

Mémoire de stage de Master 2 GAED
Parcours Gestion et Évaluation des environnements Montagnards (GEMO)

**Un siècle d'évolution glaciaire dans les Alpes françaises à
partir de l'œuvre iconographique de Paul Helbronner**



*Bassin d'accumulation du glacier d'Argentière photographié par Paul Helbronner
le 17 août 1920 depuis l'Aiguille des Grands Montets (3296 m)*

Travail réalisé par **Zora Erard** sous la direction de :

Ludovic Ravanel et Philip Deline, maîtres de stage, Laboratoire EDYTEM
Emmanuel Chapron, référent universitaire, Université Toulouse Jean Jaurès

Attestation sur l'honneur

Je soussignée : Erard, Zora, Master 2 GAED, Parcours GEMO

Année universitaire : 2024 - 2025

Certifie sur l'honneur que le document joint à la présente déclaration :

- Est un travail original, c'est-à-dire que :
 - toute idée ou formulation tirée d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, mentionne explicitement et précisément leur origine,
 - toute source (site internet, recueil de discours, etc.) est précisément citée,
 - les citations intégrales sont signalées entre guillemets ou sous la forme d'un paragraphe clairement identifié lorsqu'il s'agit de citations longues.
- N'a pas été rédigé, même partiellement, par une intelligence artificielle.
- N'a pas été structuré, même partiellement, par une intelligence artificielle.
- Ne s'appuie pas sur une synthèse réalisée par une intelligence artificielle (synthèse bibliographique par exemple).
- Ne présente pas d'illustration, carte, image, etc. générée par une intelligence artificielle.

Fait à Chambéry le 14 juillet 2025,

Zora ERARD

Résumé

Les glaciers sont de très bons indicateurs du changement climatique en cours et de ses effets sur les milieux de haute montagne. Dans les Alpes françaises, leur retrait depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1850) est largement étudié et des travaux montrent qu'il s'accélère souvent depuis la fin des années 1990. Ce mémoire s'appuie sur des photographies prises entre 1907 et 1920 par Paul Helbronner, géodésien et alpiniste, pour documenter cette évolution glaciaire. Il a pour but de mettre en évidence certaines conséquences du retrait glaciaire (fragmentation des glaciers, perte de surfaces glaciaires, multiplication des néolacs).

La démarche a consisté à sélectionner et numériser les panoramas photographiques pertinents de deux des douze tomes de la *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*, afin de comparer les contours glaciaires anciens à ceux relevés sur des photographies aériennes récentes (2022-2023), dans le but d'estimer des pertes de surface englacée dans les massifs du Mont-Blanc, de la Vanoise et des Écrins. Pour cela, une méthode fondée sur l'utilisation du *monoplotting* et d'un système d'information géographique (QGIS) a été développée. Une typologie glaciaire a également été élaborée afin de traduire les trajectoires des appareils glaciaires et de mieux appréhender les évolutions propres à chaque glacier. Cette catégorisation visait aussi à mettre en évidence le phénomène de fragmentation en fonction des morphologies glaciaires.

L'analyse a permis de constater une disparition de 48,5 % des appareils glaciaires étudiés en faisant ressortir des dynamiques différencierées. Les petits appareils glaciaires comme les tabliers de glace et les couloirs sont apparus comme plus vulnérables aux variations climatiques avec respectivement 28,6 % et 82,3 % de disparitions. Les appareils de plus grande taille tels que les glaciers de vallée, de versant et de cirque-et-de-versant ont enregistré des pertes de superficie moindres mais ont été davantage sujets au morcellement. Le retrait glaciaire s'accompagne par ailleurs de l'apparition de formes post-glaciaires, les néolacs, caractérisés ici par leur petite taille. Ces indicateurs de la déglaciation pourraient avoir des implications futures fortes, tant sur le plan écologique (nouveaux habitats) que sur celui des risques naturels (vidanges brutales).

Ce travail met en lumière l'importance des images d'archives qui, combinées à des photographies aériennes récentes, permettent une reconstitution sur le temps long de l'évolution des paysages et des glaciers. L'étude confirme la valeur scientifique et patrimoniale de l'œuvre iconographique de Paul Helbronner dans un contexte de désengagement. Elle souligne également l'intérêt de poursuivre l'exploitation de ces ressources pour suivre l'évolution des glaciers et anticiper les impacts environnementaux à venir.

Mots clés : Paul Helbronner, glaciers, changement climatique, monoplotting, archives

Abstract

Glaciers are very good indicators of ongoing climate change and its effects on high mountain environments. In the French Alps, their retreat since the end of the Little Ice Age (around 1850) has been widely studied, and research shows that this retreat has often accelerated since the late 1990s. This thesis draws on photographs taken between 1907 and 1920 by Paul Helbronner, geodesist and mountaineer, to document this glacial evolution. Its aim is to highlight some of the consequences of glacier retreat (fragmentation of glaciers, loss of glacierized surfaces, multiplication of proglacial lakes).

The approach consisted in selecting and digitizing relevant photographic panoramas from two of the twelve volumes of the *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*, in order to compare past glacier outlines with those identified on recent aerial photographs (2022–2023). The objective was to estimate losses of glacierized surface area in the Mont Blanc, Vanoise, and Écrins massifs. To achieve this, a method based on monoplotting and the use of a geographic information system (QGIS) was developed. A glacial typology was also elaborated to describe the trajectories of glacier units and to better understand the specific evolutions of each glacier. This categorization also aimed to highlight the phenomenon of fragmentation according to glacier morphologies.

The analysis revealed the disappearance of 48.5% of the studied glacier units, bringing out differentiated dynamics. Small glacier units such as ice aprons and couloirs appeared more vulnerable to climatic variations, with disappearance rates of 28.6% and 82.3% respectively. Larger units, such as valley glaciers, slope glaciers, and cirque–slope glaciers, recorded smaller surface losses but were more prone to fragmentation. Glacier retreat has also been accompanied by the emergence of post-glacial landforms, namely proglacial lakes, which in this case are characterized by their small size. These indicators of deglaciation could have significant future implications, both from an ecological perspective (new habitats) and in terms of natural hazards (sudden outburst floods).

This work highlights the importance of archival images which, when combined with recent aerial photographs, allow for long-term reconstructions of landscape and glacier evolution. The study presented here confirms the scientific and heritage value of Paul Helbronner's iconographic work in the context of glacier retreat. It also underlines the relevance of continuing to exploit these resources in order to monitor glacier evolution and anticipate future environmental impacts.

Keywords : Paul Helbronner, glaciers, climate change, monoplotting, archival images

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier **Ludovic Ravanel** et **Philip Deline** pour leur encadrement, leurs conseils précieux et leur disponibilité tout au long de ce stage. Nos discussions m'ont permis de progresser dans des domaines qui me passionnent : la glaciologie et la géomorphologie glaciaire.

Je remercie également **l'Association Paul Helbronner** pour sa collaboration et pour l'accès aux archives photographiques, qui ont constitué la base de ce mémoire. La confiance qui m'a été accordée a été essentielle au bon déroulement de ce projet.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des membres du laboratoire **EDYTEM** pour leur accueil chaleureux et les échanges scientifiques enrichissants qui ont accompagné mon stage. Un grand merci notamment à Nawel, Robin, Max et Damien, stagiaires de l'équipe Morphodynamiques, auprès de qui j'ai beaucoup appris !

Je remercie le master **GEMO** et mon référent universitaire **Emmanuel Chapron** qui a su répondre à mes (nombreuses) interrogations sur les lacs glaciaires !

Enfin, merci à **Jade** qui accompagne toutes mes sorties en montagne, m'écoute avec patience raconter mon amour des glaciers et qui m'a soutenu tout au long de ce travail.

Sommaire

<u>Résumé</u>	3
<u>Abstract</u>	4
<u>Remerciements</u>	5
<u>Sommaire</u>	6
<u>Liste des sigles</u>	7
<u>Introduction</u>	8
I. <u>Contexte du stage</u>	10
I. 1. <u>Présentation des structures encadrantes</u>	10
I. 2. <u>Objectifs du stage</u>	12
I. 3. <u>Présentation du secteur d'étude</u>	13
II. <u>Cadre théorique</u>	17
II. 1. <u>Dynamiques glaciaires dans les Alpes françaises</u>	17
II. 2. <u>Typologie des appareils glaciaires</u>	24
II. 3. <u>Méthodes de quantification du retrait glaciaire</u>	26
III. <u>Méthodologie</u>	31
III. 1. <u>Matériel et données</u>	31
III. 2. <u>Méthodes et traitement</u>	32
III. 3. <u>Limites</u>	40
IV. <u>Résultats</u>	42
IV. 1. <u>Le corpus cartographique</u>	42
IV. 2. <u>Présentation du corpus</u>	47
IV. 3. <u>Données statistiques</u>	49
IV. 4. <u>Apports des résultats</u>	56
V. <u>Discussion</u>	57
V. 1. <u>Mise en perspective des résultats</u>	57
V. 2. <u>Déroulement du stage et retours personnels</u>	61
VI. <u>Conclusion et perspectives</u>	62
<u>Bibliographie :</u>	63
<u>Sitographie</u>	69
<u>Annexe 1</u>	71
<u>Annexe 2</u>	86
<u>Annexe 3</u>	90
<u>Index des figures</u>	92
<u>Index des tableaux</u>	93
<u>Index des annexes</u>	93
<u>Table des matières</u>	94

Liste des sigles

- **BD RGE ALTI** : Base de Données de Référence à Grande Échelle – Altimétrie
- **CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique
- **CREA Mont-Blanc** : Centre de Recherches sur les Écosystèmes d'Altitude – Mont-Blanc
- **DMG** : Dernier Maximum Glaciaire
- **EDYTEM** : Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne
- **GLIMS** : *Global Land Ice Measurements from Space* (Mesures mondiales des glaciers depuis l'espace)
- **GLOF** : *Glacial Lake Outburst Flood* (Vidange brutale de lac glaciaire)
- **IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière
- **INPE** : Inventaire National des Plans d'Eau
- **IPCC** : *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
- **LiDAR** : *Light Detection and Ranging* (Télédétection par laser)
- **MNT** : Modèle numérique de terrain
- **OSUG** : Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble
- **PAG** : Petit Âge Glaciaire
- **QGIS** : *Quantum Geographic Information System* (Système d'information géographique Quantum)
- **RGI** : *Randolph Glacier Inventory* (Inventaire mondial des glaciers de Randolph)
- **SIG** : Système d'information géographique
- **SIM** : Stades Isotropiques Marins
- **WGMS** : *World Glacier Monitoring System* (Système Mondial de surveillance des glaciers)

Introduction

Paul Helbronner (1871-1938) est un pionnier de la géodésie alpine et de la photographie de haute montagne. Il découvre les Alpes durant sa jeunesse lors d'un voyage à Chamonix. Sa première ascension du mont Blanc, en 1891, lui ouvre les portes de l'alpinisme. Très vite, il envisage cette pratique au-delà de l'exploit sportif : l'alpinisme va lui servir à réaliser un projet scientifique et artistique ambitieux (Association Paul Helbronner, 2017).

À une époque où la cartographie des milieux montagnards est très incomplète, Paul Helbronner lance de vastes campagnes de levés topographiques dans le but de mesurer les sommets alpins. Pendant 24 ans, il sillonne les Alpes françaises, transportant instruments scientifiques et matériel photographique afin d'étudier et d'immortaliser les reliefs (Bonfort, 2006). Il laisse derrière lui un fond colossal avec notamment une *Description géométrique détaillée des Alpes françaises* en 12 tomes (Observatoire de la Côte d'Azur, 2024). Ces ouvrages, accompagnés de leurs annexes photographiques et de quelques panoramas à l'aquarelle, constituent une véritable mémoire des Alpes du début du XXe siècle.

C'est sur l'exploitation de ces photographies panoramiques que se fonde cette étude. Prises un demi-siècle après la fin du Petit Âge Glaciaire (1350 - 1850), ces images sont des témoignages précieux d'un milieu bouleversé par la crise climatique et les profonds changements associés. Depuis la fin de cette période glaciaire, les glaciers alpins ont perdu environ 64 % de leur volume (Reinthal & Paul, 2025) et ont connu une fonte accélérée depuis les années 1980 (Huss et Hock, 2018). Ce retrait rapide s'est également accompagné d'une dégradation du pergélisol, fragilisant les versants (Bodin *et al.*, 2016) et de la multiplication de lacs glaciaires menaçant parfois les vallées en aval (Shugar *et al.*, 2020). Comprendre et mesurer les évolutions de la haute montagne englacée, par le biais de ces images anciennes, c'est faire mettre en avant les conséquences du changement climatique sur des secteurs précis, répartis au sein de trois massifs alpins. La rareté de ces photos leur confère une valeur patrimoniale et historique supplémentaire car peu nombreux étaient les photographes qui, au début du XXe siècle, s'aventuraient sur des terrains de montagne chargés des appareils lourds et encombrants de l'époque (Léon, 2015).

Dans ce contexte, le travail présenté ici a pour objectif de valoriser cet héritage iconographique et d'en extraire des données glaciologiques. L'objectif premier de ce stage est de réaliser une comparaison diachronique de l'englacement des Alpes françaises entre le début du XXe siècle et la période actuelle (2022 – 2023) *via* des photos aériennes. L'utilisation d'archives photographiques pour retracer les évolutions glaciaires a déjà fait l'objet de différentes études dans les Alpes. En Suisse, des archives d'images terrestres acquises entre 1916 et 1947 ont permis de quantifier la perte de volume glaciaire sur près d'un siècle (Mannerfelt *et al.*, 2022). Nussbaumer et Zumbühl (2012) ont également utilisé un corpus

constitué de sources iconographiques, dont des photographies anciennes, pour reconstituer les fluctuations des glaciers des Alpes occidentales et centrales au cours du XVIII^e siècle. En France, des travaux ont mis en lumière l'importance des clichés anciens pour documenter les évolutions glacio-morphologiques dans les Alpes. Par exemple, Ravanel & Deline (2008) ont comparé photographies anciennes et récentes pour inventorier les chutes de blocs sur la face nord des Aiguilles de Chamonix depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. De même, Mourey & Ravanel (2017) ont utilisé des photographies historiques, ainsi que cartes et topos, pour suivre l'évolution des itinéraires d'accès dans le bassin de la Mer de Glace sur plus d'un siècle. Ce travail s'inscrit dans la continuité de ces approches mais propose d'étudier les évolutions différenciées de plusieurs types d'appareils glaciaires. Des données quantitatives ont pu être extraites de ces analyses, renseignant les pertes de superficie, les changements de types d'appareils glaciaires ainsi que l'apparition de nouvelles formes post-glaciaires. Cette approche, qui se fonde sur une typologie adaptée au milieu alpin, permet de renseigner différents types d'évolutions pouvant, par exemple, être intégrés à des modèles de prévision et de modélisation.

Au-delà de l'apport scientifique et quantitatif, ces images sont des supports particulièrement intéressants pour communiquer sur les évolutions paysagères, en particulier dans un contexte de changement climatique global. Cette méthode de médiation a déjà fait ses preuves : en 2020, une exposition « géo-photographique » avait utilisé des clichés de glaciers pour sensibiliser au changement climatique (Rossi *et al.*, 2020). L'US Geological Survey (USGS) avait, dans ce même contexte, entrepris une démarche de documentation des évolutions glaciaires grâce à des pairs d'images (anciennes et actuelles) sur la période 1887 - 2019 (McKeon *et al.*, 2021). Cette compilation de photographies avait pour objectif d'illustrer les changements paysagers liés à l'augmentation des températures globales, au sein du Glacier National Park (Montana, USA). Le corpus photographique étudié aussi se prête donc aussi à un travail de sensibilisation et de vulgarisation auprès du grand public.

Ce stage de recherche et de médiation scientifique, mené en collaboration avec l'Association Paul Helbronner au sein du laboratoire EDYTEM (Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne) du CNRS et de l'Université Savoie Mont-Blanc, vise à répondre à la question suivante : **Dans quelle mesure les photographies de Paul Helbronner du début du XX^e siècle peuvent-elles être mobilisées pour documenter l'évolution de l'englacement dans les Alpes françaises sur un siècle ?**

I. Contexte du stage

I. 1. Présentation des structures encadrantes

L'Association Paul Helbronner

Crée en 2010, l'Association Paul Helbronner réunit aujourd'hui une vingtaine de membres, presque tous descendants directs du géodésien et photographe Paul Helbronner. Sa mission est double : faire connaître la vie et l'œuvre de cet explorateur des Alpes, et mettre en valeur le fonds scientifique, photographique, artistique et culturel qu'il a laissé. Elle se donne également pour objectif de contribuer à une meilleure connaissance de la montagne, notamment dans le cadre des changements climatiques en cours (Association Paul Helbronner, 2024).

Ses moyens financiers reposent essentiellement sur les cotisations de ses membres et sur des dons collectés autour de projets concrets. Depuis sa création, elle a mené plusieurs actions marquantes, comme l'exposition organisée en 2015 pour l'inauguration du téléphérique italien Skyway vers la pointe Helbronner (Funivie Monte Bianco), ou la publication du livre *Les Alpes d'Helbronner, Mesure et démesure* de Michel Léon aux éditions Glénat (Léon, 2015).

L'association collabore régulièrement avec des chercheurs et des journalistes, mettant parfois à leur disposition des archives familiales, en complément de celles conservées au Musée dauphinois de Grenoble. En 2024, elle a notamment contribué à un article publié dans la revue néerlandaise *Bergen Magazine* (Van Velzen, 2024). Depuis, elle développe plusieurs partenariats pour valoriser et rendre accessible le fonds Helbronner, notamment par la numérisation de son œuvre. L'un de ces partenariats associe le Musée dauphinois, qui conserve l'essentiel du fonds (panoramas aquarellés, plus de 12 000 plaques de verre, carnets de terrain, objets personnels, et la *Description géométrique détaillée des Alpes françaises* (Observatoire de la Côte d'Azur, 2024) et la Bibliothèque nationale de France, en vue de numériser l'ensemble de ces documents. Un autre partenariat a été noué avec la Fédération des Clubs alpins français, pour sensibiliser le public à l'évolution des paysages alpins à travers, par exemple, une application géolocalisée présentant des photos prises il y a un siècle ou la création de « chemins Helbronner ».

Enfin, l'étude présentée ici est le fruit d'un partenariat mis en place avec le laboratoire EDYTEM – Université Savoie Mont Blanc en vue de mesurer le potentiel d'exploitation scientifique actuel de la *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*.

Le laboratoire EDYTEM

Fondé en 2003, le laboratoire EDYTEM est une UMR (unité mixte de recherche) dont les tutelles sont le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et l'Université Savoie Mont-Blanc. Le laboratoire est implanté sur le campus de *Savoie Technolac*, au Bourget-du-Lac (Savoie) et fait partie de l'OSUG (Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble). Il rassemble des chercheurs d'horizons variés au sein d'une structure résolument interdisciplinaire centrée sur les environnements montagnards (figure 1).



Les études et recherches menées au sein d'EDYTEM explorent les multiples facteurs qui impactent les dynamiques environnementales de montagne et se répartissent au sein de quatre équipes de recherche. Les responsables d'équipes sont désignés par élection et siègent au conseil d'unité où ils représentent l'ensemble des personnels.

- L'équipe **Matières** animée Emilie Chalmin et Micheline Draye concentre ses recherches sur les "matières d'intérêt économique et/ou culturel" (EDYTEM, 2025) exploitées par l'Homme. Elle comporte 13 personnels permanents, 8 thèses y sont actuellement effectuées ainsi que deux post-doctorats.
L'équipe **Sociétés** animée par Hélène Salomon et Mélanie Duval a pour objectif l'étude des cultures, pratiques et politiques du milieu montagnard. 13 personnels permanents y travaillent et 12 thèses y sont menées.
- L'équipe **Zone Critique** animée par Christine Piot et Pierre Sabatier se penche sur les forçages climatiques et anthropiques qui influent sur les flux de matière au sein de la zone critique. L'équipe compte 17 personnels permanents et 12 thèses en cours.
- L'équipe **Morphodynamiques**, au sein de laquelle s'est effectué ce stage, est animée par Ludovic Ravanel et Yann Rolland. Elle se concentre sur les dynamiques géomorphologiques, en particulier dans les milieux de haute montagne et karstiques. Actuellement, l'équipe compte 10 permanents, 7 thèses ainsi que 10 projets et programmes en cours. Plusieurs axes de recherche sont développés par l'équipe : les évolutions des secteurs à permafrost et des régions englacées de la haute montagne, les interactions entre érosion à long terme et dynamiques à court terme, les "dynamiques amont-aval dans les processus d'érosion et de transport-dépôt" (OSUG, 2025), l'étude des réseaux karstiques et les interventions humaines sur les paysages physiques.

La structuration du laboratoire en quatre équipes permet un croisement des regards sur les évolutions des espaces de montagne. Trois thèmes transversaux, faisant intervenir les différentes équipes structurent ainsi EDYTEM :

- Le thème "**Changements environnementaux et sociétés**" regroupe des problématiques liées aux changements de pratiques des sociétés humaines dans un contexte de changement climatique.

- Le thème “**Ressources et patrimoines**” questionne la place des patrimoines naturels et culturels au sein de problématiques environnementales, géomorphologiques, géographiques et sociales.
- Le thème “**Épistémologie, politiques, espaces de montagnes**” interroge les représentations de l'espace, de la montagne et de l'environnement et les enjeux politiques et épistémologiques qui y sont liés.

Pour chaque thème, des responsables sont nommés par l'équipe de direction afin d'assister aux conseils de direction (deux fois par mois) et aux conseils d'unité.

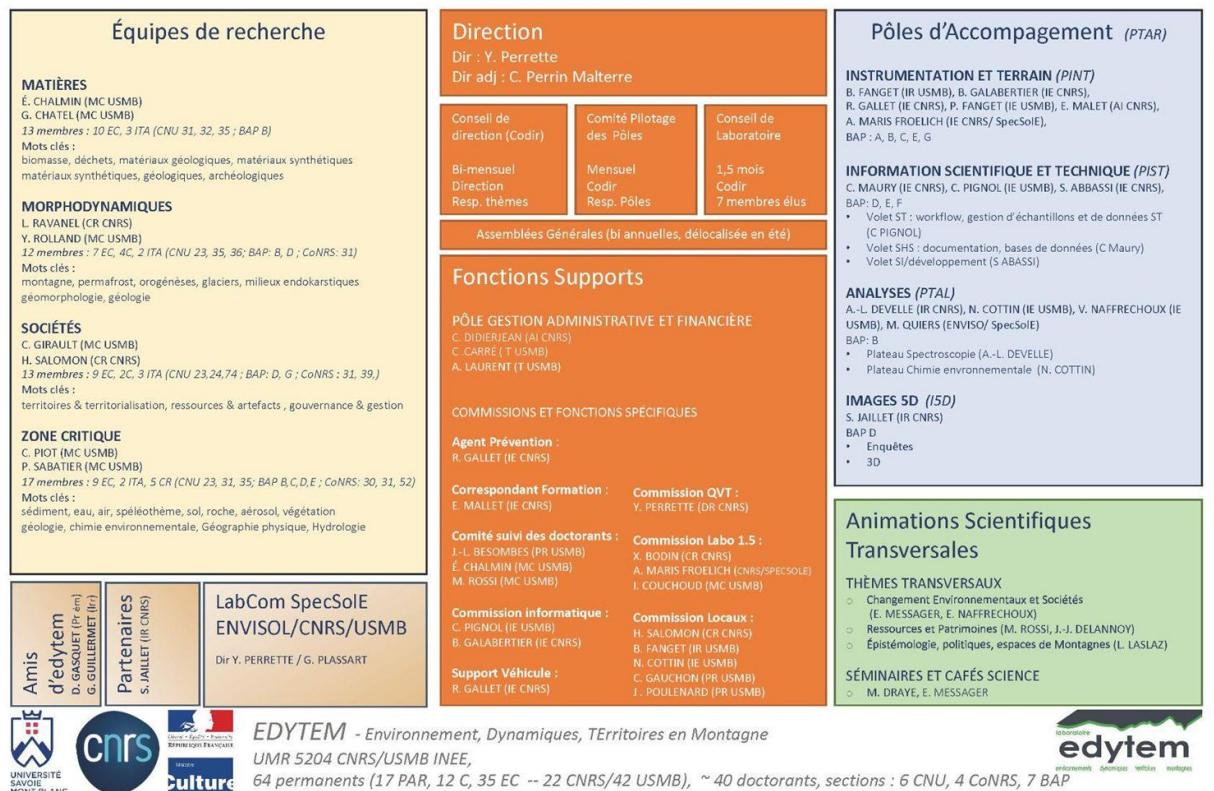


Figure 1 : Organigramme du laboratoire EDYTEM (EDYTEM, 2025).

I. 2. Objectifs du stage

La collaboration entre l'Association Paul Helbronner et le laboratoire EDYTEM vise, à travers ce stage, à faire ressortir le potentiel scientifique (glaciologie) des documents produits par Paul Helbronner.

L'œuvre iconographique et textuelle du géodésien n'avait encore jamais été étudiée dans cette perspective. Avant le début de ce stage, nous ne savions pas précisément ce que contenaient les Tomes et les annexes de la *Description*. Paul Helbronner avait-il produit des descriptions détaillées d'environnements glaciaires dans ses écrits ? Les photographies panoramiques contenaient-elles de nombreux appareils glaciaires ? Et si oui, étaient-ils

présents dans leur intégralité sur les clichés ? Une première partie du travail allait donc devoir être consacrée à l'exploration des documents afin d'en définir le potentiel pour l'étude de l'évolution de l'englacement alpin. La suite méthodologique allait en effet dépendre de cette première reconnaissance des données.

Toutefois, si la méthode s'est construite au fil de l'étude, des objectifs étaient déjà clairement définis : ce travail devait produire des données exploitables, qualitatives et quantitatives, sur les évolutions de la haute montagne alpine française englacée depuis le début du XXe siècle. Il devait également promouvoir l'œuvre de Paul Helbronner et permettre de faire connaître son travail. Enfin, dans une démarche de science ouverte, ce stage avait pour but de produire des résultats et de les rendre accessibles à large public, *via* des supports visuels de vulgarisation scientifique. L'idée de travailler grâce à des techniques de monoplotting (géoréférencement sur images obliques) était déjà envisagée compte tenu de la nature des photographies, prises depuis des sommets alpins. La volonté de cartographier et de quantifier l'évolution des surfaces englacées était également un objectif clair dont la méthode a été élaborée par la suite en travaillant sur des orthophotos aériennes superposées à des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

I. 3. Présentation du secteur d'étude

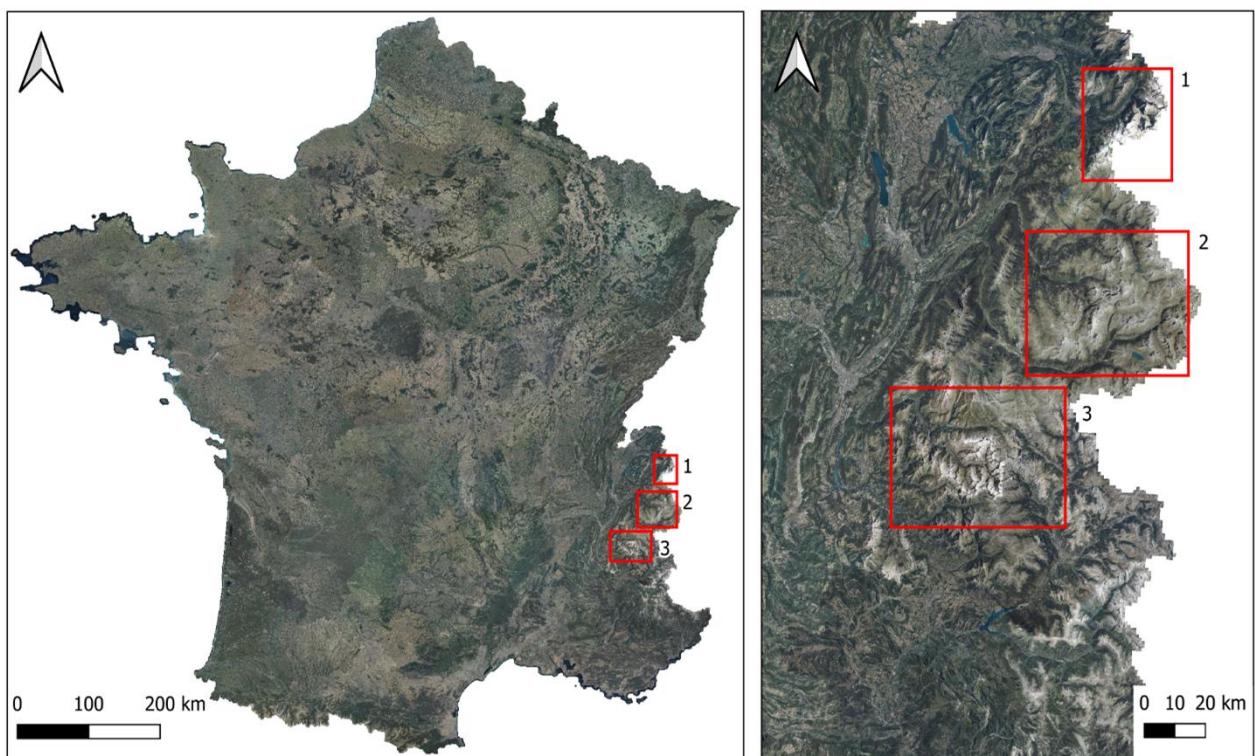


Figure 2 : Localisation des massifs étudiés (fond : orthophotos IGN).

Le travail présenté ici s'appuie sur les photographies des Tomes 1 (*Chaîne méridienne de Savoie*) et 2 (*Massifs du Chablais et du Faucigny, versant français du massif du Mont-Blanc*) de la *Description*. Le territoire d'étude couvre donc trois massifs des Alpes françaises : les massifs des Écrins, de la Vanoise et du Mont-Blanc (figure 2).

- Le massif de la Vanoise

Le massif de la Vanoise (Savoie, 73), s'étend entre la vallée de la Tarentaise au nord, celle de la Maurienne au sud, la frontière italienne à l'est et les massifs de Belledonne et de la Lauzière à l'ouest. Les altitudes y dépassent souvent les 3000 m, à l'image de la Grande Casse (3855 m), point culminant de la Vanoise et du département de la Savoie. Parmi les sommets emblématiques du massif, figurent également la Dent Parrachée (3697 m), le Dôme de la Sache (3601 m) ou encore la pointe de la Réchasse (3212 m) (Parc National de la Vanoise ; IGN). Afin de préserver les richesses naturelles de ce territoire, un Parc National a été créé en 1963 dont le cœur couvre une superficie de 535 km² et l'aire d'adhésion s'étend sur 1450 km² (Parc National de la Vanoise). Initialement mis en place pour sauvegarder le bouquetin, ce parc recense aujourd'hui 1200 espèces florales, 65 espèces protégées et des milieux naturels diversifiés. Les 400 km de sentiers et le réseau de refuges modernisés compris au sein du Parc en font également un lieu d'attractivité touristique (OFB, 2024).

Au-delà de sa richesse en biodiversité et son attractivité, c'est sa dynamique glaciaire qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de cette étude. Les hautes altitudes de ce massif favorisent la présence de nombreux glaciers : dans les années 1970, Vivian et Bocquet (1973) ont réalisé la première synthèse glaciologique de la Vanoise, en cartographiant les principaux groupes glaciaires et en proposant des fiches descriptives détaillées. Cette étude pionnière a posé les bases des connaissances actuelles sur la répartition et la morphologie des glaciers du massif. Plus, récemment, sur la période 2006–2009, Gardent *et al.* (2014) estimaient leur nombre à 174. Cette étude a notamment révélé que les surfaces englacées en Vanoise ont diminué de 61,1 % entre le Petit Âge Glaciaire et 2006 – 2009 et que cette diminution s'est accélérée avec une perte d'environ 29,7 % de la surface glaciaire entre 1967 – 1971 et 2006 – 2009.

- Le massif des Écrins

Le massif des Écrins s'étend sur les départements des Hautes-Alpes (05) et de l'Isère (38). Il comprend 150 sommets de plus de 3 000 m dont la Barre des Écrins (4102 m), point culminant du massif, la Meije (3983 m) ou le Pelvoux (3946 m) (IGN). Le massif se caractérise par des reliefs escarpés et des vallées glaciaires profondes au sein desquelles l'activité pastorale côtoie aujourd'hui un tourisme de montagne très développé (Association des Parcs Nationaux de France, 2012). Ces activités humaines sont encadrées dans un but de protection de la biodiversité qu'abrite le massif : environ 3631 espèces végétales, 6881 espèces

d'invertébrés et plus de 445 espèces de vertébrés y ont été recensées (Parc National des Écrins, 2025). Dans ce contexte, un Parc National a vu le jour en mars 1973 afin de préserver ce patrimoine naturel. Sa zone cœur couvre 930 km² tandis que son aire d'adhésion couvre une surface de 1596 km².

À l'image de la Vanoise, le massif des Écrins est marqué par une forte dynamique glaciaire. Études pionnières au sein de ce massif, les campagnes glaciologiques de Jacob (1927) se penchaient déjà sur les fluctuations de plusieurs glaciers de l'Oisans, principalement situés dans les Écrins, entre 1905 et 1911. Ces travaux avaient révélé que le recul des glaciers s'était arrêté en 1911 hormis pour le glacier de Saint-Sorlin. L'étude signalait une potentielle crue glaciaire à venir, qui eut effectivement lieu et fut documentée par des campagnes menées entre 1918 et 1921 (Allix, 1927). Plus récemment, les études concernant l'englacement des Écrins ont mis en avant un recul accéléré des surfaces glaciaires. Entre la fin du Petit Âge Glaciaire et 1967 – 1971, le retrait glaciaire était de 3 % par décennie puis est passé à 26 % entre 2003 et 2006 – 2009. Au total, les surfaces englacées des Écrins ont reculé de 59,9 % entre le Petit Âge Glaciaire et 2006 – 2009 (Gardent *et al.*, 2014).

- Le massif du Mont-Blanc

Partagé entre la France, l'Italie et la Suisse, le massif du Mont-Blanc abrite le point culminant de l'Europe occidentale : le mont Blanc (4806 m). Ce massif compte plusieurs sommets culminant à plus de 4000 m, dont le Dôme du Goûter (4792 m), le Mont-Blanc-de-Courmayeur (4748 m), les Grandes Jorasses (4208 m) ou l'Aiguille Verte (4122 m) (Commune de Chamonix-Mont-Blanc). Le massif n'est pas protégé par un Parc Naturel comme le sont les deux autres massifs. Il fait toutefois l'objet de plusieurs moyens de protections fragmentés. Il fait, en effet, partie des sites classés pour leur caractère pittoresque depuis l'arrêté de classement publié en 1951 (DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 2012). Deux Réserves Naturelles Nationales, celle des Aiguilles-Rouges et celle des Contamines-Montjoie (Réserves Naturelles de France) protègent également une partie du territoire. Certaines zones sont aussi soumises à la réglementation *Natura 2000* (Communauté de communes de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc, 2015) et enfin, une Aire de protection des habitats naturels a été mise en place dans le but de préserver ces milieux d'altitude d'intérêt patrimonial (Préfecture de Haute-Savoie, 2020).

Les glaciers, largement présents dans le massif (CREA Mont-Blanc), ont passionné de nombreux chercheurs tels que Joseph, Henri et Charles Vallot, scientifiques du XIXe et XXe siècles qui s'étant consacrés à l'étude de la haute montagne. Une étude réalisée par ces chercheurs et parue en 1922, révèle les fluctuations de longueur des glaciers de Chamonix entre 1894 et 1921 (Vallot, 1922). Ces résultats font état d'une crue glaciaire au début du XXe siècle, avec une avancée du glacier des Bossons et de celui de Taconnaz sur les années 1919 et 1920 (Vallot, 1922). Aujourd'hui, les études récentes montrent un recul important des

surfaces englacées du massif du Mont-Blanc, qui est toutefois inférieur à celui qu'ont connu la Vanoise et les Écrins. Entre le Petit Âge Glaciaire et 2006-2009, la partie française du massif avait perdu 23,6 % de sa surface glaciaire (Gardent *et al.*, 2014).

Ces trois massifs comportent donc une caractéristique commune : ils sont soumis à une forte dynamique glaciaire. Depuis la réalisation des clichés au début du XXe siècle, l'engagement des reliefs alpins a fortement évolué et se trouve marqué par une réduction considérable des surfaces englacées (Deline et Le Roy, 2008 ; Gardent *et al.*, 2014). Tout l'enjeu de ce travail est de qualifier et quantifier les évolutions grâce aux archives photographiques de Paul Helbronner. Avant de présenter la méthode mise en place et les résultats obtenus, il convient de présenter le cadre théorique, ou état de l'art, dans lequel s'inscrit ce mémoire. Nous y rappellerons les dynamiques glaciaires qui ont caractérisé les Alpes, les méthodes qui ont été mises en œuvre pour les analyser et enfin l'importance d'une approche fondée sur une typologie glaciaire dans le but d'étudier les différentes trajectoires des appareils glaciaires.

II. Cadre théorique

II. 1. Dynamiques glaciaires dans les Alpes françaises

II. 1. a. Glaciations et interglaciaires

Les glaciers alpins actuels sont l'héritage d'un passé glaciaire rythmé par les variations climatiques du Quaternaire, débuté il y a 2,6 millions d'années. Durant cette ère géologique, les Alpes ont connu une alternance de périodes glaciaires (climat froid) et interglaciaires (climat plus tempéré) qui ont fait fluctuer fortement l'emprise des surfaces englacées (Davis *et al.*, 2009). Ces glaciations sont principalement liées aux cycles de Milankovitch c'est-à-dire aux variations des paramètres orbitaux de la Terre, notamment de l'obliquité et la précession, qui jouent un rôle fondamental sur l'insolation reçue par la Terre (Parrenin et Paillard, 2012 ; Imbrie *et al.*, 1992). La fluctuation de ces paramètres suppose des modifications de la position de la Terre par rapport au Soleil : celle-ci reçoit moins de chaleur, le climat se refroidit et des glaciations se mettent en place (NASA, 2020). Depuis les années 1970, la reconstruction des fluctuations climatiques du Quaternaire s'appuie sur l'étude des stades isotopiques marins. Ses stades sont obtenus par la mesure du rapport isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$). Cette mesure est elle-même obtenue par la comparaison entre la proportion de ^{18}O et de ^{16}O dans un échantillon de carottes sédimentaire marine (Muglia *et al.*, 2023). Une période chaude ou tempérée est caractérisée par un rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ stable tandis qu'une période froide se caractérise par une prévalence de ^{18}O (Lisiecki et Raymo, 2005). Une courbe globale (figure 3) du rapport isotopique a été établie à la suite de l'étude de Lisiecki et Raymo (2005). Dans cette courbe, les stades isotopiques marins froids, correspondant à des périodes de glaciations, sont exprimés en chiffres pairs, tandis que les phases interglaciaires sont exprimées en chiffres impairs.

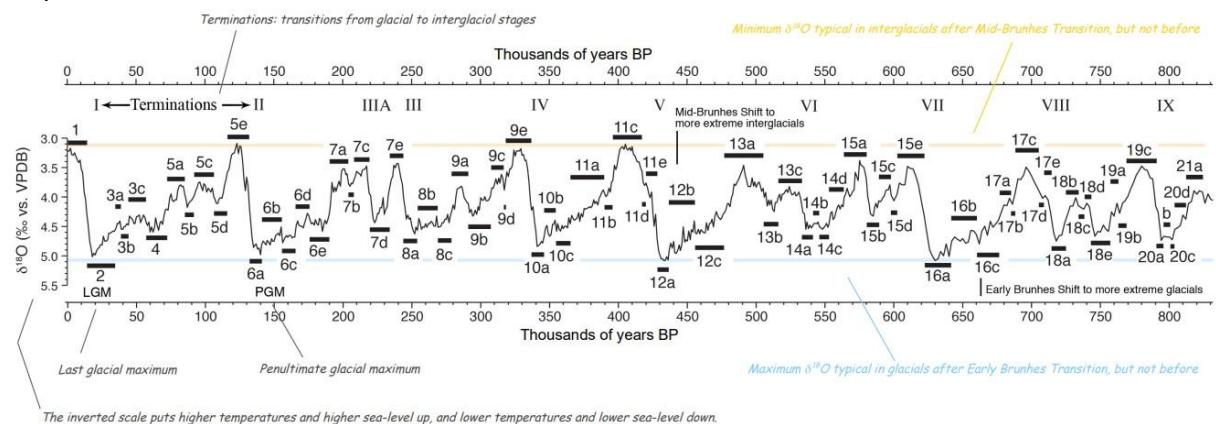


Figure 3 : Les stades isotopiques marins sur les 800 000 dernières années (Railsback *et al.*, 2015 ; Lisiecki et Raymo, 2005).

