



Analyse des risques glaciaires et périglaciaires dans les Pyrénées françaises

Anna PELLAERS

Master II Gestion et Évaluation des Milieux Montagnards

Année 2025

Maître de stage : Nadia Hassine

Responsable pédagogique : Jean-Marc Antoine

Photo de couverture : Glacier des Oulettes de gaube, juillet 2025



Attestation sur l'honneur

Je soussigné/soussignée* :

Nom, prénom : PELLAERS Anna

~~Master 1~~ / Master 2 GAED*

Parcours : GEMO / TRENT*

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

Par ailleurs, je déclare avoir utilisé une intelligence artificielle pour : [cocher la ou les cases si nécessaire]

- ☒ Corriger l'orthographe et le style de mon mémoire
- ☐ Traduire des passages de publications en langue étrangère. Dans ce cas, les passages utilisés dans le mémoire sont clairement identifiés et précisent quel logiciel d'IA a été mobilisé

Fait à Toulouse
Signature

Le 25/08/2025

*Conserver la mention appropriée

Résumé

Ce rapport de stage de Master II porte sur l'analyse des risques glaciaires et périglaciaires à l'échelle des Pyrénées françaises. Il a été réalisé au sein du service de la Restauration des Terrains de Montagne (RTM), à l'agence de Tarbes, qui couvre les départements des Pyrénées-Atlantiques et des Hautes-Pyrénées. Commandée par le Ministère de la Transition écologique dans le cadre du Plan d'Action de Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG), l'étude dresse un état des lieux de la situation actuelle des glaciers blancs pyrénéens et propose une typologie des glaciers blancs instables spécifique à ce massif. Pour conduire l'analyse de risque, des critères ont été établis afin d'identifier les zones sources, c'est-à-dire des secteurs instables susceptibles de générer un aléa. Parmi les phénomènes étudiés figurent la chute de séracs, le glissement basal de glace et les vidanges de poches d'eau sous-glaciaire. Un niveau de risque a été attribué pour chaque bassin versant regroupant des glaciers blancs. Ce travail vise à apporter des connaissances sur les dynamiques glaciaires pyrénéennes et à contribuer à la prévention des risques dans un contexte de changement climatique.

Mots-clés : Glacier blanc, risque, changement climatique, zone source, Pyrénées

This Master II internship report focuses on the analysis of glacial and periglacial risks across the French Pyrenees. It was carried out within the Mountain Terrain Restoration (RTM), at the Tarbes agency, which covers the Pyrénées-Atlantiques and Hautes-Pyrénées departments. Commissioned by the Ministry of Ecological Transition as part of the Action Plan for the Prevention of Risks of Glacial and Periglacial Origin (PAPROG), the study provides an overview of the current situation of Pyrenean white glaciers and proposes a typology of unstable white glaciers specific to this massif. To conduct the risk analysis, a set of criteria were established to identify source areas, unstable sectors likely to generate a hazard. The phenomena investigated include serac falls, basal ice sliding, and the sudden drainage of subglacial water pockets. Each watershed containing clean-ice glaciers was assigned a hazard level. This work aims to provide knowledge on Pyrenean glacial dynamics and to contribute to risk prevention in the context of climate change.

Keywords: White glacier, hazard, climate change, source area, Pyrenees

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Nadia Hassine, ma maîtresse de stage, pour m'avoir guidée avec bienveillance tout au long de ces six mois. Merci pour ses explications précieuses sur les risques naturels, ses conseils avisés, ses relectures attentives, mais surtout pour son soutien constant. La confiance accordée m'a permis de m'exprimer pleinement et de réaliser avec joie mon travail.

Je voudrais également remercier Jean-Marc Antoine, mon responsable pédagogique, pour sa disponibilité et ses remarques pertinentes sur ce travail.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à toute l'équipe du service RTM, avec qui j'ai eu la chance de partager mon quotidien. Merci à Chloé, pour son accueil dans son bureau et ses sorties sur le terrain ; à Claire, pour sa joie communicative ; à Viviane, pour sa bienveillance ; à Xavier, pour ses connaissances et ses défis sportifs partagés ; à Marine, pour avoir partagé une partie de sa grossesse ; à Sébastien pour sa merveilleuse bonne humeur ; à Édith pour sa gentillesse ; et à Gaëtan, pour ses blagues incessantes. Merci à chacun pour leur écoute, leur soutien et tous ces instants simples mais précieux, faits de rires et de repas partagés.

Un merci tout particulier à Laurent Lespine, dont la passion pour la glaciologie m'a profondément guidée et inspirée. Ses conseils et les ouvrages transmis ont largement nourri ma réflexion.

Je souhaite également remercier mes parents, qui m'ont toujours soutenue dans mes choix personnels et encouragée à suivre ce qui me passionne. Aujourd'hui, je crois pouvoir dire, avec beaucoup de joie et de fierté, que j'ai trouvé ma voie : celle d'être géographe spécialisée en milieux montagnards.

Merci à mes sœurs, Julia et Noémie, qui m'apportent tant d'amour, de force et d'équilibre dans mon quotidien, la vie sans elles n'aurait pas le même goût.

Enfin, toute mon affection va à Rémi et à notre petit Mastoc, qui partagent mon quotidien et vivent avec moi les émotions les plus douces comme les plus difficiles. Merci de me soutenir, inlassablement.

Table des matières

Liste des sigles	5
Introduction	1
Partie 1 : Contexte et missions du stage	3
1.1 La Restauration des Terrains de Montagne : un service dédié à la maîtrise des risques naturels en montagne	3
1.2 Présentation des missions du stage	7
1.3 Présentation du territoire d'étude : les glaciers blancs pyrénéens	11
Partie 2 : Cadre théorique et enjeux du stage	13
2.1 Définition et fonctionnement des glaciers blancs : concepts de glaciologie	13
2.2 Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire	17
2.3 Connaissances des risques glaciaires dans les Pyrénées face au changement climatique	23
Partie 3 : Démarche méthodologique	28
3.1 Travail bibliographique, appropriation du sujet et acquisition des données	28
3.2 Typologie des glaciers blancs instables dans les Pyrénées françaises	29
3.3 Identification des zones sources potentielles	29
3.4 Estimation des risques d'origine glaciaire et périglaciaire à partir de la méthode de la ligne d'énergie	32
Partie 4 : Résultats	36
4.1 Proposition d'une typologie prenant en compte le contexte pyrénéen	36
4.2 Analyse de l'aléa glaciaire	38
4.3 Evaluation des risques glaciaires dans les Pyrénées à court et moyen terme	58
Partie 5 : Discussion, mise en perspective et retour d'expérience	63
5.1 Retour sur les résultats obtenus	63
5.2 De nouvelles perspectives : les risques associés aux lacs proglaciaires	64
5.3 Retour d'expérience	67
Conclusion	69
Bibliographie	70
Liste des figures	73
Liste des tableaux	74
Table des matières	75
Liste des annexes	77
Annexes	77

Liste des sigles

PAPROG : Plan d'Action de Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire

ROGP : Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire

RTM : Restauration des terrains de Montagne

ONF : Office National des Forêts

SIG : Système d'Information Géographique

PAG : Petit Âge Glaciaire

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MIG : Mission d'Intérêt Général

LiDAR : Light Detection And Ranging

IGN : Institut Géographique National

GLOF : Glacial Lake Outburst Floods

EBR : Etude de Bassin de Risque

DMG : Dernier Maximal Glaciaire

Introduction

L'année 2025 marque un tournant symbolique. Elle a été désignée *Année internationale de la préservation des glaciers* par l'UNESCO. Cette initiative vise à sensibiliser le grand public et les décideurs à l'importance cruciale des glaciers pour les équilibres planétaires. En effet, ces derniers représentent une ressource vitale, fournissant de l'eau douce à un quart de la population mondiale (UNESCO, 2022). Pourtant, leur recul partout dans le monde est alarmant : depuis 1850, les Pyrénées ont perdu près de 90 % de leurs glaciers, contre environ 60 % dans les Alpes (René, 2025).

Les conséquences de cette fonte sont nombreuses et préoccupantes. Parmi elles, on peut citer l'élévation du niveau marin, la raréfaction des ressources en eau douce, la transformation des écosystèmes ainsi que l'émergence ou l'intensification d'aléas naturels spécifiques (UNESCO, 2022). Parmi les phénomènes glaciaires les plus marquants, on trouve les chutes de séracs, les glissements d'important volume de glace, ou encore les vidanges brutales de lacs sous-glaciaires (Failletaz, 2021). Bien que localisés dans des zones souvent peu accessibles, ces événements peuvent avoir des répercussions importantes sur les vallées situées en contrebas, menaçant des personnes, des infrastructures et biens matériels.

Plusieurs événements récents rappellent la réalité de ces risques. En juillet 2025, la vidange d'un lac glaciaire issu du glacier d'Aletsch, en Suisse, a englouti le village de Blatten, situé en contrebas. Si les pertes humaines ont pu être évitées grâce à un dispositif de surveillance et à une évacuation préventive, cet événement a révélé la difficulté de faire face à des aléas soudains, localisés et difficiles à anticiper. Trois ans plus tôt, en 2022, l'effondrement de séracs du glacier de la Marmolada, en Italie, avait provoqué la mort de dix personnes et marqué durablement les esprits (Hancok, 2023).

Dans ce contexte de transformation des milieux glaciaires, les risques associés aux glaciers blancs font désormais l'objet d'une attention croissante en France. Les connaissances scientifiques et techniques permettent aujourd'hui de mieux caractériser ces phénomènes et d'en comprendre leurs sources. Les actions de prévention et de modélisation menées actuellement par l'Etat et l'Office National des Forêts (ONF) au sein du service de la Restauration des Terrains de Montagne (RTM) s'inscrivent dans une logique d'anticipation face aux aléas émergents. Elles visent à identifier les formes d'instabilité propres aux glaciers blancs et à localiser les zones potentiellement exposées. Ces travaux permettent ainsi de produire des cartographies de risque à destination des acteurs territoriaux, afin d'orienter les politiques d'aménagement, d'ajuster les dispositifs de sécurité, et de renforcer la résilience des territoires de montagne face aux effets du changement climatique.

C'est dans cette optique que le ministère de la Transition écologique a lancé, en 2021, un Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG). Ce programme vise à développer une expertise nationale sur les risques liés à la déstabilisation des glaciers et des terrains périglaciaires.

Initialement déployé dans les Alpes, le projet est étendu aux Pyrénées depuis 2022. L'étude conduite s'inscrit dans la continuité de l'inventaire des glaciers blancs (2023) réalisé par l'association de glaciologie pyrénéenne, *Moraine*, et a pour objectif de réaliser, à l'échelle de la chaîne pyrénéenne, une analyse des risques susceptibles de générer des phénomènes glaciaires ou périglaciaires. Dès lors, une question se pose :

Les Pyrénées sont-elles exposées à des risques d'origine glaciaire et périglaciaire, et comment ces risques peuvent-ils être identifiés et évalués ?

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est double : établir un socle de connaissance sur les aléas d'origine glaciaire et périglaciaire dans les Pyrénées françaises, et évaluer les enjeux territoriaux qui y sont associés.

Ce rapport de stage s'articule autour de six grandes parties. La première présente le contexte de l'étude et les missions du stage, en replaçant l'étude dans le cadre du PAPROG. La deuxième partie propose un cadre théorique, permettant de comprendre les notions-clés mobilisées et les enjeux scientifiques, techniques et territoriaux liés aux risques glaciaires et périglaciaires. La troisième partie détaille la démarche méthodologique adoptée pour mener l'analyse. La quatrième est consacrée à la présentation des résultats, à travers des éléments cartographiques. La cinquième partie permet une discussion critique, mettant en perspective les résultats et les limites de l'étude. Cette partie est aussi consacrée à un retour d'expérience personnel, apportant réflexions sur les enseignements tirés de ce travail.

Partie 1 : Contexte et missions du stage

1.1 La Restauration des Terrains de Montagne : un service dédié à la maîtrise des risques naturels en montagne

1.1.1 Histoire et origines de la Restauration des Terrains en Montagne

Les éléments présentés dans cette section sont issus des deux sources suivantes :

- Ministère de l'Agriculture. Restauration des Terrains en Montagne (RTM). Département de la Savoie (1885-1963). Consulté sur France Archives, le portail national des archives en ligne.
- Office national des forêts (ONF). La grande Histoire des forêts (#Épisode 1) : le reboisement des massifs montagneux, salvateur et protecteur, publié le 4 novembre 2024.

L'administration forestière en France a une longue histoire qui commence dès le Moyen Âge. La première réglementation connue date de 1219, sous le roi Philippe II Auguste, qui voulait contrôler l'exploitation et la vente du bois, ressource essentielle pour l'économie et la défense du royaume. En 1291, Philippe IV le Bel instaure les premiers « *maîtres des Eaux et Forêts* », marquant le début d'une administration dédiée à la gestion et au contrôle des espaces forestiers. Celle-ci se renforce progressivement, notamment avec l'ordonnance de Brunoy de 1346, qui introduit les principes d'une gestion durable et planifiée des forêts.

Mais c'est surtout sous Colbert, ministre de Louis XIV, que cette administration a été profondément réformée. En 1661, une ordonnance royale ferme certaines forêts domaniales pour mieux les protéger. Ce document sert à limiter la gestion des forêts publiques, notamment pour garantir la production de bois de chêne utilisé dans la construction navale. Cette ordonnance restera une référence jusqu'au Code forestier de 1827, qui constitue encore aujourd'hui le socle juridique de la gestion forestière en France.

Au XIX^{ème} siècle, face à la dégradation des massifs de montagne (déboisement, érosion, inondations), Napoléon III confie à l'administration des Eaux et Forêts de nouvelles missions, notamment le service des dunes et des ponts et chaussées. À partir de 1882, la direction des forêts est divisée en plusieurs services, dont un dédié au reboisement et à la Restauration des Terrains en Montagne (RTM).

C'est dans ce contexte que naît le RTM, directement issu de l'administration des Eaux et Forêts. Il hérite de ses savoir-faire en gestion forestière, en techniques de reboisement et en aménagement hydraulique, tout en adaptant ses méthodes aux contraintes des milieux montagnards.

Sa création répond à un double constat. D'une part, les catastrophes naturelles s'intensifient, comme la crue torrentielle de 1875, qui rappelle la vulnérabilité des zones de montagne. Cet événement a causé la mort de 71 personnes à Verdun (Ariège) et de 208 à Toulouse, et détruit plus de 1 200 maisons. D'autre part, les montagnes connaissent à cette époque leur maximum démographique. Les vallées sont densément peuplées et les versants exploités jusqu'aux pentes les plus raides pour l'agriculture et l'élevage. Cette pression anthropique provoque un déboisement des vallées, un pâturage intensif et une érosion des sols. Ces milieux dégradés, fragilisés par les activités humaines, réagissent plus violemment aux fortes pluies, aux crues et aux avalanches.

Ainsi, dès ses débuts en 1882, le RTM acquiert des terrains dégradés, principalement situés en haut des versants, pour y mener des travaux de stabilisation et de reboisement. En 1884 la loi pour le “ré-engazonnement” est promulguée. Dans les Pyrénées, plus de 43 000 hectares de terrains sont devenus domaniaux et intégrés dans ces périmètres RTM”



Figure 1 : Reboisement des versants par le RTM

A gauche : Le village Les Meyries (Hautes-Alpes) avant (ONF) ; A droite : Les Meyries après (ONF)

Source : ONF, consulté sur “La grande Histoire des forêts (#Episode 1) : le reboisement des massifs montagneux, salvateur et protecteur”

Avec le temps, les missions du RTM évoluent. Si les enjeux de reboisement ont marqué les débuts, l’expertise des risques naturels est devenue de plus en plus centrale, notamment à partir du XXème siècle. Entre 1882 et 1914 on parle de “l’Âge d’Or” du RTM, là où de nombreux ouvrages vont être construits.



Figure 2 : Construction d’un barrage de correction torrentielle, Saint Nazare les Eymes, 1921

Source : RTM 38, consulté sur Irma Grenoble “1860 - 2010, 150 ans de lutte contre les risques naturels”

Le reboisement des versants, combinés à des ouvrages de génie civil tels que des barrages de correction torrentielle, des drains ou des dispositifs paravalanches, visait à lutter contre l’érosion et à limiter les risques naturels.

Cependant, entre 1940 et 1980, la politique RTM connaît un ralentissement, en raison du manque de financements liés aux guerres mondiales, mais aussi d’un changement progressif des mentalités. L’économie touristique prend alors le pas sur les préoccupations liées à la gestion des risques, reléguant les ouvrages RTM au second plan.

Ce sont des événements majeurs, marquants sur le plan médiatique, qui relancent les actions de protection. L'avalanche de Val d'Isère en 1970, ayant causé 46 morts et 37 blessés, illustre cette nécessité de réaffirmer les missions du RTM pour la sécurité des biens et des personnes.

En 1989, le RTM est officiellement intégré à l'ONF, créé en 1966 sous l'impulsion de Georges Pompidou pour moderniser la gestion des forêts publiques. Depuis lors, il constitue un service spécialisé au sein de l'ONF, dédié à la maîtrise des risques naturels en montagne.

1.1.2 Contexte institutionnel et fonctionnement actuel

Aujourd'hui, le RTM constitue une composante spécialisée de l'ONF, établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la double tutelle du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, et du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

Il conserve son rôle de service technique de l'Etat, au service de l'intérêt général, en alliant ses missions historiques de protection et de valorisation des forêts publiques (domaniales, départementales, communales et sectionales), tout en ayant une expertise sur les risques naturels (avalanches, glissements de terrain, crue torrentielle, risque glaciaire).

Le RTM est organisé en trois agences régionales (Alpes du Nord, Alpes du Sud et Pyrénées), elles-mêmes divisées en services départementaux ou bi-départementaux, représentant une centaine d'agents. Les équipes, composées de techniciens et d'ingénieurs aux compétences variées (géomorphologie, génie civil, hydraulique, gestion forestière), assurent à la fois une présence de terrain et une expertise technique. Le budget annuel est de 10 millions d'euros.

Les activités du RTM reposent en grande partie sur des Missions d'Intérêt Général (MIG) confiées et financées par l'Etat. La première MIG, financée par le Ministère en charge des forêts, occupe environ la moitié de l'activité annuelle.

Elle concerne la gestion des ouvrages de protection situés en forêts domaniales, leur entretien, ainsi que la réalisation de nouvelles infrastructures lorsque nécessaire (figure x).

La seconde MIG, financée par le ministère en charge des risques naturels via la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), représente environ 37 % de l'activité. Son objectif est d'améliorer la prévention en analysant les phénomènes naturels, en produisant des expertises et en apportant un soutien aux services de l'Etat et aux collectivités pour intégrer la gestion des risques dans l'aménagement du territoire.



Figure 3 : ouvrages paravalanches au dessus de la Mongie, avril 2025

En complément, le RTM réalise des missions spécifiques confiées localement par l'État, ou des prestations (maîtrises d'œuvre, études, expertises) pour le compte de collectivités ou d'autres acteurs publics.

Selon la nature des projets, le RTM peut intervenir en tant que maître d'ouvrage ou maître d'œuvre. En tant que maître d'ouvrage, il pilote directement des travaux réalisés en forêt domaniale, dont l'État est propriétaire, depuis la conception jusqu'à la réception, en définissant le budget, le calendrier et les objectifs.

En tant que maître d'œuvre, il met son expertise technique au service d'un commanditaire (par exemple une commune), conçoit les solutions adaptées et encadre les travaux. C'est par exemple le cas sur la commune de Viella, où un important glissement de terrain est en cours depuis 2018. Le RTM est ici maître d'œuvre pour assister la commune (le commanditaire) dans le suivi des travaux.



Figure 4 : A gauche : glissement de terrain à Viella (juillet 2020), à droite : travaux de drainage à Viella (juillet 2025).

L'agence RTM des Pyrénées, cadre de ce stage, couvre six départements : Ariège, Aude, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Atlantiques et Pyrénées-Orientales (figure 5). Elle est organisée en trois services bi-départementaux basés à Perpignan, Saint-Gaudens et Tarbes, rassemblant environ 25 agents au total. Le service de Tarbes, où s'est déroulé le stage, est composé de neuf personnes aux compétences spécialisées telles que la gestion des avalanches, la prévention des chutes de blocs, l'ingénierie des travaux, la géomatique, la géologie et la gestion forestière.

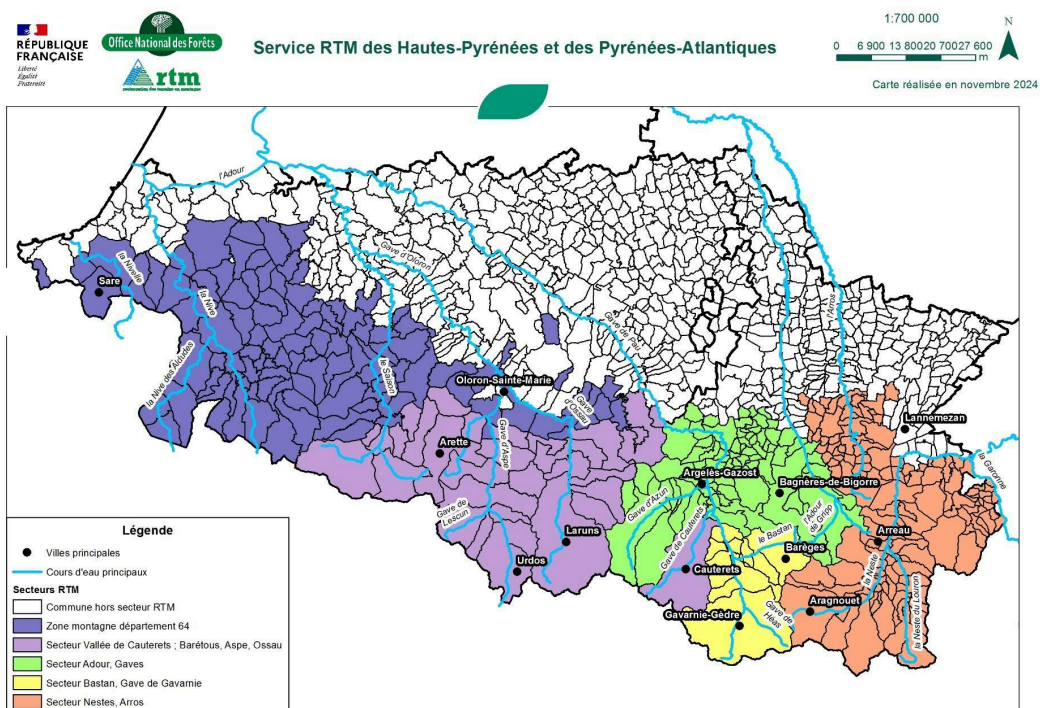


Figure 5 : Distribution des territoires du service RTM des Hautes-Pyrénées entre les responsables de secteurs risques naturels (C. Compagnet, ONF)

1.2 Présentation des missions du stage

1.2.1 Commande ministérielle dans le cadre du Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG)

Face à aux transformations des milieux glaciaires et périglaciaires dûes au changement climatique, le PAPROG a été mis en place en 2019 par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), sous l'égide du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. Ce programme national s'articule autour de quatre axes majeurs visant à mieux connaître, évaluer, prévenir et gérer ces risques (Lacroix, 2022) :

1. **L'amélioration des connaissances des phénomènes glaciaires et périglaciaires** : le premier volet consiste à réaliser des inventaires et à actualiser les données concernant les Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP). Ces inventaires permettent d'identifier les zones sensibles, d'évaluer la dynamique des phénomènes glaciaires et périglaciaires, ainsi que de caractériser leur potentiel générateur de risques.
2. **Recensement des enjeux et vulnérabilités** : ce deuxième axe consiste à recenser les éléments exposés aux risques, qu'il s'agisse des populations humaines, des infrastructures (routes, ouvrages hydrauliques, bâtiments), des activités économiques ou des espaces naturels sensibles. L'objectif est de cartographier les vulnérabilités afin d'établir des priorités d'action adaptées aux contextes locaux et régionaux.
3. **Mise en place d'actions de prévention et de réduction des risques** : En s'appuyant sur les diagnostics réalisés, le PAPROG met en œuvre des mesures concrètes visant à limiter les

conséquences des aléas glaciaires et périglaciaires. Cela comprend la conception et l'installation d'ouvrages de protection, l'intégration des risques dans les documents d'urbanisme (Plans de Prévention des Risques Naturels, PPRN), ainsi que la sensibilisation des acteurs locaux et des populations concernées.

4. **Développement de dispositifs d'anticipation et de gestion de crise :** Face à la soudaineté et à la gravité possible des risques glaciaires, PAPROG renforce les systèmes de surveillance et d'alerte et peut former les acteurs territoriaux à la gestion des situations d'urgence.

Dans ce contexte, le rôle du RTM est de réaliser l'évaluation de la sensibilité des territoires français aux ROGP. Avec des partenaires scientifiques (laboratoire EDYTEM, CNRS), le RTM mènent des inventaires détaillés des formes glaciaires et périglaciaires sur les massifs alpins et pyrénéens. Ces données permettent de hiérarchiser les bassins versants selon leur exposition aux risques et d'orienter les actions publiques vers les zones les plus exposées.

