Les glaciers rocheux de Haute-Garonne : inventaire, cartographie et risques associés », *Rapport du service RTM 64-65 (ONF)*
- WAHRHAFTIG C., COX A. (1959) – « Rock glaciers in the Alaska Range », *Bulletin of the Geological Society of America*, pp. 383-436

Sitographie :

<https://geomorphologie-montagne.ch/>

[Insee - Institut national de la statistique et des études économiques](#)

<https://www.ariège.com/decouvrir-ariège/geologie/glacier-du-valier>

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/datation-des-echantillons/datation-du-dernier-maximum-glaciaire-1>

<https://fr.climate-data.org/>

<https://météofrance.com/>

https://po.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/073_Inst-Pyrenees-Orientales/FICHIERS/AGROENVIRONNEMENT/CLIMATO/Climato des P O ca66 2018.pdf

https://www.pyrandonnees.fr/meteo_climat_montagne.php

http://www.irma-grenoble.com/05documentation/03phototheque_diaporamaRTM.php

[Qu'est-ce que le permafrost ? - PermaFRANCE \(osug.fr\)](#)

<https://ariegeois.fr/ariege-pyrenees/>

<http://paysages.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/pyrenees-orientales/fondements11.html>

<https://earth.google.com/>

<https://www.geoportail.gouv.fr/carte>

Liste des annexes :

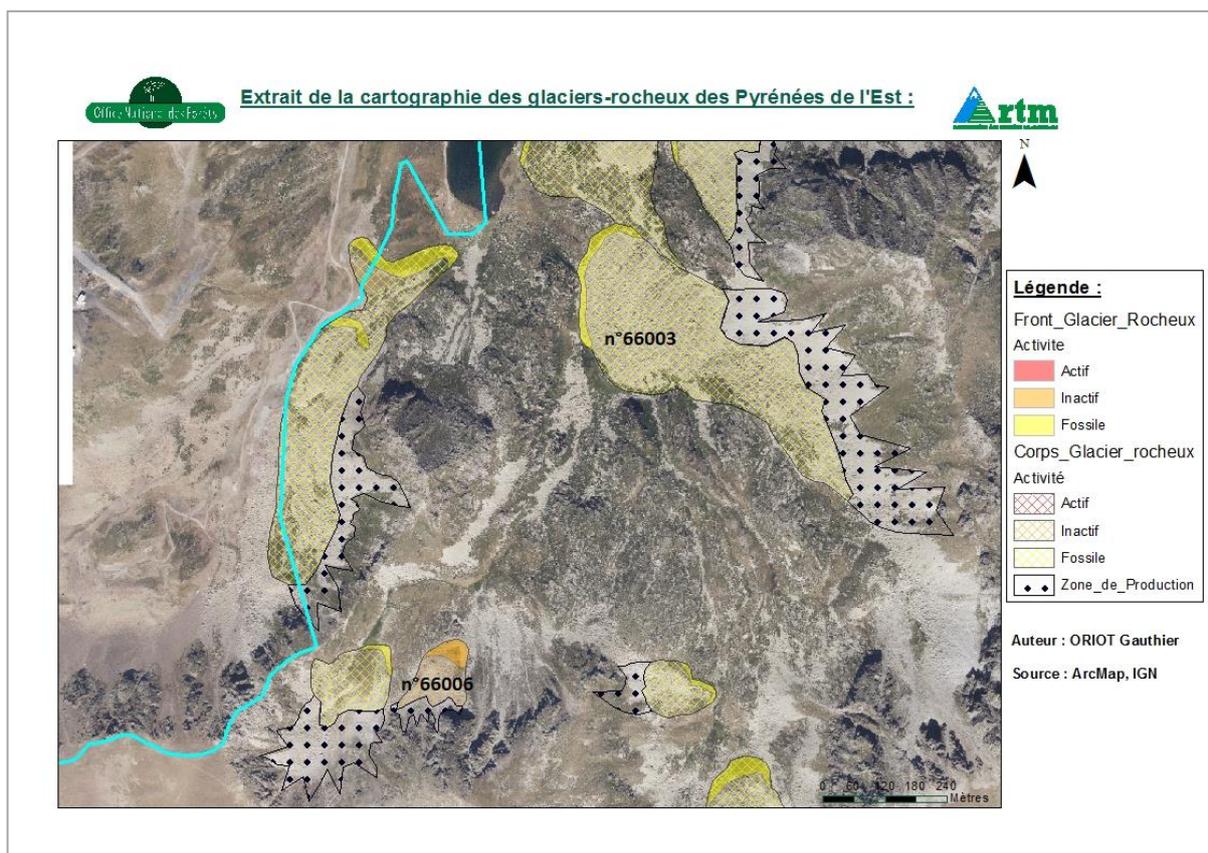
Compte rendu des sorties terrains dans les Pyrénées-Orientales :	73
Annexes 1 : Glaciers-rocheux de la vallée de Font Negra -> n°66003 / n°66006.....	73
Annexe 2 : Glaciers-rocheux du versant Est du Pic del Gegant -> n°66164 et n°66196	78
Annexe 3 : Glaciers-rocheux du versant Nord du Pic de l'Infern -> n°66150 / n°66194 / n°66195 / n°66198.....	82
Annexe 4 : Glaciers-rocheux du versant Nord du Pic supérieur de la Vaca -> n°66140 / n°66202.....	87
Annexe 5 : Glacier-rocheux du versant Nord du pic du Carlit -> n°66071	91
Compte rendu des sorties terrains en Ariège :	94
Annexe 6 : Glacier-rocheux de l'étang de Soula-Couloumé -> n°09049	94
Annexe 7 : Glacier-rocheux du versant Nord du Pic de la Cabanéta -> n°09082	98
Annexe 8 : Glacier-rocheux de l'étang de Joclar -> n°09113.....	102
Annexe 9 : Glacier-rocheux du versant Nord du Pic de Racofret -> n°09214	105

Annexes :

Compte rendu des sorties terrains dans les Pyrénées-Orientales :

Annexes 1 : Glaciers-rocheux de la vallée de Font Negra -> n°66003 / n°66006

Visite réalisée le 15/06/22 avec Raphaële Charvet (Spécialiste expertise risques naturels) et Emilie Jean (stagiaire au service RTM des Pyrénées-Orientales)

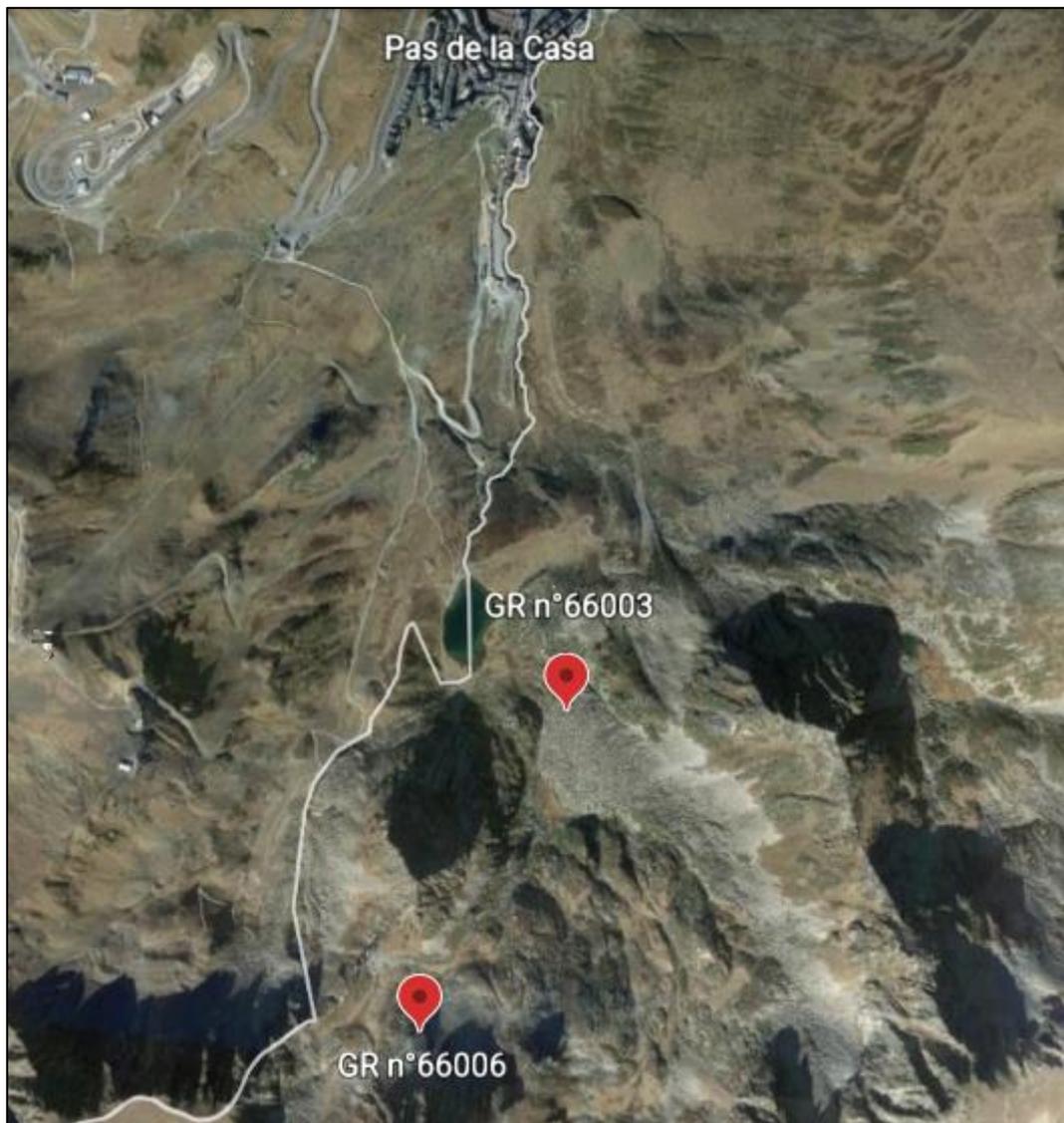


Carte 1 : Cartographie des glaciers-rocheux de la vallée de Font Negra (n°66003 et n°66006)

Contexte géographique :

La vallée de Font Negra se situe à la frontière avec l'Andorre sur la commune de Porta au sein du massif du même nom juste au-dessus de la ville du Pas de la Casa. C'est au sein de cette vallée que se situent les sources de la rivière Ariège qui s'écoule jusqu'au Sud de Toulouse. Cette vallée est composée de nombreux glaciers-rocheux fossiles pour la plupart. Ceux qui vont nous intéresser ici ce sont ceux identifiés sur la carte 5 ci-dessus, à savoir le n°66003 et le n°66006. Le GR n°66003 est situé sur le versant Ouest de la Portella de Font Negra qui culmine à 2596m d'altitude, avec une orientation Nord-Ouest. Il s'étend sur 702m entre les altitudes 2290m et 2434m, soit un dénivelé de 144m. Le GR n°66006 est quant à lui situé plus au Nord dans la vallée en amont, sur le versant Nord du Coll des Isards qui culmine à 2744m d'altitude, avec une orientation Nord. Il s'étend sur 147m entre les

altitudes 2503m et 2580m. Concernant les enjeux, on retrouve donc la ville du Pas de la Casa (Andorre) vers 2100m d'altitude 2km en aval de la même vallée, ainsi que des remontées mécaniques à proximité.



Carte 2 : Photographie aérienne de la zone d'étude extrait de Google Earth

Observations :

La visite de ce site a fait partie des premières visites réalisées lors de cet inventaire, l'objectif était donc d'apprendre et de mettre en pratique la méthodologie lors d'une visite d'un glacier-rocheux sur le terrain (critères d'observations, photos à prendre, mesures à faire...). La présence d'un enjeu fort proche de ces formes périglaciaires a également motivé cette visite. Notre attention c'est ici concentré sur les deux formes identifiées comme inactives lors de la phase de photo-interprétation (GR n°66003 et 66006), les autres formes étant très clairement fossiles depuis un long moment et totalement stabilisées. Cette visite a donc permis de rectifier l'activité du GR n°66003 comme étant finalement fossile. En effet, le front du GR, ayant une pente de 31°, est entièrement recouvert d'une végétation importante de landes à rhododendron, preuve de stabilité depuis un long moment. Le corps est quant à lui composé de matériaux granitiques très grossiers (beaucoup de blocs de plus de

15m3) formant des sillons transversaux bien marqués, également très stable et partiellement végétalisé. L'ensemble de ces observations permettent d'affirmer qu'il s'agit donc d'un glacier-rocheux fossile.