Au Dernier Maximum Glaciaire (DMG), il y a environ 21 000 ans (Ehlers et Gibbard, 2007), on estime que sur la totalité des Alpes (incluant les zones de piémont environnantes), près de 220 000 km² étaient recouverts par des glaciers (Coutterand, 2009). La calotte alpine pouvait alors recouvrir les vallées jusqu'au piémont tandis que les langues glaciaires descendaient jusqu'aux plaines (figures 4 et 5)

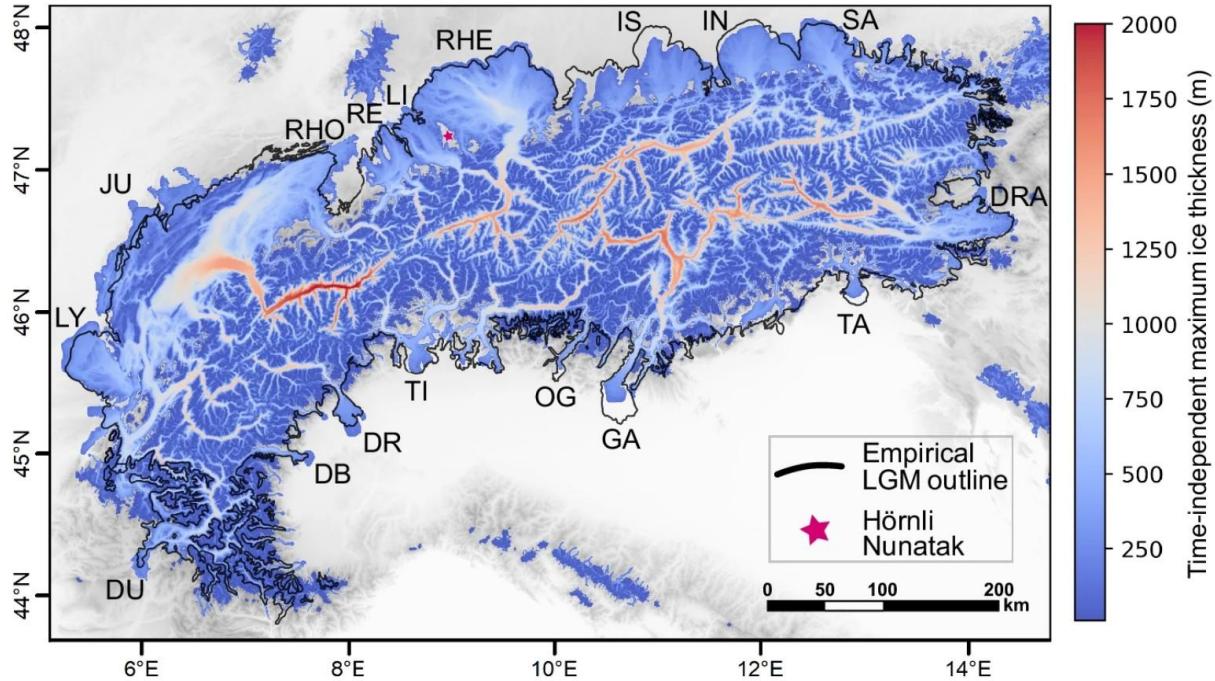


Figure 4 : Simulation de l'extension glaciaire au DMG (Léger et al., 2025) avec les lobes.

Acronymes noirs représentent les principaux noms des glaciers de sortie : c'est-à-dire les glaciers de sortie du Rhône (RHO), du Jura (JU), de Lyon (LY), de la Durance (DU), de la Doire-Baltéa (DB), de la Doire-Riparia (DR), de l'Oglio (OG), du Tagliamento (TA), de la Drau (DRA), de la Salzach (SA), de l'Inn (IN), de l'Isar (IS), du Rhin (RHE), de la Linth (LI) et de la Reuss (RE).



Figure 5 : Lyon au DMG et Lyon aujourd'hui (Coutterand, 2009).

Cette période de grandes glaciations est suivie de l'optimum climatique de l'Holocène, entre 11 000 et 5 000 ans BP (Badino et al., 2018), qui s'est caractérisée par des températures environ $1,6 \pm 0,8$ °C à celles actuelles (Kaufman et al., 2003). À la suite de cet optimum, une période de refroidissement s'est mise en place, connue sous le nom de Néoglaciale. Celle-ci

est caractérisée par des périodes de refroidissement entrecoupées de phases plus chaudes. Dans les Écrins, par exemple, Le Roy *et al.* (2017), ont identifié cinq avancées datées à environ 4250 ; 3660 ; 2090 ; 1310 et 920 ans BP. Le Petit Âge Glaciaire (PAG) représente la phase finale du Néoglaciaire, et s'est caractérisé par une avancée glaciaire maximale dans les Alpes occidentales.

II. 1. b. Le Petit Âge Glaciaire, une dernière avancée holocène des glaciers alpins

La plus marquante des avancées du Néoglaciaire est donc le Petit Âge Glaciaire (PAG) qui représente l'épisode d'expansion récent le plus important des Alpes. S'étendant approximativement entre 1350 et 1850 et principalement centré sur l'hémisphère Nord, cette phase d'extension se différencie des glaciations précédentes par son caractère régional, son refroidissement plus modeste et des causes principalement liées à la variabilité solaire et aux éruptions volcaniques (Owens *et al.*, 2017). Contrairement au DMG qui a vu l'extension

massive des calottes continentales (Mann, 2002) et une baisse des températures moyennes d'environ 4 à 7 °C (Schneider von Deimling *et al.*, 2006 ; Jansen *et al.*, 2007) le PAG a été entraîné par un refroidissement plus limité atteignant par endroit -1,5 °C (Coutterand, 2018 ; Ilyashuk *et al.*, 2019). Il s'agit donc non pas d'une glaciation mais d'un épisode climatique froid qui s'est déroulé au sein d'une période interglaciaire.

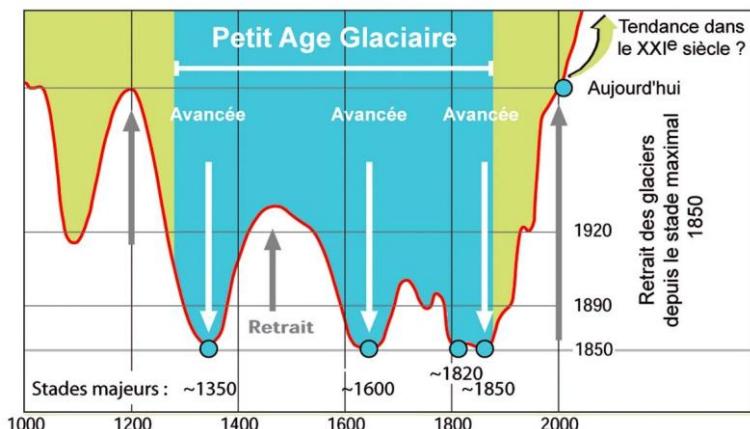


Figure 6 : Fluctuations glaciaires au PAG (Coutterand, 2018).

Les reconstructions glaciaires mettent en évidence trois poussées principales correspondant à des *maxima* d'extension : au XIV^e, XV^{le} et XIX^e siècle (Holzhauser *et al.*, 2005 ; Nicolussi *et al.*, 2022 ; figure 6). Dans les Alpes françaises, la superficie glaciaire totale des glaciers est estimée à 544 km² à la fin du PAG, vers 1850, contre 275 km² en 2009 (Gardent *et al.*, 2014), soit une surface deux fois plus grande.

L'impact du PAG a été particulièrement visible sur les basses altitudes, au niveau des villages qui voyaient se rapprocher les langues glaciaires depuis le fond des vallées. Le glacier des Bossons (massif du Mont-Blanc) dont le front atteignait 1050 m en 1818 (Nussbaumer et Zumbühl, 2012) menaçait à cette époque les habitations (figure 7). Aujourd'hui, le front du glacier s'élève à plus de 1700 m d'altitude, témoignant d'une dynamique glaciaire contemporaine caractérisée par une fonte accélérée.

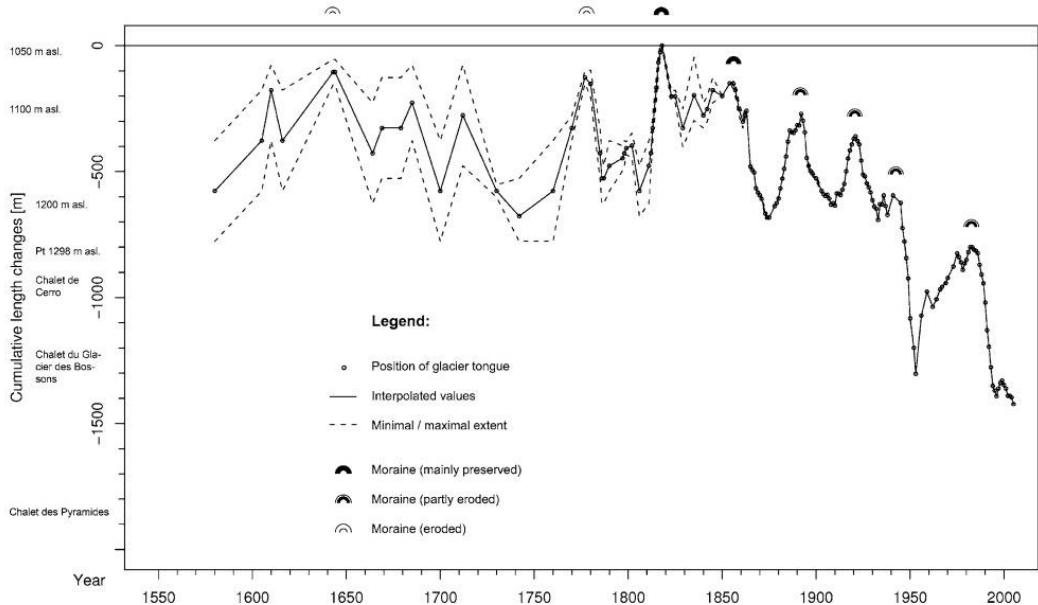


Figure 7 : Fluctuations du glacier des Bossons (massif du Mont-Blanc) de 1580 à 2005
(Nussbaumer et Zumbühl, 2011)

Depuis la fin du PAG, les glaciers ont connu un recul important et des pertes de superficie de l'ordre de 50 % (Gardent *et al.*, 2014) en lien direct avec l'augmentation des températures de l'air liée aux activités humaines (IPCC, 2021). En effet, après 1860, les glaciers ont entamé un recul progressif, ponctués de phases d'avancées autour de 1890, 1920 et 1980 (Zasadni, 2007). Certains glaciers, comme le Grand Aletsch (Holzhauser *et al.*, 2005), ont cependant poursuivi un recul continu depuis leur maximum du milieu du XIX^e siècle (Zemp *et al.*, 2008).

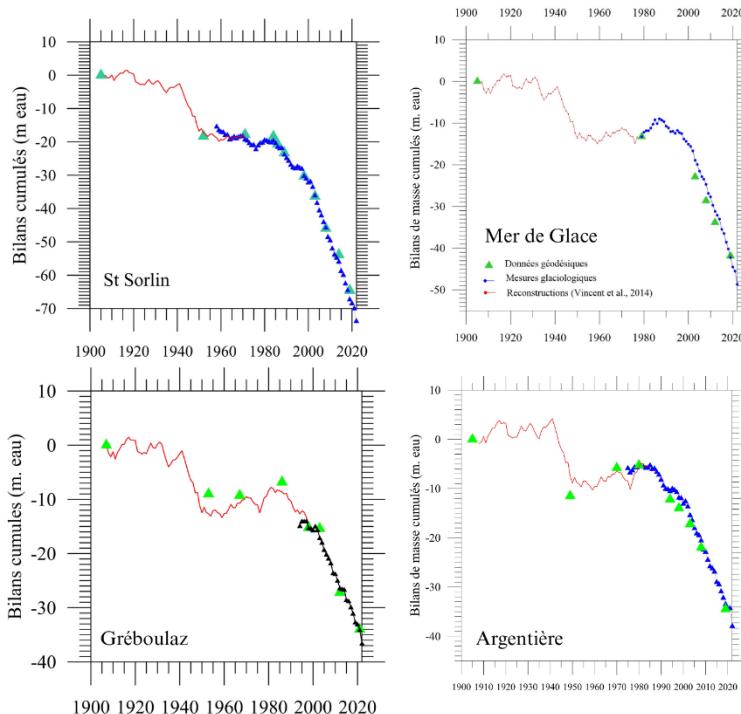


Figure 8 : Bilans de masse des glaciers de St Sorlin, la Mer de Glace, Gréboulaz et Argentière (données GLACIOCLIM ; OSUG, 2025).

II. 1. c. Au XIX^e siècle : une fonte accélérée

Le début de l'ère industrielle, au XIX^e siècle, marque le début d'une époque profondément défavorable aux glaciers alpins.

Afin de mesurer la réponse des glaciers au climat actuel, le projet GLACIOCLIM (les GLACIers, un Observatoire du CLIMat) a pour objectif de constituer une base de données glaciologique, météorologique et hydrologique liée à certains glaciers des Andes, des Alpes et de l'Antarctique

(GLACIOCLIM ; OSUG, 2025). Dans le cadre de ce projet, les glaciers alpins français de Saint-Sorlin, Sarennes, Gébroulaz, Mer de Glace et Argentière sont suivis et mesurés afin d'en étudier les fluctuations. L'étude du bilan de masse de ces glaciers montre un déséquilibre croissant entre accumulation et ablation à partir de 1980 (données GLACIOCLIM ; OSUG, 2025 ; figure 8). Indicateur de la "santé" d'un glacier, le bilan de masse, quand il est négatif, indique une perte de masse glaciaire, actuellement directement imputable au réchauffement du climat (IPCC, 2021).

Gardent *et al.* (2014) confirme cette accélération : "le retrait par décennie est 2,5 fois plus rapide entre 1967-1971 et 2006-2009 qu'entre la fin du PAG et 1967". D'autres travaux indiquent également une modification dans la morphologie des glaciers. Les petits appareils glaciaires d'une superficie inférieure à 0,1 km² se multiplient : entre la fin des années 1960 et 2012, leur part a augmenté de 31 à 51 % tandis que la part de glaciers de plus d'1 km² a chuté de 41 à 31 % (Gardent *et al.*, 2014). Ces modifications mettent en avant le besoin de mettre en place des typologies glaciaires afin d'analyser les évolutions en termes de types d'appareils.

Si l'étude de la perte des surfaces englacées est si importante, c'est parce que le recul des glaciers se répercute sur de nombreux systèmes : écologie, hydrologie, société, les impacts de la fonte sont multiples.

II. 1. d. Principaux impacts du retrait glaciaire

Une augmentation des aléas

Le retrait glaciaire entraîne tout d'abord une augmentation de certains aléas naturels, qui, lorsqu'ils rencontrent des enjeux (villages, infrastructures) sont à l'origine de risques.

Ces risques sont d'abord gravitaires. L'un d'eux risques concerne l'instabilité des glaciers suspendus. Présents sur des pentes raides, ces glaciers sont dits « à base froide » : l'interface glace-roche est à une température négative et la glace « colle » au substratum rocheux. Gilbert *et al.*, 2015 et Faillettaz *et al.*, 2013 estiment que ces glaciers peuvent être la source d'importantes avalanches de glace dans un contexte de hausse des températures globales. En effet, si la base du glacier devient partiellement tempérée (0°C), l'eau de fonte peut agir comme lubrifiant et le glacier perd en stabilité. Ce phénomène peut entraîner des chutes de blocs de glace massifs qui, s'ils se produisent au-dessus de pentes enneigées, peuvent déclencher d'importantes avalanches et menacer les habitations de fond de vallée (Ravanel, 2009). Des langues glaciaires peuvent également se détacher, à l'image de l'avalanche qui s'est produite depuis le glacier du Tour en 1949 et qui causa 6 morts (figure 9). Cette catastrophe semble avoir été causée par une fonte et des épisodes pluvieux importants qui, par apport d'eau liquide, eurent un effet lubrifiant sous le glacier (Guichonnet, 1950).

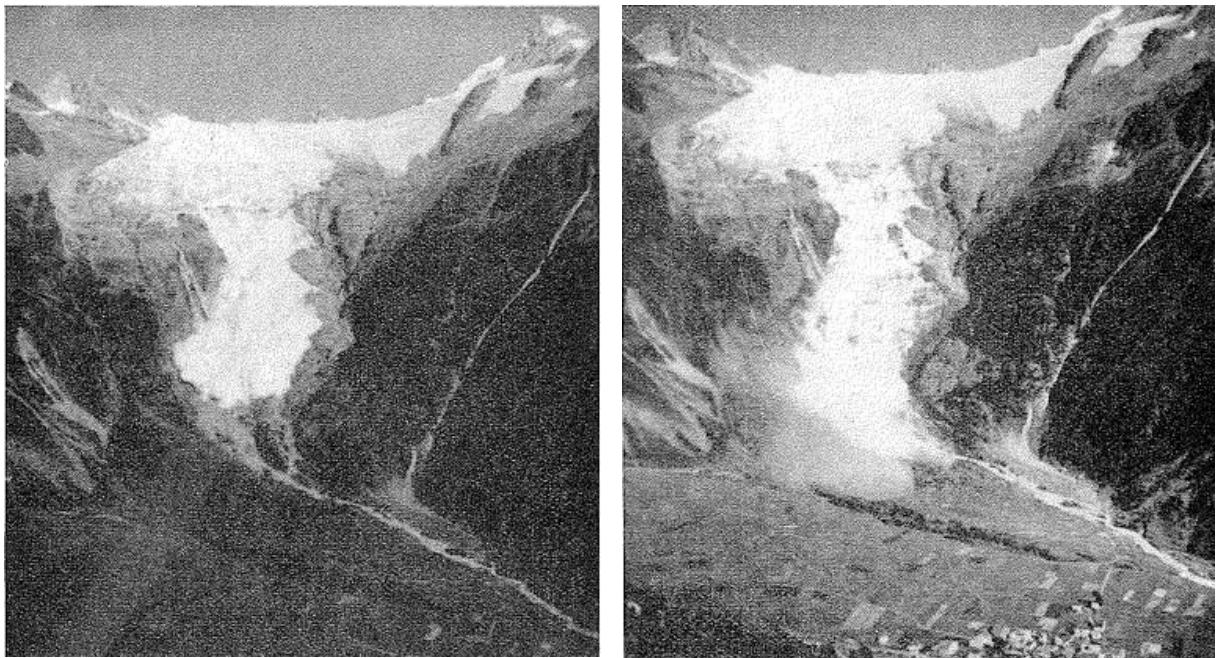


Figure 9 : Effondrement du glacier du Tour le 14 août 1949 (ph : Frison-Roche)

Un second risque, concerne les écoulements liés à la fonte. Les glaciers, en se retirant, libèrent des parois parfois instables, auparavant maintenues par la glace. Ces parois ainsi fragilisées constituent un terrain favorable aux écoulements et aux glissements (Ravanel et Deline, 2008). Ces chutes ne sont toutefois pas liées uniquement au retrait des glaciers, elles sont aussi dues au réchauffement du permafrost dont la glace agit comme un « ciment » au sein des parois.

Le retrait des glaciers favorise également la création de lacs, parfois sources de dangers, dans les secteurs récemment désenglacés. Qu'ils soient barrés par une moraine, retenus par un front glaciaire, situés à la surface, sous la base ou à l'intérieur même du glacier, ces lacs peuvent devenir particulièrement dangereux s'ils se vidangent brutalement, un phénomène nommé GLOF (*Glacial Lake Outburst Flood* ; Worni *et al.*, 2014 ; Iturriaga, 2011 ; Emmer *et al.*, 2014). En effet, le retrait des glaces favorise la création de barrages naturels fragiles, qui, s'ils cèdent sous la pression de l'eau, menacent les vallées en aval (Préfecture de Haute-Savoie, 2023). On peut citer le cas récent de la Bérarde, un hameau des Écrins rayé de la carte dans la nuit du 20 au 21 juin 2024 en raison d'un épisode de forte pluie et de fonte du manteau neigeux, aggravé par la vidange du lac supraglaciaire de Bonne Pierre (Bontemps *et al.*, 2025).

Conséquences écologiques et hydrologiques

Non seulement la fonte des glaciers favorise certains aléas naturels, mais elle impacte les écosystèmes et le régime des cours d'eau de montagne.

Le recul des langues glaciaire entraîne une transformation rapide des milieux alpins et de leurs écosystèmes. Si le recul des glaciers crée de nouveaux terrains disponibles pour la colonisation végétale, ce retrait a toutefois pour conséquence la disparition de micro-habitats périphériques (marges du glacier, moraines latérales, fronts glaciaires partiellement déneigés en été) qui accueillent une flore spécialisée adaptées « cryophile ». Losapio *et al.* (2021) estiment que sur 117 espèces végétales spécialistes de ces milieux, environ un quart pourrait disparaître localement avec la fonte totale des glaciers.

Au niveau hydrologique, la fonte modifie profondément l'alimentation des cours d'eau. Cette modification se divise en trois phases successives à mesure que le glacier se retire. Dans un premier temps, la fonte entraîne une augmentation des débits estivaux, créant un apport important d'eau douce durant la saison sèche (Pradhananga *et al.*, 2022 ; Zanoni *et al.*, 2023). Ce régime est toutefois temporaire : le glacier atteint un « *peak water* » lorsque l'apport d'eau de fonte maximal est dépassé. À partir de ce moment, les débits estivaux commencent à décroître (Huss et Hock, 2018). À long terme, la fonte menace le rôle de « châteaux d'eau » que jouent les glaciers au sein des bassins versants. Actuellement, ils stockent l'eau en hiver pour la relâcher en été, un rôle qui ne sera plus assuré s'ils viennent à disparaître (Barnett *et al.*, 2005). D'un point de vue écologique, cette réduction des apports en eau de fonte aura des conséquences sur les écosystèmes aquatiques d'altitudes : concentration de sédiments en suspension plus faible, températures et pH de l'eau plus élevés. La modification de ces paramètres écologiques pourra entraîner l'extinction de certaines espèces aquatiques alpines endémiques (Brown *et al.*, 2007).

Enjeux sociaux et économiques

Le recul glaciaire a également de nombreuses conséquences sociales et économiques sur les territoires de montagne. À long terme, la disparition des glaciers impactera différents secteurs clés de l'économie. L'agriculture souffrira de la diminution des débits estivaux des cours d'eau et l'approvisionnement en eau potable sera plus incertain tandis que la production d'hydroélectricité pourra connaître une baisse sensible (Beniston *et al.*, 2018 ; Huss *et al.*, 2017). Ces profonds changements, qui touchent à des piliers des sociétés montagnardes, risquent de fragiliser les équilibres socio-économiques actuellement en place.

Par ailleurs, les territoires de montagne, dont l'économie dépend principalement de l'activité touristique, subissent déjà les répercussions du changement climatique sur le tourisme glaciaire. Un nombre croissant de courses d'alpinisme deviennent impraticables (itinéraires

plus techniques, dangers, incertitudes quant aux périodes propices à l'alpinisme en été) nuisant à la fois à l'économie des vallées mais aussi à leur dynamique sociale et culturelle (Salim *et al.*, 2023).

Enfin, l'augmentation des aléas gravitaires liés au retrait glaciaire représente une menace directe pour les infrastructures, les habitations de fond de vallée et, de manière générale, la sécurité des populations locales (Ravanel et Deline, 2008). Cette exposition aux risques soulève de nouvelles questions concernant les modalités de gestion territoriale et de prévention.

→ ***Face aux conséquences de la fonte glaciaire et à la transformation structurelle des glaciers alpins, il devient essentiel de prendre en compte les trajectoires des différents appareils glaciaires afin d'en comprendre les mécanismes et d'en anticiper les évolutions. Pour cela, il est important de mettre en place des typologies glaciaires qui permettent de repérer des trajectoires récurrentes en fonction de la forme, la taille, la pente et autres caractéristiques des glaciers.***

II. 2. Typologie des appareils glaciaires

II. 2. a. Intérêts d'une classification

Tous les appareils glaciaires ne réagissent pas de la même façon au changement climatique. Leur fonctionnement dépend de leur morphologie, leurs caractéristiques topographiques (altitude, exposition, pente, etc.) ou leur mode d'alimentation (Benn et Evans, 2010 ; Romshoo *et al.*, 2022). Par exemple, un petit glacier niché dans un cirque ombragé n'aura pas la même réponse qu'un grand glacier de vallée s'écoulant sur un versant exposé au sud. Gardent *et al.* (2014) met en avant ces dynamiques différenciées : elle montre que les glaciers les plus affectés par la fonte entre 1967-1971 et 2006-2009 sont ceux de petite taille, exposés est, sud-est et sud et particulièrement ceux dont la pente est relativement raide. Cet exemple montre l'importance de prendre en compte différents paramètres lors de l'analyse des dynamiques glaciaires et de les regrouper en une typologie.

II. 2. b. La typologie WGMS comme référence internationale

Créé en 1986, le *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) est un organisme qui assure un suivi glaciologique à l'échelle de la planète. Il produit principalement des données de terrain concernant les variations de longueur des glaciers, les bilans de masses, les vitesses d'écoulement et d'autres paramètres. En complément de ces données, le projet *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), fondé en 1999, se donne pour objectif de cartographier l'ensemble des glaciers à l'échelle du monde. Tous deux se basent sur une

classification des glaciers comprenant principalement des caractéristiques morphologiques pour différencier les différents types d'appareils glaciaires (tableau 1). Cette typologie, utilisée par le *Randolph Glacier Inventory* (RGI), fait office de référence internationale.

Type de glacier	Caractéristiques
Inlandsis (<i>Continental ice sheet</i>)	Vaste masse de glace couvrant une surface terrestre de taille continentale.
Champ de glace (<i>Icefield</i>)	Couche de glace recouvrant un terrain relativement plat et dont l'épaisseur est insuffisante pour masquer la topographie sous-jacente. Superficie inférieure à 50 000 km ² .
Calotte glaciaire (<i>Ice cap</i>)	Masse glaciaire en forme de dôme masquant la topographie du substrat rocheux.
Glacier émissaire (<i>Outlet glacier</i>)	Glacier s'écoulant à partir d'une calotte glaciaire ou d'un champ de glace. Il suit les dépressions topographiques locales et n'a pas de bassin d'accumulation clairement défini.
Glacier de vallée (<i>Valley glacier</i>)	Glacier dont la zone d'accumulation est nettement identifiable par sa morphologie, et dont la langue glaciaire s'insère dans une vallée aux versants raides.
Glacier de montagne (<i>Mountain glacier</i>)	Glacier adhérant à un versant et ne correspondant à aucun autre modèle de classification. Les glaciers de cirque, les tabliers de glace et les glaciers suspendus sont compris dans cette catégorie.
Glacieret (<i>Glacieret</i>)	Petites masses de glace de forme indéfinie située dans des dépressions ou sur des versants protégés. Elles sont alimentées par de la neige transportée par le vent, des avalanches et/ou des accumulations particulièrement importantes certaines années. Pour être considérées comme glacierets, ces formes glaciaires doivent

	exister depuis au moins deux années consécutives.
Plateforme de glace flottante (<i>Ice shelf</i>)	Masse de glace flottante d'épaisseur considérable, attachée à une côte et alimentée par un ou plusieurs glaciers.
Glacier rocheux (<i>Rock glacier</i>)	Masse de débris contenant de la glace interstitielle et se déplaçant lentement dans le sens de la pente.

Tableau 1 : Typologie WGMS (WGMS, 2020).

Au-delà de cette classification, des subtilités sont apportées par le WGMS et GLIMS. Ainsi, une classification par la forme des bassins et des langues glaciaires, les caractéristiques des fronts, l'exposition et les glaciers "parents" (entités glaciaires plus grandes dont les appareils glaciaires faisait historiquement partie) permet de catégoriser plus finement les glaciers, en particulier ceux de montagne, objets de notre recherche.

II. 2. c. Limites de cette typologie du WGMS

Bien que servant de référence mondiale, la typologie du WGMS reste axée sur des critères morphologiques et montre d'importantes limites lorsqu'il s'agit de décrire des appareils glaciaires de petite taille, de forme complexe ou couverts de débris, notamment en montagne (Linsbauer *et al.*, 2021 ; Attaullah, 2023). La catégorie "glacier de montagne" est très large, englobant des appareils glaciaires qui répondent à des dynamiques très différentes comme les glaciers de cirque et les tabliers de glace. Dans le cadre de ce travail présenté, nous proposons une typologie particulière, présentée plus loin dans ce mémoire (cf. Partie III. 2.), qui classe les glaciers de montagne en différentes entités afin de pallier les limites des classifications existantes.

→ ***Les glaciers des Alpes se retirent actuellement à des vitesses inédites et l'analyse de ce retrait doit se faire selon une typologie rigoureusement établie afin de comprendre les différentes dynamiques qui animent les appareils glaciaires. La partie suivante s'intéresse aux approches existantes pour quantifier le recul glaciaire et à la méthode retenue pour ce travail.***

II. 3. Méthodes de quantification du retrait glaciaire

La quantification du retrait glaciaire peut se faire de différentes façons selon les contextes glaciologiques, la période étudiée et les données disponibles. De la télédétection à

l'exploitation de sources historiques, de nombreuses approches existent. Celles-ci sont présentées ici dans le but dans le but de comprendre quelles méthodes peuvent être mobilisées mais, dans le cadre de cette étude, nous n'utiliserons que le *monoplotting*.

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Les MNT sont des représentations en 3D de la surface terrestre, ils permettent de mettre en évidence la topographie d'un terrain. Ils peuvent être issus de différents procédés ; les plus utilisés sont le LiDAR et la photogrammétrie :

- Le LiDAR produit des faisceaux laser envoyés par un drone, un avion ou un capteur installé sur un trépied (LiDAR terrestre) qui calcule le temps d'aller-retour des signaux et les traduit en nuages de points à haute résolution (figure 10 ; Florinsky, 2012).
- La photogrammétrie est une technique de relevé topographique qui repose sur l'exploitation d'images aériennes ou satellitaires couvrant le même terrain avec des angles différents. L'acquisition de ces images permet, grâce à la stéréoscopie, de reconstituer une vue 3D du terrain par triangulation. En connaissant précisément la position et l'orientation des capteurs lors de la prise de vue, ainsi que les angles sous lesquels les images ont été prises, il est ainsi possible de déterminer la position exacte d'un point dans l'espace. (Henry *et al.*, 2001).

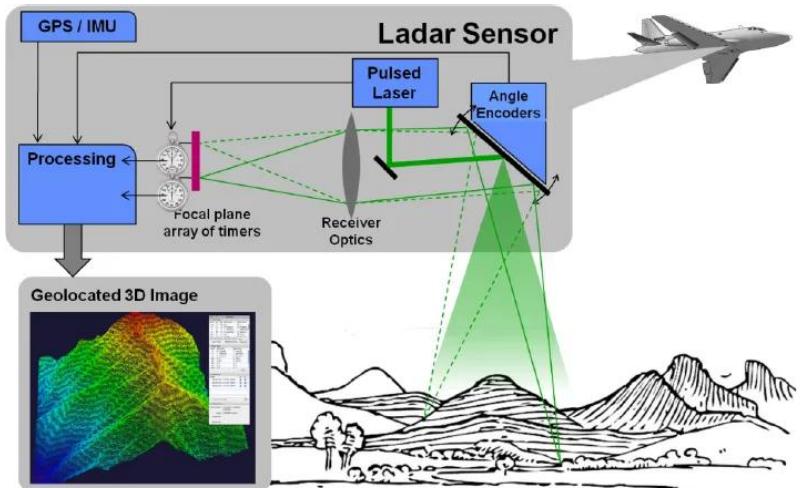


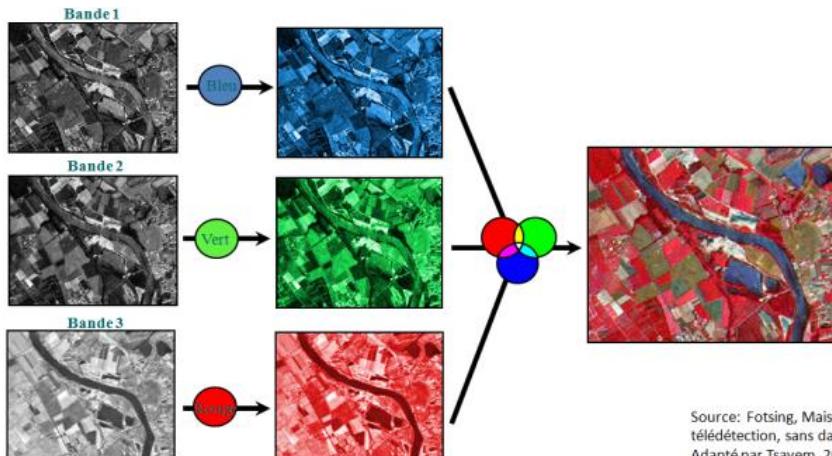
Figure 10 : Construction d'un MNT (Morisseau, 2017).

La comparaison de MNT de dates différentes peut servir à calculer des variations d'altitude ou des bilans de masse. Berthier *et al.* (2012) ont notamment démontré leur utilité dans le suivi des glaciers des Alpes françaises en comparant les MNT de 2001 avec ceux de 1952.

Télédétection par satellite (Landsat, Sentinel-2, Pléiades)

Les images multispectrales sont composées de bandes correspondant à des portions du spectre électromagnétique. Chaque surface naturelle renvoie une signature spectrale différente en fonction de sa réaction à la lumière, c'est-à-dire de sa manière de la réfléchir ou de l'absorber. Cette variation de "réponse" permet d'identifier et caractériser la nature d'un

terrain (figure 11). L'exploitation de ces images permet donc de cartographier les zones englacées après un traitement faisant apparaître la neige et la glace. La comparaison d'images multispectrales de différentes époques permet de mettre en évidence l'évolution des glaciers. On peut citer ici les travaux de Paul *et al.* (2011) dont l'objectif était de cartographier les glaciers des Alpes européennes à partir d'images *Landsat™* de 2003. La télédétection permet donc de déterminer les fluctuations en 2D des glaciers, c'est-à-dire les variations d'extension, tandis que l'approche utilisant les MNT fournit des informations sur les volumes en 3D.



Source: Fotsing, Maison de la télédétection, sans date.
Adapté par Tsayem, 2010

Figure 11 : Fonctionnement de la télédétection (Tsayem, 2010).

Figure 11 : Fonctionnement de la télédétection (Tsayem, 2010).

Les datations géochronologiques

Les datations géochronologiques permettent de dater la mise en place de dépôts laissés par les glaciers (blocs erratiques, moraines). Dans le contexte d'analyse des fluctuations glaciaires, ce type de datation permet de déterminer où s'est arrêté un glacier et à quelle période, permettant ainsi de retracer une chronique de ses variations. Parmi ces méthodes on retrouve :

- Datation par isotopes cosmogéniques : formés par l'interaction des rayons cosmiques avec la roche en surface, ils permettent d'estimer depuis quand un bloc erratique est exposé et d'en déduire la date à laquelle il a été déposé par le glacier. Le Béryllium-10 (¹⁰Be) a été utilisé pour reconstituer les fluctuations glaciaires dans le massif du Mont-Blanc (Protin, 2019) et du Pelvoux (Le Roy *et al.*, 2015).
- Dendrochronologie : cette science a pour objet l'étude des cernes d'arbres qui peuvent révéler des informations sur la recolonisation des moraines et les variations climatiques. Elle a notamment permis d'établir une chronologie néoglaciale de la Mer de Glace (Le Roy, 2015).
- Lichénométrie : basée sur la mesure de la taille des thalles de lichens, notamment le *Rhizocarpon geographicum*, cette méthode sert notamment à dater les dépôts de blocs par les glaciers. Une étude utilisant cette approche avait été menée sur les fluctuations des glaciers durant le PAG dans les Écrins par Le Roy & Deline (s2009).

- Datation radiocarbone (^{14}C) : elle permet de dater des restes organiques (bois, tourbe) jusqu'à environ 50 000 ans (Reimer *et al.*, 2020). Dans le contexte glaciaire, un tronc retrouvé sous une moraine peut fournir une date maximale d'avancée du glacier (Joerin *et al.*, 2006). La méthode repose sur la désintégration du ^{14}C , isotope instable du carbone, dont la demi-vie est d'environ 5 730 ans (Godwin, 1962).

Toutes ces méthodes permettent, en collectant des éléments sur le terrain, de dater assez précisément les fluctuations glaciaires passées. En complément de ces données, il est intéressant de s'appuyer sur d'autres types de ressources, comme les archives historiques qui offrent des témoignages souvent datés, qu'ils soient iconographiques ou écrits.

L'exploitation des archives historiques

Les ressources historiques sont de précieux outils pour étudier le retrait glaciaire notamment à une échelle de temps de deux à trois siècles (Nussbaumer et Zumbühl, 2012). Parmi les différentes archives disponibles, on retrouve des textes, qui permettent parfois de reconstituer des environnements en fonction des descriptions qui sont données, et des contenus iconographiques. Compte-tenu du contexte de cette étude, nous allons nous pencher sur ces dernières en considérant particulièrement le *monoplotting*, utilisé dans cette étude.

À partir du XIXe siècle, la photographie se démocratise, donnant lieu à de nombreuses prises de vues. Des clichés pris depuis les fonds de vallée permettent de documenter les avancées glaciaires mais peu de photographes, à l'époque, s'aventuraient sur les terrains de haute montagne pour immortaliser les glaciers (Garimoldi et Ginouvès, 1995). C'est ce qui fait des photographies de Paul Helbronner des supports riches d'informations lorsqu'il s'agit de comparer la situation glaciaire d'il y a un siècle et la situation d'aujourd'hui. Toutefois, une simple comparaison visuelle ne suffit pas si on veut quantifier la diminution des surfaces englacées. Pour cela, plusieurs méthodes existent.

La photogrammétrie est l'une de ces méthodes. Lorsqu'il existe plusieurs clichés d'un même endroit pris à des dates différentes, il est possible de reconstituer en 3D la forme et la position de certaines surfaces, ici, par exemple, les glaciers (Scaioni *et al.*, 2018). Le géoréférencement de cartes anciennes est une seconde méthode, permettant d'exploiter des cartes comme celles de l'État-Major (milieu du XIX) afin de les comparer avec les cartes actuelles. Pour cela, sur un logiciel de SIG, on réalise un géoréférencement qui consiste à superposer les cartes des deux époques selon des points dits "de contrôle" : on fait correspondre deux points sur les deux documents qui correspondent à un même lieu (Freudiger *et al.*, 2018). Cette superposition permet de quantifier le recul glaciaire mais nécessite toutefois l'usage de cartes anciennes suffisamment précises. Enfin, mêlant les deux techniques, on retrouve le *monoplotting*, méthode qui a été utilisée dans ce travail, qui consiste à géoréférencer une

photographie oblique. Comme le géoréférencement classique, il s'agit de définir des points de contrôle, par exemple sur photo oblique ancienne comme c'est le cas dans cette étude, et sur un support actuel (orthophoto, carte IGN ou MNT) (Bozzini *et al.*, 2012). Nous verrons, dans la méthodologie, comment et pourquoi le monoplotting a été particulièrement utile afin localiser les fronts de certains glaciers au début du XXe siècle à partir des photographies de Paul Helbronner.

➔ *Au regard du contexte glaciaire actuel des Alpes françaises, des méthodes existantes pour analyser le recul des glaciers et des connaissances que nous avons sur les différents types d'appareils glaciaires, la problématique de ce stage prend tout son sens. Ne pas utiliser les archives photographiques du pionnier de l'alpinisme et la géodésie qu'est Paul Helbronner serait se priver d'une ressource précieuse d'informations. Dans les sections suivantes, nous allons voir quelles étaient les missions de ce stage et quelle méthode a été mise en place pour atteindre les objectifs.*

III. Méthodologie

III. 1. Matériel et données

Pour cette étude et dans le but de qualifier et quantifier le retrait glaciaire sur un siècle, nous nous sommes appuyés sur des données de deux types.

- **Données iconographiques de Paul Helbronner**

Nous avons parcouru les Tomes 1, 2 et 10 de la *Description* et les panoramas associés. La lecture des écrits n'a pas fait ressortir de passages pertinents dans le cadre de ce travail : il était davantage question de l'organisation des missions de Paul Helbronner et de ses calculs de triangulation que des paysages glaciaires. Les écrits ont donc été éludés rapidement dans le but de se concentrer sur les photographies panoramiques. Aux Tomes 1 (*Chaîne méridienne de Savoie*) et 2 (*Massifs du Chablais et du Faucigny, versant français du massif du Mont-Blanc*) étaient associées des annexes contenant ces panoramas dans un format qui permettait une numérisation via un scanner à plat. Le Tome 10 (*Massifs du Champsaur, du Dévoluy, des Écrins et du Pelvoux*), en revanche, n'était associé à aucune annexe : les photographies étaient intégrées à la reliure du livre d'une façon qui rendait impossible leur numérisation sans matériel professionnel. La sélection du corpus d'images s'est donc centrée sur les deux premiers Tomes de l'œuvre.

Nous nous sommes ensuite appuyés sur différents paramètres pour choisir les clichés les plus pertinents. La présence d'appareils glaciaires était évidemment un prérequis mais nous avons éliminé de la sélection les photos présentant trop de glaciers incomplets, lointains ou les images d'une qualité insuffisante. L'application de ces critères a abouti à une sélection et la numérisation de 12 photographies panoramiques (tableau 2). Les dimensions conséquentes des photographies ne permettent pas d'illustrer ce tableau, en revanche les clichés annotés sont présentés en annexe 1.

Tomes / photo	Lieu de la prise de vue	Secteur photographié (bassin, sommet principal ou glaciers principaux)
2 / 20	Somme de l'Aiguille des Grands Montets	Bassin d'accumulation du glacier d'Argentière
2 / 19	Sommet du Tour Noir	Aiguille Verte, glacier d'Argentière
2 / 24	Sommet de l'Aiguille du Moine	Bassin d'accumulation de la Mer de Glace, glaciers de Talèfre, de Leschaux
2 / 25	Sommet de l'Aiguille du Midi	Mont Blanc, Vallée Blanche
2 / 26	Sommet de la Pointe Helbronner	Glacier du Géant, Aiguilles Marbrées
2 / 13	Sommet des Posettes	Glacier du Tour
2 / 14	Sommet des Posettes	Aiguille du Grépon, Aiguille du Plan
1 / 11	Sommet de l'Aiguille Rouge	Mont Pourri
1 / 15	Sommet du Brévent	Glaciers des Bossons et de Taconnaz
1 / 05	Sommet de la Dent Parrachée	Dôme de l'Arpont
1 / 01	Sommet Goléon	La Meije, Le Rateau, glacier de la Girose
1 / 09	Sommet de Bellecôte	Mont Pourri, La Grande Casse

Tableau 2 : Synthèse des 12 photographies de Paul Helbronner sélectionnées.