1.2.2 Objectifs du stage

Ce stage de six mois s'inscrit dans ce contexte et porte sur l'analyse des ROGP à l'échelle de l'ensemble de la chaîne pyrénéenne. Il fait suite aux inventaires réalisés en 2022, 2023 et 2024 sur les glaciers rocheux, glaciers blancs, permafrost et lacs glaciaires (Cartographies des ROGP réalisées par département en [annexe 1](#)). La mission principale, à terme, est l'étude de risque de ces quatre types de ROGP (tableau 1).

Compte tenu du temps imparti, il n'a pas été possible de mener une analyse complète pour les quatre phénomènes. Le travail s'est donc concentré sur l'étude des glaciers blancs et sur une partie des lacs glaciaires, sans inclure les glaciers rocheux ni les parois en permafrost. L'étude des glaciers blancs avait déjà été réalisée dans les Alpes, le service RTM des Pyrénées s'appuie ainsi sur l'expertise et l'expérience acquises dans ce massif pour adapter la méthodologie au contexte pyrénéen. Concernant l'analyse des lacs, seuls les lacs proglaciaires (à moins d'un kilomètre d'un glacier) ont été traités dans le cadre du stage.

Tableau 1 : Les quatre risques d'origine glaciaire et périglaciaire et l'avancée de leur étude

Risques d'origine glaciaire et périglaciaire	Inventaire réalisé	Phénomène étudié	Analyse des risques
Glacier blanc	Inventaire 2023	Avalanche de glace, chute de séracs, vidange de poche d'eau sous-glaciaire	Réalisée lors de ce stage
Glacier rocheux	Inventaire 2022	Effondrement, chute de blocs	À réaliser
Permafrost	Inventaire 2024	Effondrement de paroi	À réaliser

Lac glaciaire	Inventaire 2024	Vidange brutale par surverse ou rupture de barrage morainique	Lacs proglaciaires réalisés, à poursuivre pour les autres types (thermokarstiques, anthropiques)
---------------	-----------------	---	--

Les missions confiées dans le stage se sont articulées autour de trois axes principaux. Le premier concerne la cartographie des bassins-versants des ROGP à l'échelle des Pyrénées à l'aide de l'outil *creer_bv* mis en place par A. Maisondieu (RTM). L'objectif est de créer par département les bassins versants comprenant des ROGP recensés dans les inventaires mentionnés précédemment. Cette étape permettra de donner par la suite un niveau de risque des ROGP à l'échelle des bassins versants pour une meilleure compréhension des territoires.

Le deuxième axe porte sur l'analyse des risques liés aux glaciers blancs dans les Pyrénées françaises. Cette démarche repose sur plusieurs étapes : d'abord l'évaluation de l'aléa, fondée sur l'estimation de la probabilité et de l'intensité d'événements glaciaires tels que les chutes de séracs, les avalanches de glace ou encore les ruptures de poches d'eau sous-glaciaires ; puis le croisement de cet aléa avec les enjeux identifiés afin d'établir un niveau de risque par bassin versant. Pour compléter cette analyse, la méthode de la ligne d'énergie a été mobilisée afin de déterminer l'angle de chute susceptible d'atteindre un enjeu.

Enfin, le troisième axe concerne l'analyse des risques liés aux lacs proglaciaires dans les Pyrénées françaises, sur la base de l'inventaire réalisé par L. Laurent (2024). Selon une approche similaire mais des critères de risques différents à celle utilisée pour les glaciers blancs, une note d'aléa et de risque a été attribuée à chacun des lacs recensés.

Ce stage a duré six mois, du 10 mars au 31 août 2025. Il s'est déroulé en plusieurs étapes comme l'illustre le calendrier ci-dessous (figure x). Les deux premiers mois ont été consacrés à la prise en main du sujet, aux lectures bibliographiques et aux premières sorties de terrain. Les mois de mai, juin et juillet ont été des mois de "production" : analyse des risques glaciaires et périglaciaires, création des bassins versants à l'échelle de la chaîne pyrénéenne, tri des couches enjeux, rédaction du rapport pour le RTM, etc. Enfin, le mois d'août était consacré à l'analyse de risque des lacs proglaciaires, au tri des données produites et à une production de note synthétique pour le futur stagiaire.

10 mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	31 août
Lecture bibliographique	Travail SIG sur la création des bassins versants	Travail SIG sur la création des bassins versants	Travail SIG sur la création des bassins versant	Proposition d'une typologie pyrénéenne des glaciers blancs	Analyse de risque des lacs proglaciaires
Prise de contact avec les personnes ressources dans les Alpes	Recherche sur les concepts de glaciologie	Définition des concepts de phénomène - aléa - risque	Tri des couches enjeux sur les 5 départements pyrénéens (64, 65, 31, 09, 66)	Rédaction rapport RTM	Rédaction du mémoire
Formation Flow-R (modélisation des laves torrentielles)	Analyse générale sur les glaciers blancs pyrénéens	Application de la méthode alpine pour rechercher les zones sources potentielles des ROGP	Rédaction rapport RTM	Analyse de risque des lacs proglaciaires	Tri et rangement des données produites
	Création de la carte des pentes (SIG)			Sortie de terrain au glacier des Oulettes de Gaube	Rédaction d'une note de synthèse à léguer à la prochaine personne travaillant sur PAPROG
				Tournée inter-massif RTM pendant 3 jours	

Travail de recherche Travail secondaire Production Travail SIG Rédaction

Figure 6 : Répartition des tâches réalisées pendant le stage

Au cours de mon stage, j'ai aussi pu aller sur le terrain environ une fois par semaine pour accompagner les responsables de secteurs au suivi des ouvrages (paravalanches, correction torrentielle) et à l'expertise de risque. Voici quelques exemples :



Figure 7 : suivi d'ouvrages paravalanches au Capets (65)



Figure 8 : étude de risque suite à une chute de blocs sur la route menant au Pic de Long (Néouvielle)

J'ai aussi pu participer pendant trois jours à la tournée inter-massif RTM dans les Pyrénées-Orientales. Tous les agents du RTM au niveau national étaient conviés, l'objectif est d'échanger et de voir ce qui se passe dans d'autres services. En l'occurrence, ces trois jours étaient dédiés aux conséquences des feux de forêts sur les risques torrentielles.

1.3 Présentation du territoire d'étude : les glaciers blancs pyrénéens

Étudier l'entière de la chaîne pyrénéenne nécessite une compréhension de ses principales caractéristiques géographiques.

Les Pyrénées s'étendent sur environ 430 km d'ouest en est, depuis l'océan Atlantique jusqu'à la mer Méditerranée, formant une frontière naturelle entre la France et l'Espagne. Elles culminent au pic de l'Aneto (3 404 m côté espagnol) et compte plusieurs sommets français dépassant les 3 000 m, dont le Vignemale (3 298 m) et le pic Long (3 192 m).

La chaîne des Pyrénées a été modelée par les glaciations quaternaires, notamment lors du Dernier Maximum Glaciaire (DMG), il y a environ 20 000 ans. Durant cette période, les glaciers descendaient bien en dessous des vallées actuelles, atteignant parfois les piémonts, comme en témoignent les moraines frontales conservées à Lourdes (65) ou Oloron-Sainte-Marie (64). Les principaux massifs abritaient d'imposants glaciers de vallée, tels que ceux du Vignemale, de la Maladeta ou du Mont Perdu, qui pouvaient s'étendre sur plusieurs dizaines de kilomètres.

L'inventaire des glaciers blancs a été réalisé en 2023 par l'association Moraine. Ce jeu de données se présente sous la forme d'un fichier vectoriel (shapefile) délimitant les contours des glaciers blancs sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne. Il comprend 22 polygones correspondant pour 15 glaciers, certains étant constitués de plusieurs entités distinctes ou de « lambeaux ». Ci-dessous le nom de ses glaciers et leurs surfaces en 2023 :

Tableau 2 : Inventaire des glaciers pyrénéens français (Association Moraine, 2023)

Massif	Glacier	Surface (ha) 2023
Balaïtous (3144m)	Las Néous	2.3
Vignemale (3298 m)	Ossoue	24
	Oulettes de Gaube	5.5
	Petit Vignemale	1.4
Gavarnie -Mont-Perdu (3355 m)	Gabiétous	8
	Taillon	5.7
	Pailla Ouest	1.7
	Pailla Est	2.9
	Astazou	4.6
Munia (3133 m)	Munia	2.6
	Barroude	2.4
Luchonnais (3222 m)	Seil de la Baque E	5
	Portillon d'Oô	1.3
	Boum	1.3
Mont Vallier (2838 m)	Arcouzan	1.4
Total		70.1

Les voici représentés spatialement sur la carte ci-dessous :

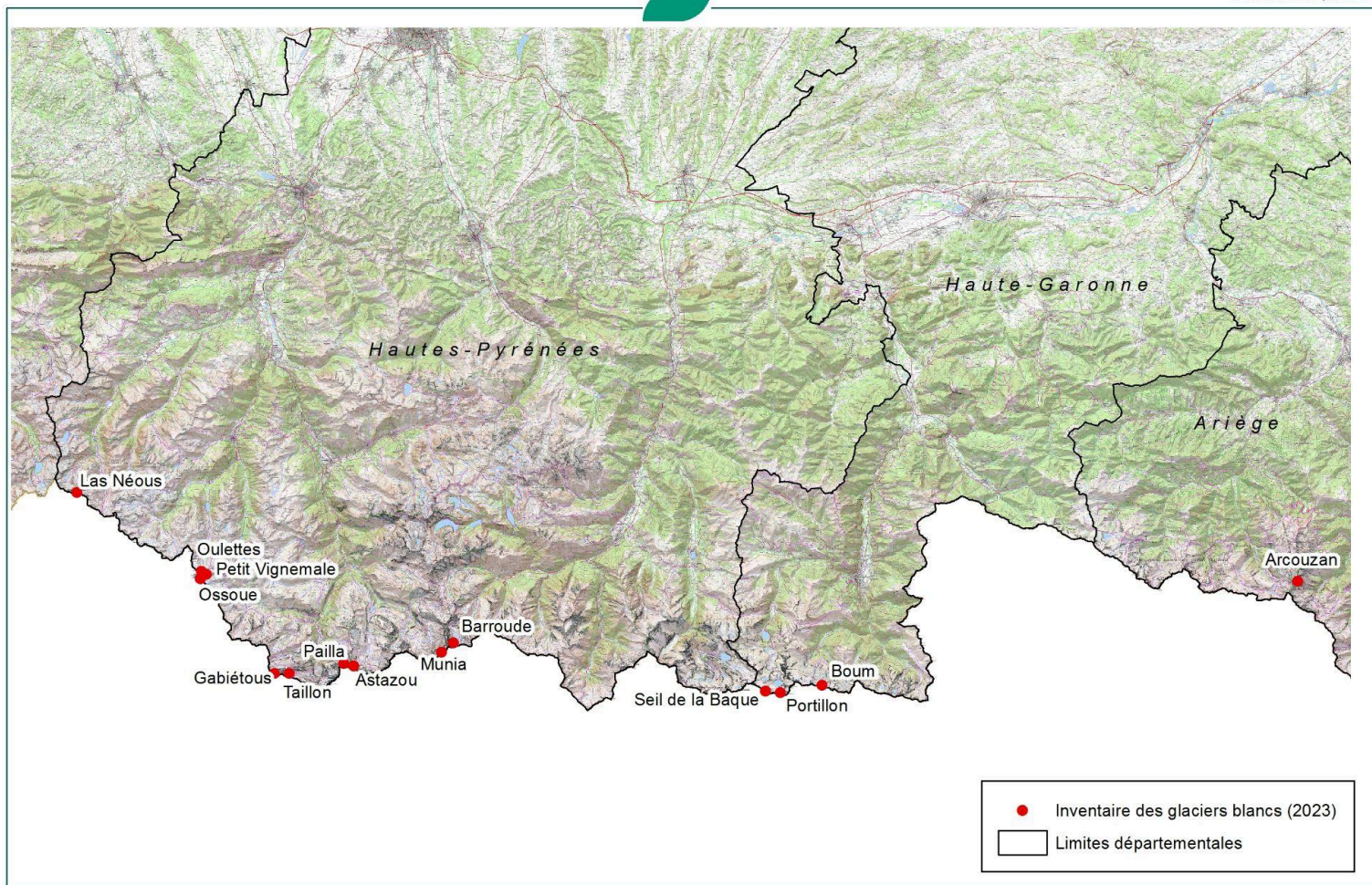


Figure 9 : Cartographie des glaciers blancs dans les Pyrénées françaises (basé sur l'inventaire de 2023, Association Moraine)

Partie 2 : Cadre théorique et enjeux du stage

2.1 Définition et fonctionnement des glaciers blancs : concepts de glaciologie

Il semble important de traiter de manière générale le fonctionnement des glaciers, ce qui facilitera la compréhension des chapitres suivants.

2.1.1 Naissance et vie d'un glacier

Un glacier blanc se forme lorsque les précipitations neigeuses dépassent la fonte estivale. Cette accumulation annuelle de neige, lorsqu'elle persiste au fil des saisons, subit une série de transformations physiques liées à la pression exercée par les couches supérieures et aux cycles thermiques de gel et de dégel (Aellen, 1989).

La neige fraîche se tasse et se transforme progressivement en **névé**, une matière granuleuse plus dense, intermédiaire entre la neige et la glace. Ce processus de densification peut être immédiat dans l'hiver ou se poursuivre sur plusieurs années : les cristaux de neige se soudent, des bulles d'air sont piégées puis progressivement expulsées, tandis que l'eau de fonte, en s'infiltrant et en regelant, contribue à souder les grains entre eux. Le névé se métamorphose peu à peu en glace bulleuse, puis en glace compacte, translucide et imperméable (Luzianovich, 2008).

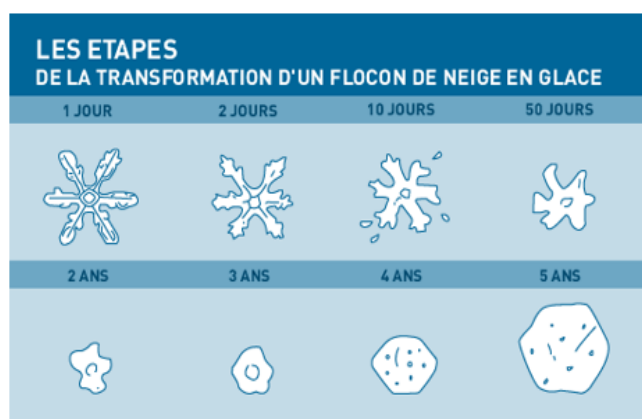


Figure 10 : Processus de création de la glace
(PolarPod, Encyclopédie polaire)

Pour définir un glacier, la pérennité est un concept clé, c'est-à-dire que la glace ne fond jamais entièrement comme l'exprime P. René *“un seul critère permet donc de définir un glacier, et de le distinguer d'un névé, celui de la durée”*(Glaciers des Pyrénées, le réchauffement climatique en images, 2013).

Le fonctionnement d'un glacier repose sur son bilan de masse, c'est-à-dire la différence entre l'accumulation (apports liés aux précipitations neigeuses, au givre, au regel de l'eau de fonte) et l'ablation (pertes dues à la fonte, la sublimation et le ruissellement). Lorsque l'accumulation excède les pertes, le glacier s'épaissit et avance. A l'inverse, un bilan négatif provoque un recul du glacier. L'équilibre glaciaire est atteint lorsque ces deux flux s'égalisent. Spatialement, cela se traduit par une séparation nette entre la zone d'accumulation, généralement en altitude, et la zone d'ablation, en aval, où la glace fond plus qu'elle ne se renouvelle (Encyclopædia Universalis, s.d.).

Un glacier bouge, glisse le long de sa pente et subit un tas de déformations. Lorsque la déformation est importante, la glace se casse et se déchire en crevasse. Si l'intensité est importante, des morceaux peuvent se détacher, on les appelle des *séracs*.



Figure 11 : crevasses et séracs sur le glacier des Oulettes de Gaube (juillet 2025)

L'histoire des glaciers s'inscrit dans une perspective géologique longue, celle des variations climatiques du Quaternaire, période couvrant les 2,6 derniers millions d'années. Cette ère est marquée par l'alternance de périodes glaciaires, durant lesquelles les glaciers se sont largement étendus dans les vallées de montagne, et de périodes interglaciaires, plus tempérées, favorisant leur recul. Ces fluctuations sont principalement attribuées aux cycles de Milanković, variations cycliques de l'orbite et de l'inclinaison de la Terre, modulant la répartition de l'énergie solaire reçue à la surface du globe.

Depuis le début de l'Holocène, il y a environ 11 700 ans, les glaciers ont globalement régressé, bien que cette tendance ait été ponctuée de fluctuations climatiques plus fraîches. La plus marquante fut le Petit Âge glaciaire (PAG), période s'étendant approximativement de 1350 à 1850, durant laquelle les températures moyennes étaient de 0,5 à 1,5 °C inférieures à celles d'aujourd'hui. Depuis la fin du XIXe siècle, cette dynamique s'est inversée : les glaciers reculent rapidement dans un contexte de réchauffement global, illustrant leur rôle d'indicateur sensible et visible du changement climatique.

2.1.2 Les paysages glaciaires

Comprendre la dynamique des glaciers implique aussi de savoir identifier les formes qu'ils laissent dans le paysage. Un glacier est toujours en mouvement et interagit avec le relief, en érodant, le modelant et y déposant des matériaux. Ces processus laissent des marques visibles, qui permettent de comprendre l'histoire glaciaire d'un territoire et de mieux comprendre les dynamiques naturelles qui y ont eu lieu. Voici les formes géomorphologiques les plus communes laissées par les glaciers :

Par érosion, le glacier façonne des **vallées en auge**, au profil transversal en U, avec un fond plat et large et des versants abrupts.



Figure 12 : Auge glaciaire, vallée de Gaube depuis le glacier des Oulettes (juillet 2025)

Lors de sa fonte, le glacier laisse derrière lui des dépôts de sédiments appelés **moraines**.

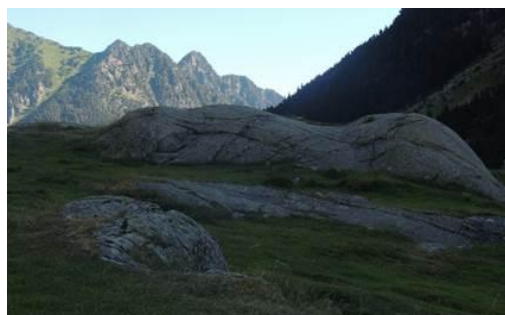
Ce sont des crêtes ou amas irréguliers de débris rocheux (till) déposés directement par le glacier et constitués de blocs, graviers et sables mal triés (Bendle, 2020). On distingue les moraines latérales (sur les flancs du glacier), les moraines frontales ou terminales (à son extrémité, marquant son maximum d'extension), et les moraines médianes (qui résultent de la réunion de deux langues glaciaires). Ces dépôts morainiques constituent des indices majeurs de l'extension passée des glaciers (Allen, 1989).

Figure 13 : moraines médianes entre le glacier du Petit Vignemale et des Oulettes (juillet 2025)



Sous la glace, les blocs emprisonnés raclent la surface du substrat, provoquant un polissage et des **stries**, marques linéaires orientées dans le sens d'écoulement du glacier. Ces phénomènes peuvent aussi entraîner des formes spécifiques comme les **roches moutonnées** ou **dos de baleine**, blocs aux formes arrondies sur un flanc et abruptes sur l'autre.

Figure 14 : dos de baleine et roches striées, Oulettes de Gaube



Ce schéma propose une vision d'ensemble du fonctionnement des systèmes glaciaires et des principales formes modelées par les glaciers.

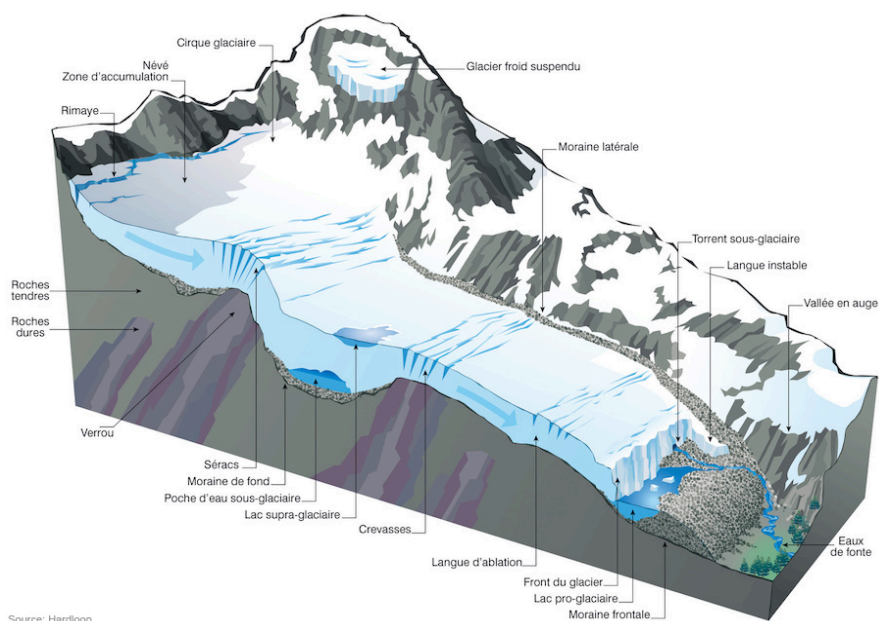


Figure 15 : Représentation schématique des formes glaciaires et périglaciaires (source : Hardloop, 2024)

Il permet de visualiser l'organisation spatiale des différents éléments liés à la dynamique glaciaire : depuis la zone d'accumulation en amont, où la glace se forme, jusqu'à la zone d'ablation en aval, où elle fond. On y repère également les formes d'érosion caractéristiques (cirques, vallées en auge, roches moutonnées), les types de dépôts morainiques, ainsi que les lacs associés à la fonte glaciaire (supraglaciaires, proglaciaires, etc.).

2.1.3 Les paysages périglaciaires

Dans le cadre de ce travail, il semble important de souligner que les paysages ne sont jamais figés. Même en l'absence de glacier actif aujourd'hui, les régions dites périglaciaires (en marge des anciennes zones englacées) restent des milieux dynamiques, modelés en permanence par les effets du gel et de dégel. Ces processus sont invisibles à l'œil nu à l'échelle d'une journée ou d'une saison, mais ils transforment pourtant profondément les reliefs au fil du temps.

Les éléments développés dans cette partie s'appuient principalement sur le rapport de stage de Stanislas Luzianovich (2008) intitulé *La vallée de Campan et la géomorphologie des Pyrénées-Centrales*, un document consulté dans le cadre de mon stage au RTM, non accessible en ligne.

Le pergélisol : fondement des dynamiques périglaciaires

Les milieux périglaciaires se caractérisent notamment par la présence de **pergélisol** (ou permafrost), c'est-à-dire une portion de sol ou de roche restant gelée de manière permanente pendant au moins deux années consécutives. Ce sol "pris dans la glace" peut contenir d'importants volumes d'eau gelée. Chaque été, seule la couche supérieure — dite couche active — dégèle temporairement, ce qui génère une série de processus géomorphologiques particuliers.

La gélifraction : quant la roche éclate sous la pression du gel-dégel

Le gel-dégel alterné est l'un des mécanismes les plus puissants de désagrégation des roches. L'eau s'infiltre dans les fissures de la roche, puis gèle lorsqu'elle est soumise à des températures négatives. En se solidifiant, elle augmente de volume de 9 %, exerçant une pression qui peut atteindre 15 kg/cm², ce qui finit par fracturer la roche. Ce processus, appelé **gélifraction**, produit des débris anguleux appelés **gélifractions**. Ces formations sont typiques des reliefs périglaciaires en montagne, et témoignent d'une érosion lente mais continue.

La cryoturbation : une réorganisation du sol par la glace

Autre processus essentiel : la **cryoturbation**, qui désigne le mélange vertical des horizons du sol sous l'effet du gel. En hiver, la formation de lentilles ou de cristaux de glace (*pipkrakes*) soulève les matériaux ; au printemps, leur fonte entraîne des affaissements désordonnés. Ce brassage provoque l'apparition de motifs géométriques à la surface du sol : polygones de gel, rayures, ou petits cercles pierreux.

La solifluxion : un écoulement lent du sol dégelé

Avec le dégel printanier, la couche active devient temporairement saturée en eau. Ne pouvant s'infiltrer plus bas à cause de la présence du sol encore gelé, l'eau rend la terre pâteuse et instable. La couche superficielle glisse alors lentement en aval sous l'effet de la gravité. Ce fluage très lent

(quelques millimètres à centimètres par an) donne naissance à des formes arrondies et lobées sur les pentes, visibles sous forme de terrasses, bourrelets ou coulées. Ces traces témoignent d'un sol en perpétuel mouvement, même dans un contexte apparemment immobile.

Les glaciers rocheux : formes mixtes, témoins d'un pergélisol actif

Parmi les formes les plus emblématiques des milieux périglaciaires figure le glacier rocheux. Il s'agit d'un amas de débris rocheux grossiers contenant une proportion importante de glace interne, qui se déplace lentement par fluage, de l'ordre de quelques centimètres à quelques mètres par an. Ces formes, situées généralement sous des talus d'éboulis en altitude, ont un aspect lobé, parfois comparé à une coulée de lave. Contrairement aux glaciers classiques, leur dynamique est liée à la déformation de leur glace enfouie, ce qui les rend très sensibles à l'évolution du pergélisol.

