



Les glaciers-rocheux dans les Hautes-Alpes : inventaire, cartographie et risques associés

octobre 2011

Source : A. RIGUIDEL GLACIER ROCHEUX DE PRA ROND (commune de St André d'Embrun)

Philippe BOUVET , Raphaële CHARVET Service RTM des Hautes-Alpes

Armaël RIGUIDEL Etudiant



et Stagiaire RTM 2011

OFFICE NATIONAL DES FORETS

*Service de Restauration des Terrains en Montagne
des Hautes-Alpes*

5, rue des Silos – BP 96 – 05003 GAP cedex

Tél. : 04.92.53.61.12 - Fax : 04.92.53.19.87

E.mail : rtm.gap@onf.fr - Web : www.onf.fr



1. SOMMAIRE

1. SOMMAIRE.....	2
2. INTRODUCTION.....	4
3. LES OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE	5
4. CADRE ET RAPPELS PREALABLES	6
4.1. LE PERGELISOL	6
4.1.1. Définition et classifications	6
4.1.2. Structure.....	7
4.1.3. Dégradations en lien avec le climat.....	7
4.2. UNE FORME PARTICULIERE DE PERGELISOL : LES GLACIERS-ROCHEUX	8
4.2.1. Définition des glaciers-rocheux	8
4.2.2. Origine et genèse des glaciers-rocheux	12
4.2.3. Typologie de l'activité des glaciers-rocheux.....	12
4.3. LACS ET THERMOKARSTS : CARACTERISATION	14
5. L'INVENTAIRE DES GLACIERS-ROCHEUX DES HAUTES-ALPES	16
5.1. LES RECENSEMENTS ANTERIEURS ET ACTUELS.....	16
5.2. LES METHODES ET LES OUTILS DE NOTRE RECENSEMENT	16
5.2.1. Les données disponibles	16
5.2.2. La photo-interprétation en stéréoscopie	18
5.2.3. Les vérifications de terrain	19
5.2.4. Les formes évidentes, les formes plus discrètes et les pièges à éviter	20
5.3. QUELQUES BELLES FORMES ET QUELQUES MORPHOLOGIES PLUS COMPLEXES	22
5.4. RENDUS CARTOGRAPHIQUES.....	30
5.4.1. Digitalisation et légende	30
5.4.2. Choix des couches à digitaliser.....	30
5.4.3. Représentation	30
5.4.4. Comparaison de nos résultats et rendus avec d'autres cartographies ou d'autres sources	31
5.5. DONNEES RECUEILLIES, DESCRIPTEURS ET TABLES ATTRIBUTAIRES DES OBJETS SIG.....	35
5.5.1. Organisation générale des données et des tables.....	35
5.5.2. Précisions sur la table des glaciers-rocheux.....	37
5.5.3. Précisions sur la table des fronts	38
5.5.4. Précisions sur la table des lacs.....	39
5.5.5. Précisions sur la table des dépressions.....	40
5.5.6. Précisions sur la table des sources	41
PREMIERES ANALYSES DES DONNEES RECUEILLIES SUR LES GLACIERS-ROCHEUX DES HAUTES-ALPES	54
5.6. L'ECHANTILLON.....	54
5.7. L'ORIENTATION DES GLACIERS-ROCHEUX.....	54
5.7.1. Activité des glaciers-rocheux : influence de l'orientation.....	55
5.8. L'ALTITUDE ET LA DENIVELEE DES GLACIERS-ROCHEUX	57
5.8.1. Altitudes des fronts de glaciers-rocheux : influence de l'orientation ?.....	60
5.9. LA LONGUEUR DES GLACIERS-ROCHEUX	61
5.9.1. Longueur des glaciers-rocheux : influence de l'orientation	62
5.10. CONCLUSIONS	63
5.10.1. Répartition des glaciers-rocheux dans les Hautes-Alpes	63
5.10.2. Influence de l'exposition	63
6. GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES NATURELS ASSOCIES	64
6.1. REFERENCES, EXEMPLES COMMENTES DANS LES ALPES	64
6.1.1. Phénomènes « gravitaires »	65
6.1.2. Phénomènes « fluviatiles »	69
6.1.3. Phénomènes périglaciaires	76

6.2. GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES NATURELS DANS LES HAUTES ALPES : EXEMPLES COMMENTES	79
6.2.1. Lac des Béraudes	79
6.2.2. Lac Blanc	83
6.2.3. Glacier d'Arsine	87
6.2.4. Combe du Lac Rouge	91
6.2.5. Lac Foréant.....	95
6.2.6. Lave torrentielle ou charriage : exemple des Sagnes Froides	99
6.2.7. Le torrent de la Salle.....	103
6.2.8. Vars.....	107
6.3. PREMIERE SYNTHESE DES RESULTATS DE CET INVENTAIRE ET DE LA RELATION GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES	111
7. SYNTHESE / CONCLUSION	113
7.1. METHODES ET LIMITES.....	113
7.2. DONNEES ENREGISTREES ET RESULTATS	114
7.3. GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES ASSOCIES	114
7.4. LES COMPLEMENTS ET LES SUITES A DONNER	116
7.4.1. Analyser plus en détail 22 sites des Hautes-Alpes	116
7.4.2. Compléter l'inventaire existant sur le Queyras.....	117
7.4.3. Diffuser l'information	117
7.4.4. Poursuivre cet inventaire sur d'autres départements.....	117
7.4.5. Pergélisol en parois rocheuses	117
8. LES RESULTATS DE L'INVENTAIRE – ATLAS DES CARTES POUR LE DEPARTEMENT DES HAUTES-ALPES	118
SIGLES	119
BIBLIOGRAPHIE.....	120

2. INTRODUCTION

La fin de XX^{ème} siècle et le début du XXI^{ème} siècle sont marqués par l'augmentation significative des températures. Si cette tendance perdure depuis la fin du Petit Age Glaciaire (milieu du XIX^{ème} siècle), l'accélération observée lors des dernières décades est encore plus marquée. Cette évolution brutale est une source de déstabilisation majeure des systèmes qui régissent les milieux naturels et humains, plus particulièrement en milieu montagneux.

La dégradation des milieux froids est significative de cette mutation, avec la fonte et le recul des glaciers, mais également du pergélisol (c'est-à-dire, la couche de sol constamment gelé pendant au moins deux années consécutives). Cette déstabilisation a été observée à de maintes reprises dans le massif alpin, et peut être à l'origine d'écroulements rocheux, de glissements de terrains ou de laves torrentielles (par dégel de parties englacées qui jouaient le rôle de ciment entre les éléments). La possibilité d'apparition de nouveaux risques induits doit désormais être examinée.

Les glaciers-rocheux sont une des morphologies caractéristiques associées au pergélisol.

Les évolutions et les mouvements des glaciers-rocheux peuvent, dans certaines configurations, être à l'origine de risques induits. C'est pourquoi, le service RTM des Hautes-Alpes a souhaité réaliser un inventaire des glaciers-rocheux du département avec cartographie, typologie et évaluation des risques potentiels.

Un premier travail avait été réalisé en 2010¹. Il a permis, sur des sites tests et des configurations variées, de mettre en place un cadre et une méthode pour de tels inventaires.

La présente étude a permis de généraliser cet inventaire sur tout le département des Hautes-Alpes² et d'en affiner la méthode. Elle fournit une cartographie et une description précises de 625 glaciers-rocheux, avec localisation et description d'éléments associés (lacs, sources, ...) pouvant avoir une influence sur les risques associés aux glaciers-rocheux.

¹ BONNETAIN L. 2010, *Le Pergélisol de montagne : bilan, méthodes dans l'évaluation des risques. Etudes de cas dans la vallée de la Guisane et de la Clarée*

² A l'exception du massif du Queyras, déjà bien couvert par des études et inventaires antérieurs

3. LES OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE

Cette étude est basée sur les connaissances acquises sur le pergélisol et sur les glaciers-rocheux, en particulier ces dernières années (principales références données en bibliographie).

Les définitions et classifications que nous avons retenues et utilisées sont données dans le chapitre « cadre et rappels préalables ».

Elle fait suite plus particulièrement à 2 rapports de stage pour :

A -le service RTM 74 : « 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) » - GARCIA S. 2008, et « Analyse de l'évolution du glacier rocheux du Dérochoir depuis la fin du XIXème siècle, commune des Houches, massif du Mont Blanc » - GARCIA S. 2009

B - le service RTM 05 : « Le Pergélisol de montagne : bilan, méthodes dans l'évaluation des risques. Etudes de cas dans la vallée de la Guisane et de la Clarée » - BONNETAIN L. 2010

Les démarches entreprises par les service RTM sur les glaciers-rocheux ont pour objectifs principaux de mettre en évidence les sites comportant des risques (avérés ou potentiels) et de proposer une ingénierie adaptée pour différents types de situations.

Dans ce contexte, les études A et B ont permis d'affiner la méthodologie de cartographie des glaciers-rocheux et d'analyser quelques cas particuliers.

Les objectifs de la présente étude étaient de constituer, pour le département des Hautes Alpes, les données de référence et les recensements nécessaires, en :

1. finalisant la méthode de cartographie directement opérationnelle (méthode de travail, représentations cartographiques, légende, ...) et pouvant être mise en œuvre sur tout un département, dans des délais raisonnables
2. cartographiant tous les glaciers-rocheux du département des Hautes Alpes (à l'exception du Massif du Queyras, déjà cartographié par Thomas Echelard)
3. établissant une grille d'analyse permettant d'apprécier et de caractériser les risques potentiels associés aux glaciers-rocheux
4. décrivant chaque glacier-rocheux localisé
5. analysant les risques associés prévisibles
6. mettant en évidence, pour tout le département, les sites présentant des risques, avérés ou potentiels.

Ces éléments fondamentaux permettront de finaliser les démarches entreprises, conjointement avec d'autres partenaires (IRSTEA, IGA en particulier), et :

- d'expertiser les sites recensés comme présentant des risques avérés ou potentiels
- dans chaque cas, de préciser les scénarios et les hypothèses pouvant conduire à une situation à risques
- de proposer une ingénierie adaptée (interventions, suivis, surveillances, ...) face à chaque type de situation

4. CADRE ET RAPPELS PREALABLES

4.1. LE PERGELISOL

4.1.1. Définition et classifications

La commission géologique du Canada définit le pergélisol ou permafrost (en anglais) ou merzlota (en russe) comme étant "un sol ou de la roche dont la température est inférieure à 0°C durant toute l'année". Muller¹, en 1947, ajoute un facteur temps à cette définition : « la température ne doit jamais être positive pendant au moins deux années consécutives ».

Le pergélisol ne peut se trouver qu'à de hautes latitudes et/ou hautes altitudes (pergélisol de montagne). Il ne résiste en plaine qu'entre les latitudes 57° et 70° Nord (selon l'influence plus ou moins forte de l'inertie thermique des océans). En Europe occidentale ou méridionale, on ne peut le trouver que dans les massifs montagneux (et tout particulièrement dans les Alpes), là où l'isotherme moyen annuel est inférieur à -2°C.

Il existe plusieurs classifications du pergélisol.

Delaloye prend en compte les températures moyennes annuelles du permafrost ou MAPT (Mean Annual Permafrost Temperature) et distingue :

- le pergélisol froid quand sa température moyenne annuelle est très inférieure à 0°C (<0,5°C) et qu'aucune valeur instantanée n'est égale à 0°C.
- le pergélisol tempéré correspond au pergélisol au point de fusion (température voisine de 0°C)
- le pergélisol semi tempéré, intermédiaire entre les deux précédents.

Harris (1988) prend en compte la température de l'air (MAAT = Mean Annual Air Temperature) et distingue :

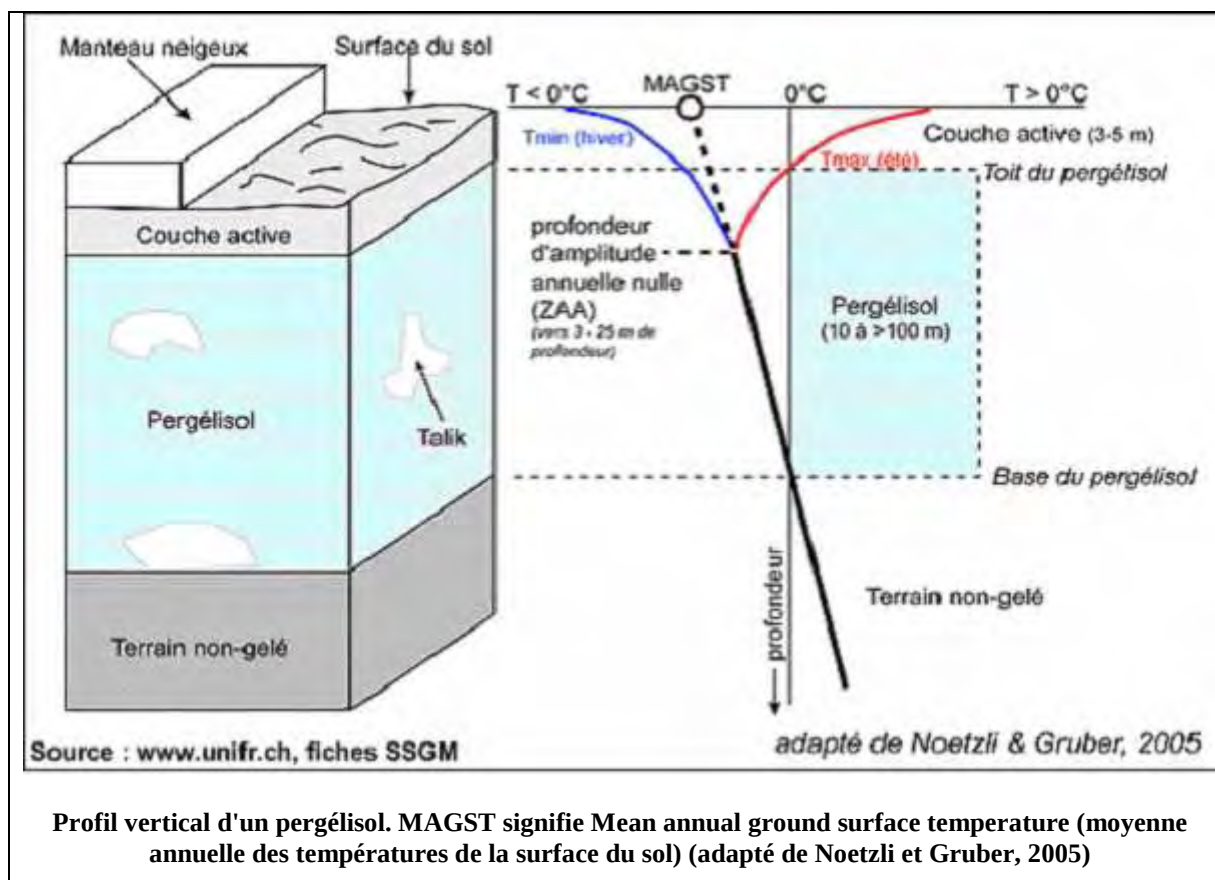
- le pergélisol continu : le pergélisol est présent sur au moins 80 % de la surface (et MAAT compris entre - 6° et - 8°)
- le pergélisol discontinu : le pergélisol est présent sur 30 à 80 % de la surface (et MAAT de -2°)
- le pergélisol sporadique : le pergélisol est présent sur moins de 30 % de la surface (et MAAT > -2°)

Lambiel (2006) prend en compte les échanges thermiques advectifs et distingue le pergélisol typique du pergélisol atypique (on peut trouver du pergélisol à des altitudes très basses, comme par exemple, dans les éboulis froids de la Plagne en Chartreuse -Isère-, à 1300 mètres d'altitude).

¹ Source BODIN X. 2007, *Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente : l'exemple du massif du Combeynot (Hautes-Alpes)*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France. Page 23.

4.1.2. Structure

Le schéma suivant illustre la stratigraphie générale du pergélisol.



Profil vertical d'un pergélisol. MAGST signifie Mean annual ground surface temperature (moyenne annuelle des températures de la surface du sol) (adapté de Noetzli et Gruber, 2005)

Le pergélisol, à proprement parler, est la couche gelée du sol. Cette couche peut aussi contenir des taliks : zones non gelées à l'intérieur du pergélisol.

Sous le pergélisol, la couche non gelée peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

Au dessus du pergélisol, la couche active (ou mollisol) est la partie qui dégèle partiellement en saison chaude et regèle en saison froide. Son épaisseur, qui peut atteindre 5 mètres dans les Alpes, varie en fonction des années et du régime météorologique. C'est une couche instable qui peut connaître des mouvements minimes de fluages ou des mouvements de plus grandes ampleurs.

La surface du sol a aussi une grande importance sur les évolutions du pergélisol. Elle influe sur les échanges thermiques et radiatifs entre le sol et l'atmosphère, et peut les faire varier notablement, selon qu'elle est recouverte, ou pas, d'une couche isolante (neige, matériaux, ...).

4.1.3. Dégradations en lien avec le climat

Pour le maintien du pergélisol, une couche isolante peut tantôt être bénéfique, tantôt avoir un rôle négatif. Cela dépend de la période à laquelle cette couche est à son niveau maximum. Une épaisse couche de neige très tôt en hiver limitera le refroidissement de la couche active et du pergélisol. A l'inverse, si cette couche demeure longtemps au printemps et début d'été, cela empêchera l'onde de chaleur de se propager au sein du pergélisol.

Il est acquis que la hausse des températures observées depuis le milieu du XIX^{ème} siècle (fin du Petit Age Glaciaire), contribue à la dégradation de plus en plus importante du pergélisol et à l'accroissement de l'épaisseur de la couche active. C'est encore plus vrai dans les Alpes où des études montrent que le réchauffement climatique, depuis 1850, y a été plus important que la moyenne mondiale (près du double) : $+0,9^{\circ}$ à $+1,5^{\circ}\text{C}$ dans les Alpes contre $+0,7^{\circ}$ à $+0,8^{\circ}\text{C}$ en moyenne mondiale

(Schoeneich et De Jong, 2008, reprenant les différents travaux de Béniston de 2005, de Casty et al. de 2005, d'Alcamo et al. de 2007 et l'IPCC de 2007).

Les conséquences de ces évolutions sur les morphologies et les risques associés peuvent être importantes.

4.2. UNE FORME PARTICULIERE DE PERGELISOL : LES GLACIERS-ROCHEUX

4.2.1. Définition des glaciers-rocheux

Dans ce chapitre, nous reprenons les définitions et commentaires de Monnier – 2004.

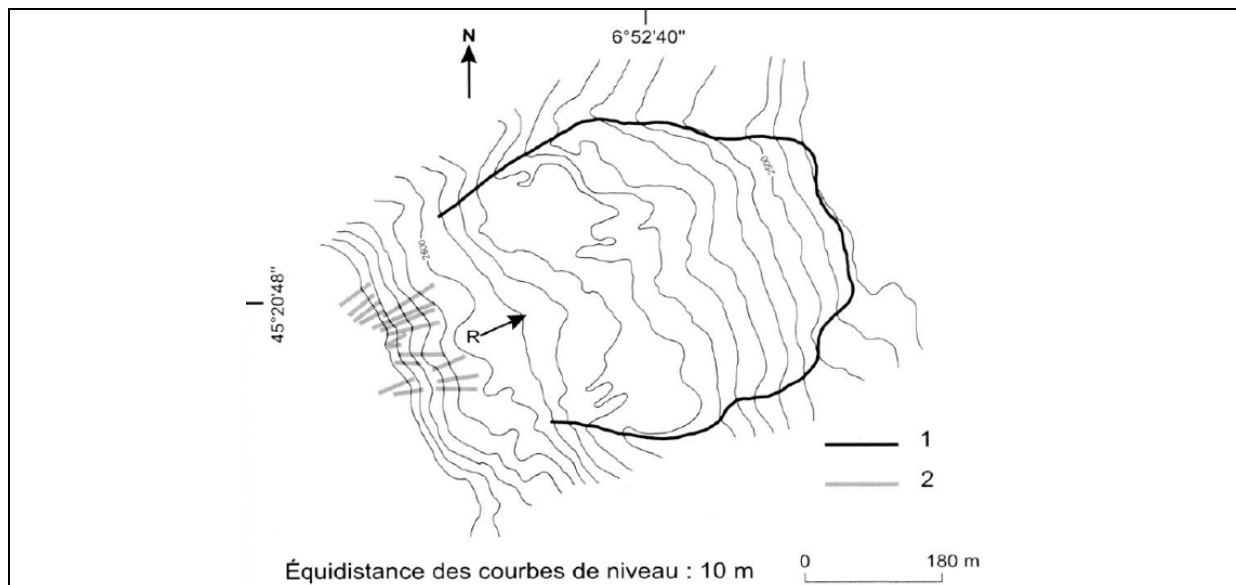
« Les glaciers-rocheux sont des accumulations de débris rocheux, achevées à l'aval par un front raide, présentant une forme de langue, ou de lobe, voire de spatule. Ils ont été repérés, il y a environ un siècle (Capps, 1910), pour le modelé particulier de leur surface, fait de multiples bourrelets longitudinaux ou transversaux.

Depuis, et plus précisément au cours des quarante dernières années, les débats se sont concentrés sur la structure interne et sur la dynamique des glaciers-rocheux. Il existe ainsi théoriquement : des glaciers-rocheux "actifs", qui contiennent une glace profonde, généralement invisible depuis la surface, et qui se déplacent vers l'aval ; des glaciers-rocheux "inactifs" qui contiennent encore de la glace, mais ont cessé de se déplacer ; et des glaciers-rocheux "fossiles", inactifs dont toute la glace a fondu (Barsch, 1987 et 1996). »

Pour identifier un glacier-rocheux, « trois axes récurrents apparaissent : la géométrie d'ensemble de la forme, les caractéristiques à ses marges, le modelé de sa surface. Nos critères se rapportent essentiellement aux limites spatiales de la forme et au modelé de sa surface.

Limites spatiales du glacier-rocheux

Un glacier-rocheux, ensemble volumineux de débris rocheux reposant sur la roche en place ou sur une autre formation superficielle, est spatialement bien délimité, par un front et des pentes latérales raides et au moins plurimétriques. À l'amont, sa limite (la racine) est beaucoup plus arbitraire (fig. 2). Dans certains contextes particuliers, les rebords latéraux peuvent être localement atténués, par exemple lorsque le glacier-rocheux rencontre un obstacle du bedrock, voire effacés, à la suite d'un comblement par des éboulis (Barsch, 1996). En revanche, la présence d'un talus frontal net, formant dans le cas de formes actives ou inactives un angle vif avec la surface supérieure du glacier-rocheux (Wahrhaftig et Cox, 1959), laissant apparaître la texture intérieure dans le cas des formes non végétalisées (Barsch, 1977 et 1996), est un critère indispensable. »



Repérage de l'altitude de la racine d'un glacier-rocheux d'après les variations géométriques des courbes de niveau. Glacier-rocheux Lanserlia I (massif de la Vanoise). D'après la "Carte géomorphologique de Lanserlia", 1/6000, de B. Kaiser (1975).

1 : limites latérales et frontales du glacier-rocheux ;

2 : cônes d'éboulis à forte pente ;

R : situation hypsométrique de la racine du glacier-rocheux. Pour déterminer l'altitude de la racine, on peut dans certains cas s'appuyer sur l'apparition des formes "fluidales" comme les bourrelets longitudinaux, mais ces derniers sont inégalement développés. Dans de nombreux cas, on constate cependant sur des cartes topographiques à grande échelle, en plus d'une diminution de la pente, une nette accentuation de la convexité vers l'aval des courbes de niveau, voire une variation de cette convexité, dirigée vers l'amont sur les talus d'éboulis, et vers l'aval sur le glacier-rocheux

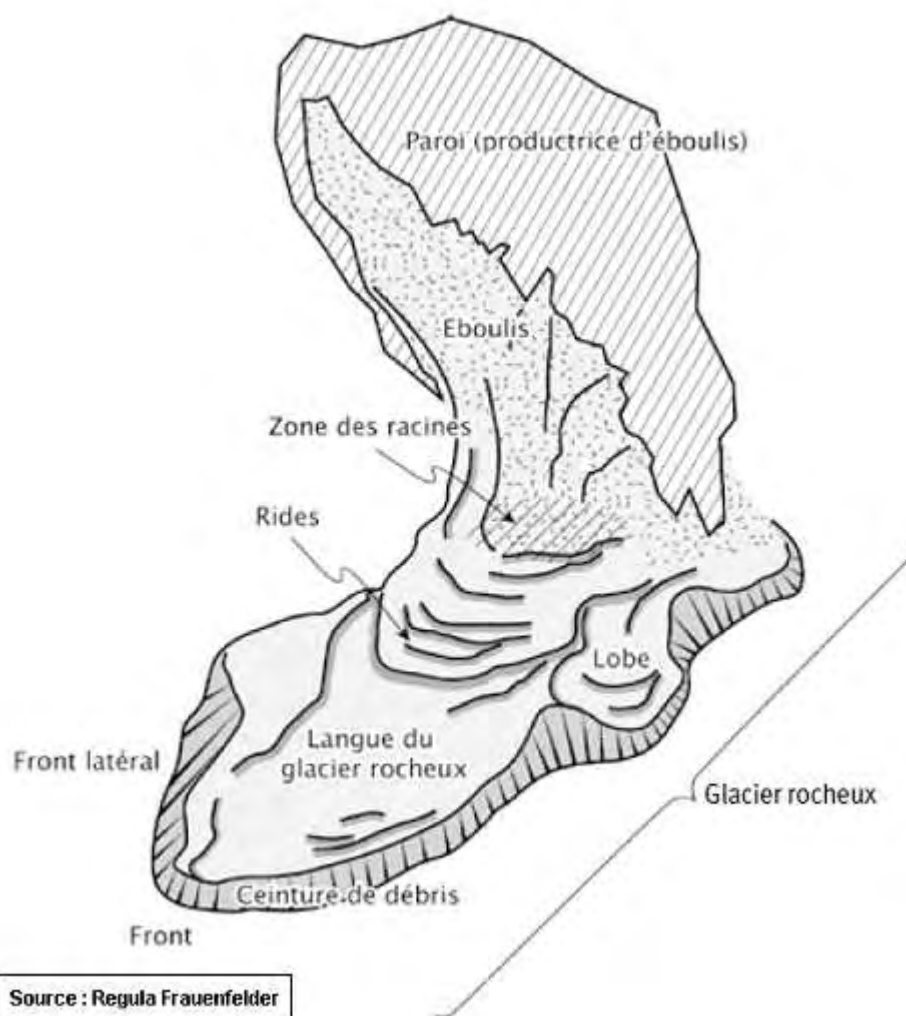
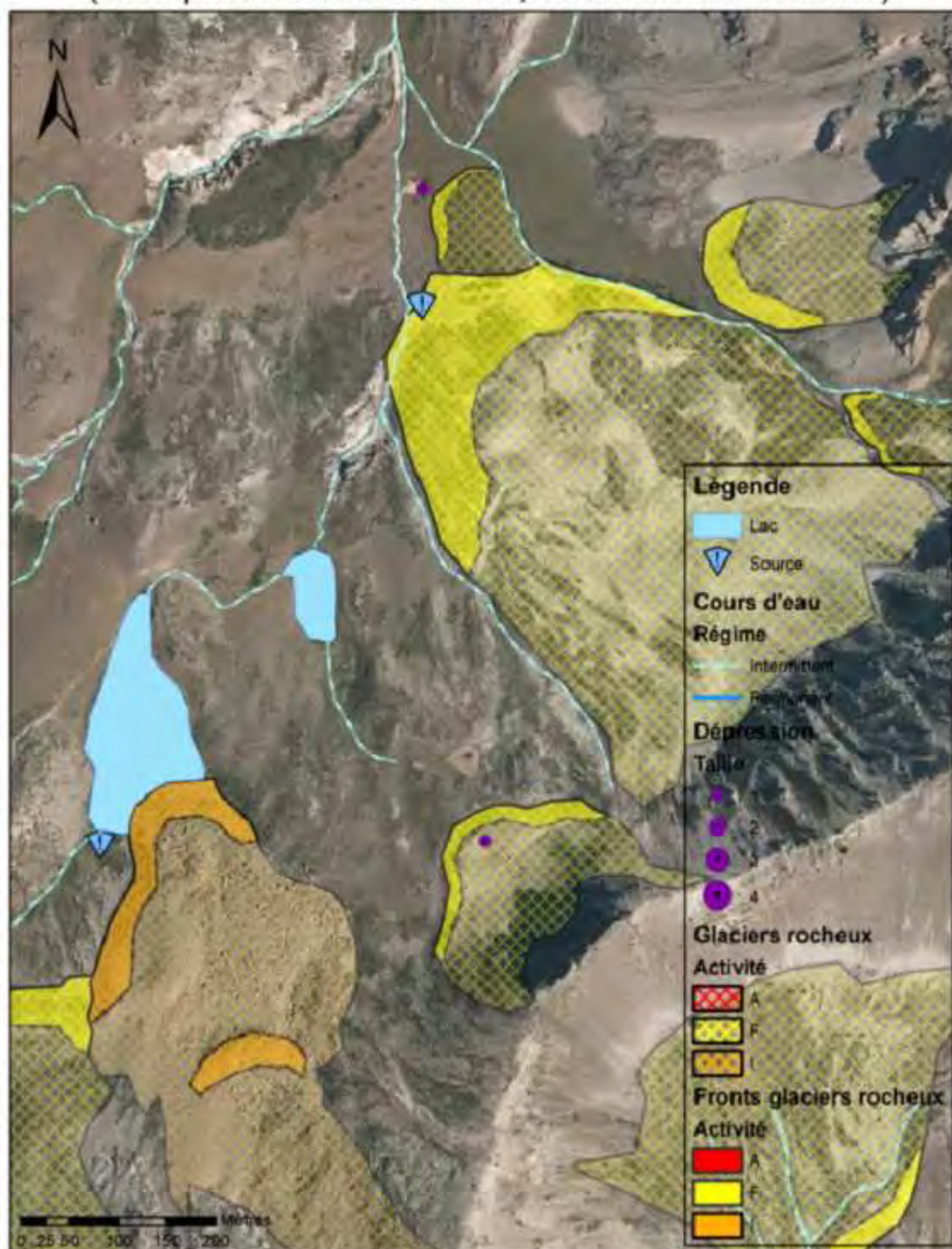


Schéma de l'anatomie d'un glacier-rocheux

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple du vallon de l'Oule, commune de Névache)



Source : RIGUIDELA. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

Exemple de la cartographie des glaciers-rocheux avec représentations des glaciers-rocheux et leurs fronts, des lacs, des dépressions, des cours d'eau et sources.

4.2.2. Origine et genèse des glaciers-rocheux

Pour recenser et cartographier les glaciers-rocheux, il est utile de connaître les mécanismes de formation et d'évolution des glaciers rocheux. Mais, sur ce sujet, il n'y a pas de consensus des différents auteurs. Nous reprenons ci-dessous la synthèse du débat, réalisée par Monnier.

« Très vite, à la suite des publications de C Wahrhaftig et A. Cox (1959), S. Outcalt et J.B. Benedict (1965) et N. Potter Jr. (1972), le grand problème devient l'origine de la glace interne, problème autour duquel s'affrontent deux écoles antagonistes, et généralement sourdes l'une envers l'autre, comme le montrent les controverses engagées autour du Galena Creek Rock Glacier, dans le Wyoming (Potter, 1972 ; Barsch, 1987 ; Potter et al, 1998) ou autour de glaciers-rocheux de la Sierra Nevada de Californie (Clark et al, 1994a et b ; Jakob, 1994). Premièrement, on trouve une école périglaciaire, la plus restrictive des deux, selon laquelle le noyau d'un glacier-rocheux correspond à un mélange de glace de pergélisol et de débris rocheux (ice-rock mixture), la glace pouvant apparaître sous forme interstitielle, sous forme de lentilles plus ou moins développées, ou sous forme de veines (Barsch, 1987, 1988 et 1992 ; Haeberli et al, 1988 ; Haeberli et Vonder Muhll, 1996). Dans cette optique, le glacier-rocheux est strictement un phénomène périglaciaire, et se définit précisément par le processus de permafrost creep (Barsch, 1992). Deuxièmement, on trouve une école au départ assez strictement glaciaire, aujourd'hui assouplie, qui reconnaît à la fois l'existence de glaciers-rocheux périglaciaires et de glaciers-rocheux glaciaires, et défendant donc l'existence de glaciers-rocheux structurés sur un noyau de glace d'origine glaciaire (Lliboutry, 1965 ; Potter, 1972 ; Whalley, 1974 ; Whalley et Martin, 1992 ; Clark et al, 1998 ; Potter et al, 1998), éventuellement en continuité avec la glace d'un vrai glacier à l'amont (modèle du glacier ice-cored rock glacier de P.G. Johnson, 1980). La terminologie employée varie sensiblement selon les auteurs : par exemple, D.I. Benn et D.J.A. Evans (1998) distinguent simplement des glaciers-rocheux périglaciaires (periglacial rock glaciers) et des glaciers-rocheux glaciaires (glacial rock glaciers), tandis qu'O. Humlun (2000) distingue des glaciers-rocheux dérivés de talus d'éboulis (talus-derived rock glaciers) correspondant au type périglaciaire et des glaciers-rocheux dérivés de glaciers (glacier-derived rock glaciers) correspondant au type glaciaire.

La multitude des débats ainsi engagés a d'abord eu pour effet de créer un engouement aux possibles effets pernicioeux, conduisant à "trouver des glaciers rocheux partout, alors qu'il y a moins de cinquante ans, on n'en trouvait nulle part" (Francou, 1993, p. 179). Ensuite, de nombreuses études semblent avoir été davantage motivées par le souci de restreindre les glaciers-rocheux à l'expression de tel ou tel processus plutôt que de les définir comme des expressions morphologiques propres. Afin de garantir une validation initiale de notre objet d'étude, afin de pas pénétrer d'emblée dans un débat génétique, option jugée prématurée, et de dégager la dimension sinon esthétique du moins patrimoniale des glaciers-rocheux, il nous semble souhaitable d'entrer dans le sujet par l'identification morphologique, à l'instar des propositions de plusieurs auteurs (Kaiser, 1975 ; Martin et Whalley, 1987 ; Hamilton et Whalley, 1995). »

Pour notre part, au cours de nos inventaires sur le département des Hautes-Alpes, nous avons constaté qu'une très grande majorité des glaciers-rocheux que nous avons cartographiés, se trouve :

- au pied de parois ou d'affleurements rocheux libérant souvent des blocs et des pierres
- et, au pied de couloirs à l'évidence souvent parcourus par des avalanches, avec des quantités de neige importantes.

Dans ces configurations, il nous semble probable que la glace contenue dans ces glaciers-rocheux puisse provenir de l'enfouissement d'une partie des culots d'avalanche (dans l'hypothèse où, pendant la 1^{ère} saison chaude qui suit l'avalanche, le culot serait recouvert par des éboulements et que sa fonte serait incomplète). Cette information ou hypothèse nous a aidé dans le travail de recensement (recherches encore plus attentives des morphologies de glaciers-rocheux dans toutes les configurations qui nous semblaient propices, notamment par l'altitude, par l'exposition et par la présence de couloirs d'avalanche).

4.2.3. Typologie de l'activité des glaciers-rocheux

Nous reprenons ici la typologie établie par Scappoza (2008 ; reprenant en partie le modèle établi par Barsch et Haeberli).