- **Données spatiales récentes**

Afin de comparer ces images anciennes de Helbronner à l'engagement actuel, nous nous sommes servis d'orthophotographies de 2022 pour les massifs de la Vanoise et des Écrins et de 2023 pour le massif du Mont Blanc. Nous avons également utilisé des Modèles Numériques de Terrain de 2020 (pour les départements de la Savoie et de la Haute-Savoie) et de 2024 (département des Hautes-Alpes) issus de la BD RGE Alti (IGN) ainsi que des nuages de points LiDAR (IGN).

III. 2. Méthodes et traitement

- **Monoplotting**

Comme vu dans la Partie II, le *monoplotting* est une méthode de géoréférencement sur images obliques, utilisée ici pour mesurer des pertes de surfaces d'engagement. Nous avons travaillé avec une extension de QGIS, *moniQue*. Ce plugin a permis de géoréférencer quelques clichés de Helbronner sur des MNT obtenus après rasterisation de nuages de points LiDAR via *CloudCompare*. Le processus de géoréférencement consiste à placer suffisamment de points de contrôle sur le MNT et sur l'image ancienne pour que le plugin puisse aligner la vue caméra sur la représentation 3D (figure 12). Une fois la calibration effectuée, il ne reste qu'à tracer les contours des appareils glaciaires sur la photographie pour qu'ils soient reportés sur le MNT et exportables en format Shape. On obtient alors les contours des glaciers au début du XXe siècle,

que l'on peut superposer à un fond cartographique actuel.

La méthode du *monoplotting* nécessite toutefois des photos très précises, présentant des glaciers au premier plan et sur lesquelles il est possible de déterminer au moins une quinzaine de points de contrôle clairement identifiables. Seules trois photographies ont été identifiées comme utilisables avec cette méthode. Nous avons donc traité les neuf autres clichés avec une autre approche.

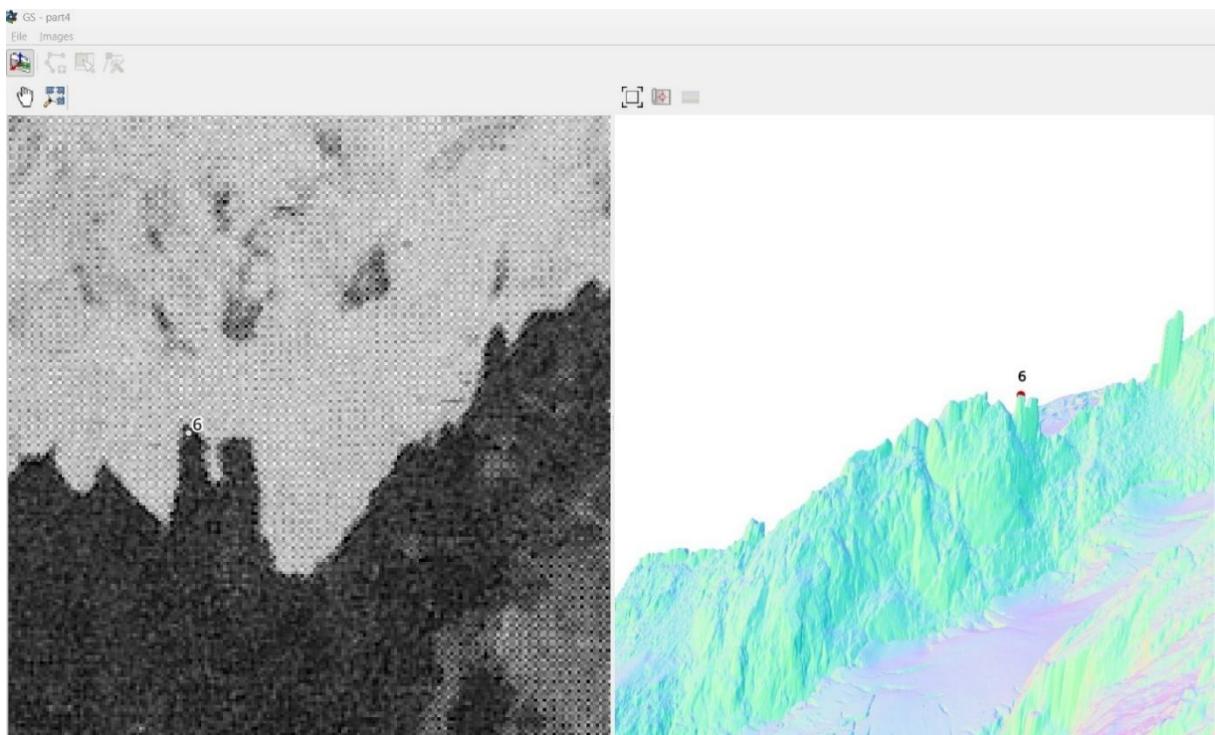


Figure 12 : Placement des points de contrôle sur moniQue (image ancienne à gauche, MNT à droite).

- **Estimation de pertes de surfaces via QGIS**

Afin d'estimer des pertes de surfaces glaciaires sans *monoplotting*, nous avons développé une approche sur QGIS, fondée sur l'utilisation d'orthophotos récentes (2022 - 2023). La première étape visait à définir la position des contours des glaciers sur ces orthophotos. Une des difficultés principales de ce travail résidait dans la délimitation des surfaces englacées recouvertes par du till ou des débris rocheux. Seuls les secteurs présentant des morphologies glaciaires clairement identifiables sous cette couverture détritique ont été pris en compte (figure 13). Par conséquent, certaines portions, notamment au niveau des marges glaciaires, ont pu être exclues de l'inventaire en raison d'incertitudes quant à la présence de glace.

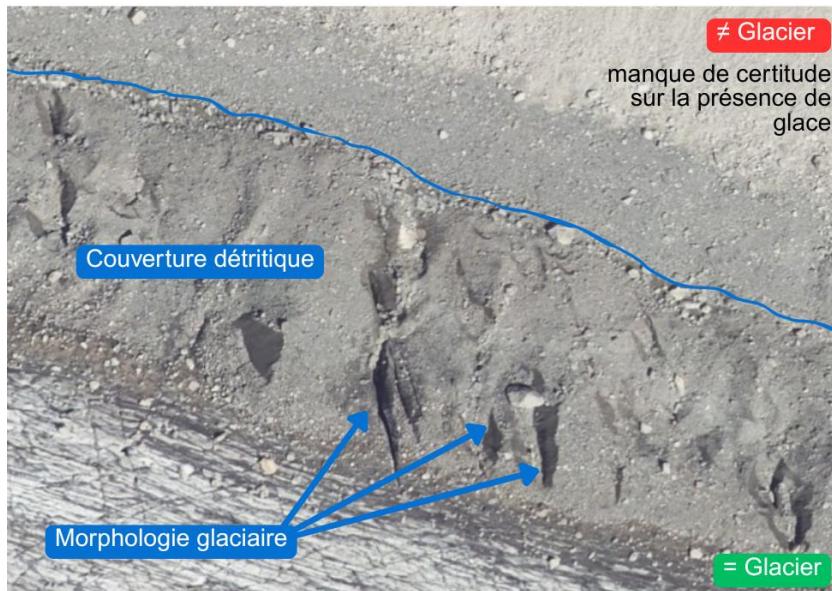
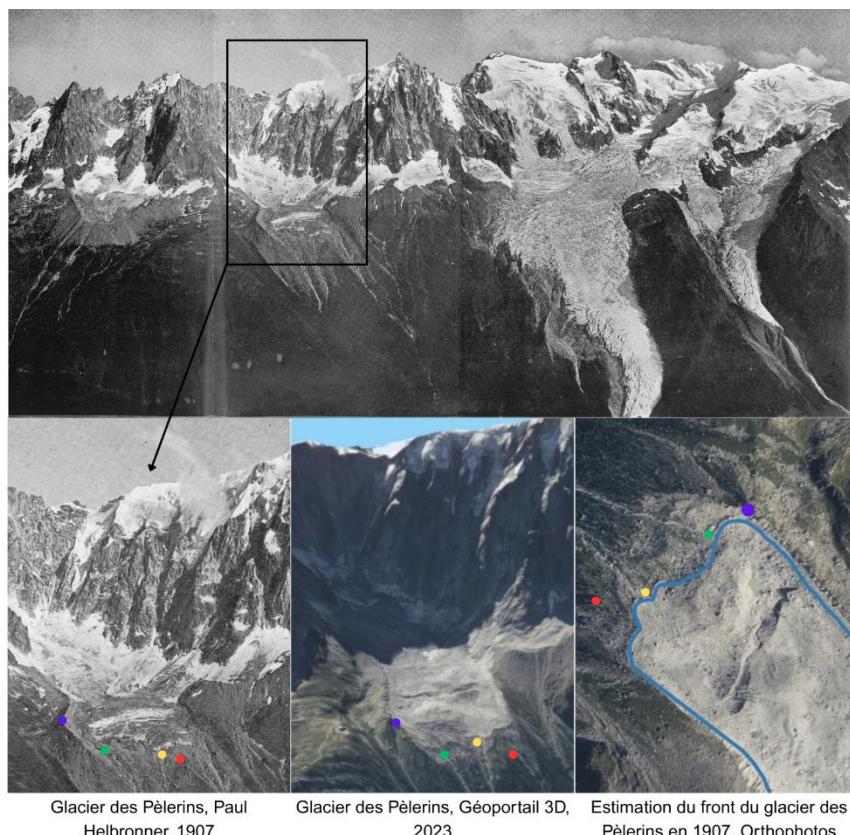


Figure 13 : Prise en compte des surfaces englacées couvertes de till et/ou de débris.

Une fois ces contours tracés, nous avons estimé les limites des glaciers au début du XXe siècle à partir des images de Helbronner. En nous appuyant sur Géoportail 3D et *Google Earth*, nous avons pu visualiser en trois dimensions les secteurs photographiés par Helbronner. Cela a permis d'incliner les images contemporaines pour correspondre aux angles de prise de vue



historiques, facilitant ainsi la comparaison visuelle. Nous avons ensuite sélectionné des points de repères (moraines, blocs, fractures) situés à proximité des fronts glaciaires sur les photographies anciennes et existant toujours sur les images récentes. Ces observations ont été reportées sur QGIS (2D) afin d'estimer la position des fronts glaciaires de l'époque que nous avons par la suite transformée en polygone (figure 14).

Figure 14 : Estimation de la position d'un front glaciaire photographié par Paul Helbronner ; l'exemple du glacier des Pèlerins (massif du Mont-Blanc).

L'approche reposant sur une estimation, nous avons choisi d'exprimer les pourcentages de perte de surface englacée selon des classes de 20 % afin de réduire les biais liés à l'incertitude des valeurs. On retrouve ainsi les six classes suivantes : moins de 20 % de perte, entre 20 et 40 %, entre 40 et 60 %, entre 60 et 80 %, plus de 80 % de perte, disparition totale, valeur indisponible.

Cette méthode n'est toutefois pas applicable à tous les appareils glaciaires, d'où la catégorie « valeur indisponible ». Sur certaines photographies de Paul Helbronner, les fronts glaciaires sont, par exemple, recouverts de neige ce qui rend difficile voire impossible leur délimitation. On retrouve également les mêmes limites qu'avec le *monoplotting* concernant les glaciers qui ne sont pas visibles dans leur ensemble ou les images d'une qualité insuffisante. Cette approche dépasse cependant les contraintes de la première méthode : pour le cas illustré par la figure 14 il aurait fallu placer plus d'une quinzaine de points de contrôle pour avoir un résultat convainquant avec *moniQue* alors que le secteur photographié est trop lointain pour être précis dans le placement de ces points. Estimer visuellement la position du front et des contours, lorsque c'est possible, permet d'obtenir une information quantitative sur le retrait glaciaire tout en restant prudent au niveau de la précision des données.

S'il n'est pas possible d'appliquer cette méthode sur tous les secteurs, il est possible d'aller au-delà d'une analyse du retrait et d'étudier les modifications structurelles des appareils glaciaires ainsi que les différentes trajectoires des types d'appareils glaciaires.

- **Typologie glaciaire utilisée**

Nous l'avons vu avec les travaux de Gardent *et al.* (2014), la réponse des glaciers face au changement climatique diffère en fonction de leurs caractéristiques. Cette même étude montrait que le retrait glaciaire s'accompagnait d'une multiplication des petits glaciers liée à la fragmentation des plus gros et témoignant de profonds changements quant à la structure des formes glaciaires. Afin d'étudier ces différentes trajectoires et de faire ressortir des trajectoires récurrentes concernant le processus de fragmentation, nous avons élaboré une typologie glaciaire adaptée au milieu alpin (figures 15 et tableau 3).

On retrouve donc huit catégories glaciaires dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2. Les images correspondantes présentent un exemple de chaque type glaciaire dont les caractéristiques morphologiques ont été soulignées par l'ajout de symboles en rouge.

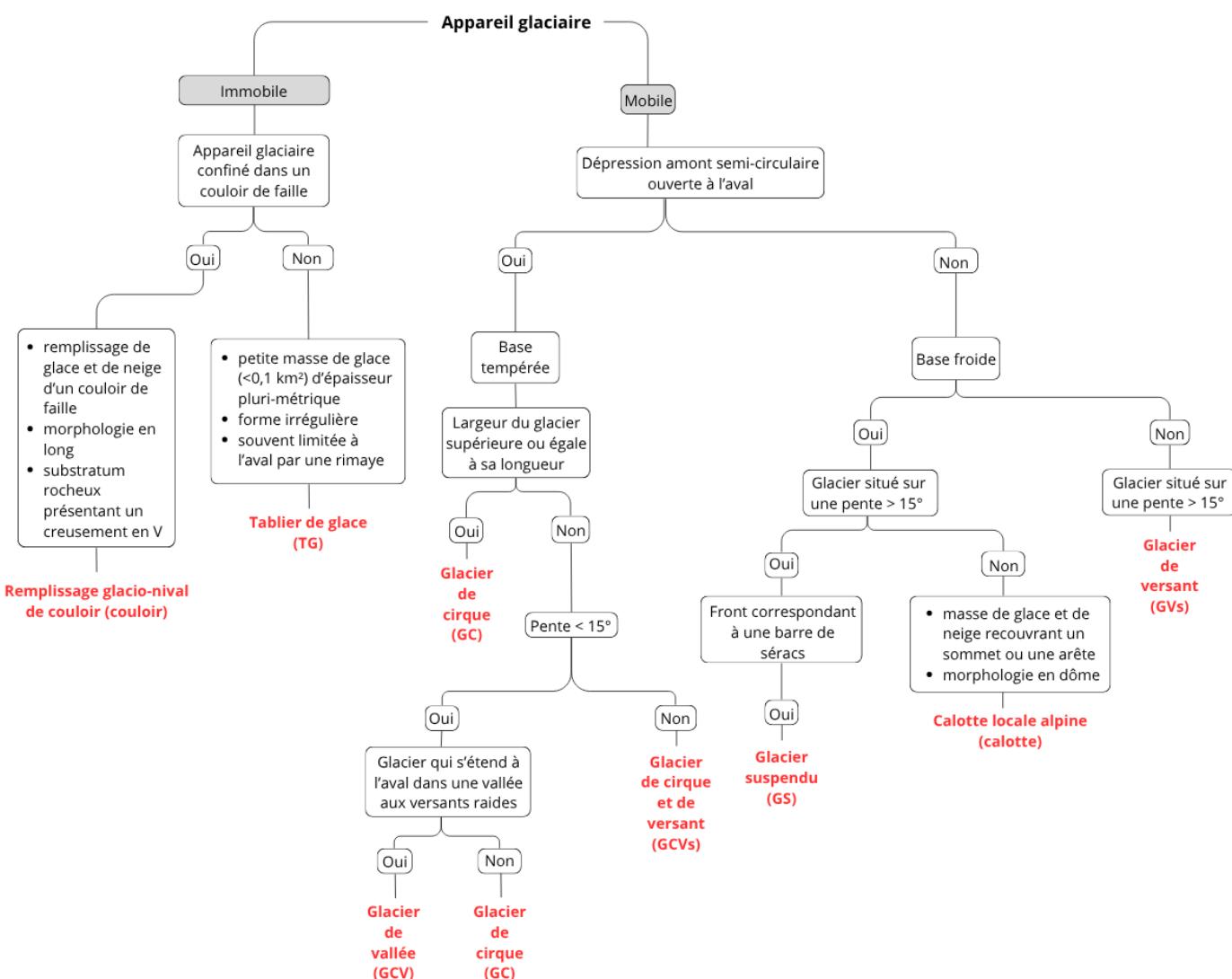
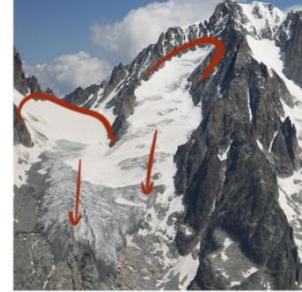


Figure 13 : Méthode d'identification des types de glaciers et typologie glaciaire associée.

Glacier de vallée	Glacier à base tempérée dont le bassin d'accumulation est confiné dans un ou plusieurs cirque(s). Langue glaciaire qui s'étend au fond d'une vallée à parois raides et en pente douce $<15^\circ$.	
Glacier de cirque	Glacier à base tempérée présent au sein de dépressions semi-circulaires ouvertes à l'aval. Largeur du glacier supérieure ou égale à sa longueur et/ou pente $< 15^\circ$.	
Glacier de cirque et de versant	Glacier à base tempérée dont le bassin est confiné dans un ou plusieurs cirque(s). S'étend à l'aval sur une pente $> 15^\circ$.	
Glacier de versant	Glacier à base tempérée localisé sur une pente $> 15^\circ$. Absence de cirque dans la partie amont du glacier.	

Calotte	Masse de glace et de neige à base froide recouvrant un sommet ou une arrête et présentant une morphologie en dôme.	
Couloir	Remplissage de glace et de neige à base froide remplissant un couloir de faille (substratum rocheux présentant un creusement en V) avec une morphologie en long.	
Tablier de glace	Petite masse de glace (<0,1 km ²) à base froide, d'épaisseur plurimétrique, de forme irrégulière et souvent délimitée à l'aval par une rimaye.	
Glacier suspendu	Glacier à base froide situé sur une pente > 15° se terminant brusquement (front correspondant à une barre de séracs).	

Tableau 3 : Les différents types glaciaires et leurs caractéristiques (ph : Google Earth, Géoportail, Victor Galuchot, Mountain Wilderness).

Cette typologie s'appuie sur la typologie de Kaushik *et al.* (2022) en y ajoutant le remplissage glacio-nival de couloir et le glacier de cirque-et-de-versant. L'ajout de des deux catégories nous a semblé pertinent pour plusieurs raisons. Premièrement, les couloirs sont des appareils glaciaires très peu étudiés, le terme « remplissage glacio-nival de couloir » n'a d'ailleurs pas

d'antécédents scientifiques. Dans la littérature, c'est le terme « goulotte » qui le remplace et qui désigne ces couloirs étroits remplis de glace ou de neige et empruntés par les alpinistes (Arnaud *et al.*, 2024). La création de cette catégorie s'est faite suite à l'observation d'un grand nombre de ces masses glaciaires qui ne correspondaient à aucun autre type sur les clichés de Helbronner. Ensuite, la création de la catégorie « glacier de cirque-et-de-versant », avait pour objectif de faire ressortir la variété des logiques de fragmentation différentes au niveau des glaciers de versant en différenciant ceux qui comportent un ou plusieurs cirques à l'amont et ceux qui n'en présentent pas.

Sur les photographies de Paul Helbronner, nous avons identifié les différents types d'appareils glaciaires puis nous avons réitéré cette opération sur QGIS pour les appareils glaciaires en 2022-2023. Lors de la phase d'identification, les appareils glaciaires connectés à un glacier en aval, deviennent partie de ce-dernier. Cela ne s'applique toutefois pas aux tabliers de glace, aux remplissages glacio-nivaux de couloirs et aux calottes dont le caractère immobile lié à leur base froide (à température négative) les différencie de la dynamique active des glaciers à base tempérée (à 0°C).

- **Inventaire des lacs glaciaires**

Au-delà des glaciers, nous avons souhaité prendre en compte les lacs glaciaires qui se sont formés entre le début du XXe siècle et 2022-2023. Quasi-absents des photographies de Paul Helbronner, ils sont les témoins d'une profonde transformation des milieux alpins. Ici, l'objectif était d'en dresser un inventaire (nombre, superficie).

La définition d'un lac ne comprend généralement pas de surface minimale, l'Inventaire National des Plans d'Eau (INPE), le définit ainsi : « masse d'eau continentale accumulée naturellement ; suffisamment profond, un lac comporte une stratification thermique stable ». N'ayant pas pu mesurer ces paramètres, nous avons fait le choix de considérer tous les plans d'eau d'une superficie minimale de 100m². Sur les cartes, le poster et les graphiques qui illustreront les résultats, les lacs glaciaires correspondent donc à la définition suivante : une masse d'eau couvrant au moins 100m², située à l'aval d'un glacier et formée suite au retrait de ce-dernier.

- **Création d'un tableau de synthèse**

Toutes ces données, (pourcentages de perte de surface, informations relatives aux catégories glaciaires, inventaire des lacs glaciaires, etc) ont été intégrées dans un tableau (extrait en figure 16, totalité en annexe 2), dans le but d'en effectuer une analyse statistique. Nous y avons ajouté des paramètres tels que l'orientation du glacier, l'altitude de son front, et la présence ou non de couverture détritique. Ce tableau contient 202 entrées correspondant aux appareils glaciaires étudiés. Dans ce tableau, un « code d'identification »

est attribué à chaque appareil glaciaire afin de pouvoir le retrouver sur les photographies de Paul Helbronner annotées (annexe 1). Celui-ci est constitué ainsi : 2_20_GV1 où 2 est le numéro du tome, 20 est le numéro de la photo, GV est le type de glacier et 1 permet d'identifier ce glacier sur la photo.

- **Traitement statistique des données et mise en valeurs des résultats**

Une fois le tableau complété, nous avons procédé au traitement des données *via* RStudio pour réaliser les graphiques. En complément de ceux-ci, nous avons illustré les résultats du *monoplotting* et de l'estimation de la position des fronts glaciaires anciens *via* cinq cartes. Un poster A0 (annexe 3) a également été créé à partir de ces résultats dans le but de les diffuser (médiation scientifique).

III. 3. Limites

Ces méthodes présentent quelques limites, qu'il convient d'évoquer avant la présentation des résultats afin d'éviter d'éventuels biais de lecture. Premièrement, bien que faibles, le *monoplotting* peut générer quelques erreurs altimétriques notamment dans les secteurs à forte pente. Ensuite, l'estimation visuelle de la position des fronts glaciaires anciens bien que s'appuyant sur des repères topographiques solides, peut légèrement différer en fonction de la personne qui délimite ces fronts. Enfin, la répartition des pertes de surface par classes de 20 % peut masquer de petites variations locales limitant ainsi la finesse de l'analyse. Malgré ces limites, les résultats obtenus permettent de dégager des tendances claires que nous présenterons dans la section suivante.

➔ **Le travail mis en oeuvre repose finalement sur deux approches combinant une analyse quantitative du retrait glaciaire sur un siècle et une étude des modifications structurelles des glaciers sur cette même période. Le *monoplotting*, s'il s'est montré efficace pour quelques clichés, a montré des limites liées à la qualité et au cadrage des photographies. Une approche complémentaire par estimation visuelle a donc été développée, permettant de localiser la position des anciens fronts glaciaires sur des orthophotos récentes. En parallèle, une typologie glaciaire a été élaborée pour considérer l'évolution de la morphologie des appareils glaciaires. Ces travaux ont permis de produire une base de données regroupant des informations sur le retrait des glaciers, l'évolution de leur morphologie, la disparition et l'apparition d'appareils glaciaires et la formation de néolacs.**

Date de la photo	Types d'appareils glaciaires sur les photos de Paul Helbronner	Lieu de la prise de vue	Secteur photographié (bassin, sommet principal ou glaciers principaux)	Code d'identification	Orientation	Altitude estimée du front (limite aval) sur les photos de Paul Helbronner (arrondie à la dizaine)	Altitude estimée du front du glacier aujourd'hui (pour les cas de changement de catégorie = altitude du front du glacier le plus à l'avant)	Perte de surface d'enfoncement estimée en %
17/08/1920	GC			2.20_GC1	SO	2800	2800	plus de 80 %
	GCVs			2.20_GCVs1	SO	2670	2698	entre 60 et 80 %
	Couloir			2.20_Cou1	S	2900	/	Disparu
	Couloir			2.20_Cou2	SO	3140	/	Disparu
	Couloir			2.20_Cou3	O	3050	/	Disparu
	Couloir			2.20_Cou4	SO	3180	/	Disparu
	Couloir			2.20_Cou5	S	3230	/	Disparu
	GC		Bassin d'accumulation du glacier d'Argentière	2.20_GC2	S	2850	2861	entre 60 et 80 %
	GV		Sommet de l'Aiguille des Grands Montets	2.20_GV1	NO	Front absent de la photo	/	Valeur indisponible
	TG			2.20_TG1	O	3270	3295	Valeur indisponible
	TG			2.20_TG2	O	3500	3449	Valeur indisponible
	Couloir			2.20_Cou6	S	3560	/	Disparu
	Couloie			2.20_Cal1	/	Limites de la calotte incertaines	/	Valeur indisponible
	Couloir			2.20_Cou7	SO	3520	/	Disparu
	Couloir			2.20_Cou8	O	3530	/	Disparu
	TG			2.20_TG3	NO	3120	3111	Valeur indisponible

GV	GCVs	GC	GS	GVS	TG	Coulotté	Calotte	Présence d'une couverture détritique et/ou de till	% de surface couverte	Lacs glaciaires	Surfaces des lacs
0	0	1	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	2	0	1	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
1	3	0	0	5	1	0	OUI	Glacier incomplet sur la photographie	0	/	/
0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	/
0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/

Figure 14 : Extrait du tableau contenant les données relatives aux appareils glaciaires étudiés.

IV. Résultats

Dans cette section, le corpus de cartes sera d'abord présenté, suivi d'une analyse de celles-ci. L'ensemble des cinq cartes est constitué de la même façon, avec (i) une photographie de Paul Helbronner sur laquelle les différents types d'appareils glaciaires sont identifiés par un code couleur ; (ii) une superposition d'orthophotos sur un MNT, permet la vue en relief du secteur en 2022 ou 2023, avec l'utilisation du même code couleur pour qualifier les formes glaciaires ; (iii) une vue en 2D du secteur est également présentée, accompagnée de vues rapprochées sur des sites clés ; enfin, (iv) un encart permet d'expliciter les évolutions majeures sur chaque secteur.

Les secteurs présentés sont ceux du bassin d'accumulation du glacier d'Argentière, du glacier du Tour et de l'Aiguille du Tacul (massif du Mont-Blanc) ainsi que les secteurs du Mont Pourri et du Dôme de l'Arpont (massif de la Vanoise).

IV. 1. Le corpus cartographique

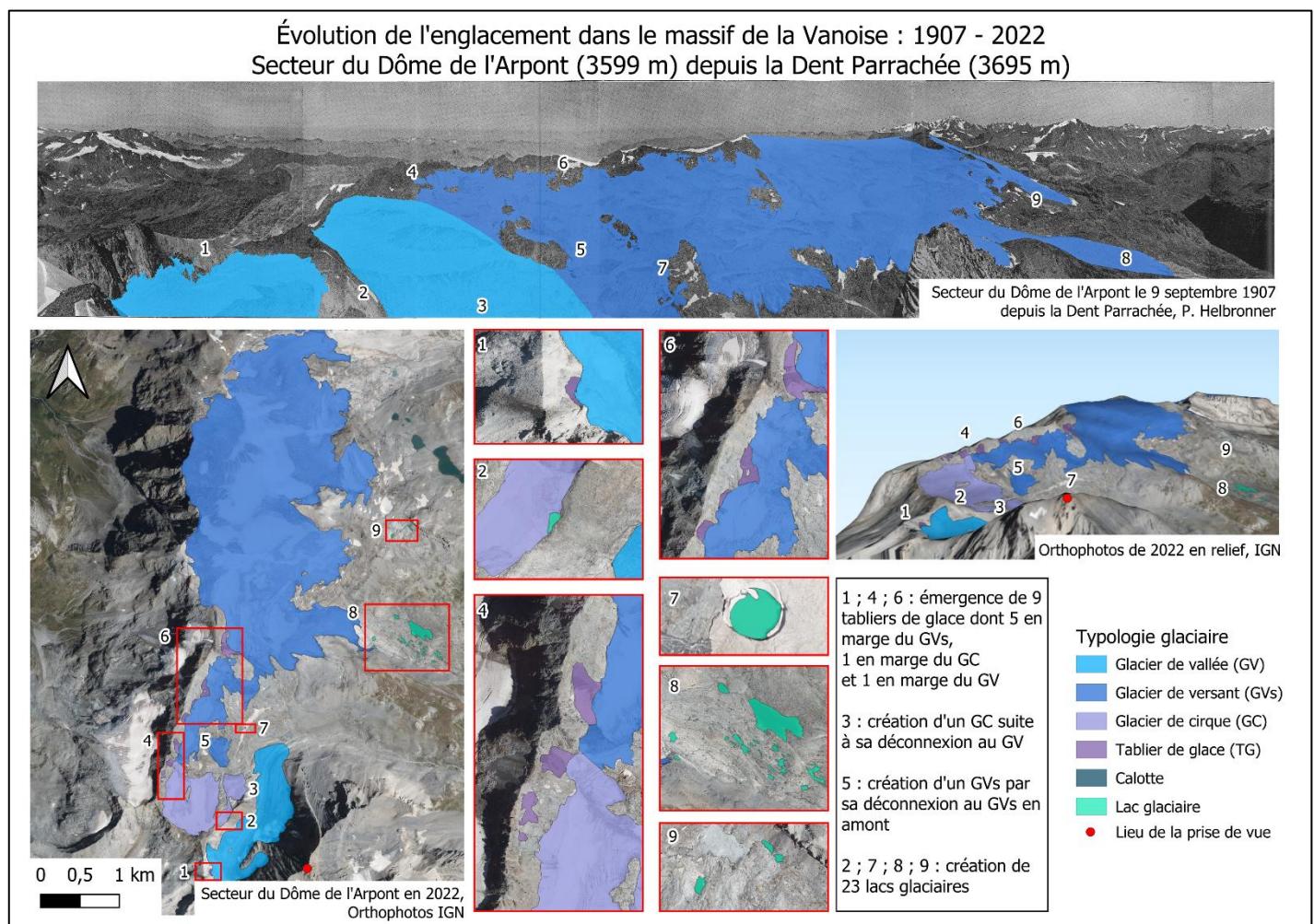


Figure 15 : Évolution de l'englacement dans le secteur du Dôme de l'Arpont (1907 - 2022).

Évolution de l'englacement dans le massif du Mont Blanc : 1920 - 2023
 Le bassin d'accumulation du glacier d'Argentière depuis l'Aiguille des Grands Montets (3296 m)

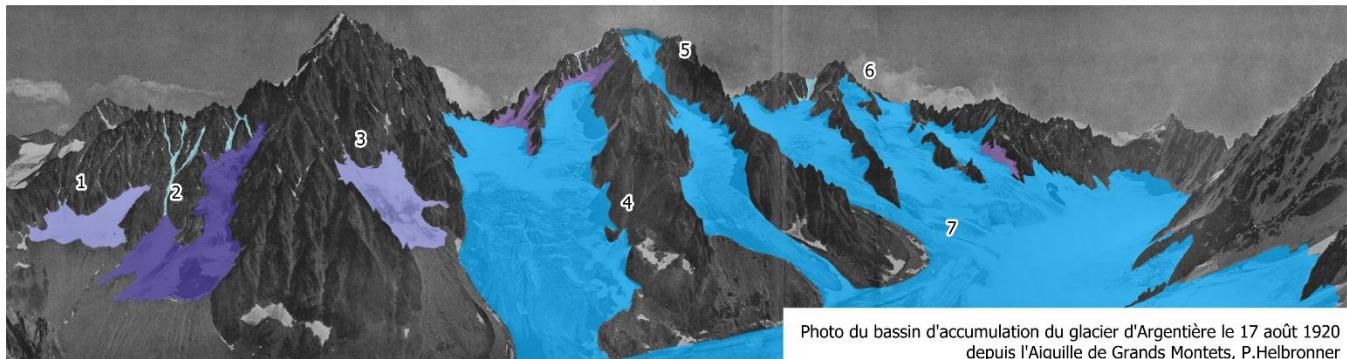
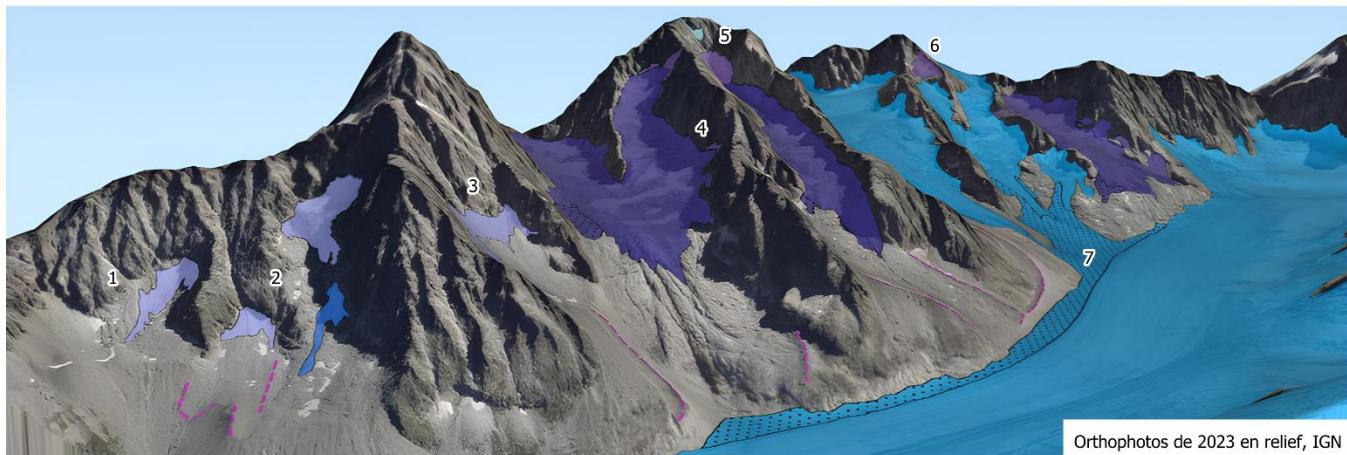
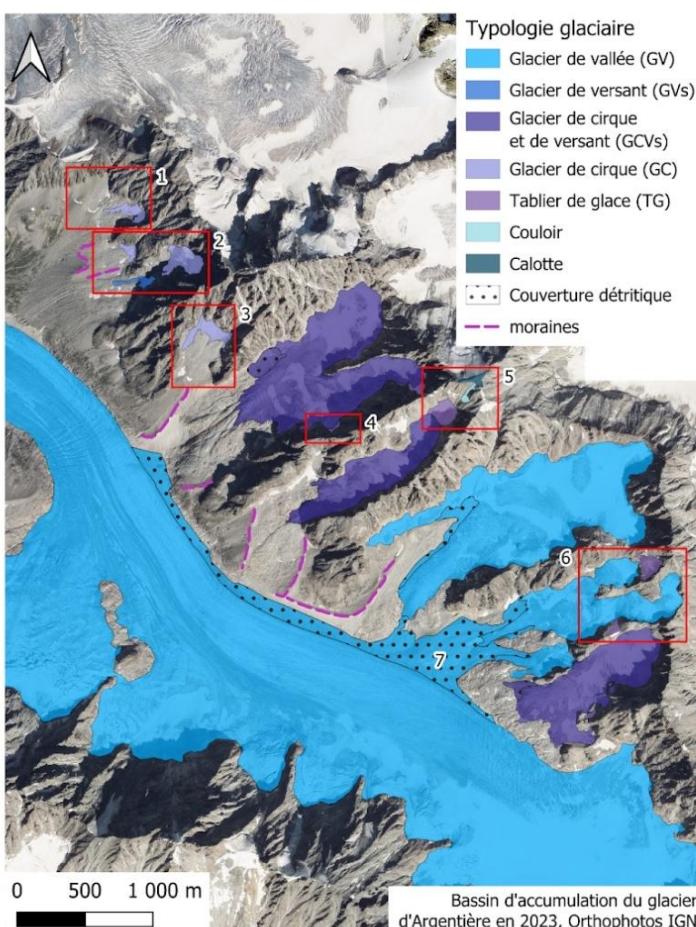


Photo du bassin d'accumulation du glacier d'Argentière le 17 août 1920 depuis l'Aiguille de Grands Montets, P.Helbronner



Orthophotos de 2023 en relief, IGN



1 ; 3 : perte de surface des GC

2 : évolution du GCVs en 2 GC et 1 GV

4 ; 5 ; 6 : émergence de 4 TG et 1 Couloir

7 : développement d'une couverture détritique qui dissimule la confluence glaciaire

Autres : évolution du GV d'Argentière qui produit 3 GCVs

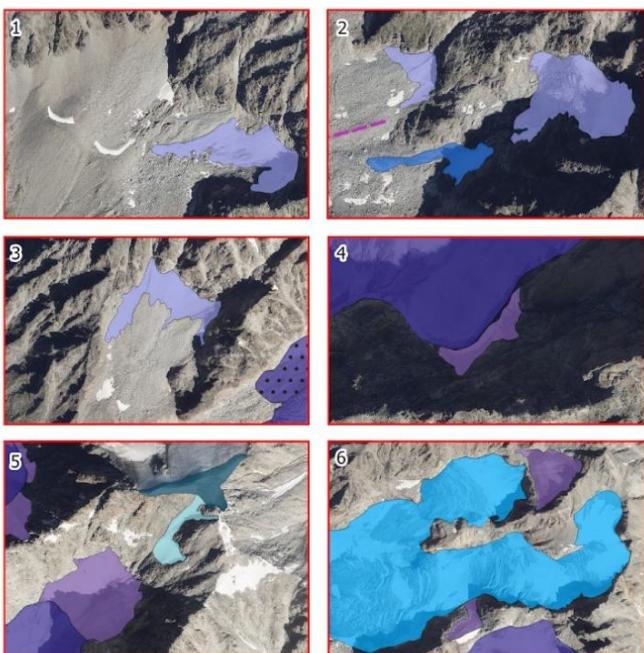


Figure 16 : Évolution de l'englacement dans le secteur du glacier d'Argentière (1920 - 2023).

Évolution de l'englacement dans le massif du Mont-Blanc : 1920 - 2023

Le glacier du Tour depuis l'Aiguillette des Posettes (2201 m)

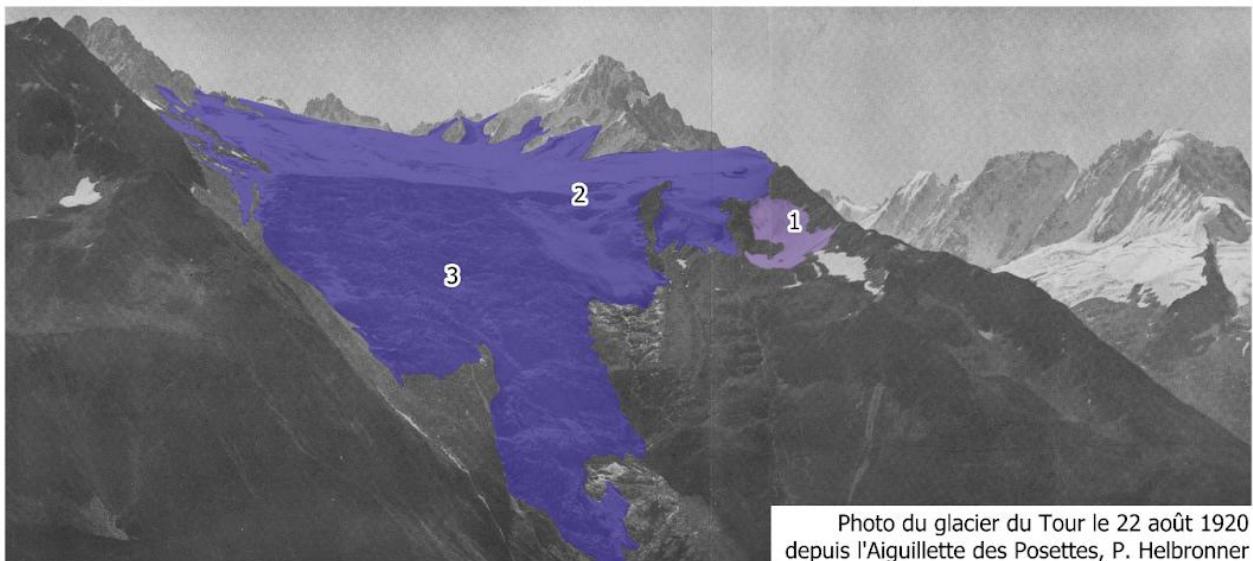
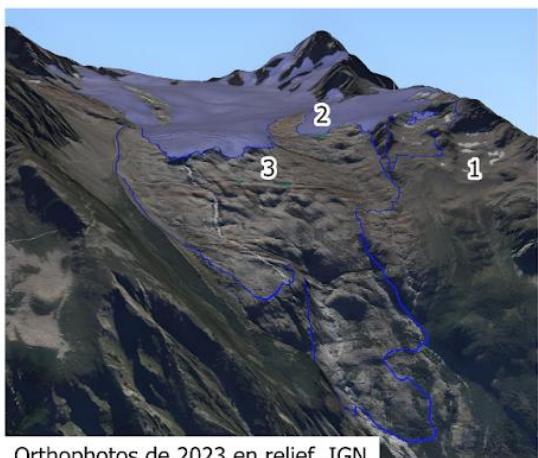
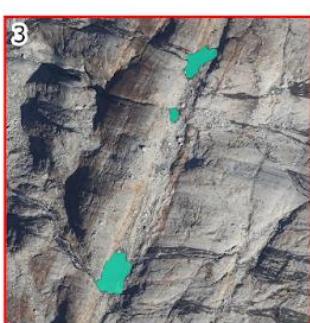
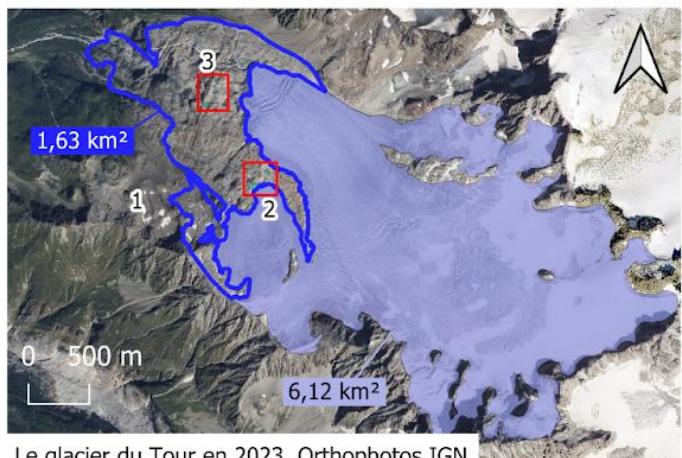


Photo du glacier du Tour le 22 août 1920 depuis l'Aiguillette des Posettes, P. Helbronner



Orthophotos de 2023 en relief, IGN



Typologie glaciaire

- Glacier de cirque et de versant (GCVs)
- Glacier de cirque (GC)
- Tablier de glace (TG)
- Lac glaciaire
- Surface désenglacée entre le 22/08/1920 et 2023

1 : disparition du TG

2 et 3 : apparition de 7 lacs glaciaires (entre 103 m² et 2 797 m²) suite au recul du glacier

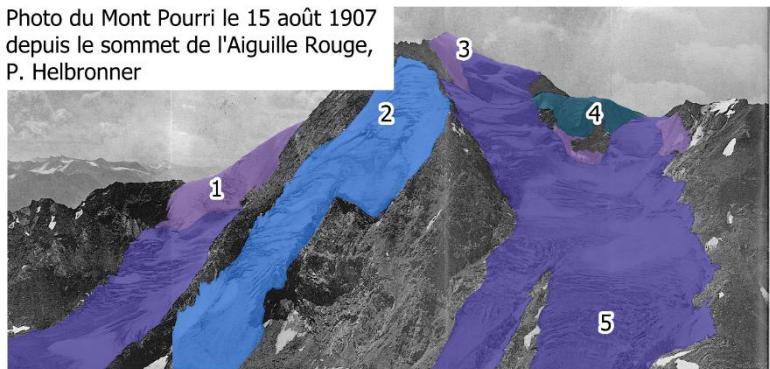
Autres : le glacier du Tour qui correspondait à un GCVs en 1920 est aujourd'hui un GC en raison de la fonte de sa langue glaciaire et de la diminution de sa pente moyenne. Le glacier a perdu 1,63 km² soit 21 % de sa superficie mesurée en 1920 et son front a reculé d'environ 1,35 km depuis cette période.