Loin d'être figés, les paysages périglaciaires sont en constante évolution, sculptés année après année par les effets du gel-dégel. La fragmentation des roches, les mouvements lents de la couche active, ou encore l'existence de glaciers rocheux modèle les versants et les fonds de vallée. Même en l'absence de glace visible, le froid reste un outil puissant de la transformation du relief, construisant des paysages complexes, instables et sensibles aux variations climatiques.

2.2 Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire

Après avoir décrit la dynamique et la structuration des paysages glaciaires et périglaciaires, il convient désormais d'aborder les risques associés à ces milieux. Cette section vise à définir les notions clés pour appréhender ces risques et à dresser un état des connaissances actuelles sur ces phénomènes.

2.2.1 Définitions et typologie

Formes Géomorphologiques Glaciaire et Périglaciaire (FGGP)

À l'échelle nationale, quatre grandes catégories de formes géomorphologiques glaciaires et périglaciaires (FGGP) sont identifiées : les glaciers blancs, les glaciers rocheux, les parois à permafrost, ainsi que les lacs glaciaires et périglaciaires. Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons uniquement sur les glaciers blancs.

Phénomène

Le mot "phénomène" vient du grec *phainomenon*, signifiant « ce qui apparaît ». Il désigne un fait observable pouvant être appréhendé par l'expérience ou l'observation. En sciences, un phénomène est analysé pour en comprendre les mécanismes, les causes, l'intensité et l'amplitude (Larousse, en ligne).

Aléa

L'aléa est défini par le GIEC (2014, p.5) comme :

« L'éventualité d'un phénomène ou d'une tendance physique, naturelle ou anthropique, ou d'une incidence physique, susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, ainsi que des dégâts et des pertes matérielles touchant les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la fourniture des services, les écosystèmes et les ressources environnementales. »

L'évaluation d'un aléa repose sur trois éléments fondamentaux : **la probabilité** d'occurrence du phénomène, **son intensité**, c'est-à-dire l'énergie qu'il développe et **son extension spatiale**, autrement dit l'ampleur de la zone potentiellement affectée

Zone source

Les zones sources sont définies comme « *l'estimation de l'extension spatiale maximale dans des zones de départ potentielles. En d'autres termes, les zones sources représenteront la surface maximale estimée pouvant devenir instable et se rompre* » (Faillietaz, 2021).

Elles sont ici considérées comme des aires, exprimées en m².

Emprise

« *L'emprise est définie comme les zones maximales potentielles pouvant être atteintes par la propagation d'un phénomène* » (Faillietaz, 2021).

Enjeux

Les enjeux désignent « *l'ensemble des personnes, infrastructures, biens matériels, patrimoines naturels ou culturels, activités économiques ou sociales qui pourraient être affectées, directement ou indirectement par la survenue d'un phénomène naturel* » (GIEC, 2014, p.5).

Exposition

Selon le GIEC (2014, p.5), l'exposition se définit comme :

« *La présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou un contexte susceptible de subir des dommages.* »

L'exposition traduit donc la relation spatiale entre les enjeux et les aléas.

Vulnérabilité

Le GIEC (2014, p.5) définit la vulnérabilité comme :

« *La propension ou la prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité, ainsi que l'incapacité à faire face et à s'adapter.* »

Risques

Le risque est défini par le rapport du GIEC comme les « *conséquences éventuelles [incidences ou impacts] et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur (...). Le risque résulte de l'interaction de la vulnérabilité, de l'exposition et des aléas (...)* » (GIEC, 2014, p. 5)

Autrement dit, un risque existe uniquement si un aléa est susceptible d'affecter des enjeux exposés et vulnérables.

Risques d'origine glaciaire et périglaciaire (ROGP)

Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire (ROGP) désignent “*l'ensemble des aléas naturels liés aux dynamiques de la cryosphère de haute montagne, et plus spécifiquement aux phénomènes instables associés aux glaciers, aux glaciers rocheux, aux lacs glaciaires et aux terrains affectés par le pergélisol (permafrost)*”(Failletaz, 2021). Ils peuvent inclure des chutes de séracs, des ruptures de glaciers, des vidanges brutales de lacs glaciaires (*glacial lake outburst floods* – GLOF), des écroulements de versants déstabilisés par la fonte du permafrost, ou encore la mobilisation de matériaux morainiques ou supra-glaciaires.

2.2.2 État des connaissances scientifiques sur les dynamiques glaciaires et leur instabilité dans le monde

Les risques glaciaires et périglaciaires suscitent un intérêt scientifique croissant depuis plusieurs décennies, en particulier dans le contexte actuel de réchauffement climatique qui accélère la fonte des glaces et multiplie les phénomènes extrêmes en montagne. Si les premières études de risques glaciaires remontent aux années 1950-1970 dans les Alpes, ce n'est qu'au tournant des années 2000 que les recherches se sont intensifiées et diversifiées, notamment grâce aux progrès de la télédétection, des systèmes d'information géographique (SIG) et de la modélisation numérique (RTM, 2024).

Dans les Alpes, notamment en Suisse, en France et en Italie, les phénomènes d'avalanches de glace, de crues glaciaires (Global Lake Outburst Flood, GLOF's) ou de ruptures de glaciers sont documentés. Des événements marquants comme la rupture du glacier Allalin en 1965 ou la menace du lac intra-glaciaire du glacier de Tête Rousse à partir de 2010 ont donné lieu à des programmes de recherche et de surveillance pilotés par des institutions comme le WSL-SLF (Suisse), l'ONF-RTM ou le CNRS en France.

En Himalaya, la fonte rapide des glaciers entraîne la formation de nombreux lacs proglaciaires potentiellement instables. Des structures comme l'ICIMOD (International Centre for Integrated Mountain Development), soutenues par des collaborations avec des chercheurs français (IRD, CNRS) et népalais, ont mis en évidence les risques liés aux lacs Imja, Tsho Rolpa ou Thulagi. La région est considérée comme l'un des principaux foyers de GLOF's dans le monde, avec des impacts potentiellement catastrophiques pour les populations en aval (Richardson et Reynolds, 2000).

Les Andes, notamment au Pérou et en Bolivie, constituent également un terrain d'étude (Emmer, Wood et Cochachin, 2024). L'histoire de la crue du lac Palcacocha en 1941, qui fit des milliers de victimes à Huaraz, a marqué les esprits et initié les premières politiques de gestion des lacs glaciaires.

Les régions polaires, bien que moins habitées, font aussi l'objet d'études pour comprendre les implications globales de l'instabilité glaciaire sur l'élévation du niveau marin. Au Groenland comme en Antarctique, les travaux de la NASA et de l'Université de Leeds ont révélé “*des mécanismes de désintégration accélérée des plateformes glaciaires*”, comme celle du Larsen B, ou les risques liés à la fonte du glacier Thwaites, surnommé « *glacier de l'apocalypse* » (Scambos et al., 2004).

D'autres zones de haute montagne, montrent également des fragilités importantes. En Alaska, au Caucase ou en Asie centrale, les instabilités glaciaires sont suivies par des organismes nationaux, mais avec des difficultés d'accès au terrain. Les mouvements gravitaires liés au dégel du permafrost, les ruptures de séracs, ou encore les effondrements de flancs de montagne sont désormais étudiés comme des phénomènes en cascade, où les aléas se combinent et se renforcent.

Face à la montée de ces risques, la recherche s'oriente vers une approche qui mêle des observations et des modélisations. De nombreuses institutions universitaires (Université de Zurich, Grenoble, Leeds, Milan), centres de recherche (IRD, CNRS, CNR) et agences gouvernementales (NASA, USGS, ONF) participent à ces recherches.

2.2.3 Les glaciers blancs et les risques qui leur sont associés

Les glaciers blancs sont à l'origine de plusieurs types de phénomènes naturels pouvant représenter des risques importants pour les zones aval. Ces risques résultent principalement de l'instabilité des masses glaciaires et des interactions entre la glace, l'eau et les matériaux glaciaires environnants.

Avalanches de glace

Les avalanches de glace surviennent lorsqu'une masse importante de glace se détache brutalement d'un glacier, souvent par **rupture de séracs** ou glissements au niveau du front glaciaire. Ces écoulements rapides de glace se produisent soudainement et atteignent des vitesses très élevées, engendrant un fort pouvoir destructeur. La déstabilisation des séracs est souvent favorisée par la dégradation thermique due au réchauffement, qui fragilise la cohésion de la glace (Lacroix, Mayet & Roche, 2022).



Figure 16 : Avalanche de glace "200 000 mètres cubes de glace dévalent plus d'un kilomètre" (Cortay, 2015)

Vidange brutale de poches d'eau sous-glaciaires et lave torrentielle

Les lacs glaciaires et proglaciaires, retenus par des moraines ou des barrières de glace, constituent une source majeure de risque. La rupture soudaine de ces barrages naturels peut provoquer des inondations violentes en aval, caractérisées par un fort débit et un transport massif d'eau, de glace et de sédiments (Taylor, 2023). Ce phénomène, connu sous le terme de *Glacial Lake Outburst Flood* (GLOF), présente un fort potentiel destructeur, notamment en termes d'érosion, de dévastation des infrastructures et de menaces sur les populations. Les mécanismes déclencheurs peuvent inclure la surpression hydraulique, la rupture mécanique du barrage ou des événements externes comme des avalanches dans le lac.

Un exemple marquant est l'événement de 1892 au glacier de Tête Rousse dans le massif du Mont-Blanc, où la rupture d'une poche d'eau sous-glaciaire a causé la mort de 175 personnes à Saint-Gervais et dans la vallée de l'Arve.

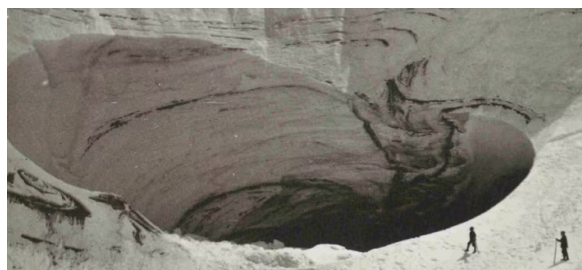


Figure 17 : prise en 1892, cette photo montre une immense cavité dans le glacier de Tête-Rousse, juste après la l'inondation de la vallée (Le Monde, 2010)

Glissement basal du front glaciaire

Les glissements basaux concernent le déplacement du front d'un glacier sur son substrat rocheux. Ce phénomène peut se produire lorsque la base du glacier est lubrifiée en eau de fonte, réduisant la friction entre la glace et le substrat et provoquant une accélération soudaine du glacier. Les glissements basaux peuvent générer des mouvements rapides de glace et de débris, parfois combinés à des éboulements ou à des avalanches de glace, augmentant ainsi la menace pour les zones habitées et les infrastructures situées en aval.

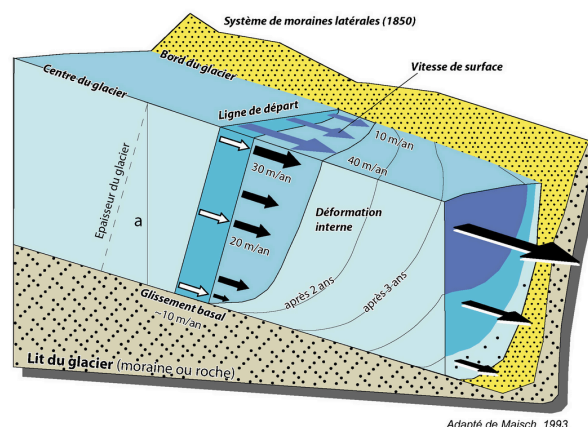


Figure 18 : schéma représentant le glissement basal d'un glacier alpin (Géomorphologie de la montagne, fiche glacier 12).

2.2.4 Prévenir les risques liés aux glaciers blancs

La prévention des risques liés aux glaciers blancs repose sur une des outils scientifiques, techniques et de gestion du territoire, qui permettent de limiter les conséquences des phénomènes glaciaires instables.

Tout d'abord, la surveillance régulière des glaciers constitue l'élément principal de la prévention. Elle s'appuie sur la télédétection par satellite ou drones (pour détecter les évolutions morphologiques), ainsi que sur des capteurs installés directement sur le terrain pour mesurer les déplacements de glace ou détecter les mouvements anormaux. Ces données permettent d'anticiper les instabilités, comme les chutes de séracs ou les vidanges brutales de lacs glaciaires, et de mettre en place des systèmes d'alerte rapide destinés à protéger les populations.

Par ailleurs, les outils de modélisation jouent également un rôle central. En intégrant les données topographiques, climatiques et physiques, ils permettent de simuler la dynamique des glaciers, d'évaluer la probabilité d'un phénomène, sa portée et ses impacts potentiels.

Lorsqu'un risque est identifié, des mesures concrètes peuvent être mises en œuvre par les gestionnaires (Etat et/ou communes) : le drainage contrôlé de lacs glaciaires est l'une des solutions les plus connues. C'est le cas du lac glaciaire des Bossons, où une galerie a été creusée dans la glace pour évacuer progressivement l'eau d'un lac suspendu au-dessus de Chamonix. Des digues, barrières ou bassins de rétention peuvent aussi être construits pour canaliser ou freiner les flux issus d'une vidange brutale ou d'un effondrement de sérac.

Etude de cas : les travaux de vidange du lac des Bossons

Ce cas emblématique, documenté dans un film de Julien Ferrandez / Ubac Media publié en avril 2025, illustre concrètement la prévention d'un risque glaciaire majeur.

Dans le massif du Mont-Blanc, la formation d'un lac en bordure du glacier des Bossons a engendré une menace directe pour Chamonix : habitations, campings, routes et infrastructures se trouvaient

potentiellement exposés à une crue torrentielle en cas de rupture brutale de la cavité glaciaire. Les étapes clés sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Chronologie de l'événement glaciaire au lac des Bossons

Date	Événement
2018	Détection d'un lac supra-glaciaire sur le glacier des Bossons (observation terrain et drone).
2021-2022	Études techniques menées par l'ONF-RTM, la commune de Chamonix, le SM3A et les services de l'État (diagnostic de risque, mesures topographiques, modélisation hydraulique).
Printemps 2023	Finalisation du scénario de gestion du risque : décision d'engager une vidange contrôlée .
Juin 2023	Début des travaux préparatoires : acheminement de la pelle araignée, ouverture d'un chenal de vidange.
31 juillet 2023	Vidange du lac glaciaire par écoulement contrôlé : l'eau s'évacue par le chenal sans provoquer de crue.
Automne 2023	Phase de surveillance post-vidange + retour d'expérience.



Figure 19 : travaux de vidange à la pelle araignée, Radio Mont Blanc, 2 août 2023

Ces travaux illustrent bien la nécessité d'étudier et d'appréhender les risques glaciaires. Sans la mise en place d'une surveillance, suivie des travaux, une vidange brutale aurait pu se produire à tout moment, provoquant une crue torrentielle en aval.

A ces mesures techniques s'ajoutent des actions de gestion territoriale par l'intégration des aléas glaciaires dans les documents d'urbanisme (cartes de risque), des réglementations de l'occupation des sols dans les zones vulnérables (fermeture de camping par exemple), sensibilisation des habitants, élus à ces nouveaux risques.

Mon stage s'inscrit dans cet "effort collectif", en visant à mieux comprendre les formes d'instabilités associées aux glaciers blancs dans les Pyrénées. Grâce à l'analyse de données géomorphologiques et glaciologiques, je participe à l'identification et à la cartographie des zones potentiellement instables.

2.3 Connaissances des risques glaciaires dans les Pyrénées face au changement climatique

2.3.1 Historique des études des formes glaciaires dans les Pyrénées

La compréhension des risques liés aux glaciers dans les Pyrénées repose avant tout sur une bonne connaissance des dynamiques glaciaires passées et présentes. Contrairement aux Alpes, où les glaciers ont été étudiés dès le XVII^e siècle en raison de leur taille et de leur impact direct sur les vallées habitées, les glaciers pyrénéens ont longtemps été perçus comme moins imposants, et donc moins préoccupants du point de vue des aléas. Leur étude scientifique a ainsi commencé plus tardivement, mais elle s'est progressivement structurée autour d'enjeux liés à l'évolution des paysages, à la ressource en eau, et plus récemment, aux risques naturels émergents.

L'étude des glaciers pyrénéens débute à la fin du XVIII^e siècle, avec les premières observations scientifiques menées par Louis Ramond de Carbonnières. Dès 1789, cet explorateur naturaliste observe et décrit les paysages glaciaires lors de ses expéditions autour du massif du Mont-Perdu (René, 2025). Ces premières descriptions marquent le début de l'intérêt scientifique pour les formes glaciaires pyrénéennes, même si la notion de risque reste alors absente.

Au XIX^e siècle, l'intérêt pour la montagne et les glaciers s'intensifie avec l'essor du **pyrénéisme**, une approche intellectuelle et artistique de la montagne développée notamment par Henri Beraldi, qui en 1898 définit ce courant comme un "*mélange d'ascension, de sensibilité et d'écriture autour des Pyrénées*" (Les vallées de Gavarnie, s.d.).

A cette époque, l'étude des glaciers prend de l'ampleur. En 1857, Aimé Civiale réalise la première photographie connue d'un glacier dans les Pyrénées, celui de la Maladeta. À la même époque, Franz Schrader, pyrénéiste, géographe et dessinateur, joue un rôle clé dans la représentation des reliefs pyrénéens. Il invente l'orographe, un instrument de dessin en relief, et réalise des cartes topographiques très détaillées, en particulier dans les Hautes-Pyrénées (Les vallées de Gavarnie, s.d.).

Parmi les travaux majeurs, on peut également citer Joseph Vallot qui en 1887 publie *Oscillations des glaciers dans les Pyrénées françaises*, une étude détaillée sur les variations du front glaciaire observées dans le temps, montrant déjà que ces glaciers connaissent des phases de recul et d'expansion (Vallot, 1887). À partir de 1891, le prince Roland Bonaparte soutient activement les recherches glaciaires dans les Pyrénées, qui étaient jusque-là surtout concentrées dans les Alpes. Il publie *Variations périodiques des glaciers français*, où il compile des données issues des Alpes et des Pyrénées (Bonaparte, 1892). Ces travaux participent à une première tentative de synthèse nationale sur les glaciers.

Au début du XX^e siècle, les travaux prennent une forme plus scientifique. L'abbé Ludovic Gaurier, alpiniste, cartographe et hydrologue, joue un rôle central dans l'inventaire des glaciers pyrénéens. Il publie en 1921 un ouvrage fondamental : *Études glaciaires dans les Pyrénées françaises et espagnoles de 1900 à 1909*, fruit de près de dix ans d'observations détaillées sur le terrain, des deux côtés de la

frontière (*Gaurier, 1921*). Ce travail permet d'avoir une vision précise de l'état des glaciers au début du XXe siècle.

Plus tard, sous l'autorité du Ministère de l'Agriculture, les Services des Eaux et Forêts et du Génie rural publient plusieurs volumes des *Études glaciologiques*, visant à inventorier les glaciers français. Le Tome VII, consacré aux Pyrénées, paraît en 1934. Il rassemble des mesures, des cartes et des observations glaciologiques couvrant les grands glaciers pyrénéens encore actifs à cette époque (*Ministère de l'Agriculture, 1934*).

À partir des années 1950, les progrès de la photographie aérienne et de la cartographie IGN permettent d'observer plus précisément l'évolution des fronts glaciaires. Plusieurs études universitaires, sont menées notamment sur les glaciers de l'Ossoue ou du Taillon.

En 2002, l'association Moraine, fondée par le glaciologue Pierre René, met en place un suivi annuel de plusieurs glaciers. Il effectue des mesures précises de la longueur, de la surface et du volume des glaciers, et calcule des bilans de masse. Ces données sont utilisées par des programmes comme Glacioclim (CNRS) ou le World Glacier Monitoring Service. Pierre René fournit aussi des données pour rendre compte de la fonte rapide des glaciers et rédige des notes d'événements lorsqu'un phénomène se produit (chute de séracs, crevasses).

Afin de visualiser les grandes étapes de l'étude des glaciers dans les Pyrénées, la frise chronologique ci-dessous présente les moments clés, depuis les premières observations jusqu'au suivi scientifique actuel.

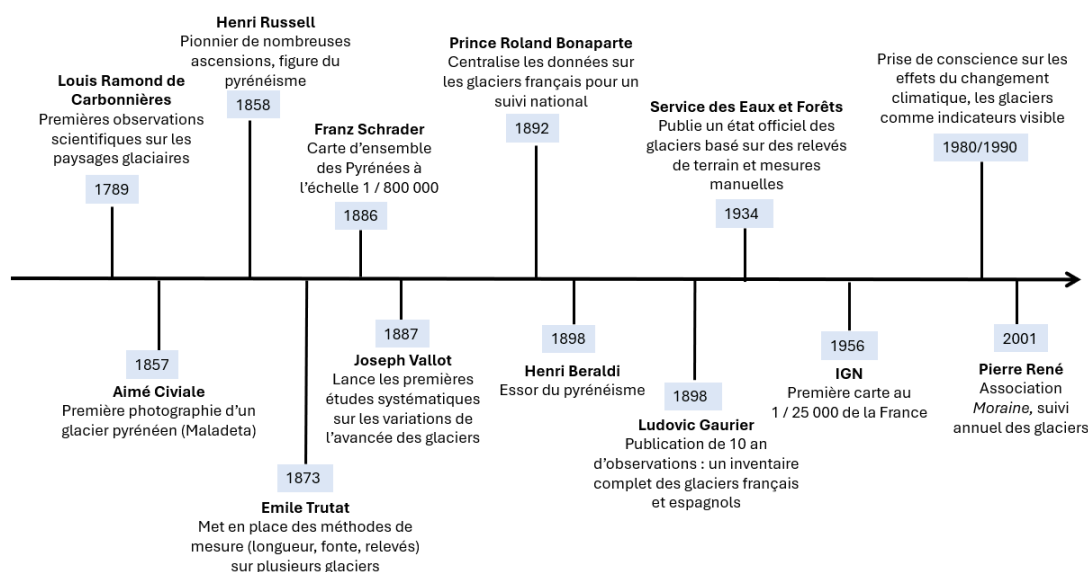


Figure 20 : Frise chronologique des grandes étapes et figures emblématiques de l'étude des glaciers pyrénéens (XVIII^e siècle – XXI^e siècle)

Après ce retour sur l'histoire des études glaciaires dans les Pyrénées, il est désormais important de s'intéresser à l'évolution actuelle de ces glaciers face au changement climatique.

2.3.2 Sensibilité des glaciers pyrénéens au changement climatique

Depuis 25 ans, les données issues des relevés de longueur et de surface menés par l'Association Moraine témoignent d'une régression continue des glaciers pyrénéens. Un seul épisode exceptionnel

de gain de masse a été enregistré en 2013, attribué à un hiver particulièrement long et neigeux, dont les chutes se sont prolongées jusqu'en juin, réduisant la durée de la fonte estivale. Ce phénomène reste toutefois isolé et ne remet pas en cause la tendance générale au recul glaciaire.

En raison des conditions climatiques insuffisamment froides pour maintenir des températures négatives constantes, on ne trouve plus de glaciers froids (entièrement sous 0 °C) ni polythermiques (combinant zones froides et tempérées) dans les Pyrénées.

Leur survie actuelle repose sur un ensemble de conditions locales spécifiques :

- **Une glaciation résiduelle, maintenue par des flux océaniques**

La surface totale des glaciers est estimée à 38,7 hectares en 2023 (Inventaire des glaciers pyrénéens, Association Moraine, 2023). Malgré leur faible extension, ces glaciers revêtent un intérêt particulier, car ils représentent la limite méridionale de la glaciation européenne. Ces glaciers pourraient ainsi constituer des indicateurs précoces du changement climatique.

La persistance de ces petits glaciers s'explique par un ensemble de conditions climatiques locales. D'une part, la majorité des glaciers encore présents sont orientés vers le nord, ce qui limite leur exposition directe au rayonnement solaire. D'autre part, les glaciers sont alimentés par les flux océaniques humides en provenance de l'Atlantique, d'où leur altitude relativement basse en comparaison des Alpes. Plus on s'éloigne de la côte Atlantique, et plus leur altitude moyenne augmente car les précipitations diminuent. Les glaciers restants se trouvent perchés ou en pied de parois dans des combes abritées, où la neige peut s'accumuler grâce aux avalanches qui découlent du haut de celle-ci.

Ainsi, même si la dynamique de fonte s'accélère à l'échelle de la chaîne, ces conditions climatiques permettent encore, temporairement, le maintien de quelques glaciers.

- **L'altitude basse des neiges persistantes**

En 2023, l'altitude moyenne des glaciers pyrénéens est de 2 668 m (minimum moyen : 2 584 m ; maximum moyen : 2 751 m). Le climat pyrénéen, soumis à des influences océaniques à l'ouest et méditerranéennes à l'est, impacte directement l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire (ELA) — c'est-à-dire la limite entre zones d'accumulation et d'ablation. Dans les Pyrénées, cette ligne se situe généralement entre 2 600 m et 3 200 m, contre 2 800 m à 3 400 m dans les Alpes. Ces dernières années, les zones d'accumulations sont quasi inexistantes, empêchant ainsi tout renouvellement du stock de glace. On estime que pour qu'il y ait une zone d'accumulation, il faut que la surface enneigée pendant l'hiver soit de 60% au minimum. À cela s'ajoutent des températures estivales fréquemment supérieures à 10 ou 15 °C à 2 500 m, accélérant significativement la fonte estivale.