Photo 1 : Vu d'ensemble du glacier-rocheux n°66003 vu d'en face



Photo 2 : Glacier-rocheux n°66003 vu du dessus



Photo 3 : Photographie du front du GR n°66003

Le glacier-rocheux n°66006, plus haut en altitude, est quant à lui dépourvue de végétation mis à part sur la partie Est du front. Front composé de matériaux granitiques grossiers assez stable dans l'ensemble qui s'étend sur une vingtaine de mètres de long avec une pente de 31°. Le corps a une forme assez affaissée mais ne contient aucune végétation alors qu'on en observe sur les versants alentours de même altitude, preuve que cette forme n'est pas encore totalement stable et pourrait encore contenir des poches de pergélisol. Ce glacier-rocheux n°66006 a donc été identifié comme actif, mais il est actuellement en cours de fossilisation.



Photo 4 : Photographie du corps du glacier-rocheux n°66006



Photo 6 : Photographie de la partie Ouest du front du GR n°66006



Photo 5 : Front du glacier-rocheux n°66006 vu du dessous

Concernant les risques, le GR n°66003 ne semble associé à aucun aléa étant donné sa forte stabilité, tandis que le GR n°66006 est susceptible de générer des petites chutes de blocs isolés lors de forte pluie, mais sans grande ampleur et qui n’atteindrait donc pas les enjeux environnants que sont la ville du Pas de la Casa et les remontées mécaniques de la station GrandValira.

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 1 : Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux de la vallée de Font Negra (n°66003 et 66006)

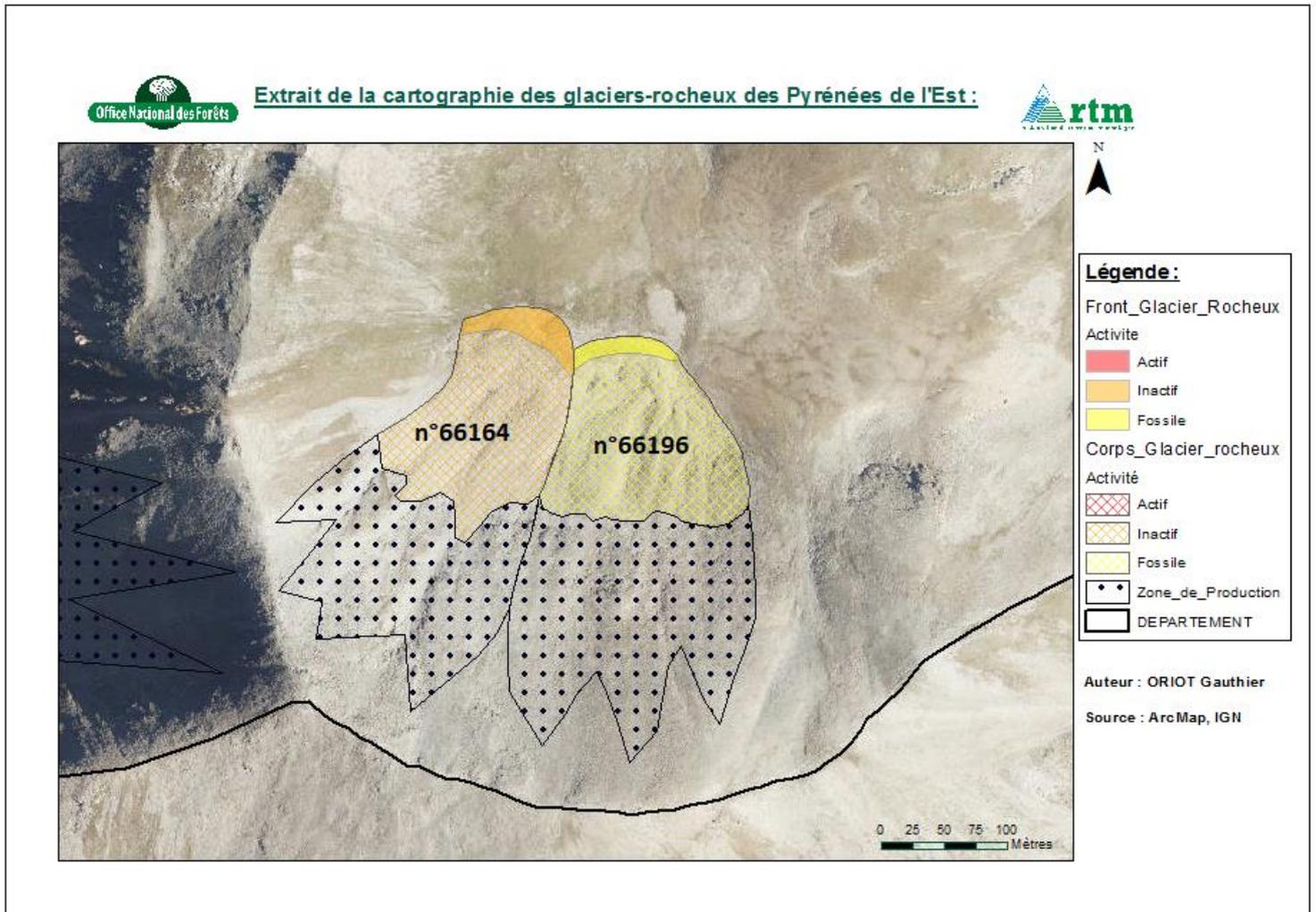
Conclusion :

Cette visite aura permis de rectifier l’activité du glacier-rocheux n°66003 comme étant fossile et non inactif comme identifié lors de la phase de photo-interprétation. Le GR n°66006 est lui en revanche bien inactif mais actuellement en cours de végétalisation.

En termes d’aléas, seul le GR n°66006 est associé à un aléa chute de bloc mais qui reste de faible ampleur et ne menace donc en aucun cas les enjeux à l’aval étant donnée la configuration topographique de ce site et notamment la présence du GR n°66003 qui fait office de barrage vers le bas de vallée à l’aval comme on peut le voir sur la photo 2. Aucun risque n’est donc associé à ces glaciers-rocheux.

Annexe 2 : Glaciers-rocheux du versant Est du Pic del Gegant -> n°66164 et n°66196

Visite réalisée le 18/07/22 avec Stéphane Nouguier (chef du service RTM des P-O)



Carte 3 : Cartographie des glaciers-rocheux du versant Est du Pic del Gegant (n°66164 / n°66196)

Contexte géographique :

Le Pic del Gegant est l'un des sommets des Pyrénées-Orientales situé à la frontière avec l'Espagne. Son versant Sud est donc espagnol tandis que le versant Nord est Français. C'est un des sommets les plus hauts du département qui culmine à 2881m, et l'un des plus haut du massif du Puigmal. Les glaciers-rocheux qui nous intéressent ici sont situés sur la face Nord, Nord-Est entre 2650 et 2750m d'altitude environ. Ils sont situés en tête de bassin versant de la Coma de Bassibes, à l'amont de l'étang des Bassibes, sur la commune de Fontpédrouse. Plus localement, ces entités se trouvent directement au pied des versants abrupts du Pic del Gegant, sur une zone de replat très isolée, loin des principaux sentiers de randonnées.

Observations :

Cette visite a permis de rectifier l'activité du glacier-rocheux qui avait été identifié comme actif au terme de la phase de photo-interprétation, c'est d'ailleurs ce qui avait motivé notre visite sur ce site. Finalement, ce GR peut être divisés en deux entités distinctes situés côte à côte, l'une étant inactive et l'autre fossile. On observe en effet une partie Est beaucoup plus végétalisée, stable et affaissée que l'autre, et dont le front est également moins imposant et pentu (28° contre 33° sur la partie Ouest), (photo 7). Ces différentes observations nous amènent donc à penser que cette partie est fossile tandis que l'autre serait plutôt inactive en raison notamment des formes encore bien marqué sur son corps, possible preuve de la présence encore partielle de pergélisol dans ce-dernier.

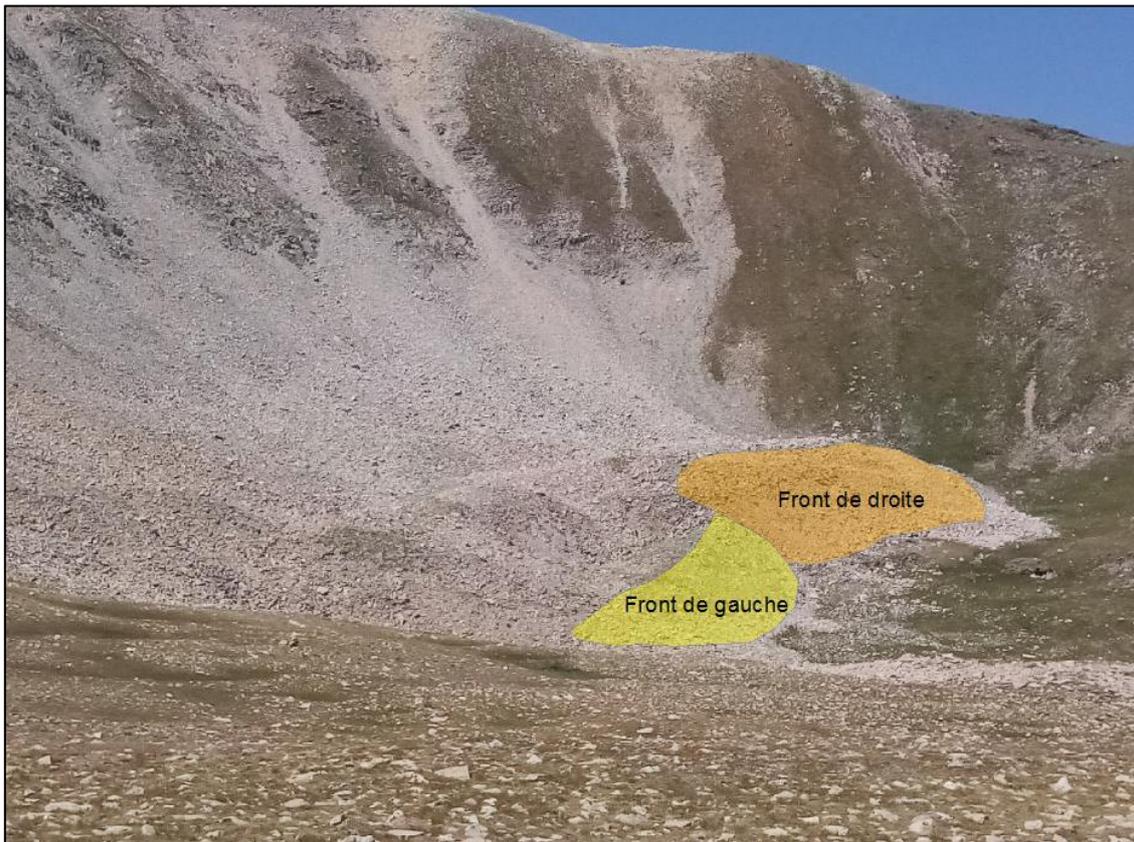


Photo 7 : Vue d'ensemble des glaciers-rocheux n°66164 (Ouest) et n°66196 (Est)



Photo 8 : Comparaison des fronts Est (photo de gauche) et Ouest (photo de droite)

Cependant, malgré une probable inactivité du GR Ouest, celui-ci est actuellement en cours de végétalisation et de stabilisation. Le risque de chute de bloc et/ou de glissement de terrain associé à ce GR est donc extrêmement faible voire inexistant, tout comme la capacité d'alimentation en matériaux du torrent situés beaucoup plus à l'aval dans la vallée.