Figure 17 : Évolution de l'englacement dans le secteur du glacier du Tour (1920 - 2023).

Évolution de l'englacement dans le massif de la Vanoise : 1907 - 2022

Le Mont Pourri (3779 m) depuis le sommet de l'Aiguille Rouge (3226 m)

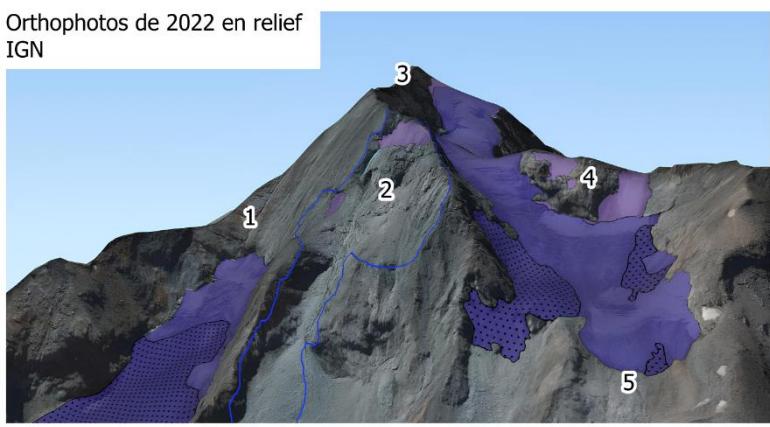
Photo du Mont Pourri le 15 août 1907 depuis le sommet de l'Aiguille Rouge, P. Helbronner



Typologie glaciaire

- Glacier de versant (GVs)
- Glacier de cirque et de versant (GCVs)
- Tablier de glace (TG)
- Couloir
- Calotte
- Couverture détritique
- Contour du glacier à partir de la photo du 15/08/1907

Orthophotos de 2022 en relief IGN



1 : disparition du TG

2 : disparition du GVs qui laisse place à 2 TG et 1 Couloir

3 : perte de surface du TG

4 : disparition de la Calotte au profit d'un TG

5 : perte de surface du GCVs

Autres : apparition d'une couverture détritique sur des portions de GCVs. Disparition de 227 931 m² de surface englacée.

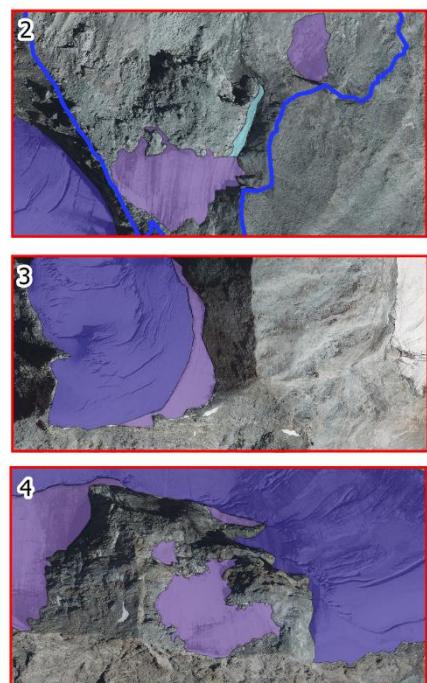
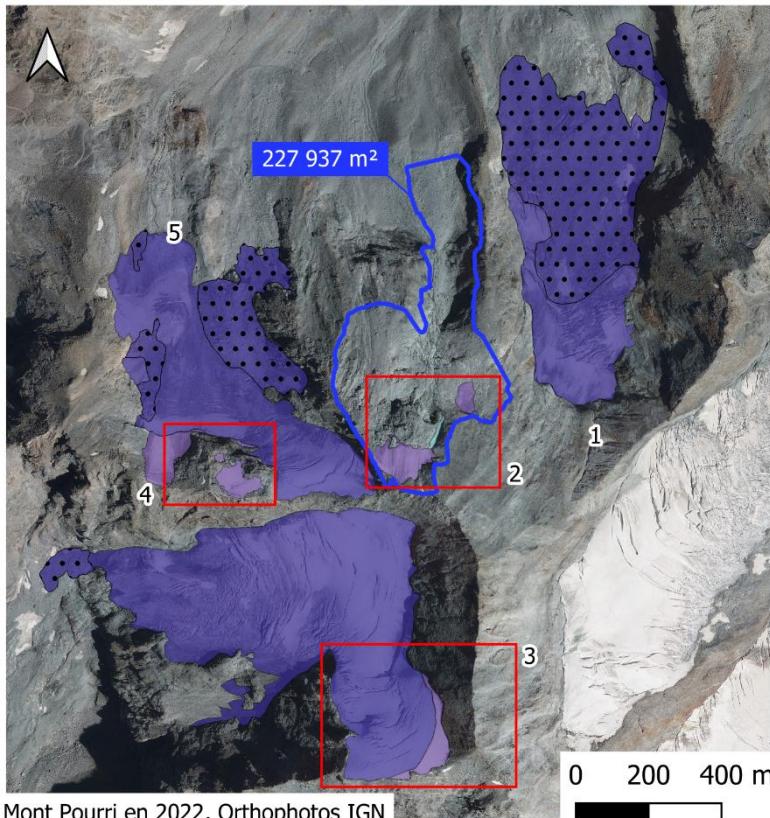
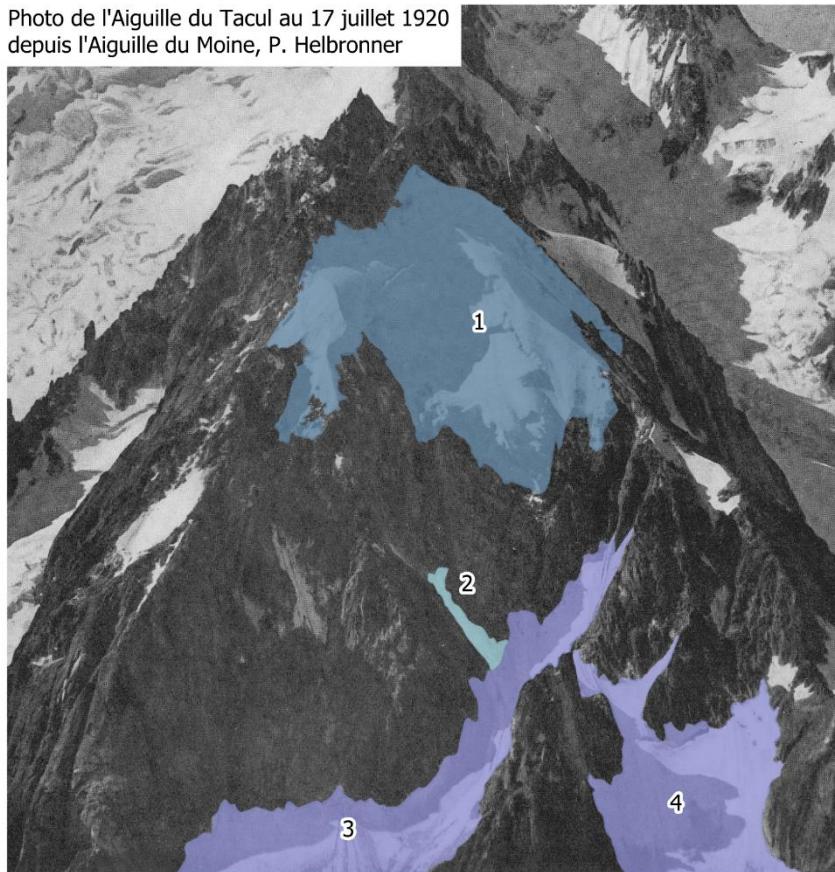


Figure 18 : Évolution de l'englacement dans le secteur du Mont Pourri (1907 - 2022).

Évolution de l'englacement dans le massif du Mont Blanc : 1920 -2023

L'Aiguille du Tacul (3444 m) depuis l'Aiguille du Moine (3412 m)

Photo de l'Aiguille du Tacul au 17 juillet 1920
depuis l'Aiguille du Moine, P. Helbronner



Typologie glaciaire

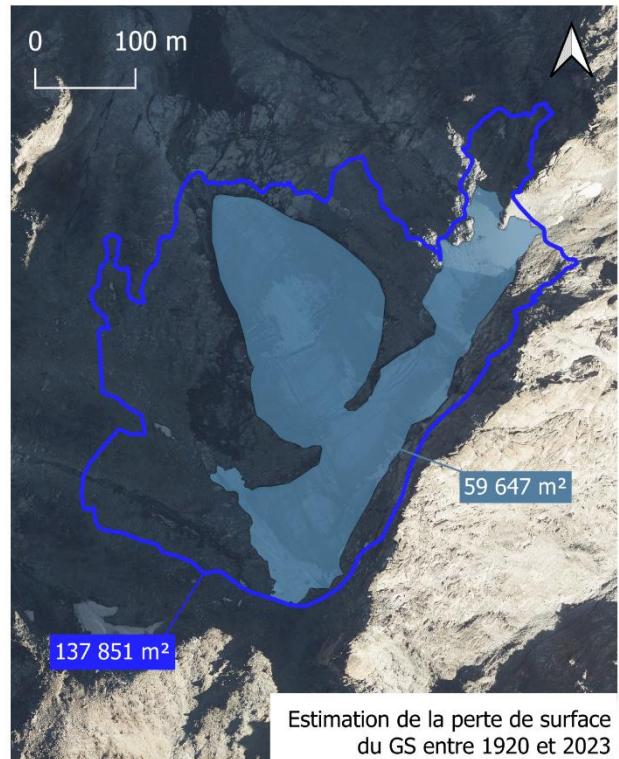
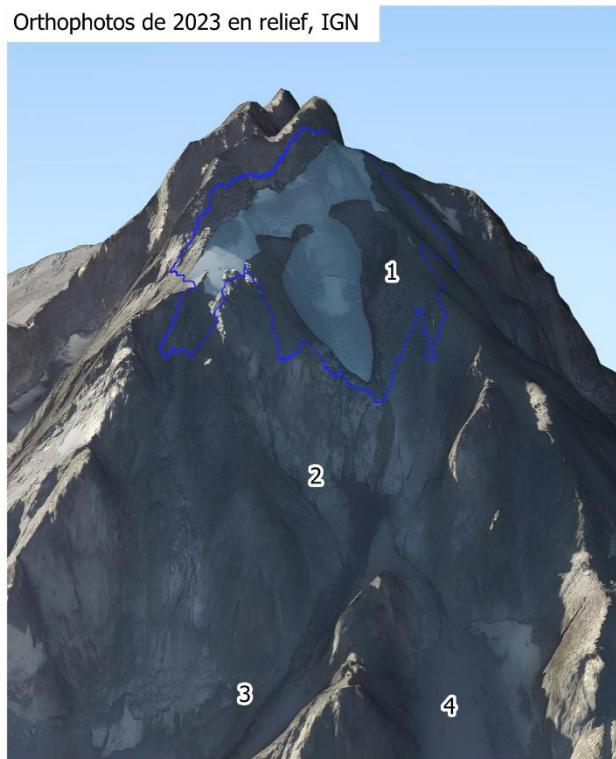
- Glacier de cirque (GC)
- Glacier suspendu (GS)
- Couloir
- Contour du glacier selon la photo du 17/07/1920

1 : perte de surface du GS :
le glacier a perdu 78 204 m²
depuis 1920 soit environ 57 %
de sa superficie à cette époque.

2 : disparition du remplissage
glace-neige dans le couloir

3 et 4 : disparition des GC

Orthophotos de 2023 en relief, IGN



Estimation de la perte de surface
du GS entre 1920 et 2023

Figure 19 : Évolution de l'englacement dans le secteur de l'Aiguille du Tacul (1920 - 2023).

IV. 2. Présentation du corpus

- **Dôme de l'Arpont (1907 – 2022)**

Sa cartographie (figure 17) présente un secteur marqué, au début du XXe siècle, par la présence de deux glaciers de grande taille : un glacier de vallée dont on voit la partie amont et un glacier de versant.

On observe que les glaciers de ce site se sont fragmentés en de nombreux appareils glaciaires de petite taille. Le glacier de vallée s'est divisé en un glacier de cirque et un glacier de vallée et a fait émerger quatre tabliers de glace. Un petit lac s'est également créé à la surface du glacier au niveau du site n°2. Le grand glacier de versant s'est lui aussi fragmenté, comme on peut le voir sur le site n°5 avec la création d'un petit glacier de versant. On note aussi l'émergence de cinq tabliers de glace et de nombreux lacs glaciaires nichés dans des surcreusements du bedrock liés à l'érosion glaciaire.

- **Bassin d'accumulation du glacier d'Argentière (1920 – 2023)**

Sa cartographie (figure 18) illustre à nouveau le phénomène de fragmentation dans la partie amont du glacier d'Argentière. Ici, ce glacier de vallée s'est divisé en plusieurs parties. Trois glaciers de cirque-et-de-versant se sont ainsi déconnectés du glacier principal et quatre tabliers de glace ont émergés. La perte d'épaisseur de glace a aussi donné lieu à l'apparition d'un couloir (site n°5). Le glacier de vallée n'est pas le seul à s'être fragmenté. Pour le site n°2, on observe que le glacier de cirque-et-de-versant présent en 1920 est aujourd'hui fractionné en deux petits glaciers de cirques et un glacier de versant.

Cette figure présente également deux phénomènes absents de la première carte : la disparition de la totalité des couloirs de glace et l'apparition d'une couverture détritique, dissimulant la confluence glaciaire (site n°7).

- **Glacier du Tour (1920 – 2023)**

La cartographie du glacier du Tour (figure 19) montre l'évolution sur un siècle de ce glacier de cirque-et-de-versant qui, en raison de la fonte de sa langue glaciaire et de la diminution de sa pente moyenne, est devenu un glacier de cirque. Ce site a été étudié *via* la méthode de *monoplotting* qui révèle une perte de surface de 1,63 km², soit 21 % de sa superficie entre 1920 et 2023. Suite à ce retrait sept lacs glaciaires sont apparus. De 103m² à 2 797m², ces lacs sont alimentés par le glacier et se situent également dans des surcreusements du bedrock. On note également la disparition du tablier glaciaire (site n°1)

- **Mont Pourri (1907 – 2022)**

L'étude de l'évolution de l'englacement du Mont Pourri (figure 20) met en évidence la disparition d'un glacier de versant. Bien que le front glaciaire soit absent de la photographie de Paul Helbronner, la méthode du *monoplotting* a été utilisée afin d'estimer la superficie visible sur le cliché de 1907 et aujourd'hui disparue. Cette approche a révélé une perte de 227 937m² de surface englacée. On remarque que la fonte de ce glacier a fait émerger deux tabliers du glace ainsi qu'un couloir (site n°2).

Un des tabliers présents en 1907, en marge d'un glacier de cirque-et-de-versant (site n°1) a également disparu, de même qu'une calotte (site n°4) qui a laissé place à un tablier. Comme observé sur la figure 15, on note l'apparition d'une couverture détritique sur les glaciers de cirque-et-de-versant.

- **Aiguille du Tacul (1920 – 2023)**

Sa cartographie (figure 21) illustre l'évolution d'un glacier suspendu, à nouveau à l'aide du *monoplotting*. Ce glacier suspendu, situé au sommet de l'Aiguille du Tacul, a perdu 57 % de sa superficie entre 1920 et 2023, soit 78 204 m². L'ensemble des appareils glaciaires situés à l'aval du glacier suspendu ont intégralement disparus.

Les éléments de l'analyse cartographique permettent de qualifier les évolutions morphologiques des glaciers sur chacun des cinq secteurs étudiés. Pour compléter cette approche qualitative, une analyse statistique a été menée à partir des données extraites des 202 appareils glaciaires étudiés. Elle vise à quantifier les pertes de surface et à explorer les possibles relations entre certaines variables telles que l'orientation, l'altitude, la typologie glaciaire et le recul observé. Cette étape permet d'élargir la lecture et d'identifier des tendances générales dans les trajectoires glaciaires.

IV. 3. Données statistiques

Les données du tableau ont permis la création de plusieurs graphiques dont nous allons exposer les résultats dans cette partie. Ce tableau contient, comme vu précédemment, les données de 202 appareils glaciaires photographiés par Paul Helbonner. Sur l'ensemble de ces appareils glaciaires présents au début du XXe siècle, on retrouve une grande majorité de couloirs (96) ainsi que de nombreux tabliers de glace (49) (figure 22). On note la présence de

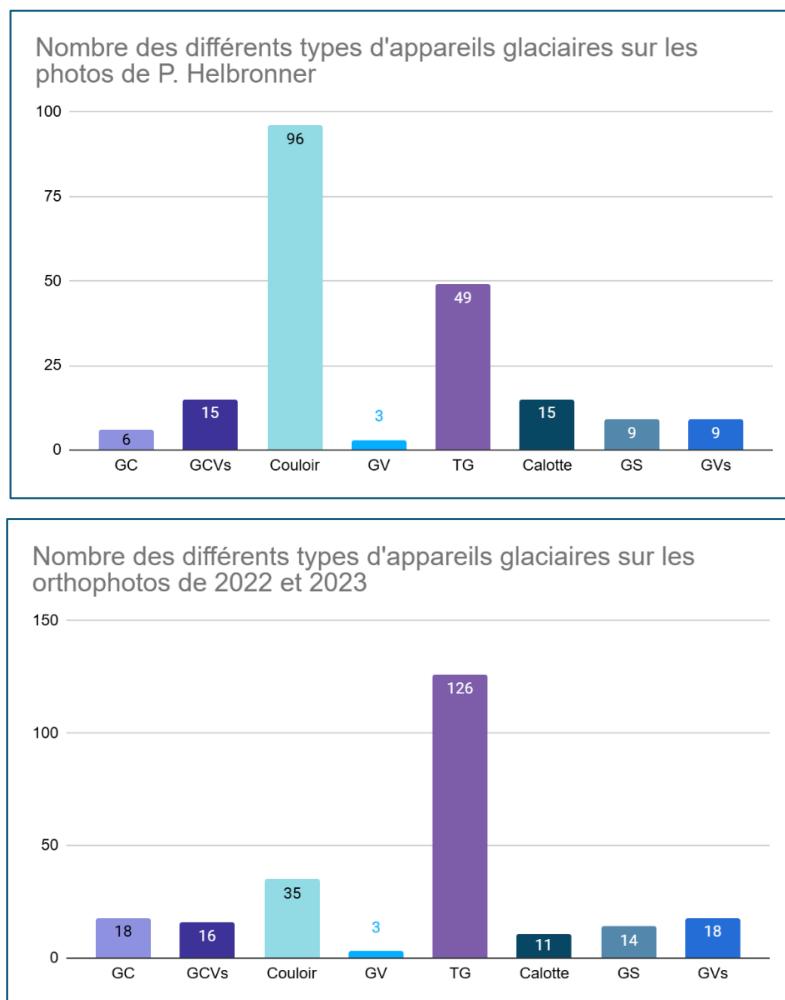


Figure 20 : Évolution du nombre des différents types d'appareils glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.

15 calottes et de 15 glaciers de cirque-et-de-versant. On compte autant de glaciers suspendus que de glaciers de versant (9 pour chacune de ces deux catégories), puis 6 glaciers de cirque. Enfin, les glaciers les moins représentés sur les clichés de Paul Helbronner sont ceux de vallée, au nombre de 3. Lorsque l'on compare le nombre d'appareils glaciaires de chaque type entre les périodes 1907-1920 et 2022-2023, on constate une augmentation du nombre d'unités dans presque toutes les catégories. Ainsi, le nombre de tabliers de glace est passé de 49 à 126 en un siècle. A l'inverse, 61 couloirs ont disparu sur cette période. Le reste des catégories glaciaires connaît des variations plus faibles. L'analyse comparative révèle 39 nouveaux appareils glaciaires, issus de fragmentations.

Afin de comprendre quels glaciers sont les plus sujets à cette fragmentation et quels appareils glaciaires sont créés par ce processus, nous avons traité les données extraites des images pour en faire un graphique (figure 23).

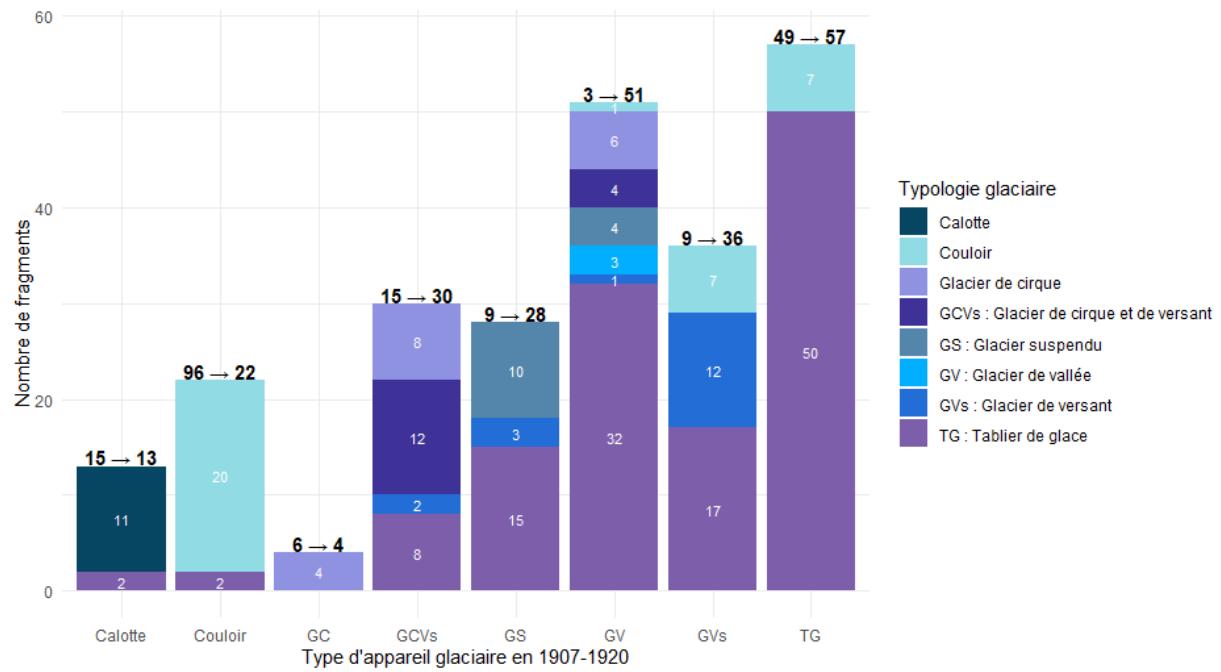


Figure 21 : Évolution des structures glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.

Exemple de lecture : les 15 GCVs présents sur les photos de Helbronner se sont fragmentés en 30 appareils glaciaires, dont 8 GC, 12 GCVs, 2 GVs et 8 TG entre 1907-1920 et 2022-2023

Ce graphique met en évidence l'importante fragmentation des glaciers de vallée, qui passent de 3 unités glaciaires en 1907-1920 à 51 en 2022-2023. Ceux-ci représentent également la catégorie qui a donné lieu à la plus grande variété de formes glaciaires : on retrouve l'ensemble de la typologie hormis les calottes dans les résultats de cette fragmentation. La seconde catégorie ayant connu un morcellement notable est celle des glaciers de versant qui, à partir de 9 unités, ont engendré l'individualisation de 36 appareils glaciaires. Cette fragmentation présente cependant des morphologies moins variées puisque qu'on compte seulement 3 types d'appareils glaciaires résultant de cette évolution dont 12 formes sur 36 restent fidèles aux caractéristiques des glaciers de versant. Les glaciers suspendus suivent ce même schéma avec 10 appareils glaciaires sur 28 qui conservent les spécificités de leur glacier d'origine. L'évolution des glaciers de cirque-et-de-versant est plus complexe et résulte en une mosaïque de glaciers de cirque, de versant, de cirque-et-de-versant et de tabliers. On remarque aussi que les calottes, les couloirs, les glaciers de cirque et les tabliers ont été nettement moins touchés par la fragmentation.

La figure révèle enfin le phénomène de multiplication des tabliers de glace. Chaque type de glacier hormis les glaciers de cirque ont fait émerger des tabliers de glace. Ils sont majoritairement représentés dans leur propre catégorie bien que quelques tabliers aient perdu en largeur jusqu'à se retrouver confiné dans une faille, donnant alors lieu à 7 couloirs. Ils sont ensuite principalement issus de glaciers de vallée, de glaciers de versant et de glaciers de cirque-et-de-versant.

Si différents types glaciaires ont connu des modifications structurelles, celles-ci s'expliquent par des diminutions d'épaisseur de glace ou des pertes de surface qui entraînent un morcèlement du glacier initial (Izagirre et al., 2024). Nous avons donc voulu mettre en avant cette dynamique de recul glaciaire au sein d'un graphique afin de comprendre à quel point les surfaces englacées étudiées ont été impactées par le changement climatique (figure 24).

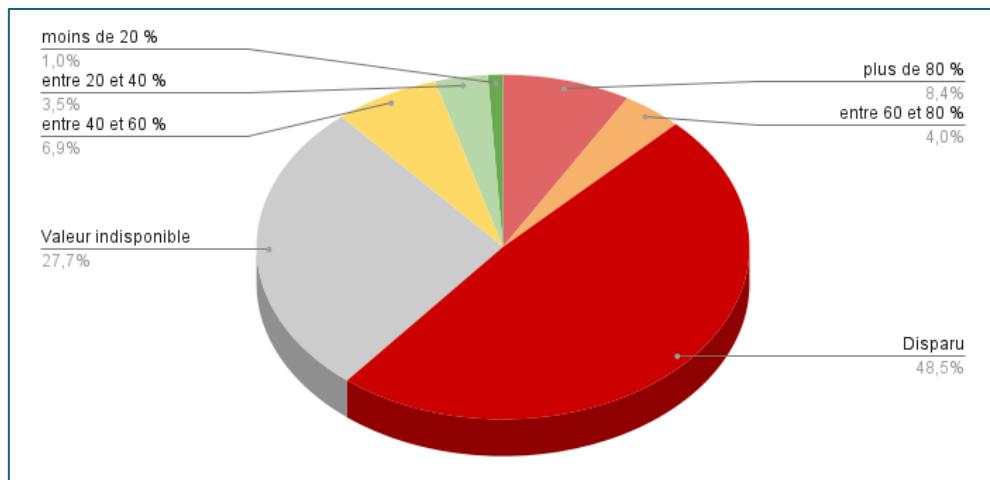


Figure 22 : Proportions des pertes de superficie par classes de 20 % des appareils glaciaires étudiés entre 1907-1920 et 2022-2023.

Les catégories de pertes de superficie inscrites dans le tableau de synthèse ont été traitées sous la forme d'un diagramme. Celui-ci nous apprend que près de la moitié (48,5 %) des glaciers étudiés ont disparu et que 8,4 % ont perdu plus de 80 % de leur superficie. Seuls 1 % des appareils glaciaires ont enregistré une diminution inférieure à 20 %.

Ces résultats nous indiquent comment l'ensemble des glaciers ont évolué en matière de superficie mais ne rendent pas compte des trajectoires propres à chaque type glaciaire. C'est pourquoi nous avons produit un second graphique sous forme de « treemap » (figure 25). Dans ce format, chaque grand bloc représente un type d'appareil glaciaire et les cases qu'il contient renvoient aux différentes catégories de perte de superficie. En analysant ce graphique, nous pouvons faire plusieurs constats.

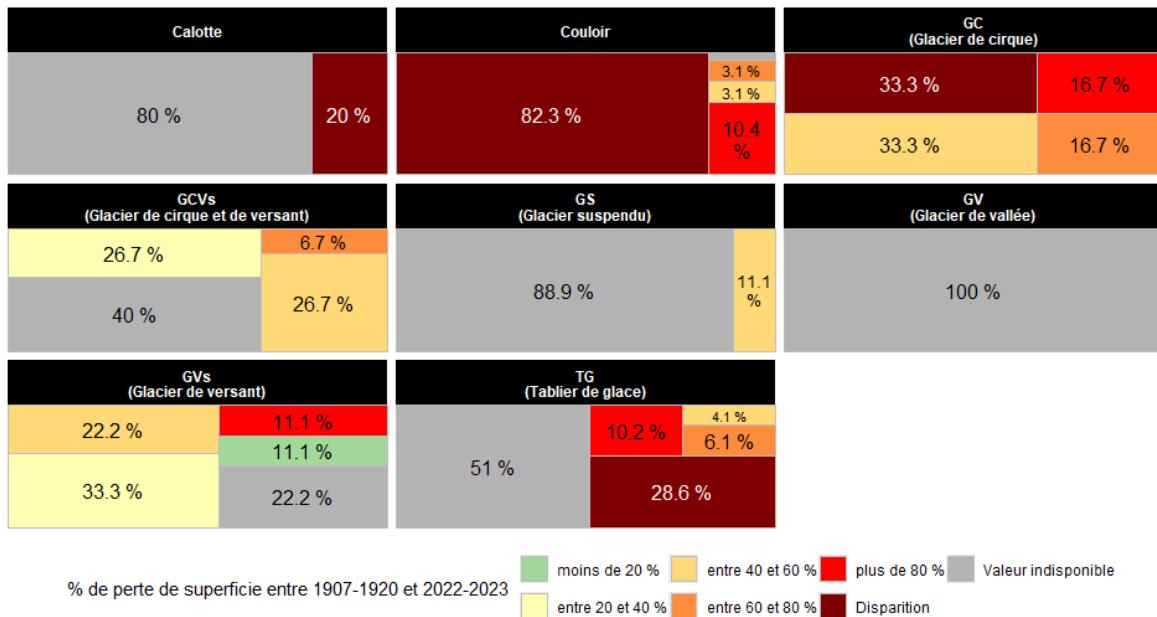


Figure 23 : Perte de superficie des différents types d'appareils glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.

Exemple de lecture : 10,4 % des couloirs étudiés ont perdu plus de 80 % de leur superficie entre 1907-1920 et 2022-2023

La difficulté à déterminer les limites des calottes alpines par vue aérienne explique le grand nombre de valeurs indisponibles. On note toutefois que 20 % d'entre elles ont disparu. Il ne s'agit toutefois pas de la catégorie ayant enregistré le plus grand nombre de disparitions : 82,3 % des couloirs étudiés ont disparu entre 1907-1920 et 2022-2023, corroborant les résultats de la figure 22 et seuls 3,1 % affichent des pertes inférieures à 40 %.

Les glaciers de cirque sont également une classe fortement touchée par le recul glaciaire : un tiers a disparu, un autre tiers a subi des pertes de superficie supérieures à 60 % et le dernier tiers est concerné par des pertes de 40 à 60 %. Les glaciers de cirque-et-de-versant ont nettement mieux résisté avec peu de pertes supérieures à 60 % et aucune supérieure à 80 %.

Les glaciers de versant présentent des profils plus variés : si certains ont quasiment disparu, d'autres ont perdu moins de 20 % de leur superficie (seule catégorie dans ce cas). Les tabliers de glace ont davantage souffert du changement climatique, avec un nombre élevé de disparitions (28,6 %) et de pertes supérieures à 80 %.

Enfin, certaines catégories sont marquées par un manque de données. Les tabliers de glace en font partie, de même que les glaciers suspendus dont la présence sur des parois raides avec peu de repères visuels complexifie l'estimation de leurs contours passés. Pour les glaciers de vallée, cela s'explique par l'absence de leur front sur les photographies de Paul Helbronner, ne permettant pas de quantifier leur perte de superficie.

Les réponses des types d'appareils glaciaires face au changement climatique diffèrent donc. Si cette diversité de réaction est liée aux morphologies glaciaires spécifiques à chaque catégorie, d'autres facteurs peuvent influencer le retrait glaciaire. L'altitude est l'un d'eux. C'est pourquoi, dans la figure 26 la relation entre la position des fronts glaciaires au XXe siècle et la perte de superficie des glaciers est étudiée.

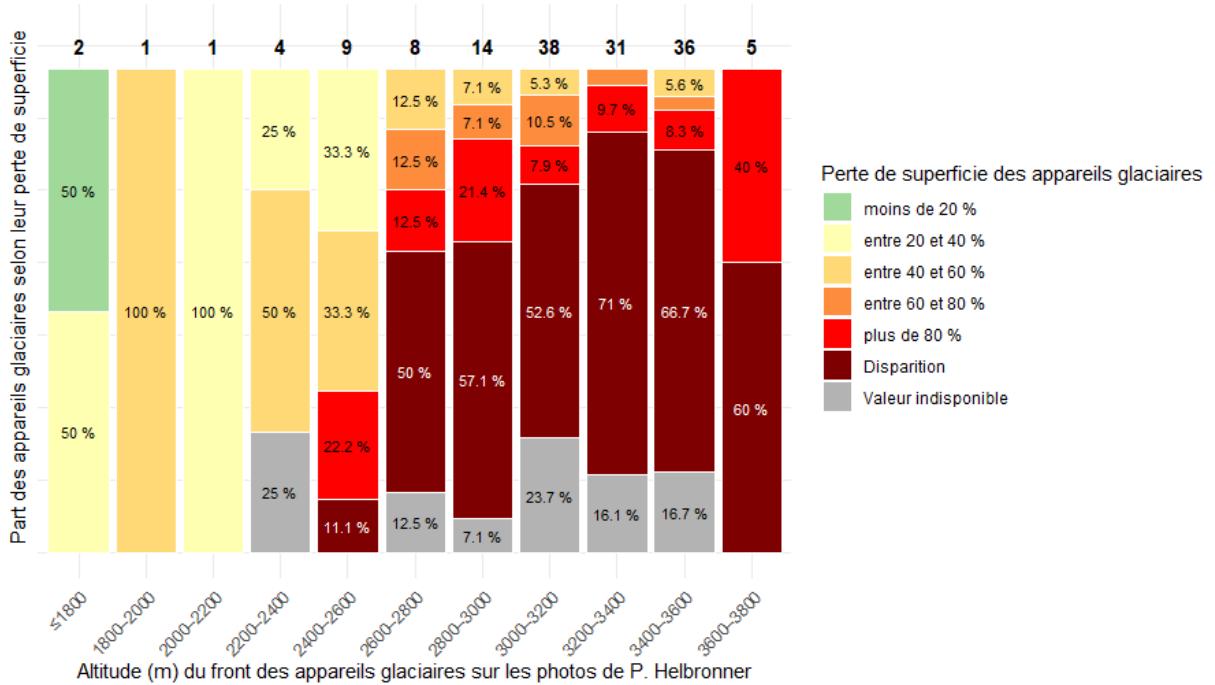


Figure 24 : Impact de l'altitude du front sur l'évolution des superficies glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.

Exemple de lecture : 12,5 % des appareils glaciaires dont le front se situait à une altitude comprise entre 2600 et 2800 en 1907-1920, ont perdu entre 60 et 80 % de leur superficie entre 1907-1920 et 2022-2023

Ce graphique présente la répartition des appareils glaciaires étudiés selon les classes d'altitude de leur front sur la période 1907-1920. À l'intérieur de chaque classe d'altitude, les glaciers sont représentés selon leur perte de superficie. L'objectif de ce graphique était de voir s'il est possible de tirer des conclusions sur la relation entre altitude et perte de superficie glaciaire. Les limites de cette figure sont toutefois importantes puisque l'ensemble des appareils glaciaires n'est pas réparti de manière égale dans les classes d'altitude. On peut néanmoins observer comment les appareils glaciaires ont évolué au sein de cet échantillon. Afin de relativiser les proportions inscrites dans chaque classe d'altitude, les effectifs de ces dernières sont inscrits en gras en haut du graphique. Certains appareils glaciaires ne sont pas représentés en raison de la difficulté à estimer l'altitude de leur front à l'époque de Paul Helbronner.

C'est entre 3200 et 3400 m qu'on trouve la proportion la plus élevée de glaciers disparus (71 %). 9,1 % des glaciers de cette classe d'altitude ont perdu plus de 80 % de leur superficie en un siècle tandis que 3,2 % ont perdu entre 60 et 80 %. Il s'agit donc d'une altitude à laquelle les appareils glaciaires ont particulièrement souffert des conséquences du changement climatique. Le constat est globalement similaire pour les glaciers situés entre 3400 et 3600 m d'altitude : 66,7 % ont disparu, 8,3 % ont perdu plus de 80 % de leur superficie, 2,7 % entre 60 et 80 % et 5,6 % entre 40 à 60 % de superficie. Ceux présents entre 3600 et 3800 m qui n'ont pas disparu ont tous perdu au moins 80 % de leur surface.

Les glaciers à plus basse altitude sont moins touchés par la fonte. À moins de 2400 m, aucun n'a perdu plus de 60 % de sa surface et on compte même plusieurs cas pour lesquels les pertes sont estimées à moins de 40 %. Entre 2400 et 2600 m, si 11,1 % des glaciers ont disparu, les pertes sont surtout comprises entre 20 et 60 %. Enfin, les appareils glaciaires situés 2600 et 3200 m ont majoritairement disparus et ceux restant affichent souvent une perte de superficie supérieure à 80 %.

Afin d'enrichir l'analyse et de prendre en compte un dernier facteur pouvant influencer la fonte, l'orientation des appareils glaciaires a été étudiée. Les glaciers présentant la même orientation ont été regroupés sur un graphique (figure 27), accompagnés de leur pourcentage de perte de superficie.

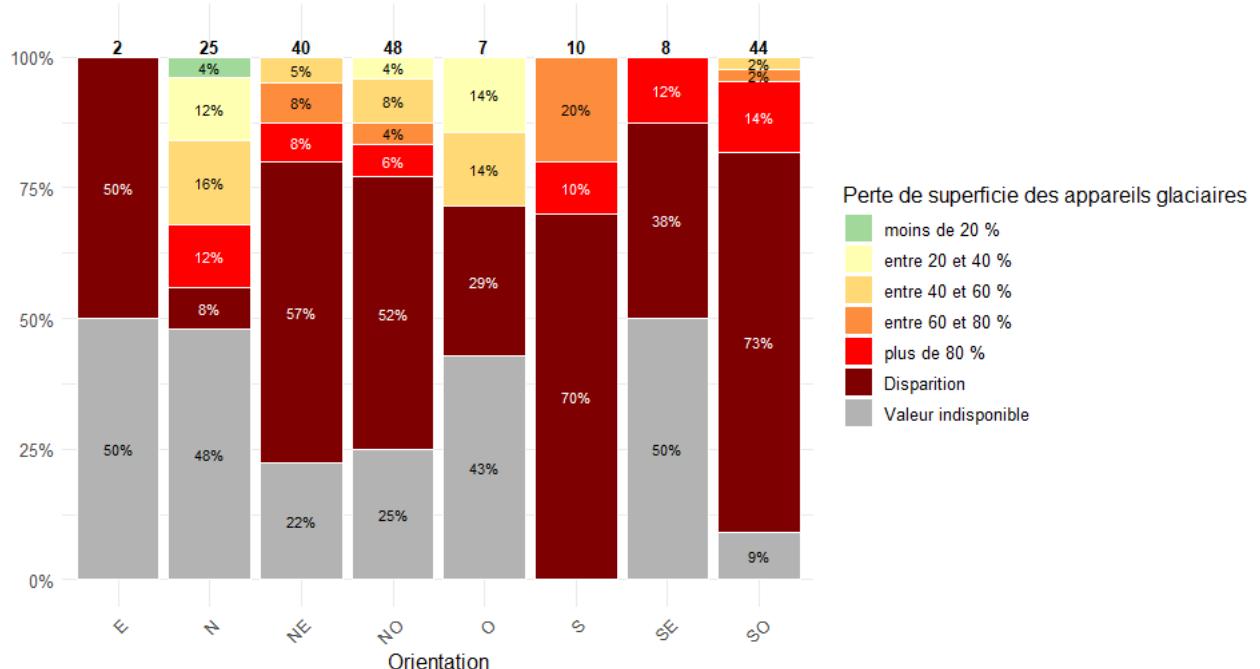


Figure 25 : Répartition des appareils glaciaires par orientation et perte de superficie.