- **Une morphologie morcelée**

On estime qu'entre la fin du Petit Âge Glaciaire (1850) et aujourd'hui, 90% de la surface des glaciers pyrénéens a disparu, contre 60% dans les Alpes (P. René, 2025). Contrairement aux Alpes, où des glaciers conservent encore une certaine cohésion spatiale, les glaciers pyrénéens apparaissent désormais comme des masses de glace discontinues, souvent enclavées ou suspendues sur des versants ombragés orientés au nord. Dans bien des cas, ces glaciers sont aujourd'hui déconnectés de leur zone d'alimentation initiale.

Le glacier d'Ossoue, plus grand glacier des Pyrénées, illustre clairement ce processus de fragmentation. Jadis compact et continu, il est aujourd'hui scindé en plusieurs unités glaciaires isolées : la plus grande s'étend sur 217 686 m², tandis que deux autres fragments mesurent 7 766 m² et 11 967 m². Ces entités sont désormais séparées par des zones rocheuses. Isolées du corps glaciaire principal, on parle alors de glace morte pour décrire les étendues déconnectées. La déconnexion physique entre les différentes parties du glacier témoigne de leur fin de vie.

Les glaciers pyrénéens sont aujourd'hui intégralement tempérés (leur température ne descend pas en dessous de 0°). Cela facilite la circulation de l'eau non seulement en surface, mais aussi au sein même du glacier et à sa base. Ces écoulements peuvent accroître la mobilité du glacier par lubrification au contact glace/roche et engendrer divers types d'instabilités, tels que des glissements, des ruptures de séracs ou des avalanches de glace. **Ainsi, le modèle glaciaire pyrénéen se distingue par des glaciers de petite taille, tempérés, fragmentés, et très sensibles aux variations climatiques.**

Ce recul rapide modifie la dynamique glaciaire pyrénéenne. Les cycles sont déséquilibrés : les périodes de fonte s'allongent, réduisant les phases d'accumulation neigeuse nécessaires à la survie des glaciers. Les masses de glace, de plus en plus réduites et discontinues, deviennent plus vulnérables aux stress thermiques et mécaniques, favorisant ainsi l'apparition de nouveaux aléas. C'est l'objet de la section suivante.

2.3.3 Répercussions du changement climatique sur les dynamiques glaciaires : des risques émergents

Le changement climatique entraîne une transformation rapide des glaciers blancs pyrénéens, avec pour conséquence l'émergence de nouveaux risques glaciaires, liés à la **disparition des langues glaciaires**.

Pendant le PAG, les langues glaciaires pyrénéennes pouvaient s'étendre jusqu'au fond des vallées, ce qui favorisait une certaine stabilité. Ces glaciers, plus étendus et plus épais, bénéficiaient alors d'un effet de compression par la glace, maintenant localement des températures plus froides au contact du substrat.

Désormais, la fonte réduit non seulement la surface et l'épaisseur des glaciers, mais fragmente également les masses glaciaires, qui se retrouvent perchées sur des versants raides, sans véritable appui en aval. **La disparition des langues glaciaires crée un véritable « appel au vide », accentuant la perte d'équilibre dans la partie amont du glacier. Ce déséquilibre peut rendre les blocs de glace restants beaucoup plus vulnérables à des effondrements soudains.**

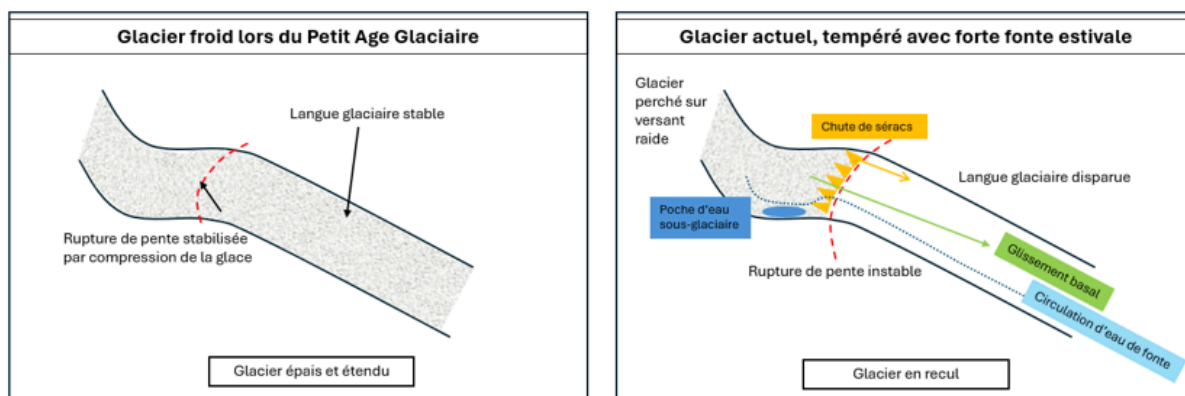


Figure 21 : Évolution morphologique des glaciers blancs et nouvelles dynamiques de risque depuis le Petit Âge Glaciaire dans les Pyrénées

Ainsi, trois risques majeurs sont aujourd'hui identifiés dans les Pyrénées, tous directement liés à ces transformations géomorphologiques dues au changement climatique :

- 1- **La chute de séracs**, favorisée par « l'appel au vide » de la disparition des langues glaciaires ;
- 2- **Le glissement basal**, facilité par la lubrification au contact glace/roche ;
- 3- **La vidange de poche d'eau sous-glaciaire**, rendue possible la circulation importante des eaux de fonte.

Ces évolutions récentes posent plusieurs questions, notamment sur la manière dont ces risques sont identifiés. C'est ce que nous allons aborder dans la problématique suivante.

2.4 Problématique

D'un côté, les glaciers régressent à un rythme accéléré, modifiant les paysages et les dynamiques de la haute montagne. De l'autre, les activités humaines — qu'elles soient touristiques, sportives ou liées à des infrastructures — s'intensifient dans ces mêmes zones.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail. Il s'agit de lever le doute sur la présence d'instabilités d'origine glaciaire dans les Pyrénées, à travers une analyse à grande échelle, croisant données glaciologiques, observations géomorphologiques et indicateurs de vulnérabilité.

A travers ce travail, nous tenterons de répondre à une question centrale :

Les Pyrénées sont-elles exposées à des risques d'origine glaciaire et périglaciaire, et comment ces risques peuvent-ils être identifiés et évalués ?

L'objectif de cette étude est double : établir un socle de connaissance sur les aléas d'origine glaciaire et périglaciaire dans les Pyrénées françaises, et évaluer les enjeux territoriaux qui y sont associés.

Partie 3 : Démarche méthodologique

Pour réaliser une analyse du risque glaciaire et périglaciaire, quatre étapes méthodologiques sont développées. La démarche repose sur une méthodologie alpine (Bazin, Roudnitska, 2022), il est donc nécessaire de l'ajuster au contexte pyrénéen.

3.1 Travail bibliographique, appropriation du sujet et acquisition des données

La première étape consiste à collecter les informations et les données nécessaires pour avoir une bonne compréhension des enjeux liés aux glaciers blancs. Ce travail bibliographique se trouve dans la partie théorique développée dans la partie précédente, c'est pourquoi nous ne nous y attarderons pas. Voici les trois principaux suivis au cours de mon stage :

- 1) **Collecte des données et des références** : rassemblement des principaux travaux sur les glaciers blancs et leurs zones sources réalisés dans les Alpes dans le cadre du PAPROG. Lectures des bibliographies produites par le RTM et familiarisation des concepts clés.
- 2) **Prise de contact avec les spécialistes impliqués sur le sujet au RTM**, pour faire un point sur l'état des connaissances, sur les expériences de suivi des glaciers instables et sur les attentes sur le sujet.
- 3) **Acquisition des couches SIG** : récupération des données (inventaire des glaciers blancs, carte des pentes, carte des enjeux, etc.).

L'inventaire des glaciers blancs a été réalisé en 2023 par l'association Moraine. Ce jeu de données se présente sous la forme d'un fichier vectoriel (shapefile) délimitant les contours des glaciers blancs sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne. Il comprend 22 polygones correspondant pour 15 glaciers, certains étant constitués de plusieurs entités distinctes ou de « lambeaux ».

En 2024, les glaciers du Boum, du Portillon et la partie des Oulettes inférieure ont disparu, suite aux épisodes de fonte exceptionnels enregistrés durant les étés 2022 et 2023 (Les glaciers des Pyrénées françaises, Cycle glaciaire 2023-24, Association Moraine, octobre 2024).

Par conséquent, ces trois glaciers sont désormais exclus de la suite de notre analyse.

Les couches suivantes ont été prises en compte :

- Carte des pentes (ONF)
- Enjeux (IGN, ONF) version actualisée par le RTM en 2024,
- Photographies des glaciers blancs (Association Moraine, 2023)
- Photographies de terrain du glacier des Oulettes et du Petit Vignemale (RTM, juillet 2025)
- Imagerie satellite Google Earth vue 3D
- Scans 25 (IGN)

Cette phase préparatoire permet de poser les fondations scientifiques et techniques de l'analyse, elle a duré les deux premiers mois du stage.

3.2 Typologie des glaciers blancs instables dans les Pyrénées françaises

Dans un second temps, il est nécessaire de caractériser les glaciers pyrénéens afin de construire une typologie adaptée aux réalités du massif, différente de celle des Alpes.

- 1) **Caractérisation des glaciers pyrénéens** : les données issues de l'inventaire glaciaire de 2023 par l'Association Moraine ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques des glaciers pyrénéens, telles que l'altitude moyenne, les altitudes minimale et maximale, la surface ainsi que leur orientation. Ce travail se trouve en annexe 2.
- 2) **Identification des différences structurantes entre Alpes et Pyrénées** : en identifiant les caractéristiques principales des glaciers pyrénéens, il est possible de mettre en évidence les écarts qui empêchent une transposition directe du modèle alpin (2.3.2 Sensibilité des glaciers pyrénéens au changement climatique)
- 3) **Proposition d'une typologie des glaciers instables pyrénéens** : à partir de l'inventaire et des informations précédentes, une typologie des glaciers est proposée, en cohérence avec les réalités pyrénéennes. **Elle s'appuie sur la prise en compte unique de glaciers tempérés**, très sensibles aux variations climatiques et à la fonte estivale (partie résultat).

Cette typologie sert de socle à l'analyse des zones sources et se trouve dans la première partie des résultats.

3.3 Identification des zones sources potentielles

La troisième phase consiste à identifier les zones sources susceptibles d'engendrer des phénomènes d'origine glaciaire. Pour cela, différents critères basés sur le modèle alpin on était appliqué aux Pyrénées :

- 1) **Critères topographiques** : un premier tri a été réalisé. Pour cela, la carte des pentes sur chaque glacier blanc a été créée en tenant compte d'un **seuil d'inclinaison supérieure à 25°** (annexe 2) selon les recommandations de la littérature (Blanc, Geay, 2023). En dessous de cette valeur de pente, il est admis que les glaciers sont stables.

L'analyse montre que tous les glaciers (17 entités) présentent des pentes dépassant ce seuil. Toutefois, pour certains, la surface de ces pentes est marginale et ne couvre pas une étendue suffisante pour constituer une zone source. Ainsi, les glaciers dont la surface de pente $> 25^\circ$ représentait moins de 20 % de la surface totale ont été exclus de l'analyse.

Les glaciers d'Ossoue, du Gabiétous, du Taillon et de Seil de la Baque ne présentent pas de pentes suffisamment importantes pour avoir une potentielle zone source.

Sur les 17 entités glaciaires identifiées initialement, 13 ont été retenues pour une analyse plus détaillée.

Les glaciers sélectionnés sont : Las Néous, Oulettes Supérieur, Petit Vignemale, Ossoue (lambeau inférieur et lambeau sud), Taillon supérieur, Pailla Est, Pailla Ouest 1 et 2, Astazou, Munia, Barroude ainsi qu'Arcouzan.

- 2) **Critères géomorphologiques** : les glaciers ont été classés selon deux configurations principales : ceux comportant une barre rocheuse marquée, et ceux qui en sont dépourvus. Cette distinction permet de mieux appréhender les mécanismes d'instabilité potentiels : dans le premier cas, la rupture de pente favorise la chute de séracs, tandis que dans le second, un glissement basal est plus probable, en lien avec une instabilité diffuse de la masse glaciaire.

Les 13 entités glaciaires ont été réparties en deux catégories, en fonction de la présence ou non d'une barre rocheuse en aval - un élément permettant d'affiner la typologie des glaciers instables.

Tableau 4 : Classification des glaciers blancs selon la présence ou non d'une barre rocheuse

Glacier avec barre rocheuse	Glacier sans barre rocheuse
Oulettes Supérieur	Las Néous
Petit Vignemale	Ossoue lambeau inférieur
Taillon Supérieur	Ossoue lambeau sud
Pailla Est	Astazou
	Munia
	Barroude
	Arcouzan
	Pailla ouest 1
	Pailla ouest 2

Ce classement facilite la suite de l'analyse, notamment l'évaluation du niveau d'aléa.

- 3) **Analyse de l'aléa** : chaque glacier a ensuite été examiné individuellement, à l'aide d'outils SIG, de photographies récentes et du dire d'expert. Cette étape vise à localiser précisément les zones sources potentielles en tenant compte des spécificités locales, comme la présence de crevasses, d'eau de fonte ou de lubrification au contact glace/roche.

Il est important de souligner que ces zones sources sont susceptibles d'évoluer rapidement, notamment du fait du réchauffement climatique et de l'intensification de la fonte estivale.

L'aléa est estimé selon trois niveaux :

Tableau 5 : Aléa glaciaire, du plus fort au plus faible

Aléa fort	2
Aléa moyen	1
Aléa faible	0

Aléa fort : des événements ont déjà été documentés dans le passé, et la morphologie actuelle du glacier montre une configuration similaire (ex. : barre de séracs surplombante).

Aléa moyen : aucun événement n'a été observé jusqu'à présent, mais la configuration laisse supposer qu'un départ pourrait se produire (ex. : zone suspendue, pente forte).

Aléa faible : il y a beaucoup plus de chance que rien ne parte.

L'aléa est déterminé selon deux catégories distinctes : ceux avec barre rocheuse et ceux sans barre rocheuse.

→ Glaciers tempérés avec barre rocheuse

Dans les configurations où les glaciers tempérés ne possèdent plus de langue glaciaire, la dynamique de la masse de glace est modifiée (figure 21, p27).

La barre rocheuse peut engendrer un aléa élevé pour les chutes de séracs. En effet, lorsque des volumes de glace fracturée sont positionnés juste au-dessus d'une barre rocheuse, la fonte estivale et la lubrification des interfaces peuvent faciliter leur détachement. La fréquence de ce type d'événement est donc la plus probable et son intensité peut être élevée au vu de l'appel au vide créé par la barre rocheuse. Celle-ci joue un rôle déterminant dans la propagation : selon sa géométrie, elle peut favoriser l'accélération des blocs et augmenter considérablement leur distance de parcours. L'intensité de l'événement est ainsi elle aussi renforcée.

Le glissement basal du front glaciaire présente également un niveau d'aléa non négligeable. L'appel au vide peut précipiter l'effondrement de l'ensemble du front glaciaire, rendant le phénomène potentiellement brutal.

Enfin, la vidange d'une poche d'eau sous-glaciaire est ici considérée comme moins probable que la chute de séracs. Toutefois, son intensité potentielle peut être très élevée. Comme pour les autres phénomènes étudiés, la présence d'une barre rocheuse peut accentuer l'appel au vide, renforçant ainsi la dynamique et l'intensité du phénomène lorsqu'il se produit. Il est également important de souligner que ce phénomène reste imprévisible, ce qui complique sa prise en compte dans une analyse de risque.

Une classification des aléas glaciaires dans les Pyrénées est proposée ci-dessous afin de hiérarchiser les phénomènes en fonction de leur intensité potentielle et de leur fréquence. Les phénomènes sont classés du plus fréquent et potentiellement intense au plus rare et moins intense.

Tableau 6 : Sensibilité des glaciers blancs avec barre rocheuse à engendrer un aléa glaciaire dans les Pyrénées

Phénomènes	Chute de séracs	Glissement basal du front glaciaire	Vidange d'une poche d'eau sous-glaciaire
Aléa	++	+	+

→ Glaciers tempérés sans barre rocheuse

En l'absence de rupture de pente nette, la formation de séracs en position instable est beaucoup moins fréquente : la glace conserve un appui plus continu sur le substrat rocheux, pouvant ainsi limiter les décrochages.

En revanche, cette configuration est potentiellement propice au glissement basal du front glaciaire. En l'absence de rupture de pente qui viendrait fragmenter ou retenir la masse de glace, celle-ci peut

glisser de manière plus globale et continue, ce qui donne à ce type d'aléa une intensité potentiellement élevée.

Enfin, la vidange de poches d'eau sous-glaciaires reste un phénomène possible. L'absence d'obstacle topographique peut permettre une évacuation plus progressive de l'eau. L'aléa associé est donc considéré comme moins probable que le glissement basal.

Tableau 7 : Sensibilité des glaciers blancs sans barre rocheuse à engendrer un aléa glaciaire dans les Pyrénées

Phénomènes	Chute de séracs	Glissement basal du front glaciaire	Vidange d'une poche d'eau sous-glaciaire
Aléa	+	++	+

3.4 Estimation des risques d'origine glaciaire et périglaciaire à partir de la méthode de la ligne d'énergie

La dernière étape vise à passer de l'aléa à une **évaluation du risque**, en tenant compte des enjeux humains et matériels situés en aval.

- 1) **Délimitation des bassins versants à ROGP** : pour valoriser le travail réalisé, un catalogue des bassins versants présentant un risque potentiel a été élaboré pour les Pyrénées ([annexe 3](#)). Les bassins versants ont été créés à l'aide de l'outil « *Tracer un bassin versant* » sur ArcMap développé par A. Maisondieu (RTM) dans le cadre du programme PAPROG.
- 2) **Intégration des enjeux** : les couches d'enjeux utilisées dans le cadre de cette étude sont spatialisées par département. Elles proviennent principalement de la BD TOPO de l'IGN et de la RDF de l'ONF, qui constituent les bases de données de référence. Toutefois, ces données ont été actualisées par le service RTM (B. Pons) pour combler les éventuels manques et assurer une meilleure cohérence à l'échelle de la chaîne pyrénéenne.

Un tri a été réalisé pour chaque département, afin de ne conserver que les **enjeux liés aux biens et aux personnes**, en cohérence avec les objectifs de la mission de l'État. Les enjeux environnementaux (forêts, milieux naturels, etc.) n'ont donc pas été pris en compte.

Les catégories retenues s'inspirent de la classification proposée par Faillettaz (2021) :

- Les enjeux humains directs : habitations, hameaux, refuges, etc. ;
- Les enjeux liés à l'intervention des secours : casernes, hélistations, etc. ;
- Les enjeux économiques et indirects : routes, lignes électriques, réseaux, dont la destruction pourrait isoler certaines zones de montagne.

Cette sélection permet de cartographier de manière homogène, sur l'ensemble des Pyrénées françaises, les zones présentant un enjeu pour la sécurité des personnes et des infrastructures essentielles.

- 3) **Attribution du niveau de risque par bassin versant** : chaque glacier blanc reçoit une note de risque (0 = faible, 1 = moyen, 2 = fort), en croisant l'aléa identifié et la nature des enjeux en aval :

Tableau 8 : Aléa glaciaire, du plus fort au plus faible

Risque fort	2
Risque moyen	1
Risque faible	0

Un risque faible signifie qu'il est fortement improbable qu'un phénomène atteigne un enjeu, soit parce que les enjeux sont absents, soit parce que la dynamique du phénomène reste très limitée ;

Un risque moyen correspond à une situation où une atteinte des enjeux est envisageable, notamment si ceux-ci se trouvent à proximité d'une zone topographiquement exposée ;

Un risque fort désigne les cas où une atteinte directe d'enjeux identifiés est jugée probable, en cas de déclenchement d'une avalanche de glace ou d'un autre processus glaciaire instable.

À noter que même en l'absence de zone source identifiée, les glaciers blancs sont tout de même intégrés au catalogue de l'annexe 3 afin de rendre compte de l'entièreté de l'analyse à l'échelle pyrénéenne.

- 4) **Utilisation du modèle de la ligne d'énergie** : afin d'ancrer l'analyse des risques glaciaires pyrénéens dans un cadre scientifique, le concept de la ligne d'énergie est utilisé pour évaluer la distance potentielle de propagation d'une avalanche de glace. Initialement utilisé pour les chutes de blocs, il est aujourd'hui utilisé pour les avalanches de glace.

La ligne d'énergie est un modèle statistique empirique initialement développé par A. Heim (1932) pour l'analyse des chutes de blocs. Il s'agit d'un outil permettant d'estimer, à partir d'une zone de départ, la localisation maximale probable du point d'arrêt d'un projectile en mouvement. Ce modèle repose sur le calcul du rapport H/L , où H représente la hauteur de chute (différence d'altitude entre le point de rupture et la zone d'arrêt), et L la distance parcourue par le phénomène selon sa trajectoire réelle. Ce ratio permet de définir un angle de trajectoire ou ligne d'énergie qui reflète la mobilité potentielle du phénomène.

Appliqué aux avalanches de glace, ce modèle permet d'évaluer l'emprise maximale potentielle d'un écoulement glaciaire, en croisant les caractéristiques du terrain avec les enseignements tirés de précédents événements documentés. Une valeur faible de H/L indique une avalanche ayant parcouru une grande distance par rapport à sa hauteur de chute, traduisant une forte mobilité de l'avalanche de glace. À l'inverse, une valeur élevée correspond à une avalanche moins mobile, s'arrêtant plus près de son point de départ.

Conformément aux recommandations issues des travaux récents menés dans les Alpes (Bazin, Roudnitska, 2022), la mesure de la hauteur (H) doit être effectuée entre le pied de la masse glaciaire effondrée (et non le sommet du glacier) et l'extrémité aval du dépôt. Ce choix vise à éviter les surestimations, notamment dans les cas où la rupture ne concerne qu'une partie basse du glacier. Quant à la distance (L), elle doit suivre la trajectoire réelle du phénomène, et non la ligne de plus grande pente. Cette approche est particulièrement importante pour les avalanches de glace, qui ont tendance à suivre plus fidèlement le relief que les chutes de blocs.

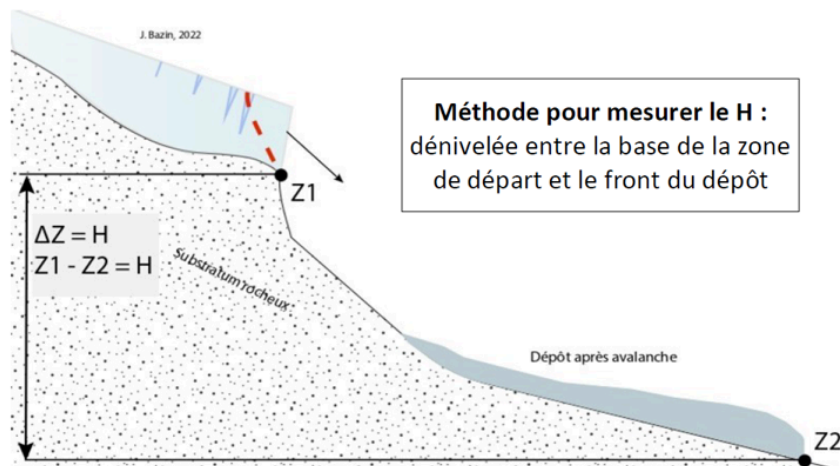


Figure 22 : Méthode pour mesurer la hauteur du ratio H/L (Bazin, 2022)

5) **Élaboration de fiches synthétiques** : pour les bassins versants présentant un niveau de risque moyen à élevé (1 ou 2), des fiches synthétiques ont été élaborées ([annexe 4](#)). Elles contiennent :

- la ou les zones sources identifiées,
- les types de scénarios de rupture envisagés (chute de séracs, glissements, etc.),
- des éléments de justification du niveau d'aléa estimé,
- les enjeux menacés s'il y a.

Ces fiches permettent de disposer d'un outil opérationnel pour les gestionnaires du territoire.

Ce logigramme est conçu afin de représenter de manière claire et structurée la démarche méthodologique adoptée pour ce travail. Il met en évidence les différentes phases successives – de l'identification des glaciers à potentiel instable à l'analyse des risques associés – en soulignant les choix opérés à chaque étape.