Photo 9 : Glaciers-rocheux n° 66164 et n°66196 vu du dessus

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 2 : Phénomènes et cotations liés aux glaciers- rocheux n° 66164 et n°66196 – commune de Fontpédrouse

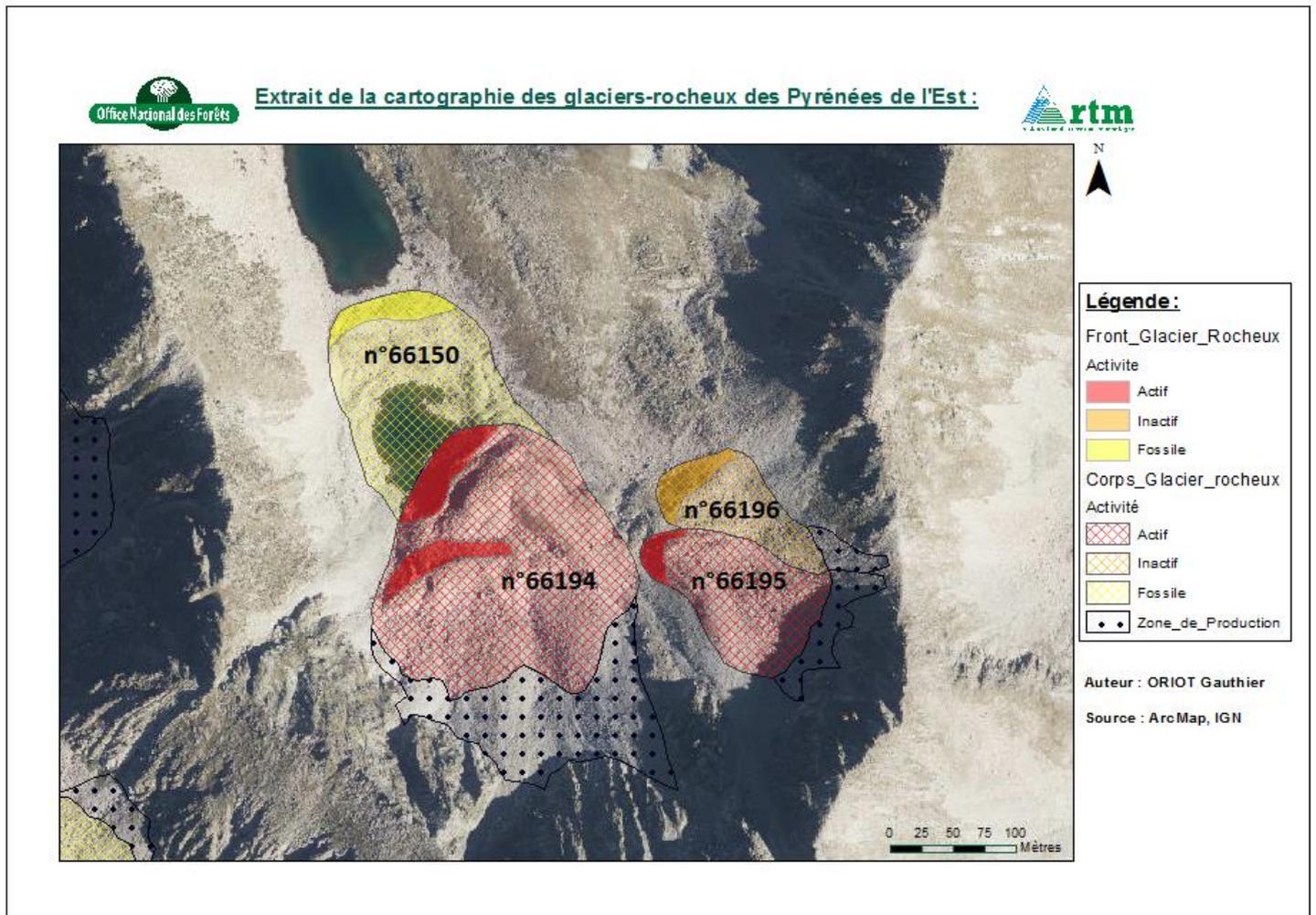
Conclusion :

La visite de ce site a donc permis de rectifier l'activité définie préalablement et de diviser un glacier-rocheux en deux entités distinctes, l'une fossile (n°66196) et l'autre inactive (n°66164).

Ce site ne représente aucun risque étant donnée les faibles aléas associés à ces GR, autant en ce qui concerne leur propre action qu'à travers des phénomènes associés et l'éloignement important des enjeux.

Annexe 3 : Glaciers-rocheux du versant Nord du Pic de l'Infern -> n°66150 / n°66194 / n°66195 / n°66198

Visite réalisée le 18/07/22 avec Stéphane Nouguier (chef du service RTM des P-O)



Carte 4 : Cartographie des glaciers-rocheux du versant Nord du Pic de l'Infern (66150 / 66194 / 66195 / 66198)

Contexte géographique :

Le Pic de l'Infern culmine à 2869m d'altitude, ce qui en fait l'un des plus hauts sommets du massif du Puigmal, situé tout proche de la frontière espagnole dans la vallée de la Carança. Les glaciers-rocheux qui nous intéressent ici sont tous situés sur le versant Nord de ce sommet avec une légère orientation Nord, Nord-Ouest au fond de la Combe de l'Infern entre 2550 et 2700m d'altitude environ. L'ensemble de ces quatre glaciers-rocheux se trouve au sein d'un vallon très encaissé qui ne reçoit pas beaucoup de soleil durant la journée et qui doit recevoir beaucoup de neige en hiver, surtout lors d'épisodes venteux en raison de la topographie des lignes de crête avoisinantes qui forment des cols de part et d'autre du vallon, propice à l'accumulation de neige dans ce même vallon. Ces conditions climatiques sont très favorables à la présence de pergélisol dans ce secteur, ce qui se matérialise par la présence de deux GR actifs accompagnés d'un GR inactif et d'un fossile comme on peut le voir sur la carte 8. Les imposantes parois rocheuses et les éboulis associés qui entoure cette combe conditionnent également la présence de GR dans cette zone à travers un apport en matériaux conséquent indispensable à la

création de ces formes périglaciaires. On retrouve également sur ce site deux petits étangs naturels appelés les étangs de la Coma de l'Infern, isolés du reste de la vallée par un imposant verrou glaciaire. On est donc ici dans un site très isolé en pied de versants rocheux imposants, très éloigné des enjeux les plus proches et totalement sauvage étant donné qu'aucun sentier de randonnée ne passe par ce vallon.



Photo 10 : Vue d'ensemble du versant Nord du Pic de l'Infern et des glaciers-rocheux qui le composent

Observations :

On retrouve donc quatre glaciers-rocheux distincts dans ce vallon, en commençant par le plus bas en altitude (n°66150) qui s'étend sur plus de 170m de 2552m à 2648m d'altitude et sur lequel s'est formé un lac thermokarstique. Ce GR est fortement végétalisé par une végétation rase type pelouse et composé de matériaux grossiers stable. Son front est très court (moins de 10m) et à une pente de 29°, il ne représente donc aucune source d'aléa. Tout comme le lac thermokarstique situé à l'amont qui se retrouve bloqué entre deux fronts et ne représente aucune menace en termes de débordement ou d'infiltration.



Photo 11 : Photographies du corps et du front du GR

Le GR inactif (n°66198) est quant à lui situé un peu plus haut dans le vallon à l'Est, son front est également partiellement végétalisé mais son corps lui ne l'est pas, on y observe de nombreux bourrelets mais aucune grosse dépression n'est visible. Son front est instable et à une pente de 38°. Ce GR ne représente pas une grande source d'aléa mise à part quelques légères chutes de bloc isolés.

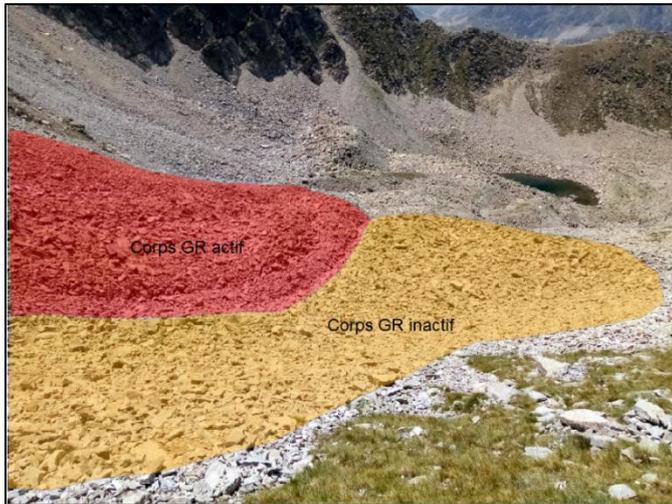


Photo 12 : Photographie des corps des glaciers-rocheux n°66198 et n°66195



Photo 13 : Photographie des fronts de glaciers-rocheux n°66198 et n°66195

Enfin, cette visite a permis de confirmer l'activité des deux autres glaciers-rocheux (n° 66194 et 66195) comme étant actifs en raison de l'absence de végétation sur leurs fronts et leur corps respectifs, des formes bombés de leur corps ainsi que des fortes pentes de leurs fronts (41° pour le GR n°66195 et 40 et 35° pour les deux fronts du GR n°66194). L'ensemble de ces fronts est très instable et composé de matériaux très grossiers. L'ensemble de ces observations permettent d'affirmer que ces glaciers-rocheux sont susceptibles de générer des chutes de blocs et/ou de légers glissements de terrain de tout ou partie du front. Cependant, leur position géographique en fond de vallon bloqué par un verrou glaciaire permet de bloquer toutes éventuelles alimentations d'un système torrentiel.



Photo 14 : Photographie du front du GR n°66195



Photo 15 : Photographie des fronts du GR n°66194



Photo 16 : Vu d'ensemble de tous les glaciers-rocheux du versant Nord du Pic de l'Infern

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 3 : Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux du versant Nord du Pic de l'Infern

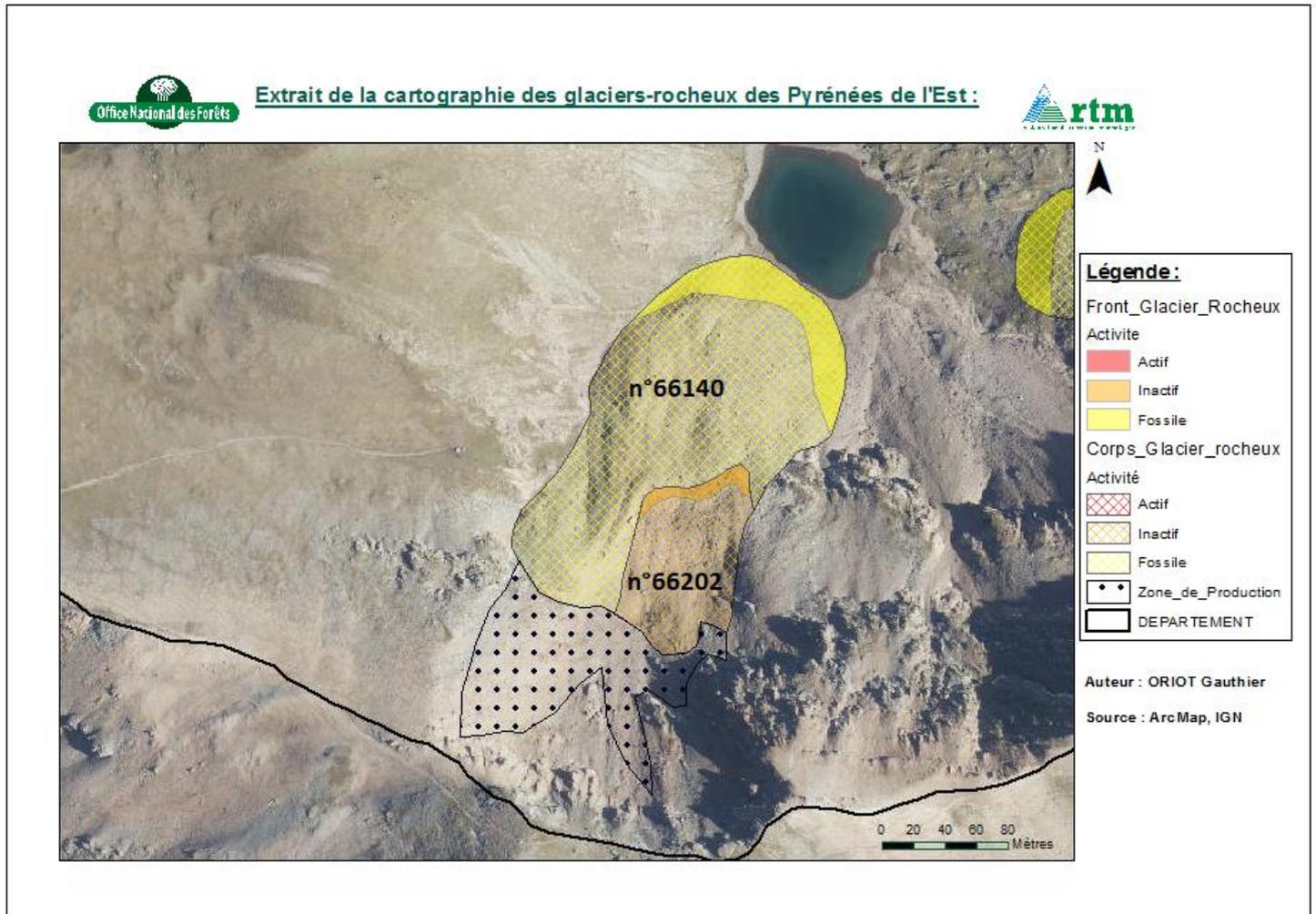
Conclusion :

La visite de ce site a donc permis de confirmer les activités de l'ensemble des glaciers-rocheux présent dans ce vallon de la Coma de l'Infern, à savoir un fossile (n°66150), un inactif (n°66198) et deux actifs recensés (n°66194 et 66195).