Un glacier-rocheux est actif si :

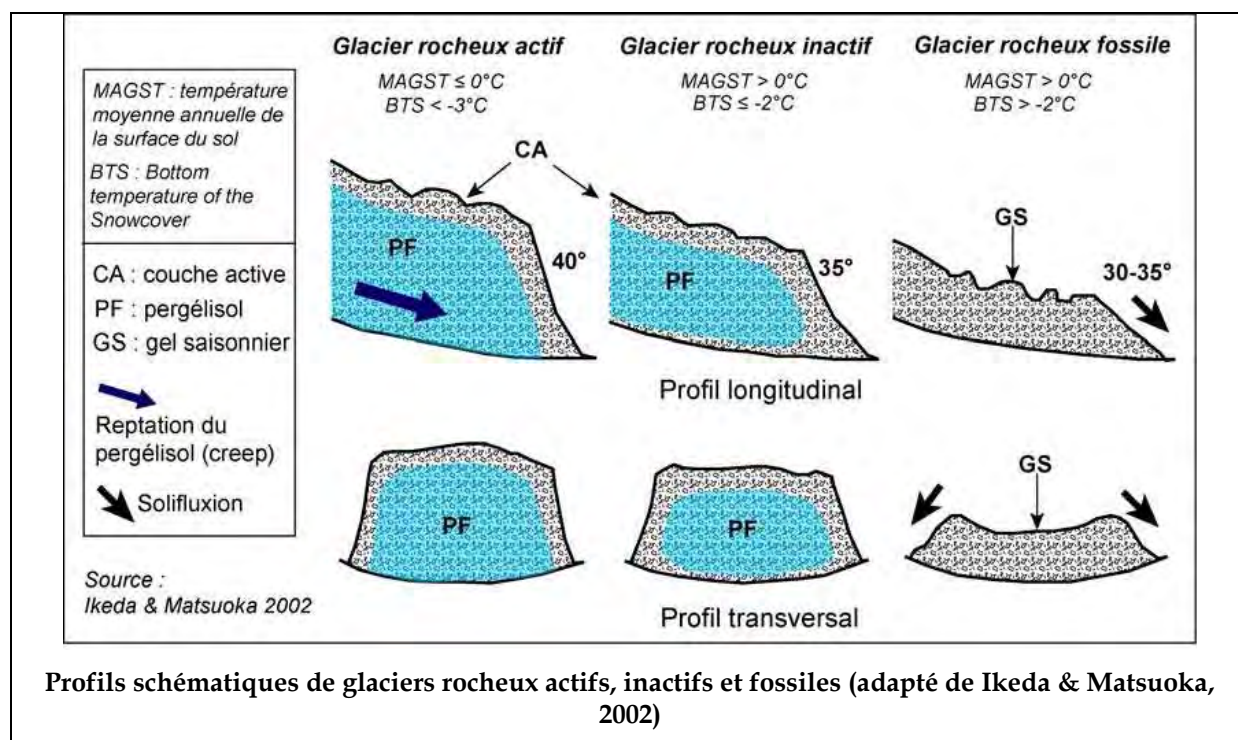
- le talus frontal est raide, sa pente entre 40 et 45°
- le relief est bombé, avec la présence de rides transversales et de sillons longitudinaux
- peu ou pas de lichens
- le front du glacier-rocheux est composé de matériaux fins
- la température de l'eau de la source est inférieure à 2°C

Un glacier-rocheux est inactif si :

- la pente du talus 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 $< 35^\circ$
- 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)



4.2.3.1. Observations complémentaires

Au cours de notre recensement, nous avons pu constater des différences morphologiques majeures parmi les glaciers-rocheux recensés et qui facilitaient leur classement en fonction de leur activité. Ces différences sont faciles à observer en photo-interprétation.

La végétation

Certains des glaciers-rocheux sont non seulement recouverts de végétation ou de lande, mais même parfois, d'une véritable forêt. Nous les avons alors évidemment qualifiés de « fossiles ».

Le bombement ou le creusement du corps central

Le corps central de certains glaciers est bien bombé (le centre du glacier est plus haut que ses bords), y compris jusqu'à proximité du front aval. La majorité des glaciers-rocheux dans ce cas ont pu être rattachés aux glaciers actifs.

Dans d'autres cas, le front aval et les limites latérales restent très nets (avec des talus bien constitués et raides). Mais, le corps central du glacier-rocheux s'est visiblement affaissé dans son ensemble et le centre du glacier peut être moins haut que les sommets des talus périphériques. L'ensemble des talus périphériques semble former un « rempart », avec un corps principal du glacier-rocheux qui s'est « vidé » (à l'évidence, par fonte d'une partie importante de la glace qu'il contenait).

Il faut faire attention de ne pas confondre ces morphologies avec des moraines frontales et latérales d'anciens glaciers « blancs ». S'il s'agit d'un glacier-rocheux même très affaissé, on doit encore nettement distinguer, sur le corps central, des bourrelets et des sillons qui attestent que le corps central a connu des déplacements ou des fluages en masse. On trouve aussi une très forte proportion de gros blocs que l'on ne trouve pas sous un ancien glacier « blanc ».

Lorsque le corps central est très affaissé, le glacier-rocheux est très souvent inactif ou fossile.

4.2.3.2. Précision du classement de l'activité des glaciers-rocheux

Il est évidemment illusoire de prétendre classer tous les glaciers-rocheux entre ces 3 catégories d'activité, sans aucune ambiguïté. La qualification que nous avons retenue est très certainement critiquable pour plusieurs d'entre eux.

Néanmoins, nous avons eu le sentiment de ne jamais trop hésiter sur la qualification de l'activité, même avec le seul travail en photo-interprétation (et sous réserve, en début de recensement, d'avoir réalisé suffisamment de contrôles terrain pour valider, par des mesures directes, ce que l'on peut déceler sur photo).

4.2.3.3. Le problème de la délimitation de la racine du glacier-rocheux

La limite amont des glaciers-rocheux (la racine) est la limite entre le pied de l'éboulis et le début du glacier-rocheux à proprement parler. Cette limite reste souvent délicate à préciser sur toute la largeur de la racine.

Pour une meilleure lisibilité des cartes, nous avons préféré intégrer l'ensemble de l'éboulis dans le périmètre cartographié du glacier-rocheux.

Par contre, pour conserver des mesures cohérentes avec celles de la majorité des auteurs, nous avons bien estimé un point moyen correspondant à la limite entre le pied de l'éboulis et le début du glacier-rocheux. L'altitude de ce point moyen donne l'altitude maximale du glacier-rocheux. Et la distance entre ce point et la limite aval du glacier-rocheux donne la longueur du glacier-rocheux.

4.3. LACS ET THERMOKARSTS : CARACTERISATION

Nous reprenons ici la typologie établie par Ravanel (2009) qui distingue trois types de lacs selon leur localisation :

- le lac pro-glaciaire, en aval immédiat du front du glacier
- le lac juxta-glaciaire, au bord d'un glacier

- le lac supra-glaciaire, à la surface d'un glacier. Le lac supra-glaciaire est aussi appelé thermokarst. Sa formation est la conséquence de la fonte de la glace dans le sol, les affaissements qui en résultent pouvant se remplir d'eau (voir image ci-dessous).



Le lac de Privé d'origine thermokarstique

5. L'INVENTAIRE DES GLACIERS-ROCHEUX DES HAUTES-ALPES

5.1. LES RECENSEMENTS ANTERIEURS ET ACTUELS

Des recensements plus ou moins exhaustifs ont été réalisés ou sont en cours sur les Alpes.

Evin¹ dans sa thèse de 1987 mentionne la localisation, le nom, l'altitude, l'orientation et la lithologie de des glaciers-rocheux (exemple : zone briançonnaise).

Thomas Echelard (Université de Grenoble) s'est inspiré des inventaires de Monnier (2006) et Bucker (2007) pour effectuer l'inventaire des glaciers-rocheux du Parc régional du Queyras.

Romain Perrier (Université Paris-Diderot) et Etienne Cossart (Université Paris 1 Panthéon Sorbonne) effectuent des mesures (télémètre laser, GPS) sur les glaciers-rocheux de la vallée de la Clarée.

En Suisse, un projet « d'inventaire, avec intégration des dangers naturels » serait en cours (d'après une discussion par courrier électronique avec M. Delaloye, professeur de géomorphologie alpine et de géographie physique à l'université de Fribourg).

5.2. LES METHODES ET LES OUTILS DE NOTRE RECENSEMENT

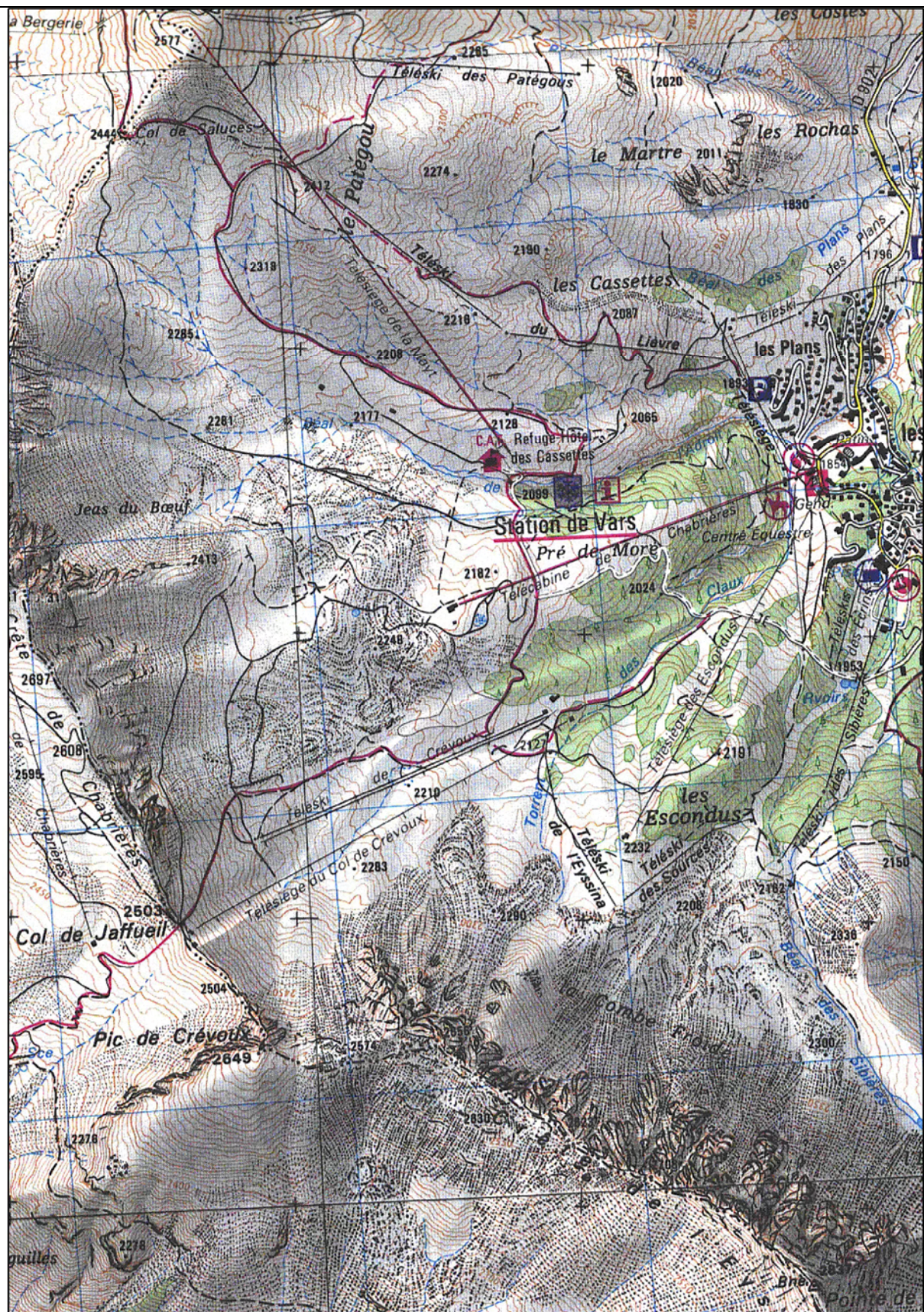
5.2.1. Les données disponibles

5.2.1.1. Cartes IGN et orthophotographies

Les cartes de l'Institut Géographique National (IGN) sont évidemment un outil indispensable pour ce travail (fond de plan, repérage, relief et altitude, ...).

Les orthophotographies constituent aussi un outil précieux. Même si le relief n'est pas directement perceptible, elles permettent quand même de visualiser les formes principales (dont les glaciers-rocheux, les dépressions, ...). En complément des photographies aériennes stéréoscopiques, elles constituent souvent un très bon fond de plan pour les repérages et rendus.

¹ Source : EVIN M. 1987, *Dynamique, répartition et âge des glaciers-rocheux des Alpes du Sud*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France. Vol 4, page 1132 à 1137

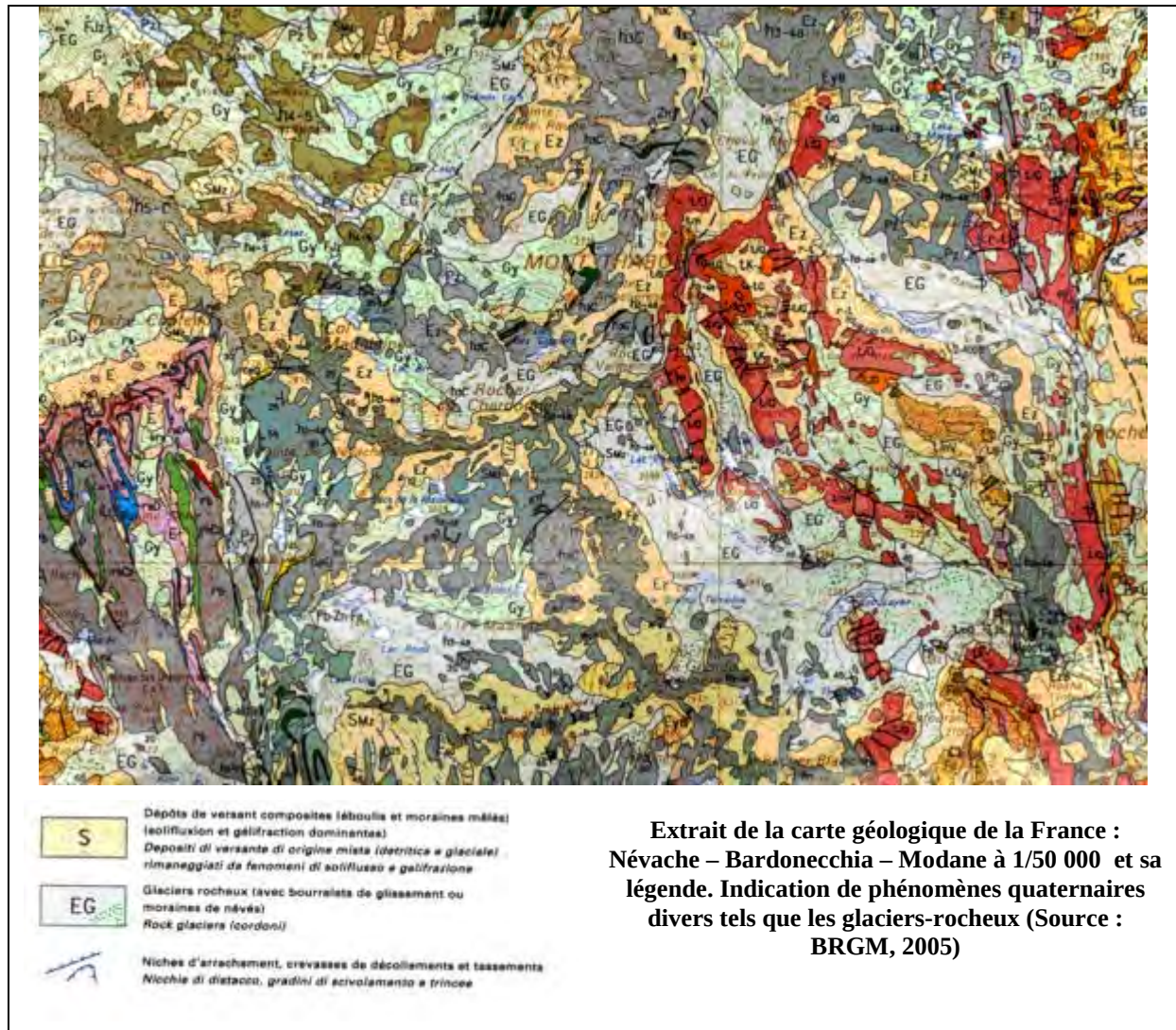


Extrait de la carte IGN au niveau de la station de ski de Vars.

5.2.1.2. Cartes géologiques

Les nouvelles versions des cartes géologiques décrivent et localisent différents phénomènes quaternaires, dont les glaciers-rocheux (lettres « EG » sur un fond vert).

Même si les délimitations de la carte géologique ne sont pas toujours assez précises, c'est une information préalable particulièrement utile.



5.2.2. La photo-interprétation en stéréoscopie

Pour ce type de recensements, l'intérêt fondamental de la photo-interprétation en stéréoscopie a déjà été mis en évidence par Loïc Bonnetain au cours d'un stage précédent au RTM des Hautes-Alpes (en 2010).

L'examen en stéréoscopie des photos aériennes permet au géomorphologue de percevoir le relief et d'alterner, autant que nécessaire, les visions d'ensemble et les zooms sur des points particuliers.

Par photo-interprétation en stéréoscopie, le géomorphologue peut d'abord déceler soit des formes caractéristiques des glaciers-rocheux, soit des sites propices. Il peut ensuite mieux chercher les autres formes susceptibles de confirmer l'existence d'un glacier-rocheux. Si le glacier-rocheux existe, il pourra le délimiter complètement, souvent du plus évident (le front) au plus discret (la racine).

Il est évident que les contrôles terrain restent indispensables. Mais, dans ces zones escarpées, ils sont souvent longs et difficiles. La photo-interprétation permet de gagner énormément de temps. Il

apparaît même impossible de réaliser des recensements suffisamment exhaustifs sans une importante phase de photo-interprétation en stéréoscopie.

Il faut aussi faire attention aux biais ou difficultés usuelles de la photo-interprétation en stéréoscopie. En particulier, nous attirons l'attention sur les points ci-dessous.

Avec la majorité des photos aériennes et des stéréoscopes, la perception du relief est exagérée ; il faut que le géomorphologue y soit habitué.

Il faut disposer de photos propices à l'examen de ces zones de haute montagne (lors de certaines prises de vue, l'enneigement au sol peut rendre impossible l'utilisation des photos).

5.2.3. Les vérifications de terrain

La seule analyse des photographies aériennes n'est pas suffisante pour avoir des données quantitatives ou qualitatives suffisamment précises. Des compléments et validations terrain restent nécessaires.

Des contrôles terrain ont été réalisés, rapidement après les premières journées de travail sur photos aériennes. Il s'agissait alors de valider ou d'améliorer le travail de photo-interprétation. Ces premières vérifications ont permis de confirmer que, avec un minimum d'expérience, la photo-interprétation est rapidement très efficace et très précise, au moins pour le repérage et la cartographie de toutes les formes. Par contre, la qualification de l'activité du glacier (actif, inactif ou fossile) avec les seules photos, est plus délicate. Surtout entre glaciers actifs et inactifs : des formes bien nettes et bien visibles sur les photos, avec très peu de végétation, incitent souvent à classer le glacier en actif alors que les contrôles terrain montrent que, sur une proportion significative, le classement en inactif est plus approprié.

Les contrôles terrain ont aussi permis de prendre des mesures ou de faire des observations directes :

- mesure de la pente du front
- mesure de la température de la source (si existante)
- relevés GPS de confirmation des points caractéristiques
- relevé de l'altitude du front
- appréciation de la stabilité du front
- vérification de la présence et de la densité de végétation au front et sur le corps du glacier-rocheux
- appréciation de la taille des matériaux au front
- photographies du front et de la surface du glacier-rocheux

La date des contrôles terrain peut jouer sur leur qualité. En juin et juillet, la couverture neigeuse encore présente peut gêner les observations. A partir de la fin août, la lumière plus rasante est plus propice à l'observation de formes discrètes.

Mais, avec 625 glaciers-rocheux recensés lors de cette étude, il est bien évident qu'il n'a pas été possible de faire partout des contrôles terrain. Ces contrôles ont dû être limités aux glaciers les plus importants, aux risques prévisibles les plus significatifs ou aux situations les plus complexes.

La réalisation ou non d'un contrôle terrain est mentionnée pour chaque glacier-rocheux cartographié (cf. table attributaire dans le SIG).

5.2.4. Les formes évidentes, les formes plus discrètes et les pièges à éviter

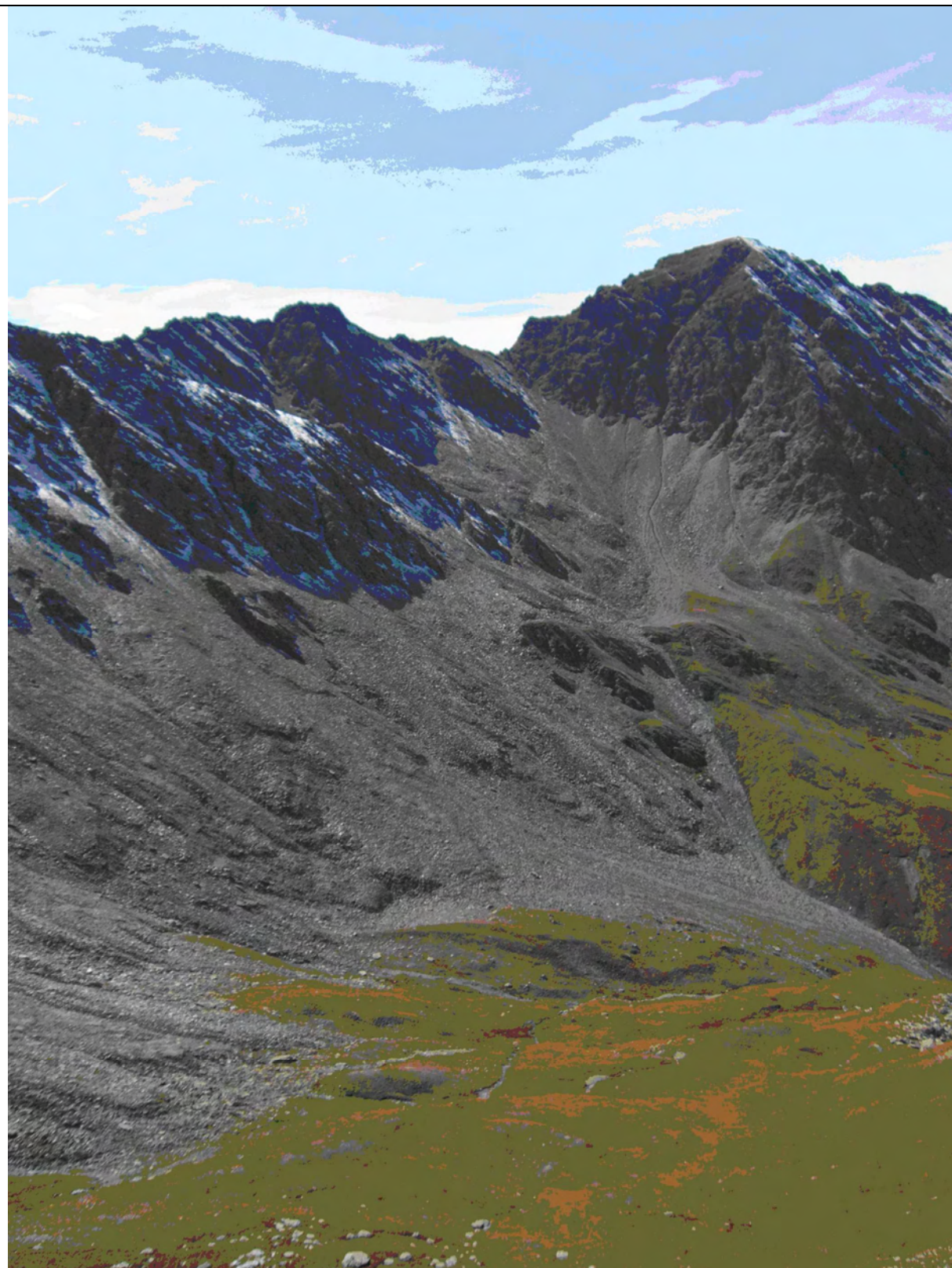
La physionomie type des glaciers-rocheux a été décrite dans les parties précédentes. Evidemment, il existe une multitude de morphologies différentes.

Les formes les plus évidentes sont les gros glaciers-rocheux avec de gros blocs : formes massives, volumes importants, fronts nets, bourrelets et sillons se détachant nettement, ...

Il existe aussi des formes plus discrètes.

D'abord des glaciers-rocheux plus petits.

Mais aussi des glaciers-rocheux constitués de matériaux fins sans gros blocs. Même s'ils sont assez volumineux, leurs formes peuvent être plus douces et plus difficiles à repérer (aussi bien en photo-interprétation que sur le terrain). Cf. la photographie ci-dessous, sur laquelle on distingue les fluages dans des formations de schistes ; les bourrelets, fronts et le bombement du glacier-rocheux sont repérables, les fronts du glacier-rocheux atteignent 2 mètres de hauteur au maximum.



Glaciers-rocheux composés de matériaux fins dans le vallon de Ségure, commune de Ristolas (source : A. RIGUIDEL)

Il existe aussi des formes proches que la majorité des auteurs ne considèrent pas comme des glaciers-rocheux et/ou que nous avons décidé de ne pas cartographier dans le cadre de cette étude :

- certains fluages dans les éboulis : ils indiquent généralement la présence de pergélisol, mais leur volume et le bombement du corps principal sont bien plus modestes que pour les glaciers-rocheux
- les bourrelets qui se forment à l'aval des éboulis (on parle aussi de protalus rempart, terme à utiliser avec précaution parce qu'il peut y avoir confusion avec d'autres processus) et bien que ces bourrelets puissent être considérés par certains comme une forme préalable au glacier-rocheux
- les moraines de poussée mais qui ont une genèse différente
- les bourrelets de névé (s'ils ressemblent à de petits glaciers-rocheux, leur morphologie est quand même plus proche de celle de glaciers couverts).

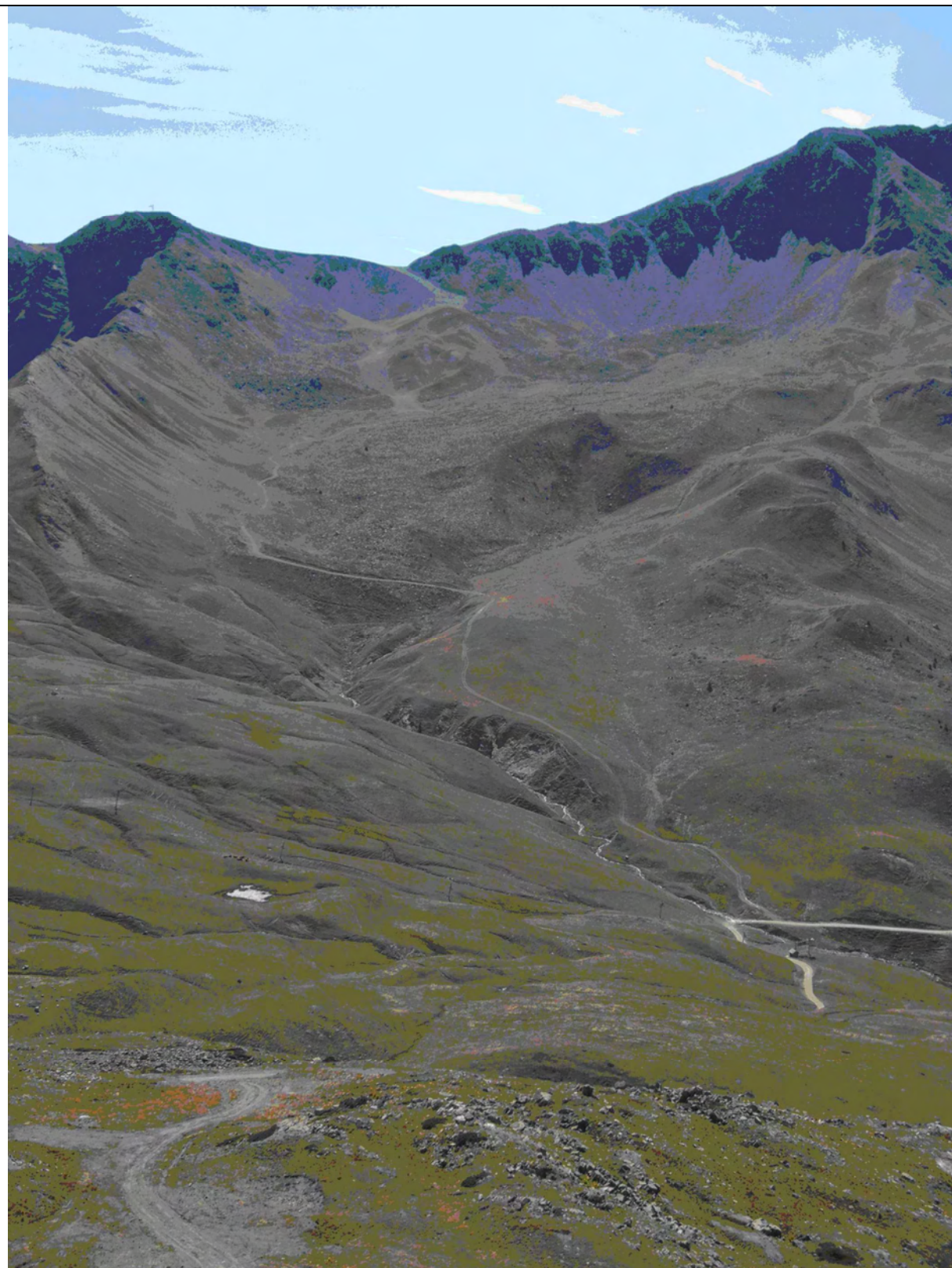
5.3. QUELQUES BELLES FORMES ET QUELQUES MORPHOLOGIES PLUS COMPLEXES

Cette partie présente des photographies de glaciers-rocheux particulièrement illustratives du travail effectué. Le choix s'est porté sur :

- de belles formes, pour faciliter la compréhension de la morphologie des glaciers-rocheux
- des particularités, comme l'incision de glaciers-rocheux par des torrents, des glaciers-rocheux sur du gypse avec des effondrements, des interactions avec les lacs ou les cours d'eau, ...



Glacier-rocheux du Pasquier, vallon de l'Oule, commune de Névache (source : A. RIGUIDEL)



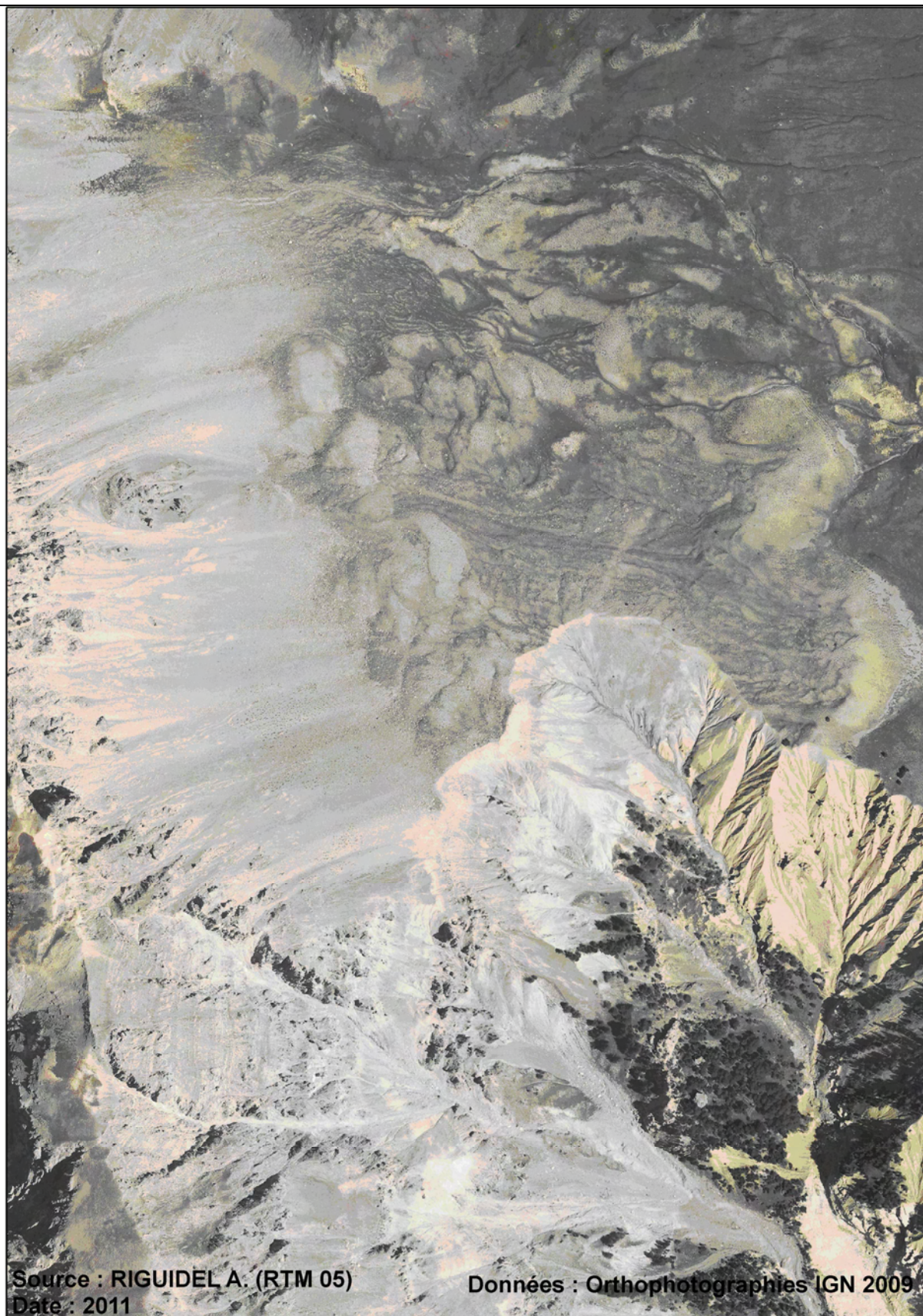
Glacier-rocheux de Pra Rond, commune de Saint André d'Embrun (source : A. RIGUIDEL)



Glacier-rocheux de l'Oule, commune de Névache (source : A. RIGUIDEL)



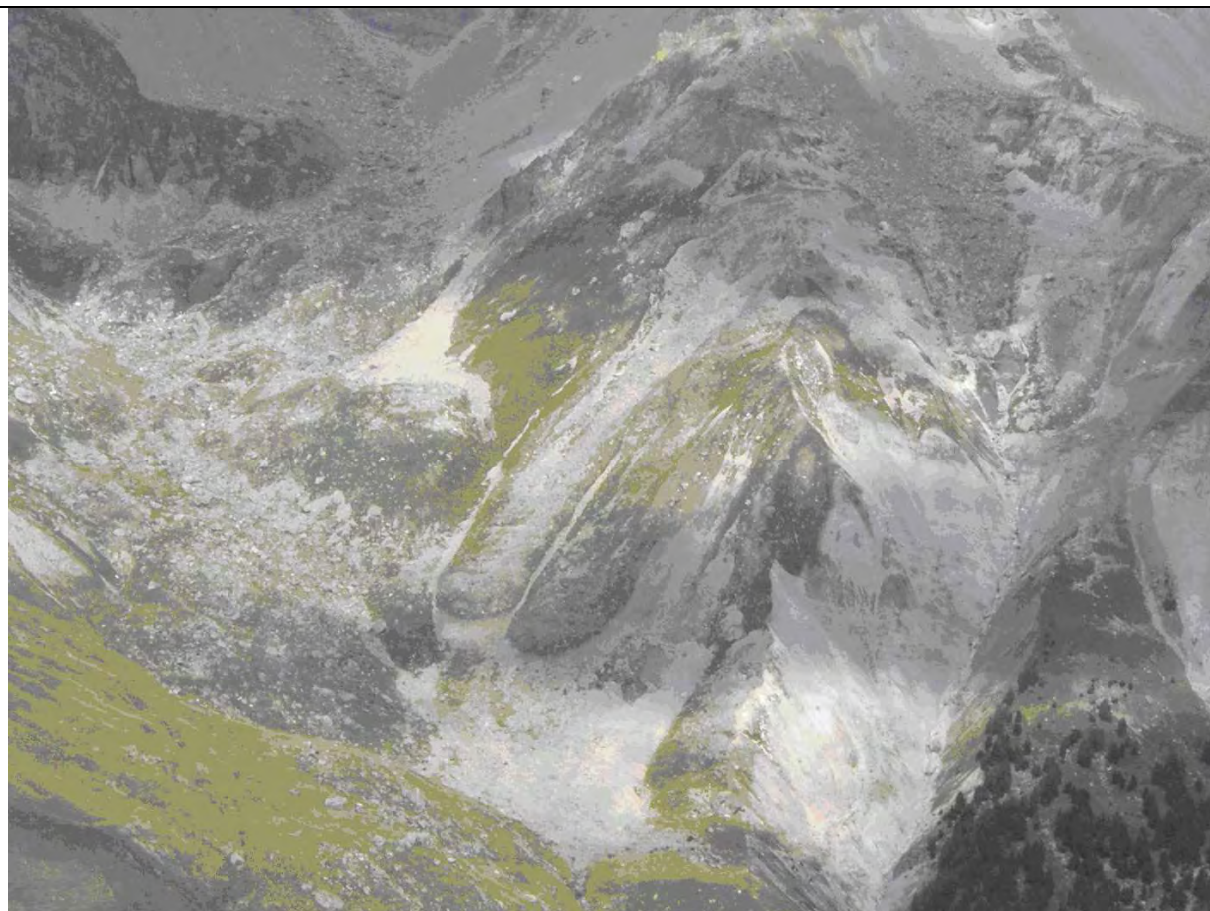
Glacier-rocheux des Sagnes Froides à l'ubac des Crêtes de Moutouze, commune de Névache (source : A. RIGUIDEL)



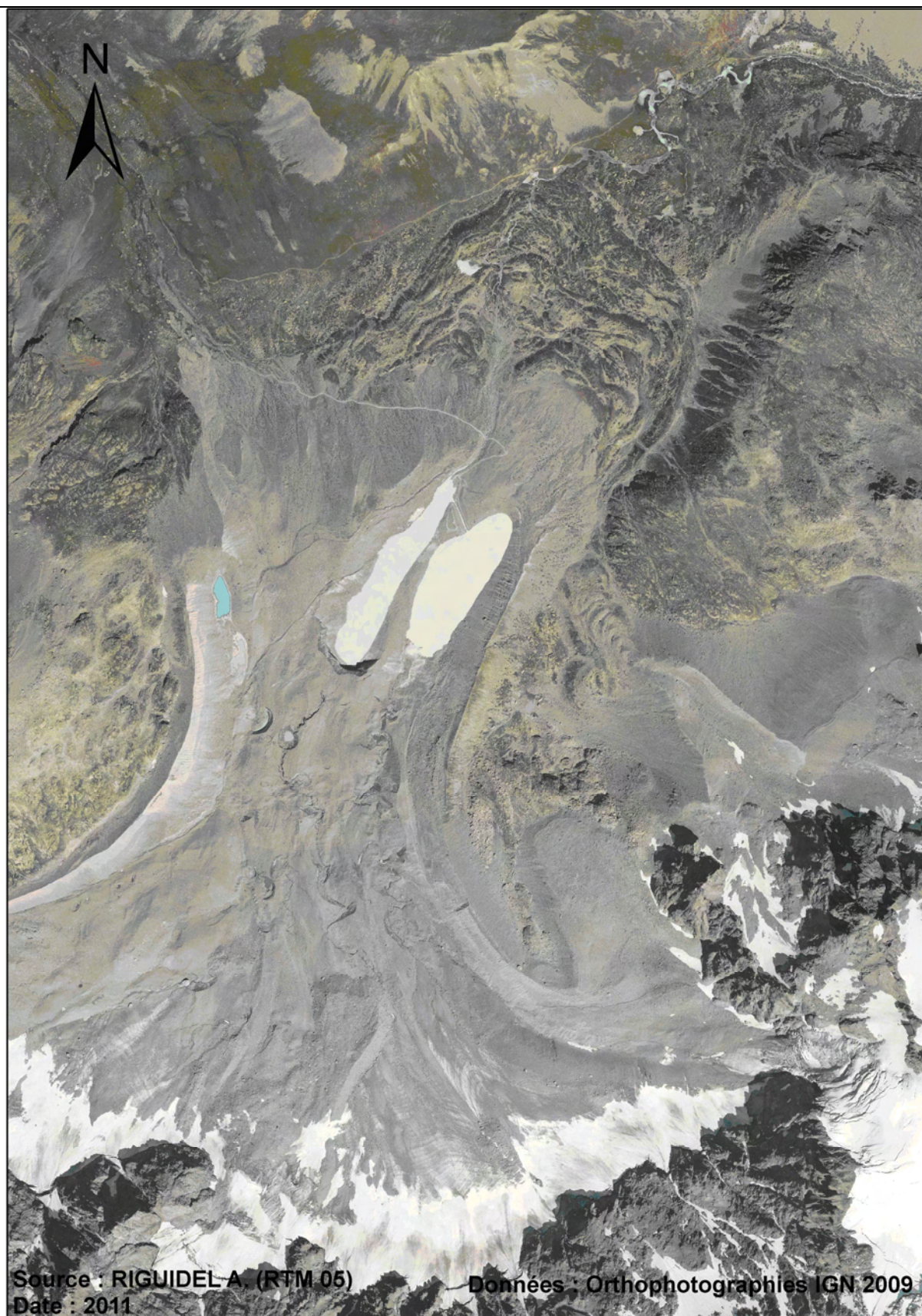
Source : RIGUIDEL A. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

Glacier-rocheux du Serre des Creuzots, avec érosion régressive du torrent du Roubion (commune de Névache)



Glaciers-rocheux du Rif Blanc. Le torrent du Rif Blanc incise longitudinalement le glacier-rocheux à droite sur la photo. (source : A. RIGUIDEL)



Complexe d'Arsine. Du Sud au Nord (de l'amont vers l'aval), on observe le glacier couvert d'Arsine, les deux lacs d'Arsine buttant sur la moraine frontale, puis les bourrelets de glaciers-rocheux fossiles.