Totalité des glaciers blancs à partir de l'inventaire (P. René, 2023) : 15 glaciers pour 22 entités distinctes

Disparition des glaciers du Boum, Taillon, Oulettes inférieur en 2024

L'étude actuelle porte sur 12 glaciers et 17 entités

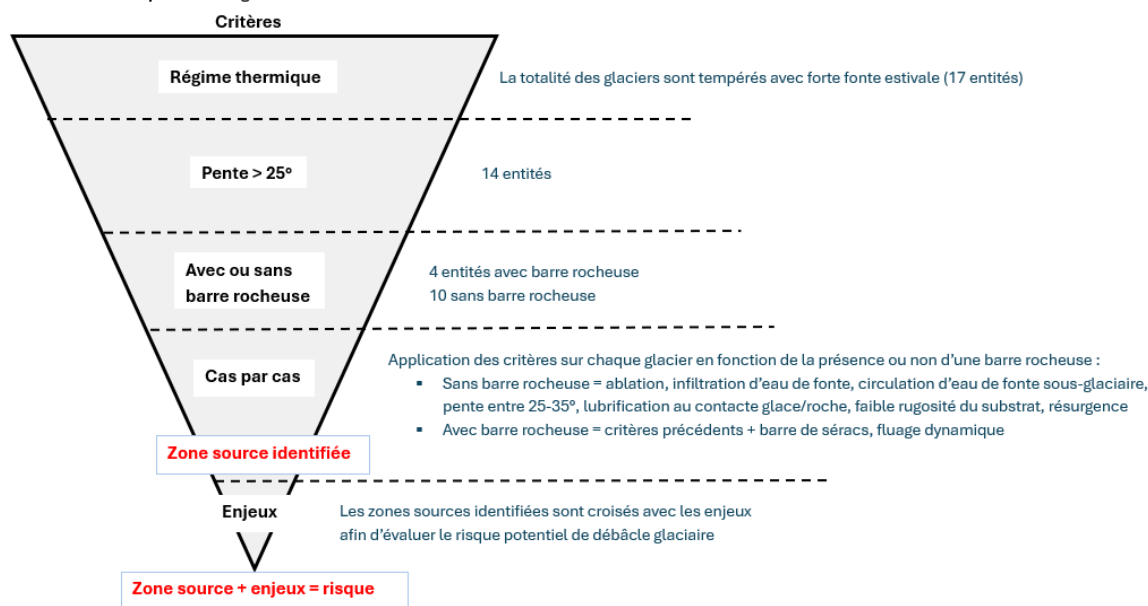


Figure 23 : Explication de la démarche méthodologique

En résumé, cette démarche méthodologique s'inscrit dans une logique d'adaptation des connaissances alpines aux particularités des Pyrénées, tout en mobilisant des outils d'analyse spatiale, des critères glaciologiques et de l'expertise sur le terrain.

La prochaine partie est consacrée à la présentation des résultats, pour mener l'analyse des risques glaciaires dans les Pyrénées.

Partie 4 : Résultats

4.1 Proposition d'une typologie prenant en compte le contexte pyrénéen

Au vu de l'état résiduel des glaciers pyrénéens, il est nécessaire d'adapter la typologie alpine (annexe 5) au contexte pyrénéen. Ainsi, deux nouvelles configurations glaciaires ont été apportées :

1- Glacier tempéré avec barre rocheuse, sans langue glaciaire

Cette configuration est représentée sur quatre glaciers pyrénéens, tels que le Petit Vignemale, les Oulettes Supérieur, le Taillon Supérieur ou encore Pailla Est.

Il s'agit de glaciers suspendus au-dessus de ruptures de pente marquées, généralement situées entre 2400 et 2900 m d'altitude. La disparition de leur langue terminale, qui assurait auparavant un rôle de butée stabilisatrice, engendre de nouveaux déséquilibres mécaniques. En l'absence de cette contre-pente, la gravité agit plus fortement sur la glace accumulée à l'amont, ce qui favorise les chutes de séracs, particulièrement en période de fonte ou après de fortes précipitations. Une classe spécifique a donc été introduite pour caractériser cette morphologie suspendue et les risques qui y sont associés (figure 24).

2- Glacier tempéré sans barre rocheuse, sans langue glaciaire

Également absents de la typologie alpine, ces glaciers représentent les 10 autres entités glaciaires étudiées dans le massif. Ils sont situés entre 2300 et 3000 m d'altitude, sur des versants à pente continue, inclinés à plus de 25°.

Dépourvus de langue glaciaire et reposant sur des substrats rocheux plutôt lisses, ces glaciers présentent une instabilité potentielle liée à leur fonte rapide et à leur faible ancrage. La lubrification de leur base par infiltration d'eau de fonte, favorisée par les hautes températures estivales, peut induire des glissements basaux.

Ci-dessous une proposition complétant la typologie des glaciers blancs instables :

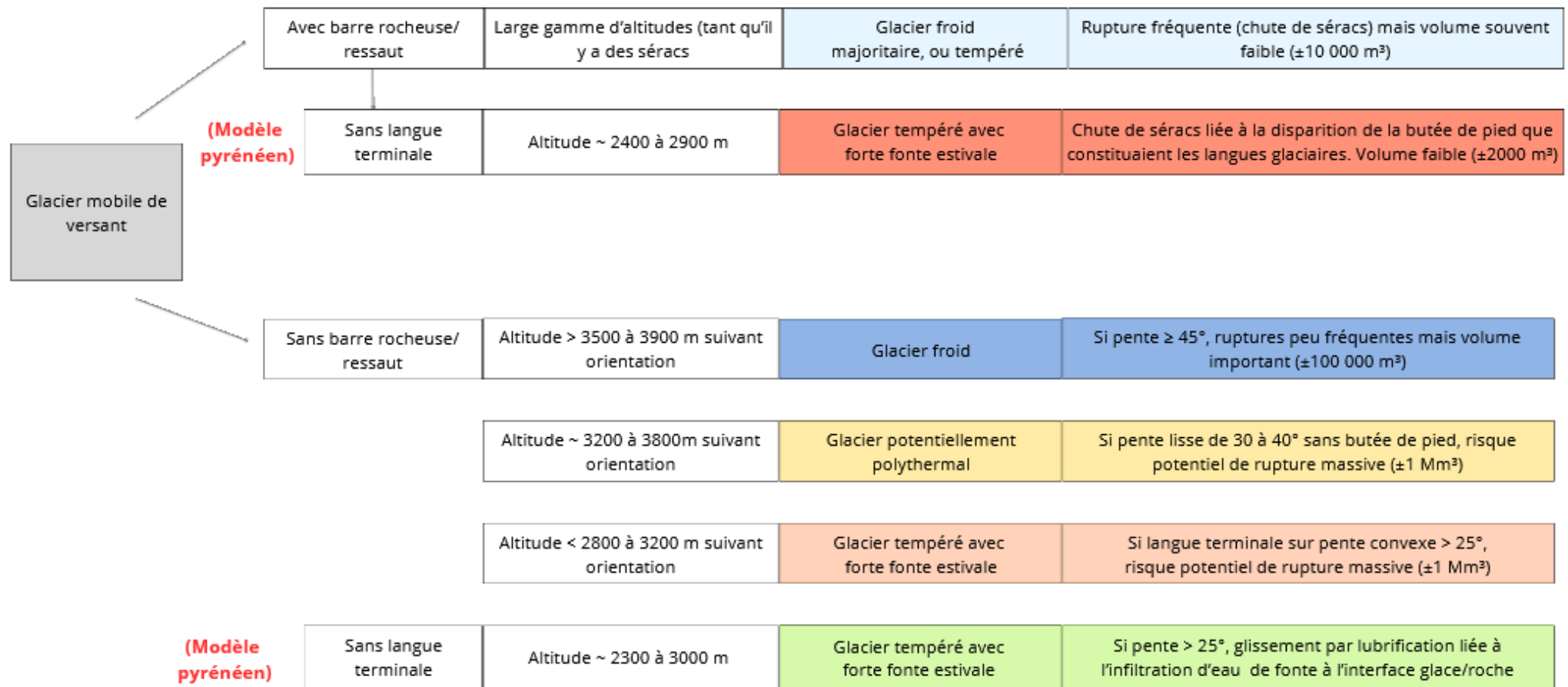


Figure 24 : Résumé en arbre fonctionnel de la typologie des glaciers blancs instables dans les Alpes et les Pyrénées

4.2 Analyse de l'aléa glaciaire

Après avoir défini la typologie des glaciers blancs pyrénéens, il est désormais possible de procéder à l'analyse de l'aléa glaciaire. Comme expliqué dans la méthodologie (3.3 Identification des zones sources potentielles), cette analyse se divise en deux catégories : les glaciers avec barre rocheuse et ceux sans barre rocheuse.

La détermination du niveau d'aléa repose sur une étude détaillée de ces glaciers : événements historiques recensés, bilan de masse, morphologie et dynamique glaciaire. Ces éléments permettent ensuite d'attribuer une note d'aléa, comprise entre 0 et 2.

4.2.1 Glaciers avec barre rocheuse

4.2.1.1 Oulettes supérieur

Caractéristiques générales :

Les informations présentées ci-dessous proviennent de l'association Moraine (Les glaciers des Pyrénées françaises, Cycle glaciaire 2023-2024, octobre 2024).

Le glacier des Oulettes supérieur est un glacier de cirque (« *confiné dans un amphithéâtre rocheux* », Moraine, 2013) et est le plus bas des Pyrénées, s'échelonnant entre 2280m et 2550m d'altitude. Cette localisation est particulièrement basse au regard de la limite théorique d'enneigement pérenne, estimée à 2900 m dans les Pyrénées. Cela s'explique par son exposition nord, mais surtout par une suraccumulation neigeuse liée aux avalanches issues de la paroi rocheuse dominante. Sa surface est estimée à 3,1 hectares.

Historique :

Des phénomènes passés ont déjà été observés (figure 25) :

- Le 22 juillet 2007, un important bloc de plusieurs milliers de mètres cubes s'est détaché du glacier, parcourant jusqu'à 300.
- Le 18 juillet 2009, un bloc de glace de 2 m³ a été retrouvé 400 mètres en aval de son point de décrochement, soit bien au-delà de la zone habituelle de dépôt.

Comme l'exprimait Pierre René (Association Moraine) en 2009 : « *Des crevasses s'ouvrent, des blocs de glace s'individualisent, des séracs s'écroulent* ».



Bilan de masse :

Malgré la fonte généralisée des glaciers pyrénéens, les Oulettes Supérieures conserve une zone d'accumulation bien marquée, alimentée par les avalanches. En septembre 2024, cette zone représentait 3 hectares, soit 55 % de la surface totale du glacier (AAR = Accumulation Area Ratio), indiquant un état proche de l'équilibre glaciaire.

Cependant, si l'on considère les 20 dernières années, le bilan de masse global reste négatif, ce qui justifie son classement comme glacier en retrait dans la présente étude.

Morphologie et dynamique glaciaire :

La partie supérieure du glacier présente les plus grandes crevasses des Pyrénées, atteignant jusqu'à 20 mètres de profondeur (Association Moraine, 2024), associées à une barre de séracs située sur une pente inclinée entre 25° et 30°. Ces éléments témoignent d'une dynamique importante, potentiellement révélatrice d'un glacier en déséquilibre.

En aval de la zone crevassée, une barre rocheuse est apparue en 2007, marquant une rupture dans le profil glaciaire. Depuis le milieu de la rive droite, une dissociation progressive du glacier s'est amorcée, scindant la masse glaciaire en deux entités distinctes. Cette séparation a été totalement effective en 2022, distinguant une partie supérieure active à une partie inférieure, largement couverte de débris rocheux.

Analyse de la probabilité de rupture glaciaire :

Plusieurs zones de départ sont clairement identifiables (figure 26) :

- 1) Un bloc de glace estimé à environ 30 m³, est en suspens et semble prêt à se décrocher (n°1).
- 2) Une zone à droite marquée par des crevasses bien ouvertes (n°2) a montré le décrochage de plusieurs blocs récemment, et d'autres semblent prêts à partir.
- 3) A gauche, de petits éboulis de glace sont visibles, témoignant d'une dynamique glaciaire active et de décrochage récent (n°3).

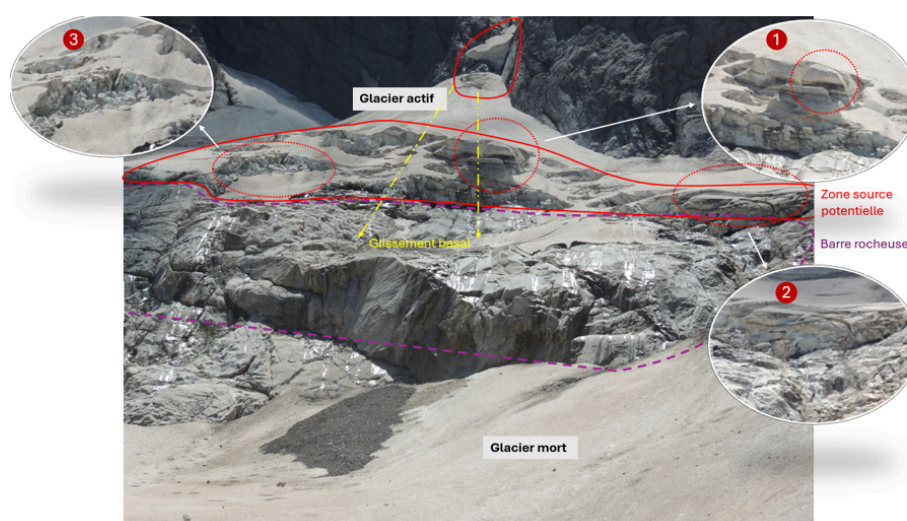


Figure 26 : Photo-interprétation des zones sources et des dynamiques glaciaires, glacier des Oulettes (10 juillet 2025)

Une forte circulation d'eau de fonte a été confirmée lors de la visite de terrain (juillet 2025). Cette eau s'infiltre et lubrifie les interfaces glace/roche, ce qui réduit l'adhérence au substrat. Ce dernier, peu rugueux, peut faciliter davantage le glissement basal ou le décrochement de blocs. La partie tout en amont du glacier semble elle aussi instable. Dans le scénario le plus catastrophique, il est possible que toute la surface du glacier glisse et qu'il y ait une rupture brutale due à la barre rocheuse, entraînant un phénomène intense. Il y a tout de même moins de chance que cet aléa arrive en comparaison à la chute de séracs évoquée précédemment.

Sur la partie morte du glacier, huit blocs de glace ont été recensés le 10 juillet 2025 (figure 27), très probablement issus de la partie droite active du glacier. Les plus gros blocs mesurent entre 1 m³ et 1,5 m³, les plus petits autour de 0,5 m³. Cette présence confirme des chutes de glace récentes, témoins de la poursuite d'un processus de déstabilisation en cours.

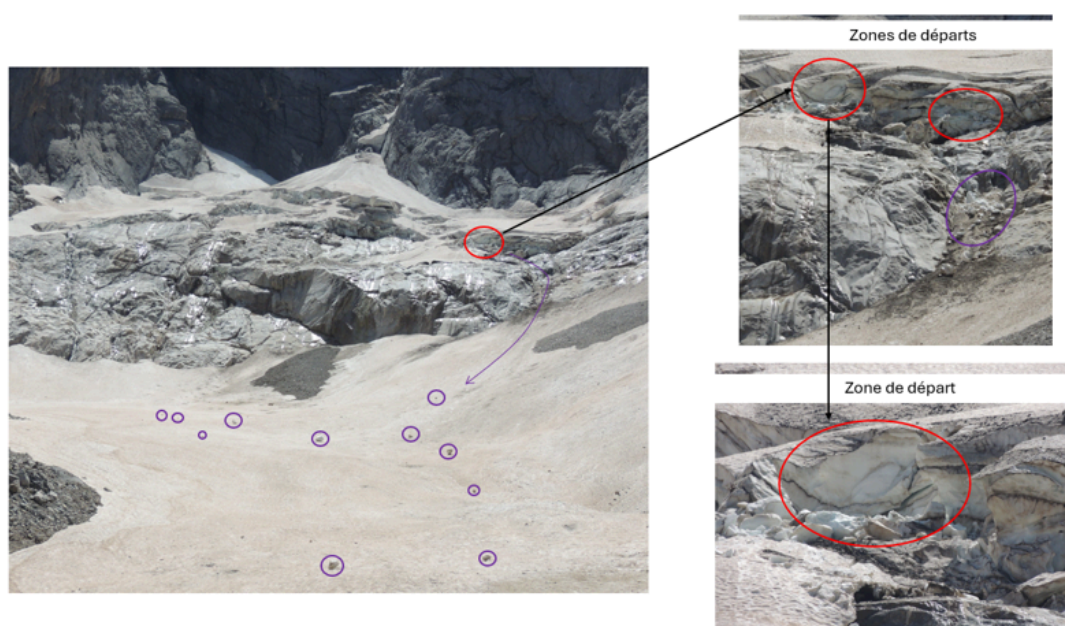


Figure 27 : Photo-interprétation des chutes de blocs de glace et de leur zone de départ potentielle, glacier des Oulettes (Anna Pellaers, 10 juillet 2025)

Analyse de d'aléa glaciaire :

Tous les indicateurs convergent vers une instabilité marquée du glacier :

- Historique documenté d'événements (2007, 2009),
- Morphologie propice à la rupture (pente, crevasses, séracs instables),
- Présence d'une barre rocheuse favorisant à la fois le déclenchement et la propagation de blocs,
- Circulation d'eau de fonte accentuant la chute de sérac et le glissement,
- Éléments récents de terrain indiquant une activité.

L'aléa est estimé à 2 (fort) selon la grille d'analyse adoptée.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	2
---	---

4.2.1.2 Petit Vignemale

Caractéristiques générales :

Le glacier du Petit Vignemale est un glacier suspendu (« *il se loge sur un gradin au milieu d'une vaste paroi* », Moraine, 2013) localisé sur le versant nord du pic du Vignemale (3298 m), entre 2650 m et 2850 m d'altitude. En 2023, sa surface est estimée à 1,3 hectares (Association Moraine).

Historique :

Ce glacier formait jusqu'au milieu du XIXe siècle un ensemble continu avec le glacier des Oulettes (figure 28) qui représentait alors une masse glaciaire unifiée couvrant environ 60 hectares. Il était le deuxième plus grand du massif pyrénéen, après celui d'Ossoue.



Figure 28 : Evolution du glacier du Petit Vignemale et des Oulettes de Gaube entre 1890 (Carte postale, source inconnue) et 2025 (Anna Pellaers, 10 juillet 2025)

Depuis l'été 2007, une barre rocheuse a séparé la partie inférieure du glacier de son compartiment supérieur. Aujourd'hui, seule la partie supérieure du glacier, suspendue au-dessus de cette barre, présente encore une dynamique glaciaire active.

À ce jour, aucun événement glaciaire n'a été enregistré dans la littérature scientifique ou les archives locales.

Bilan de masse :

Ces dernières décennies, le glacier présente un bilan de masse négatif, se traduisant par une fonte intense et une réduction d'épaisseur. L'année 2023 a particulièrement marqué un recul important, avec un amincissement conséquent, rendant la masse glaciaire plus instable. Toutefois, en 2024, un hiver particulièrement enneigé a temporairement inversé cette tendance : au 19 septembre 2024, le glacier était intégralement recouvert de neige, avec un taux de recouvrement (AAR) de 100 %. La ligne d'équilibre s'établissait alors autour de 2700 m, indiquant un bilan ponctuellement excédentaire.

Morphologie et dynamique glaciaire :

Le glacier présente une morphologie étagée, avec deux compartiments superposés. La partie amont repose directement sur une barre rocheuse escarpée qui induit une rupture de pente significative. L'inclinaison moyenne y est estimée à 35°. En juillet 2025, aucun sérac n'est visible, mais la présence de crevasses, identifiables sur la figure 29, témoigne de mouvements glaciaires encore actifs. La barre

rocheuse en contrebas crée un véritable appel au vide, ce qui renforce la vulnérabilité mécanique de cette zone suspendue.

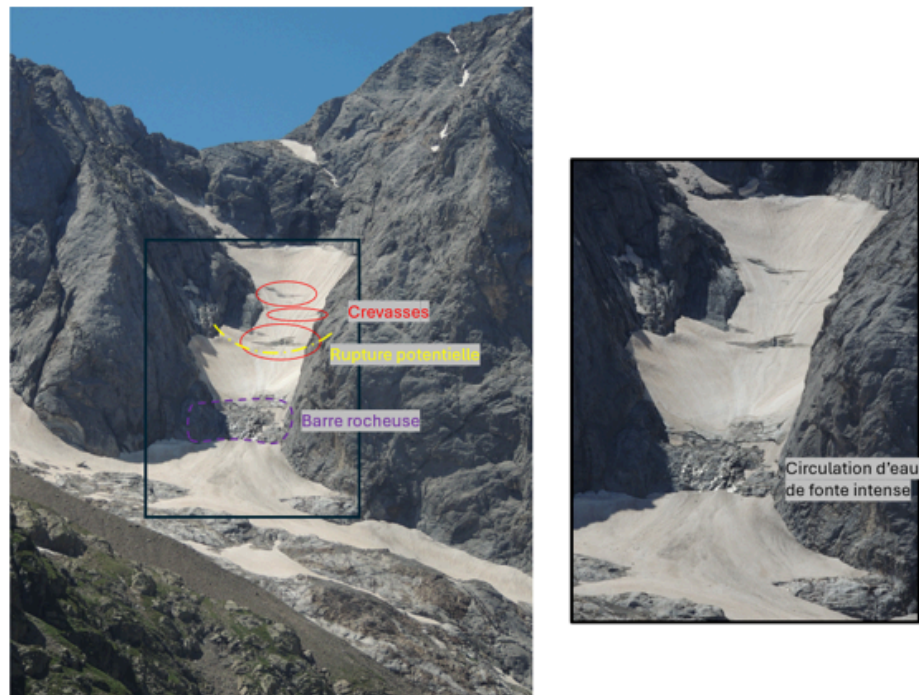


Figure 29 : Photo-interprétation de l'aléa glaciaire du Petit Vignemale, glacier des Oulettes (Anna Pellaers, 10 juillet 2025)

Analyse de l'aléa glaciaire :

Plusieurs facteurs concourent à un risque de rupture potentiel sur la partie amont du glacier :

- La pente marquée au-dessus de la barre rocheuse ;
- La présence de crevasses ;
- Une circulation hydrologique intense, avec infiltration de l'eau de fonte jusque dans le lit rocheux, augmentant les possibilités de lubrification à la base.

Ces éléments pourraient favoriser un glissement basal et une rupture dans la partie suspendue du glacier, identifiée comme zone de rupture potentielle sur la photo-interprétation (figure 29). Ce scénario représente à ce jour le seul aléa glaciaire plausible identifié sur ce site.

L'aléa est estimé à 1 (moyen) selon la grille d'analyse adoptée.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	1
---	---

4.2.1.3 Taillon supérieur

Caractéristiques générales :

Le glacier du Taillon supérieur est un glacier de cirque, exposé nord-est. Il s'étend entre 2709 m et 2788 m d'altitude, sur une pente moyenne d'environ 37°, reposant sur une barre rocheuse. Sa surface actuelle est estimée à 1,6 hectare (Association Moraine, 2023).



Figure 30 : Glacier du Taillon, Parc national des Pyrénées (P. Meyer), date approximative : 2020

Historique :

En 1850, lors du Petit Âge Glaciaire, le glacier du Taillon occupait une position bien plus vaste. Il prenait naissance au niveau de la Fausse Brèche (environ 2900 m) et s'étendait jusqu'à 2360 m d'altitude, atteignant plus de 1 km de longueur (Association Moraine, 2013). À cette époque, il constituait un glacier de versant relativement important.

Entre 1914 et 1960, on observe une accélération marquée de la fonte, relevée par Administration des Eaux et Forêts. Toutefois, une période de légère croissance est observée entre 1977 et 1979, avec un gain de masse estimé à +0,7 m d'épaisseur, traduisant une phase de stabilité.

Depuis le milieu du XIXe siècle, le glacier a toutefois subi une régression massive, avec une perte de plus de 80 % de sa surface. En 2007, il se scinde en deux unités distinctes : une partie supérieure, et une partie inférieure, désormais exclue de l'analyse en raison de sa faible pente (< 25°).

Aucun événement glaciaire n'a été signalé dans la littérature scientifique ou les archives locales.

Morphologie et dynamique glaciaire :

La partie supérieure du glacier du Taillon, seule retenue dans cette étude, présente une morphologie résiduelle. Située au-dessus de la barre rocheuse, elle ne montre aucun signe de dynamique glaciaire active. L'absence de crevasses ou de déformation de la glace suggère un glacier qui perd progressivement en épaisseur et en cohésion. La glace est conservée localement par l'ombrage ou la topographie, mais le fonctionnement interne est désormais très limité, voire inexistant.

Analyse de l'aléa glaciaire :

L'aléa glaciaire associé au Taillon supérieur est globalement faible, compte tenu de son activité réduite. Voici les éléments analysés :

- Chute de séracs : absente, car aucun sérac n'est présent sur le glacier.
- Vidange d'une poche d'eau : peu probable. La pente élevée ($\sim 35^\circ$) du substrat rocheux favorise un écoulement naturel des eaux de fonte.
- Glissement : il s'agit de l'aléa le plus envisageable. Toutefois, aucun signe de rupture ni fissure n'a été identifié à ce jour. De plus, si un glissement devait survenir, son impact resterait limité, en raison de la petite taille du glacier.

L'aléa est estimé à 0 (faible) selon la grille d'analyse adoptée.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.1.4 Pailla est

Caractéristiques générales :

Pailla Est est un glacier de suraccumulation, c'est-à-dire qu'il se forme principalement grâce aux dépôts d'avalanches en provenance de parois abruptes (Moraine, 2013). Situé en marge du cirque de Gavarnie, exposé nord, il fait partie d'un ensemble morcelé comprenant plusieurs entités proches : Pailla est, Pailla ouest 1 et Pailla ouest 2.

En 2023, la surface du glacier de Pailla Est est estimée à 1,6 hectares, pour une altitude comprise entre 2 500 m et 2 601 m.



Figure 31 : Glacier de Pailla est, Association Moraine, septembre 2023

Historique :

Son étendue a toujours été modeste, n'ayant jamais dépassé les 10 hectares (Moraine, 2013).

Aucun événement glaciaire n'a été signalé dans la littérature scientifique ou les archives locales.