Exemple de lecture : 4 % des appareils glaciaires orientés nord en 1907-1920 ont perdu moins de 20 % de leur superficie entre 1907-1920 et 2022-2023

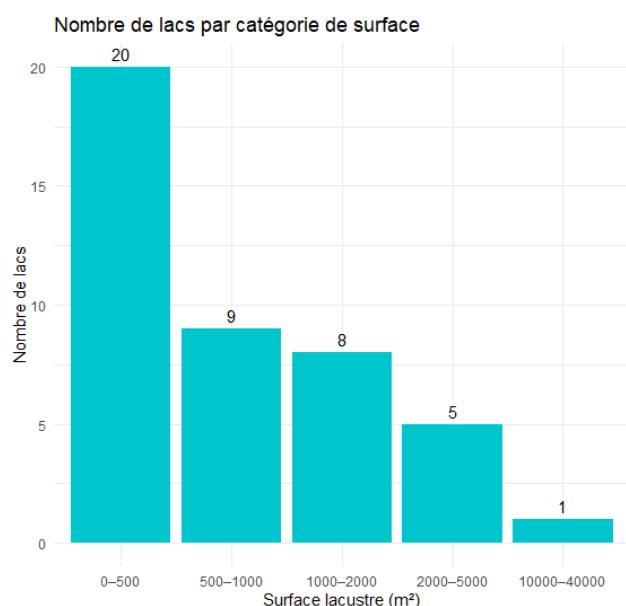
On note avant tout, qu'à l'image du graphique précédent, celui-ci présente des données inégalement réparties, c'est pourquoi les effectifs totaux de chaque colonne sont inscrits en gras au-dessus de celles-ci. On compte par exemple très peu d'appareils glaciaires orientés est, ouest et sud-est tandis qu'ils sont nombreux à être orientés nord, nord-est, nord-ouest, sud-ouest et sud.

Les appareils glaciaires les plus impactés par la fonte sont orientés SO : 73 % ont disparu et 14 % ont perdu plus de 80 % de leur superficie. Les glaciers orientés S sont également très touchés : 70 % ont entièrement fondu en un siècle, 10 % ont perdu plus de 80 % de leur superficie et 20 % entre 60 et 80 %.

Les glaciers orientés NE et NO ont perdu la moitié de leurs effectifs. Sur 48 appareils glaciaires orientés NO, seuls 4 % ont perdu entre 20 et 40 % de leur superficie, le reste est caractérisé par un retrait bien plus élevé, allant jusqu'à plus de 80 % pour 6 % d'entre eux.

C'est sur des versants orientés nord que les appareils glaciaires se maintiennent le mieux : seuls 8 % ont disparus, avec toutefois 12 % qui enregistrent une perte de superficie supérieure à 80 % ; il s'agit de la seule catégorie ayant des pertes inférieures à 20 %.

Après avoir étudié les différents facteurs pouvant influencer le retrait glaciaire, nous nous sommes penchés sur des formes post-glaciaires créées suite à la fonte : les néolacs. Ne disposant que de données concernant leurs contours, nous les avons ordonnés par classes de superficie (figure 28).



On constate que la majorité des lacs glaciaires formés en un siècle est de très petite taille (< 500 m²). On en compte ensuite seulement neufs dont la superficie est comprise entre 500 et 1000 m², huit entre 1000 et 2000 m², cinq entre 2000 et 5000 m² et seul un excède les 10 000 m².

Figure 26 : Nombre de lacs par catégorie de surface.

IV. 4. Apports des résultats

Les analyses du corpus cartographique et des données chiffrées mettent en évidence une dynamique glaciaire marquée par un recul généralisé et une fragmentation des appareils glaciaires entre le début du XXe siècle et 2022-2023. Les trajectoires varient toutefois selon la morphologie des glaciers, leur altitude et leur orientation.

Les cartes du Dôme de l'Arpont et du bassin d'accumulation du glacier d'Argentière illustrent particulièrement le phénomène de fragmentation : les glaciers de vallée et de versant de ces secteurs se sont effectivement divisés en plusieurs appareils glaciaires de plus petite taille. La totalité du corpus cartographique met également en avant un recul d'intensité variable selon les sites avec parfois des disparitions complètes. La fonte a également favorisé l'apparition de nouveaux paysages post-glaciaires, marqués par la présence de lacs. Par ailleurs, les cartographies révèlent la présence de couvertures détritiques à la surface de certains glaciers qui étaient absentes des photographies de Paul Helbronner.

Les données statistiques confirment ces observations : elles révèlent que la fragmentation a particulièrement impacté les glaciers de vallée et, dans une moindre mesure, ceux de cirque-et-de-versant tandis que les glaciers de cirque n'ont pas subit de changement de typologie. Cette analyse quantitatives met en évidence la multiplication des tabliers de glace qui contraste avec la disparition de la majorité des couloirs.

L'évaluation des pertes de superficie montre l'ampleur du recul avec près de la moitié des glaciers disparus et 8,4 % ayant perdu plus de 80 % de leur superficie. Les glaciers orientés Sud-Ouest et Sud ont été les plus touchés, de même que ceux situés au-dessus de 3200 m d'altitude. Enfin, l'inventaire des lacs glaciaires met en avant le nombre conséquent de ces formes post-glaciaires apparues en un siècle en mettant l'accent sur leur surface réduite.

➔ **Nous verrons, dans la section suivante, comment interpréter ces résultats et comment ceux-ci s'inscrivent dans la recherche. Nous nous pencherons ensuite leurs limites avant d'évoquer les perspectives potentielles de cette étude.**

V. Discussion

V. 1. Mise en perspective des résultats

V. 1. a. Interprétation des évolutions observées

On a tout d'abord constaté une augmentation significative du nombre de tabliers de glace (figure 22) avec 77 nouvelles unités identifiées en un siècle. Toutefois, ce résultat contraste avec ceux de la figure 25 qui font état de la disparition de 28,6 % des tabliers initialement recensés (figure 25), un constat qui indique une forte vulnérabilité de ces formes glaciaires face au changement climatique, confirmée par Guillet et Ravanel (2020) et Kaushik *et al.* (2022) et liée notamment à la faible épaisseur de ces formations glaciaires. La comparaison de ces deux données révèle donc que le nombre de tabliers ayant émergé depuis les photographies de Paul Helbronner est bien supérieur à 77, compte-tenu de leur fort taux de disparition sur cette période. La multiplication de ces formes glaciaires est elle-même une réponse au changement climatique : ces appareils glaciaires correspondent soit à de la glace plaquée sur une paroi et révélée par la fonte du glacier qui la masquait, soit à une accumulation nivale pérenne qui succède au retrait du glacier (Kaushik *et al.*, 2022). Cette activité glaciaire témoigne donc des transformations de l'architecture glaciaire, où la fonte des glaciers crée des conditions favorables à l'apparition de structures plus petites, qui apparaissent comme des formes transitoires avec une probabilité très forte de disparition au cours des prochaines décennies (Kaushik *et al.*, 2022).

La figure 25 met également en avant une perte de superficie de différente intensité selon le type d'appareils glaciaires avec une fonte plus modérée pour les glaciers de versant et ceux de cirque-et-de-versant et plus marquée pour les couloirs, les calottes, les glaciers de cirque et, comme vu précédemment, les tabliers. Cette différence peut s'expliquer par l'impact de la taille des glaciers sur leur fonte. Ceux de versant et de cirque-et-de-versant ont une superficie globalement plus élevée que celle des autres catégories (hormis les glaciers de vallée, pour lesquels nous ne disposons pas de données de perte de superficie). Or, plusieurs études montrent qu'à taux d'ablation égal, les glaciers plus petits se rétractent plus rapidement en raison d'un rapport surface/volume élevé (Gardent *et al.*, 2014 ; Tennant *et al.*, 2012 ; Granshaw et Fountain, 2006). D'autre part, le faible rapport périmètre/surface expose les petits glaciers au rayonnement du terrain environnant (Jiskoot, 2012) ce qui accélère leur fonte tandis que les glaciers plus étendus sont proportionnellement moins exposés.

Sur la question de la fragmentation, nous avons vu que les glaciers de vallée, les glaciers de versant ainsi que les glaciers de cirque-et-de-versant sont les plus sujets au morcellement. La fragmentation des glaciers de cirque-et-de-versant a déjà été observée dans plusieurs travaux antérieurs. Pelfini et Smiraglia (1992) rapportent par exemple la division de la langue glaciaire

du glacier Fellaria, dans les Alpes italiennes, en deux parties distinctes, qui se sont elles-mêmes fragmentées. La même étude mentionne également la division du glacier de Scersen en cinq glaciers principaux, confirmée par Galluccio et Scotti (2022) (figure 29). Ces observations montrent que les glaciers de cirque-et-de-versant ont tendance à se fragmenter souvent en plusieurs glaciers de cirque. Cette tendance à la fragmentation des glaciers de cirque-et-de-versant et des glaciers de vallées peut s'expliquer par la morphologie de ces derniers, qui présentent une partie amont constituée d'un ou plusieurs cirques et une partie aval s'étendant dans une vallée aux parois raides ou sur un versant de montagne.

Cette configuration en deux parties, souvent délimitées par une rupture de pente, favorise la perte de connexion entre les sections, telle qu'illustrée par les cartographies du glacier d'Argentière et du Dôme de l'Arpont. Ce mécanisme est mis en lumière par l'exemple du glacier du Forni étudié par Diolaiuti et Smiraglia (2010), où un affleurement rocheux a provoqué la séparation entre le bassin supérieur d'accumulation (sous forme de cirque) et la langue glaciaire principale. La fragmentation des glaciers de versant est nettement moins étudiée. Les travaux menés sur les glaciers de versant concernent davantage les risques de rupture de langue glaciaire, qui constituent un véritable enjeu de sécurité pour les vallées anthropisées (Failletaz *et al.*, 2011).

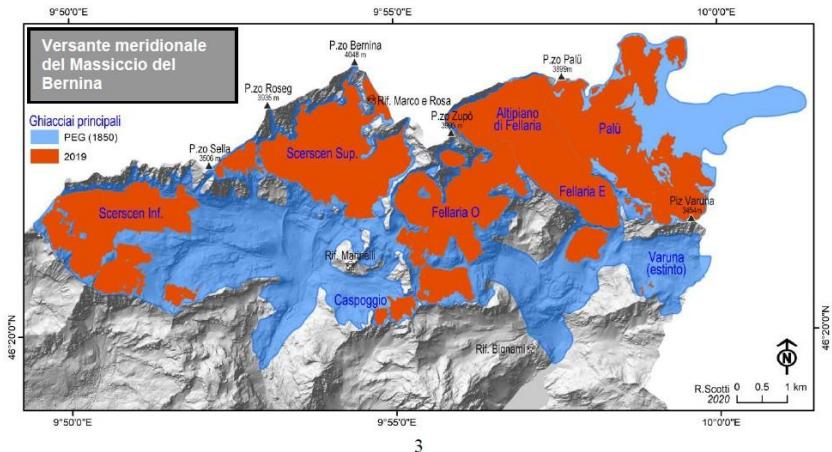


Figure 27 : Fragmentation des glaciers de Scersen et Fellaria (Galluccio et Scotti, 2022).

Les résultats des données statistiques fournissent d'autres informations sur des facteurs influençant l'évolution des formes glaciaires. Le constat a été fait (figure 27), qu'une orientation S ou SO leur était particulièrement défavorable, de même que NE et NO dans une moindre mesure, tandis qu'ils se conservent mieux sur une pente orientée N. La différence de recul glaciaire entre les orientations N et S ou SO est largement documentée (Evans, 1977 ; Chueca et Julian, 2004 ; Evans et Cox, 2005 ; Gardent *et al.*, 2014 ; Rabatel *et al.*, 2013). Toutefois, ces études montrent que des orientations NE et NO sont plutôt favorables, contrairement à nos observations. Différentes hypothèses peuvent expliquer cela : (i) si la majorité des glaciers classés NE ou NO sont de petite taille, ils sont plus vulnérables et disparaissent plus facilement (Huss et Fisher, 2016); (ii) la tendance globale à l'élévation de la température et au retrait glaciaire se fait ressentir, même sur des expositions favorables (Gardent *et al.*, 2014); (iii) les appareils glaciaires peuvent subir des conditions microclimatiques défavorables (Evans, 2006); (iv) enfin, si les formes glaciaires de ces versants

sont à situées à basses altitudes, elles sont plus sensibles au climat, quelle que soit l'orientation (Paul et Haeberli, 2008).

La figure 26 portant sur la relation entre altitude des fronts glaciaires en 1907-1920 et perte de superficie actuelle, présente des données inégalement réparties avec 124 fronts glaciaires entre 2600 et 3800 m mais seulement 25 en-dessous de 2600 m, ce qui fragilise l'interprétation. En effet, les glaciers de basse altitude (< 2600 m) ont mieux résisté, ce qui semble paradoxal au regard des processus climatiques attendus selon l'étagement montagnard (Zemp *et al.*, 2015) et doit être interprété avec prudence en raison du faible effectif de cette classe altitudinale. Ces résultats font état d'une fonte plus intense aux altitudes élevées, notamment au-delà de 3200 m, un constat là encore paradoxal et ce malgré le nombre plus élevé de glaciers étudiés à ces altitudes. À l'image des données concernant l'orientation, ces résultats peuvent s'expliquer par différentes hypothèses : (i) l'inégale répartition des appareils glaciaires de l'échantillon limite la mise en évidence de tendances robustes, notamment aux basses altitudes ; (ii) des conditions microclimatiques ont pu être favorables aux quelques glaciers situés en-dessous de 2600 m ; (iii) enfin, les petits appareils en haute altitude (couloirs, tabliers) ayant connu de nombreuses pertes ont pu biaiser les données finales.

La figure 28 révélait que les lacs glaciaires recensés sur les secteurs d'étude étaient principalement de petite taille. Cela concorde avec les résultats de Mölg *et al.* (2021) dont l'inventaire de 1192 néolacs suisses montraient que plus de 90 % d'entre eux avaient une taille inférieure à 10 000 m². Cette superficie restreinte s'explique par leur localisation, souvent dans de petites dépressions du substrat rocheux créées par l'érosion glaciaire (Haeberli *et al.*, 2016).

V. 1. b. Limites :

Malgré des résultats intéressants, l'étude présentée ici comporte certaines limites à souligner.

Tout d'abord, les photographies de Paul Helbronner, bien qu'elles soient d'une grande valeur historique et patrimoniale, ne sont pas toutes adaptées à l'étude du retrait glaciaire. Certaines sont insuffisamment nettes, les glaciers apparaissent parfois en arrière-plan ou sont incomplets. L'estimation des pertes de superficie peut s'avérer impossible par la seule reconnaissance visuelle, par exemple pour les calottes, tandis que le manque de repères est l'un des principaux obstacles à l'estimation de la position des fronts, en particulier pour les tabliers de glace ou les glaciers suspendus, plaqués à des parois raides sans blocs identifiables ou moraines à proximité.

Concernant les données relatives à l'orientation et l'altitude, celle-ci sont inégalement réparties, ce qui peut introduire des biais dans l'analyse des résultats. Certains secteurs sont mieux documentés que d'autres ce qui nuit à la représentativité de l'étude.

Enfin, comme précisé dans la méthode, il faut garder à l'esprit que les résultats de perte de superficie sont issus d'estimations qui, bien que s'appuyant sur des repères, peuvent être imprécises et masquer des variations locales.

V. 1. c. Apports de ce travail :

Ce travail s'inscrit dans la continuité des études menées par de nombreux glaciologues portant sur le recul glaciaire tout en y apportant des spécificités. Premièrement, l'utilisation du fonds Helbronner est une première en glaciologie. L'exploitation de cette œuvre permet d'apporter un regard nouveau sur les évolutions de la haute montagne à l'échelle d'un siècle. Rapidement suivis du développement de la photographie aérienne, plus facile à étudier, les travaux de Paul Helbronner n'ont pas été des sources privilégiées pour analyser le retrait glaciaire. Pourtant, ces archives photographiques, outre qu'elles constituent un patrimoine historique précieux, sont un témoignage rare sur un milieu en transition, particulièrement intéressant pour l'étude des petites formations glaciaires telles que les tabliers et les couloirs.

L'étude des couloirs est d'ailleurs l'un des apports de cette étude. Leur dynamique est peu documentée, hormis dans quelques articles qui se penchent sur ces « goulottes » par le biais de l'évolution des voies d'alpinisme (Arnaud *et al.*, 2024).

Enfin, si des typologies glaciaires sont mobilisées dans la littérature pour analyser l'évolution des glaciers (Cogley, 2009 ; Raup *et al.*, 2007 ; Gardent *et al.*, 2014), cette étude propose leur adaptation au contexte alpin, pour évaluer plus finement les trajectoires des appareils glaciaires, y compris des formations jusqu'ici peu étudiées (couloirs ou tabliers).

V. 2. Déroulement du stage et retours personnels

Ce stage s'est déroulé sur quatre mois, au sein de l'équipe Morphodynamiques du laboratoire EDYTEM, sous l'encadrement de Ludovic Ravanel et Philip Deline. Mon travail s'est effectué en autonomie avec des réunions au laboratoire ou en visioconférence avec mes deux maîtres de stage, dans l'objectif de structurer l'avancée de mes travaux. L'entièreté de mon stage s'est effectuée au laboratoire, avec les autres stagiaires de l'équipe Morphodynamiques, ce qui m'a permis de m'intégrer à la structure et de bénéficier de nombreux échanges utiles pour m'aider à avancer dans mes tâches.

Celles-ci se sont réparties selon l'organisation présentée dans la figure 30. J'ai donc commencé par la sélection et la numérisation des photographies, procédé à leur exploitation, recensé ces données et produit des supports visuels pour mettre en forme mes résultats.

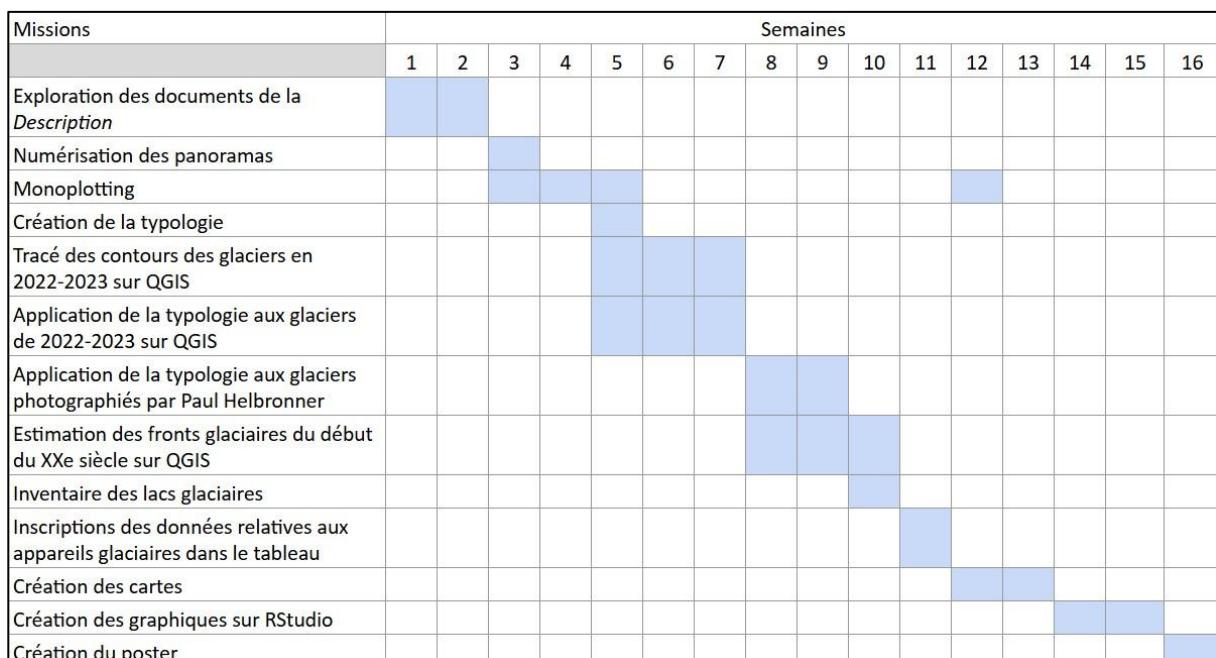


Figure 28 : Diagramme de Gantt présentant la répartition de mes missions.

J'ai beaucoup appris au cours de ce stage. De nombreuses notions de master m'ont été utiles, à l'image de la maîtrise de Rstudio, de QGIS et des connaissances liées au fonctionnement des environnements de haute altitude. Certaines compétences me manquaient toutefois : les environnements glaciaires, leurs morphologies et leurs fonctionnements ont été peu abordés en cours ce qui m'a poussée à me documenter très largement et à questionner mes encadrants, auprès de qui j'ai beaucoup progressé. L'absence d'enseignement concernant le langage Python (nécessaire à l'utilisation de l'extension de *monoplotting moniQue*) et la manipulation de nuages de points LiDAR (notamment *via CloudCompare*) constituait un second obstacle. L'élargissement des cours pratiques à ces méthodes pourrait être une bonne perspective pour des étudiants souhaitant poursuivre dans la recherche.

VI. Conclusion et perspectives

Ce mémoire avait pour objectif de documenter l'évolution des glaciers alpins au cours du siècle dernier, à partir des photographies de Paul Helbronner. En combinant deux approches (le *monoplotting* et une estimation visuelle des fronts anciens dans un SIG), nous avons pu constituer une base de données de 202 appareils glaciaires répartis dans les massifs des Écrins, de la Vanoise et du Mont-Blanc. La comparaison entre les clichés anciens et les orthophotos récentes (2022-2023) a permis de retracer les grandes tendances de cette évolution.

Les résultats montrent un recul généralisé de l'engagement avec près de la moitié des glaciers étudiés qui ont disparu et une perte de superficie dépassant 80 % pour beaucoup d'autres. Cette fonte ne se traduit pas seulement par une réduction des surfaces glaciaires : elle modifie aussi la structure des appareils avec une fragmentation des grands glaciers de vallée, de versant et de cirque-et-de-versant, l'apparition de tabliers de glace, la disparition des couloirs et la multiplication de néolacs. Si certains résultats relatifs à l'orientation et l'altitude semblent paradoxaux au regard des études existantes, en partie à cause des limites de l'échantillon et de la méthode, la tendance globale confirme la forte vulnérabilité des petits appareils glaciaires (tabliers, couloirs) et le caractère transitoire de certaines formes issues de la fragmentation.

L'intérêt de cette recherche tient dans l'usage d'un fonds photographique patrimonial n'ayant jamais été exploité pour ce type d'étude. Malgré des contraintes liées à la nature ancienne de ces supports, ce travail montre que des clichés anciens peuvent être une ressource pertinente et précieuse pour analyser les dynamiques glaciaires. Enfin, au-delà des aspects strictement glaciologiques, les résultats mettent en lumière des transformations paysagères majeures qui peuvent entraîner des répercussions sur les risques naturels, les usages de la montagne et les écosystèmes d'altitude.

Une suite logique à ce travail pourrait être de compléter ce type d'approche par des mesures de terrain afin d'enrichir les résultats déjà acquis de données physiques. Dans une perspective plus proche, des actions de médiation pourront être menées pour sensibiliser différents publics aux évolutions glaciaires et valoriser le fonds Helbronner grâce à un poster conçu dans un but de médiation. La publication prochaine d'un article dans la Revue de Géographie Alpine permettra également de partager les résultats de cette étude avec un public plus averti.

Bibliographie :

Allix, A. (1927). *Campagnes glaciologiques de 1920 et 1921 dans l'Oisans (face nord)*. *Études glaciologiques*, 6, 1-39. https://www.persee.fr/doc/etgla_0983-6500_1927_num_6_1_934

Arnaud, M., Mourey, J., Bourdeau, P., Bonet, R., & Ravanel, L. (2024). Impacts of climate change on mountaineering routes in the Écrins Massif (Western Alps, France) (T. révisée par C. Mole, Trad.). *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, 112(4). <https://doi.org/10.4000/12a6t>

Attaullah, H., Khan, A., Khan, M., Atta, H., & Iqbal, M. S. (2023). Implications of accuracy of global glacier inventories in hydrological modeling: A case study of the Western Himalayan mountain range. *Water*, 15(22), 4049. <https://doi.org/10.3390/w15223887>

Badino, F., Ravazzi, C., Vallè, F., Pini, R., ... Orombelli, G. (2018). 8800 years of high-altitude vegetation and climate history at the Rutor Glacier forefield, Italian Alps: Evidence of middle Holocene timberline rise and glacier contraction. *Quaternary Science Reviews*, 185, 41–68. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.01.022>

Barnett, T., Adam, J., & Lettenmaier, D. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>

Benn, D., & Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and glaciation* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203785010>

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, ... Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759-794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>

Berthier, E., & Vincent, C. (2012). Relative contribution of surface mass-balance and ice-flux changes to the accelerated thinning of Mer de Glace, French Alps, over 1979-2008. *Journal of Glaciology*, 58(209), 501–512. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J083>

Bodin, X., Krysiecki, J.-M., Schoeneich, P., Le Roux, O., ... Walpersdorf, A. (2017). The 2006 collapse of the Bérard rock glacier (southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), 209–223. <https://doi.org/10.1002/ppp.1887>

Bonfort, J.-P. (Éd.). (2006, avril). *Le monde n'est pas un panorama*. Bonfort. ISBN 2916390022 / 9782916390024

Bontemps, N., Larose, E., Chmiel, M., & Blanc, A. (2025). The June 2024 flooding of La Bérarde: Insights from seismic data and field observations (Nos. EGU25-6557). *EGU25. Copernicus Meetings*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-6557>

Bozzini, C., Conedera, M., & Krebs, P. (2012). A new monoplotting tool to extract georeferenced vector data and orthorectified raster data from oblique non-metric photographs. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(3), 499-518. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.1.3.499>

Brown, L. E., Hannah, D. M., & Milner, A. M. (2007). Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Global Change Biology*, 13(5), 958-966. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01341.x>

Cathala, M., Magnin, F., Linsbauer, A., & Haeberli, W. (2021). Modelling and characterizing glacier-bed over-deepenings as sites for potential future lakes in the deglaciating French Alps. *Géomorphologie: Relief, processus, environnement*, 27(1), Article 1. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15255>

Chueca, J., & Julian, A. (2004). Relationship between solar radiation and the development and morphology of

small cirque glaciers (Maladeta Mountain Massif, Central Pyrenees, Spain). *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 86(1), 81–89.

Cogley, J. G. (2009). A more complete version of the World Glacier Inventory. *Annals of Glaciology*, 50(53), 32–38. <https://doi.org/10.3189/172756410790595859>

Coutterand, S. (2018). *Atlas des Glaciers Disparus* (J. Jouzel, Préface). Guérin Éds.

Coutterand, S., Schoeneich, P., & Nicoud, G. (2009). Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : Glacier du Rhône ou/et glaciers savoyards ? *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 8, 11–22. <https://doi.org/10.3406/edyte.2009.1069>

Davis, P. T., Menounos, B., & Osborn, G. (2009). Holocene and latest Pleistocene alpine glacier fluctuations : A global perspective. *Quaternary Science Reviews*, 28(21-22), 2021-2033. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.05.020>

Diolaiuti, G., & Smiraglia, C. (2010). Changing glaciers in a changing climate: How vanishing geomorphosites have been driving deep changes in mountain landscapes and environments. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7882>

Ehlers, J., & Gibbard, P. L. (2007). The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quaternary International*, 164–165, 6–20. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.008>

Emmer, A., Vilímek, V., & Klimeš, J. (2014). Glacial lake outburst floods (GLOFs) database project. In *Landslide science for a safer geoenvironment* (pp. 107-111). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04999-1_10

Failletaz, J., & Funk, M. (2013). Instabilités glaciaires et prédition. *Mémoire de la Société vaudoise des sciences naturelles*, 25, 159–174. https://wp.unil.ch/risk/files/2013/11/13_Failletaz_MemSVSN2013_C_Li.pdf

Failletaz, J., Funk, M., & Sornette, D. (2011). Prediction of alpine glacier sliding instabilities: A new hope (No. arXiv:1201.1189). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.1189>

Florinsky, I. (2012). *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Elsevier / Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65718-X>

Freudiger, D., Mennekes, D., Seibert, J., & Weiler, M. (2018). Historical glacier outlines from digitized topographic maps of the Swiss Alps. *Earth System Science Data*, 10(2), 805-814. <https://doi.org/10.5194/essd-10-805-2018>

Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J.-P., & Deline, P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*, 120, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.004>

Garimoldi, G., & Ginouvès, V. (1995). La photographie et la découverte de la montagne par l'alpinisme. <https://doi.org/10.3406/mar.1995.1567>

Galluccio, A., & Scotti, R. (2022). Storia recente del ghiacciaio di Scerscen (Bernina italiano). *Rivista Glaciologica Italiana*, 40(2), 71–80.

Gilbert, A., Vincent, C., Gagliardini, O., Krug, J., & Berthier, E. (2015). Assessment of thermal change in cold avalanching glaciers in relation to climate warming. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6382-6390. <https://doi.org/10.1002/2015GL064838>

Godwin, H. (1962). Half-life of Radiocarbon. *Nature*, 195(4840), 984. <https://doi.org/10.1038/195984a0>

Granshaw, F. D., & Fountain, A. G. (2006). Glacier change (1958–1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA. *Journal of Glaciology*, 52(177), 251–256.

<https://doi.org/10.3189/172756506781828782>

Guichonnet, P. (1950). La catastrophe du Glacier du Tour. *Revue de géographie alpine*, 38(2), 391-408.
<https://doi.org/10.3406/rga.1950.4063>

Guillet, G., & Ravanel, L. (2020). Variations in surface area of six ice aprons in the Mont-Blanc massif since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology*, 66(259), 777–789. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.46>

Haeberli, W., Linsbauer, A., Cochachin, A., Salazar, C., & Fischer, U. H. (2016). On the morphological characteristics of overdeepenings in high-mountain glacier beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(13), 1980–1990. <https://doi.org/10.1002/esp.3966>

Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., ... Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5(5), 418-435. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>

Huss, M., & Fischer, M. (2016). Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change. *Frontiers in Earth Science*, 4, Article 34. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034>

Henry, J.-B., Grussenmeyer, P., Malet, J.-P., & Maquaire, O. (2001). Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze. *Revue de l'Association Française de Topographie*, (87), 42–50.

Holzhauser, H., Magny, M., & Zumbuuhl, H. (2005). Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15, 789-801. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl853ra>

Huss, M., & Hock, R. (2018a). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135-140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>

Huss, M., & Hock, R. (2018b). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135-140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>

Ilyashuk, E., Heiri, O., Ilyashuk, B., Koinig, K., & Psenner, R. (2019). The Little Ice Age signature in a 700-year high-resolution chironomid record of summer temperatures in the Central Eastern Alps. *Climate Dynamics*, 52(1), 401-417. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4555-y>

Imbrie, J., Boyle, E. A., Clemens, S. C., Duffy, A., Howard, W. R., ... Toggweiler, J. R. (1992). On the structure and origin of major glaciation cycles: 1. Linear responses to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*, 7(6), 701-738. <https://doi.org/10.1029/92PA02253>

Iturriaga, L. (2011). Glacier lake outburst floods. In *Encyclopedia of snow, ice and glaciers* (pp. 381-399). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_196

Jacob, C. (1927). Observations glaciologiques exécutées en Oisans pendant l'été 1911 pour le compte du Service de l'Hydraulique et des Améliorations agricoles au Ministère de l'Agriculture. *Études glaciologiques*, 6, 1-20. https://www.persee.fr/doc/etgla_0983-6500_1927_num_6_1_925

Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K. R., Duplessy, J.-C., ... Zhang, D. (2007). Palaeoclimate. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 434–497). Cambridge University Press. https://www.giss.nasa.gov/pubs/docs/2007/2007_Jansen_ja05100g.pdf

Jiskoot, H., & Mueller, M. S. (2012). Glacier fragmentation effects on surface energy balance and runoff: Field measurements and distributed modelling. *Hydrological Processes*, 26(12), 1861–1875. <https://doi.org/10.1002/hyp.9288>

Joerin, U. E., Stocker, T. F., & Schlüchter, C. (2006). Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the

Holocene. *The Holocene*, 16(5), 697-704. <https://doi.org/10.1191/0959683606hl964rp>

Kaufman, D. S., Ager, T. A., Anderson, N. J., Anderson, P. M., ... Wolfe, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W). *Quaternary Science Reviews*, 23(5), 529–560. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.09.007>

Kaushik, S., Ravanel, L., Magnin, F., Trouvé, E., & Yan, Y. (2022). Ice aprons in the Mont Blanc Massif (Western European Alps): Topographic characteristics and relations with glaciers and other types of perennial surface ice features. *Remote Sensing*, 14(21), 5557. <https://doi.org/10.3390/rs14215557>

Léon, D. (2015, 25 novembre). *[Les Alpes d'Helbronner, mesures et démesure]*. Glénat. Collection Beaux Livres Montagne. ISBN 9782344010693

Leger, T. P. M., Jouvet, G., Kamleitner, S., Mey, J., Herman, F., Finley, B. D., Ivy-Ochs, S., Vieli, A., Henz, A., & Nussbaumer, S. U. (2025a). A data-consistent model of the last glaciation in the Alps achieved with physics-driven AI. *Nature Communications*, 16(1), 848. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56168-3>

Le Roy, M., Deline, P., Carcaillet, J., Schimmelpfennig, I., & Ermini, M. (2017a). ¹⁰Be exposure dating of the timing of Neoglacial glacier advances in the Ecrins-Pelvoux massif, southern French Alps. *Quaternary Science Reviews*, 178, 118–138. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.010>

Le Roy, M., & Deline, P. (2009). Étude des fluctuations glaciaires du Petit Âge de Glace dans le Massif des Écrins: Apports de la lichénométrie. *Géographie physique et Quaternaire*, 63(1), 31-44. <https://doi.org/10.3406/edYTE.2009.1072>

Le Roy, M., Nicolussi, K., Deline, P., Astrade, L., Edouard, J.-L., Miramont, C., & Arnaud, F. (2015a). Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: The Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quaternary Science Reviews*, 108, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.033>

Le Roy, M., Nicolussi, K., Deline, P., Astrade, L., Edouard, J.-L., Miramont, C., & Arnaud, F. (2015b). Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: The Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quaternary Science Reviews*, 108, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.033>

Linsbauer, A., Fischer, M., & Paul, F. (2021). The New Swiss Glacier Inventory SGI2016: From a topographical to a glaciological dataset. *Frontiers in Earth Science*, 9, 704189. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.704189>

Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20(1), PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>

Losapio, G., Cerabolini, B. E. L., Maffioletti, C., Tampucci, D., Gobbi, M., & Caccianiga, M. (2021). The consequences of glacier retreat are uneven between plant species. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 616562. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.616562>

Mann, M. (2002). Little Ice Age. In *Encyclopedia of Global Environmental Change* (Vol. 1, p. 504-509). Wiley.