Dépressions par dissolution du gypse, sous les glaciers-rocheux de la combe de Lauze

5.4. RENDUS CARTOGRAPHIQUES

5.4.1. Digitalisation et légende

Pour cette étude, nous avons réalisé la cartographie avec un Système d'Informations Géographiques (SIG) (ArcGis d'ESRI, version 9.2).

Le fond de plan est l'ortho-photographie IGN de 2009.

5.4.2. Choix des couches à digitaliser

Les digitalisations se sont faites, par couches indépendantes, pour les objets ci-dessous :

- les périmètres des glaciers-rocheux
- les fronts des glaciers-rocheux
- les sources sur les fronts
- les lacs situés sur ou à proximité des glaciers rocheux
- les dépressions situées sur ou à proximité des glaciers rocheux
- les cours d'eau utiles à la compréhension des risques associés

Lorsque plusieurs glaciers-rocheux se superposent, la délimitation des périmètres est parfois complexe. Il est aussi possible de délimiter un seul périmètre de glacier-rocheux mais avec plusieurs fronts.

5.4.3. Représentation

Les principaux éléments sont les glaciers-rocheux, cartographiés par des polygones hachurés. La couleur représente l'activité du glacier-rocheux : couleurs rouge, orange et jaune pour respectivement actif, inactif et fossile

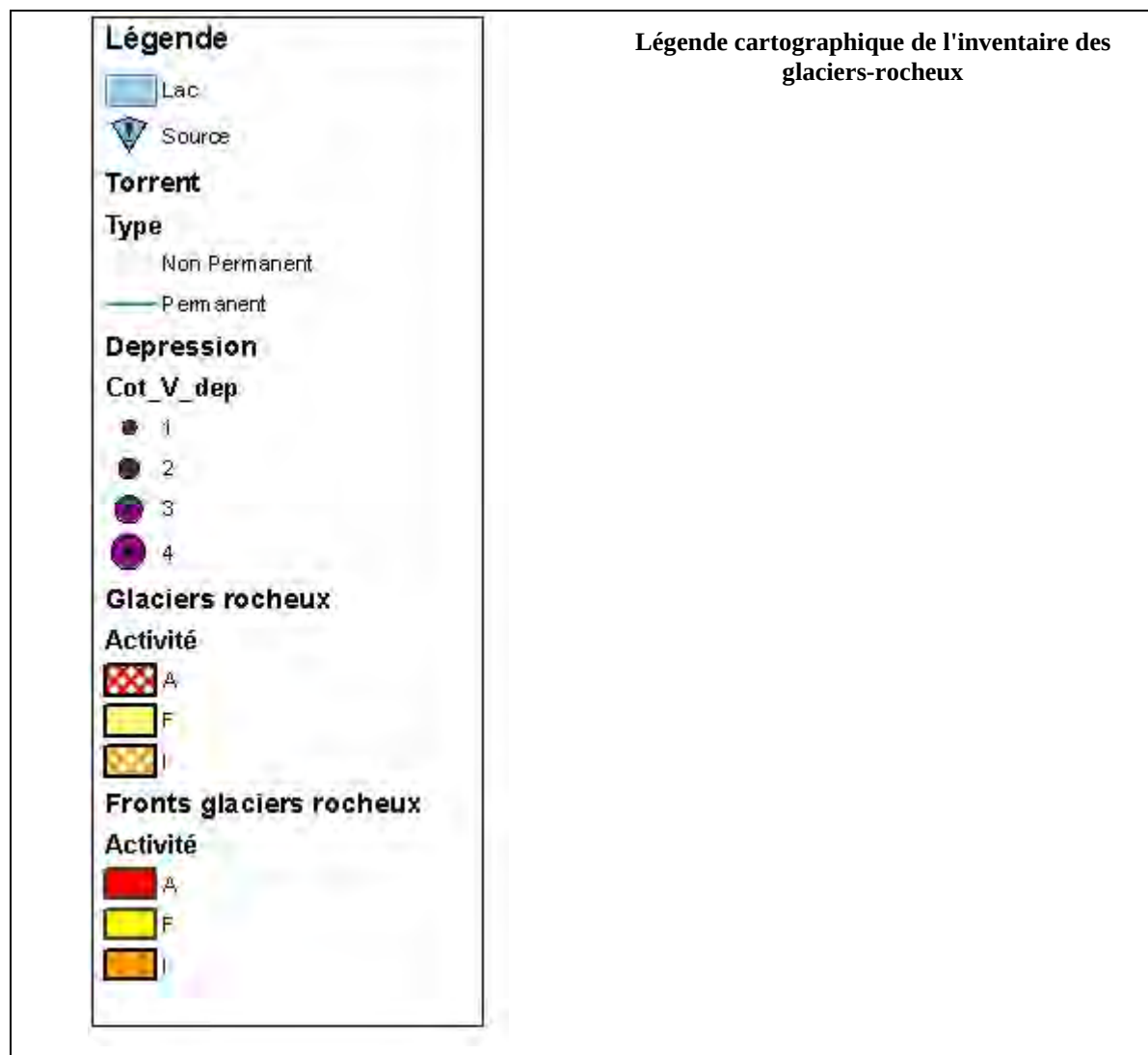
Ce même choix de couleurs est utilisé pour les fronts de glaciers-rocheux, représentés par des aplats continus.

Les lacs sont des polygones bleus.

Les dépressions sont représentées par des symboles ponctuels. La taille des symboles est fonction du volume de la dépression.

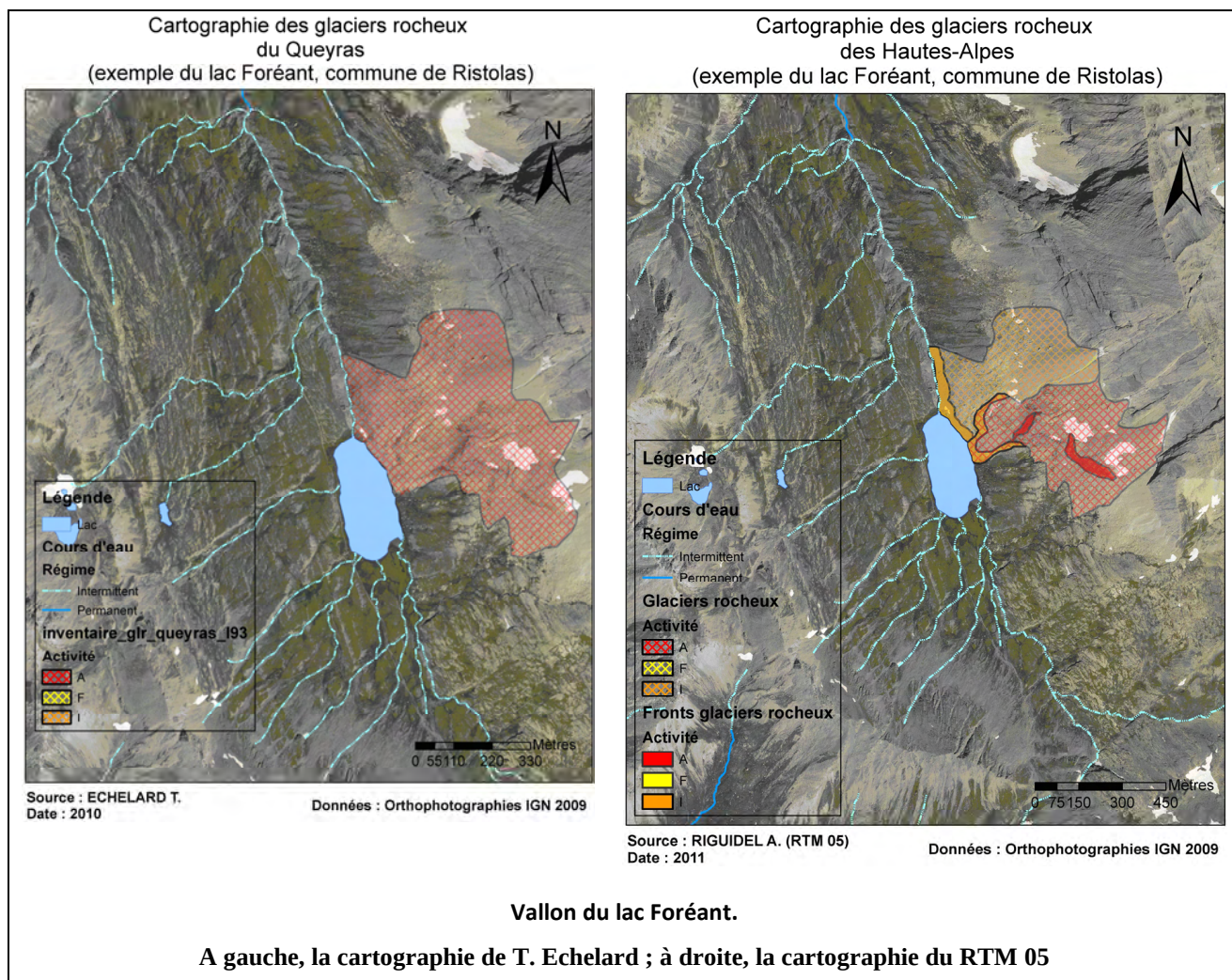
Deux types de cours d'eau sont représentés : les cours d'eau permanents (ligne continue) et les cours d'eau temporaires (ligne tiretée).

Pour les sources, le figuré est ponctuel.



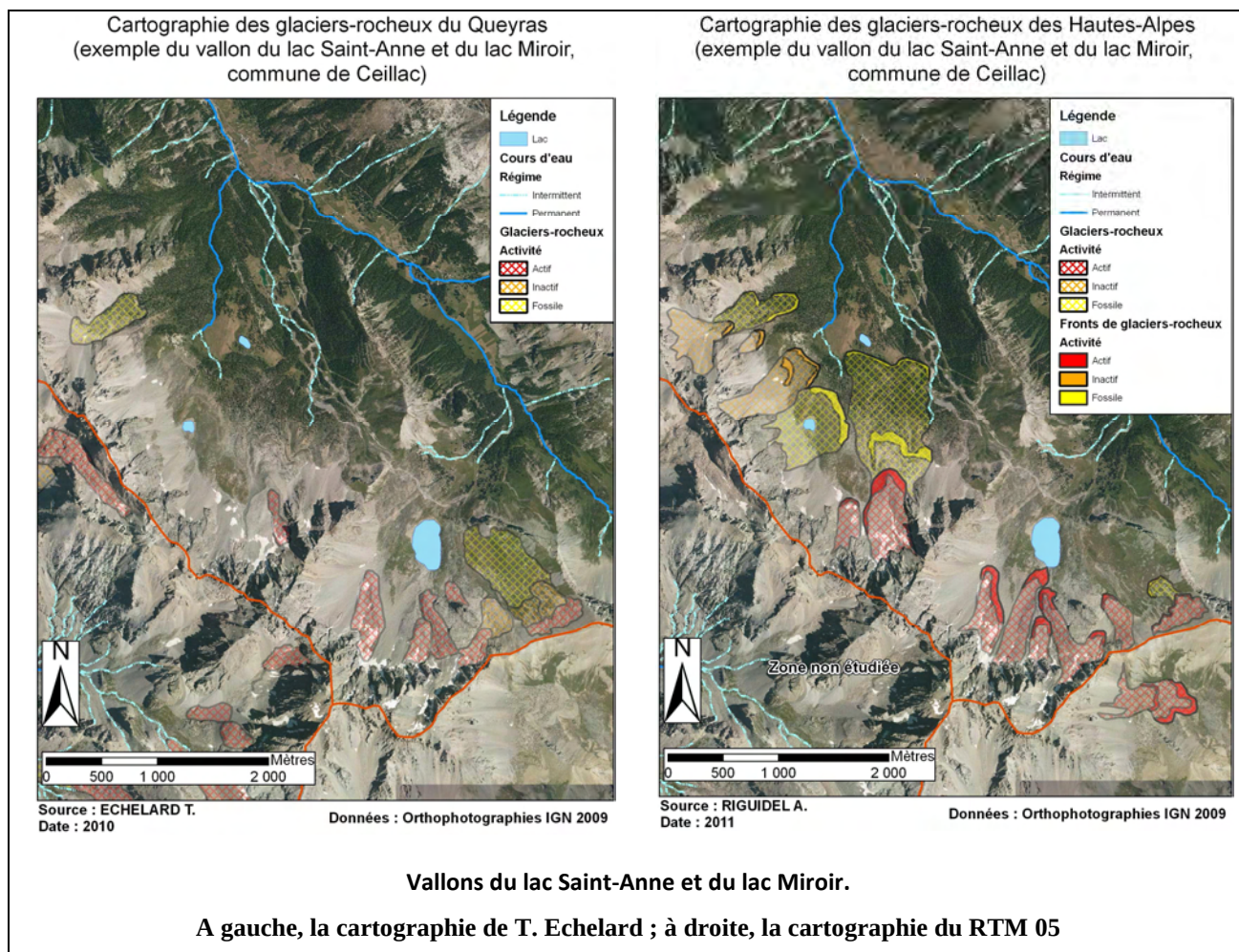
5.4.4. Comparaison de nos résultats et rendus avec d'autres cartographies ou d'autres sources

Pour visualiser les différences avec d'autres méthodes, nous avons mis en œuvre notre méthode, sur quelques sites-tests où nous disposions d'une autre cartographie (dans le cas particulier, les cartographies de T. Echelard sur le Queyras).



Cette comparaison met d'abord en évidence qu'il y a une bonne concordance dans la délimitation des périmètres.

Par contre, il apparaît bien que l'information cartographique est nettement enrichie par la délimitation spécifique des fronts. Le sens d'écoulement du glacier et sa limite aval sont immédiatement perceptibles. On peut aussi mieux percevoir les juxtapositions de glaciers et les fronts intermédiaires.



Sur cet exemple, il y a quand même des concordances sur plusieurs glaciers-rocheux. Cela confirme que, assez souvent, plusieurs géomorphologues peuvent avoir les mêmes interprétations et aboutir à des cartes comparables.

Mais il est vrai que la comparaison sur ce site met aussi en évidence des différences importantes. Nous avons contacté T. Echelard à ce sujet. Et les différences peuvent principalement s'expliquer par les raisons ci-dessous.

Possibilité d'oubli

Chaque méthode a ses limites et il reste difficile de prétendre avoir réalisé un inventaire exhaustif.

Pour notre part, et du fait que notre objectif était bien de faire un inventaire aussi exhaustif que possible (dans un délai raisonnable), nous avons passé un temps conséquent en photo-interprétation. Cette phase nous a permis de déceler des formes et des glaciers pas toujours très évidents. Elle nous a surtout permis, en prenant du recul, de facilement appréhender chaque vallon dans son ensemble et de comprendre (ou de plus facilement interpréter) l'organisation et l'emboîtement des formes.

Différence de méthode

T. Echelard a beaucoup utilisé l'interférométrie radar et s'est principalement intéressé aux glaciers-rocheux qui connaissaient des déplacements. Même s'il en a cartographié quelques uns, les glaciers-rocheux inactifs (et a fortiori fossiles) n'étaient pas au cœur de son travail.

Pour notre part, nous avons cherché à recenser toutes les morphologies attestant de la présence d'un glacier-rocheux, même fossile.

Différences d'interprétation

Dans le vallon du lac Miroir, T.Echelard (après discussion avec Bodin) a interprété les morphologies bien visibles en aval du glacier-rocheux actif, comme faisant partie d'un complexe morainique. Pour notre part, nous avons considéré qu'il s'agissait d'un assez vaste glacier-rocheux fossile (du fait de la morphologie dans l'axe central, faite de bourrelets successifs, qui nous paraît incompatible avec les dépôts raclés par un glacier blanc, même si son recul s'est fait en plusieurs phases).

Des différences d'interprétation de ce type sont relativement inévitables et il ne sera pas possible de toutes les régler.

Il n'en demeure pas moins que nous considérons que les différences d'interprétation restent marginales et ne remettent pas en cause l'intérêt d'un recensement.

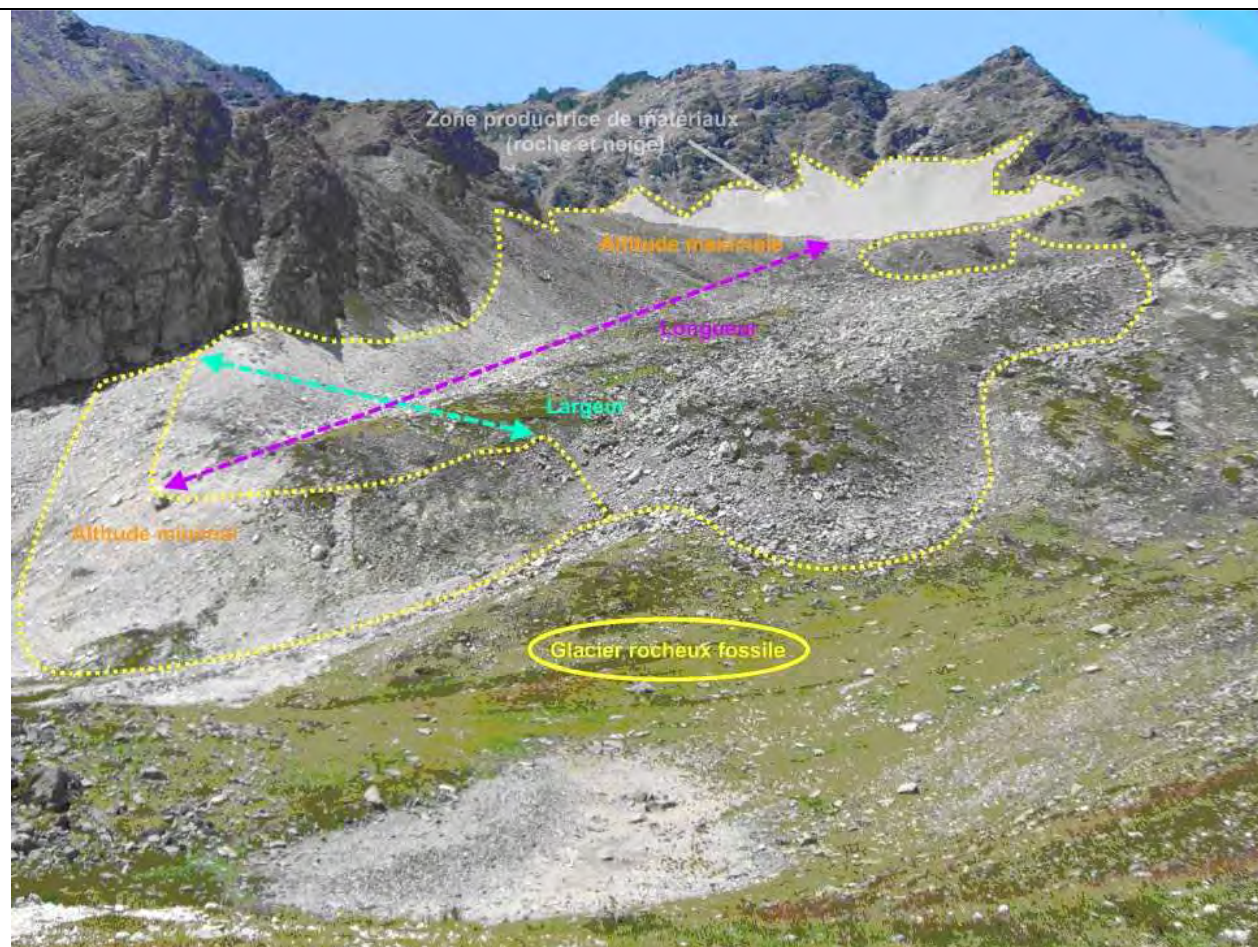
5.5. DONNEES RECUEILLIES, DESCRIPTEURS ET TABLES ATTRIBUTAIRES DES OBJETS SIG

5.5.1. Organisation générale des données et des tables

5.5.1.1. Les descripteurs principaux

Il s'agit des descripteurs usuels sur chaque entité : exposition, altitudes, pentes, activité, ...

Ils sont détaillés dans les tables et les commentaires spécifiques plus loin dans ce chapitre.



Photographie commentée des mesures liées au glacier-rocheux (source : A. RIGUIDEL)

5.5.1.2. Les descripteurs des phénomènes et des enjeux

Pour appréhender les risques potentiellement associés aux glaciers-rocheux, nous avons analysé la bibliographie et réexaminé des exemples décrits par différents auteurs (cf. en particulier le paragraphe 6.1). Ces analyses, complétées par nos propres observations, nous amènent à proposer une typologie des éléments ou des situations qui pourraient être génératrices de risques.

Pour cette typologie des risques, il nous est apparu nécessaire de décrire et de quantifier de nombreux paramètres, en distinguant particulièrement :

les phénomènes	/	les enjeux
----------------	---	------------

les phénomènes ayant des conséquences sur le glacier ou dans sa proximité immédiate	/	les phénomènes ayant pour origine le glacier-rocheux mais pouvant avoir des conséquences éloignées
---	---	--

les phénomènes brutaux	/	les phénomènes progressifs
------------------------	---	----------------------------

les phénomènes ayant pour origine :

le glacier-rocheux lui-même	/	le front du glacier	/	un lac sur ou à proximité du glacier-rocheux	/	une dépression sur ou à proximité du glacier-rocheux
-----------------------------	---	---------------------	---	--	---	--

Par ailleurs, plusieurs de ces informations peuvent être pondérées et combinées à d'autres pour aller plus loin dans les analyses. C'est pourquoi, nous avons décidé de retenir un système de cotation chiffrée de ces informations.

Le système de cotation est toujours le même : une note de 1 à 4, la valeur 0 étant également possible.

Ces valeurs chiffrées respectent une même logique :

0	non renseigné ou information non pertinente
1	Influence faible sur les risques (avérés et/ou potentiels)
2	Influence moyenne sur les risques (avérés et/ou potentiels)
3	Influence forte sur les risques (avérés et/ou potentiels)
4	Influence majeure sur les risques (avérés et/ou potentiels)

Une telle échelle, avec un nombre pair de choix possibles (plus le 0), a été retenue pour empêcher les opérateurs de choisir, trop souvent et par facilité, la valeur centrale de l'échelle.

Le tableau ci-dessous résume ces principales distinctions et illustre les principaux phénomènes que nous avons pris en compte :

Phénomènes modérés à faibles <i>Cotation : 1 à 2, parfois 3</i>	Phénomènes intenses <i>Cotation : 4, parfois 3</i>	Parties du glacier-rocheux ou de son environnement concernées
Déplacements du glacier à vitesse constante, moyenne ou faible	Surge	Corps et front du glacier
Glissements localisés	Rupture du glacier	Corps et front du glacier
Tassements de faible ampleur	Affaissements brutaux	Corps et front du glacier
Chute de pierres, glissements localisés	Chutes de blocs, éboulements	Front du glacier
Ravinement	Laves torrentielles	Corps et front du glacier
Vidanges progressives, variations du niveau d'eau	Débâcle, vidange brutale (par infiltration ou par débordement)	Lac, dépression

Les tables des fronts, lacs, dépressions et sources ne détaillent que de informations propres à ces entités, avec un champ spécifique rappelant le glacier-rocheux auxquelles elles sont rattachées.

La table des glaciers-rocheux détaillent les informations propres aux glaciers-rocheux et servent aussi aux informations synthétisant les évaluations des phénomènes (proches, distants, des différentes origines possibles, ...) et les évaluations des enjeux.

5.5.1.3. Les propositions

Les dernières colonnes des tables « glaciers-rocheux », « lacs » et « dépressions » permettent de faire des propositions, plus particulièrement pour des actions de suivi ou de surveillance.

5.5.2. **Précisions sur la table des glaciers-rocheux**

Notre table attributaire s'inspire de celle réalisée par Echelard pour le Queyras. Cela facilitera les comparaisons et la valorisation des résultats des différentes études.

Le contrôle terrain : un champ spécifique indique si, pour chaque glacier-rocheux, il a été réalisé ou pas.

L'orientation : elle correspond à l'axe moyen de l'écoulement, de l'amont vers l'aval, dans la partie supérieure du glacier-rocheux (à partir de la racine).

L'altitude minimale : c'est l'altitude du pied du front.

L'altitude maximale : c'est l'altitude moyenne du sommet des racines principales. Ce n'est pas l'altitude des sommets ou des affleurements rocheux producteurs de matériaux qui dominent le glacier.

La pente moyenne : pente moyenne = $\cos(\text{alt max} - \text{alt min}) / \text{longueur}$.

PSIR : c'est le rayonnement solaire moyen sur le glacier. Il peut être déterminé par un module de calcul fourni par ESRI. Pour plus de détails, voir le mémoire de T. Echelard (2010) "Détection de mouvements par interférométrie radar dans les zones à permafrost : applications aux glaciers-rocheux du

Queyras", Mémoire de master, Université de Grenoble, France. Le champ est prévu dans notre table attributaire mais nous n'avons pas eu la disponibilité pour le renseigner.

La racine et la longueur :

Il arrive que plusieurs glaciers-rocheux emboîtés et superposés soient cartographiés. Par exemple, un petit glacier-rocheux 1 actif, au dessus d'un glacier-rocheux 2 inactif, lui-même au dessus d'un grand glacier-rocheux 3 fossile. Dans ce cas, nous avons considéré que la racine de ces 3 glaciers-rocheux superposés était toujours la même. L'altitude maxi et l'orientation de ces 3 glaciers-rocheux sont identiques. Et l'on a ainsi :

Longueur glacier 2 = longueur glacier 1 + longueur de la partie apparente du glacier 2

Longueur glacier 3 = longueur glacier 2 + longueur de la partie apparente du glacier 3

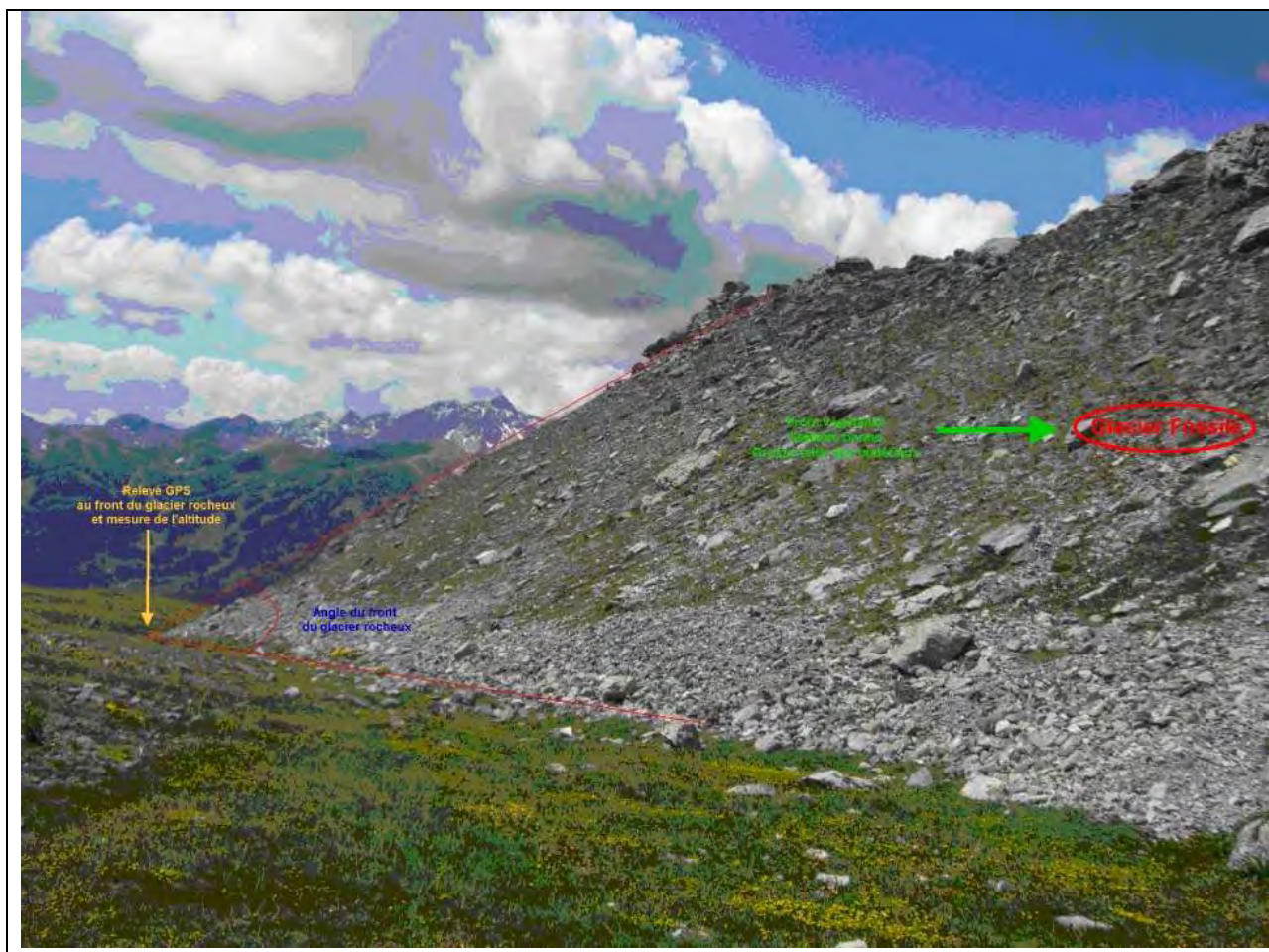
5.5.3. Précisions sur la table des fronts

Le potentiel d'alimentation du torrent en matériaux

Si le front du glacier-rocheux est en contact avec le torrent :

- Pour un torrent à régime non permanent, on considèrera souvent qu'il y a une faible alimentation du torrent en matériaux par le front d'un glacier-rocheux.
- Pour un torrent à régime permanent, on considèrera souvent qu'il peut y avoir une forte alimentation du torrent en matériaux par le front d'un glacier-rocheux.

Si le front du glacier-rocheux n'est pas en contact direct avec le torrent, mais s'il est perché au-dessus d'une forte pente, un mouvement du glacier-rocheux par glissement, rupture ou éboulement, pourrait avoir une incidence sur le torrent à l'aval par un apport brutal de matériaux.



5.5.4. Précisions sur la table des lacs

Il ne s'agissait pas ici de recenser tous les lacs en montagne mais seulement ceux qui pouvaient interagir avec les glaciers-rocheux et influencer sur les risques associés.

La position du lac par rapport au glacier-rocheux

La position "dessus" correspond généralement à des thermokarsts (mais nous n'avons pas fait de distinction particulière dans ce recensement).

La position "amont" est très rare (cas de lacs en amont d'un glacier-rocheux et qui influeraient sur les risques associés au glacier-rocheux). Dans notre recensement, elle existe sur le cas du complexe des glaciers d'Arsine.

La distance entre le lac et le glacier-rocheux

Tous les lacs sur ou au contact des glaciers-rocheux doivent être recensés.

Pour les lacs qui ne sont pas au contact des glaciers-rocheux, la question se pose de savoir jusqu'où en tenir compte et les recenser. Aucune réponse précise ne peut être donnée. Il faut recenser les lacs qui influent sur les risques associés aux glaciers-rocheux : soit parce que les mouvements du glacier-rocheux peuvent l'amener au contact du lac soit parce que le lac est sur le trajet que peuvent emprunter des phénomènes prenant naissance sur le glacier.