Morphologie et dynamique glaciaire :

Le glacier de Pailla Est présente une morphologie proche de celle d'un glacier rocheux, caractérisé par une fine couche de glace résiduelle recouverte ou mêlée à des matériaux rocheux. Aucune dynamique glaciaire active n'est observée : la masse glaciaire restante semble stable. L'ensemble semble davantage fossilisé qu'en mouvement, marquant ainsi une phase terminale de l'évolution glaciaire sur ce site.

Analyse de l'aléa glaciaire :

En conséquence, l'aléa est estimé à 0 (faible) selon la grille d'analyse adoptée.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.1.5 Bilan de l'aléa glaciaire pour les glaciers avec barre rocheuse

Parmi les quatre glaciers étudiés, le glacier des Oulettes supérieur présente le plus fort aléa (2). Il cumule plusieurs zones sources potentielles, avec des événements historiques documentés. Lors de la sortie de terrain du 12 juillet 2025, de nouveaux blocs issus de ruptures récentes étaient visibles au pied du glacier, ce qui confirme une dynamique glaciaire encore active.

Le glacier du Petit Vignemale présente un aléa modéré (1). Bien qu'il n'y ait pas de séracs, plusieurs signes de fragilité sont relevés : présence de crevasses, circulation d'eau sous-glaciaire, substrat peu rugueux. Ces éléments peuvent provoquer un glissement du front, bien que l'activité glaciaire soit globalement en déclin.

En revanche, les glaciers du Taillon supérieur et de Pailla Est sont aujourd'hui considérés comme résiduels. Leur dynamique est quasi nulle, ils ne présentent pas de signes de rupture ni de morphologies instables. Ils sont en train de disparaître progressivement, l'aléa est donc évalué comme faible (0).

Les coches indiquent un critère présent ; les croix signalent un critère absent ; les tirets correspondent à un critère incertain ou non vérifiable.

Tableau 9 : Bilan des zones sources potentielles des glaciers avec barre rocheuse, à régime tempéré avec forte fonte estivale

Critères	Oulettes Supérieur	Petit Vignemale	Taillon Supérieur	Pailla Est
Bilan de masse négatif (ablation)	✓	✓	✓	✓
Fonte estivale généralisée	✓	✓	✓	✓
Barre rocheuse	✓	✓	✓	✓
Barre de séracs surplombant la barre rocheuse	✓	✗	✗	✗

Crevasses	✓	✓	✗	✗
Circulation d'eau de fonte sous-glaciaire (au substrat)	✓	✓	✓	-
Lubrification au contact glace/roche	✓	✓	-	-
Faible rugosité du substrat	✓	-	-	✗
Résurgence	✓	✓	✗	✗
Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	2	1	0	0

La deuxième partie de l'analyse s'effectue sur les glaciers sans barre rocheuse.

4.2.2 Glaciers tempérés sans barre rocheuse

4.2.2.1 Pailla ouest 1 et 2

Caractéristiques générales :

Situé en marge du cirque de Gavarnie, ces entités font partie d'un ensemble morcelé. À l'origine, le glacier de Pailla constituait une entité unique, qui s'est progressivement divisée en deux parties (Pailla Est et Pailla Ouest), puis en trois entités distinctes à l'heure actuelle : Pailla Est, Pailla ouest 1 et Pailla ouest 2.

Pailla ouest un glacier de suraccumulation, c'est-à-dire qu'il se forme principalement grâce aux dépôts d'avalanches en provenance de parois abruptes (Moraine, 2013).

En 2023, la surface du glacier de Pailla ouest 1 est estimée à 1,4 hectares, pour une altitude comprise entre 2 502m et 2 414m. Pailla ouest 2 fait la même année 0,3 hectares entre 2489m et 2429m.



Figure 32 : Glacier de Pailla ouest, Association Moraine, septembre 2023

Historique :

Pour l'historique de ce glacier, se référer à Pailla Est (page 44).

Aucun événement glaciaire n'a été signalé dans la littérature scientifique ou les archives locales.

Morphologie et dynamique glaciaire :

Le glacier de Pailla ouest est en apparence très dégradé, recouvert (environ 50%) de débris rocheux. Malgré cet aspect peu actif, des crevasses sont encore visibles sur la gauche du glacier (figure 32), ce qui témoigne d'une certaine activité résiduelle.

Analyse de l'aléa glaciaire :

Dans cette configuration la chute de séracs est exclue (étant absents). La vidange d'une poche d'eau sous-glaciaire est également très improbable, car la pente et la morphologie du glacier proche de la paroi ne favorise pas l'accumulation d'eau de fonte sous la glace.

L'aléa envisageable serait une rupture partielle au niveau des crevasses, du front glaciaire. Cependant, au vu du volume mobilisable et de la fonte intense, l'aléa est faible car le glacier tend à fondre sans encombre.

L'aléa est évalué comme faible (0) pour Pailla ouest 1 et Pailla ouest 2.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.2 Las Néous

Caractéristiques générales :

Le glacier de Las Néous se situe dans le massif du Balaïtous, sur le versant est. Avec une surface estimée à 2,3 hectares en 2023, il s'étend entre 3 037 mètres et 2 832 mètres d'altitude, occupant un espace escarpé et encaissé. Il s'agit d'un glacier de cirque, c'est-à-dire qu'il est confiné dans un amphithéâtre rocheux.

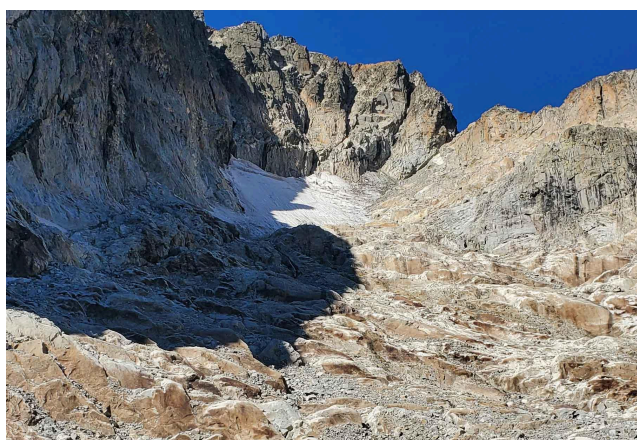


Figure 33 : Glacier de Las Néous, Association Moraine, septembre 2023

Historique :

Au XIXe siècle, le Balaïtous comptait plusieurs glaciers, parmi lesquels ceux de la brèche Latour, de la Frondella ou encore du Pabat. Aujourd'hui il ne reste plus que celui de Las Néous.

En 1850 il s'étendait sur une longueur de 1700m et couvrait une cinquantaine d'hectares. Pierre René explique « avec 1400m de retrait en un siècle et demi (10 mètres par an en moyenne), le glacier de Las Néous détient le record de régression des Pyrénées » (Glacier des Pyrénées, 2013).

Morphologie et dynamique glaciaire :

Face aux conditions climatiques défavorables, le glacier s'est retiré vers les altitudes les plus élevées. Il est aujourd'hui perché en contrebas de la paroi rocheuse « mais sa marge de manœuvre est limitée : sa fin est proche » (P. René, 2013).

Des crevasses étaient encore apparentes en 2012, désormais elles ne le sont plus. Le glacier tend vers un stade résiduel.

Analyse de l'aléa glaciaire :

L'aléa chute de séracs est exclu (absents du glacier). L'aléa de glissement du front glaciaire paraît peu probable, aucun indice de rupture n'ayant été observé. Quant à la vidange brutale d'une poche d'eau sous-glaciaire, elle semble également improbable. En effet, la pente raide, la circulation active de l'eau de fonte et la rugosité apparente du substrat rocheux, ne favorisent pas l'accumulation d'eau sous-glaciaire.

L'aléa est évalué comme faible (0) pour le glacier de Las Néous.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.3 Ossoue, lambeau inférieur et sud

Le glacier principal d'Ossoue a été initialement écarté de l'analyse en raison du critère de pente, considérant qu'il ne présentait pas suffisamment de zones inclinées à moins de 25°. Toutefois, il paraît indispensable d'intégrer ce glacier dans l'évaluation globale de l'aléa, au vu de son importance. En effet, le glacier d'Ossoue est, à ce jour, le plus vaste glacier des Pyrénées, avec une surface de 21,7 hectares. L'exclure de l'analyse reviendrait à ignorer une entité majeure du patrimoine glaciaire pyrénéen.

Dans cette optique, et pour mieux rendre compte de sa dynamique morcelée, le glacier d'Ossoue a été subdivisé en trois entités distinctes : le glacier principal d'Ossoue, le lambeau inférieur et le lambeau sud.

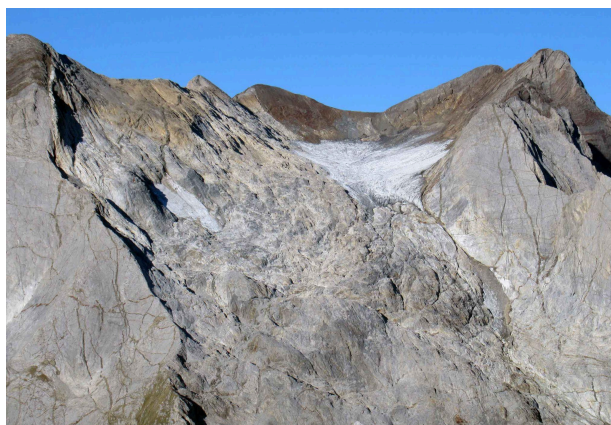


Figure 34 : Glacier d'Ossoue, Association Moraine, septembre 2023

Caractéristiques générales :

Le glacier d'Ossoue se situe dans le Vignemale, rassemblant plusieurs glaciers notables par leur taille et leur morphologie : les Oulettes de Gaube, le Petit Vignemale et Ossoue.

L'exposition générale du massif est orientée vers l'est, et sa topographie est peu favorable à l'accumulation de neige : le glacier est faiblement alimenté par des avalanches et exposé directement au rayonnement solaire, contrairement à d'autres glaciers mieux protégés par des parois rocheuses. Sur les quinze dernières années, le bilan de masse n'a été légèrement positif qu'à une seule reprise, ce qui souligne la situation critique de ce glacier.

Les altitudes des entités sont les suivantes :

- Glacier d'Ossoue : entre 3 213 m et 2 982 m
- Lambeau inférieur : entre 2 939 m et 2 806 m
- Lambeau sud : entre 3 034 m et 2 948 m

Les superficies sont :

- Glacier d'Ossoue : 21,7 hectares
- Lambeau inférieur : 0,78 hectare
- Lambeau sud : 1,2 hectare

Historique :

Les informations historiques sont tirées du site internet Criosfera pirineos.

Lors du Petit Âge Glaciaire, le glacier atteignait une superficie d'environ 112 hectares. Sa langue glaciaire s'étirait sur 2 430 mètres, bien au-delà des longueurs observées sur les autres grands glaciers pyrénéens.

Au cours du XXe siècle, la langue glaciaire a progressivement rétréci, tout en conservant jusqu'à récemment une longueur importante : 1,9 km au début du siècle, puis 1,6 km à la fin, et encore 1,4 km en 2012. En 2007, l'apparition du seuil rocheux a modifié la dynamique du glacier, et a contribué à la formation de deux entités glaciaires, séparées définitivement en 2016-2017.

Le lobe sud, plus petit, présentait encore une certaine activité en 2017, mais il est désormais considéré comme un névé, c'est-à-dire un reste de neige persistante sans véritable dynamique glaciaire. Sur la marge gauche, une étroite langue de glace accrochée au versant nord, entre le col des Glaciers et le Petit Vignemale, s'est également détachée du glacier principal en 2022, adoptant à son tour la morphologie d'un névé (figure 35).

Depuis le début du XXI^e siècle, le recul du glacier a été mesuré à une moyenne d'environ 13 mètres par an, avec une perte d'épaisseur estimée à 2 mètres par an. Les années de 2022 et 2023 ont enregistré des bilans de masse négatif de 4,06 m et 4,52 m de perte d'épaisseur, des records depuis le début des relevés.



Figure 35 : Glacier d'Ossoue en 1911 et 2021, Association Moraine

Morphologie et dynamique glaciaire :

Aujourd'hui, le glacier d'Ossoue ne subsiste que sous forme de trois entités, dont deux névés. Seul le glacier principal a désormais une activité glaciaire qui semble stable car il est positionné dans un creux.

Analyse de l'aléa glaciaire :

Aucun aléa glaciaire significatif ne peut être identifié sur le glacier d'Ossoue, ni sur ses lambeaux inférieurs et sud. Aucun phénomène de type chute de séracs, vidange de poche sous-glaciaire ou glissement basal ne semble envisageable dans la configuration actuelle.

L'ensemble des entités du glacier d'Ossoue est classé en niveau d'aléa 0 (faible).

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.4 Astazou

Caractéristiques générales :

Le glacier d'Astazou est situé dans le massif du Mont-Perdu au cœur du cirque d'Estaubé, sur le versant nord de la frontière franco-espagnole. Il est le voisin du glacier de Pailla Est, dont il est séparé

par la hourquette de Pailla. Sa surface actuelle est de 4,64 hectares et ses altitudes sont comprises entre 2571m et 2418m.



Figure 36 : Glacier d'Astazou, Association Moraine (2023)

Historique :

Lors du Petit Âge Glaciaire, le glacier d'Astazou atteignait une surface de 9 hectares. Sa langue glaciaire s'étendait alors jusqu'à la hourquette de Pailla, avec une longueur maximale estimée à environ 250 mètres. Comme de nombreux petits glaciers pyrénéens, il a subi un recul marqué tout au long du XXe siècle, entraînant une réduction drastique de sa taille et de son activité dynamique.

Morphologie et dynamique glaciaire :

Aujourd'hui, le glacier s'apparente davantage à un glacier rocheux : la glace résiduelle est enfouie sous les éboulis, limitant sa dynamique de surface et rendant les signes d'écoulement glaciaire difficiles à observer.

Analyse de l'aléa glaciaire :

Le risque glaciaire associé au glacier d'Astazou est jugé faible. Sa dynamique quasi inexistante rend impossible un phénomène glaciaire tel qu'une chute de séracs ou une vidange glaciaire brutale.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.5 Munia

Caractéristiques générales :

Le glacier de la Munia est situé dans le cirque de Troumouse à l'aplomb du pic de la Munia (3133m). Il repose sur une pente exposée au nord-est et sa surface actuelle est de 2,6 hectares.



Figure 37 : Glacier de la Munia, Association Moraine (2023)

Historique :

À la fin du Petit Âge Glaciaire, le glacier mesurait jusqu'à 10 hectares au maximum et s'étendait sur une longueur d'environ 500 m. Face aux conditions climatiques actuelles, il a largement régressé en surface et en épaisseur : alors que sa longueur en 2000 était estimée à environ 45 m avec des crevasses de 20 m de profondeur, en 2020 il ne couvre plus que 2,6 hectares.

Morphologie et dynamique glaciaire :

C'est un glacier de suraccumulation, c'est-à-dire qu'il se forme principalement à la base de parois abruptes, là où s'accumulent les dépôts d'avalanches. Des crevasses sont présentes (figure 37), ainsi que des blocs de glace qui montrent une certaine activité glaciaire. Ces blocs semblent être liés à la fracturation de la glace sous l'effet de la fonte très importante car ils sont situés en amont du glacier.

Analyse de l'aléa glaciaire :

On ne peut exclure la chute de ces blocs de glace mais elle paraît improbable au vu de leur position : ils semblent être maintenus de l'aval par effet de compression par le glacier. Cependant, dans un stade de fonte plus avancée, il serait possible que ces blocs se détachent par une rupture au niveau de la crevasse principale (partant du milieu du glacier). Par un effet en cascade, la chute de ces blocs pourrait survenir mais un tel phénomène paraît peu probable.

La circulation d'eau de fonte semble importante au vu du petit lac présent en aval. La vidange de poche d'eau sous-glaciaire est donc exclue.

Le risque glaciaire associé au glacier d'Astazou est jugé faible.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.6 Barroude

Caractéristiques générales :

Le glacier de Barroude se situe dans le massif de la Munia, entre 2 530 et 2 403 mètres d'altitude. En 2023, sa surface est estimée à 2,4 hectares.



Figure 38 : Glacier de Barroude, Association Moraine (2023)

Historique :

Au cours du Petit Âge Glaciaire, le glacier de Barroude représentait le plus grand glacier du massif de la Munia. Il s'étendait sur une surface d'environ 16 hectares et atteignait une longueur de près de 700 mètres. Son alimentation était favorisée par une importante suraccumulation de neige, liée aux éboulements du mur de Barroude, situé entre les pics de Tromouse et d'Heid. Grâce à ces apports, le glacier est resté actif jusqu'à environ 2010. Sa langue glaciaire descendait alors jusqu'à une altitude relativement basse, autour de 2 400 mètres.

Morphologie et dynamique glaciaire :

Aujourd'hui, le glacier de Barroude se présente comme un glacier résiduel entièrement recouvert de débris rocheux. Ce couvert cache la glace, mais l'écoulement glaciaire reste perceptible par la présence d'un tunnel creusé par la fonte (figure 38), par lequel s'échappe l'eau issue du glacier. Il est possible que ce tunnel fasse suite à la rupture d'une poche d'eau sous-glaciaire.

Quelques crevasses subsistent encore au centre, bien qu'elles soient elles aussi recouvertes de matériaux. L'ensemble témoigne d'une dynamique fortement réduite.

Analyse de l'aléa glaciaire :

Le glacier de Barroude ne présente actuellement pas de risques notables associés à des chutes de séracs (absents) ou à une rupture brutale de son front. De plus, la probabilité d'une vidange brutale de poche d'eau sous-glaciaire est jugée faible, compte tenu de l'écoulement constant et important observé. Ainsi, le niveau d'aléa glaciaire associé à ce glacier est considéré comme faible.

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.7 Arcouzan

Caractéristiques générales :

Le glacier d'Arcouzan est situé sur les pentes nord-est du mont Vallier, dans le massif de l'Ariège, en région Occitanie. Il s'étend actuellement entre 2 539 mètres et 2 357 mètres d'altitude. Sa superficie est estimée à 13 602 m² (soit environ 1,36 hectares). Il s'agit du glacier le plus oriental des Pyrénées françaises, ce qui lui confère une position géographique particulière dans l'étude du retrait glaciaire.



Figure 39 : Glacier d'Arcouzan, Association Moraine (2023)

Historique :

Contrairement à la majorité des glaciers pyrénéens, qui suivent une dynamique de recul presque continue depuis le Petit Âge Glaciaire, le glacier d'Arcouzan a connu une légère phase de croissance au début des années 2010. Cela s'explique par des précipitations neigeuses abondantes, qui ont permis une augmentation de sa superficie. En l'espace de trois saisons, le glacier est ainsi passé de 1,8 hectare à 2,8 hectares en 2014, avec notamment un gain de 5 000 m² en 2013. Sur la période 1850-2012, sa diminution globale est restée inférieure à la moyenne : environ -70 % contre -85 % pour l'ensemble des glaciers pyrénéens.

À partir de 2014, le glacier entre de nouveau en phase de retrait, quoique modérée : sa surface diminue légèrement pour atteindre 2,48 hectares en 2018. En revanche, la période 2018-2021 est marquée par une fonte beaucoup plus significative, avec une perte de 6 mètres d'épaisseur en seulement trois ans.

Morphologie et dynamique glaciaire :

Il est un glacier de suraccumulation : il est niché au pied d'une paroi rocheuse abrupte, contre laquelle il reçoit une grande partie de ses apports neigeux par chute ou avalanche. La glace présente une coloration marronâtre sur la droite, témoignant de sa régression, tandis que le centre du glacier est plus blanchâtre, suggérant la présence de récentes accumulations neigeuses (figure 39).

De nombreuses crevasses longitudinales parcourant tout le glacier sont visibles. La partie gauche du glacier apparaît comme plus dégradée et plus fragmentée que la partie droite : elle tend à disparaître plus rapidement, et les crevasses constituent désormais la structure même de la masse glaciaire résiduelle.

Analyse de l'aléa glaciaire :

Sa position encaissée sur une pente et contre une paroi rocheuse rend peu probable la formation de poches d'eau sous-glaciaires, du fait d'un écoulement rapide des eaux de fonte. Par ailleurs, bien que de petits blocs de glace puissent ponctuellement se détacher de la rive gauche, aucune masse suspendue de grande ampleur ne permet d'envisager la venue d'une chute de blocs de glace importante.

La rupture frontale du glacier, souvent associée à des surélévations ou à un surplomb, n'est pas visible et peu envisageable.

En résumé, bien que le glacier conserve une dynamique résiduelle, les conditions géomorphologiques et la faible quantité de glace exposée à l'instabilité conduisent à classer le risque glaciaire comme faible (0).

Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0
---	---

4.2.2.8 Bilan de l'aléa glaciaire

Les impacts du réchauffement climatique sont évidents par la réduction des glaciers pyrénéens. Aucun des glaciers étudiés ne présente actuellement les conditions nécessaires à l'émergence d'un aléa glaciaire significatif. Ni chute brutale de séracs, ni rupture frontale, ni vidange soudaine sous-glaciaire ne sont envisagées dans l'état actuel des connaissances et observations. Ce bilan souligne l'évolution des glaciers pyrénéens vers des formes résiduelles, caractérisées par une stabilité relative mais fragile.

Le tableau synthétise les principales caractéristiques observées dans ces glaciers. Les indicateurs d'un potentiel aléa sont généralement absents ou très peu marqués.

Tableau 10 : Bilan des zones sources potentielles des glaciers sans barre rocheuse, tempérés et soumis à une forte fonte estivale

Critères	Pailla Ovest 1 et 2	Las Néous	Ossoue lambeau inférieur et sud	Astazou	Munia	Barroude	Arcouzan
Bilan de masse négatif (ablation)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fonte estivale généralisée	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Séracs	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Crevasses	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Infiltration (eau de fonte, pluie)	✓	✓	-	-	✓	-	✓
Circulation d'eau de fonte sous-glaciaire (au substrat)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lubrification au contact glace/roche	-	✗	-	-	✗	✗	✗
Faible rugosité du substrat	✗	✗	✗	✗	-	-	-
Résurgence	✗	✗	-	✗	-	-	-
Aléa 0 = faible ; 1 = moyen ; 2 = fort	0	0	0	0	0	0	0

En particulier :

La majorité des glaciers sont de type suraccumulation, c'est-à-dire qu'ils se situent au pied de parois abruptes et sont alimentés par des dépôts ponctuels d'avalanches. Leur configuration ne favorise pas le glissement basal du front glaciaire, car aucune lubrification au contact glace/roche n'a été observée.

La vidange de poches d'eau sous-glaciaires, bien que difficilement observable, est écartée, car tous les glaciers présentent une forte circulation d'eau sous-glaciaire. On peut donc supposer que l'eau s'écoule plutôt que de se bloquer dans les interstices glaciaires.

La chute de séracs est également exclue, car ils sont absents sur l'ensemble des glaciers étudiés.

La majorité des glaciers, notamment Pailla, Astazou, Munia, Arcouzan et Barroude, sont largement couverts par des débris rocheux. Cette couverture, témoignant d'une fonte glaciaire avancée, joue un rôle stabilisateur en réduisant la mobilité interne de la glace et en limitant ainsi le risque d'effondrement soudain ou de ruptures majeures.

Des glaciers tels que les lambeaux inférieurs et sud d'Ossoue, Barroude et Astazou montrent des signes clairs de disparition imminente. Leur volume minimise encore davantage le potentiel d'instabilités importantes, puisque ces masses résiduelles sont morphologiquement dégradées et peu dynamiques.

Seuls les glaciers de la Munia, Ossoue, Arcouzan, Pailla Ouest et Barroude, conservent encore des crevasses, indicateurs d'une certaine dynamique interne. Cependant, la localisation et la configuration topographique associée ne favorisent pas des ruptures majeures.

Cas particuliers à surveiller :

Le glacier de la Munia, bien qu'en apparence globalement stable présente des crevasses partant du centre du glacier qui, en cas d'intensification rapide de la fonte, pourrait devenir le point d'initiation d'une rupture locale, susceptible d'entraîner la chute de blocs en amont. Il serait important de surveiller son évolution dans les années à venir.

4.2.3 Bilan global des aléas glaciaires dans les Pyrénées françaises

L'analyse des onze glaciers pyrénéens permet de dégager une tendance claire : l'aléa glaciaire est globalement faible à l'échelle de la chaîne pyrénéenne, bien que des situations localement instables existent (tableau 11, figure 40).

La présence d'une barre rocheuse en pied de glacier joue un rôle déterminant dans l'intensité et la probabilité des aléas. En effet, les glaciers dotés de cette configuration présentent un aléa plus fort, lié à des mécanismes de rupture plus fréquents et plus violents.

Parmi les sept glaciers sans barre rocheuse étudiés, aucun ne présente de critères suffisants pour être considéré comme une zone source d'aléas. Ces glaciers sont notamment dépourvus de séracs, ces blocs de glace instables pouvant provoquer des chutes brutales. De plus, l'absence de lubrification au contact glace/roche empêche tout glissement rapide du glacier. Les crevasses, lorsque présentes — comme c'est le cas pour les glaciers du Munia, d'Arcouzan, de Pailla Ouest et du Barroude —, reflètent une dynamique interne plutôt faible et, en raison de la configuration topographique, ne conduisent pas à des ruptures majeures. Par ailleurs, les débris rocheux contribuent à stabiliser les masses glaciaires restantes, limitant leur mobilité interne et réduisant ainsi le risque d'effondrement soudain. Certains de ces glaciers, notamment les lambeaux inférieurs et sud d'Ossoue, ainsi que Barroude et Astazou, montrent une tendance à la disparition imminente, ce qui diminue encore plus la probabilité d'événements dangereux.