Les glaciers-rocheux actifs présents ici peuvent potentiellement être la source d'aléa à court et moyen termes, à travers des chutes de blocs notamment ou encore des petits glissements de terrain. En revanche, ce site étant isolé par un verrou glaciaire, l'alimentation d'un torrent en matériaux semble impossible, de même que tout problème lié à une vidange ou au débordement d'un lac. Etant donné l'éloignement important de ce site aux enjeux les plus proches, on peut en conclure que ce site ne représente aucun risque potentiel.

Annexe 4 : Glaciers-rocheux du versant Nord du Pic supérieur de la Vaca -> n°66140 / n°66202

Visite réalisée le 19/07/22 avec Stéphane Nouguier (chef du service RTM des P-O)



Carte 5 : Cartographie des glaciers-rocheux du versant Nord du Pic supérieur de la Vaca (n°66140 /n°66202)

Contexte géographique :

Le Pic supérieur de la Vaca est un des sommets des Pyrénées-Orientales situés à la frontière avec l'Espagne au sein du massif du Puigmal, sur le haut de la vallée de la Carança, dans la commune de Fontpédrouse. Il culmine à 2826m d'altitude ce qui en fait l'un des sommets les plus hauts de ce massif. Les glaciers-rocheux qui nous intéressent ici sont situés sur le versant Nord de ce sommet avec une légère orientation Nord – Nord-Est, juste à l'amont de l'étang naturel Blau. Ces GR n°66140 et n°66202 sont respectivement fossile et inactif et s'étendent sur 260 et 130m entre les altitudes 2583m et 2715m. Ces GR font parties des plus hauts observés dans les Pyrénées de l'Est, ce qui pourrait justifier la présence de pergélisol. En termes d'enjeux un sentier de grande randonnée passe à proximité directe de ces glaciers-rocheux le long de l'étang Blau, mais mis à part ce sentier les autres enjeux les

plus proches sont extrêmement éloignées de ce site, d'autant plus que le lac est situé au fond d'une petite cuvette en contrebas de tout ce qui l'entoure et ne comporte aucun exutoire naturel visible.

Observations :

Cette sortie terrain nous aura permis de rectifier l'activité du glacier-rocheux identifié lors de la phase de photo-interprétation. En effet, à l'origine ce GR avait été identifié comme étant actif, c'est d'ailleurs ce qui avait motivé notre visite sur ce site, mais finalement, une fois sur place, il s'est avéré que malgré sa forme très imposante et son corps bombé, on avait affaire à un GR fossile au vu de la végétation rase qui recouvre la quasi-totalité du corps et du front. Seule la partie la plus à l'amont est dépourvue de végétation et semble encore contenir du pergélisol. C'est pourquoi le glacier-rocheux originel a été découpé en deux entités distinctes, l'une étant fossile et l'autre inactive comme on peut le voir sur la carte 5 ci-dessus. Le GR fossile particulièrement imposant est composé de matériaux très fins, contrairement aux autres glacier-rocheux observés dans le massif de la Carança, ce qui rend son front très instable en raison notamment de la forte pente de ce-dernier (38°). Cela concerne surtout la partie Ouest du front, tandis que le corps est lui bien stable. Cette instabilité ne semble donc pas dû à la présence de pergélisol mais uniquement au profil topographique du front qui n'est pas encore à l'équilibre.

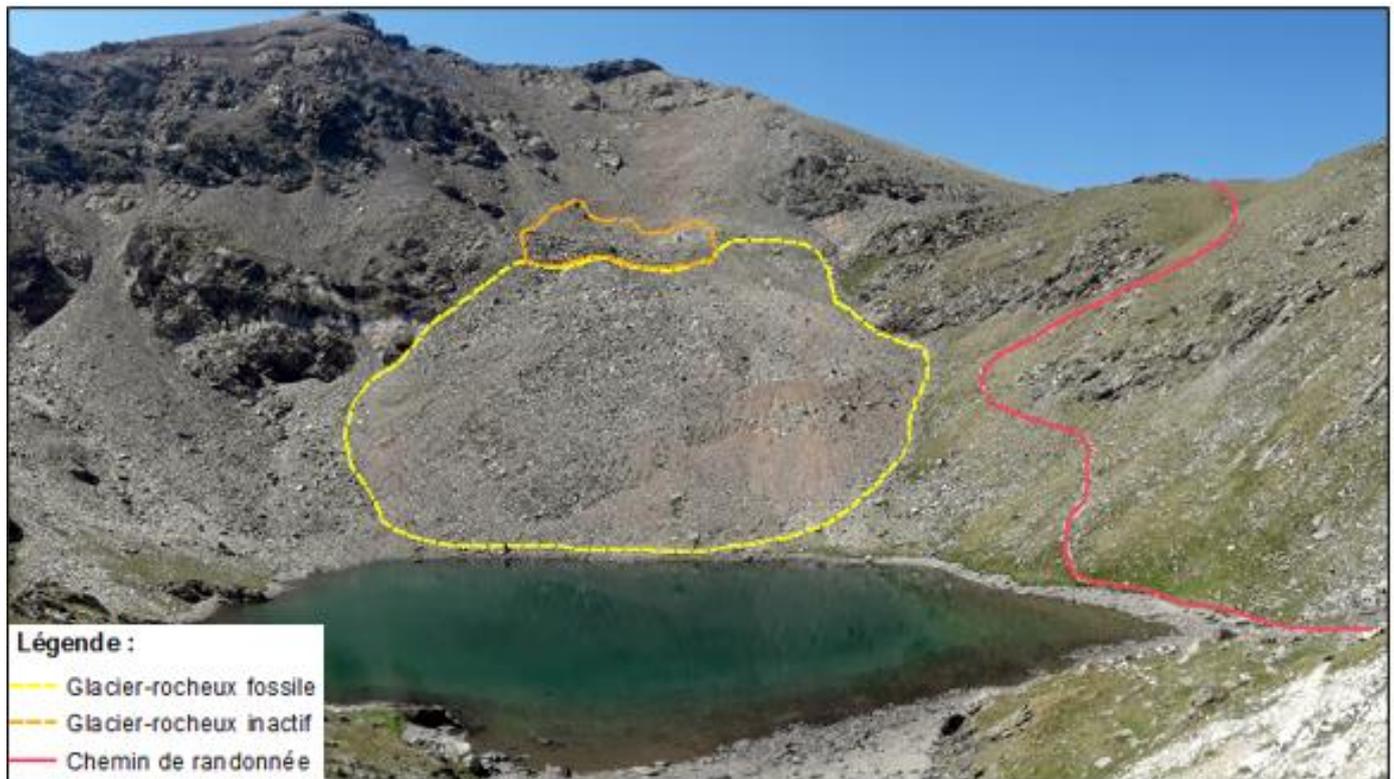


Photo 17 : Photographie d'ensemble des glaciers-rocheux n°66140 et n°66202 vu d'en face

La partie inactive est quant à elle délimitée par un petit front ayant une pente de 36° et semble différente du reste du corps, avec des matériaux plus grossiers instables. On observe également qu'aucune végétation n'est présente sur cette partie du corps alors qu'à la même altitude sur les zones adjacentes la végétation est présente, comme on peut le voir sur la photo 19. Ces observations amènent à penser que cette partie serait encore inactive.

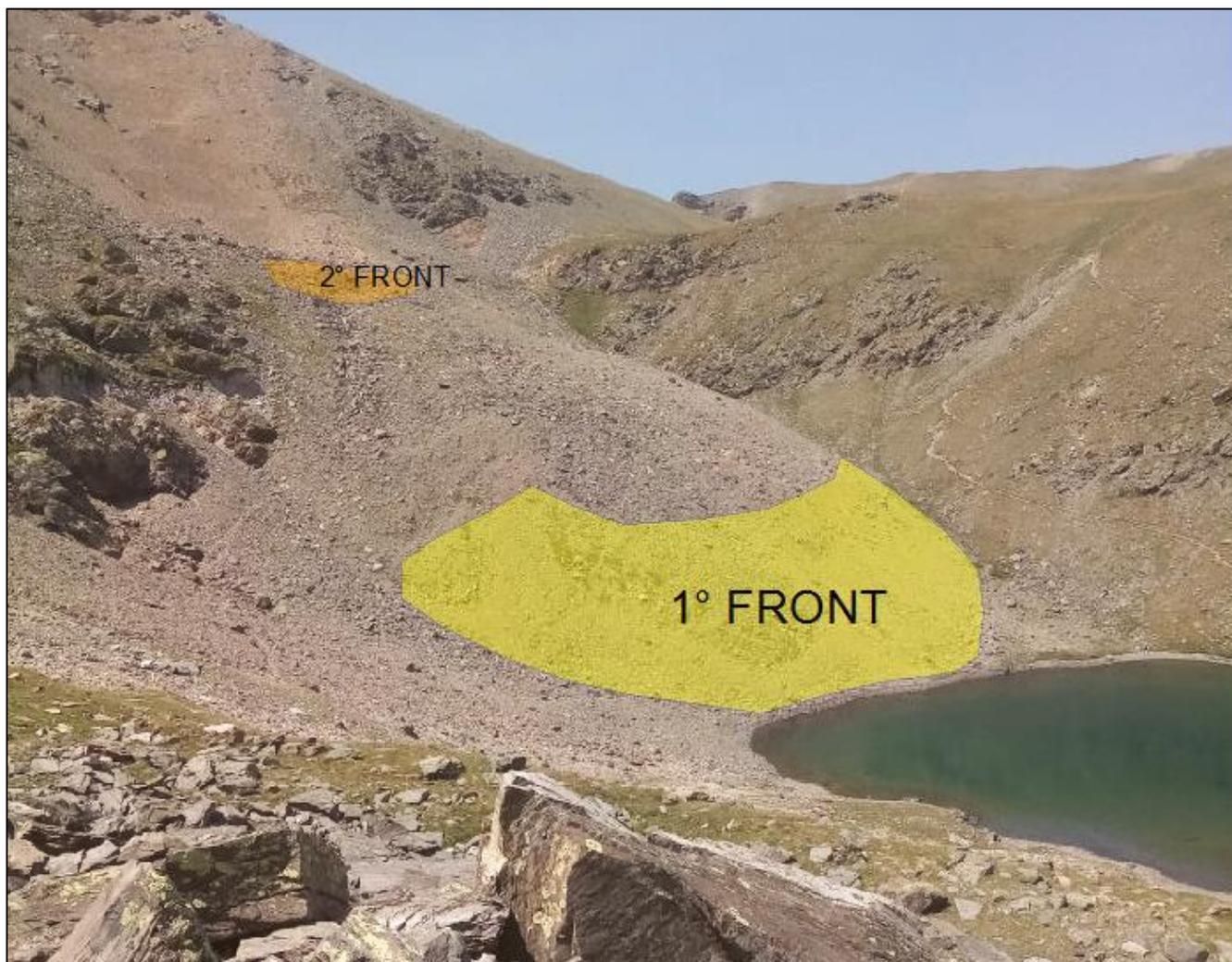


Photo 18 : Vu d'ensemble des glaciers-rocheux n°66140 et n°66202 vu de la gauche avec les fronts bien identifiés



Photo 19 : Photographies du corps du glacier-rocheux inactif n°66202

Les aléas associés à ces glaciers-rocheux se limitent à des chutes de blocs plutôt isolées, la potentialité de glissement de terrain important semble assez faible tout comme l'alimentation d'un système torrentiel en matériaux étant donné la situation géographique de l'étang situé juste à l'aval de ces GR. En cas de chute de bloc importante on peut cependant envisager une légère variation du niveau de l'eau de l'étang mais rien de plus. Les enjeux se limitant à un sentier de grande randonnée comme on l'a vu plus tôt, le seul risque associé à ces GR est une chute de bloc qui atteindrait le sentier, ce qui semble peu probable étant donné la position géographique du sentier par rapport au GR comme on peut le voir sur la photo 17.