Le volume des lacs

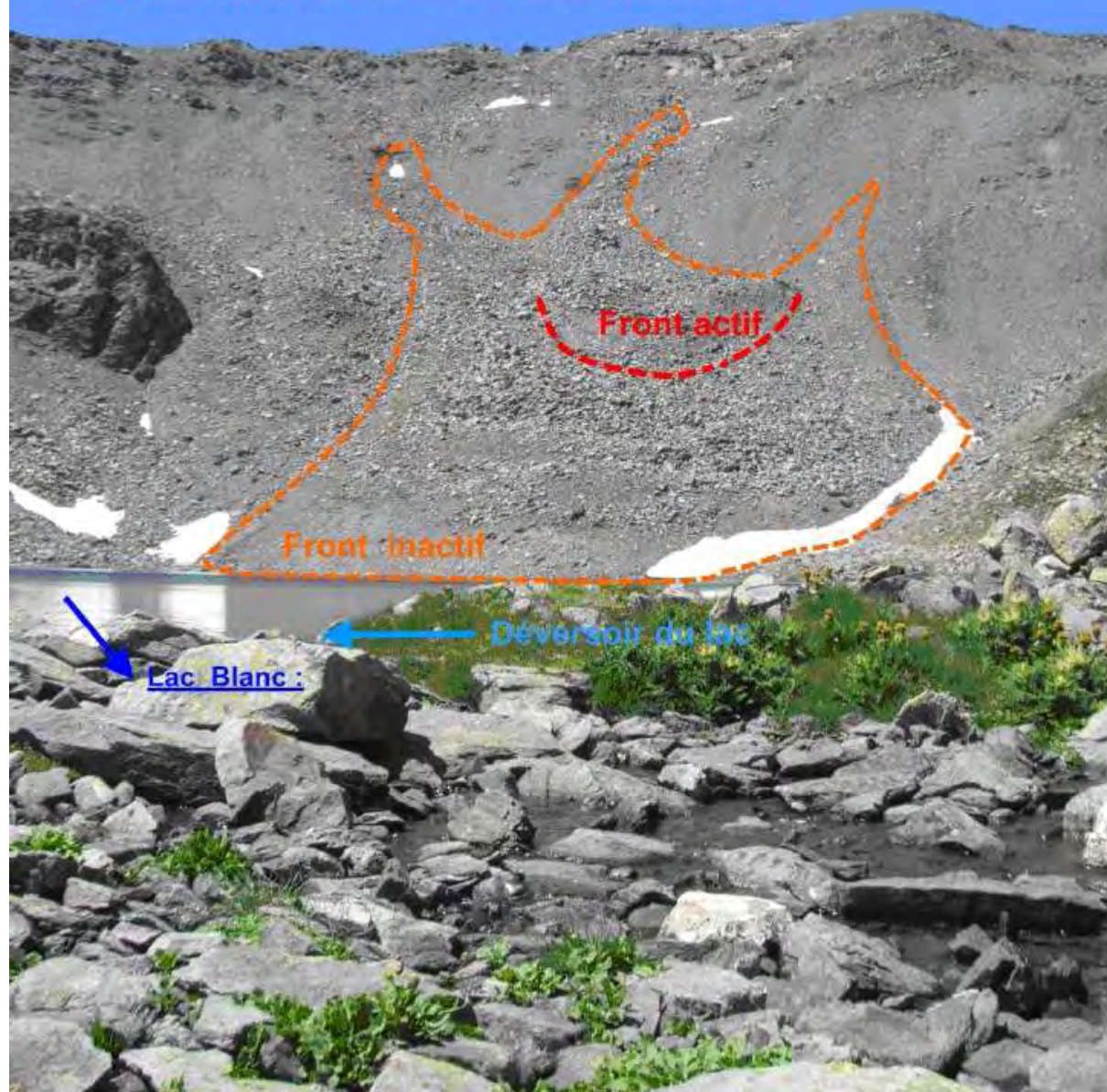
Nous avons défini les 4 classes ci dessous

Classe	Volume (m ³)	Superficie (ha)	Profondeur moyenne (m)
1	< 10.000	< 0,5	2
2	10.000 – 50.000	0,5 – 2	3
3	50.000 – 250.000	2 – 5	5
4	> 250.000	> 5	8

Relation entre la superficie et le volume des lacs dans notre système de cotation

Caractéristiques du lac :

- + Altitude de 2695 mètres
- + Aval du glacier rocheux
- + Vidanges progressives (en cas de mouvements du front)
- + Volume du lac coté 4 (soit un volume $>250 \text{ km}^3$)
- + Surveillance sur le site utile : visite occasionnelle

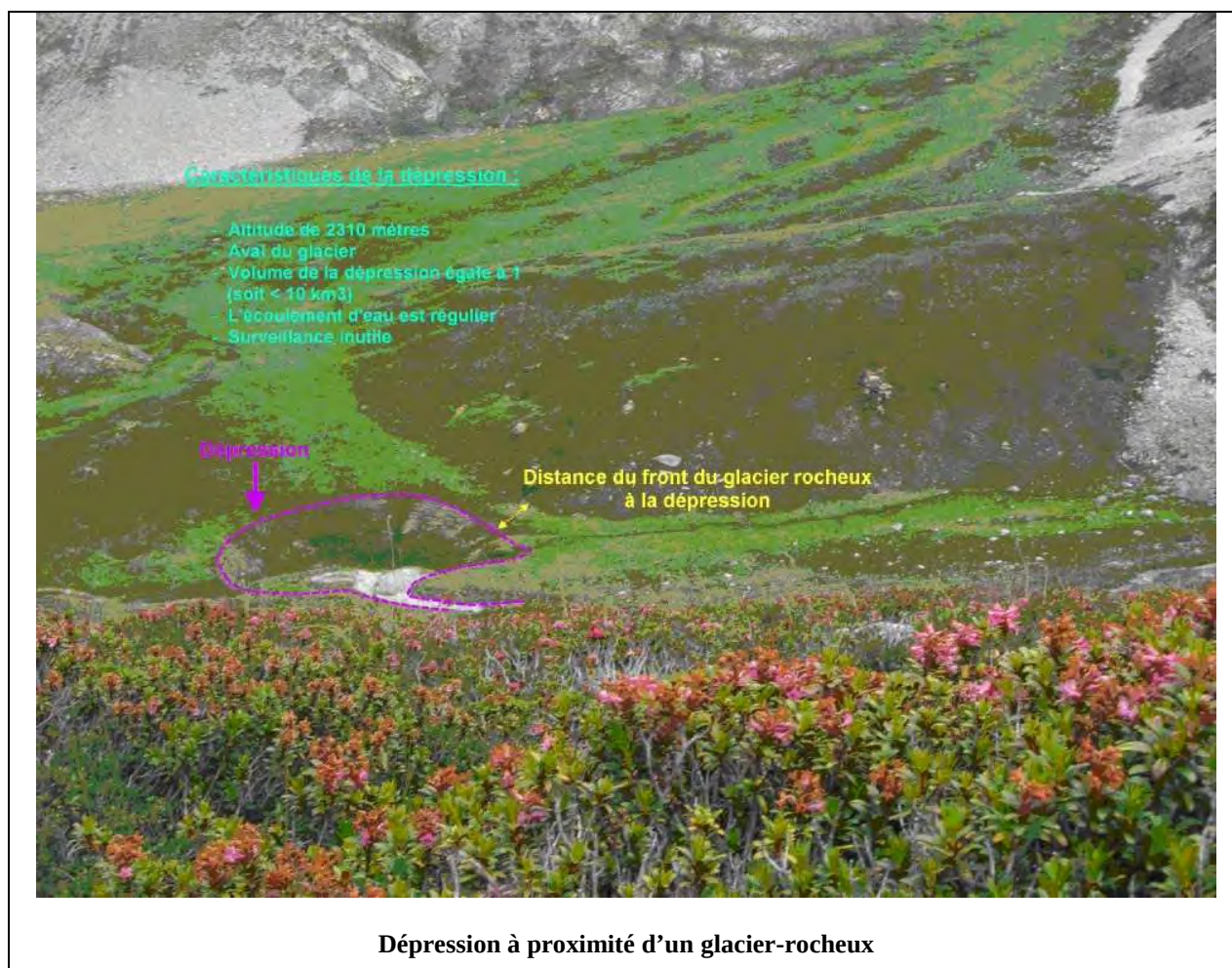


Le lac Blanc à l'interface de glaciers-rocheux

5.5.5. Précisions sur la table des dépressions

La variation de la hauteur d'eau
ONF - Service RTM

Dans la dépression, la présence d'eau n'est pas pérenne (sinon ce serait un lac). Il est important de mentionner le mode d'évacuation de l'eau (évacuation par infiltration, par phénomènes brutaux, ...).

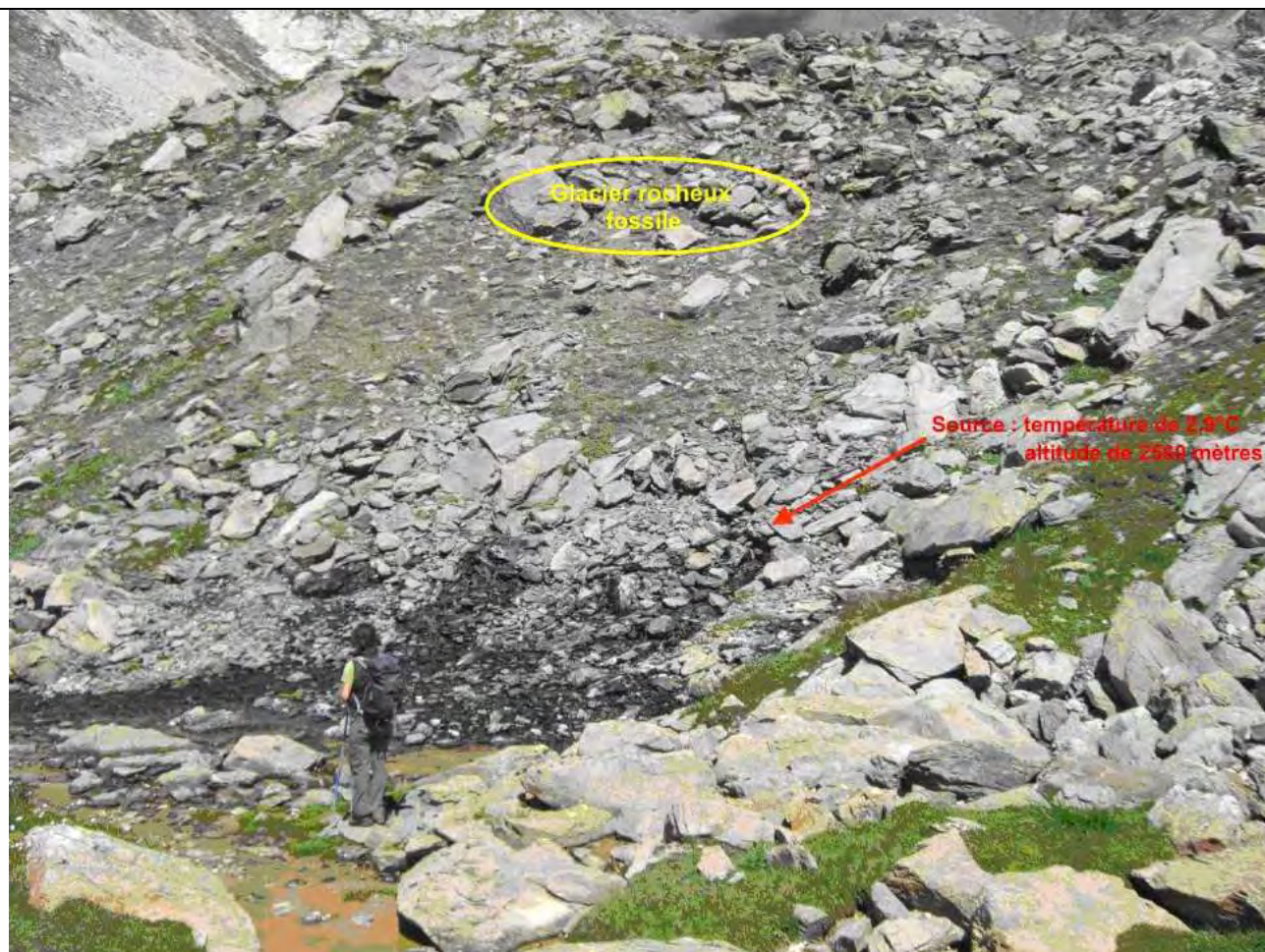


5.5.6. Précisions sur la table des sources

La température de la source permet généralement de vérifier l'activité du glacier-rocheux. Il est communément admis que :

- le glacier-rocheux est fossile si $T_{\text{source}} > 2^{\circ}\text{C}$
- le glacier-rocheux est inactif ou actif si $T_{\text{source}} < 2^{\circ}\text{C}$.

La température de la source peut varier, notamment en fonction de la saison. C'est pourquoi, il est important de noter la date du contrôle terrain.



Un glacier-rocheux avec ses sources

5.5.6.1. SIG : la table attributaire des glaciers-rocheux

CARACTERISTIQUES DES GLACIERS-ROCHEUX																		
Type d'informations	Identifiant de l'entité	Type de couche	N° du glacier	Orientation (principale) du glacier	Altitude minimale du glacier	Altitude maximale du glacier	Rayonnement solaire moyen	Activité du glacier rocheux	Abscisse du centroïde	Ordonnée du centroïde	Pente moyenne du glacier	Longueur du glacier	Largeur au front du glacier	Département	Commune	N°INSEE	Source de la donnée	Date du contrôle de terrain
Nom du champ	FID	shape	Id_glacier	orientatio	ALTI_MIN	ALTI_MAX	PSIR	activité	X	Y	pente	longueur	largeur	départem	commune	n°INSEE	Data	Contrôle_T
Type	pré-défini	pré-défini	texte	texte	réel double	réel double	réel double	texte	réel double	réel double	réel double	réel double	réel double	texte	texte	entier long	texte	texte
Longueur	pré-défini	pré-défini	35	4	11	11	18	1	18	18	18	11	11	25	40	8	60	20
Décimales	pré-défini	pré-défini			0	0	15		15	15	15	0	0					
Commentaires, compléments					en mètre	en mètre			en lambert 93	en lambert 93		en mètre	en mètre				Nom de la personne	
Exemples ou choix possibles	0	polygone		N (Nord)	2335	2620		A (Actif)				648	71	Hautes-Alpes	Névache		Dupond	juin 2011
	1	polygone		NO (Nord-Ouest)	2400	2700		I (Inactif)				729	189	Savoie	Valloire		Martin	juin 2011
	2	polygone		NNO (Nord-Nord-Ouest)	2475	2620		F (Fossile)				252	378	Hautes-Alpes	Ristolas		Haddock, modifié par Martin	août 2011
	3	polygone																
	4	polygone																
	5	polygone																

Table des glaciers-rocheux – 1^{ère} partie descriptive

PHENOMENES AVERES			
Evènements connus - Cotation	Evènements connus	Traces - Cotation	Traces
evt_C	evt	traces_C	traces
texte	texte	texte	texte
1	50	1	50
	Un même type d'événement peut avoir une importance différente		Un même type de traces peut avoir une importance différente
?	Non renseigné	?	Non renseigné
0	Aucun événement connu	0	Aucune trace constatée
1	Coulées	1	Coulées (très anciennes)
2	Lave torrentielle (17 juillet 2001)	2	Coulées (récentes)
3	Lave torrentielle, rupture du front	3	Glissements importants en amont
4	Rupture du glacier	4	Glissements importants en aval

Table des glaciers-rocheux – 2^{ème} partie : les phénomènes constatés

Cette partie détaille les types de phénomènes recensés et leur hiérarchie.

Dans les phénomènes avérés, des phénomènes évidents sur tous les glaciers-rocheux ne sont pas rappelés: déplacements (anciens pour les glaciers fossiles ou inactifs, en cours pour les glaciers actifs) ou tassements (souvent importants sur le corps des glaciers fossiles ou inactifs).

Cet extrait illustre aussi la méthode utilisée :

- la cotation permet de hiérarchiser les phénomènes, en fonction de leur importance (dans l'optique d'une bonne appréciation des risques), la note de 1 correspondant à des phénomènes de faible ampleur, celle de 4 correspondant à des phénomènes majeurs ;
- la partie descriptive permet de donner les détails nécessaires (les détails donnés dans cet exemple permettent de « cadrer » les types de phénomènes et leur importance relative ; l'utilisateur peut décrire des phénomènes spécifiques, en respectant la même logique et la même hiérarchisation).

PHENOMENES POUVANT GENERER UNE MENACE SUR LE GLACIER ROCHEUX OU SA PROXIMITE							ENJEUX DE PROXIMITE			
Phénomènes glacier	Phénomènes front - Cotation	Phénomènes front	Phénomènes lac Cotation	Phénomènes lac	Phénomènes dépression - Cotation	Phénomènes dépression	Enjeux sur glacier Cotation	Enjeux sur glacier	Enjeux à proximité du glacier - Cotation	Enjeux à proximité du glacier
phP_GR	phP_fr_C	phP_fr	phP_lac_C	phP_lac	phP_dp_C	phP_dp	enj_sur_C	enj_sur	enj_prox_C	enj_prox
texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte
50	1	50	1	50	1	50	1	60	1	70
			Le lac étant dans l'environnement proche d'un glacier		La dépression étant dans l'environnement proche d'un glacier					Proximité : Qui peut rentrer dans le champs d'avancée du glacier (frontal ou latéral)
Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné
Aucune menace envisagée	0	Aucune menace envisagée	0	Aucune menace envisagée	0	Aucune menace envisagée	0	Aucun, Piste (voiture)	0	Aucun, oratoire, piste de ski
Tassements et déplacements de faible ampleur	1	Mouvements, glissements localisés	1	Variation du niveau d'eau	1	Variation du niveau d'eau	1	Piste de ski	1	Pylône électrique
Déplacements importants (> 0,5 m/an)	2	Faible alimentation du torrent en matériaux	2	Vidange progressive (par infiltration)	2	Vidange progressive (par infiltration)	2	Pylône électrique	2	Route
Glissements brutaux localisés	3	Forte alimentation du torrent en matériaux	3	Vidange progressive (par débordement)	3	Vidange progressive (par débordement)	3	Route	3	Refuge, Habitations
Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	4	Glissement, rupture brutaux	4	Débâcle	4	Débâcle	4	Refuge, Habitations	4	Refuge, Habitations

Table des glaciers-rocheux – 3^{ème} partie : les phénomènes à prendre en compte sur le glacier-rocheux et sa proximité, et les enjeux associés

PHENOMENES POUVANT GENERER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER ROCHEUX								ENJEUX DISTANTS	
Phénomènes glacier - Cotation	Phénomènes glacier	Phénomènes front Cotation	Phénomènes front	Phénomènes lac - Cotation	Phénomènes lac	Phénomènes dépression - Cotation	Phénomènes dépression	Enjeux distants - Cotation	Enjeux distants
phD_GR_C	phD_GR	phD_fr_C	phD_fr	phD_lac_C	phD_lac	phD_dp_C	phD-dp	enj_dist_C	enj_dist
texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte
1	50	1	50	1	50	1	50	1	50
L'impact est évalué pour une distance plus importante		L'impact est évalué pour une distance plus importante		L'impact est évalué pour une distance plus importante		L'impact est évalué pour une distance plus importante			
?	Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné	?	Non renseigné
0	Aucune menace envisagée	0	Aucune menace envisagée	0	Aucune menace envisagée	0	Aucune menace envisagée	0	Aucun
1		1		1		1		1	Infrastructures locales
2	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	2	Faible alimentation du torrent en matériaux	2	Vidange progressive (par infiltration)	2	Vidange pro-gressive (par infiltration)	2	maisons isolées, infrastructures importantes
3	Glissement important, jusqu'au talweg	3	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	3	Vidange progressive (par débordement)	3	Vidange pro-gressive (par débordement)	3	Hameau
4	Départ d'une lave torrentielle	4	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	4	Débâcle	4	Débâcle	4	Village, ville

Table des glaciers-rocheux – 3^{ème} partie : les phénomènes à prendre en compte et pouvant avoir un impact éloigné, et les enjeux associés

PROPOSITIONS		
Surveillance du site	Type de surveillance	Commentaires
surveille	surv_type	Commentair
texte	texte	texte
15	35	200
		Commentaire général, impression, autres suggestions
Inutile	Aucune	
A voir (une discussion avec des personnes plus au fait doit avoir lieu pour statuer)	Contrôle terrain (unique)	
Inutile	Aucune	
Utile	Mesure de déplacement du front	
Utile	Topo-graphique	
Conseillée	Niveau d'eau par sonde, contrôle annuel	

Table des glaciers-rocheux – 4^{ème} partie : les propositions

Cette dernière partie permet de synthétiser les informations et de faire des propositions. En général, ces propositions seront plutôt liées à une éventuelle surveillance du site.

5.5.6.2. SIG : la table attributaire des fronts

Type d'informations	CARACTERISTIQUES DES FRONTS									PHENOMENES	
	Identifiant de l'entité	Type de couche	N° du glacier	Pente du front	Végétalisation du front	Stabilité du front	Taille des matériaux du front	Activité du front	Source de la donnée	PATM - Cotation	Potentiel d'Alimentation du Torrent en Matériaux (PATM)
Nom du champ	FID	shape	Id_glacier	pente	veget	stab	dim_mat	activité	data	PATM_C	PATM
Type	pré-défini	pré-défini	texte	réel simple	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte
Longueur	pré-défini	pré-défini	35	4	10	15	15	1	60	1	50
Décimales	pré-défini	pré-défini		2							
Commentaires, compléments			cet identifiant correspond à celui du glacier rocheux auquel il est rattaché						Nom de la personne		
Exemples ou choix possibles	0	polygone	98	44	non	mauvaise	fine	A (Actif)	Dupond	?	Non renseigné
	1	polygone	6	37	en cours	moyenne	moyenne	I (Inactif)	Martin	0	Aucune alimentation supposée
	2	polygone	51	32	oui	bonne	grosse	F (Fossile)	Martin, modifié par Dupond	1	Faible alimentation du torrent en matériaux
	3	polygone	33							2	Forte alimentation du torrent en matériaux
	4	polygone	51 (il y a deux fois le même identifiant, donc cela signifie qu'un glacier possède au moins deux fronts distincts)	35	en cours	bonne	grosse	F (Fossile)	Martin, modifié par Dupond	3	Très forte alimentation du torrent en matériaux
	5	polygone								4	Glissement, rupture brutaux

Table des fronts de glaciers-rocheux

5.5.6.3. SIG : la table attributaire des lacs

CARACTERISTIQUES DES LACS																
Type d'informations	Identifiant de l'entité	Type de couche	N° du glacier	Altitude	Abscisse du centroïde	Ordonnée du centroïde	Superficie	Nom du lac	Position par rapport au glacier	Distance par rapport au glacier	Distance par rapport au front du glacier	Variation observée du niveau du lac	Explication probable de la variation du niveau d'eau au sein du lac	Source de la donnée	Date du document source	Source et type de document
Nom dans la table attributaire ArcGis	FID	Shape	Id_glacier	altitude	X	Y	Superficie	Nom	Position	Dist_Bd_gl	Dist_Ft_gl	Var_observ	Expli	DataSource	Date_doc	Source_doc
Type	pré-défini	pré-défini	texte	entier court	réel double	réel double	réel double	texte	texte	réel double	réel simple	texte	texte	texte	texte	texte
Longueur	pré-défini	pré-défini	35	4	18	18	15	30	10	14	6	3	30	50	20	30
Décimales	pré-défini	pré-défini			15	15	5			9	2					
Explication				en mètre			en ha			en mètre	en mètre			Nom de la personne		
Exemples et possibilités	0	polygone	99	2500			4.6	lac Blanc	dessus	0	33	non		Dupond	août 2009	Photo aérienne IGN
	1	polygone	298	2330			3.3	lac d'Asti	aval		8.06	oui	Rythme naturel	Martin	juin 1997	
	2	polygone	57	2760					amont		49.2	?	Non renseigné	Haddock, modifié par Martin	2007	
	3	polygone	16	2505					coté	3.5		oui	Mouvement du glacier			
	4	polygone	166	2360			0.56	lac Rouge	coté	16.6		?	Non renseigné			
	5	polygone	16	2500					aval		59.76	oui	Eboulements			

Table des lacs – 1^{ère} partie : les principaux descripteurs

VOLUMES ET VARIATIONS DE NIVEAU		PHENOMENES POUVANT GENERER UNE MENACE				PROPOSITIONS LAC	
Volume d'eau	Variations possibles du niveau d'eau, y.c. en cas de mouvements du glacier	Phénomènes constatés - Cotation	Phénomènes constatés	Phénomènes supposés - Cotation	Phénomènes supposés	Surveillance	Type de surveillance
vol	vol_var	ph_C	ph	ph_supp_C	ph_supp	surveill	surv_typ
texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte	texte
1	13	1	50	1	50	15	50
						Vis à vis du lac	
1 (<10.000 m³)	Non renseigné, Non	?	Non renseigné	?	Non renseigné		
2 (de 10.000 m³ à 50.000 m³)	Très faible	0	aucun	0	aucun	Non	
3 (de 50.000 m³ à 250.000 m³)	Faible	1	variations de niveau	1	variations de niveau	Utile	
4 (>250.000 m³)	Moyenne	2	vidanges progressives	2	vidanges progressives	Conseillé	Niveau d'eau, Relevé topo-graphique
	Forte	3	vidanges brutales par infiltration	3	vidanges brutales par déversement	Conseillé	Contrôle terrain annuel
	Très forte	4	vidanges brutales par déversement	4	vidanges brutales par infiltration	Utile	Niveau d'eau

Table des lacs – 2^{ème} partie : l'eau, les phénomènes prévisibles et les propositions

5.5.6.4. SIG : la table attributaire des dépressions

Type d'informations	CARACTERISTIQUES DES DEPRESSIONS									
	Identifiant de l'entité	Type de couche	N° du glacier	Altitude	Abscisse de la dépression	Ordonnée de la dépression	Position par rapport au glacier	Distance / glacier	Distance / front	Source de la donnée
Nom du champ	FID	shape	Id_glacier	alti	X	Y	position	dist_GR	dist_fr	data
Type	pré-défini	pré-défini	texte	entier court	réel double	réel double	texte	texte	réel simple	texte
Longueur	pré-défini	pré-défini	35	4	18	18	10	10	6	50
Décimales	pré-défini	pré-défini			15	15			2	
Commentaires, compléments				en mètre					en mètre	Nom de la personne
Exemples ou choix possibles	0	point	99	2500			dessus	dessus	33	Dupond
	1	point	298	2330			aval	aval	8.06	Martin
	2	point	57	2760			amont	dessus	49.2	Haddock, modifié par Martin
	3	point	16	2505			coté	coté		
	4	point	166	2360			coté	coté		
	5	point	16	2500			aval	aval	59.76	

Table des dépressions – 1^{ère} partie : les principaux descripteurs

VOLUMES ET EAU				PROPOSITION DEPRESSION	
Volume de la dépression	Présence d'eau	Commentaire sur la présence d'eau	Variation d'hauteur d'eau constatée	Surveillance	Type de surveillance
volume	eau_O/N	eau_commen	H_eau_var	surveill	surv_typ
texte	texte	texte	texte	texte	texte
1	10	150	1	15	50
			hauteur d'eau déjà atteinte (trace)		
1 (<10.000 m ³)	?		?		
2 (de 10.000 m ³ à 50.000 km ³)	oui	écoulement régulier	1 (de 0 à 2 mètres)	Non	
3 (de 50.000 m ³ à 250.000 m ³)	non	stockage temporaire faible	2 (entre 2 et 5 mètres)	Utile	
4 (>250.000 m ³)	?		3 (entre 5 et 8 mètres)	Conseillé	Niveau d'eau, Relevé topographique
	oui		4 (plus de 8 mètres)	Conseillé	Contrôle terrain annuel
	non			Utile	Niveau d'eau

Table des lacs – 2^{ème} partie : l'eau et les propositions

5.5.6.5. SIG : la table attributaire des sources

Type d'informations	CARACTERISTIQUES DES SOURCES										
	Identifiant de l'entité	Type de couche	N° du glacier	Altitude	Abscisse de la source	Ordonnée de la source	Température de la source	Commentaire sur la température	Distance par rapport au front	Date de la mesure	Source de la donnée
Nom du champ	FID	shape	Id_glacier	alti	X	Y	T	T_comm	dist_fr	date_mesur	data
Type	pré-défini	pré-défini	texte	entier court	réel double	réel double	réel simple	texte	réel simple	texte	texte
Longueur	pré-défini	pré-défini	35	4	18	18	4	50	6	20	50
Décimales	pré-défini	pré-défini			15	15	2		2		
Commentaires, compléments				en mètre					en mètre		Nom de la personne
Exemples ou choix possibles	0	point	99	2500					2.5		Dupond
	1	point	298	2330					3.6	16 juin 2011	Martin
	2	point	57	2760					11.2		Haddock, modifié par Martin
	3	point	79	2505							
	4	point	166	2360							
	5	point	16	2500					4.8		

Table des sources

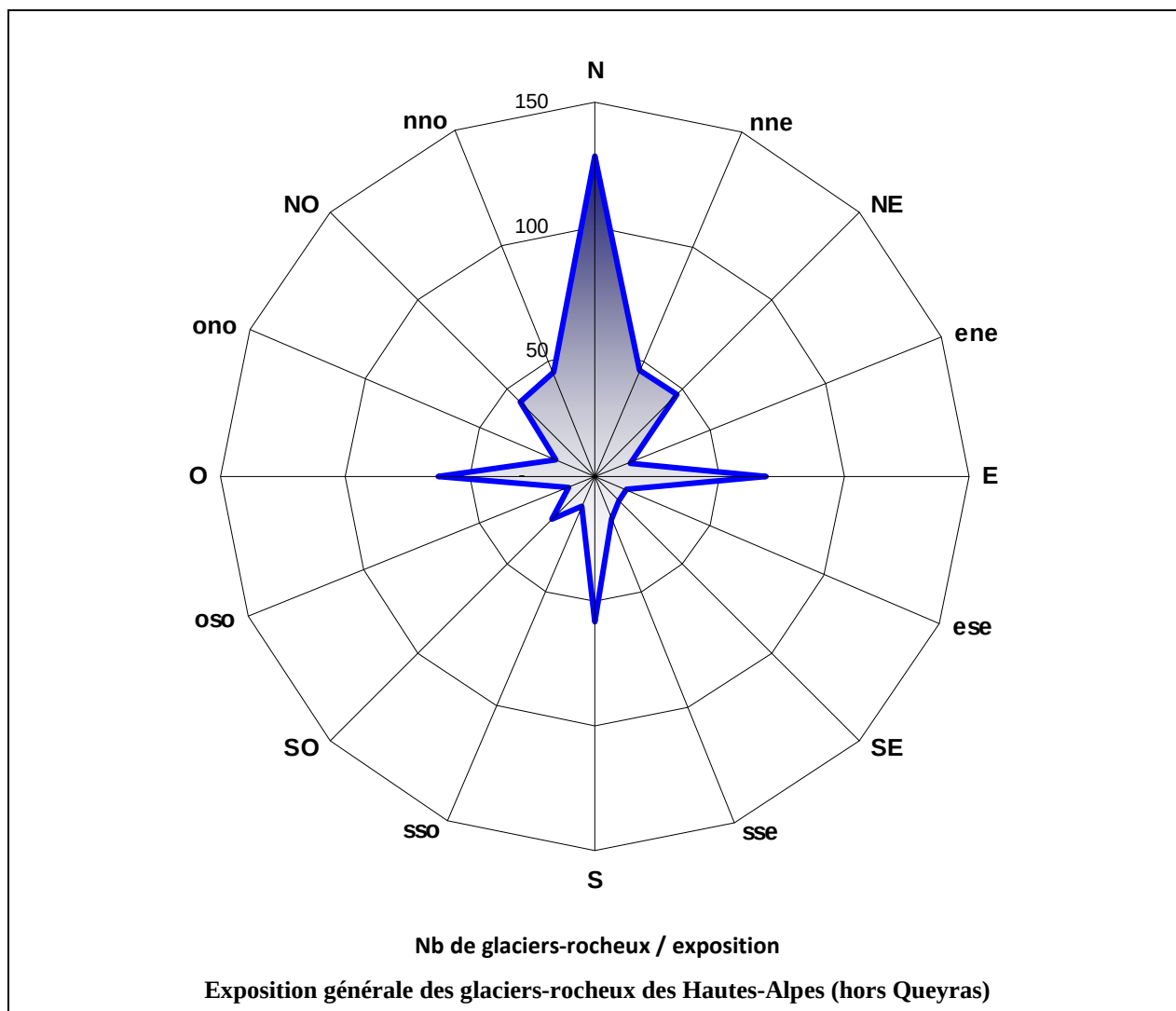
PREMIERES ANALYSES DES DONNEES RECUEILLIES SUR LES GLACIERS-ROCHEUX DES HAUTES-ALPES

5.6. L'ECHANTILLON

Notre inventaire nous a permis de constituer un échantillon de 625 glaciers-rocheux situés dans le département des Hautes Alpes (hors massif du Queyras).

Cet échantillon comprend aussi quelques glaciers très proches de la limite du département et des glaciers-rocheux étudiés : 14 glaciers-rocheux en Savoie (massif des Cerces) et 1 glacier-rocheux dans les Alpes de Haute Provence (massif du Parpaillon).

5.7. L'ORIENTATION DES GLACIERS-ROCHEUX

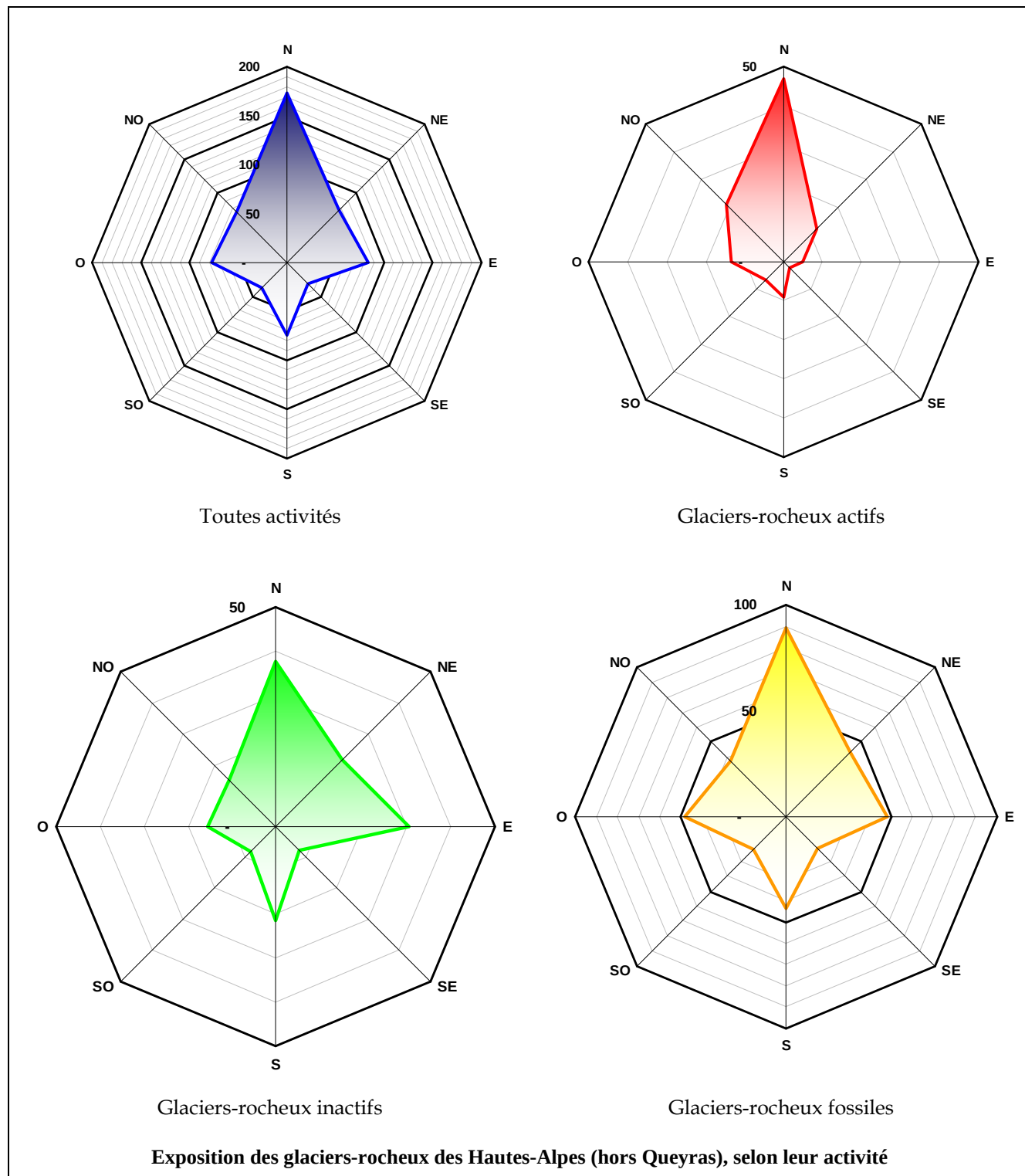


Sans surprise, une grande majorité des glaciers-rocheux est située en orientation Nord (21%), mais la proportion des glaciers-rocheux situés en exposition Sud est encore d'environ 11 %.

La répartition est équivalente entre les expositions Est et Ouest.

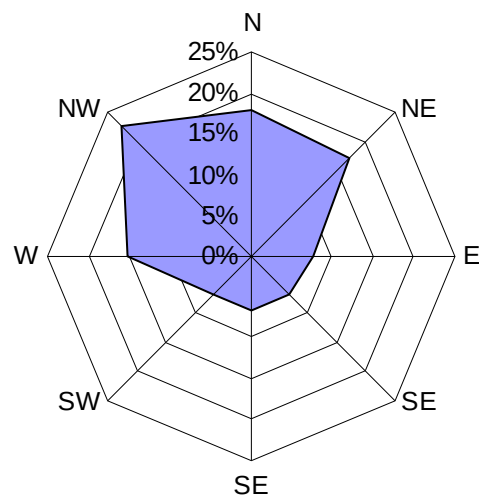
5.7.1. Activité des glaciers-rocheux : influence de l'orientation

Les schémas ci-dessous donnent le détail des orientations, selon l'activité du glacier-rocheux (avec lissage sur les 8 orientations principales).