En revanche, chez les glaciers qui possèdent une barre rocheuse, plusieurs formes d'aléas sont identifiées. Le glacier des Oulettes supérieur représente un aléa fort. Ce glacier a plusieurs zones sources potentiellement instables, avec des événements historiques enregistrés ainsi que des ruptures récentes qui témoignent d'une dynamique glaciaire encore active. La présence de séracs, de crevasses importantes, la lubrification au contact glace/roche et la circulation sous-glaciaire d'eau accentuent le niveau d'aléa.

Le glacier du Petit Vignemale, quant à lui, présente un aléa moyen. Bien qu'il ne comporte pas de séracs, la présence de crevasses, une circulation d'eau sous-glaciaire notable et un substrat peu rugueux sont autant de facteurs qui fragilisent la stabilité du glacier. Le front glaciaire du Petit Vignemale peut ainsi potentiellement glisser, même si sa dynamique tend globalement à décroître. Enfin, les glaciers du Taillon supérieur et de Pailla Est affichent un aléa faible. Ces glaciers sont presque résiduels et ne présentent pas de signes d'instabilité notable.

En résumé :

Tableau 11 : Niveau d'aléa des glaciers blancs dans les pyrénées françaises

	Nombre	Aléa fort (2)	Aléa moyen (1)	Aléa faible (0)
Sans barre rocheuse	7	0	0	7
Avec barre rocheuse	4	1 (Oulettes supérieur)	1 (Petit Vignemale)	2

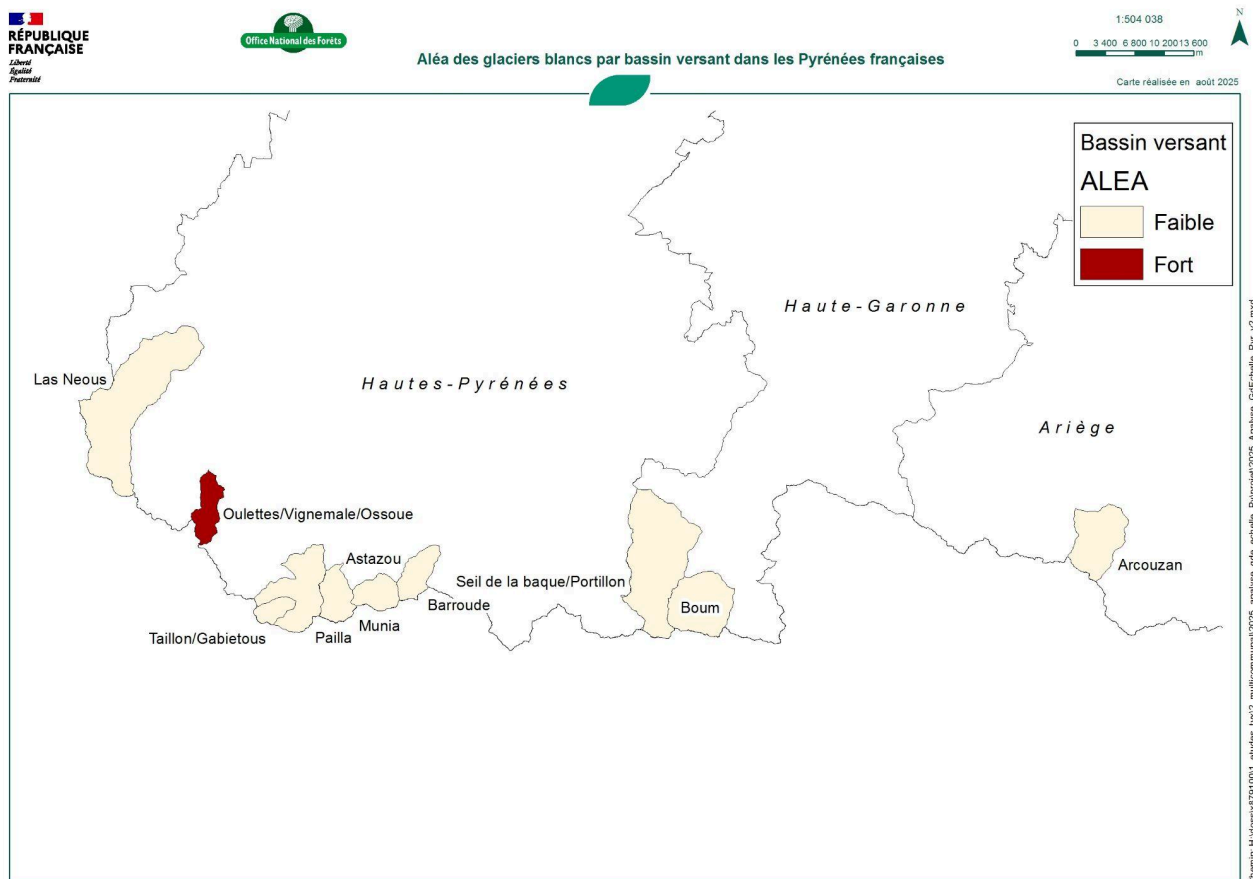


Figure 40 : Cartographie des aléas glaciaires dans les Pyrénées françaises

Après avoir défini l'aléa glaciaire, il est nécessaire de procéder à une étude des risques à l'aide de la méthode de la ligne d'énergie. L'objectif de la partie suivante est de croiser l'aléa avec les enjeux situés en aval afin d'établir un niveau de risque.

4.3 Evaluation des risques glaciaires dans les Pyrénées à court et moyen terme

4.3.1 Méthode d'analyse de la propagation d'avalanche de glace à partir de la méthode de la ligne d'énergie

Dans le cas des Pyrénées, cette méthode a été appliquée au glacier des Oulettes de Gaube, considéré, selon l'avis à dire d'expert, comme le seul glacier présentant une forte probabilité de rupture. Deux événements historiques ont été recensés : l'un en 2007 et l'autre en 2009 (Moraine, 2007 et 2009).

Ces deux événements ont produit des distances de propagation de l'ordre de 300 à 400 mètres, avec des volumes estimés à 2 000 m³ pour le plus important et 100 m³ pour le moins important.

Tableau 12 : Mesure du H/L pour le glacier des Oulettes supérieur

Glacier et année de l'événement	Volume (en m ³)	Différence d'altitude H (en m)	Longueur L suivant trajectoire (en m)	Rapport H/L	Angle ligne d'énergie (en °)
Oulettes (2007)	2000	145	300	0.48	25,8
Oulettes (2009)	100	187	400	0.46	28
Rupture partielle (scénario atteignant le refuge)	1000	352	1730	0.2	11,5
Rupture totale (scénario atteignant le refuge)	31 000	352	1730	0.2	11,5

Les rapports H/L associés à ces événements sont respectivement de 0,48 (2007) et 0,46 (2009), ce qui correspond à des angles d'énergie de 25,8° et 28°. Ces valeurs traduisent un aléa glaciaire relativement localisé : seules les zones en contrebas du glacier ont été exposées.

Un scénario théorique a ensuite été simulé, dans lequel une rupture glaciaire atteindrait le refuge des Oulettes de Gaube, situé à 1 730 m en aval du point de départ potentiel. Dans cette hypothèse, le rapport H/L chute à 0,2, ce qui correspond à un angle de seulement 11,5°.

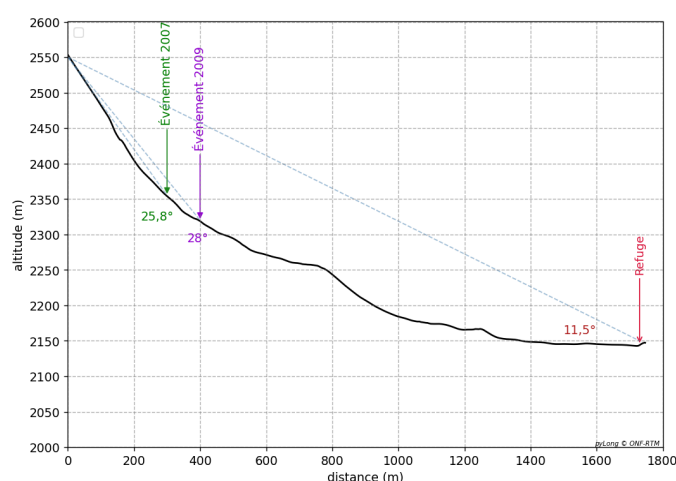


Figure 41 : Ligne d'énergie des avalanches de glace de 2007 et 2009 et ligne d'énergie atteignant le refuge des Oulettes de Gaube

Ce résultat implique qu'il faudrait un événement d'une intensité exceptionnelle, mobilisant une très grande quantité d'énergie, pour que la glace puisse atteindre le refuge (figure 41). Un tel cas de figure ne correspond à aucune situation recensée sur ce glacier ni même dans les données européennes existantes (figure 42). Ainsi, ce scénario permet d'appuyer l'estimation d'un risque faible sur ce site : le refuge apparaît, selon cette méthode, hors d'atteinte dans les conditions actuelles, y compris dans l'hypothèse d'une rupture complète de la masse glaciaire.

Enfin, les valeurs de H/L obtenues pour les Oulettes ont été comparées à une base de données européenne recensant des avalanches de glace selon leur volume et leur mobilité (Thibert et al., 2021). Ces données incluent notamment neuf rétro-analyses alpines réalisées par Juliette Bazin. Sur ce graphique, les événements des Oulettes s'intègrent dans la tendance générale. En revanche, le scénario refuge s'en éloigne nettement, confirmant son caractère hors norme. A noter que le volume utilisé pour le scénario hypothétique est de l'ordre de 2000 m³, seuil historique maximal.

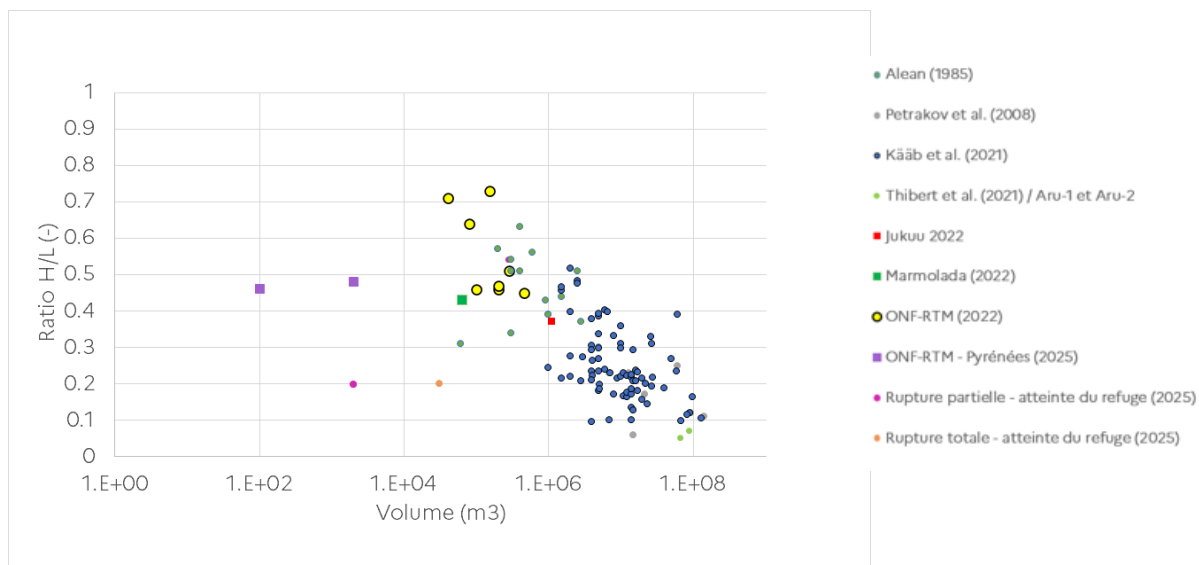


Figure 42 : Coefficient H/L en fonction du volume pour des avalanches de glace (adapté de Thibert et al., 2021). En violet figure les événements recensés (2007 et 2009), en rose le scénario pour atteindre le refuge des Oulettes

4.3.2 Bilan des risques glaciaires potentiels dans les Pyrénées

Le niveau de risque global est résumé dans le tableau ci-dessous et est hiérarchisé de la manière suivante : nul (0), moyen (1) ou élevé (2)

Tableau 13 : Liste des glaciers blancs pyrénéens, de leur probabilité de rupture et du niveau de risque relatif.

Massif	Glacier	Surface (ha)	Aléa	Volume mobilisable (m³)	Premier enjeu exposé	Rapport H/L	Angle d'énergie	Niveau de risque
Balaïtous	Las Néous	2,3	Faible	-	Refuge	-	-	Faible
Vignemale	Oulettes inférieur	2,4	Faible	-	Refuge	-	-	Faible
	Oulettes supérieur	3,1	Fort	2000	Refuge	0,2	11,5	Faible
	Petit Vignemale	1,3	Moyen	1000	Refuge	-	-	Faible
	Ossoue lambeau inférieur	0,7	Faible	-	Pont	-	-	Faible
	Ossoue lambeau sud	1,1	Faible	-	Pont	-	-	Faible
Gavarnie	Taillon supérieur	1,6	Faible	-	Grange	-	-	Faible
	Pailla Ouest 1	1,4	Faible	-	Refuge	-	-	Faible
	Pailla Ouest 2	0,3	Faible	-	Refuge	-	-	Faible
	Pailla Est	2,9	Faible	-	Refuge	-	-	Faible
	Astazou	4,6	Faible	-	Pont	-	-	Faible
Munia	Munia	2,5	Faible	-	Pont	-	-	Faible
	Barroude	2,4	Faible	-	Refuge	-	-	Faible
Mont Vallier	Arcouzan	1,3	Faible	-	Parking	-	-	Faible

En conclusion, le retrait rapide des glaciers fait émerger de nouveaux types de risques. En particulier, la disparition de la langue glaciaire pouvant entraîner la perte de la butée naturelle qui stabilisait jusque-là la partie supérieure du glacier. Cette évolution favorise l'instabilité des séracs restants, qualifiés de « séracs humides » en raison de la présence d'eau de fonte qui fragilise leur cohésion. En l'absence de cette butée, ces masses de glace peuvent désormais basculer plus facilement, augmentant potentiellement le risque d'avalanches de glace.

Deux zones sources potentielles de rupture glaciaire ont été identifiées sur le glacier des Oulettes supérieur et du du Petit Vignemale (fiches synthétiques en [annexe 5](#)). Ces glaciers se distinguent par la présence de séracs à proximité de barres rocheuses dans le cas des Oulettes, susceptibles de se décrocher au vu de la fonte accélérée. Une forte dynamique d'écoulement au contact de la glace/roche peut provoquer un glissement du front glaciaire dans le cas du Petit Vignemale. Ce dernier étant considéré comme moyen au vu de son stade résiduel.

L'analyse du risque appuyé par la méthode de la ligne d'énergie a permis d'évaluer précisément la possibilité d'une rupture pouvant affecter les zones habitées ou les infrastructures proches. Cette méthode a montré que le refuge des Oulettes de Gaube apparaît hors d'atteinte dans les conditions actuelles, y compris dans l'hypothèse d'une rupture complète de la masse glaciaire.

En conséquence, le risque qu'un événement glaciaire ou périglaciaire vienne impacter un enjeu est, à l'heure actuelle, considéré comme nul dans les Pyrénées.

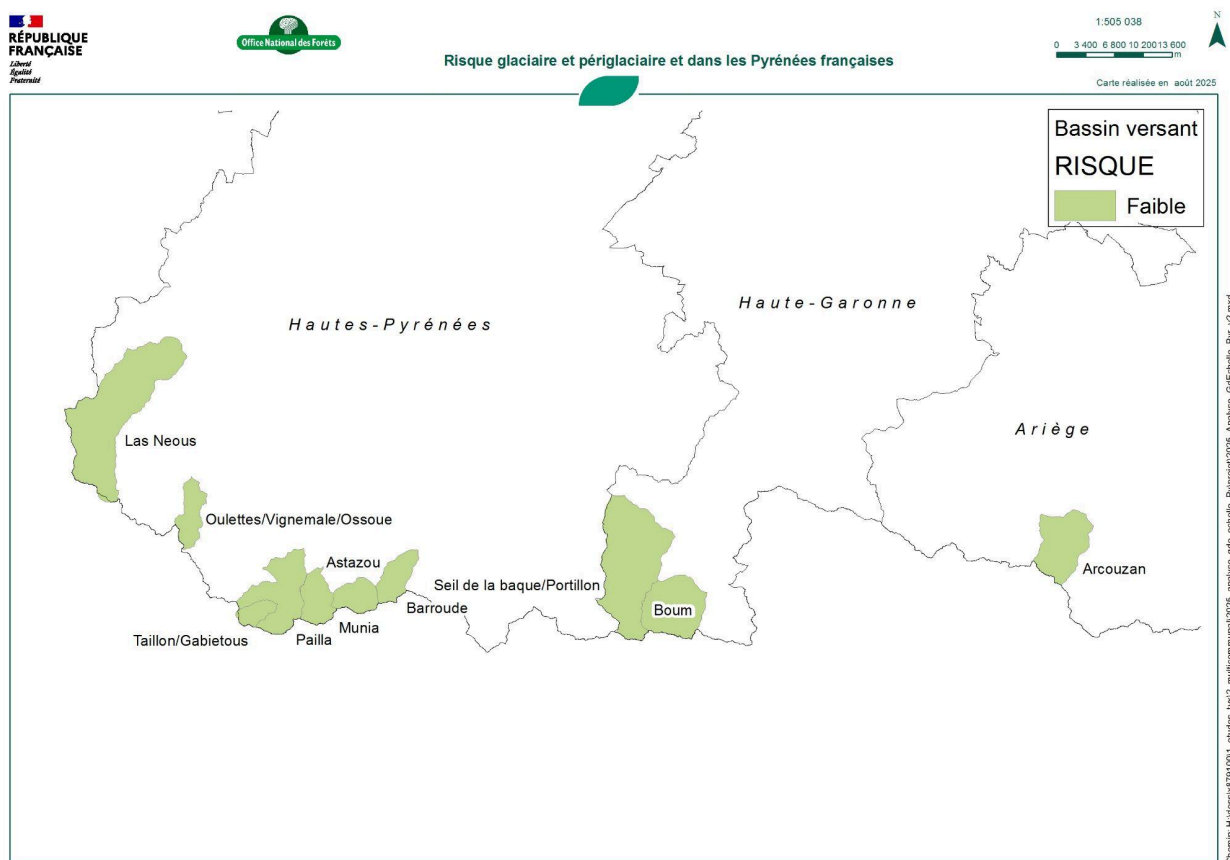


Figure 43 : Cartographie des risques glaciaires dans les Pyrénées françaises

Partie 5 : Discussion, mise en perspective et retour d'expérience

5.1 Retour sur les résultats obtenus

5.1.1 Intérêt scientifique et opérationnel du travail

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une commande formulée par le ministère de la Transition écologique, avec pour objectif d'initier une première analyse structurée des risques glaciaires dans les Pyrénées. Jusqu'à présent, aucun travaux de ce type n'avaient été réalisés sur ce sujet à l'échelle pyrénéenne, contrairement aux Alpes qui bénéficient d'un suivi plus ancien et plus régulier.

Ce travail a donc une double valeur : scientifique, car il apporte une meilleure compréhension du fonctionnement et des spécificités des glaciers pyrénéens ; et opérationnelle, car il propose une méthode utilisable par les gestionnaires pour identifier et hiérarchiser les zones à risque.

Un autre point concerne la méthodologie utilisée. Initialement pensée pour les Alpes, elle n'était pas entièrement adaptée au contexte pyrénéen. Il a donc fallu la retravailler et l'ajuster, notamment en proposant une typologie pyrénéenne des glaciers instables. Cela a demandé du temps, mais permet aujourd'hui d'avoir une base de travail plus cohérente avec les réalités du massif.

Sur le plan opérationnel, les résultats ont été synthétisés sous forme de cartes, de fiches synthétiques et d'un catalogue des bassins versants à risque.

Enfin, la sortie de terrain réalisée aux Oulettes de Gaube et au Petit Vignemale, a permis de confronter les données SIG à la réalité du terrain. Ce type d'observation est essentiel pour valider les hypothèses formulées au bureau et ancrer l'analyse dans le réel. Elle donne une plus-value importante à ce travail.

5.1.2 Limites du travail réalisé

Comme toute méthodologie de travail, ce mémoire comporte certaines limites.

Tout d'abord, la taille réduite et la faible activité des glaciers dans les Pyrénées rendent l'analyse à court terme, puisque comme le dit Pierre René, d'ici 2035 il n'y aura plus de glaciers. Leur petit volume, leur fragmentation et leur accès souvent difficile ne facilitent ni la collecte de données, ni les observations directes. De plus, le fait que les glaciers sont perchés en milieu de terrain isolé n'a permis qu'une seule sortie, ce qui limite la vérification sur place des observations faites à l'aide du SIG.

En début de stage, l'objectif était d'étudier quatre types de risques glaciaires et périglaciaires. Face à la complexité du sujet, j'ai dû faire le choix de me concentrer uniquement sur les glaciers blancs. Cela m'a permis de pousser l'analyse plus loin, même si cela implique que d'autres phénomènes (lacs glaciaires, parois permafrost et glaciers rocheux) n'ont pas été explorés (figure 44).

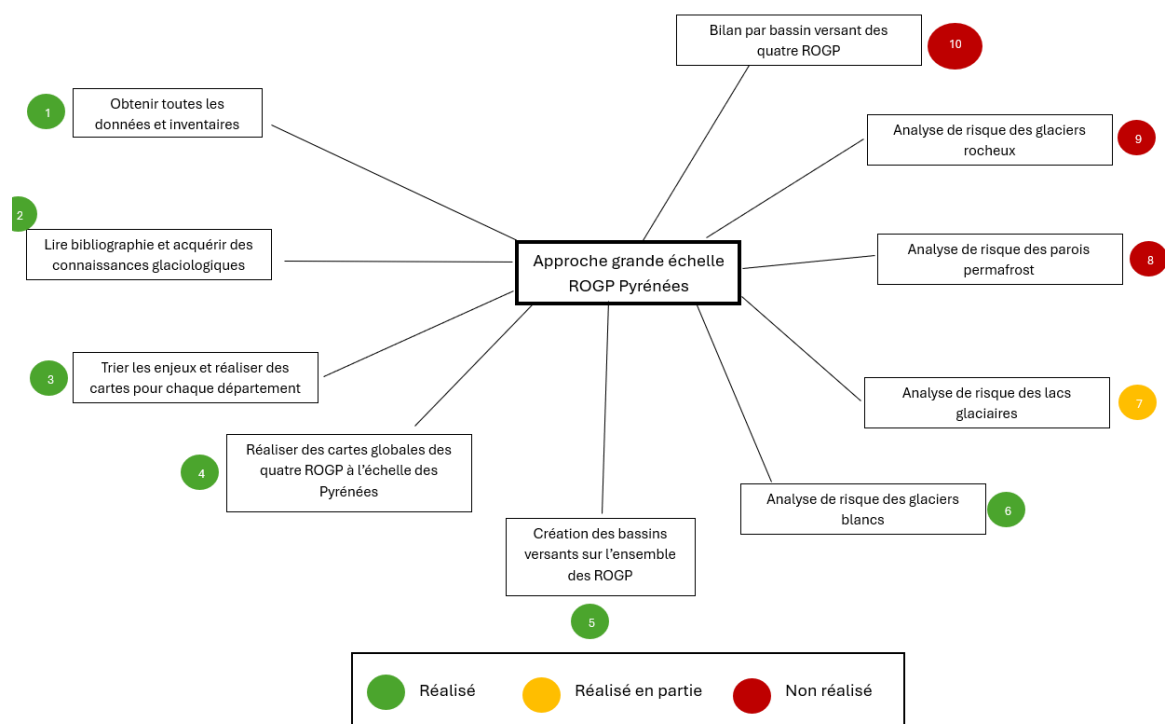


Figure 44 : bilan des missions effectuées et non-effectuées au cours du stage

Enfin, si j'ai été bien accompagné à distance par des personnes basés dans les Alpes, j'aurais aimé pouvoir échanger davantage en présentiel, ou participer à des sorties de terrain communes. Cela aurait permis de mieux comprendre leurs méthodes d'analyse et de confronter nos points de vue sur les différences entre les deux massifs.

5.2 De nouvelles perspectives : les risques associés aux lacs proglaciaires

5.2.1 Contexte et problématique

A la fin de mon stage, j'ai pu commencé l'analyse de risque sur les lacs glaciaires, en faisant le choix de me concentrer uniquement sur les lacs proglaciaires (à moins d'un kilomètre d'un glacier). Ce travail s'inscrit dans la continuité de l'étude menée sur les glaciers, en ouvrant une nouvelle perspective sur les risques liés aux plans d'eau d'origine glaciaire, qui constituent des milieux dynamiques et parfois instables. Le livrable se trouve en [annexe 6](#).