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 4 : Phénomène et cotations liés aux glaciers-rocheux du versant Nord du pic supérieur de la Vaca (n°66140 et n°66202)

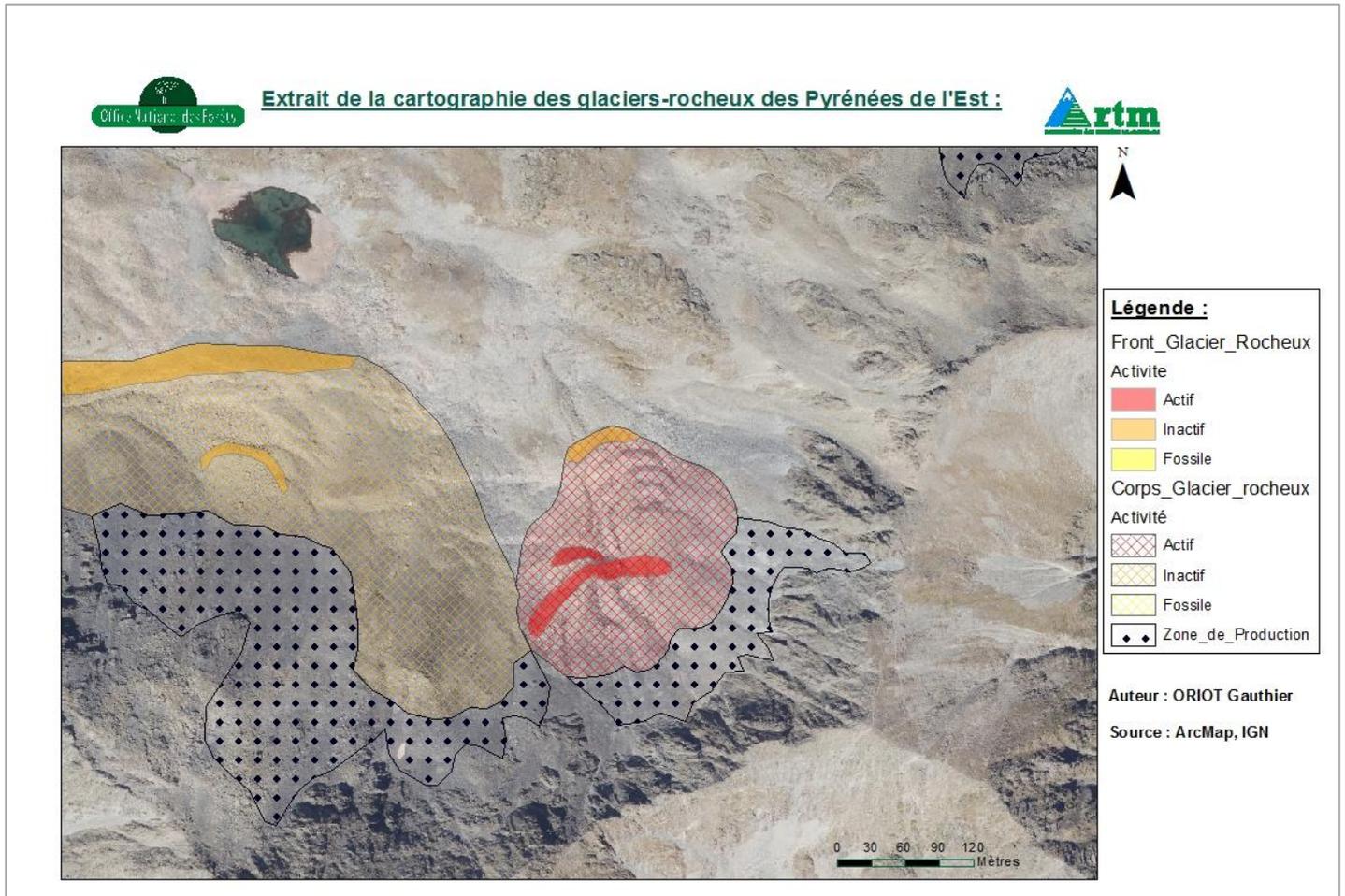
Conclusion :

Cette visite sur le terrain nous aura donc permis de rectifier l'activité du glacier-rocheux identifié actif lors de la phase de photo-interprétation en deux entités distinctes l'une inactive (n°66202) et l'autre fossile (n°66140).

Ces glaciers-rocheux étant en partie instable, ils peuvent être à l'origine de chute de blocs. Cependant, mis à part le sentier de randonnée qui semble hors d'atteinte d'une éventuelle chute de bloc vu le profil topographique de la zone et la légère combe que sépare ce sentier du GR, on observe aucuns autres enjeux susceptibles d'être impacté par cet aléa. On en conclut donc que ces glaciers-rocheux n°66202 et n°66140 ne représentent aucun risque.

Annexe 5 : Glacier-rocheux du versant Nord du pic du Carlit -> n°66071

Visite réalisée le 31/07/22 (non accompagné de personnel RTM)



Carte 6 : Cartographie du glacier-rocheux du versant Nord du pic du Carlit (n°66071)

Contexte géographique :

Le pic du Carlit est le plus haut sommet des Pyrénées-Orientales avec 2921m d'altitude. Il donne son nom au massif qui l'entoure et se situe au sein de la commune d'Angoustrine. Le glacier-rocheux qui nous intéresse ici se situe sur le versant Nord du pic du Carlit, avec une orientation Nord-Ouest. Il s'étend sur 225m entre les altitudes 2610m et 2681m. C'est l'un des seuls glaciers-rocheux actifs du massif et du département, c'est pourquoi il a semblé intéressant d'aller le voir de plus près. Son altitude, sa position géographique en versant Nord et les parois rocheuses présentes à l'amont de celui-ci succédés par des zones d'éboulis font de ce site le site idéal à la formation d'un glacier-rocheux et de présence de permafrost. En termes d'enjeux, ce GR se situe en fond de vallée sauvage, où aucun sentier ne passe, on ne retrouve donc aucun enjeu à proximité directe du GR. L'enjeu le plus proche étant le barrage de l'étang du Lanoux situé bien à l'aval aux alentours de 2200m d'altitude.

Observations :

Cette sortie nous aura permis de confirmer l'activité de ce glacier-rocheux n°66071, comme étant bel et bien actif. Cela ne fait en effet aucun doute lorsqu'on visite ce site. Le GR en question est composé de trois fronts imposants situés les uns au-dessus des autres, seul le plus au Nord et le plus bas en altitude est végétalisé et semble stable avec une pente de 36°, c'est d'ailleurs à partir de ces observations que nous avons décidé de l'identifier comme inactif sur la cartographie (carte 6). Le reste du glacier-rocheux, à savoir l'ensemble du corps et les deux autres fronts sont totalement dépourvus de végétation. Le corps composé de matériaux grossiers est globalement bombé avec des sillons et des bourrelets très bien marqués, signe de mouvement encore aujourd'hui, on observe également quelques petites dépressions mais peu marquées. Les deux autres fronts sont quant à eux composés de matériaux fins avec une pente de 38° pour celui du milieu et 40° pour le front le plus au Nord, ce qui les rends particulièrement instable et sujet aux chutes de blocs.



Photo 20 : Vue d'ensemble du glacier-rocheux n°66071 et des parois rocheuses qui le dominent vu du bas



Photo 21 : Photographie du corps du GR n°66 et des fronts amonts



Photo 22 : Photographie du corps du GR n°66071 vu du front du milieu

L'ensemble de ces observations nous amènent donc à dire que ce glacier-rocheux est bien actif comme déterminé lors de la phase de photo-interprétation. La forte instabilité de la majeure partie du GR et notamment des deux fronts amonts nous amène à dire que ce GR pourrait générer des aléas du type chute de blocs et/ou glissement de terrain. En revanche, ce GR n'étant pas directement connecté à un système torrentiel, l'alimentation torrentielle en matériaux est nulle. Etant donné l'éloignement de l'ensemble des enjeux les plus proches, on peut donc en conclure que ce glacier-rocheux ne représente aucun risque malgré son activité.

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 5 : Phénomènes et cotations liés au glacier-rocheux du versant Nord du pic du Carlit (n°66071)

Conclusion :

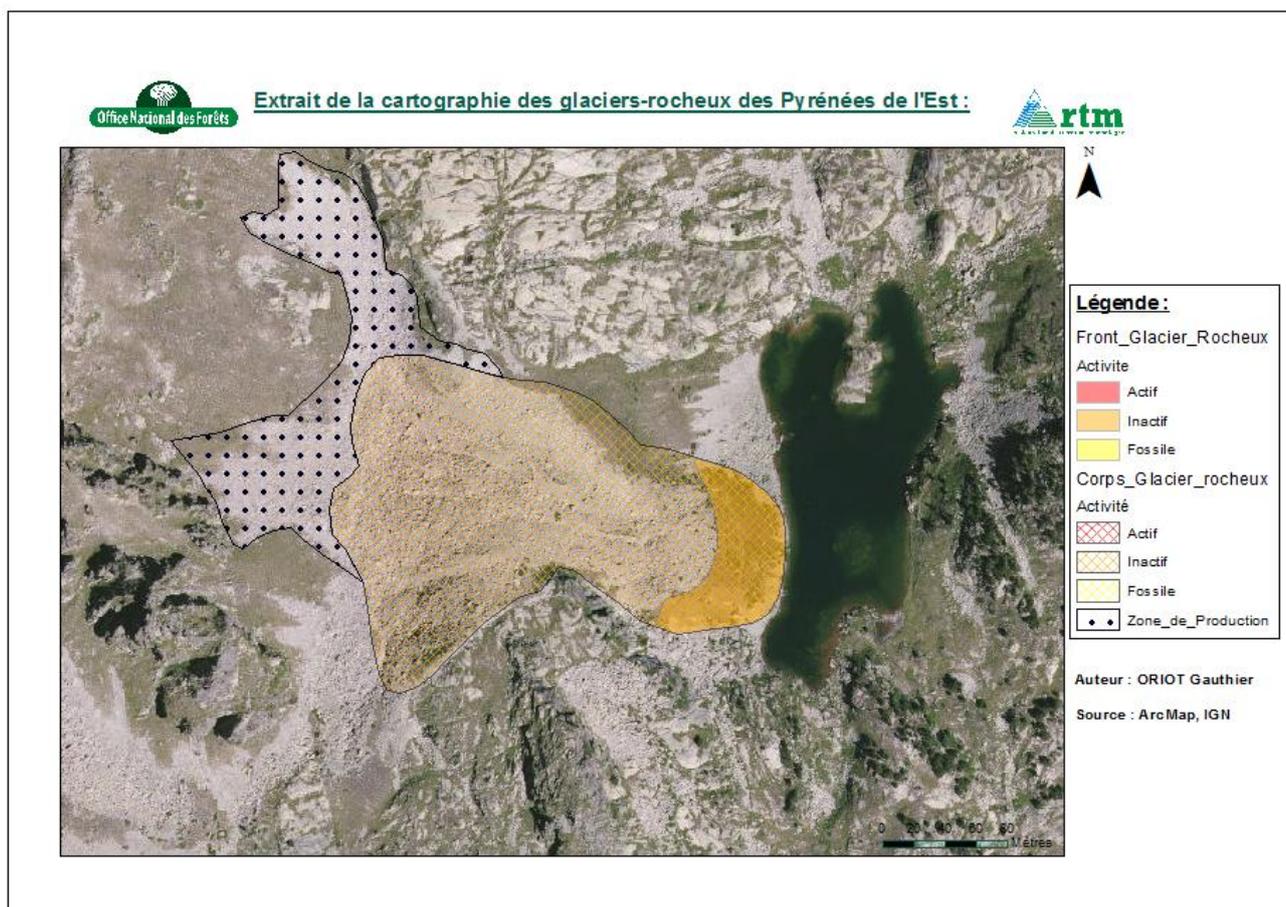
Cette visite sur le terrain nous aura donc permis de confirmer l'activité du glacier-rocheux n°66071 à partir de l'ensemble des observations réalisées. En effet, l'instabilité quasi généralisée et matérialisée par l'absence de végétation sur le corps, ainsi que l'aspect général du GR bombé sont autant de preuve que ce GR est bel et bien actif.

Etant donnée son activité et son instabilité, ce GR pourrait générer des aléas du type chute de blocs et/ou glissement de terrain. Cependant, ce GR n'étant pas connecté à un système torrentiel, l'ensemble des enjeux les plus proches sont trop éloignés de ce site pour être impactés par les aléas associés. Ce glacier-rocheux n°66071 ne représente donc aucun risque malgré son activité.

Compte rendu des sorties terrains en Ariège :

Annexe 6 : Glacier-rocheux de l'étang de Soula-Couloumé -> n°09049

Visite réalisée le 05/07/22 avec Emmanuel Lucchese (chef de projet risques naturels RTM Haute Ariège)



Carte 7 : Cartographie du glacier-rocheux de l'étang de Soula-Couloumé (n°09049)

Contexte géographique :

L'étang de Soula-Couloumé est un étang naturel situé en Haute Ariège dans le massif du Carlit sur la commune de Mérens-les-Vals à une altitude de 2320m environ, au sein d'une zone de replat isolé par un verrou rocheux stable juste au Sud de ce-dernier, par lequel s'écoule un petit exutoire naturel. Il alimente à l'aval le ruisseau des Bésines qui s'écoule jusqu'à l'étang artificiel des Bésines. Le glacier-rocheux qui nous intéresse ici est situé juste à l'Ouest de cet étang sur le versant Est du Pic des Taulades qui culmine à 2580m d'altitude. Ce GR a donc une orientation Est et s'étend sur 286m entre 2327m et 2424m d'altitude. Ces caractéristiques ne sont pas vraiment propices à la présence de pergélisol, qui est principalement présent dans les Pyrénées à partir de 2500m d'altitude en versants Nord.