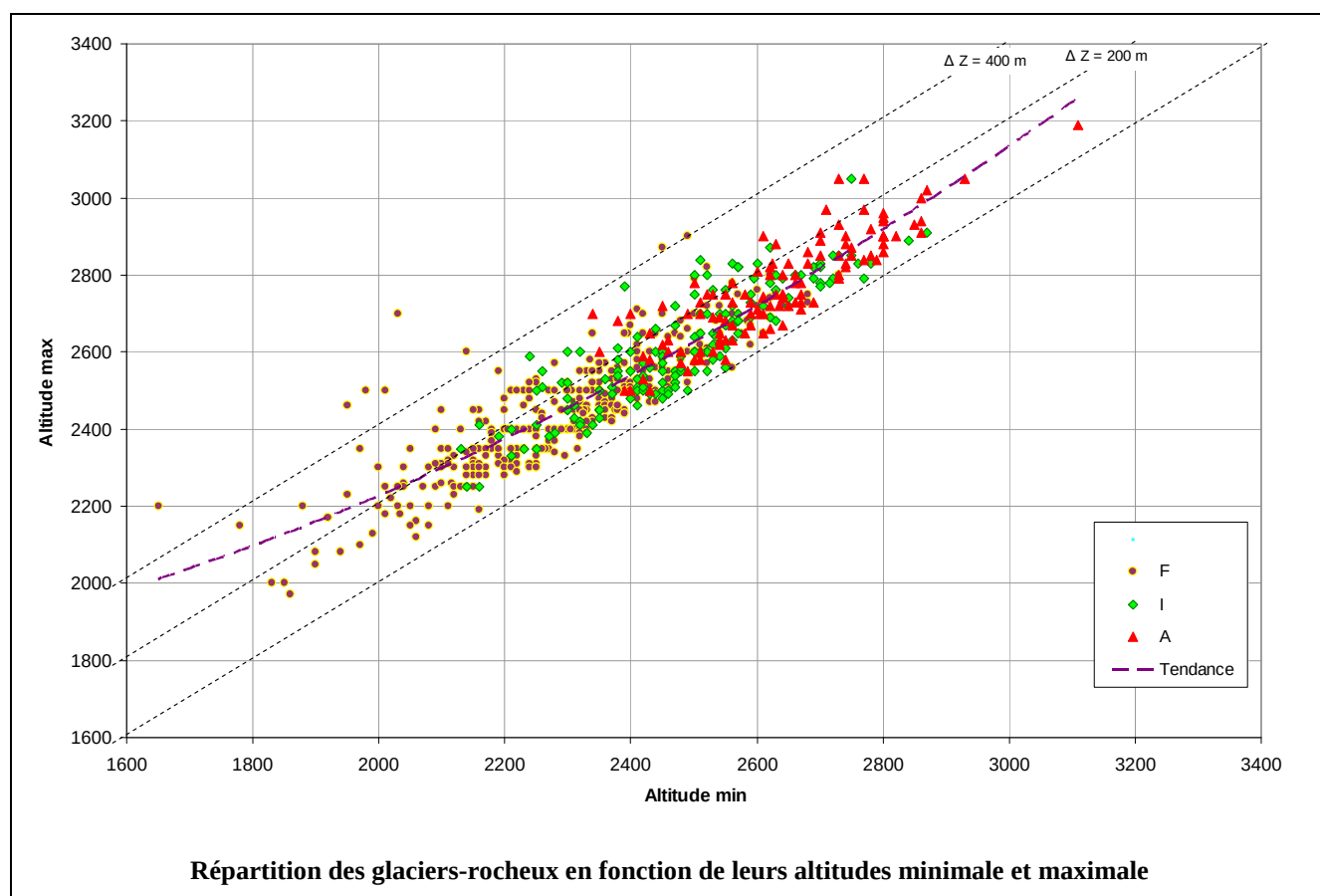
Les glaciers-rocheux actifs sont très nettement orientés au Nord.

A titre de comparaison, nous donnons ci après la répartition trouvée par Monnier, dans une région très proche (Haute vallée de l'Arc, Savoie). Il y a toujours une très grande majorité des expositions au Nord, mais un décalage plus sensible vers l'Ouest.



Exposition des parois ou des cirques situés à l'amont des glaciers-rocheux (%). Savoie, Haute Vallée de l'Arc - Selon Monnier - 2004

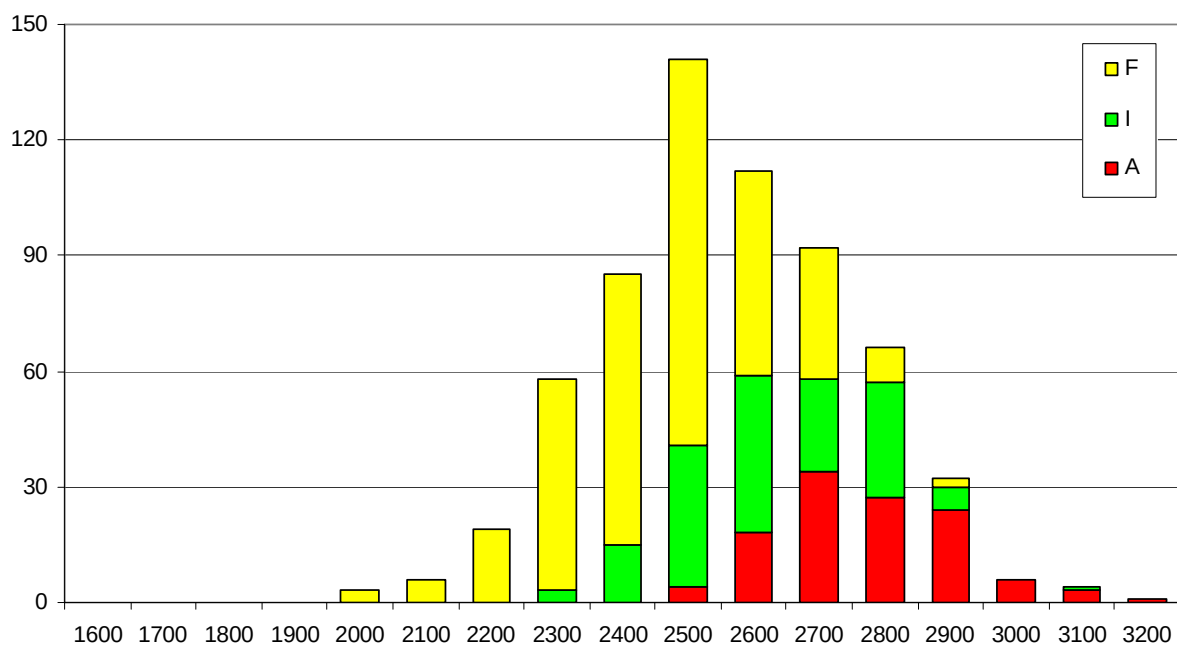
5.8. L'ALTITUDE ET LA DENIVELEE DES GLACIERS-ROCHEUX



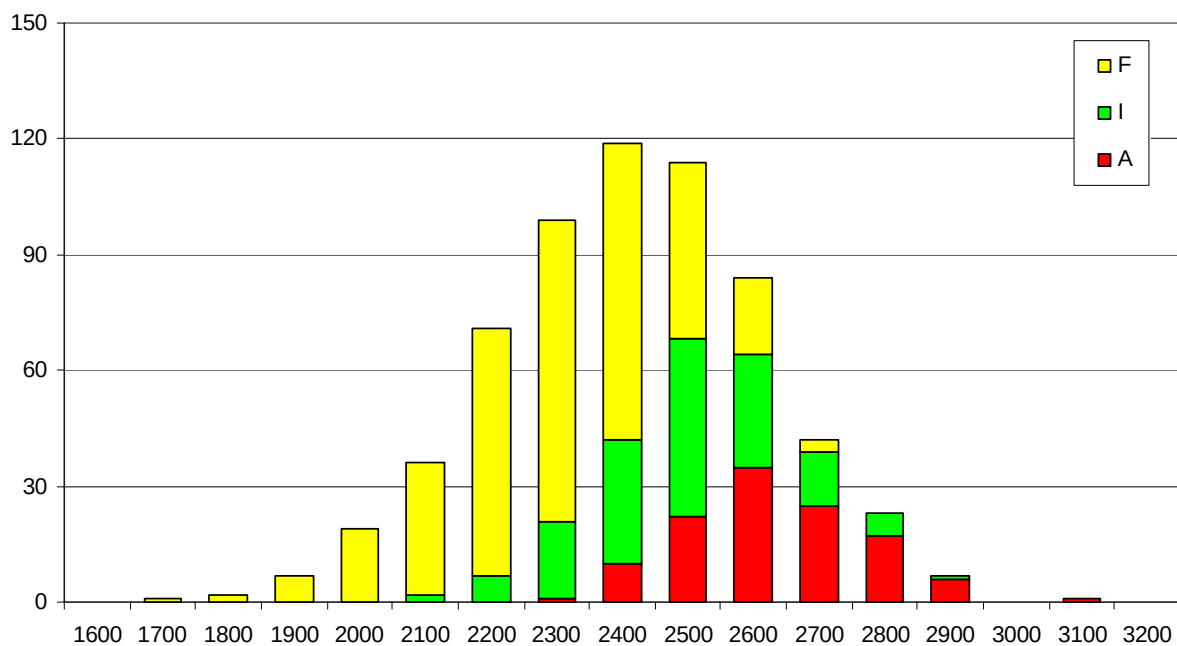
Comme cela était prévisible, les glaciers-rocheux fossiles occupent la frange altitudinale la plus basse et les glaciers-rocheux actifs la frange la plus haute.

Les dénivelées les plus importantes correspondent à d'anciens glaciers-rocheux, aujourd'hui fossiles.

La dénivelée moyenne des glaciers-rocheux actifs aujourd'hui est de l'ordre de 100 à 150 m.

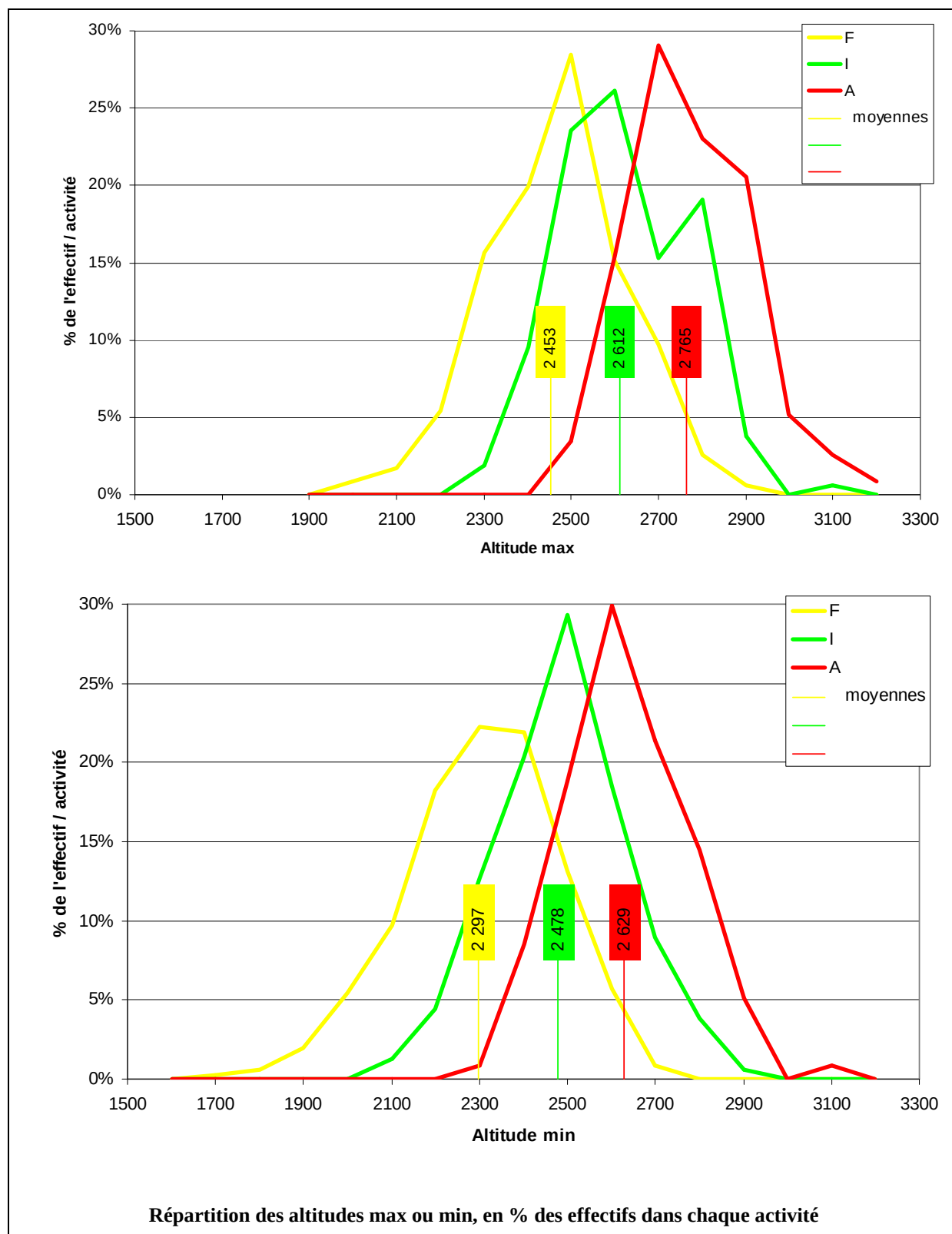


Altitude maxi



Altitude mini

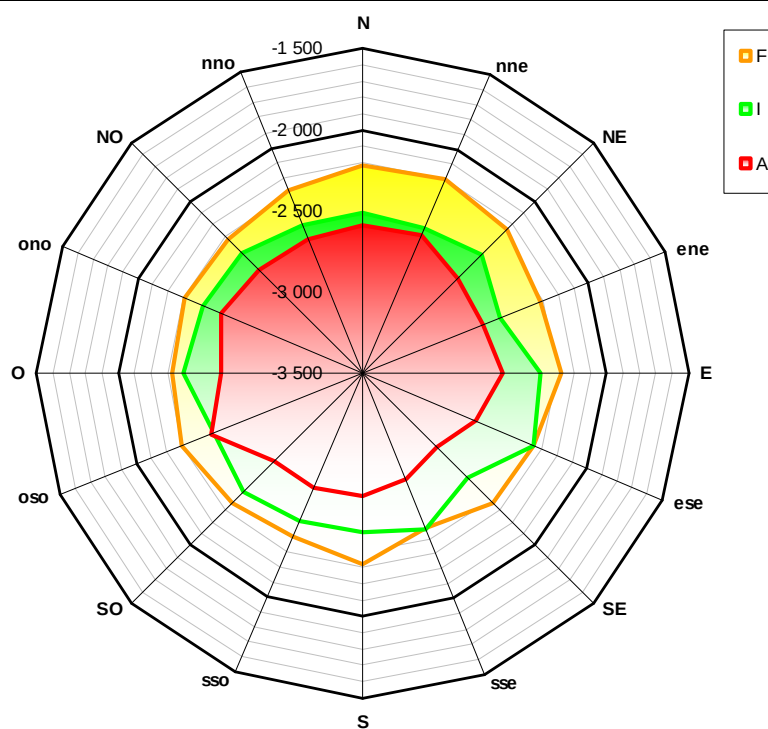
Répartition des glaciers-rocheux en fonction de leurs altitudes max ou min et selon leur activité



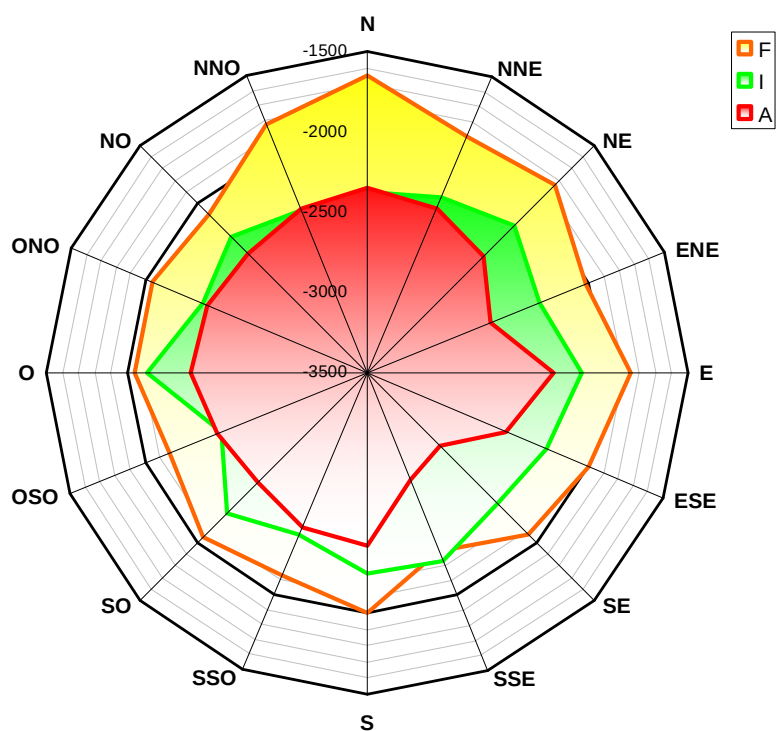
Ces graphiques de répartition des glaciers-rocheux en fonction de l'altitude montrent :

- une remarquable régularité des répartitions
- une nette distinction entre les populations « actifs » / « inactifs » / « fossiles »
- une différence de l'ordre de 150 à 170 m, sur la moyenne des altitudes, entre « actifs » et « inactifs » ainsi qu'entre « inactifs » et « fossiles ».

5.8.1. Altitudes des fronts de glaciers-rocheux : influence de l'orientation ?



moyenne des altitudes atteintes par les fronts de glaciers-rocheux

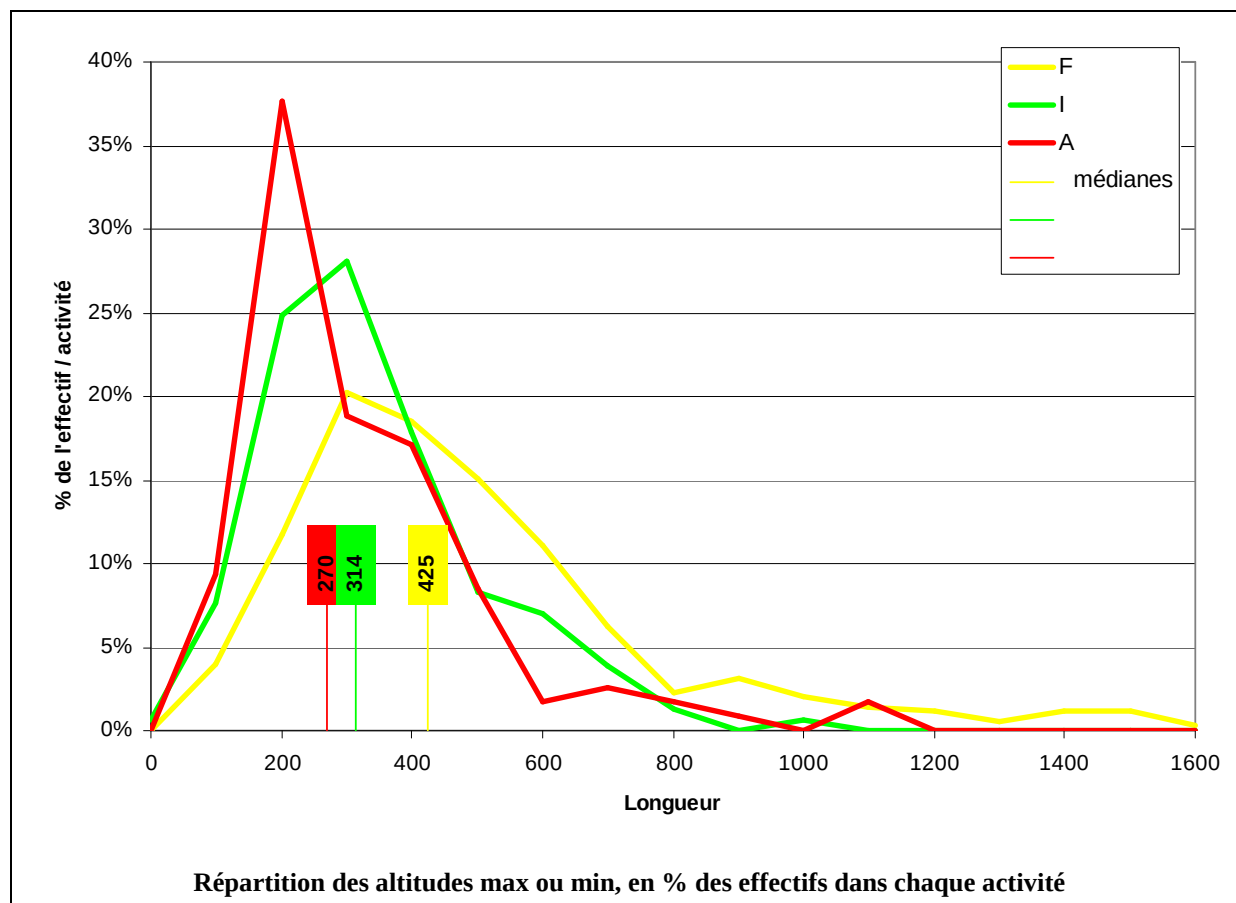


altitudes les plus basses atteintes par les fronts de glaciers-rocheux

Influence de l'exposition sur les altitudes des fronts de glaciers-rocheux

Ces graphiques mettent en évidence une faible influence de l'exposition sur l'altitude des fronts des glaciers-rocheux (et même si, pour les glaciers-rocheux fossiles, les altitudes les plus basses correspondent quand même aux expositions nord).

5.9. LA LONGUEUR DES GLACIERS-ROCHEUX



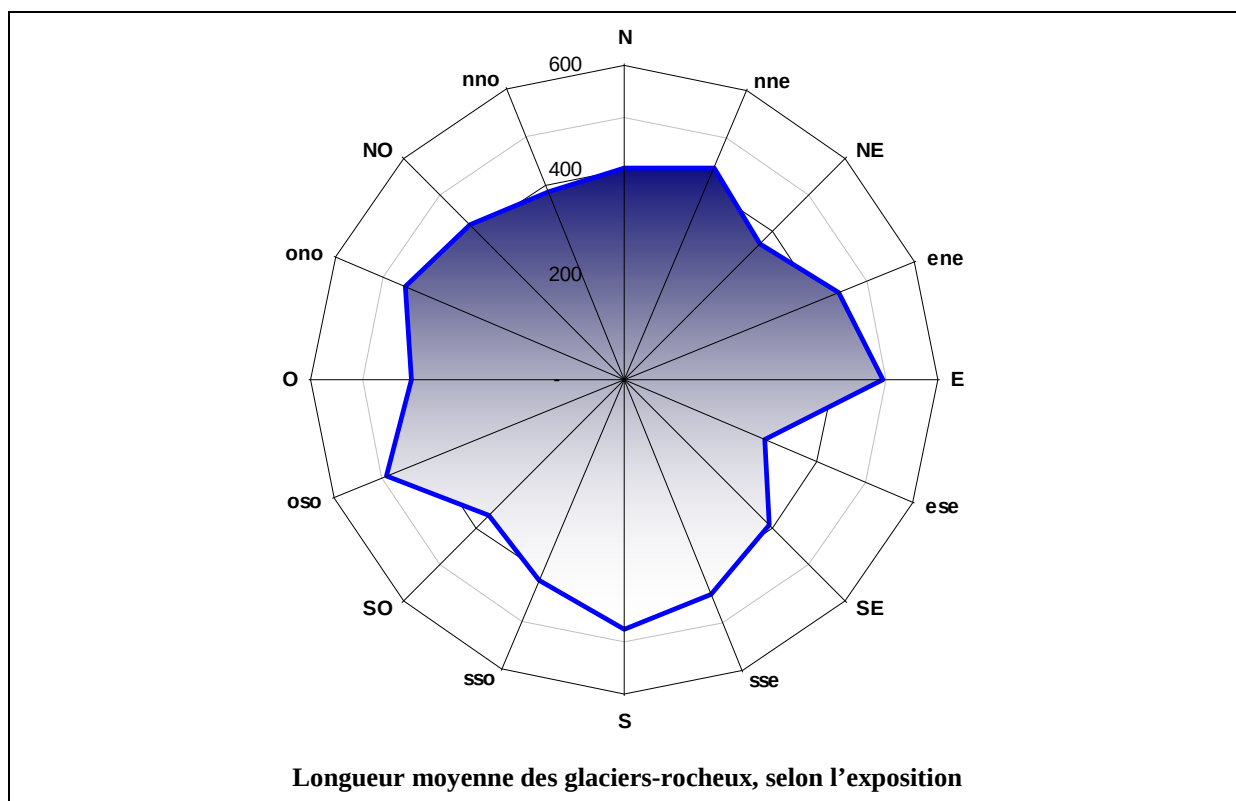
La très grande majorité des glaciers-rocheux (90 %) fait moins de 600 m de longueur.

La répartition des longueurs montre des différences entre les 3 populations : en général, les glaciers-rocheux actifs sont plus courts que les glaciers-rocheux inactifs, eux-mêmes plus courts que les glaciers-rocheux fossiles.

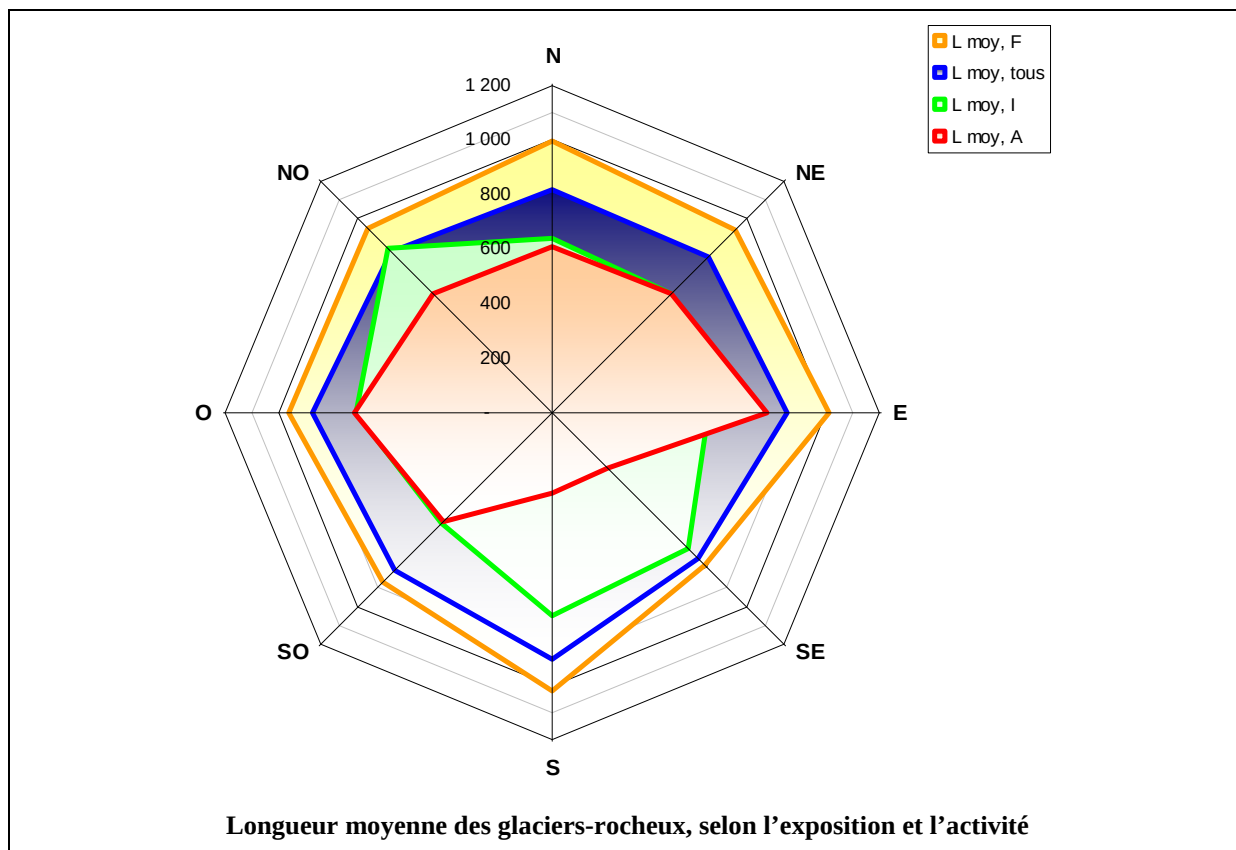
Le glacier-rocheux le plus long fait 1.561 m.

Les 16 glaciers-rocheux les plus longs sont tous fossiles.

5.9.1. Longueur des glaciers-rocheux : influence de l'orientation



Comme on l'a vu plus haut, les glaciers-rocheux sont nettement plus nombreux en exposition nord. Par contre, la figure ci-dessus montre que l'exposition ne semble pas influencer sur la longueur des glaciers-rocheux.



La figure ci-dessus montre quand même que les glaciers-rocheux actifs sont significativement plus longs en exposition nord (alors que ce n'est pas le cas pour les autres activités, les glaciers-rocheux fossiles montrant même une remarquable constance dans leur longueur moyenne, quelle que soit l'exposition).

5.10. CONCLUSIONS

5.10.1. Répartition des glaciers-rocheux dans les Hautes-Alpes

Altitude minimale des fronts de glaciers-rocheux

	Actifs	Inactifs	Fossiles
Altitude la plus basse relevée	2.350	2.130	1.650
Moyenne des altitudes minimales	2.630	2.480	2.300
Ecart type	2.500 à 2.770	2.330 à 2.630	2.120 à 2.470

De manière exceptionnelle, on peut trouver quelques fronts de glaciers-rocheux fossiles en dessous de 2.000 m d'altitude (2,5 % des glaciers-rocheux recensés).

On ne peut trouver des fronts de glaciers-rocheux actifs qu'au dessus de 2.350 m d'altitude.

5.10.2. Influence de l'exposition

Deux points particuliers mis en évidence au cours de notre recensement méritent aussi l'attention.

L'exposition influe beaucoup sur la répartition (en nombre) des glaciers-rocheux (ils sont évidemment beaucoup plus nombreux en exposition nord).

Par contre, l'exposition influe peu sur la longueur des glaciers-rocheux ou sur l'altitude de leur front aval (ces 2 paramètres étant liés). Ce constat est a priori étonnant et méritera des analyses complémentaires.

6. GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES NATURELS ASSOCIES

6.1. REFERENCES, EXEMPLES COMMENTES DANS LES ALPES

Les aléas liés aux glaciers-rocheux sont assez diversifiés et encore aujourd'hui largement méconnus. Plusieurs sites permettent néanmoins d'illustrer concrètement quelques phénomènes potentiellement dangereux ou gênants, en lien avec les glaciers-rocheux ou avec la dégradation du pergélisol.

On retient ici la typologie proposée par Krysiecki (2008), et même si le vocabulaire utilisé dans cette classification ne nous paraît pas toujours très clair. Il distingue trois grandes catégories de phénomènes : gravitaires (influence prépondérante de la pente), fluviatiles (influence prépondérante de l'eau à l'état liquide) et périglaciaires (influence prépondérante de l'eau à l'état solide).

Phénomènes		Exemple	Lieu	Année(s)
Gravitaires	éboulement / éboulis	Glacier rocheux de Tsarmine	Val d'Arolla (Valais, Suisse)	2003
	rupture du glacier	Glacier rocheux du Bérard	Massif du Parpaillon (04)	2006
	coulées de débris			
Fluviatiles	laves torrentielles	Glacier rocheux du Ritigraben Mattertal	Valais (Suisse)	1993
		Glacier rocheux de Suvretta	Haute-Engadine (Grisons)	
	coulées de boue			
	ravinements	Glacier rocheux de Suvretta	Haute-Engadine (Grisons)	
	vidanges brutales	Glacier rocheux du Fond de Chauvet	Massif de l'Ubaye (04)	1936-1938 ; 1956 ; 1970 ; 1991 ; 1997 ; 2007
Périglaciaires	tassements internes			
	fluage/glisement/surge	Glacier rocheux du vallon de Grüob	Valais (Suisse)	1975 à 2001
	formation de dépression			

Types de risques liés à la dégradation du pergélisol des glaciers-rocheux, selon la typologie de Krysiecki

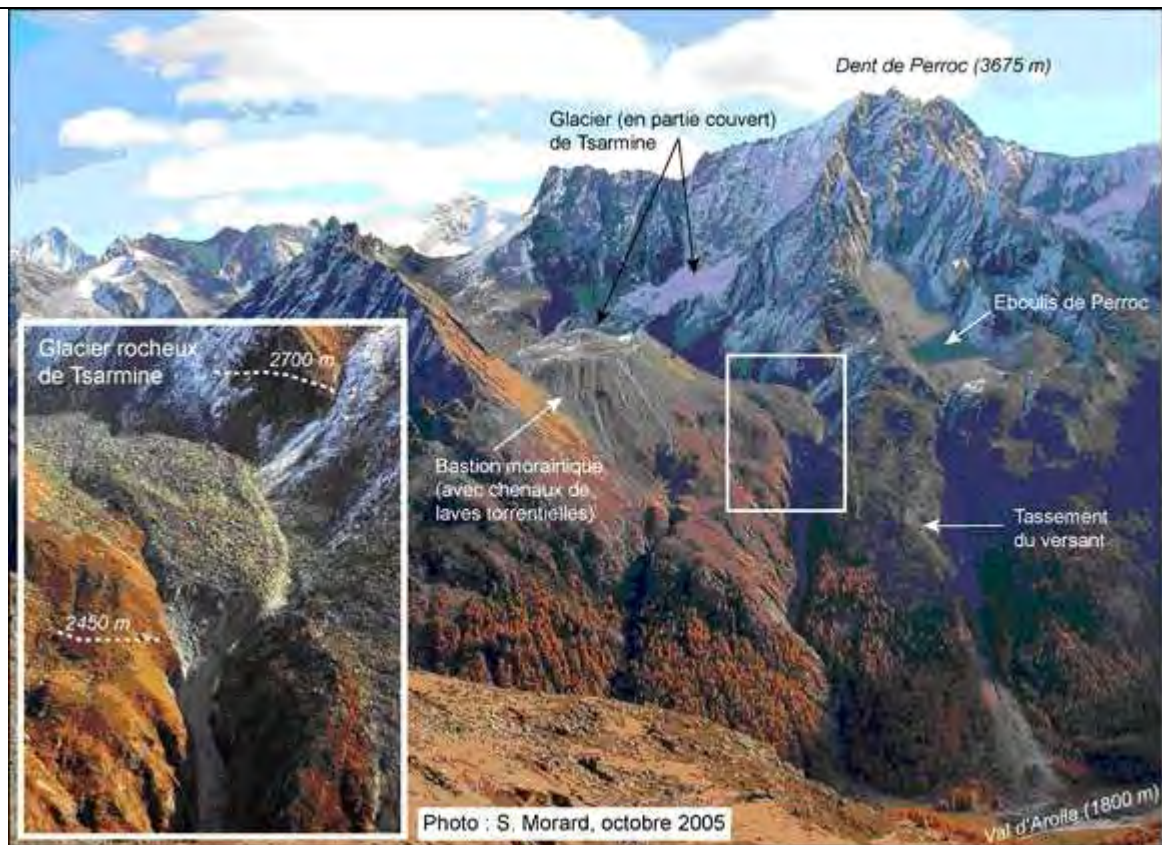
Nous reprenons ci-dessous ces différents exemples, en les commentant. Nous avons aussi, sur ces exemples, appliqué et détaillé nos grilles d'analyse.

6.1.1. Phénomènes « gravitaires »

6.1.1.1. Glacier-rocheux de Tsarmine : un exemple d'éboulement

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutale, éboulement	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations du glacier-rocheux de Tsarmine, selon notre grille d'analyse



Vue du versant de Tsarmine dans le Val d'Arolla (VS).

Le glacier-rocheux de Tsarmine semble s'être réactivé ou avoir subi une accélération récemment (déplacement du front d'environ 20- 30 mètres entre 1983 et 1999). Son front très raide et très instable se situe juste à l'amont d'un couloir escarpé, devenant potentiellement une source d'instabilités de versant.