Mannerfelt, E. S., Dehecq, A., Hugonnet, R., Hodel, E., Huss, M., Bauder, A., & Farinotti, D. (2022). Halving of Swiss glacier volume since 1931 observed from terrestrial image photogrammetry. *The Cryosphere*, 16(8), 3249-3268. <https://doi.org/10.5194/tc-16-3249-2022>

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... Zhou, B. (Eds.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

McKeon, L. A., Fagre, D. B., & Peitzsch, E. H. (2021). *Glaciers of Glacier National Park repeat photography collection* [Data set]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9CQDA7S>

Mölg, N., Huggel, C., Herold, T., Storck, F., ... Odermatt, D. (2021). Inventory and evolution of glacial lakes since the Little Ice Age: Lessons from the case of Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(13), 2551–2564. <https://doi.org/10.1002/esp.5193>

Mourey, J., & Ravanel, L. (2017). Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France). *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, 105(4). <https://doi.org/10.4000/rga.3780>

Muglia, J., Mulitza, S., Repschläger, J., Schmittner, A., ... Zhao, N. (2023). A global synthesis of high-resolution stable isotope data from benthic foraminifera of the last deglaciation. *Scientific Data*, 10(1), 131. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02024-2>

Nicolussi, K., Le Roy, M., Schlüchter, C., Stoffel, M., & Wacker, L. (2022). The glacier advance at the onset of the Little Ice Age in the Alps: New evidence from Mont Miné and Morteratsch glaciers. *The Holocene*, 32(7), 624–638. <https://doi.org/10.1177/09596836221088247>

Nussbaumer, S. U., & Zumbühl, H. J. (2012). The Little Ice Age history of the Glacier des Bossons (Mont Blanc massif, France): A new high-resolution glacier length curve based on historical documents. *Climatic Change*, 111(2), 301-334. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0130-9>

Parrenin, F., & Paillard, D. (2012). Terminations VI and VIII (~530 and ~720 kyr BP) tell us the importance of obliquity and precession in the triggering of deglaciations. *Climate of the Past*, 8(6), 2031-2037. <https://doi.org/10.5194/cp-8-2031-2012>

Paul, F., Frey, H., & Le Bris, R. (2011). A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results. *Annals of Glaciology*, 52(59), 144-152. <https://doi.org/10.3189/172756411799096295>

Paul, F., & Haeberli, W. (2008). Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models. *Geophysical Research Letters*, 35(21). <https://doi.org/10.1029/2008GL034718>

Pelfini, M., & Smiraglia, C. (1992). Recent fluctuations of glaciers in Valtellina (Italian Alps) and climatic variations. *Journal of Glaciology*, 38(129), 309–313. <https://doi.org/10.3189/S0022143000003725>

Pradhananga, D., & Pomeroy, J. W. (2022). Recent hydrological response of glaciers in the Canadian Rockies to changing climate and glacier configuration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(10), 2605-2616. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2605-2022>

Protin, M. (2019). *Études des fluctuations glaciaires dans le massif du Mont-Blanc depuis la fin du Dryas Récent à partir des nucléides cosmogéniques in situ* [Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université]. Géochimie. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02301654>

Racoviteanu, A. E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S. J. S., & Armstrong, R. (2009). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements

Railsback, L., Gibbard, P., Head, M., Voarintsoa, N. R., & Toucanne, S. (2015). An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quaternary Science Reviews*, 111, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.012>

Raup, B., Racoviteanu, A., Khalsa, S. J. S., Helm, C., Armstrong, R., & Arnaud, Y. (2007). The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*, 56(1), 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.018>

Ravanel, L. (2009). Évolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 8, 113–124. <https://doi.org/10.3406/edyte.2009.1078>

Ravanel, L., & Deline, P. (2008). La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc) : évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du petit âge glaciaire. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 14(4), 261–272. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7444>

Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., ... Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

Reinthalter, J., & Paul, F. (2025). Reconstructed glacier area and volume changes in the European Alps since the Little Ice Age. *The Cryosphere*, 19(2), 753–767. <https://doi.org/10.5194/tc-19-753-2025>

Romshoo, B., & Tropos, D. (2022). Importance of size representation and morphology in modelling optical properties of black carbon: Comparison between laboratory measurements and model simulations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(23), 6965–6989. <https://doi.org/10.5194/amt-15-6965-2022>

Salim, E. (2023). Glacier tourism without ice: Envisioning future adaptations in a melting world. *Frontiers in Human Dynamics*, 5, 1137551. <https://doi.org/10.3389/fhmd.2023.1137551>

Scaioni, M., Barazzetti, L., Corti, M., Crippa, J., ... Diolaiuti, G. A. (2018). Integration of terrestrial and UAV photogrammetry for the assessment of collapse risk in alpine glaciers. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W4, 445–452. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-445-2018>

Schneider von Deimling, T., Rahmstorf, S., & Ganopolski, A. (2006). How cold was the Last Glacial Maximum? *Geophysical Research Letters*, 33(14), L14709. <https://doi.org/10.1029/2006GL026484>

Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Watson, C. S., ... Strattman, K. (2020). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 10(10), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>

Tennant, C., Menounos, B., Wheate, R., & Clague, J. J. (2012). Area change of glaciers in the Canadian Rocky Mountains, 1919 to 2006. *The Cryosphere*, 6(6), 1541–1552. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1541-2012>

Vivian, R., & Bocquet, G. (1973). Les grands groupes glaciaires: Les glaciers de la Vanoise. *Revue de géographie alpine*, 61(1), 5–52. <https://doi.org/10.3406/rga.1973.1329>

Worni, R., Huggel, C., Clague, J. J., Schaub, Y., & Stoffel, M. (2014). Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. *Geomorphology*, 224, 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.031>

Zasadni, J. (2007). The Little Ice Age in the Alps: Its record in glacial deposits and rock glacier formation. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 41, 117–137. https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiH-GiW/sgcb/sgcb_41/sgcb_41_07.pdf

Zanoni, M. G., Stella, E., & Bellin, A. (2023). Long-term hydrological behavior of an Alpine glacier. *Journal of Hydrology*, 626, 130316. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130316>

Zemp, M., Roer, I., Kääb, A., Hoelzle, M., Paul, F., & Haeberli, W. (2008). *Global glacier changes: Facts and figures*. World Glacier Monitoring Service. <https://doi.org/10.5167/uzh-4173>

Sitographie

Association Paul Helbronner. (2024). *Site officiel*. <http://www.helbronner.org/>

Communauté de communes de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc. (2025). *Natura 2015*. <https://www.ccvalledechamonixmontblanc.fr/wp-content/uploads/sites/2/2025/03/natura-2015.pdf>

CREA Mont-Blanc. (s.d.). *Atlas Mont-Blanc*. <https://atlas.creamontblanc.org/>

Données des Alpes. (s. d.). Service d'observation GLACIOCLIM. Consulté le 14 juillet 2025, sur <https://glacioclim.osug.fr/Donnees-des-Alpes>

Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Auvergne-Rhône-Alpes. (2012). *Massif du Mont-Blanc* [PDF]. https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/massif_du_mont-blanc_arrete_ou_decret_de_classement.pdf

EDYTEM. (2025). *Équipes*. Université Savoie Mont Blanc / CNRS. <https://edytem.osug.fr/-equipes->

EDYTEM. (2025). *Organigramme*. Université Savoie Mont Blanc / CNRS. <https://edytem.osug.fr/-organigramme->

Funivie Monte Bianco S.p.A. (s.d.). *Skyway Monte Bianco*. <https://www.montebianco.com/fr>

Le Parc national de la Vanoise. (s. d.). Consulté le 14 août 2025, sur <https://www.ofb.gouv.fr/les-parcs-nationaux-de-france/le-parc-national-de-la-vanoise>

Mairie de Chamonix-Mont-Blanc. (s.d.). *Le Massif du Mont-Blanc*. <https://www.chamonix.fr/la-commune/le-territoire/patrimoine-naturel/le-massif-du-mont-blanc/>

NASA. (2020, 27 février). *Cycles de Milankovitch (orbitaux) et leur rôle dans le climat terrestre*. <https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>

Observatoire de la Côte d'Azur, Service bibliothèque. (2024, avril). *Description géométrique détaillée des Alpes françaises / Paul Helbronner (1935-1939)* [Livre de présentation, PDF]. Observatoire de la Côte d'Azur. https://www.oca.eu/images/OCA/FR/BIB_fichiers/BIBNUM-EXTERNE/EXPO-LIVRET3-DESCRIPTION-GOMETRIQUE-ALPES-FRANCAISES.pdf

Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble. (2025). *GLACIOCLIM – Les GLACiers, un Observatoire du CLIMat*. <https://www.osug.fr/missions/observation/ocean-atmosphere-surfaces-continentales/glacioclim/>

Parc national des Écrins. (2025). *Biodiv'Écrins : Atlas de la faune et de la flore*. <https://biodiversite.ecrins-parcnational.fr/>

Parcs nationaux de France. (2012). *Alpages et estives dans les parcs nationaux métropolitains de montagne*. https://www.ecrins-parcnational.fr/sites/ecrins-parcnational.com/files/fiche_doc/12077/2012-estives-parcs-nationaux.pdf

Préfecture de la Haute-Savoie. (2020, 1er octobre). *Arrêté préfectoral n° 2020-066 portant désignation de la zone de protection des habitats naturels du Mont-Blanc (APHN-ARP-SIGNE)*. <https://www.haute-savoie.gouv.fr/contenu/telechargement/34279/202066/file/APHN-ARP-SIGNE.pdf>

Réserve Naturelle de France. (s.d.). *Réserve naturelle des Aiguilles Rouges*. <https://reserves-naturelles.org/reserves/aiguilles-rouges/>

Réerves Naturelles de France. (s.d.). *Réserve naturelle des Contamines-Montjoie*. <https://reserves-naturelles.org/reserves/contamines-montjoie/>

RGI 7.0 Consortium. (2023). *Randolph Glacier Inventory – A dataset of global glacier outlines, version 7.0*. National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.5067/f6jmovy5navz>

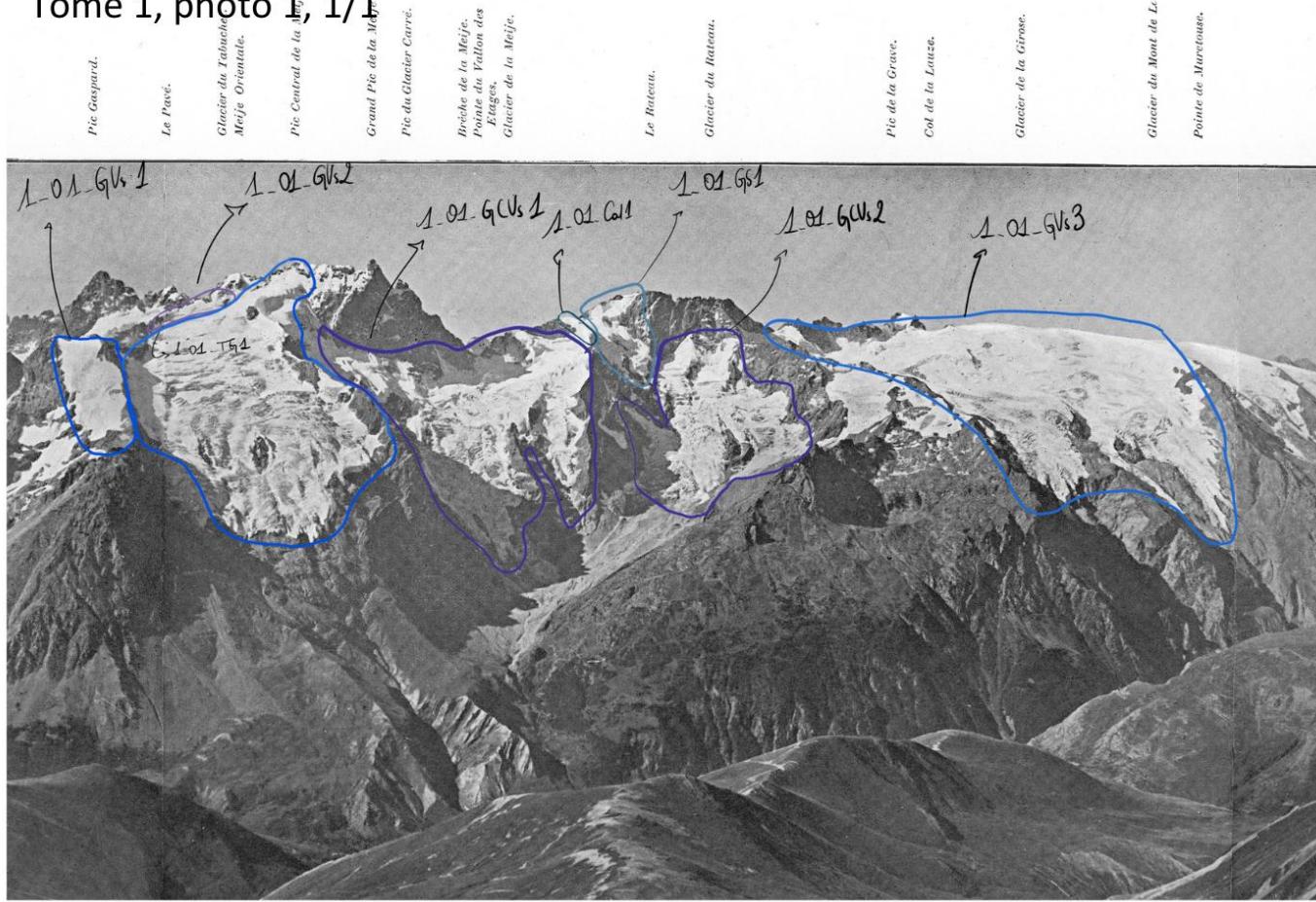
Van Velzen, S. (2024, mai). *Les Alpes cartographiées : L'œuvre incommensurable de Paul Helbronner*. Bergen Magazine. https://www.helbronner.org/IMG/pdf/Bergen_magazine-Mai_2024-français_comprimé_cle8a849e.pdf

World Glacier Monitoring Service (WGMS). (2019). *WGMS Attribute Description (Version 1.0)*. https://wgms.ch/downloads/WGMS_AttributeDescription.pdf

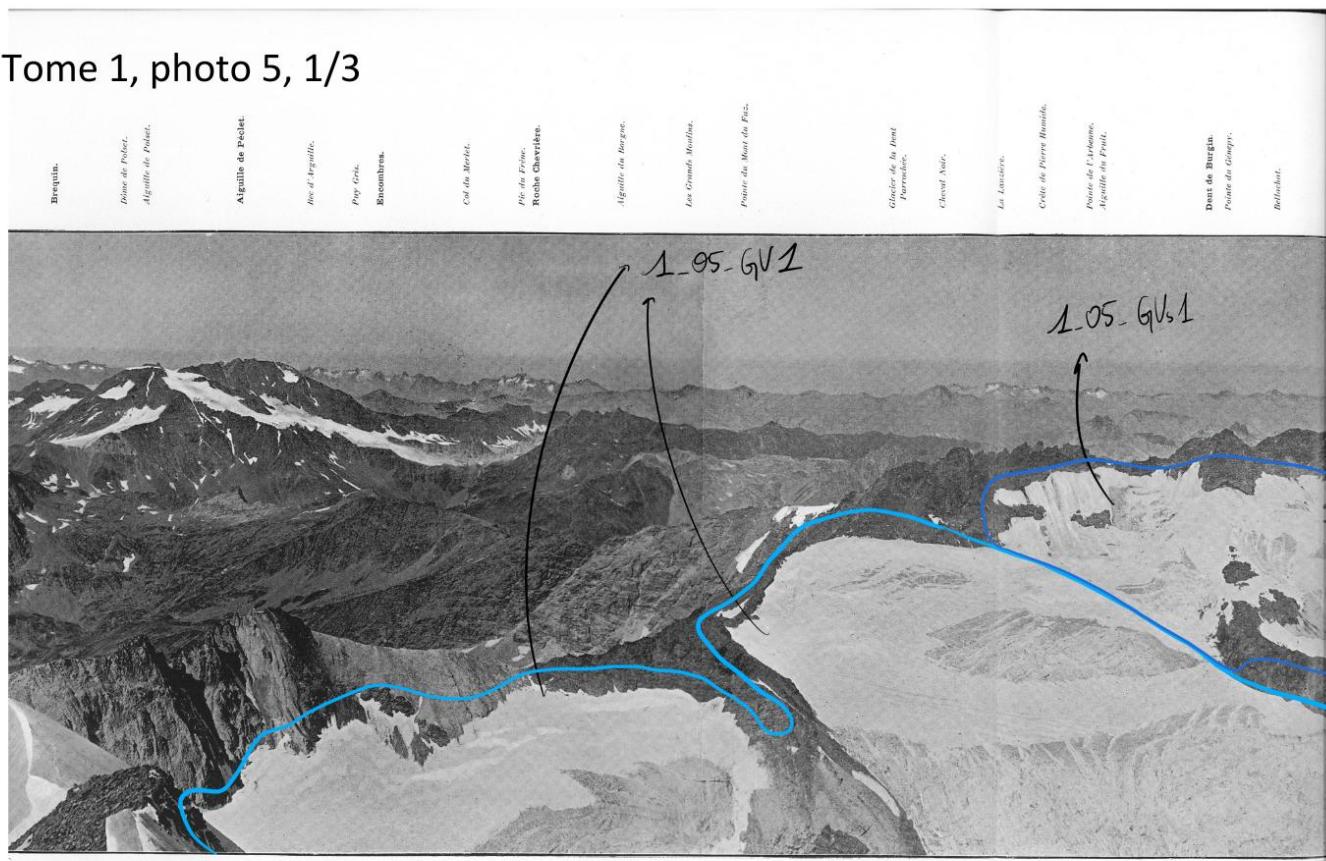
Annexe 1

Corpus des 12 panoramas de Paul Helbronner sélectionnés pour cette étude annotés
(typologie et codes d'identification pour chaque appareil glaciaire)

Tome 1, photo 1, 1/1

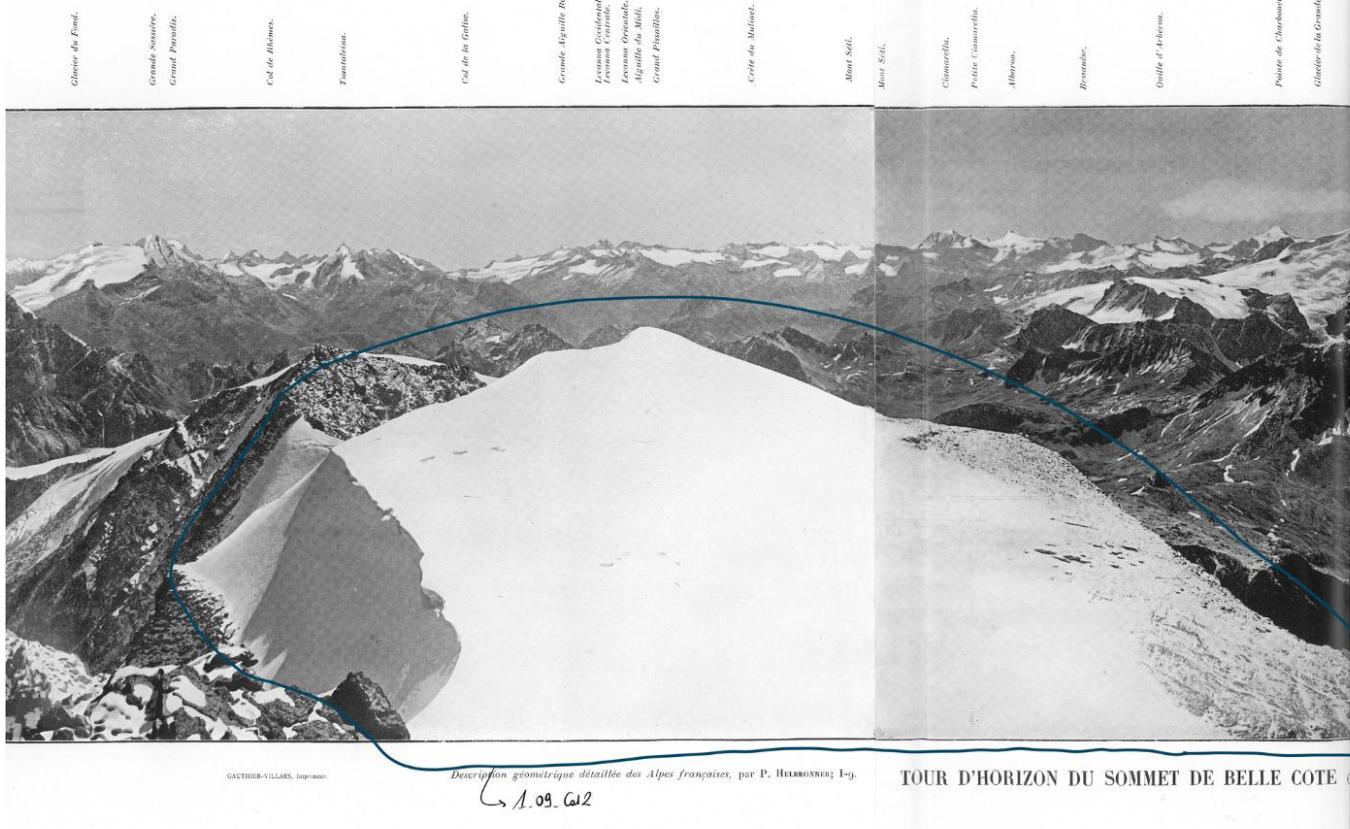


Tome 1, photo 5, 1/3

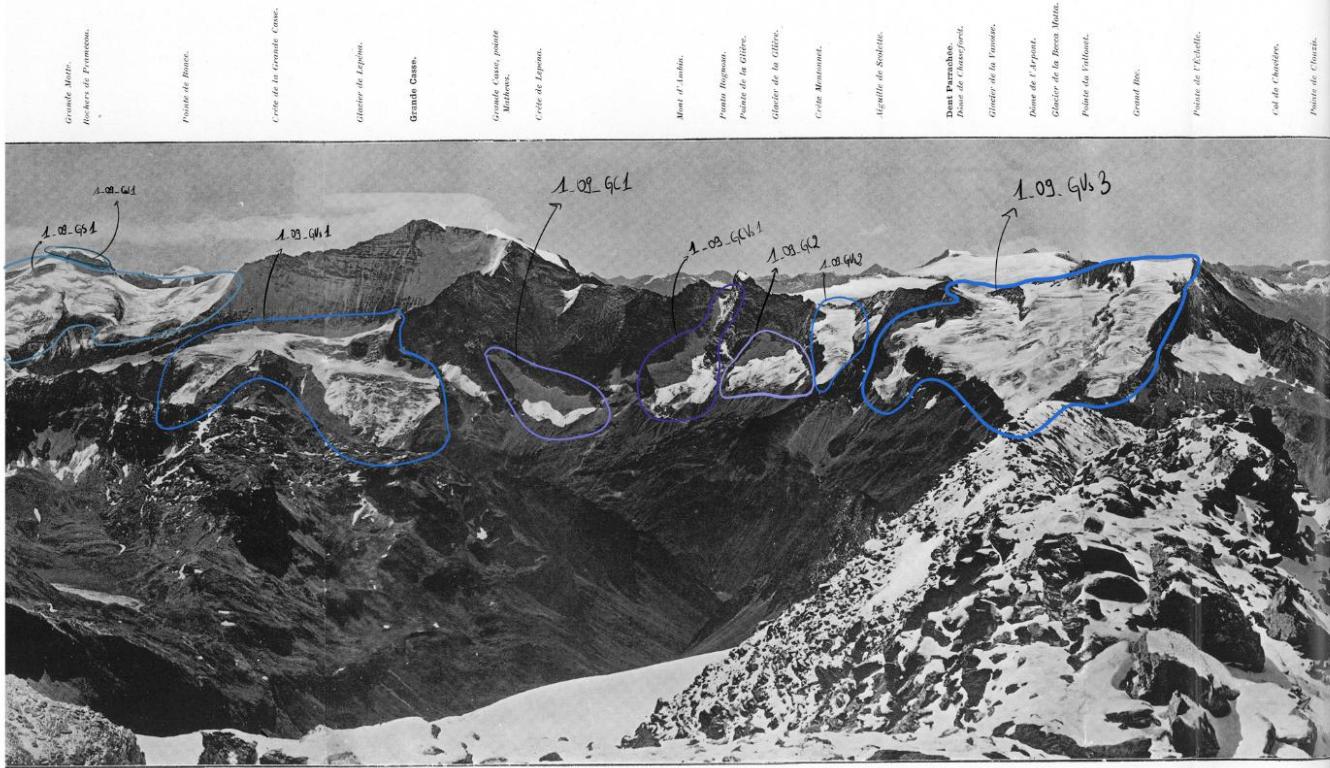


ORIZON DU SOMMET DE LA DENT PARRACHÉE (3711 E. M.).

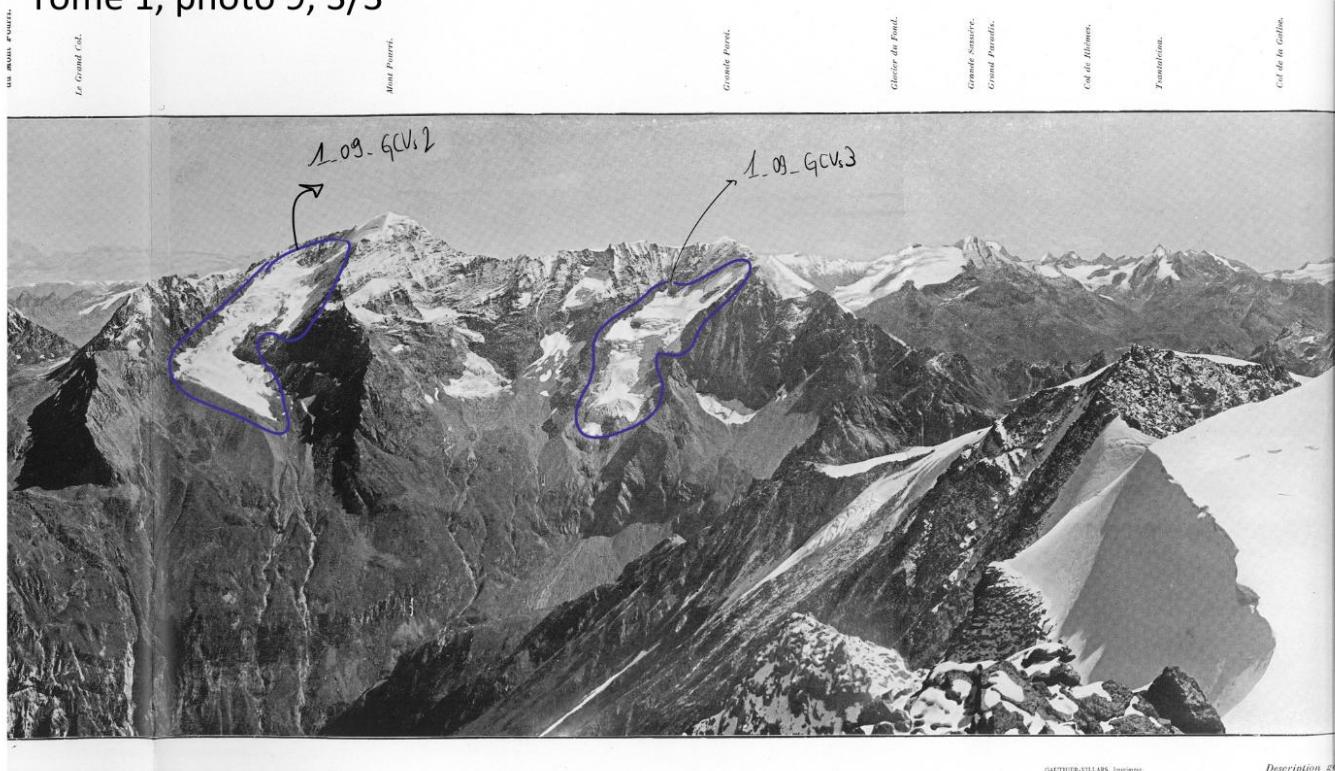
Tome 1, photo 9, 1/3



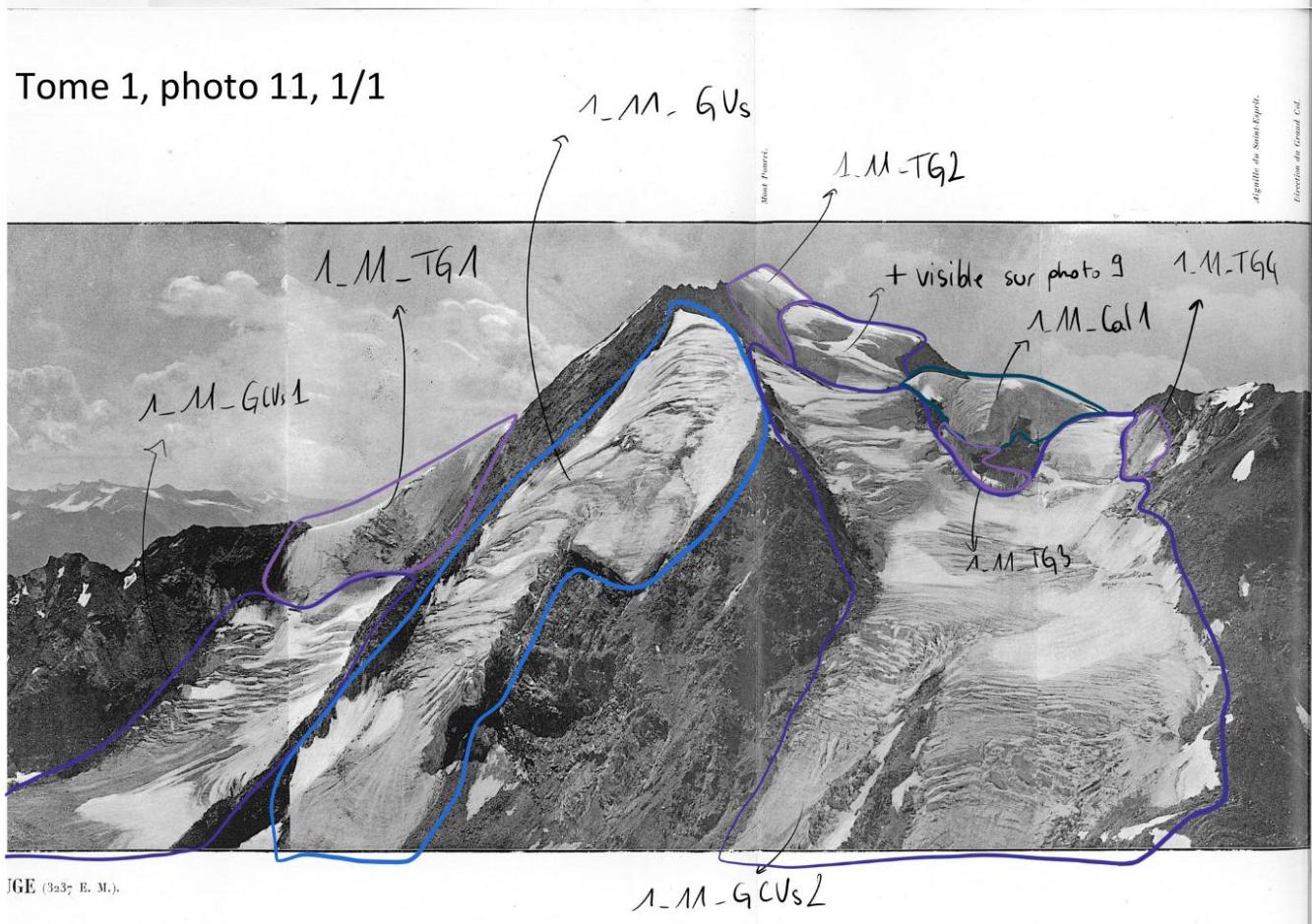
Tome 1, photo 9, 2/3



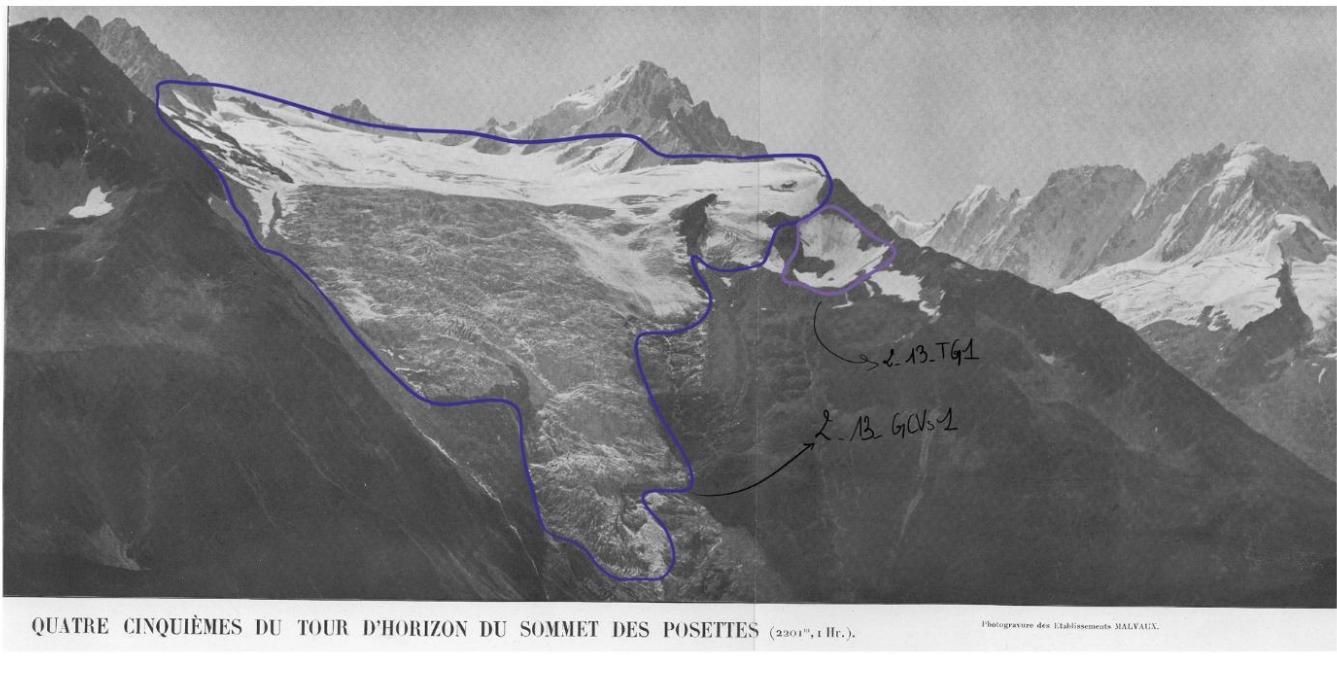
Tome 1, photo 9, 3/3



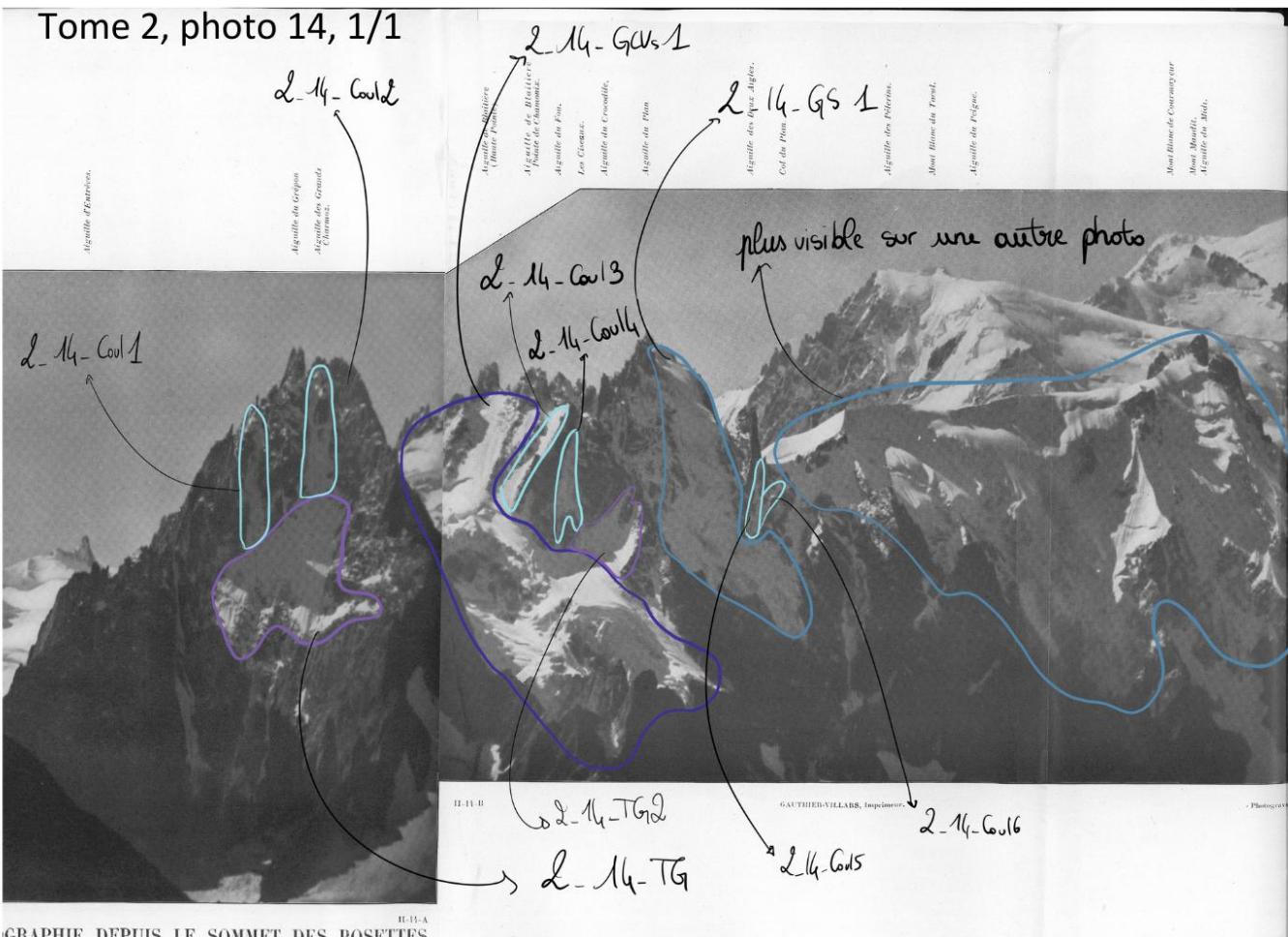
Tome 1, photo 11, 1/1



Tome 2, photo 13, 1/1



Tome 2, photo 14, 1/1



Tome 1, photo 15, 1/2

Glacier du Tour.

Glacier d'Argentière.

Aiguille du Tour.

Aiguille du Tour.

Col du Tour.

Aiguille du Chardonnet.

Glacier de Lognan.

Aiguille d'Argentière.

Glacier des Grands

Montets.

Mer de Glace.

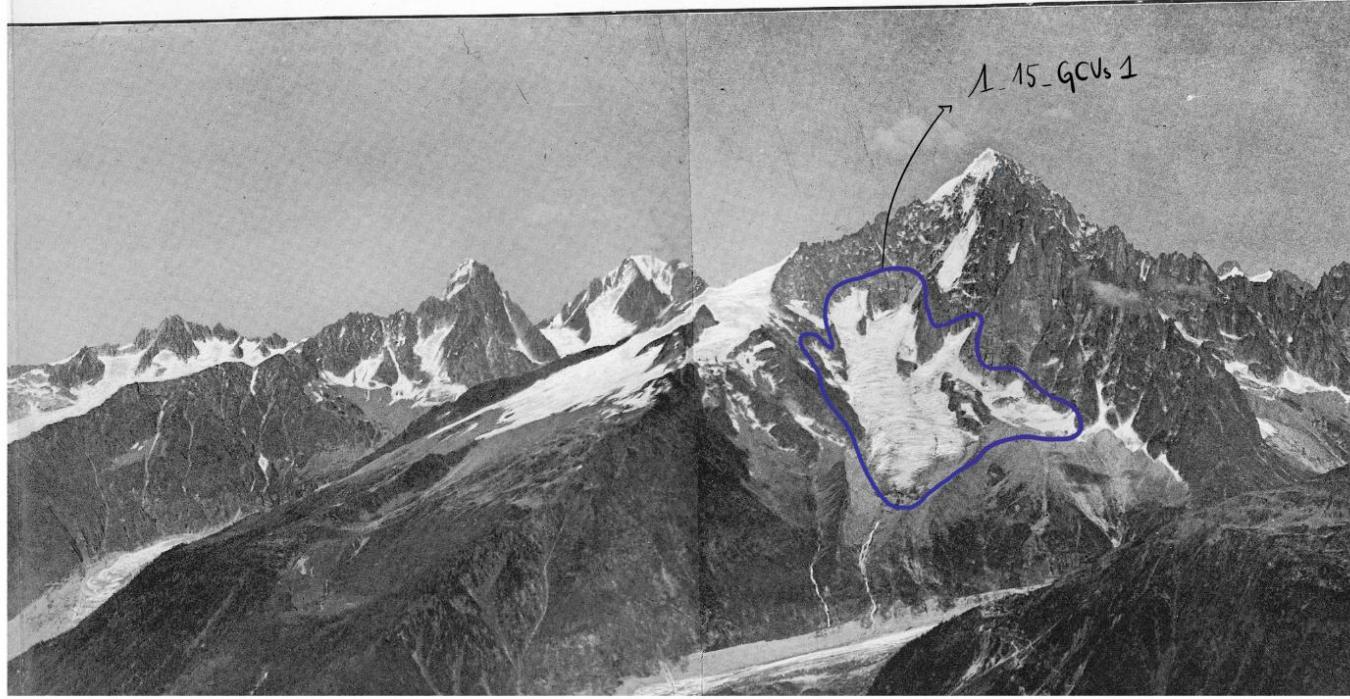
Glacier du Mont Blanc.

Aiguille Verte.

Montanvert.

Aiguille du Triod.

Aiguille du Moine.



Tome 1, photo 15, 1/2

Glacier des Sautillans.

Col des Sautillans.

Grandes Jorasses.

Aiguille de Blatière.

Glacier de Blatière.

Aiguille des Plan.

Col du Plan.

Aiguille des Pâquerets.

1-15-GS1

Aiguille des Mâts.

1-15-GS2

Glacier Rival.

Col du Mât.

Mont Blanc du Tacul.

1-15-GVs 6

Mont Maudit.

Grands Mâts.

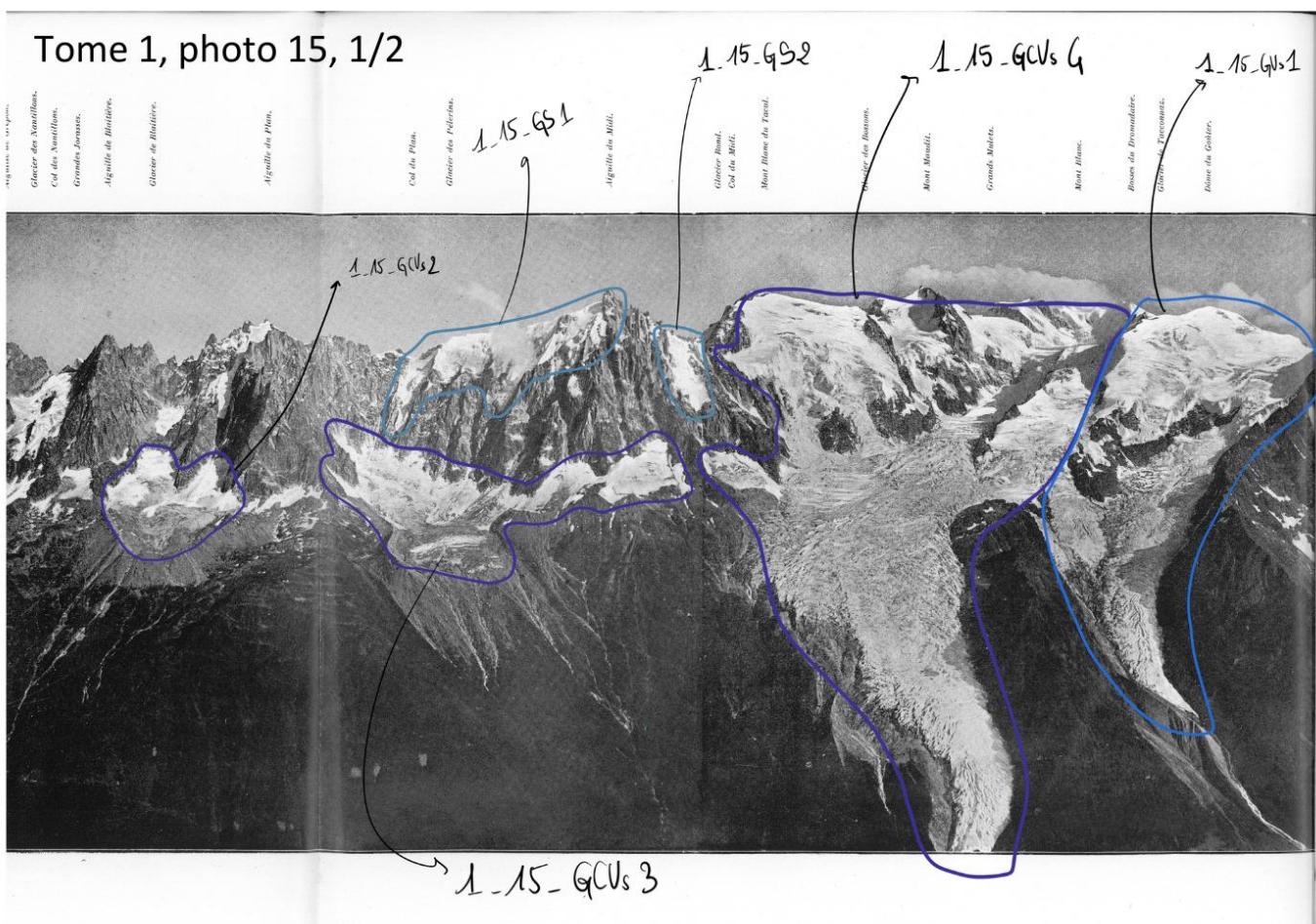
Mont Blanc.

Envers des Diomèdes.

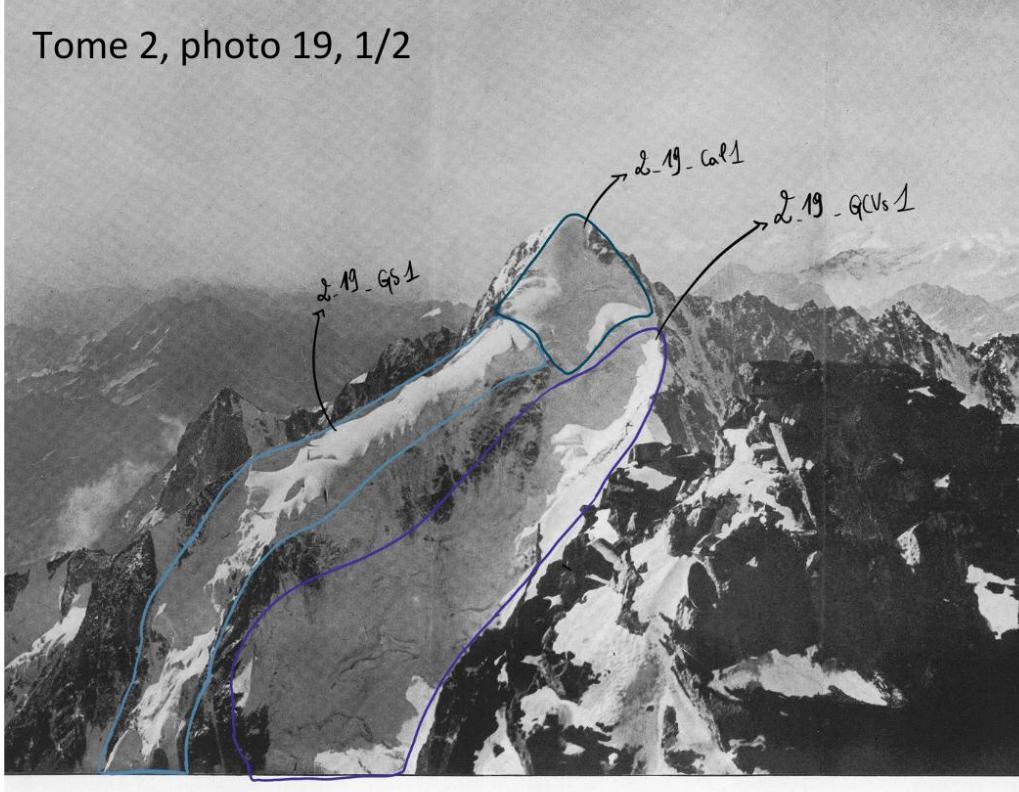
Glaciers des Envers.