Observations :

Ce glacier-rocheux est donc situé à proximité directe de l'étang de Soula-Couloumé et notamment son front qui vient « se jeter » dans l'étang. La particularité de ce glacier-rocheux est que son front est entièrement végétalisé par de la pelouse et des landes à rhododendrons, ce qui nous permet d'en déduire qu'il est très stable malgré une pente de 36°. Tandis que son corps, constitué de matériaux grossiers, est totalement dépourvu de végétation et plutôt instable. La forme générale de ce corps composée de sillons, bourrelets et dépressions fortement marqués laisse à penser que cette forme est encore aujourd'hui animée de mouvement. Ce qui voudrait donc dire que des poches de pergélisol sont encore présentes par endroit et expliquerait cette instabilité. A partir de l'ensemble de ces observations, ce glacier-rocheux a été jugé inactif.



*Photo 23 :
Glacier-rocheux
n°09049 vu de
face*



*Photo 24 : Photographie du
corps du GR n°09049 vers
l'amont*

Cependant, malgré les possibles mouvements qui peuvent animer le corps, le front stable, végétalisé et très imposant (environ 40m de long) (photo 1) de ce GR empêche des éventuels aléas chute de blocs / glissement de terrain qui pourrait provenir du corps d'atteindre le lac. Par conséquent, la probabilité d'alimentation d'un torrent en matériaux est très faible.



Photo 25 : Photographie du front du GR n°09049 vu de haut

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 6 : Phénomènes et cotations liés au glacier-rocheux de l'étang de Soula-Couloumé (n°09049)

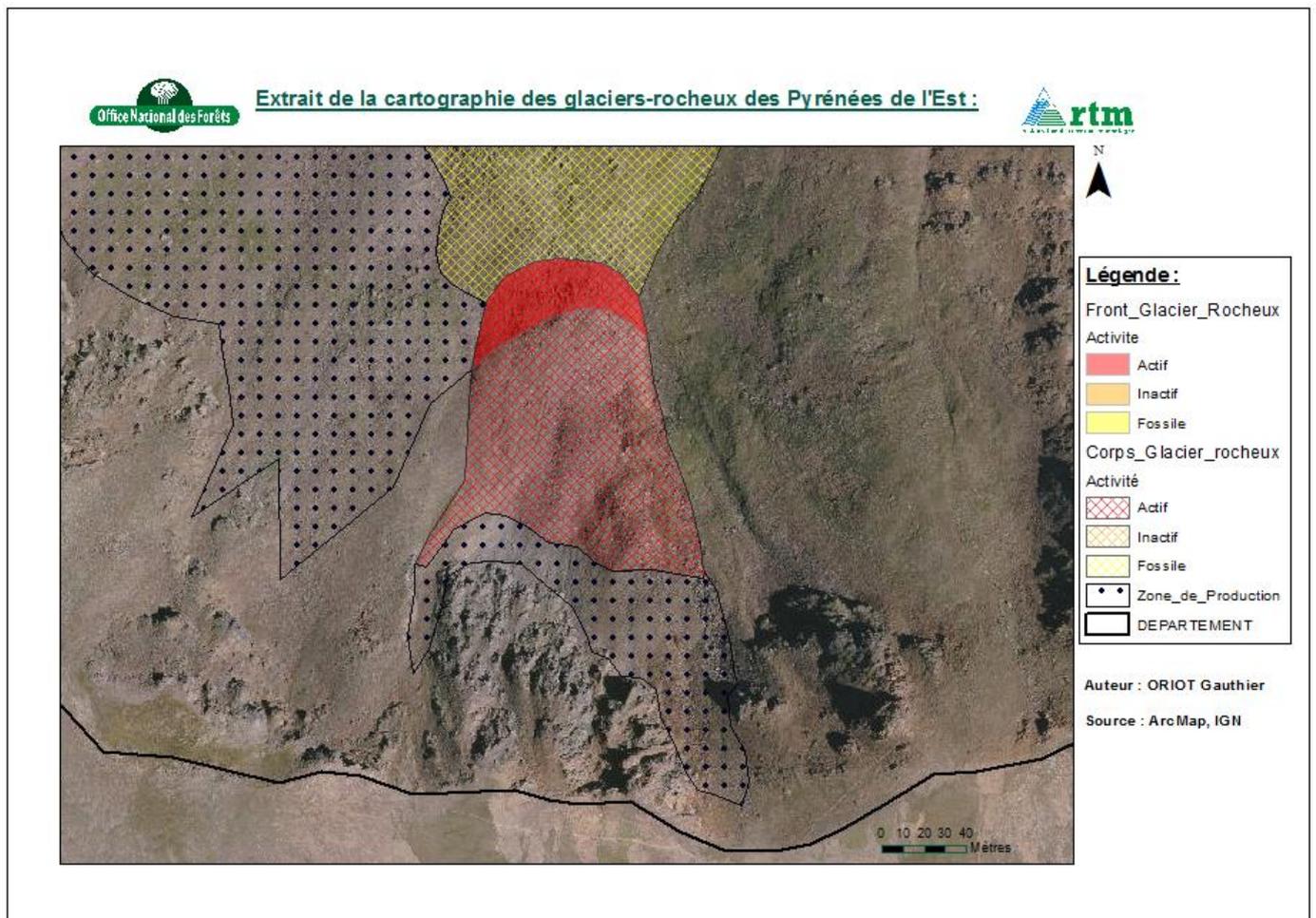
Conclusion :

Au vu de l'ensemble des observations réalisées lors de la visite sur le terrain que nous venons de détailler, ce glacier-rocheux semble inactif, malgré un front fortement végétalisé, ce qui peut donc laisser penser que ce GR n°09049 est en cours de fossilisation.

Comme on vient de le voir, les aléas associés à ce GR sont quasi inexistants, de même que les enjeux qui se limitent aux infrastructures hydroélectriques de l'étang des Bésines qui sont situés largement à l'aval de ce glacier-rocheux. On peut donc affirmer que ce GR ne représente aucun risque.

Annexe 7 : Glacier-rocheux du versant Nord du Pic de la Cabanéta -> n°09082

Visité réalisée le 12/07/22 avec Emmanuel Lucchese (chef de projet risques naturels RTM Haute Ariège)



Carte 8 : Cartographie du glacier-rocheux du versant Nord du Pic de la Cabanéta (n°09082)

Contexte géographique :

Le Pic de la Cabanéta est un des sommets ariégeois situé à la frontière avec l'Andorre, au sein du massif de l'Aston en Haute-Ariège, dans la commune de L'Hospitalet-près-l'Andorre. Il culmine à 2847m d'altitude, ce qui en fait un des sommets les plus hauts des environs et du département. Le glacier-rocheux qui nous intéresse ici se situe sur le haut du versant Nord de ce sommet et s'étend sur 150m entre 2625m et 2717m d'altitude. Cette orientation Nord et cette altitude élevée font de ce site un site propice à la présence de pergélisol. Ce GR se situe sur le haut de la vallée du Siscar, qui débouche à l'aval sur le village de L'Hospitalet-près-l'Andorre, qui peut donc représenter un enjeu important en cas d'aléa d'alimentation torrentielle important.

Observations :

Cette visite réalisée le 12 juillet 2022 a permis de confirmer l'activité de ce glacier-rocheux, qui est formé d'un front très imposant (trentaine de mètres) ayant une pente de 42°, non végétalisé et composé de schistes très fins, ce qui le rend extrêmement instable. Son corps est en revanche assez affaissé, composé de matériaux grossiers et légèrement végétalisé, principalement au niveau des fronts latéraux. Ce qui laisse penser que le pergélisol présent à l'intérieur de cette forme est petit à petit en train de disparaître. Néanmoins, ce GR reste pour l'instant bien actif au vu de son front notamment.



Photo 26 : Photographie du front très instable du GR n°09082



Photo 27 : Glacier-rocheux n°09082 vu de haut

Ce glacier-rocheux pourrait être à l'origine de chute de blocs et/ou de glissement de terrain important, notamment en période estivale en cas de dégradation importante du pergélisol présent en profondeur, qui fait office de ciment entre tous les blocs qui compose ce GR. Cependant, ce glacier-rocheux n'est connecté à aucun système torrentiel et est séparé des enjeux les plus proches (infrastructures hydroélectriques dans la vallée) par de nombreux replats et des contre-pentes. C'est donc une forme très isolée du point de vue des enjeux comme on peut le voir sur la photo ci-dessous.



Photo 28 : Photographie prise depuis le pied du GR n°09082 vers le fond de vallée

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

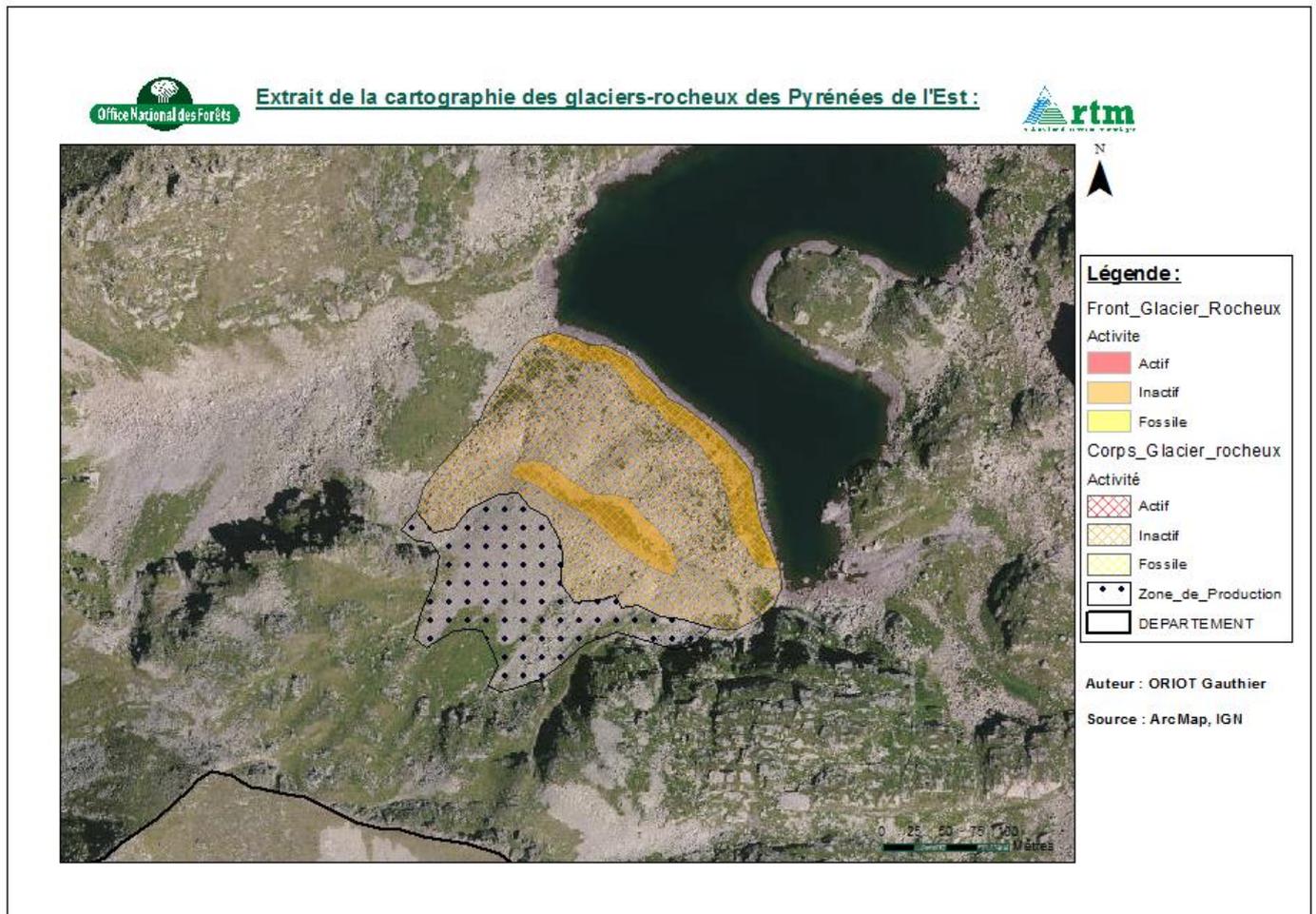
Tableau 7 : Phénomènes et cotations liées au glacier-rocheux du versant Nord du pic de la Cabanéta (n°09082)

Conclusion :

Cette visite nous aura donc permis d'affirmer que ce glacier-rocheux n°09082 est bel et bien actif au vu de son front très pentu et instable notamment. Cependant, malgré cette activité qui rend cette forme très instable et sujette à des aléas tels que des chutes de blocs et/ou des glissements de terrain, le fort éloignement avec l'ensemble des enjeux présents dans cette vallée et la non-connexion avec un système torrentiel en font un GR sans aucun risque potentiel associé.