Les phénomènes sur ce glacier-rocheux sont de plusieurs natures. Il est situé dans un ensemble plus vaste et complexe comprenant notamment :

- dans un premier vallon, un glacier couvert terminé à l'aval par un bastion morainique (dont un petit lac proglaciaire), des moraines de poussée et un petit glacier-rocheux
- dans un deuxième vallon, un glacier-rocheux assez important. C'est le comportement de ce glacier-rocheux qui est analysé ici.

Ce glacier-rocheux est sur un versant pentu et, surtout, son front domine des pentes fortes.

Il a connu une avancée assez rapide : jusqu'à 2 m/an dans la période 1983 - 1999.

Cette avancée s'est notamment traduite par un front de glacier-rocheux aujourd'hui très raide, et dominant directement les pentes fortes du talweg.

Le front a déjà libéré des matériaux et le risque de laves torrentielles prenant naissance dans ces matériaux semble élevé: « Il n'y a pas de traces de récentes laves torrentielles produites par le glacier rocheux. Cependant, un tel événement est hautement probable ces prochaines années (ou décennies). La quantité de matériaux qui s'est éboulée du front est en effet considérable. » LUGON R., DELALOYE R. et PERRUCHOUD E. (2008), *Aléas naturels en zone de pergélisol et détection des risques, Alpes valaisannes, Suisse*. Actuellement, par l'avancée du front et par l'érosion régressive qui a érodé une partie du front, la pente du front du glacier-rocheux est très raide et donc instable.

6.1.1.2. Glacier-rocheux du Bérard : un exemple de rupture brutale de glacier-rocheux

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	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

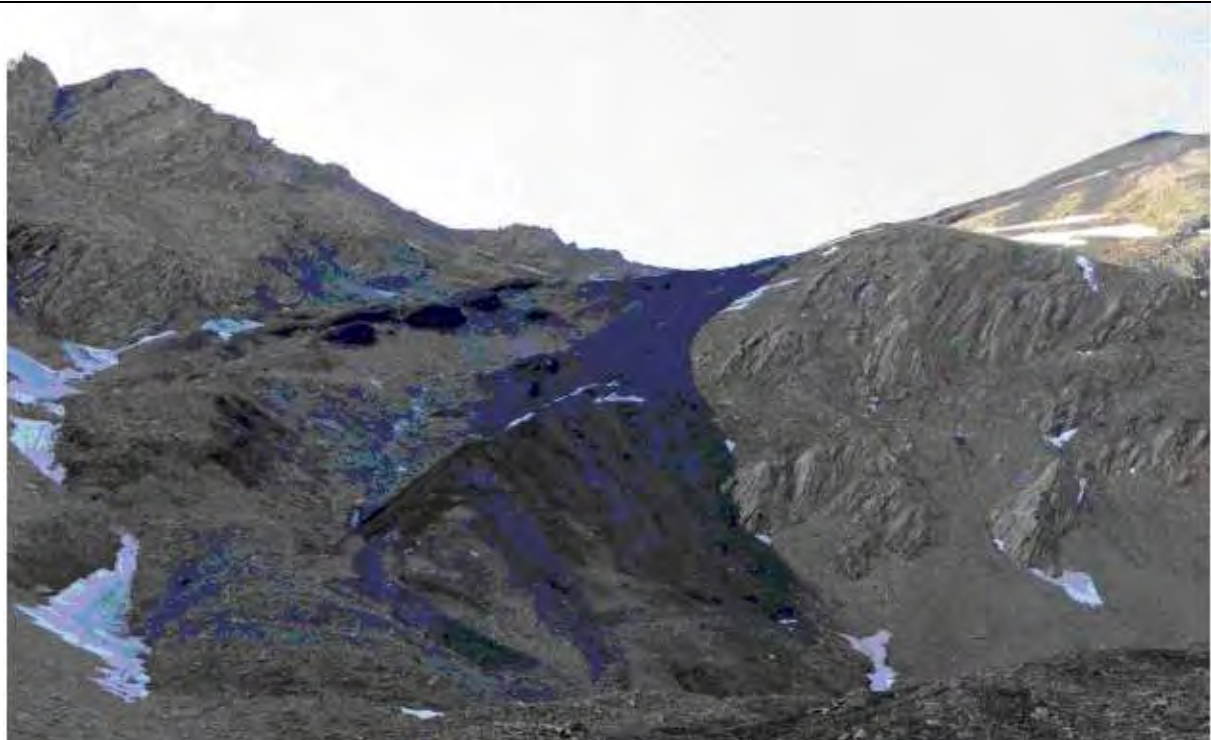
Phénomènes et cotations du glacier-rocheux du Bérard, selon notre grille d'analyse

Le vallon du Bérard est situé dans le massif du Parpaillon entre 2200 et 3000 mètres d'altitude (Alpes de Haute Provence). Ce vallon abrite un glacier-rocheux orienté Nord. Les connaissances récentes sur ce site datent des événements survenus en 2006.

Au cours du mois d'août 2006, s'est produit un glissement de terrain ou plus précisément le glissement de « paquets de blocailles pris dans une matrice de glace » (Krysiecki, 2008). La présence abondante de glace a révélé la présence d'un pergélisol, jusque là inconnu sur ce site. Le volume de matériaux mobilisé est remarquable (près de 2 millions de m³).

Il est vraisemblable que, si ce glacier-rocheux n'avait pas été repéré avant 2006, c'est à cause de la lithologie des matériaux (très fine) et de mouvements de fluage peu marqués.

La niche d'arrachement est apparue entre 2 700 et 2 750 mètres d'altitude (soit l'altitude équivalente à l'isotherme -2°C). Depuis la canicule de 2003, il semble que la zone ait subi des affaissements, et, le 10 juillet 2006, un berger explique avoir vu comme « une forme de rimaye » au même niveau (repris par Krysiecki).



Le glacier-rocheux du Bérard et sa cicatrice de rupture de l'été 2006 (Source : J.M. KRYŚIECKI)

On peut aussi rechercher un phénomène déclencheur particulier qui aurait déstabilisé toute la masse en une seule fois. Il s'avère que deux orages violents se sont produits vers le 19 août (avec 50 à 90 mm de précipitations). La contribution de ces orages au glissement du glacier-rocheux est difficile à estimer, mais le rôle de l'eau est généralement primordial lors de tels événements.

Actuellement, les conséquences de cet événement sont limitées géographiquement à ce seul vallon éloigné des enjeux de la vallée. Des mouvements continuent de se produire.

6.1.2. Phénomènes « fluviatiles »

6.1.2.1. Glacier-rocheux de Ritigraben Mattertal : un exemple de lave torrentielle

	SYNTHESE DES PHENOMENES BRUTAUX POUVANT CREER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHENOMENES POUVANT CREER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	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

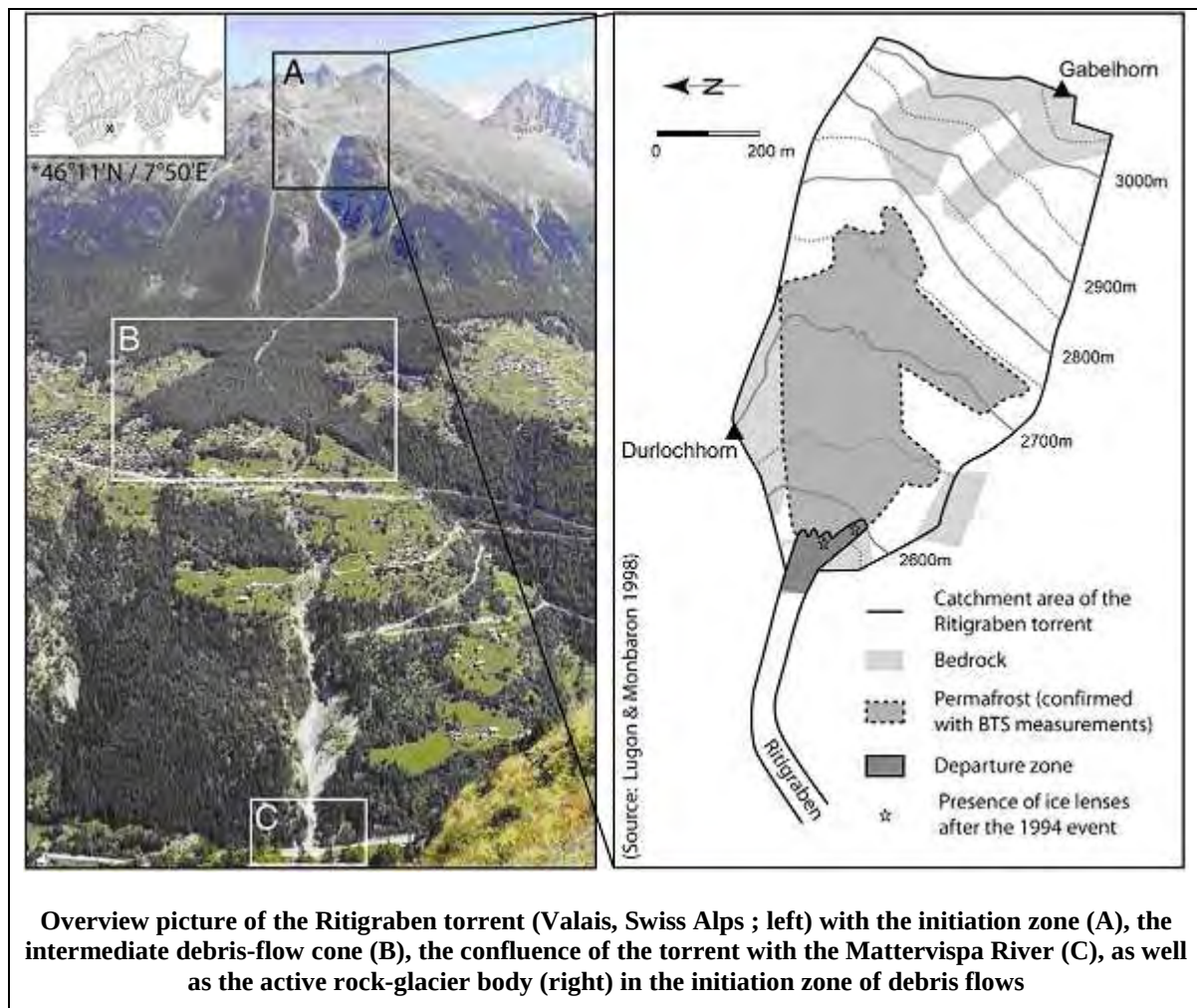
Phénomènes et cotations du glacier-rocheux de Ritigraben Mattertal, selon notre grille d'analyse

Le torrent de Ritigraben est situé sur le versant ouest de la vallée de Mattertal (Suisse – Valais). On a recensé 124 laves torrentielles par des études de dendrochronologie entre 1706 et 2005 (étude réalisée sur un échantillon de 1204 arbres), soit une moyenne de 3,26 événements par décennie (Lugon et Stoffel, 2010, reprenant les travaux de Béniston et Stoffel de 2006).

Dans l'étude de 2008 sur les « Aléas naturels en zone de pergélisol et détection des risques, Alpes valaisannes, Suisse ». LUGON R., DELALOYE R. et PERRUCHOUD E. rappellent que 2 zones de déclenchement des laves torrentielles ont été recensées sur ce torrent :

- une vers 1 360 m d'altitude (berges instables)
- l'autre entre 2 400 et 2 600 m d'altitude correspondant au front du glacier-rocheux et aux zones immédiatement en aval où s'accumulent les matériaux éboulés depuis le front.

L'événement majeur s'est produit en 1993, lorsqu'une lave torrentielle a emporté 6 000 m³ du front du glacier-rocheux (Lugon et Stoffel, 2010, reprenant les travaux de Zimmermann et al. de 1997). Elle faisait suite à un important épisode pluvieux, avec 115 mm de pluie en 72h. Après l'événement, on pouvait observer des lentilles de glaces massives au front du glacier-rocheux. Par leur fonte au cours de l'été suivant, elles ont provoqué l'érosion importante du front du glacier-rocheux.



Nous reprenons ici l'analyse du mécanisme de rupture et du rôle du pergélisol développée par les auteurs :

« Le mécanisme de rupture est dû au glissement de la couche active (la couche de gel/dégel saisonnière de 5 à 7 m d'épaisseur) sur le toit du pergélisol sursaturé en glace. Les précipitations intenses du 21 au 24 septembre 1993 (119.2 mm à la station météorologique de Grächen), combinées au drainage convergent vers la tête du chenal d'écoulement située au front du glacier rocheux, sur une pente fortement inclinée (30 – 40°), et ont saturé la couche active, déclenchant ainsi une lave torrentielle. Le toit du pergélisol a donc agi comme une surface imperméable et limitatrice de l'érosion régressive. »

6.1.2.2. Glacier-rocheux de Suvretta : un exemple de ravinement sur glacier-rocheux

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux, ravinement	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou ravinement	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Départ d'une lave torrentielle, très fort ravinement	Glissement, rupture brutale	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle, très fort ravinement	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations du glacier-rocheux de Suvretta, selon notre grille d'analyse

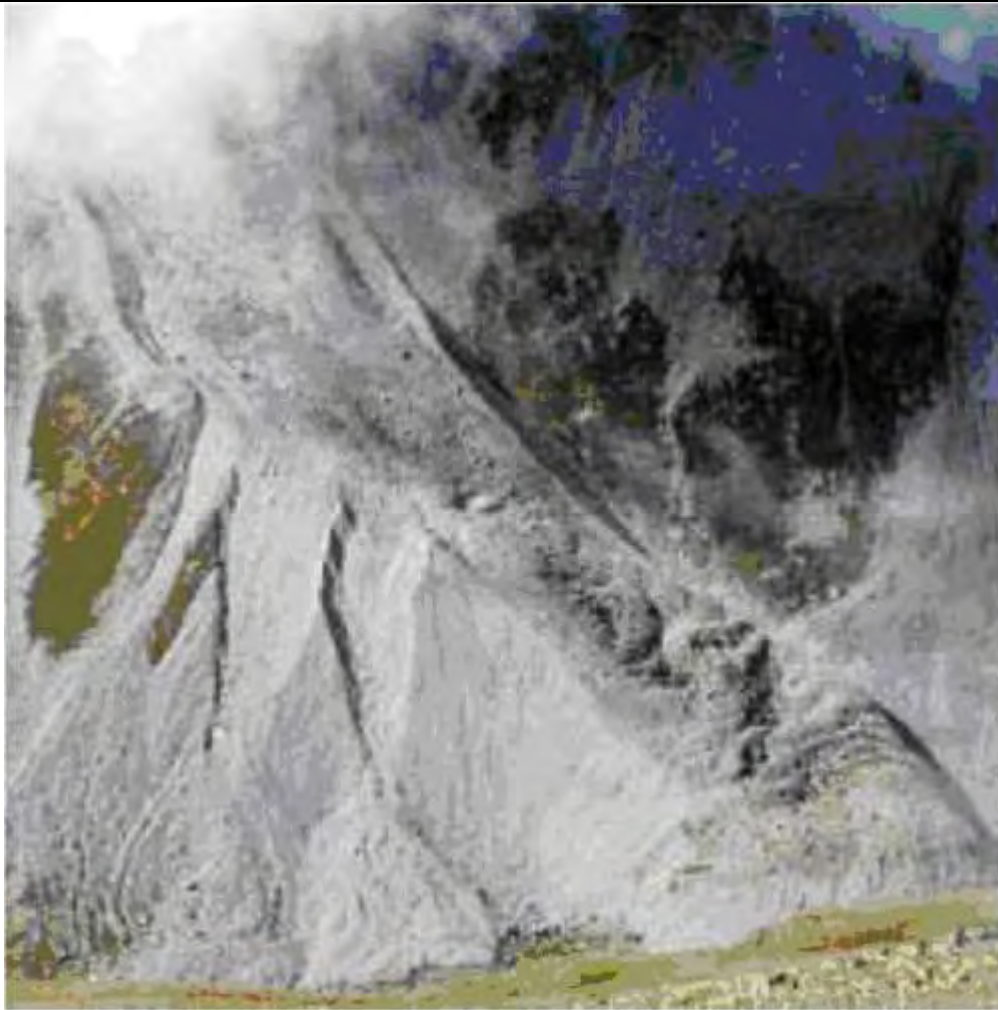


Photo : Regula Frauenfelder

**Le glacier-rocheux actif de Suvretta, sur le flanc oriental du Piz Julier, en Haute Engadine.
On distingue un fort ravinement sur les marges latérales du front**

Cette photographie illustre bien les processus de ravinement sur les fronts de glaciers-rocheux. On distingue clairement deux cônes d'éboulis sur le flanc droit du glacier-rocheux de Suvretta.

6.1.2.3. Glacier du Plan de Chauvet : un exemple de vidange brutale de thermokarst

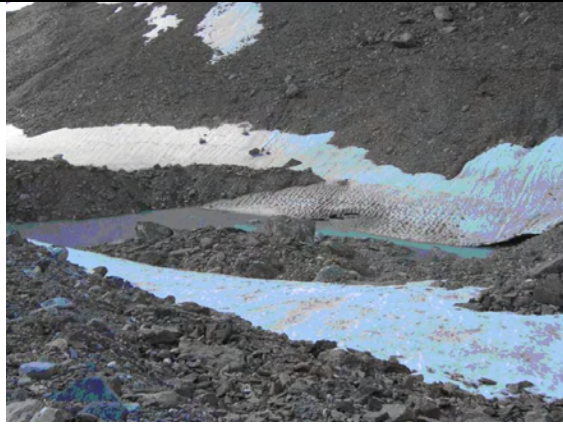
	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITÉ				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	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

Phénomènes et cotation du glacier du Plan de Chauvet, selon notre grille d'analyse

Le glacier du Plan de Chauvet se situe dans la vallée de l'Ubaye (Alpes de Haute Provence), et plus particulièrement sur le versant ouest de l'aiguille de Chambeyron.

Il s'agit d'un glacier couvert, entouré de glaciers-rocheux latéraux, sur lequel s'est formé un thermokarst d'une longueur estimée à 800 mètres (Buckel, 2010).

Bien que le lac soit situé sur un glacier couvert, nous avons jugé utile de rappeler ici cet exemple, pour illustrer les problématiques des lacs sur ou proches des glaciers.



Le thermokarst du Plan de Chauvet en juillet 2011 (source A. Riguidel)



La cuvette du thermokarst en aval d'un glacier-rocheux, (source : A. Riguidel)

Depuis l'entre-deux guerres, on dénombre 6 vidanges brutales en 1936, 1956, 1970, 1991, 1997 et la dernière en 2008.

Le caractère répétitif du phénomène a favorisé le lancement d'un programme de recherche et de surveillance du site par le service du RTM des Alpes de Haute Provence. La surveillance consiste en une visite annuelle du site pour évaluer les évolutions. Ainsi, le compte rendu de la visite du glacier de Chauvet du 7 juillet 2011 mentionne "la forme concave du glacier-rocheux permet une possibilité de stockage d'eau importante et semblant supérieure à celle observée les années précédentes" (M. Peyron, RTM04, 2011).

Ce phénomène de vidange peut-être dangereux parce qu'il est imprévisible (méconnaissance des systèmes qui régissent les circulations d'eau et les vidanges).

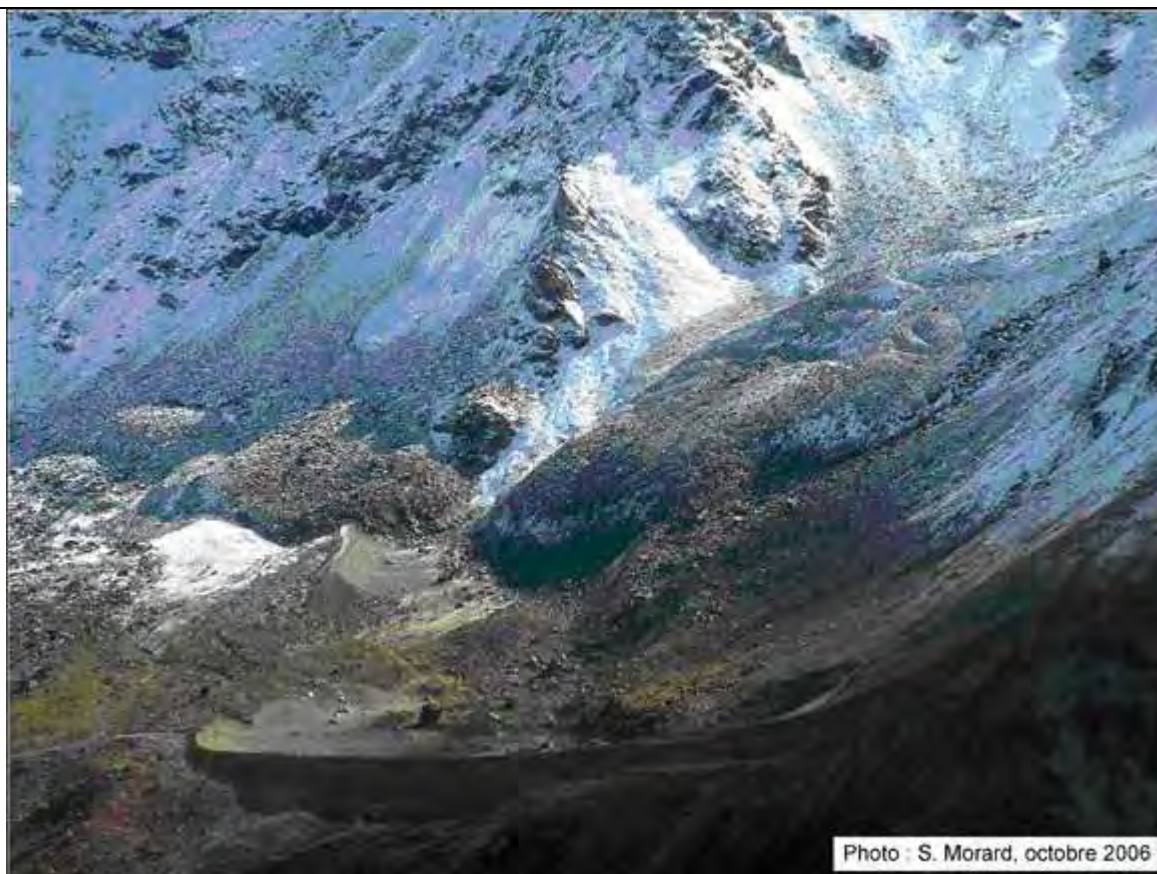
Le niveau d'eau, la forme et le volume de la dépression qui peut se remplir chaque année sont les points majeurs notés lors des missions de surveillance.

6.1.3. Phénomènes périglaciaires

6.1.3.1. Glacier-rocheux de Grüob un exemple de glacier-rocheux en surge

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 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	Déplacement très important (surge), rupture du glacier	Déplacement très important (surge), rupture du glacier	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle, déplacement important du front (plusieurs mètres par an)	Départ d'une lave torrentielle, déplacement important du front (plusieurs mètres par an)	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations du glacier-rocheux de Grüob, selon notre grille d'analyse



Glacier-rocheux en surge du vallon de Grüb (Vallée de Tourtemagne, VS).

Les crevasses sur la formation sont bien visibles. Les digues situées à l'aval ont été érigées pour protéger le village de Gruben des avalanches.

Le glacier-rocheux du vallon Grüb a avancé de 60 mètres entre 1975 et 2001. Ces valeurs (plus de 2 m / an en moyenne) sont caractéristiques d'un glacier en surge. Les déplacements du front ont parfois atteint 5 m / an.

De nombreuses crevasses sont apparues. Ces dernières mesuraient jusqu'à 12 m de hauteur (source : <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/ssgmfiches/pergelisol/3406.php>).

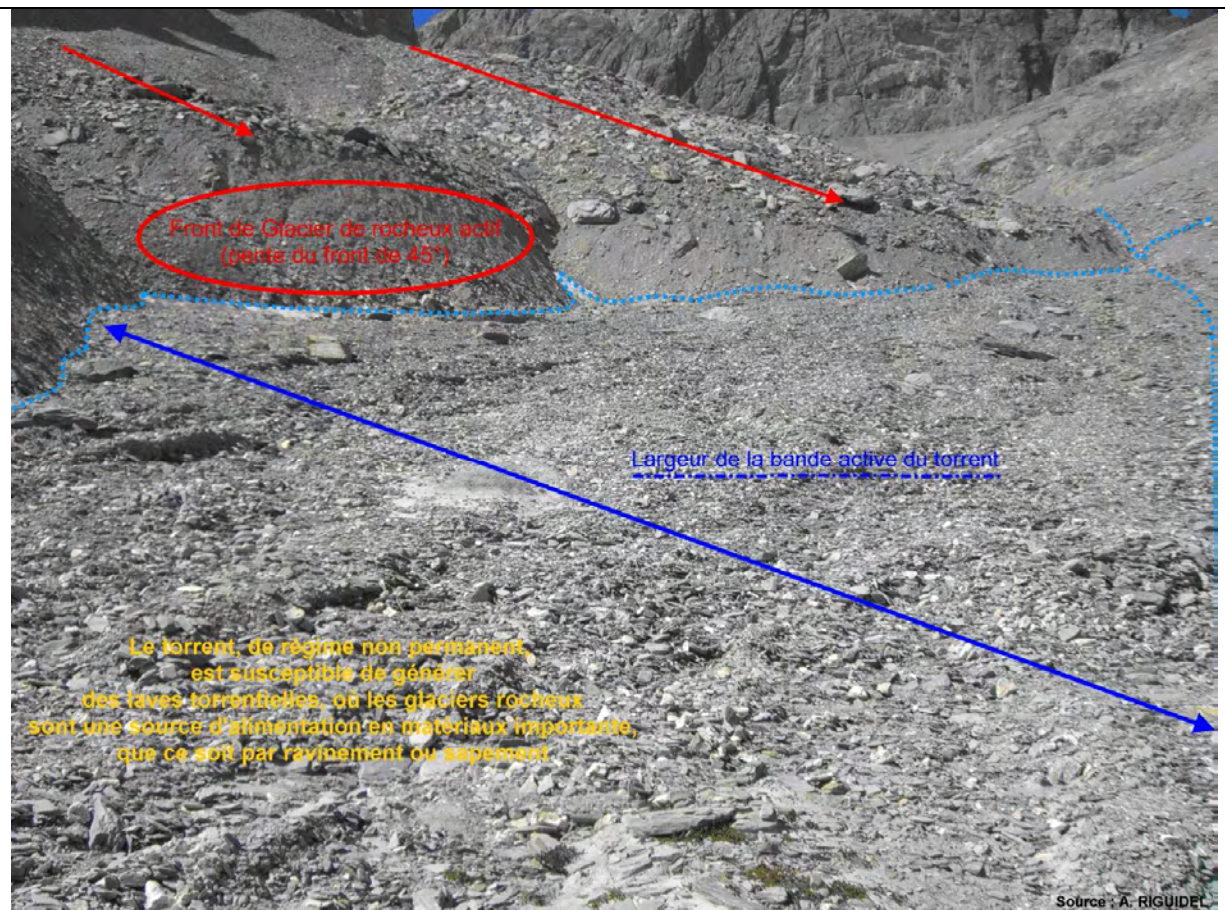
Un affaissement du glacier-rocheux s'est aussi produit.

La présence du village de Gruben en aval de ce glacier-rocheux a nécessité l'installation de digues pour assurer sa protection.

Plusieurs autres glaciers-rocheux sont actuellement en surge.

Parmi eux, on peut noter le glacier-rocheux du Petit Tsaté (voir Lambiel, 2006) et surtout le glacier-rocheux du Grabengüffer qui est un cas exceptionnel. En effet, sa progression moyenne est de 80 mètres par an, avec des pointes à 120 mètres par an. Malheureusement, il n'existe pas encore de documentation sur ce site, mais des études sont en cours. Ainsi, l'université de Fribourg a mis en ligne une webcam⁵ sur le site.

⁵ Source : <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/acag/doku.php?id=info:live>



L'interface glacier-rocheux et cours d'eau : une zone susceptible de départ de laves torrentielles

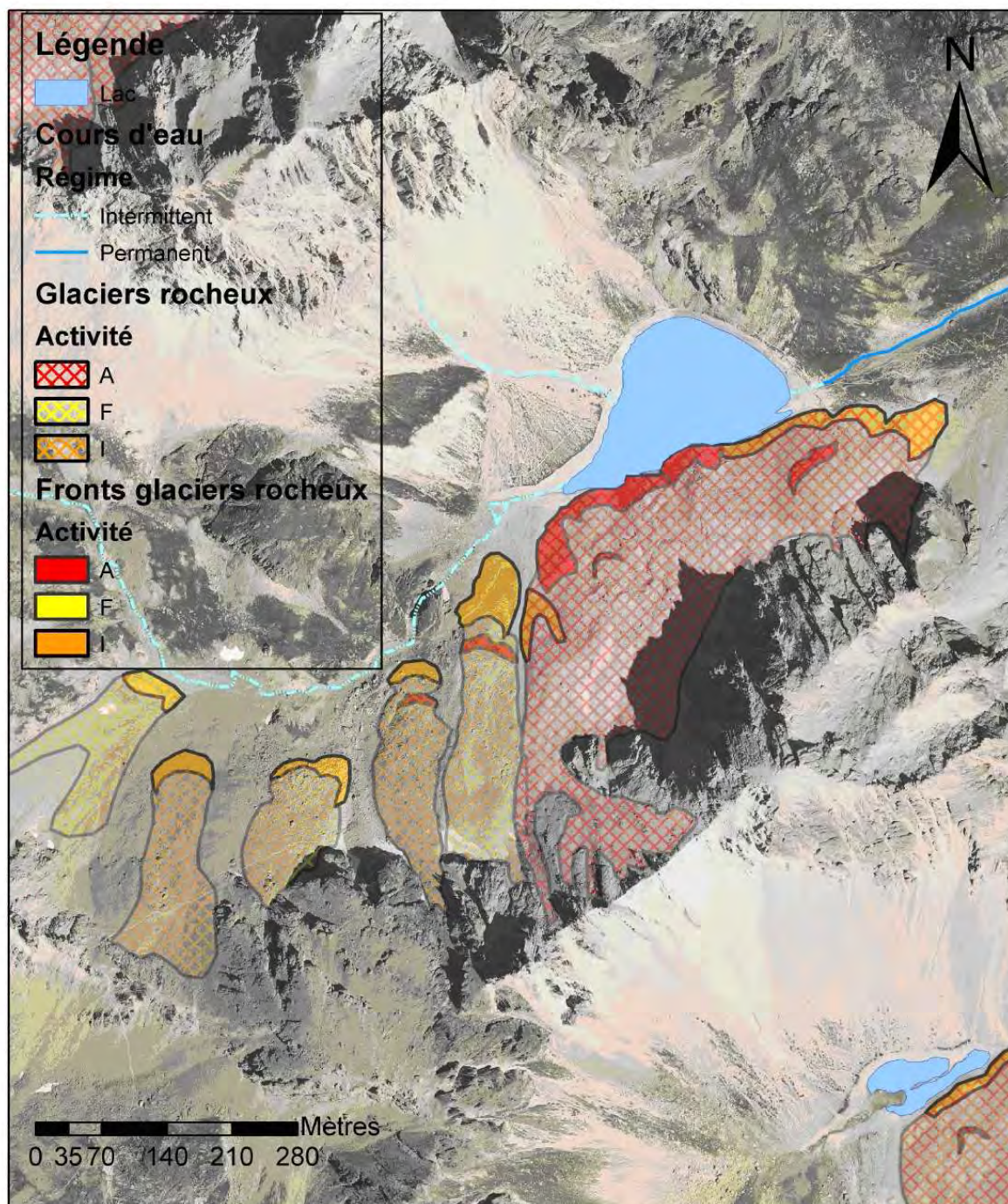
6.2. GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES NATURELS DANS LES HAUTES ALPES : EXEMPLES COMMENTES

6.2.1. Lac des Béraudes

	SYNTHESE DES PHENOMENES BRUTAUX POUVANT CREER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHENOMENES POUVANT CREER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus à un lac	Phénomènes dus à une dépression	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	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 en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au lac	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations des glaciers-rocheux de la combe du Lac des Béraudes

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple de la combe du lac des Béraudes, commune de Névache)



Source : RIGUIDEL A. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.1.1. Contexte géographique

Le lac des Béraudes se situe dans le massif des Cerces, sur la commune de Névache, à proximité du hameau de Saint Jacques. Ce lac est dominé par les crêtes de Béraudes au Sud (Point des Béraudes à 2 837 mètres), les crêtes de Moutouze au Nord (2 862 mètres) et les rochers de la Moulinière à l'Ouest (3 053 mètres). Le déversoir du lac à 2 504 mètres d'altitude s'ouvre vers l'Est et la rive droite de la Clarée, via le ruisseau des Béraudes.

6.2.1.2. Observations

L'accès au vallon du lac des Béraudes passe par le verrou du vallon. Ce verrou est constitué d'un dépôt morainique sur un socle rocheux affleurant par endroit. Le niveau du lac fluctue et le ruisseau des Béraudes présente un régime intermittent.

Les glaciers-rocheux du vallon occupent le versant Nord des crêtes de Béraudes.

Selon notre classification, il s'agit de glaciers-rocheux actifs pour la majeure partie, avec aussi des glaciers-rocheux inactifs de part et d'autre.

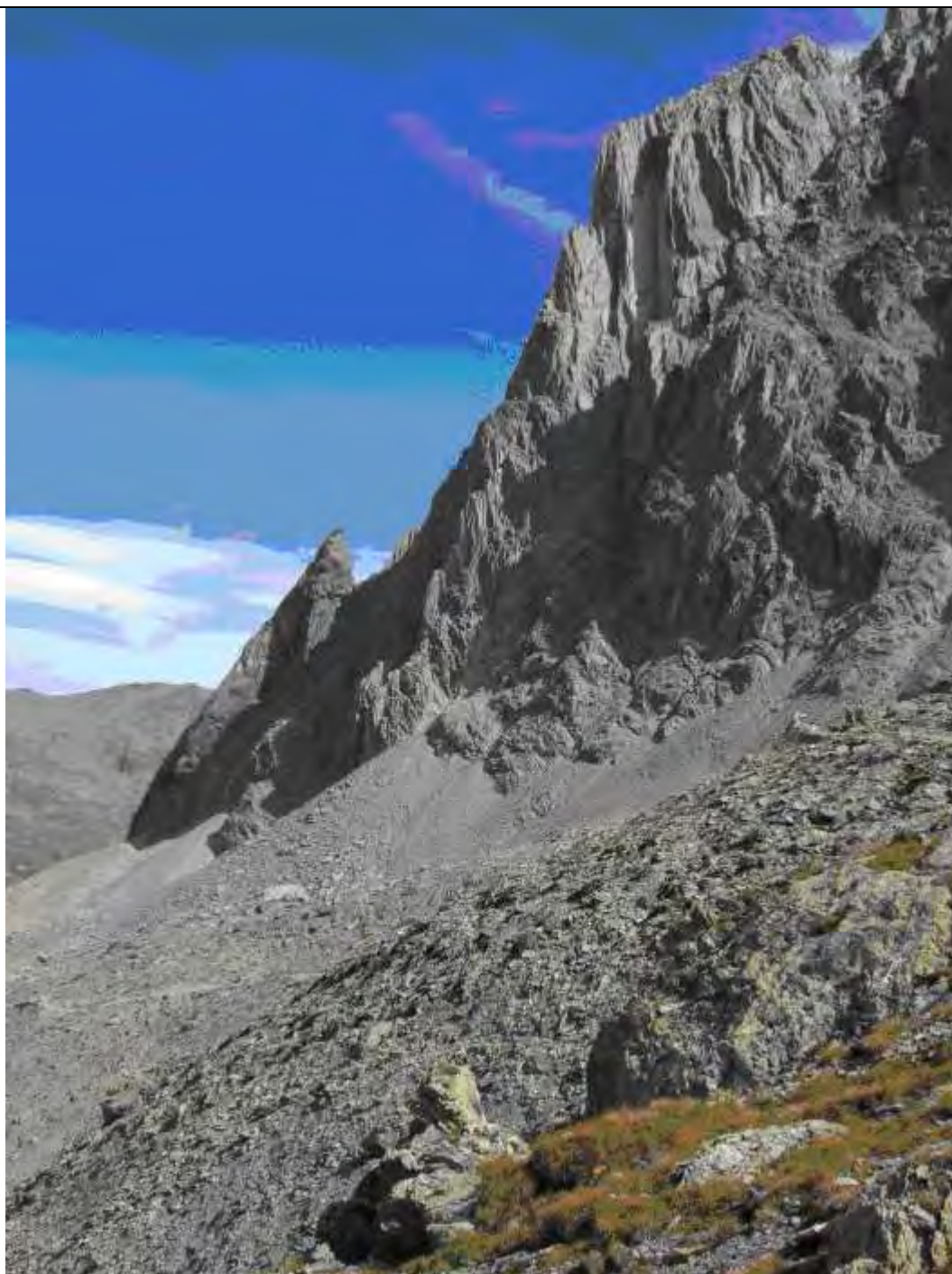
La visite du site effectuée le 8 septembre 2011 avec M. Schoeneich (professeur de géomorphologie à l'IGA et spécialiste du pergélisol) et la discussion avec M. Krysiecki incitent à relativiser l'inactivité des glaciers-rocheux cartographiés en amont. Il pourrait s'agir de formes discrètes de glacier-rocheux sur lithologie fine, avec notamment un front très peu prononcé. M. Krysiecki constate une ressemblance avec le glacier-rocheux du Bérard (voir partie 4.1.1.).