1-15-GVs 1

Envers des Gaillands.

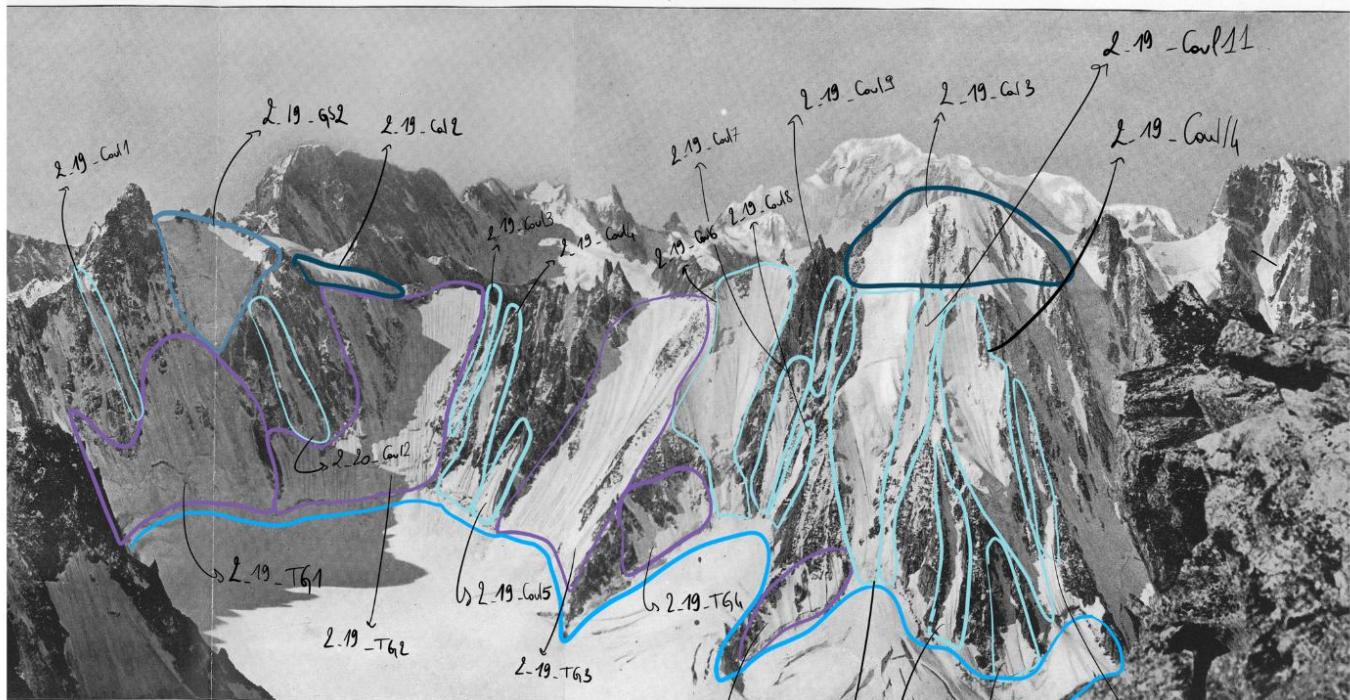


Tome 2, photo 19, 1/2



JR D'HORIZON DU SOMMET DU TOUR NOIR (3837^m, 3 Hr.)

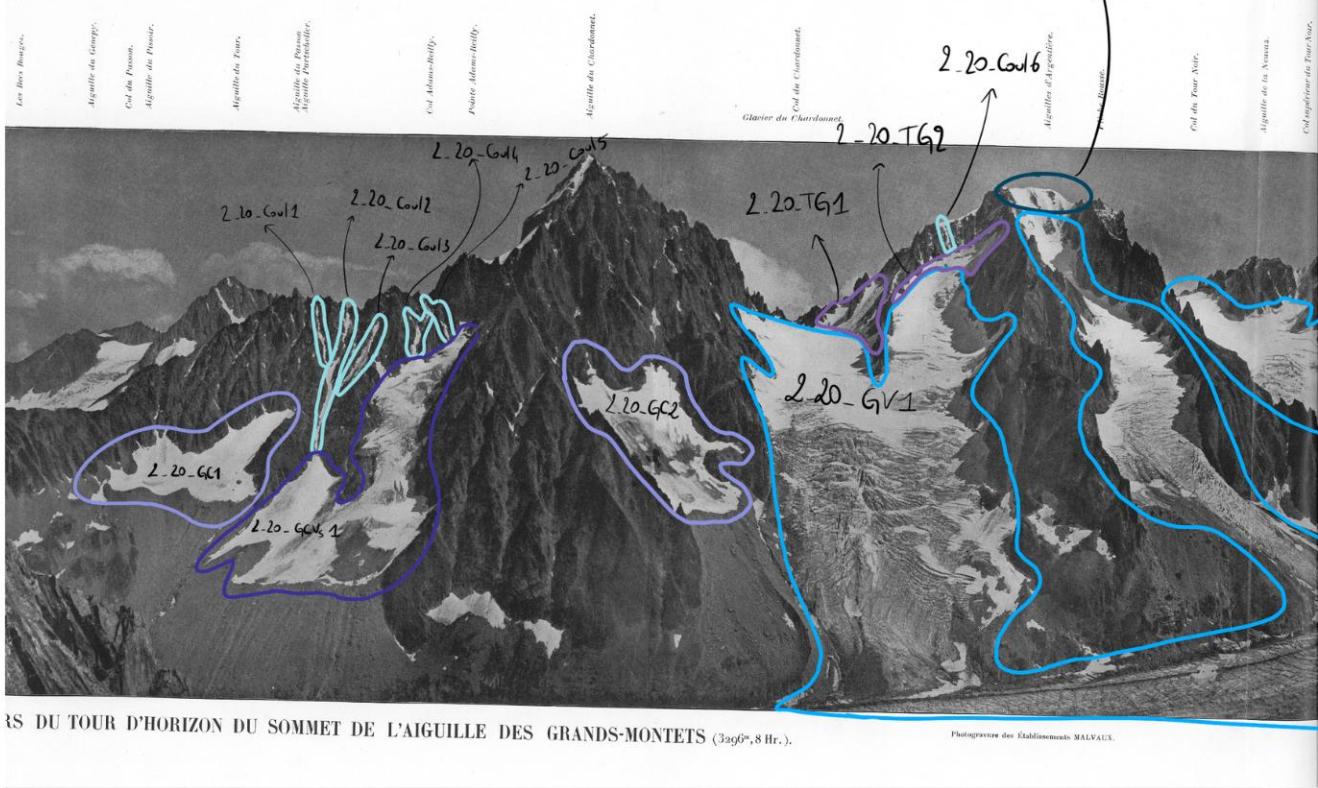
Tome 2, photo 19, 2/2



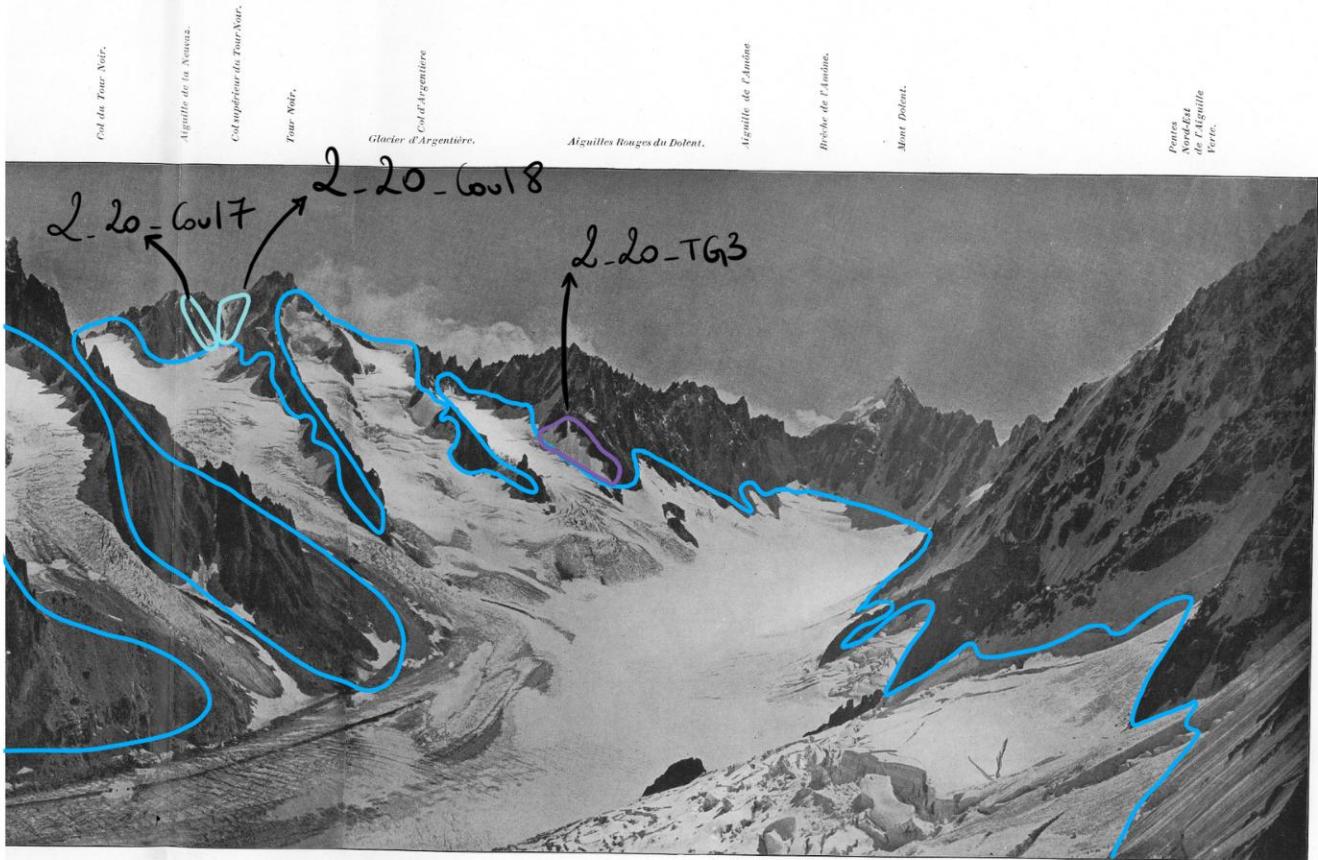
GAUTHIER-VILLARS, Imprimeurs.

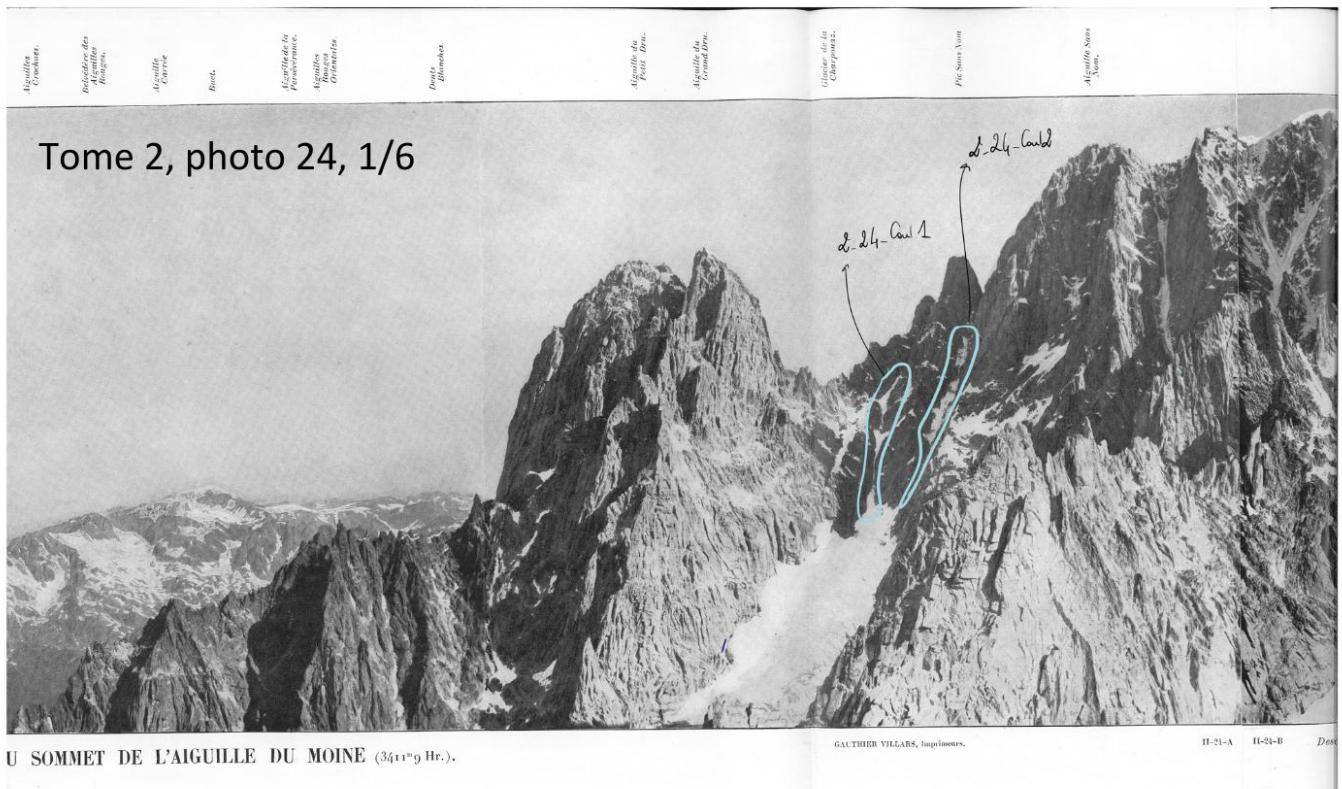
L-19-Coul10 Description géométrique détaillée des Alpes françaises, par P. HELBRONNE
L-19-TG6 L-19-Coul12 L-19-Coul13 L-19-Coul15