Annexe 8 : Glacier-rocheux de l'étang de Joclar -> n°09113

Visite réalisée le 13/07/22 avec Carine Masse (Experte risques naturels RTM Ariège et Haute-Garonne) et Nadège Kieffer (technicienne de secteur RTM Ariège et Haute-Garonne)



Carte 9 : Cartographie du glacier-rocheux de l'étang de Joclar (n°09113)

Contexte géographique :

L'étang de Joclar se situe dans le massif de l'Aston en Haute Ariège, sur la commune d'Aston à une altitude de 2320m d'altitude environ. Comme on peut le voir sur la carte ci-dessus, le glacier-rocheux qui nous intéresse ici est « collé » à cet étang, avec une orientation Nord-Est. Il s'étend sur 290m pour une surface de 38800m² entre les altitudes 2331m et 2407m. L'étang de Joclar est un étang naturel dépourvu d'infrastructures hydroélectrique et isolé du reste de la vallée par un imposant verrou glaciaire rocheux stable au Nord de celui-ci. On observe aucun exutoire naturel ce qui fait de ce site un site relativement isolé de tout enjeu.

Observations :

Cette visite réalisée le 13 juillet 2022 nous aura permis de rectifier l'activité attribuée à ce glacier-rocheux durant la phase de photo-interprétation. En effet, dans un premier temps ce GR avait été identifiée comme actif. Cependant, après la sortie sur le terrain, il est apparu évident que ce glacier-rocheux était seulement inactif et même en cours de fossilisation. La particularité de ce GR est qu'il a deux fronts bien distincts situés l'un au-dessus de l'autre qui sont tous les deux entièrement végétalisés par de la pelouse et des landes à rhododendrons notamment. Cette végétalisation est rendue possible par la stabilisation de ces fronts qui sont pourtant très pentu, notamment le front le plus à l'aval qui se jette dans le lac qui a une pente moyenne de 39° mais qui peut atteindre par endroit les 46° . Le front amont a quant à lui une pente de 32° . Le corps de ce GR composé de matériaux granitiques extrêmement grossiers est lui majoritairement non végétalisé mais tout de même assez stable, malgré une forme globale bien bombée entre les deux fronts avec des sillons et des bourrelets bien marqués. Cela laisse penser qu'il pourrait encore y avoir des poches de pergélisol en profondeur dans ce GR, d'où le classement en inactif plutôt qu'en fossile.

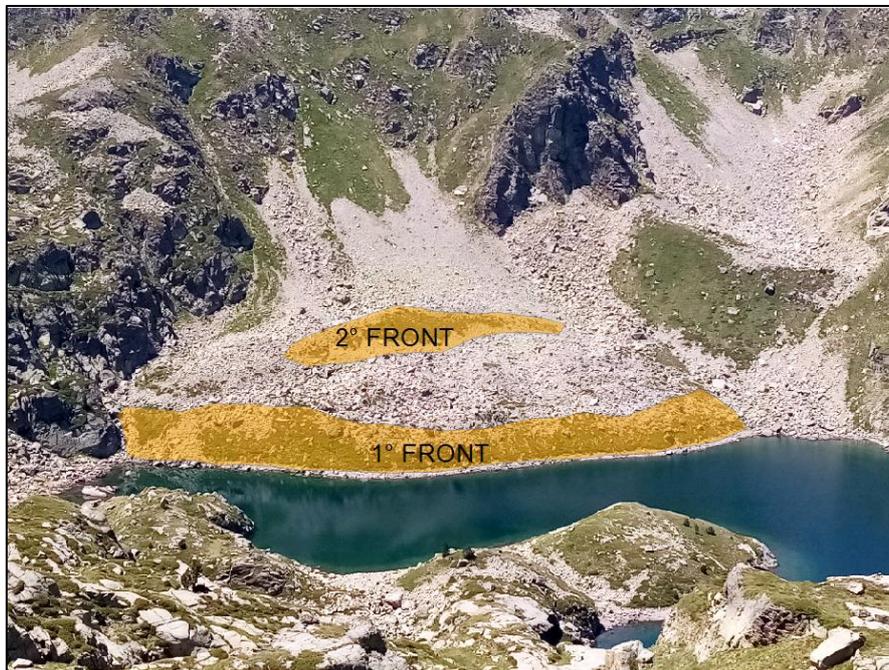


Photo 29 : Glacier-rocheux n°09113 vu de face



Photo 30 : Front aval du GR n°09113 vu de côté



Photo 31 : Corps entre les 2 fronts du GR n°09113 vue de haut

Ce glacier-rocheux étant globalement bien stable, mise à part quelques chutes de bloc isolées, on n’imagine pas d’autres aléas potentiels associés à ce-dernier. De plus, les enjeux les plus proches sont très en aval dans la vallée ou hors de portée, comme c’est le cas pour le refuge gardé de Ruhle qui surplombe la vallée à l’aval en rive droite. Par conséquent, ce glacier-rocheux ne semble représenter aucun risque potentiel ou avérée.

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 8 : Phénomènes et cotations liés au glacier-rocheux de l'étang de Joclar (n°09133)

Conclusion :

Cette visite de terrain nous aura donc permis de réajuster l’activité de ce glacier-rocheux n°09133 comme étant inactif plutôt qu’actif en raison principalement de la végétation très présente sur les fronts de celui-ci. L’aspect général du corps bombé et bien marqué suppose qu’il y aurait encore des poches de glace à l’intérieur, même s’il est actuellement en cours de fossilisation.

Les aléas associés à ce glacier-rocheux se limitent à des chutes de blocs isolés depuis le corps du GR pouvant atteindre au maximum le lac. L’éloignement des enjeux nous permet donc d’affirmer que ce GR ne représente aucun risque.

Annexe 9 : Glacier-rocheux du versant Nord du Pic de Racofret -> n°09214

Visite réalisée le 22/07/22 avec Benjamin Géraud (chef de projet risques naturels Vicdessos Couserans)

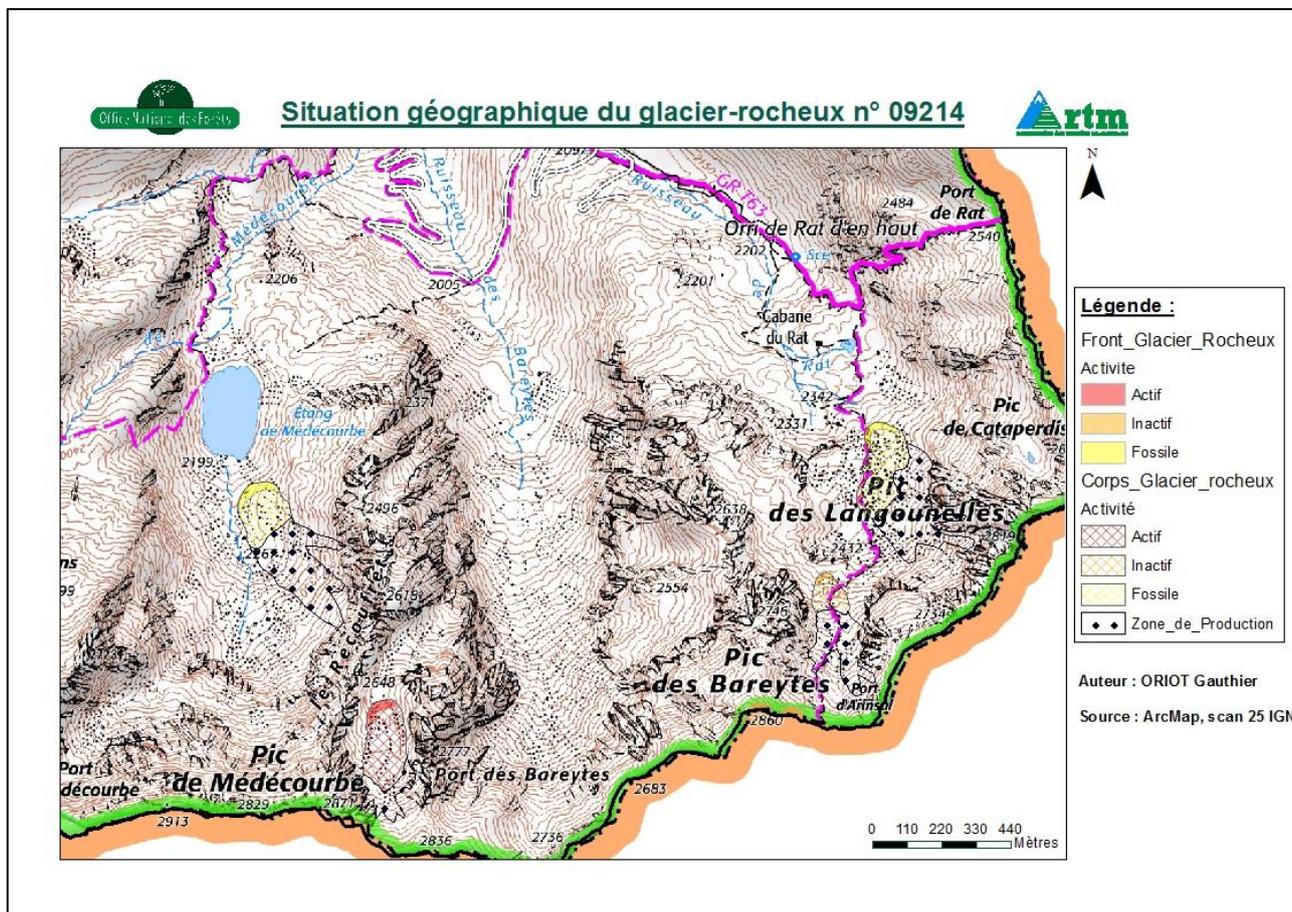


Carte 10 : Cartographie du glacier-rocheux du versant Nord du Pic de Racofret (n°09214)

Contexte géographique :

Le pic de Racofret est un des sommets ariégeois que marque la frontière avec l'Andorre au sein du massif du Montcalm dans la commune d'Auzat. Il culmine à 2836m et se situe juste à l'Est du pic de Médécourbe qui lui culmine à 2913m et marque le point de frontière entre l'Espagne au Sud-Ouest, l'Andorre au Sud-Est et la France au Nord. Le glacier-rocheux qui nous intéresse ici est un des seuls encore actif du département et se situe donc sur le versant Nord du pic de Racofret, au sein d'une combe très étroite et isolée. Son orientation est plein Nord et il mesure 295m de long pour une surface de 32230m² entre les altitudes 2604m et 2667m. Cette position géographique au sein de cette combe à l'ombre une grande partie de la journée et à haute altitude en fait un site très propice à la présence de pergélisol. De plus, la présence de grandes parois rocheuses qui entourent cette combe permet un apport en matériaux important, nécessaire à la formation de ces formes périglaciaires. Ce qui justifie donc la présence de ce GR actif ici.

Ce glacier-rocheux est situé juste à l'amont d'un tout petit lac, lui-même à l'amont d'un goulet d'étranglement torrentiel qui s'écoule par la suite dans la vallée. Cependant, les enjeux les plus proches sont situés très loin en aval dans la vallée, seul un sentier de randonnée (qui est aussi un ancien projet de route vers l'Andorre) passe à proximité de ce GR dans la vallée à l'aval.



Carte 11 : Cartographie de la situation géographique de glacier-rocheux n°09214

Observations :

Cette visite sur le terrain réalisée le 22 juillet 2022 nous a permis de confirmer que ce glacier-rocheux est bel et bien actif comme déduit lors de la phase de photo-interprétation. En effet, dans un premier temps nous avons observé la forte présence de névés dans ce vallon pour la période de l'année, alors que les autres vallons adjacents n'en comportaient aucun, preuve du microclimat particulièrement froid qui réside dans cette combe, favorable à la présence de pergélisol. Dans un deuxième temps la forme globalement bombée du glacier-rocheux et très marquée par des sillons et des bourrelets n'a fait que confirmer cette hypothèse. Tout comme le front du GR ayant une pente de 41° composé de matériaux grossiers instables sur une vingtaine de mètres de long. Le tout dépourvu de végétation. L'ensemble de ces observations permet d'affirmer qu'il s'agit bien d'un glacier-rocheux actif qui pourrait potentiellement générer des chutes de blocs et/ou glissement de terrain qui pourraient eux-mêmes, en cas de forte pluie venir fournir en matériaux le système torrentiel aval. Cependant, comme on vient de le voir les principaux enjeux sont très éloignés de ce vallon mis à part un sentier de randonnée. Les risques associés à ce glacier-rocheux sont donc très limités.