Les glaciers-rocheux actifs ont la particularité d'arriver directement au contact du lac des Béraudes et dessinent le contour de la rive droite du lac.

Les parois dominant ces glaciers-rocheux fournissent une alimentation importante en matériaux. Elles sont ainsi à l'origine d'un éboulement d'une taille significative, sans doute survenu au printemps 2011.

6.2.1.3. Conclusions / Perspectives

Avant les visites de terrain, un risque de débâcle brutale du lac pouvait être envisagé (rupture du verrou). L'état du site analysé sur le terrain, et tout particulièrement du verrou, ne permet pas de confirmer cette crainte. On peut plutôt retenir des **possibilités de vidanges par débordement**, liées à des ruptures sur le front du glacier-rocheux, à la chute de blocs ou d'une partie de la paroi rocheuse.



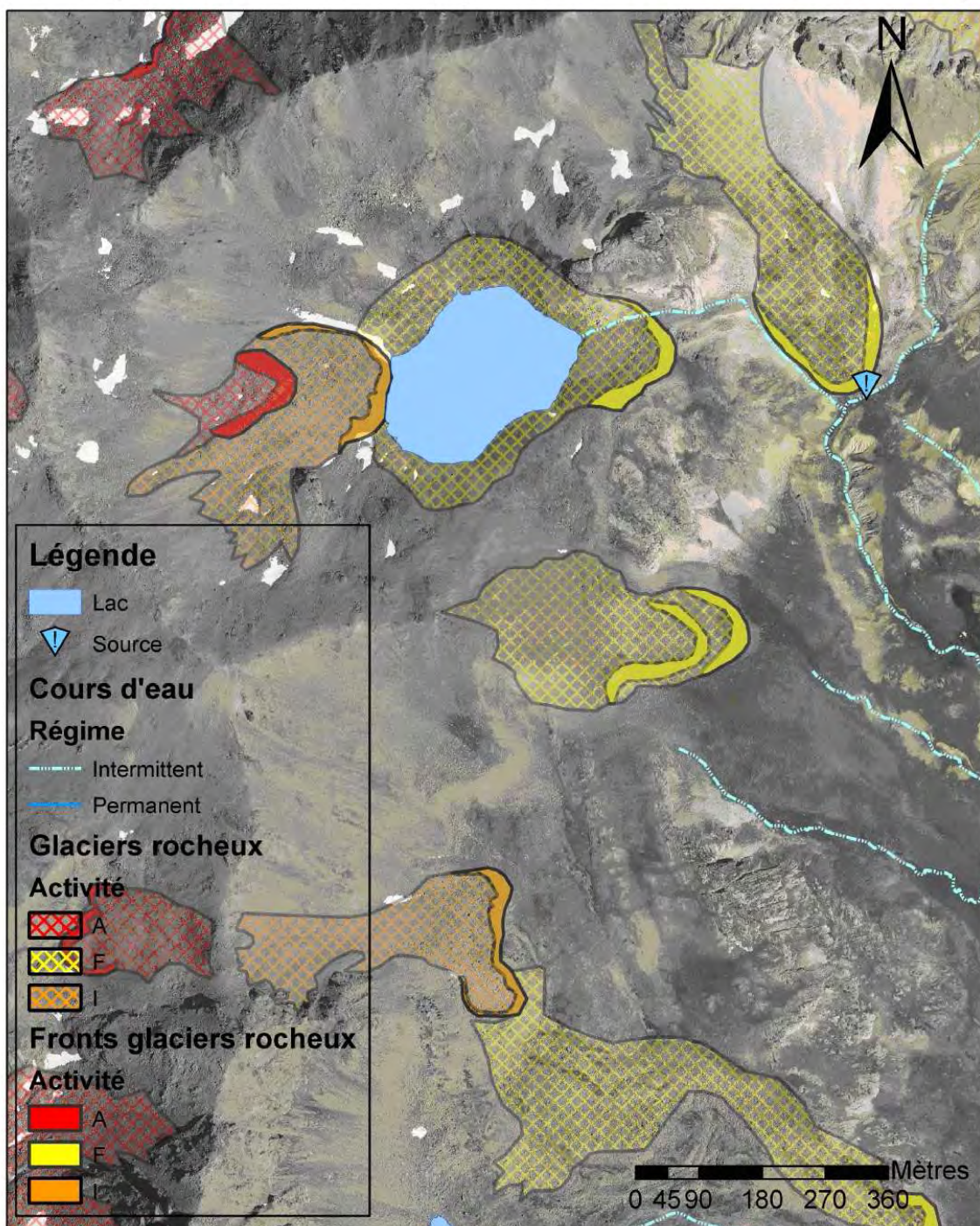
Eboulement à l'amont des glaciers-rocheux du vallon du lac des Béraudes (source : A. RIGUIDEL)

6.2.2. Lac Blanc

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux de la combe du Lac Blanc

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple du Lac Blanc, commune de Névache)



Source : RIGUIDELA. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.2.1. Contexte géographique :

Le lac Blanc est une des alimentations du torrent du Vallon, affluent de la rive gauche de la Clarée (commune de Névache). Il s'agit du plus grand lac de la Clarée par sa superficie (4,6 hectares), mais également l'un des plus hauts par son altitude (2 700 m). Il est situé à l'est du Pic du Lac Blanc (2 980m) et au sud du Rocher Blanc (2 856m).

6.2.2.2. Observations :

Le lac Blanc est situé dans une cuvette formée par un tassement du corps d'un glacier rocheux. Ce glacier-rocheux est qualifié de fossile. La partie rive gauche du front du glacier-rocheux fossile, aujourd'hui déversoir du lac, semble avoir été emportée par le passé (traces anciennes d'épandage à l'aval). Le déversoir du lac (voir photographie ci-dessous) domine une pente forte. Aucun écoulement n'apparaît distinctement. Les cartes IGN signalent un écoulement intermittent.

L'analyse des photographies aériennes (mission de 1995) révèle la présence d'un glacier-rocheux au contact amont du lac, mais sans pouvoir déterminer avec certitude son activité. Ces observations, combinées à l'analyse du déversoir du lac, nous ont conduit à vérifier et valider la cartographie sur le terrain.



Front de glacier-rocheux et déversoir du lac Blanc

La visite sur le terrain confirme un écoulement du lac par le déversoir. Cette circulation ne se fait pas toujours en surface.

Actuellement, le front du glacier-rocheux fossile semble stable.

En bordure ouest du lac, un glacier-rocheux inactif (d'après les mesures de front effectuées et la stabilité relative de sa surface) domine le lac. Un petit glacier-rocheux actif a été individualisé à l'amont du glacier-rocheux inactif. La probabilité de glissement du glacier-rocheux dans le lac semble limitée mais ne peut être exclue.

Aucun enjeu proche n'est recensé. A l'aval du lac, le vaste replat chahuté de Saume Longue fait office de zone de régulation et permet un étalement des matériaux avant la confluence avec le torrent du Vallon. Le torrent du Vallon conflue ensuite avec la Clarée au village de Névache (enjeu éloigné).

6.2.2.3. Conclusions / Perspectives

La présence d'un lac sur un glacier-rocheux et la présence de glaciers-rocheux (inactif et actif) à l'amont du lac incitent à des analyses complémentaires sur ce site du lac Blanc portant notamment sur :

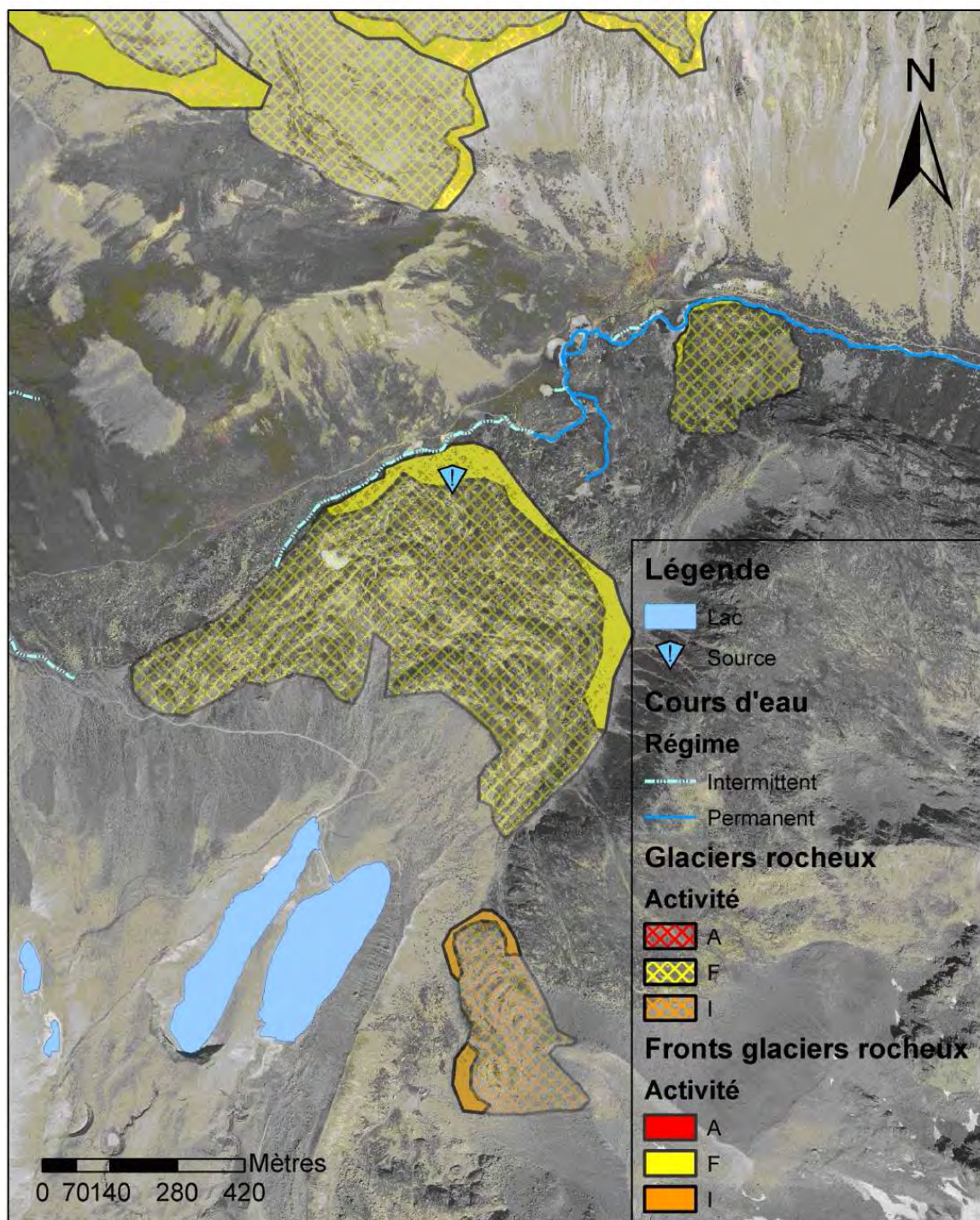
- la stabilité du front du glacier-rocheux fossile faisant office de déversoir du lac
- l'évolution du glacier-rocheux inactif en contact avec le lac (et du glacier-rocheux actif plus en amont).

6.2.3. Glacier d'Arsine

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux d'Arsine

Cartographie du complexe morainique d'Arsine et ses lacs (commune de Môtetier-les-Bains, Hautes-Alpes)



Source : RIGUIDEL A. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.3.1. Contexte géographique :

Le complexe d'Arsine est composé :

- d'un glacier blanc (environ 260 ha) se transformant en glacier noir,
- de deux lacs proglaciaires formés à l'amont immédiat de la moraine frontale du Petit Age Glaciaire,
- et d'un complexe de bourrelets à l'aval de cette moraine.

L'ensemble se localise dans la frange septentrionale du Parc National des Ecrins. Le lac du glacier d'Arsine est situé à une altitude de 2 455 m au pied du massif des Agneaux. Il domine le bassin versant du Petit Tabuc qui rejoint la Guisane, peu après le hameau du Casset (commune de Monêtier-les-Bains). Un écoulement se dirige également vers la Romanche, via le Rif de la Planche et le hameau du Lauzet. Le point culminant est la Montagne des Agneaux à 3 664 mètres d'altitude.

6.2.3.2. Historique :

Le lac d'Arsine est apparu vers 1950 avec la fonte du glacier du même nom. La formation de ce lac est due à la sédimentation des farines glaciaires en eau stagnante (ANTOINE et FABRE, 2000). Sa croissance continue jusqu'à vers 1985 (d'environ 50 cm par an) commença à interroger les spécialistes, dans la mesure où le niveau d'eau ne tarderait pas à déborder la moraine frontale. Son volume important, estimé en 1985 à 800 000 m³ (superficie de 6 ha, profondeur de 40 mètres), constituait alors une menace directe de débâcle via le torrent du Petit Tabuc. On estima à 3 ans le temps maximal avant que le lac n'atteigne sa cote maximale.

Les différentes études réalisées en 1985 et 1986 conclurent à la nécessité de réaliser un déversoir pour limiter le volume d'eau du lac et maintenir la stabilité de la moraine frontale. Les différents scénarii envisageaient tous que la lave torrentielle ou le charriage engendré par la débâcle atteindrait le hameau du Casset entre 8 et 12 minutes, pour une hauteur d'eau évaluée entre 1 et 2 mètres (CEMAGREF, 1986).

Les travaux effectués au printemps 1986 (aménagement d'un déversoir dans la moraine) ont considérablement réduit les risques de débordement brutal.

6.2.3.3. Evolutions post-travaux et observations :

La surveillance du site d'Arsine s'est poursuivie au cours de la période 1986-2002. Il s'est formé un second lac à l'ouest du premier dont le volume ne cessa de croître durant cette période. L'efficacité du déversoir a également été constatée (avec l'évacuation naturelle du trop plein d'eau en période estivale chaude).

6.2.3.4. Présence d'un glacier-rocheux ?

Concernant la partie aval, la question se pose déjà en 1967 (volume 55 de la revue de géographie alpine) de savoir s'il s'agit de bourrelets issus d'un glacier-rocheux fossile ou d'un complexe morainique (ANTOINE et FABRE, 2002). Pour notre travail sur les Hautes-Alpes, nous avons décidé de recenser cet ensemble de bourrelets. Nous avons considéré qu'il s'agit d'une forme fossile de glacier-rocheux, dont la racine aurait ensuite été recouverte par l'avancée du glacier d'Arsine. Cette hypothèse se fonde d'une part sur la morphologie générale du site, et d'autre part sur le fait de l'existence d'un glacier-rocheux "subactuel" à l'est (LAOUSSE et GUEN, 1998). Par ailleurs, les terrains sur le site sont propices à la formation de glaciers-rocheux, indépendamment de l'orientation, comme le prouvent les très nombreux glaciers-rocheux du secteur.

La connaissance précise de la morphologie en aval du lac est importante pour comprendre les différents écoulements d'eau. On observe ainsi les sources du Réou d'Arsine au front du système morainique. Des demandes furent effectuées par M. Vallon, en 1992, dans ce sens, afin d'apprécier l'évolution de l'hydrologie des bassins versants du Petit Tabuc et du Rif de la Planche. Il est en effet avéré que l'eau de ces sources est celle qui provient du lac. Or, ces dernières sont situées à 800 mètres en distance horizontale et à 150 mètres en aval de la moraine frontale. Cette présence incite Antoine et Fabre (2002) à suggérer la mise sous surveillance de ces sources. Par ailleurs, Vincent, Guirado et Vallon (2002) estiment que si "le risque actuel est très limité, la situation peut changer très vite".

La profondeur du premier lac d'Arsine a été mesurée au cours de l'été 2011 par les agents du Parc national des Ecrins (PNE) et de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) lors d'une étude sur la

vie⁶ (zooplancton). La profondeur du lac est de 33 mètres, soit une baisse de la bathymétrie de 7 mètres par rapport à la valeur mesurée en 1985.

6.2.3.5. Conclusions / Perspectives :

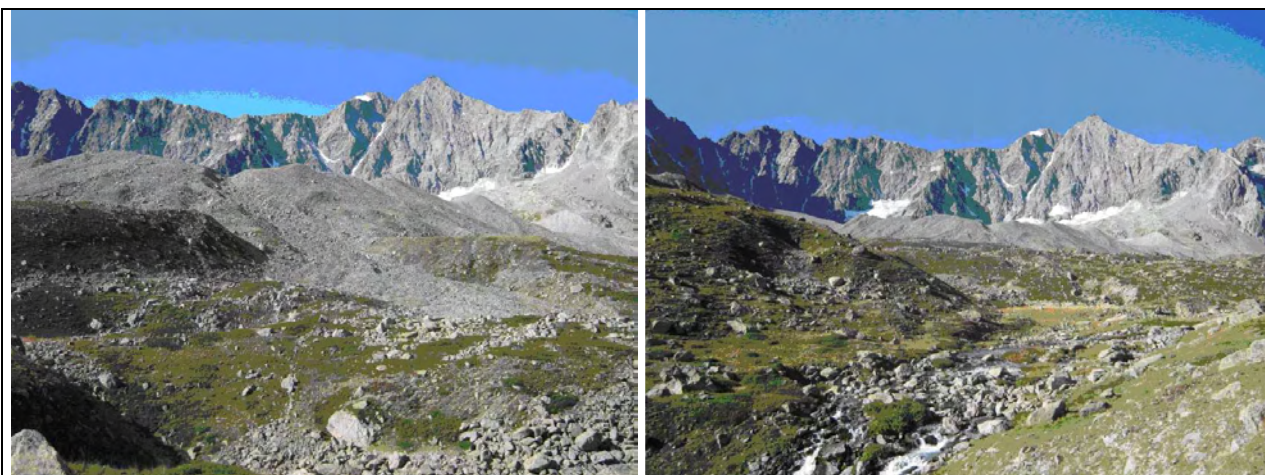
Les travaux réalisés en 1886 semblent avoir réglé une très grande partie de la menace, notamment parce qu'ils ont permis de réduire considérablement le volume des lacs.

Néanmoins, des questions encore nombreuses se posent sur ce site et sur ses évolutions possibles, par exemple :

- Stabilité du chenal d'écoulement sur la moraine ?
- Cheminement des circulations d'eau dans la moraine ?
- Influence de ces circulations d'eau sur la stabilité du front de la moraine ?
- Présence ou pas de gypse dans le substratum et influences sur la stabilité ?
- ...

Spécifiquement vis-à-vis du glacier-rocheux que nous avons cartographié sur ce site :

- S'agit-il vraiment d'un glacier-rocheux ?
- Ce glacier-rocheux est-il présent sous la moraine ?
- Par tassement, le glacier-rocheux peut-il provoquer des mouvements de la moraine, modifier les circulations d'eau ou influencer sur la stabilité de cet ensemble complexe ?



Complexe glaciaire d'Arsine, bourrelets du glacier-rocheux à l'aval de la moraine frontale du PAG et son chenal érodé (Source : A. Riguidel, août 2011)

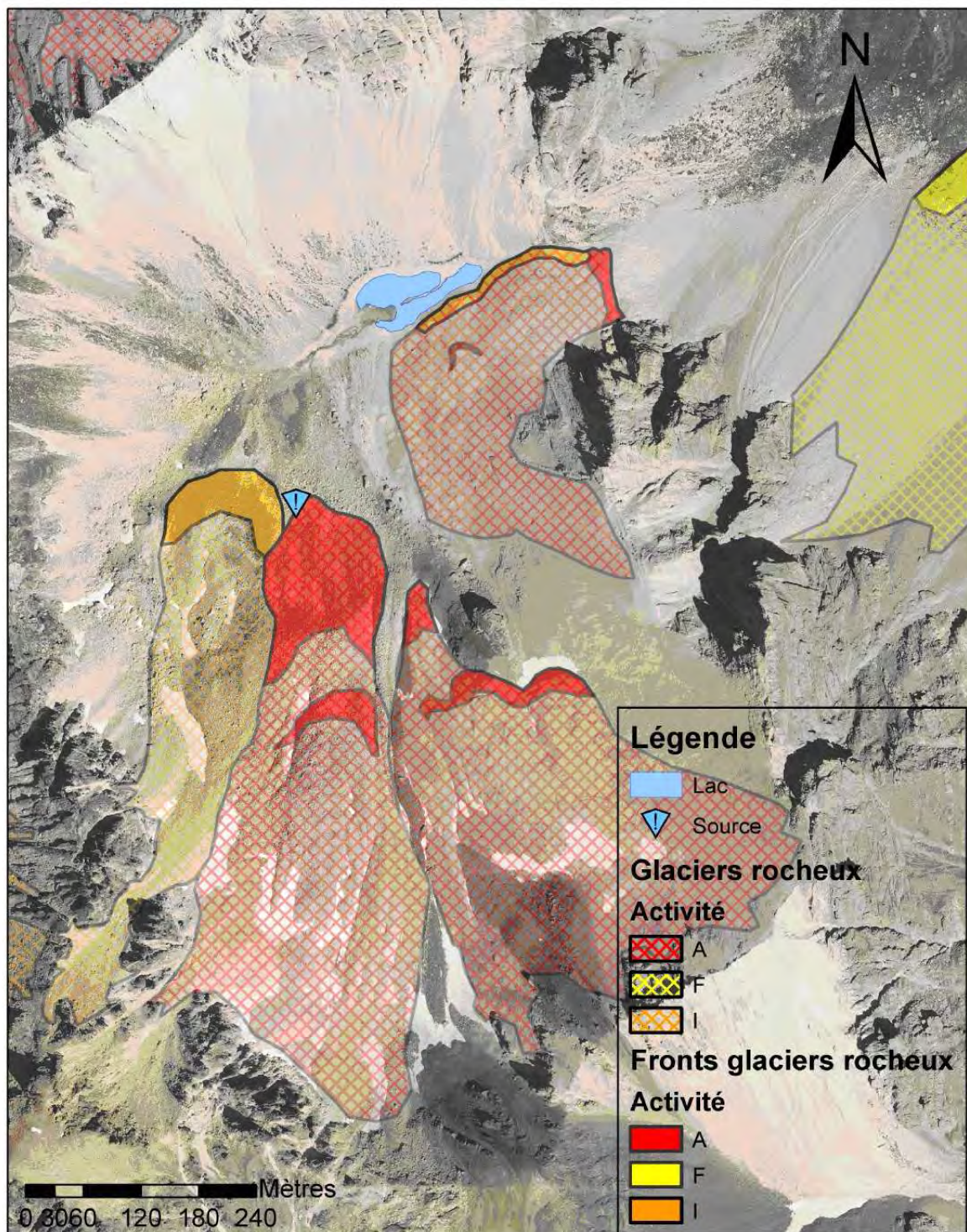
⁶ Source : article du *Dauphiné Libéré* à la date du 21 septembre 2011 relatant les propos d'Eric Vannard (PNE)
ONF – Service RTM

6.2.4. Combe du Lac Rouge

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux de la combe du Lac Rouge

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple de la combe du lac Rouge, commune de Névache)



Source : RIGUIDELA. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.4.1. Contexte géographique :

La combe du lac Rouge est un vallon du massif des Cerces en rive droite de la Clarée. Elle se situe sur la commune de Névache, en haute vallée de la Clarée, à proximité du hameau de Saint Jacques. Elle est séparée de la combe du lac des Béraudes par les crêtes de Béraudes.

De cette combe, l'ouverture vers la Clarée se fait par un étroit verrou, tandis que la dépression est occupée par le lac Rouge à une altitude de 2 585 mètres. Cette combe du lac Rouge, entourée de crêtes de haute altitude culminant aux alentours de 2 900 mètres, est favorable à la présence de névés.

6.2.4.2. Observations :

La montée au lac Rouge se termine par un verrou. Sa pente soutenue de 42° dans sa partie supérieure correspond à un front de glacier-rocheux actif composé de matériaux fins très peu compactés (cheminement à pied très difficile). Le sentier contourne ce verrou en longeant le socle rocheux recouvert par endroit de dépôts morainiques. Le sommet du verrou est situé à 2 600 mètres d'altitude, c'est-à-dire 15 mètres plus haut que le lac. C'est pourquoi aucun écoulement de surface n'est visible.

Le volume du lac observé lors de la visite de terrain du 24 août 2011 est très faible. On distingue nettement deux parties du lac reliées entre elles. On suppose qu'une part de l'eau du lac parvient à s'infiltrer, mais la majeure partie du volume d'eau est certainement évaporée. Les alimentations du lac proviennent de la fusion de la glace et des précipitations.

Depuis le lac Rouge, on distingue nettement trois glaciers-rocheux :

- le premier correspond au verrou que l'on contourne pour accéder au lac ; son front domine et pourrait menacer le sentier d'accès au site ;
- le second, au centre, présente un front imposant, raide et instable (des chutes de blocs sont visibles) ; la température de l'eau de la source, légèrement supérieure à 2°C à plusieurs mètres de la source, confirme qu'il s'agit d'un glacier-rocheux actif ;
- le troisième glacier-rocheux, au fond du vallon, ne présente pas de faciès particulièrement dangereux car, si sa pente est encore marquée (37°), il semble être en voix de fossilisation.

6.2.4.3. Conclusions / Perspectives :

La combe du lac Rouge est un site où des analyses complémentaires sont nécessaires, du fait de l'activité des glaciers-rocheux et de la présence d'un lac important dans le vallon.



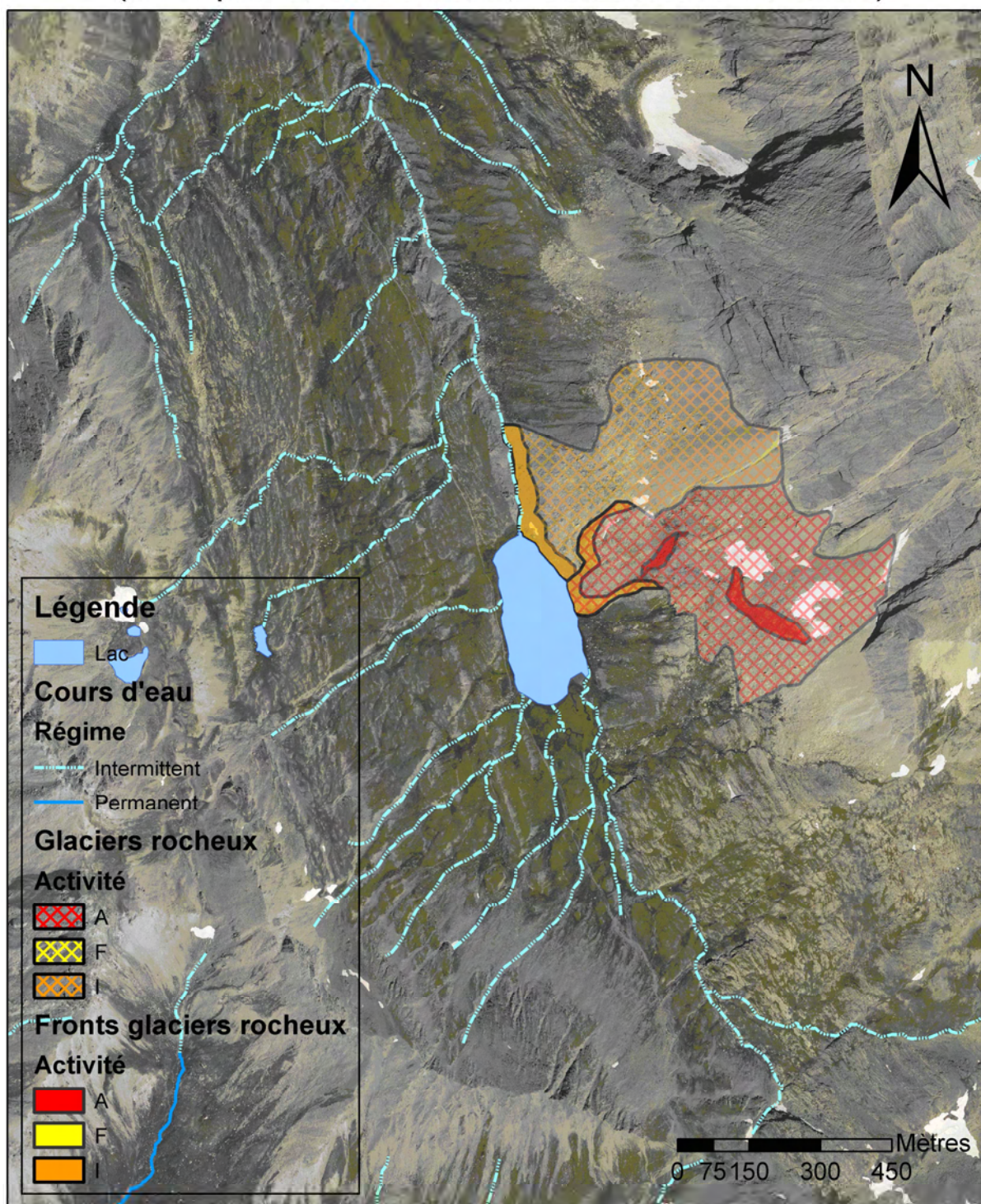
La combe du lac Rouge dominée par des glaciers-rocheux
(source : A. RIGUIDEL)

6.2.5. Lac Foréant

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux du vallon du Lac Foréant

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple du lac Foréant, commune de Ristolas)



Source : RIGUIDEL A. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.5.1. Contexte géographique :

Le vallon du lac Foréant se situe sur la commune de Ristolas dans le Queyras. Le lac situé à 2 618 mètres d'altitude dans un vallon orienté Nord-Sud, est entouré par les crêtes de la Taillante à l'Est à environ 3 200 mètres d'altitude, le Pain de Sucre au Nord à 3 208 mètres et le Pic de Foréant à l'Ouest à 3 081 mètres.

Le torrent de Bouchouse prend naissance au lac Foréant, puis s'écoule vers le Sud en alimentant le lac Egorgéou à 2 394 mètres d'altitude, avant de confluer avec le Guil dont il est un affluent rive gauche, en amont du hameau de l'Echalp.

6.2.5.2. Observations :

L'inventaire d'Echelard (2010) indiquait la présence d'un glacier-rocheux actif au niveau du déversoir du lac. Les photographies aériennes confirment cette présence et mettent en évidence une pente forte en aval immédiat du déversoir. La largeur du déversoir n'est que de quelques mètres.



Le glacier-rocheux et du lac de Foréant, commune de Ristolas (Source : A. Riguidel)

La visite sur le terrain a permis de vérifier les caractéristiques du site. On a ainsi pu confirmer la présence du glacier-rocheux actif. Sa langue en rive droite arrive en bordure du lac et l'extrémité rive droite termine son avancée actuelle en limite du torrent. On estime la largeur du lit du torrent à environ 5 mètres.

Le déversoir du lac est constitué par un socle rocheux permettant l'écoulement d'eau en cas de trop plein. A l'aval du lac, des gorges présentent d'abord une pente forte puis une partie plane : le delta du lac Egorgéou.

L'activité du glacier-rocheux de Foréant semble hétérogène et fonction de l'activité de ses différents fronts. Les fronts situés en bordure du lac et du cours d'eau présentent des pentes inférieures à 40°, tandis que les

fronts situés dans le versant ont une pente de 42°. Selon les mesures effectuées par Echelard sur les mouvements de ce glacier-rocheux, seuls ces derniers avancent de quelques décimètres par an (il n'avait pas pu intégrer ces mesures à son Mémoire de 2010).

6.2.5.3. Conclusions / Perspectives :

La présence d'un glacier-rocheux au contact d'un lac et de son déversoir, au sommet de pentes fortes, correspond à une situation potentiellement à risque.

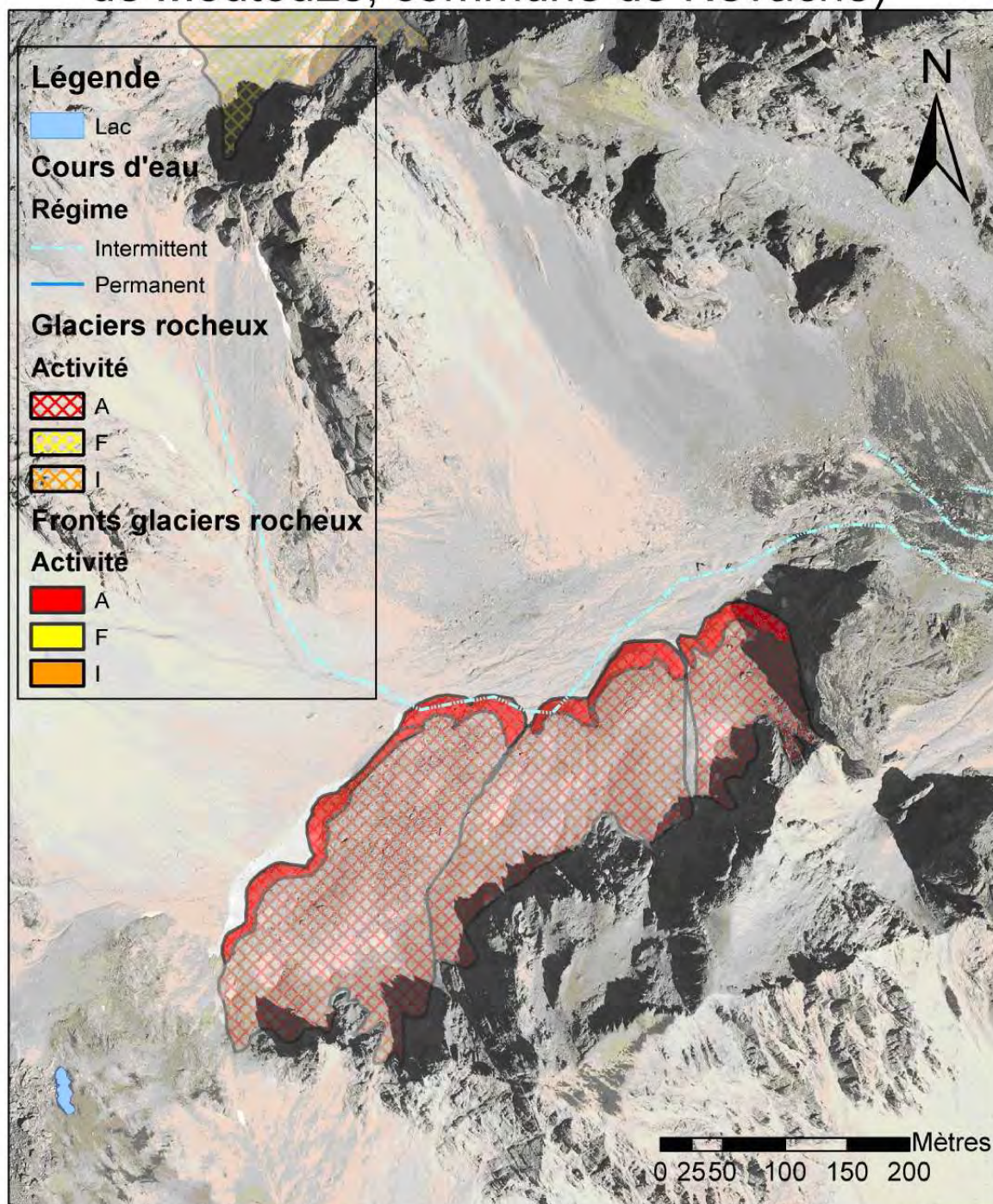
C'est pourquoi, des analyses complémentaires nous apparaissent nécessaires sur ce site.

6.2.6. Lave torrentielle ou charriage : exemple des Sagnes Froides

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par infiltration)	Source de matériaux pour le torrent (ravinement, ...)	Faible alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par infiltration)
3	Glissements brutaux localisés	Forte alimentation du torrent en matériaux	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par infiltration)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux des Sagnes Froides – Crêtes de Moutouze

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple des Sagnes Froides - Crêtes de Moutouze, commune de Névache)



Source : RIGUIDEL A. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.6.1. Situation géographique:

Le vallon des Sagnes Froides est localisé en rive droite de la Clarée, sur la commune de Névache. Ce vallon fait partie intégrante du massif des Cerces. Il est ouvert vers l'Est et limité au Nord Ouest par la Pointe des Cerces à 3 097 mètres d'altitude. La rive droite du vallon est dominée par les Crêtes de Moutouze comprises entre 2 700 et 2 862 mètres d'altitude.