Tome 2, photo 20, 1/2

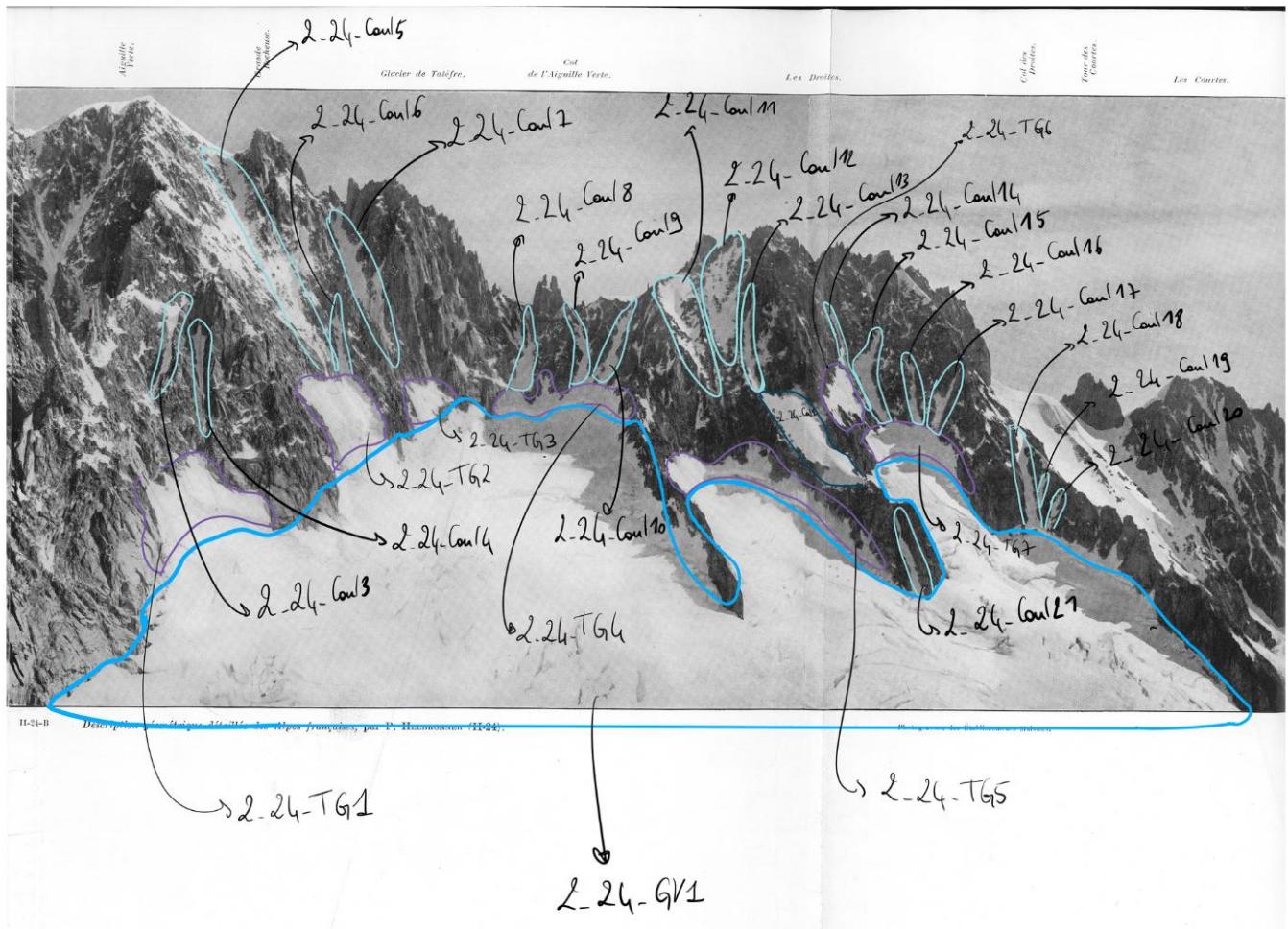


Tome 2, photo 20, 2/2

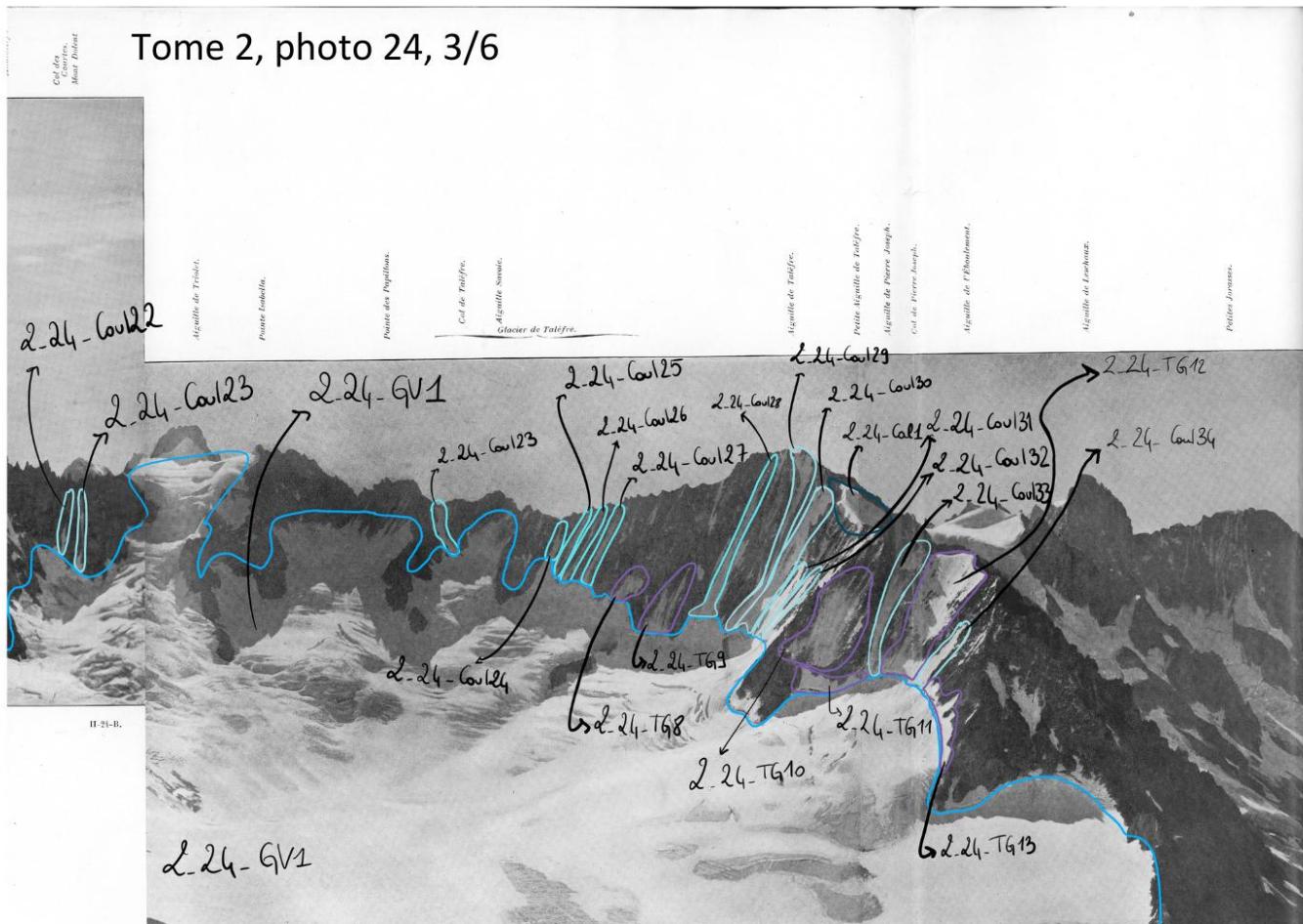




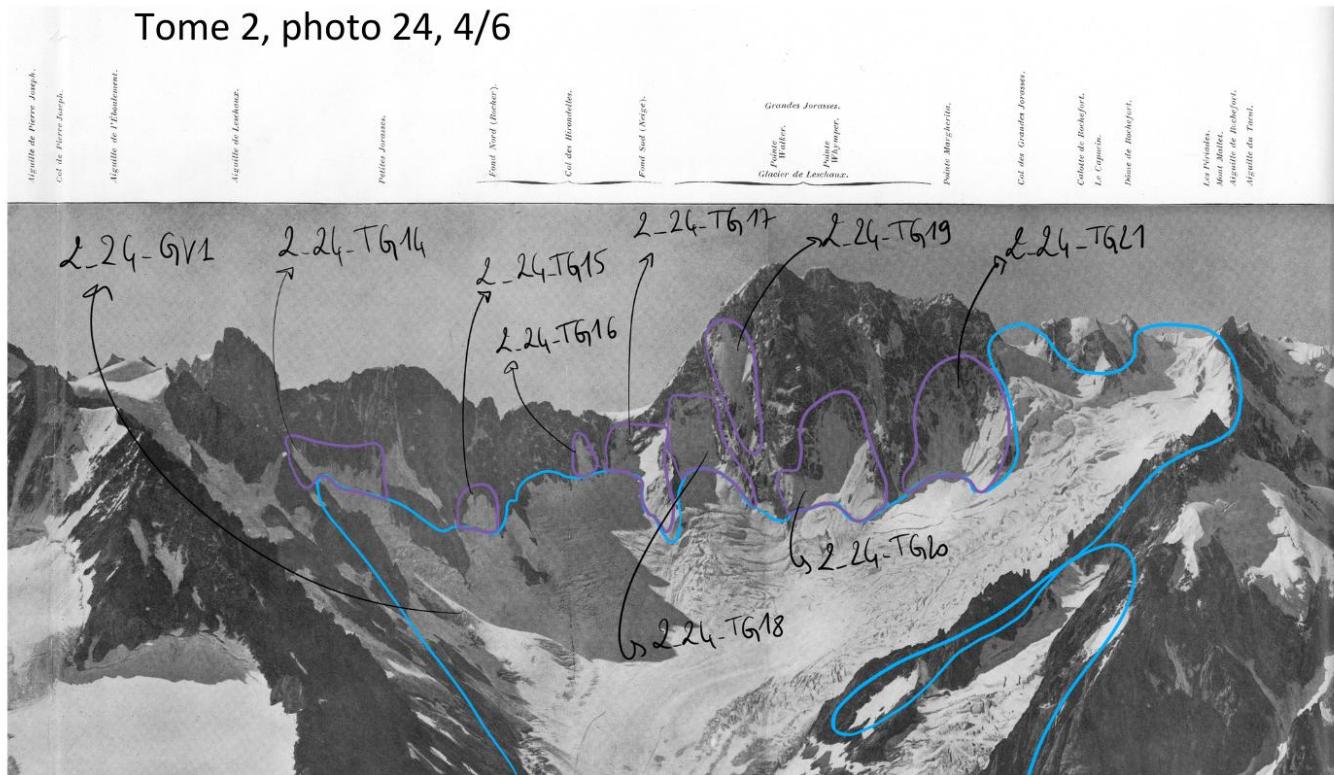
Tome 2, photo 24, 2/6



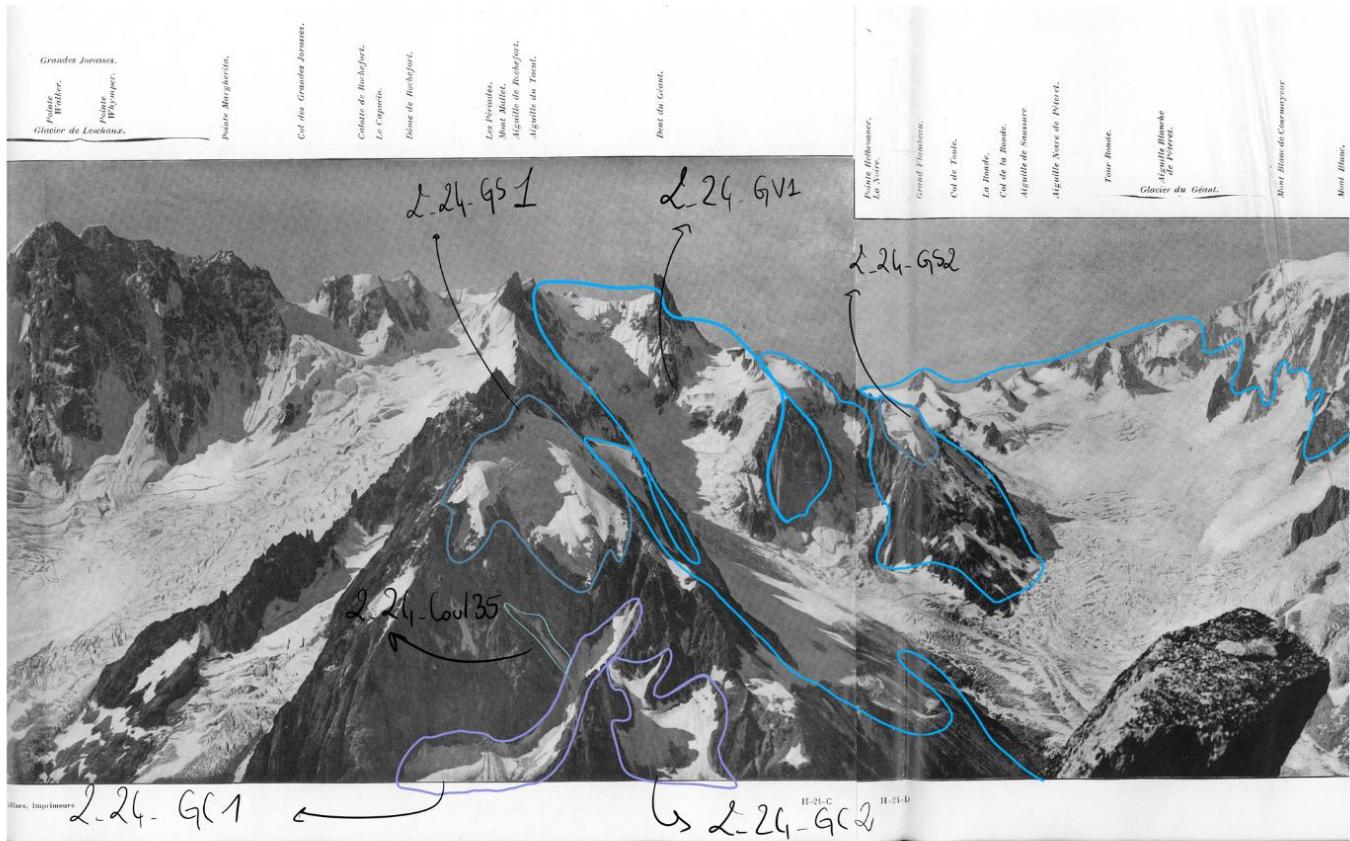
Tome 2, photo 24, 3/6



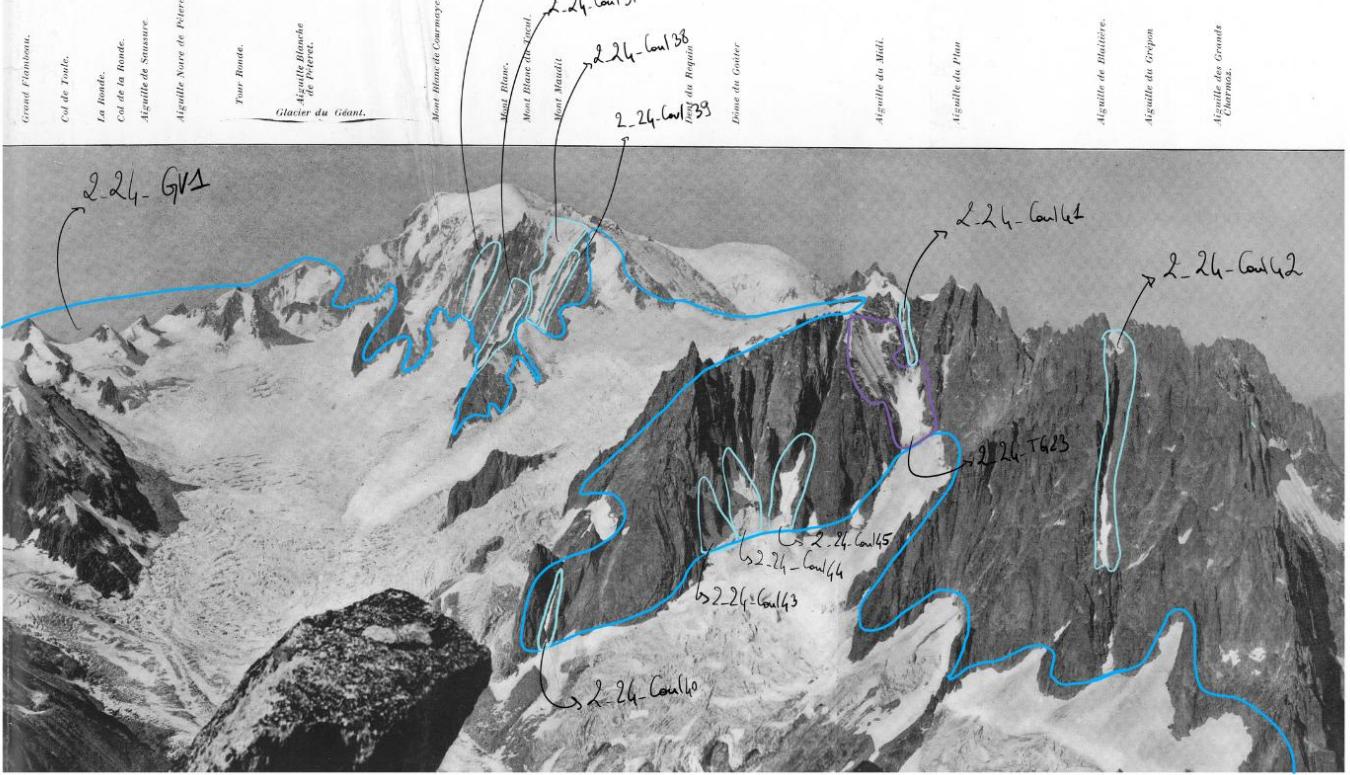
Tome 2, photo 24, 4/6

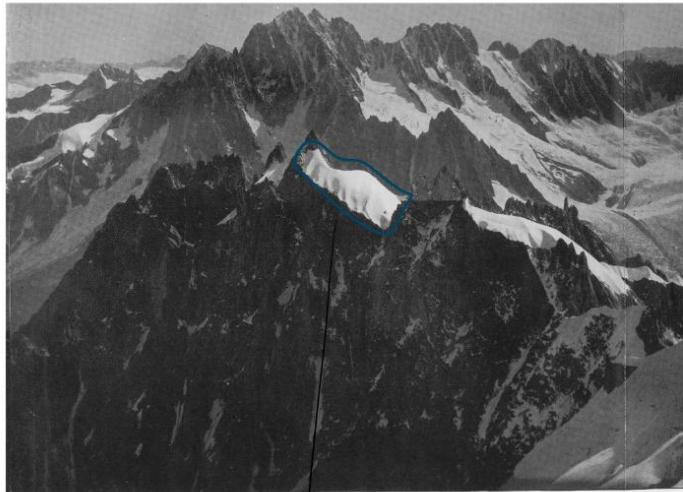


Tome 2, photo 24, 5/6

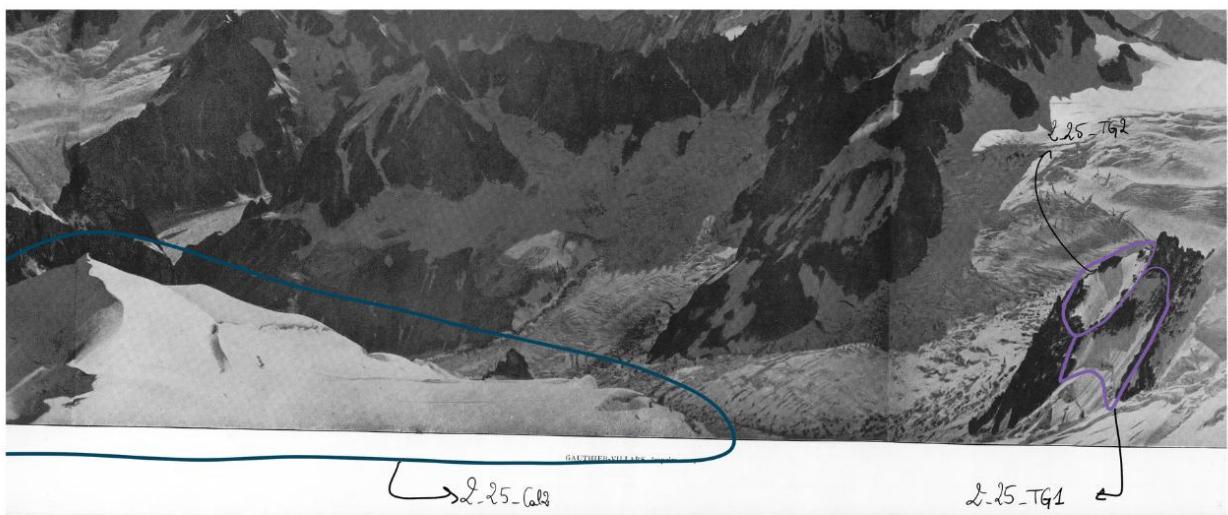


Tome 2, photo 24, 6/6

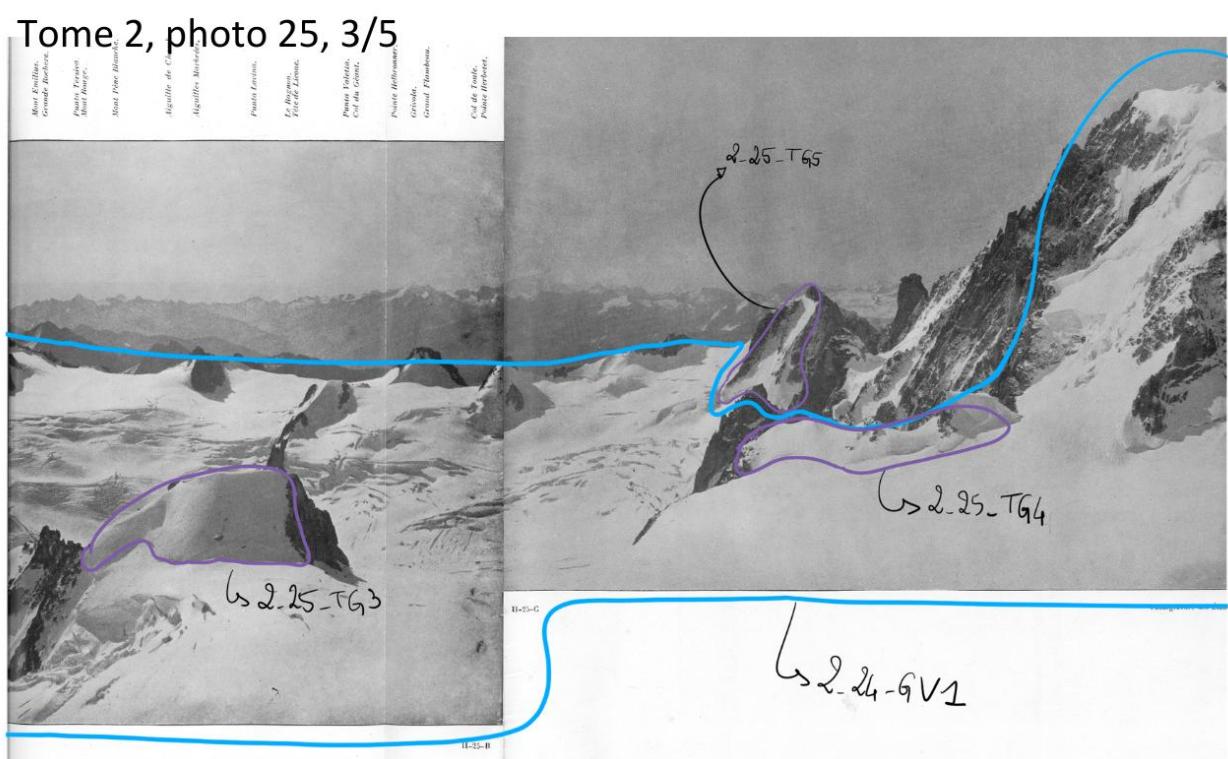




Tome 2, photo 25, 1/5

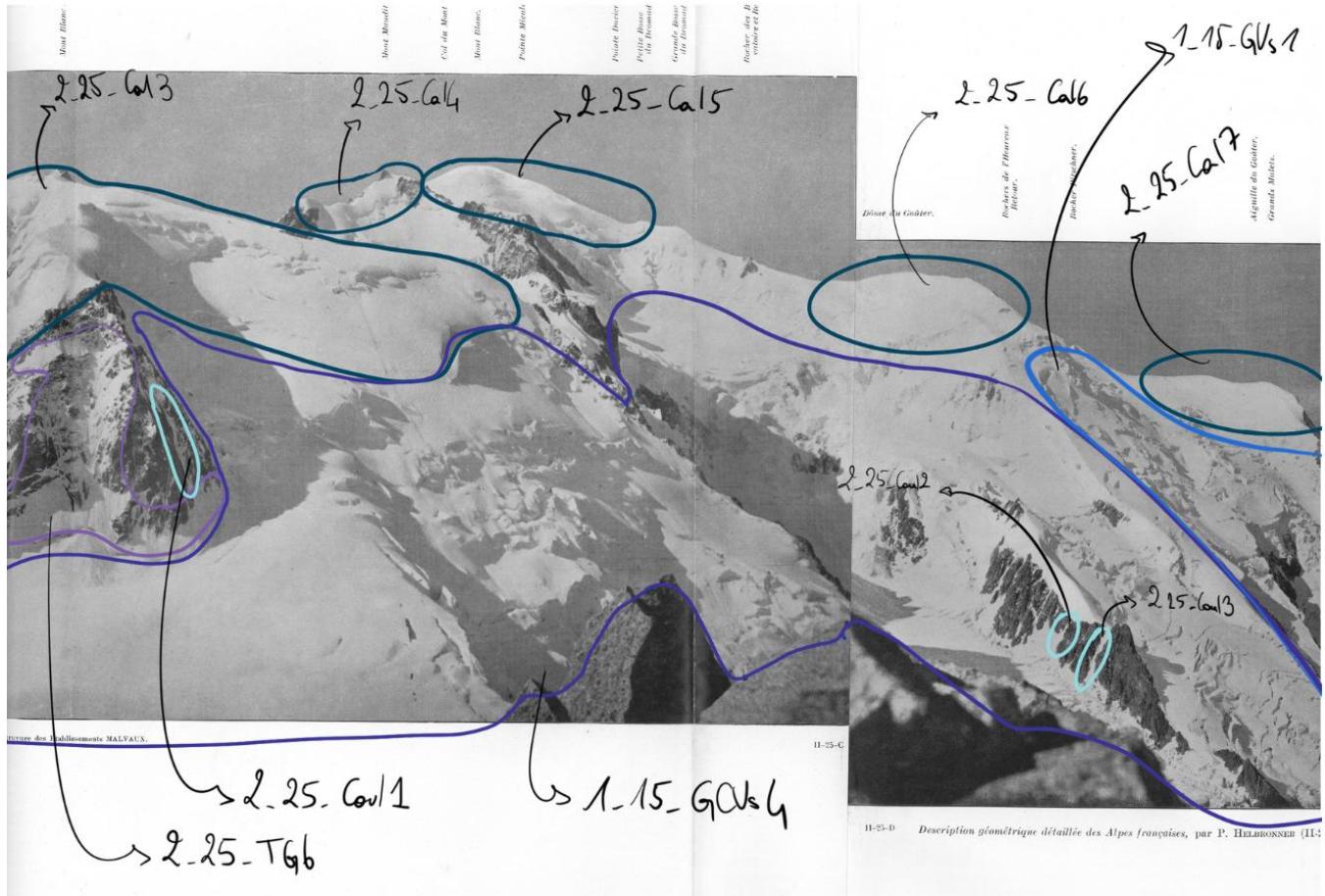


Tome 2, photo 25, 2/5

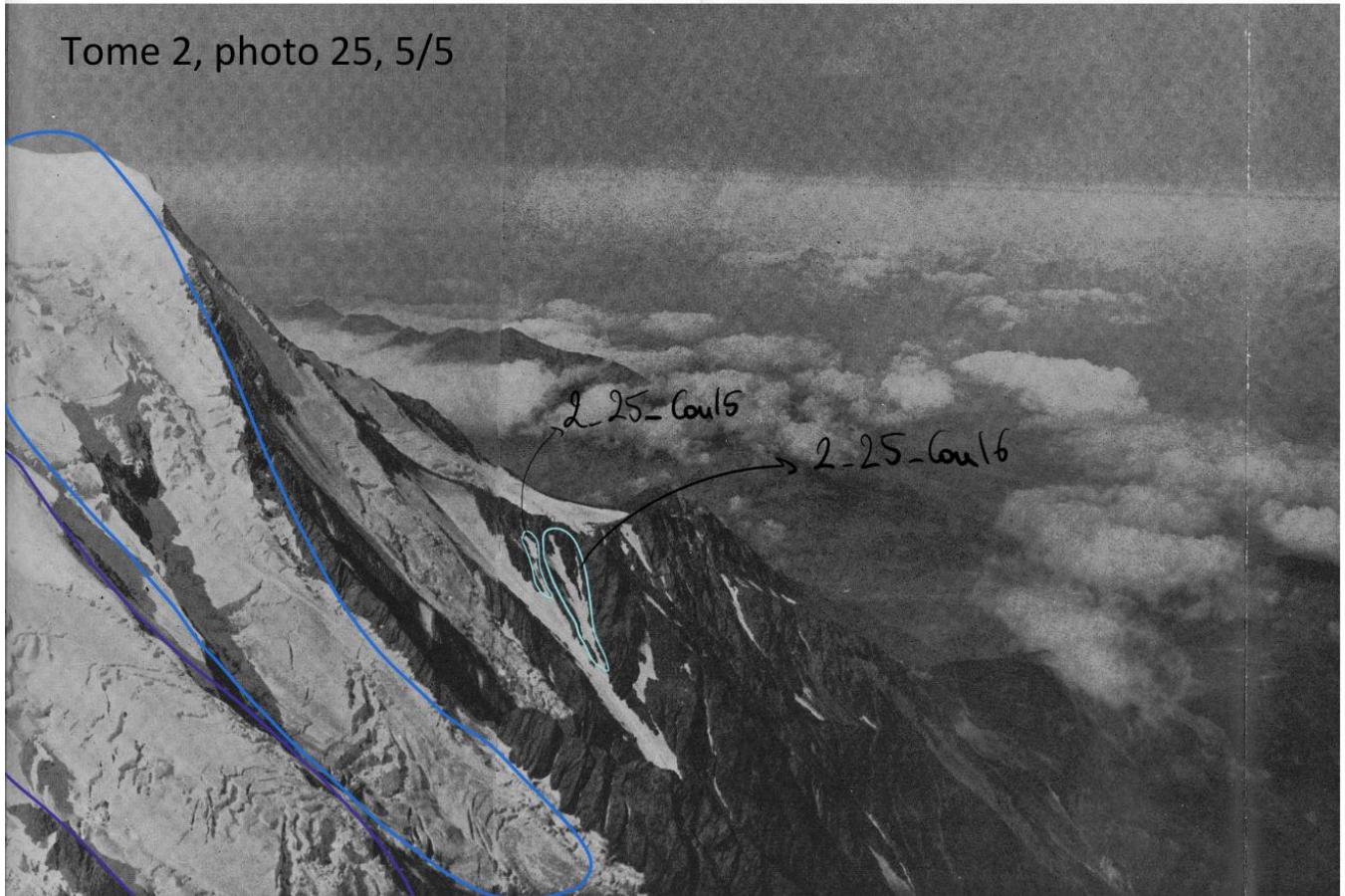


83

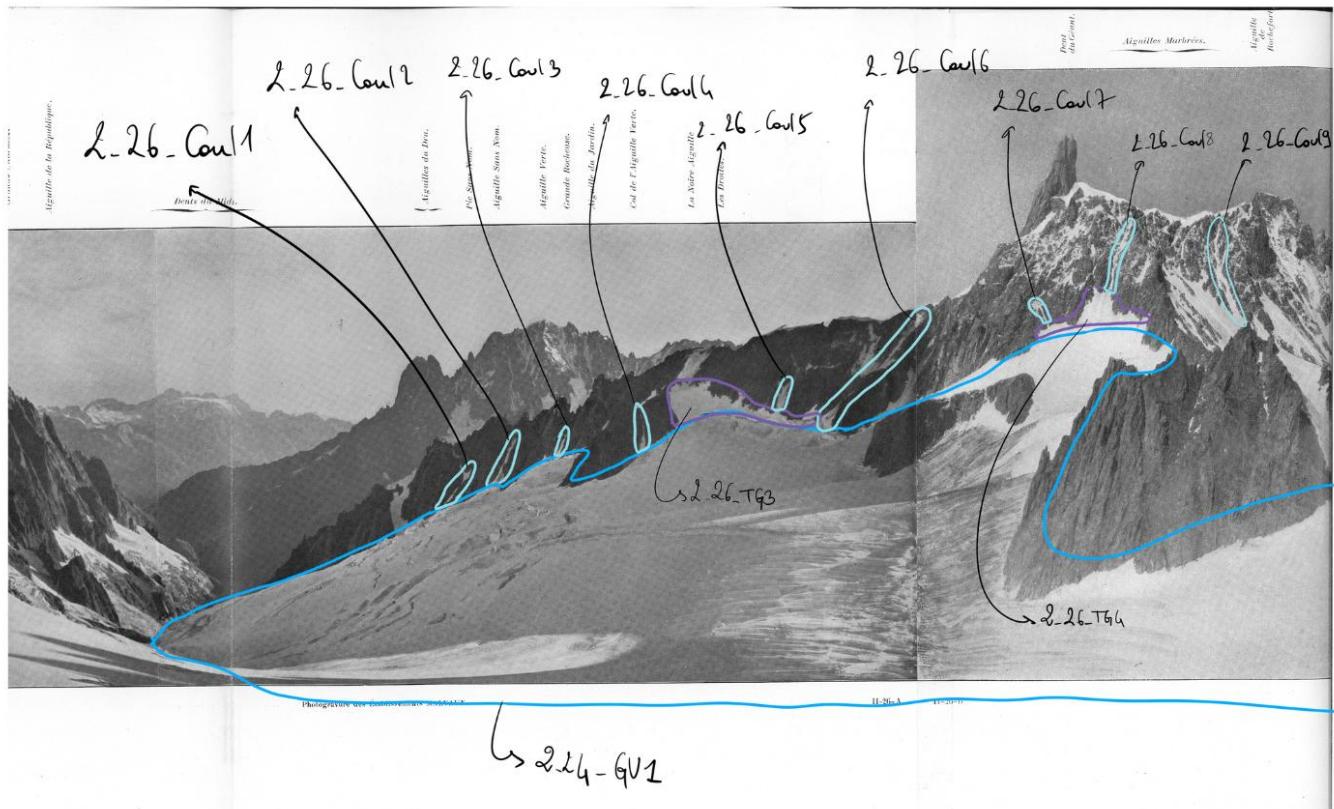
Tome 2, photo 25, 4/5



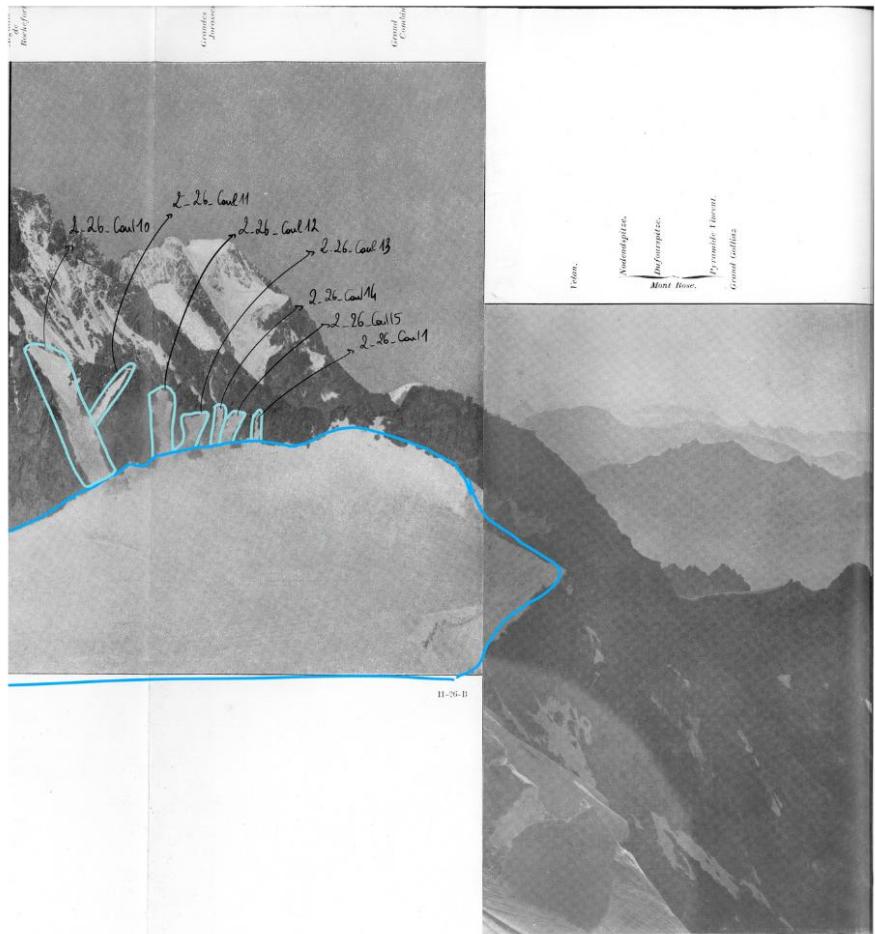
Tome 2, photo 25, 5/5



Tome 2, photo 26, 1/2



Tome 2, photo 26, 2/2



Annexe 2

Tableau de données sur les appareils glaciaires étudiés

Date de la photo	Types d'appareils glaciaires sur les photos de Paul Helbronner	Lieu de la prise de vue	Secteur photographié (bassin, sommet principal ou glaciers principaux)	Code d'identification	Orientation	Altitude estimée du front (limite aval) sur les photos de Paul Helbronner (arrondie à la dizaine)	Altitude estimée du front du glacier aujourd'hui (pour les cas de changement de catégorie = altitude du front du glacier le plus à l'aval)	Perte de surface d'engelacement estimée en %	GV	GCVs	GC	GS	GVs	TG	Couloir	Calotte	Présence d'une couverture détritique et/ou de till	% de surface couverte	Lacs glaciaires	Surfaces des lacs	
17/08/1920	GC	Sommet de l'Aiguille des Grands Montets	Bassin d'accumulation du glacier d'Argentière	2_20_GC1	SO	2800	2800	plus de 80 %	0	0	1	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	GCVs			2_20_GCVs1	SO	2670	2698	entre 60 et 80 %	0	0	2	0	1	0	0	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul1	S	2900	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul2	SO	3140	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul3	O	3050	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul4	SO	3180	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul5	S	3230	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	GC			2_20_GC2	S	2850	2861	entre 60 et 80 %	0	0	1	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	GV			2_20_GV1	NO	Front absent de la photo	/	Valeur indisponible	1	3	0	0	0	5	1	0	OUI	Glacier incomplet sur la photographie	0	/	
	TG			2_20_TG1	O	3270	3295	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/	
	TG			2_20_TG2	O	3500	3449	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul6	S	3560	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	Calotte			2_20_Cal1	/	Limites de la calotte incertaines	/	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul7	SO	3520	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	Couloir			2_20_Coul8	O	3530	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	TG			2_20_TG3	NO	3120	3111	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/
05/09/1907	GS	Sommet de Bellecôte	Mont Pourri, La Grande Casse	1_09_GS1	N	Front absent de la photo	/	Valeur indisponible	0	0	0	0	3	4	0	0	NON	/	0	/	
	Calotte			1_09_Cal1	/	Limites de la calotte incertaines	/	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
	GVs			1_09_GVs1	NO	2240	2700	entre 40 et 60 %	0	0	0	0	1	0	0	0	OUI	entre 20 et 40 %	1	2194	
	GC			1_09_GC1	N	2340	2390	entre 40 et 60 %	0	0	1	0	0	0	0	0	OUI	entre 20 et 40 %	0	/	
	GCVs			1_09_GCVs1	N	2420	2440	entre 20 et 40 %	0	1	0	0	0	0	0	0	OUI	entre 20 et 40 %	0	/	
	GC			1_09_GC2	N	2560	2619	entre 40 et 60 %	0	0	1	0	0	0	0	0	OUI	entre 40 et 60 %	1	1075	
	GVs			1_09_GVs2	N	2620	2770	entre 20 et 40 %	0	0	0	0	1	0	0	0	NON	/	0	/	
	GVs			1_09_GVs3	NE	2450	2550	entre 40 et 60 %	0	0	0	0	0	5	1	0	OUI	entre 40 et 60 %	0	/	
	Calotte			1_09_Cal2	/	Limites de la calotte incertaines	/	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/	
	GCVs			1_09_GCVs2	SO	2660	2910	entre 40 et 60 %	0	1	0	0	0	0	0	0	OUI	moins de 20 %	0	/	
	GCVs			1_09_GCVs3	O	2580	2940	entre 40 et 60 %	0	0	1	0	0	0	2	0	NON	/			
15/08/1907	GCVs	Sommet de l'Aiguille Rouge	Mont Pourri	1_11_GCVs1	N	Front absent de la photo	/	Valeur indisponible	0	1	0	0	0	0	0	0	OUI	entre 60 et 80 %	0	/	
	TG			1_11_TG1	NE	2980	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	GVs			1_11_GVs1	N	Front absent de la photo	/	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	2	1	0	NON	/	0	/	
	TG			1_11_TG2	O	3460	3460	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/	
	GCVs			1_11_GCVs2	N	Front absent de la photo	/	Valeur indisponible	0	1	0	0	0	0	0	0	OUI	entre 20 et 40 %	0	/	
	Calotte			1_11_Cal1	/	Limites de la calotte incertaines	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
	TG			1_11_TG3	N	3240	3251	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/	
	TG			1_11_TG4	NE	3250	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
29/07/1907	GCVs	Sommet du Brévent	Glacier des Bossons et de Tacognaz	1_15_GCVs1	O	2190	2430	entre 20 et 40 %	0	1	0	0	1	0	0	0	NON	/	0	/	
	GCVs			1_15_GCVs2	NO	2300	2370	entre 40 et 60 %	0	1	0	0	0	0	0	0	OUI	entre 40 et 60 %	0	/	
	GS			1_15_GS1	NO	Position du front difficile à déterminer	3020	Valeur indisponible	0	0	0	3	0	3	0	0	NON	/	0	/	
	GCVs			1_15_GCVs3	NO	2190	2312	entre 40 et 60 %	0	1	3	0	0	0	0	0	OUI	entre 40 et 60 %	1	1044	
	GCVs			1_15_GCVs4	N	Front absent de la photo	1721	Valeur indisponible	0	1	1	0	0	2	0	0	NON	/	0	/	
	GVs			1_15_GVs1	N	1540	2030	moins de 20 %	0	0	0	0	1	0	0	0	NON	/	0	/	
	GS			1_15_GS2	NO	3050	3050	Valeur indisponible	0	0	0	1	0	2	0	0	NON	/	0	/	
	TG			1_15_TG1	N	2400	2457	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
	Couloir			1_15_Coul1	N	2410	2793	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
	GV	Sommet de la Dent Parrachée	Dôme de l'Arpont																		

31/08/1920	Sommet du Tour Noir	Aiguille Verte, glacier d'Argentière	2_19_Coul4	NE	3120	3120	entre 60 et 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul5	NE	3110	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_TG3	NE	3090	3090	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	4	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_TG4	N	3060	3060	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul6	NE	3160	3160	entre 60 et 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul7	NE	3170	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul8	NE	3160	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul9	NE	3420	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_TG6	NE	2970	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul10	NE	3100	3100	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul11	NE	3080	3080	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul12	NE	2970	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul13	NE	2920	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul14	N	2990	3180	entre 40 et 60 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_19_Coul15	NO	3000	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_19_Cal3	/	Limites de la calottes incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/		
17/07/1920	Sommet de l'Aiguille du Moine	Bassin d'accumulation de la Mer de Glace, glaciers de Talfére, de Leschaux	2_24_Coul1	S	3340	3340	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul2	SO	3340	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul3	SO	3540	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul4	SO	3460	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul5	SE	3570	3861	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul6	S	Position du front difficile à déterminer		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul7	S	3600	3682	entre 60 et 80 %	0	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul8	SO	3600	3600	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul9	SO	3620	3620	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul10	SO	3620	3620	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul11	SO	Position du front difficile à déterminer		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul12	SO	Position du front difficile à déterminer		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul13	S	3590	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul14	S	3640	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul15	SO	3590	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul16	SO	3580	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul17	SO	3580	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul18	SO	3400	3400	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul19	SO	3440	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul20	SO	3400	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul21	SO	3270	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_TG1	SE	3380	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_TG2	SE	3500	3500	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_TG3	SE	Position du front difficile à déterminer		3532	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
			2_24_TG4	SO	3530	3530	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_TG5	SE	3420	3420	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_TG6	SE	Position du front difficile à déterminer		3490	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_TG7	SO	Position du front difficile à déterminer		3490	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_GV1	SO	Front absent de la photo		2525	Valeur indisponible	1	1		5	4	1	24	0	0	OUI	Glacier incomplet sur la photographie	0	/
			2_24_Coul22	SO	3310	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul23	SO	3290	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/		
			2_24_Coul24	NO	Position du front difficile à déterminer		/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul25	NO	Position du front difficile à déterminer		/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/	
			2_24_Coul26	NO	3300	/	Disparu	0	0	0	0										

Couloir	2_24_Coul39	NE	3460	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/			
	2_24_Coul40	NE	2470	2470	plus de 80 %	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/			
	2_24_Coul41	SE	Position du front difficile à déterminer		Disparu	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/			
	2_24_Coul42	E	Position du front difficile à déterminer		Disparu	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/			
	2_24_Coul43	NE	2770	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/			
	2_24_Coul44	NE	2900	2900	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	0	1	0	NON	/	0	/			
	2_24_Coul45	NE	2870	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/			
	2_24_TG22	N	3070	3070	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	3	0	0	NON	/	0	/			
	Calotte				2_25_Cal1	/	Limites de la calotte incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/	
	Calotte				2_25_Cal2	/	Limites de la calotte incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/	
07/08/1920	TG	Sommet de l'Aiguille du Midi	Mont Blanc, Vallée Blanche	2_25_TG1	NO	3180	3180	entre 60 et 80 %	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/	
	TG			2_25_TG2	NO	3210	3270	plus de 80 %	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_25_TG3	NO	3350	3280	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_25_TG4	NO	3540	3540	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	3	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_25_TG5	NE	3370	3370	entre 60 et 80 %	0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_25_TG6	N	3580	3580	entre 40 et 60 %	0	0	0	0	0	2	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_25_Cou1	NO	3630	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Calotte			2_25_Cal3	/	Limites de la calotte incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/
	Calotte			2_25_Cal4	/	Limites de la calotte incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/
	Calotte			2_25_Cal5	/	Limites de la calotte incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/
	Calotte			2_25_Cal6	/	Limites de la calotte incertaines		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	1	NON	/	0	/
6 et 9/08/1920	Couloir	Sommet de la Pointe Helbronner	Glacier du Géant, Aiguilles Marbrées	2_25_Coul3	NE	3200	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_25_Coul4	NE	3180	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_25_Coul5	NE	2780	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_25_Coul6	NE	2660	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_26_TG1	SO	3400	3400	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_26_TG2	SE	3380	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou1	SO	Position du front difficile à déterminer		Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou2	SO	3260	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou3	SO	3330	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou4	SO	3350	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
22/08/1920	Couloir	Sommet des Posettes	Aiguille du Grépon, Aiguille du Plan	2_26_Cou5	SO	3430	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou6	SO	3410	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou7	S	3600	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou8	SO	3640	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou9	SO	3600	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_26_TG3	SO	3430	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_26_TG4	SO	3600	3600	plus de 80 %	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou10	SO	3400	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou11	SO	3450	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou12	SO	3420	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
22/08/1920	Couloir	Sommet des Posettes	Aiguille du Grépon, Aiguille du Plan	2_26_Cou13	SO	3420	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou14	SO	3430	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou15	SO	3430	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_26_Cou16	SO	3430	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_14_Cou1	N	3150	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_14_Cou2	N	3110	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	TG			2_14_TG1	N	2890	3006	plus de 80 %	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
	GCVs			2_14_GCVs1	NO	Front absent de la photo		2495	Valeur indisponible	0	1	0	0	0	0	0	OUI	moins de 20 %	0	/
	Couloir			2_14_Coul3	NE	3210	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_14_Coul4	NE	3150	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
22/08/1920	TG	Sommet des Posettes	Glacier du Tour	2_14_TG2	NE	3170	3170	Valeur indisponible	0	0	0	0	0	1	0	0	NON	/	0	/
	GS			2_14_GS1	N	Position du front difficile à déterminer		3109	Valeur indisponible	0	0	0	1	0	1	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_14_Coul5	NE	3250	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	Couloir			2_14_Coul6	NE	3250	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/
	GCVs			2_13_GCVs1	NO	1700	2527	entre 20 et 40 %	0	0	1	0	0	0	0	0	NON	/	7	2797 / 219 / 233 / 819 / 890 / 498 / 103
	TG			2_13_TG1	NO	2540	/	Disparu	0	0	0	0	0	0	0	0	NON	/	0	/

Annexe 3

Poster de médiation (conçu au format A0)

Un siècle d'évolution glaciaire dans les Alpes françaises à partir de l'œuvre iconographique de Paul Helbronner

Zora ERARD, Ludovic RAVANEL, Philip DELINE

PAUL HELBRONNER

Paul Helbronner (1871-1938) est un pionnier de la **géodésie alpine** et de la **photographie** de haute montagne.

Il découvre les Alpes durant sa jeunesse lors d'un voyage à Chamonix. Sa première **ascension du mont Blanc**, en 1891, lui ouvre les portes de l'alpinisme. Très vite, il envisage cette pratique au-delà de l'exploit sportif : l'alpinisme va lui servir à réaliser un projet scientifique et artistique ambitieux.

À une époque où la cartographie des milieux montagnards est balbutiante, Paul Helbronner lance de vastes campagnes de levés topographiques dans le but de mesurer les sommets alpins. Pendant **24 ans**, il sillonne les Alpes françaises, transportant instruments scientifiques et matériel photographique afin d'étudier et d'immortaliser les reliefs.

Il laisse derrière lui un fonds colossal de **12 tomes** regroupés au sein de la *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*. Ces ouvrages, accompagnés de leurs **annexes photographiques** et de quelques panoramas à l'aquarelle, constituent une véritable mémoire des Alpes du début du XXe siècle.



RÉSULTATS

Évolution de l'engagement dans le massif du Mont-Blanc : 1920 - 2023
Le glacier du Tour depuis l'Aiguillette des Posettes (2201 m)

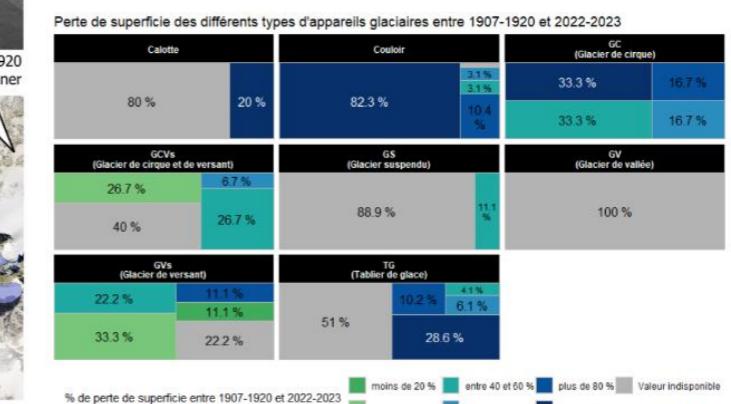
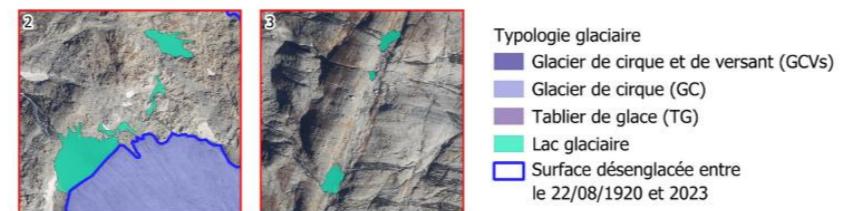
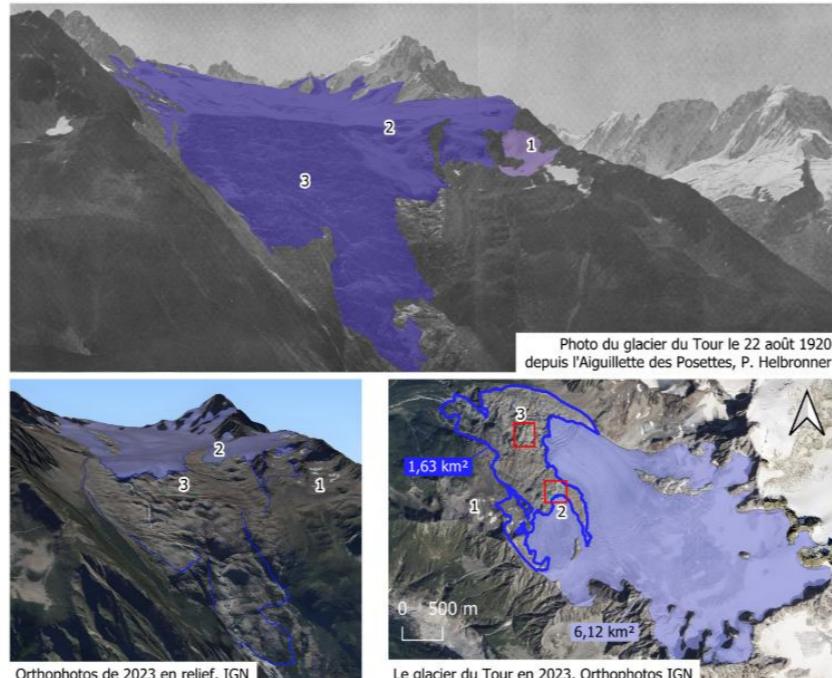


Figure 2 : Perte de superficie des appareils glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023

Exemple de lecture : 6,9 % des appareils glaciaires étudiés ont perdu entre 40 et 60 % de leur superficie entre 1907-1920 et 2022-2023

Figure 3 : Perte de superficie des différents types d'appareils glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023

Exemple de lecture : 10,4 % des couloirs étudiés ont perdu plus 80 % de leur superficie entre 1907-1920 et 2022-2023

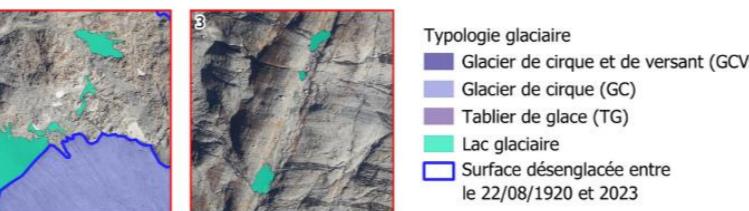
Remarques : les couloirs sont les appareils glaciaires qui ont enregistré le plus de pertes depuis le début du XXe siècle. Les GVs sont les seuls types pour lesquels certains glaciers ont enregistré des pertes inférieures à 20 %. Aucun GS, GV ou GCVs n'a disparu entre 1907-1920 et 2022-2023.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude a pour but de comparer l'engagement des Alpes françaises sur une série de photographies de Paul Helbronner préalablement sélectionnées (prises entre **1907 et 1920**) et les images aériennes des mêmes secteurs (prises en **2022 et 2023**). Ce travail porte sur le Tome 1 (chaîne méridienne de Savoie) et le Tome 2 (massif du Mont-Blanc) de la *Description*.

MÉTHODE

- 1 Consultation des Tomes dédiés à la haute montagne englacée et sélection des photos.
- 2 Élaboration d'une typologie des appareils glaciaires sur les photos de Paul Helbronner et les photos actuelles.
- 3 Comparaison des deux périodes : Traçage de polygones (QGIS) ou utilisation du monoplotting afin de déterminer les contours des glaciers pour les années 1907-1920 et évaluer la perte de superficie. Analyse de l'évolution des différents types d'appareils glaciaires.
- 4 Acquisition de données glaciologiques (altitudes des glaciers, orientation, type, perte de superficie, etc) et alimentation d'un tableau de synthèse.
- 5 Création de cartes et de graphiques.



1 : disparition du TG
2 et 3 : apparition de 7 lacs glaciaires (entre 103 m² et 2 797 m²) suite au recul du glacier
Autres : le glacier du Tour qui correspondait à un GCVs en 1920 est aujourd'hui un GC en raison de la fonte de sa langue glaciaire et de la diminution de sa pente moyenne. Le glacier a perdu 1,63 km² soit 21 % de sa superficie mesurée en 1920 et son front a reculé d'environ 1,35 km depuis cette période.

Figure 1 : Évolution du glacier du Tour entre 1920 et 2023

CONCLUSION

La **moitié** des appareils glaciaires (48,5 %) présents sur les photographies de Paul Helbronner ont aujourd'hui disparu (figure 2). L'analyse typologique (figure 3) met en évidence une **forte disparité** selon les types d'appareils : les couloirs sont les plus touchés, **82,3 %** d'entre eux ont disparu. Au-delà du recul des surfaces englacées (figure 1), on constate l'**apparition de nouvelles formes** glaciaires ou postglaciaires. L'analyse comparative révèle ainsi **39 nouveaux appareils glaciaires**, issus de la fragmentation de glaciers anciens en différentes masses glaciaires plus petites et **43 lacs**. Dans des milieux de haute altitude aux évolutions si rapides, l'apport photographique de Paul Helbronner est une ressource précieuse. Lui-même l'avait prédit !

"Il est permis, d'ailleurs, de supposer à l'avance [l'intérêt] que pourra présenter quelque jour, notamment au point de vue glaciologique, l'ensemble de cette documentation" - Paul Helbronner, 1930

Index des figures

Figure 1 : Organigramme du laboratoire EDYTEM (EDYTEM, 2025).	12
Figure 2 : Localisation des massifs étudiés (fond : orthophotos IGN).	13
Figure 3 : Les stades isotopiques marins sur les 800 000 dernières années (Railsback et al., 2015 ; Lisiecki et Raymo, 2005).	17
Figure 4 : Simulation de l'extension glaciaire au DMG (Léger et al., 2025) avec les lobes.	18
Figure 5 : Lyon au DMG et Lyon aujourd'hui (Coutterand, 2009).	18
Figure 6 : Fluctuations glaciaires au PAG (Couterrand, 2018).	19
Figure 7 : Fluctuations du glacier des Bossons (massif du Mont-Blanc) de 1580 à 2005 (Nussbaumer et Zumbühl, 2011)	20
Figure 8 : Bilans de masse des glaciers de St Sorlin, la Mer de Glace, Gréboulaz et Argentière (données GLACIOCLIM ; OSUG, 2025).	20
Figure 9 : Effondrement du glacier du Tour le 14 août 1949 (ph : Frison-Roche)	22
Figure 10 : Construction d'un MNT (Morisseau, 2017).	27
Figure 11 : Fonctionnement de la télédétection (Tsayem, 2010).	28
Figure 12 : Placement des points de contrôle sur moniQue (image ancienne à gauche, MNT à droite)	33
Figure 15 : Méthode d'identification des types de glaciers et typologie glaciaire associée....	36
Figure 16 : Extrait du tableau contenant les données relatives aux appareils glaciaires étudiés.....	41
Figure 17 : Évolution de l'englacement dans le secteur du Dôme de l'Arpont (1907 - 2022). 42	42
Figure 18 : Évolution de l'englacement dans le secteur du glacier d'Argentière (1920 - 2023).	43
Figure 19 : Évolution de l'englacement dans le secteur du glacier du Tour (1920 - 2023).....	44
Figure 20 : Évolution de l'englacement dans le secteur du Mont Pourri (1907 - 2022).	45
Figure 21 : Évolution de l'englacement dans le secteur de l'Aiguille du Tacul (1920 - 2023)..	46
Figure 22 : Évolution du nombre des différents types d'appareils glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.	49
Figure 23 : Évolution des structures glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.	50
Figure 24 : Proportions des pertes de superficie par classes de 20 % des appareils glaciaires étudiés entre 1907-1920 et 2022-2023.	51
Figure 25 : Perte de superficie des différents types d'appareils glaciaires entre 1907-1920 et 2022-2023.	52
Figure 26 : Impact de l'altitude du front sur l'évolution des superficies glaciaires entre.....	53
Figure 27 : Répartition des appareils glaciaires par orientation et perte de superficie.	54
Figure 28 : Nombre de lacs par catégorie de surface.	55
Figure 29 : Fragmentation des glaciers de Scersen et Fellaria (Galluccio et Scotti, 2022).	58
Figure 30 : Diagramme de Gantt présentant la répartition de mes missions.	61

Index des tableaux

Tableau 1 : Typologie WGMS (WGMS, 2020).	26
Tableau 2 : Synthèse des 12 photographies de Paul Helbronner sélectionnées.....	32
Tableau 3 : Les différents types glaciaires et leurs caractéristiques (ph : Google Earth, Géoportal, Victor Galuchot, Mountain Wilderness).	38

Index des annexes

Annexe 1 : Corpus des 12 panoramas de Paul Helbronner sélectionnés pour cette étude annotés.....	71-85
Annexe 2 : Tableau de données sur les appareils glaciaires étudiés.....	86-89
Annexe 3 : Poster de médiation.....	90-91

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Sommaire	6
Liste des sigles	7
Introduction.....	8
I. Contexte du stage.....	10
I. 1. Présentation des structures encadrantes	10
I. 2. Objectifs du stage	12
I. 3. Présentation du secteur d'étude.....	13
II. Cadre théorique	17
II. 1. Dynamiques glaciaires dans les Alpes françaises	17
II. 1. a. Glaciations et interglaciaires	17
II. 1. b. Le Petit Âge Glaciaire, une dernière avancée holocène des glaciers alpins.....	19
II. 1. c. Au XIXe siècle : une fonte accélérée	20
II. 1. d. Principaux impacts du retrait glaciaire.....	21
II. 2. Typologie des appareils glaciaires	24
II. 2. a. Intérêts d'une classification.....	24
II. 2. b. La typologie WGMS comme référence internationale.....	24
II. 2. c. Limites de cette typologie du WGMS	26
II. 3. Méthodes de quantification du retrait glaciaire	26
III. Méthodologie	31
III. 1. Matériel et données	31
III. 2. Méthodes et traitement.....	32
III. 3. Limites	40
IV. Résultats.....	42
IV. 1. Le corpus cartographique.....	42
IV. 2. Présentation du corpus	47
IV. 3. Données statistiques	49
IV. 4. Apports des résultats	56
V. Discussion.....	57
V. 1. Mise en perspective des résultats.....	57
V. 1. a. Interprétation des évolutions observées	57
V. 1. b. Limites	59
V. 1. c. Apports de ce travail	60
V. 2. Déroulement du stage et retours personnels	61
VI. Conclusion et perspectives	62

Bibliographie :	63
Sitographie	69
Annexe 1	71
Annexe 2	86
Annexe 3	90
Index des figures	92
Index des tableaux	93
Index des annexes	93
Table des matières	94

Abstract

Glaciers are very good indicators of ongoing climate change and its effects on high mountain environments. In the French Alps, their retreat since the end of the Little Ice Age (around 1850) has been widely studied, and research shows that this retreat has often accelerated since the late 1990s. This thesis draws on photographs taken between 1907 and 1920 by Paul Helbronner, geodesist and mountaineer, to document this glacial evolution. Its aim is to highlight some of the consequences of glacier retreat (fragmentation of glaciers, loss of glacierized surfaces, multiplication of proglacial lakes).

The approach consisted in selecting and digitizing relevant photographic panoramas from two of the twelve volumes of the *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*, in order to compare past glacier outlines with those identified on recent aerial photographs (2022–2023). The objective was to estimate losses of glacierized surface area in the Mont Blanc, Vanoise, and Écrins massifs. To achieve this, a method based on monoplotting and the use of a geographic information system (QGIS) was developed. A glacial typology was also elaborated to describe the trajectories of glacier units and to better understand the specific evolutions of each glacier. This categorization also aimed to highlight the phenomenon of fragmentation according to glacier morphologies.

The analysis revealed the disappearance of 48.5% of the studied glacier units, bringing out differentiated dynamics. Small glacier units such as ice aprons and couloirs appeared more vulnerable to climatic variations, with disappearance rates of 28.6% and 82.3% respectively. Larger units, such as valley glaciers, slope glaciers, and cirque–slope glaciers, recorded smaller surface losses but were more prone to fragmentation. Glacier retreat has also been accompanied by the emergence of post-glacial landforms, namely proglacial lakes, which in this case are characterized by their small size. These indicators of deglaciation could have significant future implications, both from an ecological perspective (new habitats) and in terms of natural hazards (sudden outburst floods).

This work highlights the importance of archival images which, when combined with recent aerial photographs, allow for long-term reconstructions of landscape and glacier evolution. The study presented here confirms the scientific and heritage value of Paul Helbronner's iconographic work in the context of glacier retreat. It also underlines the relevance of continuing to exploit these resources in order to monitor glacier evolution and anticipate future environmental impacts.

Keywords : Paul Helbronner, glaciers, climate change, monoplotting, archival images

Résumé

Les glaciers sont de très bons indicateurs du changement climatique en cours et de ses effets sur les milieux de haute montagne. Dans les Alpes françaises, leur retrait depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1850) est largement étudié et des travaux montrent qu'il s'accélère souvent depuis la fin des années 1990. Ce mémoire s'appuie sur des photographies prises entre 1907 et 1920 par Paul Helbronner, géodésien et alpiniste, pour documenter cette évolution glaciaire. Il a pour but de mettre en évidence certaines conséquences du retrait glaciaire (fragmentation des glaciers, perte de surfaces glaciaires, multiplication des néolacs).

La démarche a consisté à sélectionner et numériser les panoramas photographiques pertinents de deux des douze tomes de la *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*, afin de comparer les contours glaciaires anciens à ceux relevés sur des photographies aériennes récentes (2022-2023), dans le but d'estimer des pertes de surface englacée dans les massifs du Mont-Blanc, de la Vanoise et des Écrins. Pour cela, une méthode fondée sur l'utilisation du *monoplotting* et d'un système d'information géographique (QGIS) a été développée. Une typologie glaciaire a également été élaborée afin de traduire les trajectoires des appareils glaciaires et de mieux appréhender les évolutions propres à chaque glacier. Cette catégorisation visait aussi à mettre en évidence le phénomène de fragmentation en fonction des morphologies glaciaires.

L'analyse a permis de constater une disparition de 48,5 % des appareils glaciaires étudiés en faisant ressortir des dynamiques différencierées. Les petits appareils glaciaires comme les tabliers de glace et les couloirs sont apparus comme plus vulnérables aux variations climatiques avec respectivement 28,6 % et 82,3 % de disparitions. Les appareils de plus grande taille tels que les glaciers de vallée, de versant et de cirque-et-de-versant ont enregistré des pertes de superficie moindres mais ont été davantage sujets au morcellement. Le retrait glaciaire s'accompagne par ailleurs de l'apparition de formes post-glaciaires, les néolacs, caractérisés ici par leur petite taille. Ces indicateurs de la déglaciation pourraient avoir des implications futures fortes, tant sur le plan écologique (nouveaux habitats) que sur celui des risques naturels (vidanges brutales).

Ce travail met en lumière l'importance des images d'archives qui, combinées à des photographies aériennes récentes, permettent une reconstitution sur le temps long de l'évolution des paysages et des glaciers. L'étude confirme la valeur scientifique et patrimoniale de l'œuvre iconographique de Paul Helbronner dans un contexte de désengagement. Elle souligne également l'intérêt de poursuivre l'exploitation de ces ressources pour suivre l'évolution des glaciers et anticiper les impacts environnementaux à venir.

Mots clés : Paul Helbronner, glaciers, changement climatique, monoplotting, archives