Photo 32 : Vu d'ensemble du glacier-rocheux n°09214 vu du haut



Photo 33 : Front du GR n°09214 vu du haut



Photo 34 : Photographie du corps du GR n°09214

	Synthèse des phénomènes brutaux pouvant créer une menace sur le glacier-rocheux ou sa proximité				Synthèse des phénomènes pouvant créer une menace à distance du glacier-rocheux			
	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier-rocheux	Phénomènes dus au front du glacier-rocheux	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression
0	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée	Aucune menace envisagée
1	Tassements et déplacements de faible ampleur	Mouvements, glissements localisés	Variation du niveau d'eau	Variation du niveau d'eau				
2	Ravinements	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent ou du lac en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Tableau 9 : Phénomènes et cotations liés au glacier-rocheux du versant Nord du pic de Racofret (n°09214)

Conclusion :

Cette visite a permis de confirmer que ce glacier-rocheux n°09214 est bien actif. C'est l'un des très rares glacier-rocheux encore actif dans le département.

Au vu de cette activité et de l'instabilité globale observée, ce-dernier pourrait potentiellement générée des aléas tels que des chutes de blocs et/ou des glissements de terrain, qui viendraient à leur tour alimenter en matériaux le système torrentiel à l'aval. Cependant, les enjeux se limitent à un sentier de randonnée située dans la vallée en aval, les autres enjeux étant beaucoup plus éloignés et séparés de notre GR par deux replats très importants en fond de vallée, qui jouent le rôle d'une zone de régulation.

Ce glacier-rocheux représente donc un risque potentiel sur ce sentier via une lave torrentielle dont les matériaux auraient été fournis par le GR.

Liste des figures :

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude Source : d-maps.com.....	9
Figure 2 : Aire géographique du département de l'Ariège. Source : intercarto.....	10
Figure 3 : Aire géographique du département des Pyrénées-Orientales. Source : intercarto.....	11
Figure 4 : Stratigraphie générale du pergélisol. Source : unifr.ch, fiches SSGM	13
Figure 5 : a) Graphique du nombre annuel d'écroulements dans les Aiguilles de Chamonix depuis 1980, établi par photocomparaison ; b) Altitude (m) et orientation (°) de l'ensemble des écroulements recensés entre 2007 et 2011 dans le massif du Mont Blanc Source : Bodin et al. 2015 ; Données : L. Ravanel	16
Figure 6 : Terrassettes de gélifluxion (en haut à droite) ; Sols structurés (en bas à droite) ; Bloc fluant (en bas à gauche) ; Ostioles (en haut à droite) Source : ResearchGate	17
Figure 7 : Schéma d'un glacier-rocheux Source : Bouvet et al., 2011	18
Figure 8 : Coupe longitudinale d'un glacier-rocheux Source : Bodin, 2008	19
Figure 9 : Profils schématiques de glaciers-rocheux actifs, inactifs et fossiles (adapté de Ikeda et Matsuoka, 2002) Source : Bouvet et al., 2011)	20
Figure 10 : Photographies de différentes formes de fluage de matériaux meubles soumis à des conditions de pergélisol dans le Val d'Anniviers (Suisse) Source : Géomorphologie-montagne.ch	21
Figure 11 : Différentes étapes de formation d'un glacier-rocheux d'origine périglaciaire Source : Haeberli, 1985 ; repris par Loïc Bonnetain, 2010.....	23
Figure 12 : Schéma des différents mécanismes mis en jeu lors d'une coulée de boue générée à partir d'un glacier-rocheux Source : Roudnitska et al., 2017, Inventaire RTM des GR de Savoie (73)	25
Figure 13 : Profil de tomographie électrique longitudinal du glacier-rocheux du Petit-Vélan (Suisse) Source : Delaloye et al., 2011	26
Figure 14 : Vidange du lac du Plan de Chauvet (04) en juillet 2008. a) Vue d'ensemble du site ; b) orifice de vidange ; c) crue quelques centaines de mètres à l'aval Source : Bodin et al., 2015 ; photos : M. Peyron, RTM 04.....	27
Figure 15 : Phénomènes et cotations liés à la dégradation du pergélisol des glaciers-rocheux Source : Rapports ONF – RTM des départements Alpains.....	28
Figure 16 : Diagramme ombrothermique de Formiguères en Capcir (à gauche) et d'Angoustrine en Cerdagne (à droite) Source : Chambre-d'agriculture.fr	30
Figure 17 : Diagramme ombrothermique des communes d'Auzat et d'Orlu en Ariège Source : Climate-data.org.....	31
Figure 18 : Carte du relief glaciaire de Mont-Louis Ouest (Pyrénées-Orientales)	40
Figure 19 : Extrait d'une ortho-photographie (versant Nord du Carlit)	41
Figure 20 : Extrait de la carte topographique SCAN25 de l'IGN (Versant Nord du Carlit)	42
Figure 21 : Pointage de glacier-rocheux sur Google Earth	43
Figure 22 : Extrait de la carte géologique 1/50 000 de Saillagouse, n° 1098	44
Figure 23 : Extrait de la cartographie des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est	45

Figure 24 : Photo d'un inclinomètre qui sert à calculer la pente du front des GR.....	48
Figure 25 : Répartition de l'ensemble des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est en fonction de leur activité :	49
Figure 26 : Répartition des glaciers-rocheux d'Ariège et des Pyrénées-Orientales en fonction de leur activité :	50
Figure 27 : Cartographie des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est :	50
Figure 28 : Répartition des glaciers-rocheux d'Ariège (graphique du haut) et des Pyrénées-Orientales (graphique du bas) par massif et par niveau d'activité :	51
Figure 29 : Répartition altitudinale des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est par niveau d'activité (ci-dessus) et dénivelée moyen (ci-dessous).....	52
Figure 30 : Répartition altitudinale des fronts des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction de l'activité :	53
Figure 31 : Répartition altitudinale des racines des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction de l'activité :	53
Figure 32 : Valeurs extrêmes et statistiques sur les altitudes des fronts des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, par niveau d'activité :	54
Figure 33 : Orientation de l'ensemble des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est :	55
Figure 34 : Orientation des glaciers-rocheux fossiles des Pyrénées de l'Est :	55
Figure 35 : Orientation des glaciers-rocheux inactifs des Pyrénées de l'Est :	56
Figure 36 : Orientation des glaciers-rocheux actifs des Pyrénées de l'Est :	56
Figure 37 : Distribution et statistiques des longueurs des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction du niveau d'activité :	57
Figure 38 : Surface moyenne en hectares des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, en fonction du niveau d'activité :	58

TABLE DES MATIERES :

Résumé :.....	1-2
Remerciements :	3
Liste de sigles :.....	5
Introduction :	6
I. Contexte du stage :	7
1. Présentation de la structure :.....	7
2. Présentation des missions :.....	8
3. Présentation de la zone d'étude :	9
II. Etat de l'art.....	12
1. Le pergélisol, une particularité des environnements froids :.....	12
a) Définition :.....	12
b) Caractérisation :	13
c) L'effet du réchauffement climatique sur le pergélisol :	15
2. Les glaciers-rocheux, une forme caractéristique de la présence de permafrost :	18
a) Définition, Caractérisation et typologie des glaciers-rocheux :	18
b) Evolution de la recherche sur les glaciers-rocheux	22
c) Aléas naturels associés aux glaciers-rocheux :.....	24
3. Le contexte particulier des Pyrénées de l'Est :.....	29
1. Un contexte géographique et climatique atypique :.....	29
2. L'évolution glaciaire depuis le LGM :.....	31
c) Des recherches sur les glaciers-rocheux limitées :.....	34
III. Inventaire des glaciers-rocheux dans les Pyrénées de l'Est :.....	37
1. Déroulement de la mission de stage :.....	37
2. Méthodologie appliquée :.....	38
a) Partie bibliographie :.....	38
b) Partie identification :.....	41
c) Partie cartographie :.....	45
d) Partie visite sur le terrain :	47
IV. Résultats :	49
1. Répartition d'activité :.....	49
2. Répartition géographique :	50
3. Répartition altitudinale :	52
4. Orientation des glaciers-rocheux :	55

5. Longueur des glaciers-rocheux :.....	57
6. Surface des glaciers-rocheux :.....	58
7. Risques associés aux glaciers-rocheux :	59
V. Discussions et mise en perspectives :.....	61
1. Discussions : en quoi les glaciers-rocheux peuvent être perçus comme des sentinelles du changement climatique ?	61
2. Retour d'expérience : Limites et suites à donner.....	62
a) Limites :	62
b) Suites à donner :.....	63
3. Retour d'expérience : apport du stage.....	64
Conclusion :	65
Bibliographie :.....	67
Sitographie :.....	71
Liste des annexes :.....	72
Annexes :	73
Liste des figures :.....	109
Table des matières :	111

Abstract :

Climate change is no longer an issue. Scientists from all over the world, supported by the IPCC, agree on this point. The increase in global temperatures, which has increased considerably since the end of the 20th century, is causing numerous upheavals that we must face. This is particularly true in our mountains, where this warming is particularly significant and is leading to a strong retreat of glacial formations, which have become the symbol of this climate change. However, white glaciers are only the tip of the iceberg. Periglacial formations, which are linked to the presence of permafrost and are very present in mountain areas, are also undergoing significant retreat and major changes. Faced with this observation, the scientific community has taken up this subject in order to analyse the impact that global warming could have on all glacial and periglacial formations, particularly in terms of risks.

It is in this context that this identification and characterisation study of the rocky glaciers of the Eastern Pyrenees is being carried out by the RTM service of the Eastern Pyrenees. This study was initiated by the Ministry of Ecological Transition, within the framework of the Action Plan for the Prevention of Risks of Glacial and Periglacial Origin. This inventory of rock glaciers, which is a characteristic form of permafrost, is the last in a long series on a national scale that began in 2011 in the Hautes-Alpes and will end in the Pyrenees (Western Pyrenees in 2021 and Eastern Pyrenees in 2022). The aim of these inventories is to map all the rocky glaciers observed on a national scale and above all to identify those that could represent a risk, particularly in this context of global warming. In order to set up, thereafter, protection works or other to limit to the maximum the stakes related to these natural hazards.

Keys words : rockglacier, permafrost, natural risks, climate change, Pyrenees

Résumé :

Le changement climatique n'est aujourd'hui plus à prouver. L'ensemble des scientifiques du monde entier, porté par le GIEC, s'accordent sur ce point. L'augmentation des températures à l'échelle mondiale, qui s'accroît considérablement depuis la fin du XX^e siècle, entraîne de nombreux bouleversements auxquels il nous faut faire face. Et notamment dans nos montagnes, où ce réchauffement est particulièrement important et entraîne un fort recul des formations glaciaires, qui sont devenues le symbole de ce changement climatique. Cependant, les glaciers blancs ne représentent que la partie émergée de l'iceberg. Les formations périglaciaires, liées à la présence de pergélisol et très présentes en zone de montagne, subissent, elles aussi, un recul important et de grandes modifications. Face à ce constat, la communauté scientifique s'est saisie de ce sujet, afin d'analyser l'impact que pourrait avoir le réchauffement climatique sur l'ensemble des formations glaciaires et périglaciaires, notamment en termes de risques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude d'identification et de caractérisation des glaciers-rocheux des Pyrénées de l'Est, au sein du service RTM des Pyrénées-Orientales. Etude initiée par le Ministère de la Transition Ecologique, dans le cadre du Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaires et périglaciaires (PAPROG). Cet inventaire des glaciers-rocheux, qui est une forme caractéristique de pergélisol, est le dernier d'une longue série à l'échelle nationale qui a débuté en 2011 dans les Hautes-Alpes et qui se termine dans les Pyrénées (Pyrénées de l'Ouest en 2021 et Pyrénées de l'Est en 2022). L'objectif de ces inventaires est de cartographier l'ensemble des glaciers-rocheux observés à l'échelle nationale et surtout d'identifier ceux qui pourraient représenter un risque, notamment dans ce contexte de réchauffement climatique. Afin de mettre en place, par la suite, des ouvrages de protection ou autre afin de limiter au maximum les enjeux liés à ces aléas naturels.

Mots clés : glacier-rocheux, pergélisol, risques naturels, changement climatique, Pyrénées