6.2.6.2. Observations :

Plusieurs glaciers-rocheux sont présents en rive droite du vallon (versant Nord), alors que le versant Sud est dominé par la présence d'éboulis.

Les glaciers-rocheux présentent des fronts imposants de plusieurs mètres de haut (jusqu'à 5 ou 6 mètres) avec une pente forte à très forte (entre 40° et 45°). Ces fronts ne sont pas stabilisés.

L'avancée semble seulement atténuée par la très faible pente, même si aucune mesure ne nous permet de confirmer ces impressions.

Le torrent des Sagnes Froides est un cours d'eau à régime intermittent, vérifié par les deux sorties de terrains effectués sur place. En effet, lors de la visite du 16 juin 2011, on pouvait observer un écoulement abondant aux pieds et sur les éboulis, mais également à la base des glaciers-rocheux, où un sapement semblait se produire (voir figure n°6). Néanmoins, la quantité de neige encore abondante à cette période ne permettait pas de distinguer clairement les limites des fronts, leur hauteur, ni même la largeur exacte du torrent, puisqu'il disparaissait en plusieurs endroits sous la neige. La visite du 24 août 2011 révélait le caractère non permanent du cours d'eau, puisque aucun écoulement n'était réellement perceptible. On observait seulement un suintement provenant des glaciers-rocheux.

6.2.6.3. Conclusions / Perspectives :

Ces différentes visites permettent de confirmer la présence de glaciers-rocheux actifs comme le suggérait l'observation des photographies aériennes. Néanmoins, on n'imaginait pas que ces glaciers-rocheux puissent avoir un tel volume (très bombés) du fait d'une couverture neigeuse encore significative.

Ces glaciers-rocheux ne présentent pas une menace directe (par glissement ou rupture d'un glacier-rocheux), puisque aucun enjeu n'est détecté dans un environnement proche.

Mais, à l'évidence, ils ont amené et pourraient continuer à amener de grandes quantités de matériaux au pied des fronts de glaciers. C'est pourquoi, des analyses complémentaires sur ce site sont nécessaires pour mieux évaluer les possibilités de reprise de ces matériaux par des écoulements torrentiels.



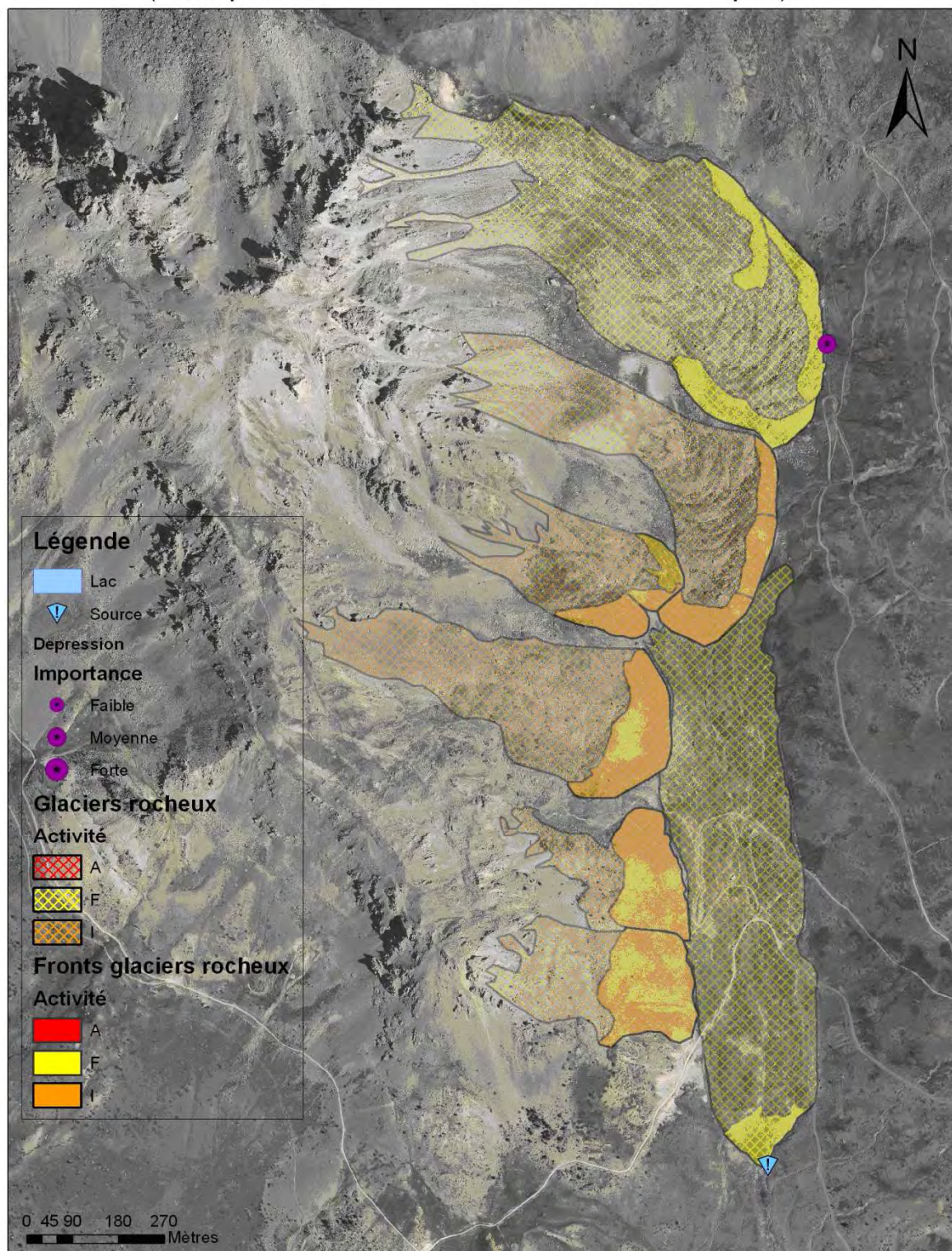
Front d'un glacier-rocheux des Sagnes Froides au contact de dépôts de charriage (source : A. RIGUIDEL)

6.2.7. Le torrent de la Salle

	SYNTHESE DES PHENOMENES BRUTAUX POUVANT CREER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHENOMENES POUVANT CREER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux de la commune de La Salle les Alpes

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple de la commune de La-Salle-Les-Alpes)



Source : RTM 05
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.7.1. Contexte géographique

Le torrent de la Salle est un affluent rive gauche de la Guisane, sur la commune de la Salle les Alpes. Des glaciers-rocheux se sont largement développés sur le versant Est du Grand Area à 2 868 mètres. Le torrent prend sa source au front d'un glacier-rocheux (voir carte ci-dessus).

6.2.7.2. Observations

Les nombreux enjeux présents à l'aval du site justifient une étude plus poussée des différents phénomènes associés aux glaciers-rocheux sur ce site.

La rive gauche du vallon est marquée par de nombreux glissements de terrain qui rentrent en contact avec les fronts de glaciers-rocheux arrivant de la rive opposée.

Les glaciers-rocheux présentent des fronts imposants. Leur pente, inférieure à 40°, et leur taux de végétalisation permettent de les qualifier d'inactifs. Certains glaciers-rocheux se fossilisent : apparition de nombreux tassements et dépressions indiquant la disparition de la glace.

Pour l'instant, aucune de ces dépressions sur glacier-rocheux ne semble stocker d'eau (bonne évacuation par infiltration).

Une dépression importante s'est aussi formée par l'avancée du front du glacier-rocheux le plus amont. En arrivant au contact du versant opposé, il a barré le vallon supérieur. Les eaux du vallon supérieur ne peuvent plus s'écouler vers l'aval à l'air libre. Elles s'infiltrent au travers du front du glacier-rocheux (et nous n'avons pas pu déceler où elles ressortent en aval). Les traces visibles dans cette dépression confirment que les eaux arrivent à s'infiltrer rapidement et ne remplissent pas la dépression.

6.2.7.3. Conclusions / Perspectives

Apparemment, ce site ne présente pas de menace directe ou immédiate.

Compte tenu des enjeux à l'aval, nombreux, il apparaît justifié de vérifier régulièrement les mouvements sur les fronts et surtout l'évolution des dépressions. Actuellement, elles ne stockent pas d'eau mais il faudrait contrôler régulièrement qu'il n'y a pas d'évolution sensible.



Glaciers-rocheux du torrent de la Salle (commune de La Salle les Alpes)

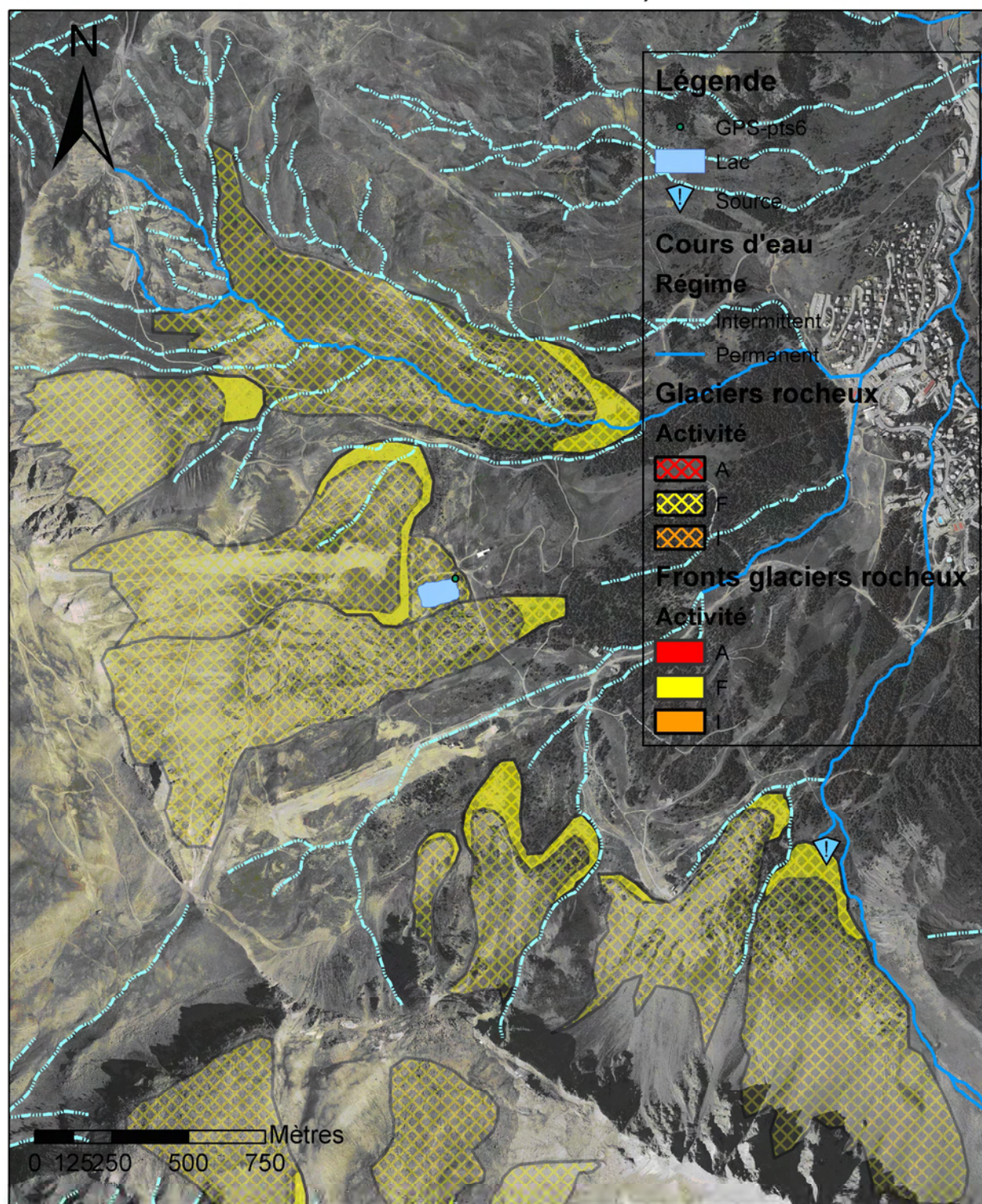
Vallon obstrué par l'avancée du glacier-rocheux supérieur – Les eaux du vallon ne peuvent s'évacuer que par infiltration au travers du front

6.2.8. Vars

	SYNTHESE DES PHÉNOMENES BRUTAUX POUVANT CRÉER UNE MENACE SUR LE GLACIER-ROCHEUX OU SA PROXIMITE				SYNTHESE DES PHÉNOMENES POUVANT CRÉER UNE MENACE A DISTANCE DU GLACIER-ROCHEUX			
	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier	Phénomènes dus au glacier	Phénomènes dus au front du glacier
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	Déplacements importants (> 0,5 m/an)	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 en matériaux	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)	Glissement important, jusqu'au talweg	Forte alimentation du torrent en matériaux ou éboulements menaçants	Vidange progressive (par débordement)	Vidange progressive (par débordement)
4	Glissement brutal généralisé, rupture du glacier	Glissement, rupture brutal	Débâcle	Débâcle	Départ d'une lave torrentielle	Départ d'une lave torrentielle ou chutes de pierres menaçantes	Débâcle	Débâcle

Phénomènes et cotations liés aux glaciers-rocheux du domine skiable de Vars

Cartographie des glaciers rocheux des Hautes-Alpes (exemple du domaine skiable de la Forêt Blanche, commune de Vars)



Source : RIGUIDEL A. (RTM 05)
Date : 2011

Données : Orthophotographies IGN 2009

6.2.8.1. Contexte géographique :

Le domaine skiable de Vars se situe entre les altitudes 1 850 mètres et 2 746 mètres (sommet au Pic de Chabrières). De nombreux glaciers-rocheux fossiles occupent ces versants et le domaine s'est développé entre ou sur ces glaciers-rocheux.



Domaine skiable de Vars : une retenue d'eau artificielle construite dans une dépression d'un glacier-rocheux fossile. (Source : A. Riguidel)

6.2.8.2. Observations :

Nous avons réalisé une visite spécifique sur ce site pour 2 raisons principales :

- d'abord pour l'interaction entre aménagements de domaines skiable et glaciers-rocheux (en particulier avec une retenue d'eau, des remontées et des bâtiments directement implantée sur des glaciers-rocheux fossiles)
- et aussi parce que les 2 torrents qui ont leurs bassins versants dans ce vaste cirque ont connu de fortes crues en mai 2008 (et qu'il y avait peut-être des enseignements à tirer de l'effet des glaciers-rocheux sur ces crues).

Les bâtiments et les remontées mécaniques implantées sur glaciers-rocheux et que nous avons examinés ne semblent avoir subi aucun mouvement ou tassement particulier.

La retenue d'eau est de construction récente (environ 3 ans). Nous n'avons décelé aucun désordre. Cette retenue a été construite sur une dépression préexistante et qui est due au glacier-rocheux fossile. Pour cette retenue, des études géotechniques ont bien été menées avant sa réalisation. Elles mentionnent la nature des terrains et font référence à la présence de terrain morainique, sans jamais évoquer le terme de glacier-rocheux. Il nous semble qu'il aurait été nécessaire

- de mieux repérer ce faciès de glacier-rocheux
- d'adapter les investigations géotechniques, pour bien connaître la compacité (et l'importance des vides) des matériaux jusqu'au substratum et pour apprécier les tassements encore possibles

Quant à l'influence des glaciers-rocheux sur les crues de 2008, il nous semble qu'elle a été plutôt favorable :

- aucun signe de ravinement sur les glaciers-rocheux (alors qu'il y en avait en amont)
- leur configuration (forte perméabilité, contre-pentes) a, au contraire, très probablement favorisé l'infiltration des pluies, retardé leur écoulement et diminué les débits de pointe de la crue.

**Domaine skiable de Vars – Glaciers-rocheux fossiles
dans le haut bassin versant du torrent de Sibières
(Source : A. Riguidel)**

**Les ravinements qui avaient pris naissance dans les
éboulis se sont arrêtés sur les glaciers-rocheux**

**La forte perméabilité de la surface des glaciers-
rocheux et de nombreuses contre pentes favorisent
l'infiltration des pluies**



6.3. PREMIERE SYNTHSE DES RESULTATS DE CET INVENTAIRE ET DE LA RELATION GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES

Au bilan, nous n'avons pas, à ce jour, mis en évidence de risques particulièrement évidents en lien avec les glaciers-rocheux recensés dans les Hautes-Alpes.

Nous avons quand même établi une liste de sites prioritaires qui, à notre sens, méritent soit des réflexions ou investigations complémentaires soit des suivis plus attentifs.

Il s'agit de 22 sites comportant 55 glaciers-rocheux. Sur un site (un vallon en général), si un ou plusieurs glaciers-rocheux justifiaient des analyses plus poussées, nous avons mis dans la liste tous les glaciers-rocheux proches, les analyses méritant d'être conduites sur l'ensemble du vallon.

Nos connaissances sur ces 22 sites ne sont pas encore suffisantes pour aboutir immédiatement à un programme de surveillance et/ou d'investigations et/ou d'intervention. Il nous faudra, sur ces sites, compléter les données recensées et les analyser plus en détail.

La moitié de ces sites figure sur la liste du fait de la présence d'un lac, sur ou au contact des glaciers-rocheux.

Pour le reste, il s'agit de glaciers-rocheux :

- actifs
- et/ ou avec un front dominant des pentes fortes
- et/ ou avec des enjeux au pied des pentes fortes.

Cette liste comprend aussi le site complexe d'Arsine (glacier + lacs + moraines + glacier-rocheux).

Commune	Lieu	Id_Glacier	Activité	Enjeux	Présence d'un lac
Ceillac	Vallon Ste Anne	629	A	village	oui
		631	A		
		632	A		
Champoléon	Mal Cros	498	A	refuge	oui
La-Salle-Les-Alpes	Torrent de la Salle	3	F	village	
		4	I		
		5	I		
		2	I		
		6	I		
		9	I		
Monetier-les-Bains	Arcine	551	F	hameau	oui
	Chardoussier	118	F	village	
	Rif Blanc	174	F	route	
		175	F		
		176	F		
		177	F		
		178	F		
		625	F		
	Vallon du Fontenil	564	A	hameau	
Nevache	Chardonnet	19	I	ville	oui
	Combe de la Miglia	224	F	ville	
	Grand lac de l'Oule	207	I	village	oui
	Lac Blanc	278	A	village	oui
		48	F		
		40	I		
	Lac de la Casse Blanche	129	A	village	oui
		130	I		
	Lac Long	615	F	refuge	oui
	Vallon de Blaune	59	F	village	
		61	F		
		58	I		
		60	I		
		62	I		
	Vallon des Béraudes	12	A	hameau	oui
		13	I		
		14	I		
	Vallon des Sables	231	A	ville	
		230	A		
		226	F		
	Vallon des Sagnes Froides	16	A	refuge	
		17	A		
		18	A		
	Vallon des Thures	221	F	village	
	Vallon du lac rouge	156	A	hameau	oui
		157	A		
		158	A		
	Vallon Froid	243	A	ville	
		244	A		
		245	A		
		246	A		
		247	A		
Pelvoux	Vallon de Clapouse	542	A	hameau	
		543	A		
Ristolas	Foréant	622	A	bergerie	oui
		623	I		

Département des Hautes-Alpes (hors Queyras) :
glaciers-rocheux et sites justifiant des examens ou analyses complémentaires

7. SYNTHÈSE / CONCLUSION

7.1. METHODES ET LIMITES

La priorité de cette étude était un inventaire exhaustif des glaciers-rocheux des Hautes-Alpes (hors Queyras, déjà fait par ailleurs). Il fallait une méthode suffisamment pertinente, efficace et reproductible ailleurs, pour permettre de réaliser cet inventaire dans un délai raisonnable (3 ou 4 mois). Les éléments essentiels de méthodologie avaient été définis en 2010 (étude de Loïc Bonnetain pour le RTM 05). Ils ont été affinés et déployés en 2011 au cours de cette étude.

Pour cet inventaire, l'utilisation des photographies aériennes a été systématique. D'autres sources d'informations ont évidemment été utilisées (carte topographique, carte géologique, connaissances des personnels RTM, ...). Des contrôles terrain étaient indispensables, pour confirmer les informations issues de la photo-interprétation et pour analyser plus en détail des sites complexes. Ces contrôles terrain n'ont pas été systématiques (50 contrôles terrain, sur 625 glaciers-rocheux cartographiés). Cette campagne d'inventaire et de cartographie a été réalisée en approximativement 45 jours, plus 10 jours pour les contrôles de terrain.

Cet inventaire est donc essentiellement basé sur une analyse experte de la géomorphologie.

La très grande majorité des glaciers-rocheux nous paraissent facilement reconnaissables (sur photos aériennes et/ou sur le terrain). De même, et après les premiers contrôles terrain de début de campagne qui nous ont permis de bien caler les observations possibles sur photos aériennes, nous n'avons pas eu de difficultés majeures à différencier les glaciers-rocheux selon leur activité (actif, inactif, fossile).

Evidemment, il y a une part d'interprétation non négligeable dans cet inventaire et :

- aucun inventaire de ce type ne peut être considéré comme réellement exhaustif
- il paraît évident que quelques formes petites ont été négligées et que quelques formes discrètes (mouvements de faible ampleur, matériaux fins, ...) ont pu être oubliées
- 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'à l'évidence on pouvait hésiter entre 2 classes, ...), sans mettre en œuvre de méthodes d'investigation plus poussées (pas de mesures de déplacement, pas de géotechnique, ...).

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

- des formes ambiguës, où la distinction entre complexe morainique et glacier-rocheux fossile fait même débat entre les différents interlocuteurs spécialisés dans l'étude du permafrost. Plusieurs formes ont été intégrées à notre inventaire compte tenu de leur morphologie et de leur environnement (alimentation, glaciers-rocheux à proximité, ...) : par exemple, la partie aval de la moraine frontale du glacier d'Arsine ou le vallon du lac du Miroir
- des formes discrètes, notamment des glaciers-rocheux qui se développent au sein d'une lithologie fine (volumes apparemment modestes, fronts moins pentus et de faible hauteur, ...).
- la distinction qu'il a fallu faire entre les glaciers-rocheux recensés et d'autres formes à ne pas recenser (formes de fluage dues à la glace à l'intérieur d'éboulis, bourrelets de névé, moraines de poussée, protalus reparts, ...).

7.2. DONNEES ENREGISTREES ET RESULTATS

Pour dépasser le simple inventaire cartographique des glaciers-rocheux (qui constitue déjà un travail important), nous avons aussi recensé, cartographié et décrit les éléments utiles à une meilleure appréhension des risques avérés ou potentiels associés aux glaciers-rocheux, aux fronts ainsi qu'aux lacs ou dépressions associés. Tous les éléments mesurés ou analysés ont été enregistrés dans les tables informatiques associées aux objets cartographiés. Ces éléments nous ont permis les premières analyses et les premières conclusions opérationnelles. Mais toutes ces informations pourront aussi être analysées plus en détail ultérieurement, pour des analyses plus approfondies.

Concernant la répartition des glaciers-rocheux, on peut retenir, dans les Hautes-Alpes :

- Altitude minimale des fronts de glaciers-rocheux

	Actifs	Inactifs	Fossiles
Altitude la plus basse relevée	2.350	2.130	1.650
Moyenne des altitudes minimales	2.630	2.480	2.300

De manière exceptionnelle, on peut trouver quelques fronts de glaciers fossiles en dessous de 2.000 m d'altitude (2,5 % des glaciers recensés).

On ne peut trouver des fronts de glaciers actifs qu'au dessus de 2.350 m d'altitude.

- Influence de l'exposition

L'exposition influe beaucoup sur la répartition (en nombre) des glaciers-rocheux, ils sont évidemment beaucoup plus nombreux en exposition nord.

Par contre, l'exposition influe peu sur la longueur des glaciers-rocheux ou sur l'altitude de leur front aval (ces 2 paramètres étant liés). Ce constat est a priori étonnant et méritera des analyses complémentaires.

Les données enregistrées dans les tables attributaires des différents objets cartographiés nous paraissent adaptées. Il faudrait néanmoins ajouter des renseignements concernant la lithologie sur le site. En effet, quelques exemples mettent en évidence que des lithologies fines peuvent être à l'origine de morphologies assez particulières des glaciers-rocheux avec notamment des formes discrètes, même pour des glaciers-rocheux volumineux (exemple du glacier-rocheux du Bérard).

7.3. GLACIERS-ROCHEUX ET RISQUES ASSOCIES

Au bilan, nous n'avons pas, à ce jour, mis en évidence de risques particulièrement évidents en lien avec les glaciers-rocheux recensés dans les Hautes-Alpes.

Nous avons établi une liste de 22 sites prioritaires (avec 55 glaciers-rocheux) qui, à notre sens, méritent soit des réflexions ou investigations complémentaires soit des suivis plus attentifs :

Commune	Lieu	Nb de glaciers-rocheux sur le site
Ceillac	Vallon Ste Anne	3
Champoléon	Mal Cros	1
La-Salle-Les-Alpes	Torrent de la Salle	6
Monetier-les-Bains	Arsine	1
	Chardoussier	1
	Rif Blanc	6
	Vallon du Fontenil	1
Nevache	Chardonnet	1
	Combe de la Miglia	1
	Grand lac de l'Oule	1
	Lac Blanc	3
	Lac de la Casse Blanche	2
	Lac Long	1
	Vallon de Blaune	5
	Vallon des Béraudes	3
	Vallon des Sables	3
	Vallon des Sagnes Froides	3
	Vallon des Thures	1
	Vallon du lac rouge	3
	Vallon Froid	5
Pelvoux	Vallon de Clapouse	2
Ristolas	Foréant	2

Département des Hautes-Alpes (hors Queyras) :
glaciers-rocheux et sites justifiant des examens ou analyses complémentaires

Il s'agit de 22 sites comportant 55 glaciers-rocheux. Sur un site (un vallon en général), si un ou plusieurs glaciers-rocheux justifiaient des analyses plus poussées, nous avons ajouté à la liste les glaciers-rocheux proches, les analyses méritant d'être conduites sur l'ensemble du vallon.

Nos connaissances sur ces 22 sites ne peuvent pas encore être assez précises pour aboutir immédiatement à un programme de surveillance et/ou d'investigations et/ou d'intervention. Il nous faudra, sur ces sites, compléter les données recensées et les analyser plus en détail.

7.4. LES COMPLEMENTS ET LES SUITES A DONNER

7.4.1. Analyser plus en détail 22 sites des Hautes-Alpes

Nous rappelons que les démarches entreprises par les service RTM sur les glaciers-rocheux ont pour objectifs principaux de mettre en évidence les sites comportant des risques (avérés ou potentiels) et de proposer une ingénierie adaptée pour différents types de situations.

La présente étude a permis :

- de finaliser la méthode de cartographie directement opérationnelle (méthode de travail, représentations cartographiques, légende, ...) et pouvant être mise en œuvre sur tout un département, dans des délais raisonnables
- de cartographier tous les glaciers-rocheux du département des Hautes Alpes (à l'exception du Massif du Queyras, déjà cartographié par Thomas Echelard)
- d'établir la grille d'analyse permettant d'apprécier et de caractériser les risques potentiels associés aux glaciers-rocheux
- de décrire chacun des 625 glaciers-rocheux localisés
- de faire une première analyse des risques associés prévisibles
- de mettre en évidence, pour tout le département, les sites présentant des risques, avérés ou potentiels, qui, au bilan, représentent 22 sites.

Sur ces 22 sites, il est maintenant nécessaire d'organiser une expertise conjointe avec d'autres partenaires (IRSTEA, IGA en particulier) pour :

7.4.1.1. expertiser ces sites

Il s'agit d'abord de confirmer les cartographies, les typologies, les renseignements collectés, ...

Il s'agira aussi :

- de définir les investigations indispensables (géotechnique, suivis, ...).
- de réaliser ces investigations, chaque cas particulier étant à traiter spécifiquement, en fonction du site, de la commune et des autres partenaires mobilisables, des moyens disponibles, ...

7.4.1.2. préciser les scénarios

Pour chaque site, les hypothèses pouvant conduire à une situation à risques seront à décrire : quels enjeux peuvent être menacés, selon quel(s) scénario(s), à quelle(s) échéances, ...

7.4.1.3. proposer une ingénierie adaptée

La diversité des 22 sites et des scénarios associés devra permettre aussi de mettre en évidence une gamme assez vaste des possibilités soit d'investigations, soit de suivi ou de surveillance, soit d'interventions, soit de gestion du site et des enjeux, ...

7.4.2. Compléter l'inventaire existant sur le Queyras

T. Echelard a déjà réalisé un inventaire des glaciers-rocheux du Queyras, mais avec une autre méthode et en privilégiant les glaciers-rocheux actifs. Lors de la comparaison des résultats entre sa méthode de recensement et la nôtre, il nous est apparu opportun de reprendre le travail de T. Echelard et de le compléter, pour avoir un inventaire homogène sur tout le département des Hautes-Alpes.

7.4.3. Diffuser l'information

Il restera à diffuser les cartographies et les données recueillies dans le cadre de cet inventaire.

Il est à noter aussi qu'une information et des échanges spécifiques seraient à organiser avec les bureaux d'étude en géotechnique qui interviennent en montagne (aménagement des domaines skiables). En effet, il leur faut connaître et bien appréhender la présence des glaciers-rocheux et, plus généralement, du pergélisol dans les zones de montagne, pour en tenir compte et adapter les investigations géotechniques. Les connaissances commencent à être nombreuses sur le pergélisol mais des études sur domaines skiables se font encore parfois sans bien appréhender cette problématique spécifique.

7.4.4. Poursuivre cet inventaire sur d'autres départements

La méthode utilisée nous paraît facilement utilisable ailleurs, pour poursuivre les cartographies et inventaires des glaciers-rocheux.

Compte tenu de plusieurs événements récents (Bérard, Chauvet, ...), un tel inventaire nous paraît particulièrement justifié dans le département des Alpes de Haute-Provence.

7.4.5. Pergélisol en parois rocheuses

Le travail que nous avons réalisé en 2010 et 2011 sur les Hautes-Alpes s'est concentré sur la problématique des glaciers-rocheux.

Pour une meilleure prévention, il serait également utile de mieux connaître la présence du pergélisol en parois rocheuses. Notamment par une cartographie de la répartition du pergélisol en paroi dans notre département (altitude, exposition, ...).

8. LES RESULTATS DE L'INVENTAIRE – ATLAS DES CARTES POUR LE DEPARTEMENT DES HAUTES-ALPES

SIGLES

BTS = Bottom Temperature of the winter Snowcover

IGN = Institut Géographique National

IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

LGGE = Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement

MAAT = Mean Annual Air Temperature

MAPT = Mean Annual Permafrost Temperature

ONEMA = Office National de l'Eaux et des Milieux Aquatiques

PAG = Petit Age Glaciaire

PERMEBAL = Surface Energy Balance Model

PNE = Parc National des Ecrins

RTM = Restauration des Terrains de Montagne

SIG = Système d'Informations Géographiques

BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE P. et FABRE D. (2000), *Géologie, hydrogéologie et stabilité du système morainique du lac d'Arsine*. LIGRIM, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- ANTOINE P. et FABRE D. (2002), *Stabilité du système morainique du lac d'Arsine*. LIGRIM, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- BARSCH D. (1977) - *Nature and importance of mass-wasting by rock glaciers in alpine permafrost environments*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2, 231-245.
- BARSCH D. (1987) - *The problem of the ice-cored rock glacier*. In Giardino J.R., Shroder J.F., Vitek J.D. (Ed.): *Rock glaciers*. Allen & Unwin, Londres, 45-53.
- BARSCH D. (1988) - *Rockglaciers*. In Clark M.J. (Ed.): *Advances in periglacial geomorphology*. John Wiley and Sons, New York, 69-87.
- BARSCH D. (1992) - *Permafrost creep and rockglaciers*. *Permafrost and Periglacial Processes* 3, 175-188.
- BARSCH D. (1996) - *Rockglaciers*. Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Springer, Berlin, 319 p.
- BODIN X. (2007), *Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente : l'exemple du massif du Combeynot (Hautes-Alpes)*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France.
- BONNETAIN L. (2010), *Le Pergélisol de montagne : bilan, méthodes dans l'évaluation des risques. Etudes de cas dans la vallée de la Guisane et de la Clarée*. Rapport de stage.
- BUCKEL C. (2010), *Etude de la stabilité du glacier-rocheux du Fond de Chauvet*. Mémoire de Master 1, Ecole et observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg, France.
- CAPPS S.R. Jr. (1910) - *Rock glaciers in Alaska*. *Journal of Geology* 18, 359-375.
- CEMAGREF, groupement d'Aix-en-Provence (division Hydraulique générale), (1986), *Lac du Glacier d'Arsine*. Etude demandée par la direction départementale de la protection civile, à l'initiative du service RTM de Gap.
- ECHELARD T. (2010), *Détection de mouvements par interférométrie radar dans les zones à permafrost : applications aux glaciers-rocheux du Queyras*. Mémoire de master, Université de Grenoble, France.
- 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, Université de Grenoble, France
- LAHOUSSE P. et GUEN R. (1998). *Le lac proglaciaire d'Arsine (Alpes françaises, massif du Pelvoux) : un risque de vidange brutale définitivement écarté?* *Revue de Géographie Alpine* Tome 86 n°3.
- LAMBIEL C. (2006), *Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : Distribution, régime thermique et instabilités*. Thèse, Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, Suisse.
- LGGE (CNRS), (1986), *Campagne de Prospection géophysique du Glacier d'Arsine*.
- LUGON R. et STOFFEL M. (2010), *Rock-glacier dynamics and magnitude-frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed : Ritigraben, Swiss Alps*. *Global and Planetary change* 73. Page 202-210.
- LUGON R., DELALOYE R. et PERRUCHOUD E. (2008), *Aléas naturels en zone de pergélisol et détection des risques, Alpes valaisannes, Suisse*.

- MONNET J. (1986), *Détermination de la stabilité de la moraine limitant à l'Est le lac d'Arsine (Hautes Alpes)*. Université scientifique technologique et médicale de Grenoble, France : Institut de recherches interdisciplinaires de géologie et mécanique.
- MONNIER S. (2004) *Identification, caractérisation et distribution spatiale des glaciers-rocheux dans la haute vallée de l'Arc (Alpes françaises du Nord) / Identification, characterisation and spatial distribution of rockglaciers in the upper Arc Valley (northern French Alps)*. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Avril-juin, vol. 10, n°2. pp. 139-155.
- MONNIER S. (2007), *Du glacier au glacier-rocheux, depuis la fin du Petit Age glaciaire, au pied du Mont Thabor (Alpes du Nord, France)*. Page 283-294.
- ONF, service RTM 04 (M. PEYRON), (2011), *Rapport de la visite de sécurité du glacier de Chauvet du 7 juillet 2011*.
- ONF, service RTM 05, (2011), *Le Pergélisol de montagne. Bilan des connaissances, méthodes d'identification, évaluation des risques induits et propositions. Le cas des Hautes-Alpes*.
- RAVANEL L. (2009), *Evolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique. Cahiers de géographie n°8, Neige et Glace de montagne : reconstitution, dynamique, pratiques*. Collection EDYTEM.
- RIGUIDEL A. (2011), *La dégradation du pergélisol de montagne génératrice de risques*. Petit Mémoire, Université de Grenoble, France.
- RIVIER B. (1997), *Lacs de Haute altitude. Méthodes d'échantillons ichtyologiques. Gestion piscicole*. Editeur Cemagref.
- SCAPPOZA C. (2008), *Contribution à l'étude géomorphologique et géodésique des éléments périglaciaire des Alpes tessinoise orientales*. Maîtrise ès science en géographie, Université de Lausanne, Suisse.
- SCHOENEICH P. et DE JONG C. (2008), *Evolution de l'environnement alpin. Quel environnement alpin demain? Pour quelles activités?* Revue de Géographie Alpine n°4, page 53-64.
- VALLON M. (1992), *Note sur la surveillance du site d'Arsine, à l'attention du service de Restauration des Terrains en Montagne des Hautes Alpes et des mairies de s communes concernées*.
- VINCENT C. et GUIRADO F. et VALLON M. (2002), *Rapport intermédiaire n°4 sur le Glacier d'Arsine*. Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement – CNRS. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- <http://www.glaciers-climat.com/le-mouvement-du-glacier.html>
- <http://www.permos.ch/downloads/alpen2007fGlacierRocheux.pdf>
- http://gsc.nrcan.gc.ca/permafrost/whatis_f.php
- <http://www.thecanadianencyclopedia.com/index.cfm>
- <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/ssgmfiches/pergelisol/3406.php>
- <http://www.slf.ch/dienstleistungen/buecher/10493.pdf> (construire sur le pergélisol)