Les lacs glaciaires et périglaciaires, en forte expansion sous l'effet du recul accéléré des glaciers, peuvent entraîner des événements appelés *glacial lake outburst floods* (GLOFs). Les crues torrentielles figurent parmi les phénomènes naturels les plus destructeurs en milieu de montagne. Elles sont caractérisées par des écoulements chargés en matériaux solides (sédiments, blocs, bois, débris organiques), pouvant atteindre plus de 50 % du volume total, leur conférant l'aspect d'un « *béton en mouvement* » (Iverson, 1997). Leur forte viscosité, leur pouvoir érosif et leur capacité d'obstruction en font des risques majeurs.

La crue torrentielle de la Bérarde (Isère, juin 2024), bien que d'origine partiellement météorologique, a mis en évidence la contribution d'un processus glaciaire : la vidange du lac supraglaciaire de Bonne Pierre.

Cet événement montre que les interactions entre processus glaciaires et torrentiels peuvent conduire à des événements extrêmes, d'autant plus marqués que la connectivité sédimentaire est forte entre les zones glaciaires et les vallées habitées en aval.



Figure 45 : crue torrentielle de la Bérarde, village à 10h29 (source : Sécurité Civile, repris de la rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024, ONF-RTM)

Leur déclenchement peut être d'origine météorologique (pluies intenses), gravitaire (éboulement, glissement de terrain) ou glaciaire (vidange brutale de lac). Dans le cadre de cette étude, l'accent est mis sur ce dernier cas : les crues torrentielles liées aux lacs glaciaires. Elles se produisent principalement lors de la rupture ou de la surverse d'un barrage naturel.

Une typologie des lacs et leur niveau de sensibilité aux crues torrentielles est développé (Demolis, 2023):

- Lacs à barrage morainique : issus du recul glaciaire, ils sont retenus par des moraines composées de matériaux meubles et peu cohésifs, parfois instables. Leur fragilité peut être accentuée par la présence de glace morte. Les mécanismes de vidange incluent la surverse (pluies intenses, fonte rapide), la rupture brutale (chute de blocs, avalanche, glissement) ou encore un processus progressif (renard hydraulique, fonte interne, incision lente). Ces lacs représentent la configuration la plus sensible dans les Pyrénées.
- Lacs à barrage de glace : les lacs à barrage de glace se trouvent principalement dans les régions de haute montagne où subsistent des glaciers actifs. Ils se forment soit directement à la surface du glacier (lacs supraglaciaires), soit en bordure de celui-ci, dans des cuvettes de surcreusement mises à nu par le recul glaciaire (lacs proglaciaires). Dans ces configurations, la digue retenant l'eau est constituée de glace, parfois mélangée à des débris morainiques. Dans les Pyrénées, aucun lac à barrage de glace n'est recensé (2023), d'après l'inventaire réalisé par Laurent. Il en résulte que le risque de vidange brutale liée à la rupture d'un barrage de glace est aujourd'hui considéré comme nul dans les Pyrénées.
- Lacs à barrage rocheux : il s'agit de lacs formés par le retrait des glaciers, occupant des cuvettes rocheuses stables (bedrock). Ces lacs sont globalement considérés comme peu sensibles à une vidange soudaine. Les débordements restent rares, mais peuvent être déclenchés par un apport massif d'eau ou de matériaux (avalanches, glissements), provoquant une surverse.

Deux mécanismes de déstabilisation existent :

- 1) La surverse, commune à tous les types de lacs, liée au dépassement du niveau du barrage par des vagues (éboulement, avalanche, vêlage) ou par une hausse rapide du plan d'eau (pluies, fonte).
- 2) La rupture, plus spécifique aux barrages de glace ou morainiques, résultant d'une défaillance structurelle (incision, renard hydraulique, fonte d'une lentille de glace).

L'inventaire actuel montre que seuls les barrages morainiques et rocheux subsistent dans les Pyrénées. Parmi eux, les barrages morainiques sont les plus vulnérables aux crues torrentielles, tandis que les barrages rocheux apparaissent globalement stables, avec un risque limité à de possibles surverses.

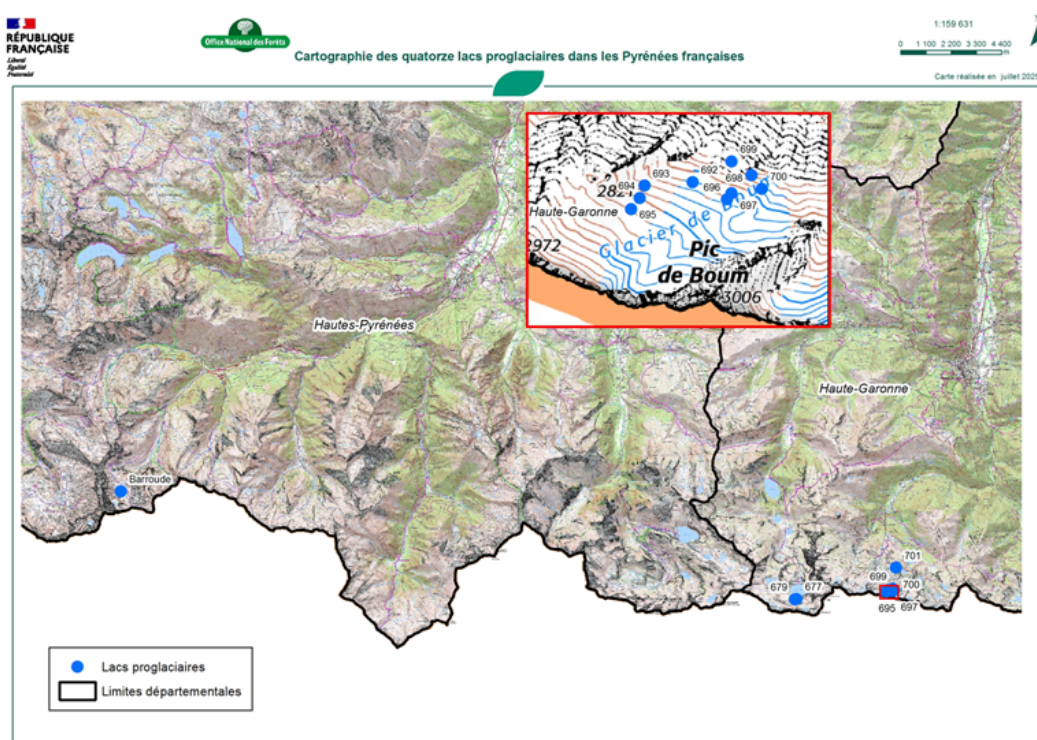


Figure 46 : Cartographie des lacs proglaciaires dans les Pyrénées françaises

5.2.3 Résultats de l'analyse de sensibilité

L'analyse de risque détaillée se trouve page 13 de l'annexe 6.

Concernant le risque de surverse, la majorité des lacs présentent une sensibilité faible à négligeable. Seuls les deux lacs de Barroude (Hautes-Pyrénées) se distinguent par une sensibilité moyenne. Plusieurs facteurs convergent dans ce secteur : présence de parois rocheuses à permafrost susceptibles de générer des chutes de blocs, proximité d'un glacier blanc en phase terminale, et configuration topographique favorisant une accumulation d'eau. Toutefois, la stabilité relative des berges morainiques végétalisées limite l'aléa, justifiant le classement intermédiaire.

De plus, aucun des quatorze lacs ne présente de conditions favorables à une rupture brutale. Les barrages rocheux ou morainiques observés apparaissent globalement stables, dépourvus de glace

résiduelle, de siphons ou de lentilles de glace morte. La présence de déversoirs fonctionnels renforce encore cette stabilité.

Ainsi, les lacs proglaciaires pyrénéens n'apparaissent pas aujourd'hui comme des risques majeurs.

Les simulations prévues avec **Flow-R** sur le secteur de Barroude constituent la prochaine étape de ce travail. Elles permettront d'estimer les trajectoires potentielles d'écoulement en cas de surverse et d'identifier les enjeux exposés (sentiers, infrastructures touristiques, zones habitées plus en aval).

À plus long terme, la poursuite de cette démarche devra inclure :

- un élargissement à l'ensemble des lacs glaciaires et périglaciaires (au-delà des seuls proglaciaires),
- une actualisation régulière de l'inventaire, afin de prendre en compte l'apparition de nouveaux plans d'eau liés à la fonte.

En définitive, l'analyse des lacs proglaciaires met en évidence le lien entre le recul glaciaire et l'émergence de nouveaux aléas en montagne. La formation de ces lacs constitue en effet une source potentielle de crues torrentielles, dont l'intensité et la dangerosité dépendent directement de la nature du barrage qui les retient. Si les barrages de glace ne sont plus une réalité dans les Pyrénées, les barrages morainiques restent des structures fragiles et instables. Ce constat souligne l'importance d'un suivi et d'une caractérisation de ces milieux, aujourd'hui intégrés dans les politiques publiques de prévention des risques, comme le montre le projet PAPROG.

5.3 Retour d'expérience

5.4.1 Articulation avec la formation de Master

Ce stage m'a permis de mettre en pratique une partie des connaissances et des compétences acquises durant mon master. Tout d'abord, j'ai beaucoup utilisé les outils SIG pour produire des cartes et croiser différentes couches d'information comme les pentes, l'emplacement des glaciers et les enjeux.

J'ai également renforcé mes capacités d'analyse de données spatiales. Le fait d'utiliser la méthode de la ligne d'énergie pour évaluer les risques m'a appris à mettre en place une démarche structurée et rigoureuse. Ce travail a nécessité une approche pluridisciplinaire : j'ai dû lire et comprendre des articles scientifiques, confronter ces connaissances avec les observations de terrain et échanger avec des experts techniques pour compléter ma réflexion.

Enfin, ce stage m'a appris à organiser mon raisonnement et à produire un document qui soit à la fois scientifique et opérationnel. Cela a été particulièrement formateur puisque ce rapport s'inscrivait dans une commande ministérielle et devait donc répondre à un objectif concret et utile.

5.4.2 Apports personnels

Sur le plan personnel, ce stage a été une expérience très formatrice. Intégrer l'équipe RTM m'a permis de découvrir les missions du service, qui associe à la fois des connaissances scientifiques, une forte

présence de terrain et la réalisation d'ouvrages de protection comme des paravalanches, des barrages ou des drains.

J'ai eu la chance de participer à des visites de chantiers en montagne et d'échanger directement avec des techniciens RTM. Ces moments sur le terrain ont été particulièrement précieux, car ils m'ont permis de comprendre concrètement comment les décisions sont prises, comment un projet est pensé puis mis en œuvre, et comment se répartissent les rôles entre la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre.

Travailler sur les glaciers dans les Pyrénées, en lien avec des experts basés dans les Alpes, a aussi été formateur. Cela m'a permis de comparer les approches, de comprendre les différences entre les massifs et de développer une expertise pyrénéenne qui me semble aujourd'hui solide en matière de glaciologie appliquée aux risques.

En résumé, ce stage m'a fait progresser autant sur le plan technique que personnel. Il m'a confortée dans mon envie de travailler sur les milieux montagnards et sur les enjeux liés aux risques naturels.

Conclusion

Le travail mené au cours de ce stage de six mois au sein du RTM des Hautes-Pyrénées a permis d'apporter des éléments nouveaux sur la question des risques glaciaires et périglaciaires dans les Pyrénées françaises. Contrairement à l'idée souvent avancée selon laquelle ces risques auraient disparu du fait de l'état résiduel des glaciers, cette étude a montré qu'il reste nécessaire d'évaluer scientifiquement ces phénomènes grâce à des méthodes reconnues et adaptées au contexte pyrénéen.

La question centrale de ce travail était la suivante : *les Pyrénées sont-elles exposées à des risques d'origine glaciaire et périglaciaire, et comment ces risques peuvent-ils être identifiés et évalués ?* Suite à cette étude, il est désormais possible d'affirmer scientifiquement que les risques glaciaires et périglaciaires dans les Pyrénées sont nuls.

Ce travail a également mis en lumière les spécificités des glaciers pyrénéens. La typologie des glaciers instables développée initialement dans les Alpes ne peut être transposée telle quelle. Les glaciers pyrénéens, de taille plus réduite, au fonctionnement tempéré et souvent dépourvus de langue glaciaire, nécessitent une adaptation de la typologie. Ce travail a ainsi proposé un complément au modèle alpin en intégrant une distinction entre glaciers tempérés avec ou sans barre rocheuse, permettant de mieux rendre compte des particularités locales.

Le recul rapide des glaciers fait aussi apparaître de nouveaux risques, comme la disparition des langues glaciaires qui jouaient un rôle de butée. Leur absence peut fragiliser les parties supérieures et favoriser l'instabilité de « séracs humides », plus susceptibles de basculer. L'utilisation de la méthode de la ligne d'énergie a permis de confirmer que, même dans ce cas, aucun enjeu n'est menacé actuellement.

Enfin, parmi les perspectives, l'attention doit se porter sur l'évolution des lacs glaciaires, de plus en plus nombreux avec la fonte rapide des glaciers. Même si les résultats de cette étude sur les lacs proglaciaires montrent qu'ils ne représentent pas un risque, leur suivi est important dans un contexte de réchauffement climatique.

Bibliographie

Aellen, M. (1989). *Les glaciers — une formation géologique particulière*. Club Alpin Suisse. URL : <https://www.sac-cas.ch/fr/les-alpes/les-glaciers-une-formation-geologique-particuliere-12618/#:~:text=celle,Leurs%20restes%20actuels%20attestent%20donc>

Association Moraine. (2010, mars). *Le glacier des Oulettes de Gaube (Vignemale), surveillance à partir d'appareils photos automatiques (2009)*.

Association Moraine. (2024, octobre). *Les glaciers des Pyrénées françaises, Cycle glaciaire 2023-2024*.

Bazin, J. & Roudnitska, S. (2022, juillet). *Typologie des glaciers instables (sujets à ruptures glaciaires) et des zones sources associées, en vue de la cartographie des avalanches de glace prévisibles dans les Alpes françaises*. ONF – RTM.

Bazin, J. & Roudnitska, S. (2023, mars). *Cartographie des aléas d'avalanche de glace dans les Alpes françaises à l'horizon 2025 et risques induits*. ONF – RTM.

Beraldi, H. (1898). *Cent ans aux Pyrénées. Vol. I* (document interne).

Bendle, J. (2020). *Moraine types. Antarctic Glaciers*. URL : <https://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/glacial-landforms/glacial-depositional-landforms/moraine-types/#:~:text=Moraines%20are%20distinct%20ridges%20or,the%20melting%20of%20glacial%20ice>

Birou, P. (1968). *Les développements récents des théories de l'érosion glaciaire*. Annales de Géographie, 77(419), 1-13. URL : https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1968_num_77_419_15605

Blanc, A. & Geay, T. (2023, avril). *Note générale concernant la production d'avis sur les risques d'origine glaciaire et périglaciaire dans les Alpes françaises*. ONF – RTM.

Bonaparte, R. (1892). *Variations périodiques des glaciers français*.

Criosfera Pirineos. (s.d.). *Ossoue*. URL : <https://criosfera.opcc-ctp.org/fr/aparato-glaciar/77-ossoue>

Davies, B. (2024). *Why are glaciers important?* Antarctic Glaciers. URL : <https://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/changing-antarctica/glaciers-and-climate-change/>

Derruau, M. (2010). *Chapitre 15 - Le système d'érosion glaciaire. Dans Les formes du relief terrestre : Notions de géomorphologie* (pp. 147-160). Armand Colin. URL : <https://shs.cairn.info/les-formes-du-relief-terrestre--9782200244286-page-147?lang=fr&tab=premiere-s-lignes>

Durand, M.-C. (1961). *L'influence des glaciers sur les cours d'eau pyrénéens (Bassins du Gave de Pau et de la Neste d'Aure)*. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 32(4), 289-318. URL : https://www.persee.fr/doc/rgpso_0035-3221_1961_num_32_4_2051

Emmer, A., Wood, J. L. & Cochachin, A. R. (2024). *Glacial Lake Outburst Floods in the Cordillera Blanca*. *Geoenvironmental Changes in the Cordillera Blanca, Peru* (pp. 169–186). URL : https://www.researchgate.net/publication/381657992_Glacial_Lake_Outburst_Floods_in_the_Cordillera_Blanca

Encyclopædia Universalis. (s.d.). *Bilan de masse et d'énergie des glaciers*. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/glaciers/2-bilans-de-masse-et-d-energie-des-glaciers/#:~:text=Le%20bilan%20de%20masse%20qu%27on,diminu%C3%A9%20de>

Failletaz, J. (2021, novembre). *Hiérarchisation des bassins de risques*. ONF – RTM (document interne).

Failletaz, J. (2021). *Hiérarchisation des risques glaciaires*. ONF – RTM (document interne).

Failletaz, J. & Funk, M. (2013). *Instabilités glaciaires et prédictions*. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, 25, 149–164. URL : https://wp.unil.ch/risk/files/2013/11/13_Failletaz_MemSVSN2013_C_Li.pdf

Ferrandez, J. / Ubac Media. (2025). *Prévenir les crues torrentielles à Chamonix : travaux de vidange du lac glaciaire des Bossons* [film documentaire]. Ministère de la Transition écologique ; RTM – ONF ; Commune de Chamonix. URL : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/raconte-moi-la-foret/comprendre-la-foret/restauration-des-terrains-en-montagne/%2B/2793::prevenir-les-crues-torrentielles-chamonix-travaux-de-vidange-du-lac-glaciaire-des-bossons.html>

France Culture. (2024). *Interview de P. René*.

Gaurier, L. (1921). *Études glaciaires dans les Pyrénées françaises et espagnoles*.

Géomorphologie montagne. (s.d.). *Géomorphologie de la montagne froide*. URL : <https://geomorphologie-montagne.ch/>

GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité*. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Organisation météorologique mondiale, Genève. URL : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIAR5-IntegrationBrochure_fr-1.pdf

Glaciers-Climat.com. (s.d.). *Le Petit Âge Glaciaire, sur les traces de l'époque glaciaire*. URL : <https://www.glaciers-climat.com/clg/petit-age-glaciaire/#:~:text=Le%20%C2%AB%C2%A0Petit%20%C3%82ge%20Glaciaire.%C2%A0%C2%BB%20%281350,1860>

Hancock, C. (2023, 28 novembre). *Le jour où le glacier de la Marmolada s'est effondré*. *Science & Vie*. URL : <https://www.science-et-vie.com/article-magazine/jour-glacier-la-marmolada-sest-effondre>

Hardloop. (2024, 13 août). *20 mots pour comprendre les glaciers et briller dans les refuges alpins*. URL : <https://www.hardloop.fr/article/0444-20-mots-pour-comprendre-les-glaciers-et-briller-dans-les-refuges-alpins>

Izagirre, E., Revuelto, J., Vidaller, I., Deschamps-Berger, C., Rojas Heredia, F., Rico, I., Alonso-Gonzalez, E., Gascoin, S., Serrano, E. & Lopez-Moreno, J. I. (2024). *Pyrenean glaciers are*

disappearing fast: state of the glaciers after the extreme mass losses in 2022 and 2023. Regional Environmental Change. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-024-02333-1>

Lacroix, D., Mayet, L. & Roche, P.-A. (2022, décembre). *Risques d'origine glaciaire et périglaciaire : Éléments en soutien à un plan d'action (rapport n° 21-22-3154)*. IGEDD ; IGA ; IGÉSR. URL : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-42445-rapport-igedd-risque-majeurs-montagne.pdf>

Laigle, D. & Peteuil, C. (2010). *Analyse de l'aléa « lave torrentielle » sur le cône de déjection du torrent du Rioulong (Hautes-Pyrénées) : une approche par scénarios*. Sciences Eaux & Territoires, 2, 152–153.

Larousse. (s.d.). *Phénomène*. Dictionnaire de français en ligne. URL : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/ph%C3%A9nom%C3%A8ne/60204>

Luzianovich, S. (2008). *La vallée de Campan et la géomorphologie des Pyrénées-Centrales*. Rapport de stage, formation d'accompagnateur en moyenne montagne (document non publié), 63 p.

Mark, B. G., French, A., Baraer, M., Carey, M., Bury, J., Young, K. R., Polk, M. H., Wigmore, O., Lagos, P., Crumley, R., McKenzie, J. M. & Lautz, L. (2017). *Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes*. Global and Planetary Change, 159, 61-70. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818117301935>

Ministère de l'Agriculture. (1934). *Études glaciologiques – Tome VII : Pyrénées*. (document interne)

Ministère de l'Agriculture. (1885–1963). *Restauration des Terrains en Montagne (RTM)*. Département de la Savoie. France Archives. URL : <https://francearchives.gouv.fr/findingaid/e66bb6fd4ab442c397d52d2a6e41b8e0b048d9>

Nussbaumer, S. U., Huss, M. & Bauder, A. (2011). *Glacier Lake Outburst Floods (GLOFs): Challenges in prediction and risk assessment*. Natural Hazards, 61(2), 717-728. URL : https://www.researchgate.net/publication/287668487_Glacial_Lake_Outburst_Floods_GLOFs_challenges_in_prediction_and_modelling

Office national des forêts (ONF). (2024, 4 novembre). *La grande histoire des forêts (#Épisode 1) : le reboisement des massifs montagneux, salvateur et protecteur*. URL : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/%2B/fb4::la-grande-histoire-des-forets-episode-le-reboisement-des-massifs-montagneux-salvateur-et-protecteur.html>

ONF. (2025, août). *150 ans après la crue historique qui a dévasté le sud-ouest*. URL : <https://www.onf.fr/aux-cotes-des-territoires/+/28c4::150-ans-apres-la-crue-historique-qui-devaste-le-sud-ouest.html>

ONF – RTM. (s.d.). *Les risques glaciaires en montagne* [fiche technique]. URL : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/raconte-moi-la-foret/comprendre-la-foret/restauration-des-terrains-en-montagne/%2B/2795::les-risques-glaciaires-en-montagne.html>

Ramond de Carbonnières, L. (1789). *Observations dans les Pyrénées* (document interne).

René, P. (2013, mai). *Glaciers des Pyrénées, le réchauffement climatique en images*. Éditions Cairn.

René, P. (2025, août). Conférence : *Glaciers d'ici, miroirs du réchauffement global*.

Roche, P.-A., Mayet, L. & Lacroix, D. (2023). *Risques d'origine glaciaire et périglaciaire – Plan d'action régional (Pyrénées)*. ONF – RTM (document interne).

Schrader, F. (1880s–1900s). *Travaux cartographiques*. IGN ; Société de Géographie.

UNESCO & IUCN. (2022). *World heritage glaciers: Sentinels of climate change*. UNESCO ; IUCN.

Vallot, J. (1887). *Oscillations des glaciers dans les Pyrénées françaises*.

Liste des figures

Figure 1 : Reboisement des versants par le RTM	4
A gauche : Le village Les Meyries (Hautes-Alpes) avant (ONF) ; A droite : Les Meyries après (ONF)	4
Source : ONF, consulté sur “La grande Histoire des forêts (#Episode 1) : le reboisement des massifs montagneux, salvateur et protecteur”	4
Figure 2 : Construction d'un barrage de correction torrentielle, Saint Nazare les Eymes, 1921	4
Source : RTM 38, consulté sur Irma Grenoble “1860 - 2010, 150 ans de lutte contre les risques naturels”	4
Figure 3 : ouvrages paravalanches au dessus de la Mongie, avril 2025	6
Figure 4 : A gauche : glissement de terrain à Viella (juillet 20205), à droite : travaux de drainage à Viella (juillet 2025).	6
Figure 5 : Distribution des territoires du service RTM des Hautes-Pyrénées entre les responsables de secteurs risques naturels (C. Compagnet, ONF)	7
Figure 6 : Répartition des tâches réalisées pendant le stage	10
Figure 7 : suivi d'ouvrages paravalanches au Capets (65)	10
Figure 8 : étude de risque suite à une chute de blocs sur la route menant au Pic de Long (Néouvielle)	10
Figure 9 : Cartographie des glaciers blancs dans les Pyrénées françaises (basé sur l'inventaire de 2023, Association Moraine	12
Figure 10 : Processus de création de la glace (PolarPod, Encyclopédie polaire)	13
Figure 11 : crevasses et séracs sur le glacier des Oulettes de Gaube (juillet 2025)	14
Figure 12 : Auge glaciaire, vallée de Gaube depuis le glacier des Oulettes (juillet 2025)	14
Figure 13 : moraines médianes entre le glacier du Petit Vignemale et des Oulettes (juillet 2025)	15
Figure 14 : dos de baleine et roches striées, Oulettes de Gaube	15
Figure 15 : Représentation schématique des formes glaciaires et périglaciaires (source : Hardloop, 2024)	15
Figure 16 : Avalanche de glace “200 000 mètres cubes de glace dévalent plus d'un kilomètre” (Cortay, 2015)	20
Figure 17 : prise en 1892, cette photo montre une immense cavité dans le glacier de Tête-Rousse, juste après la l'inondation de la vallée (Le Monde, 2010)	20
Figure 18 : schéma représentant le glissement basal d'un glacier alpin (Géomorphologie de la montagne, fiche glacier 12).	21
Figure 19 : travaux de vidange à la pelle araignée, Radio Mont Blanc, 2 août 2023	22
Figure 20 :Frise chronologique des grandes étapes et figures emblématiques de l'étude des glaciers pyrénéens (XVIII ^e siècle – XXI ^e siècle)	24

Figure 21 : Évolution morphologique des glaciers blancs et nouvelles dynamiques de risque depuis le Petit Âge Glaciaire dans les Pyrénées	27
Figure 22 : Méthode pour mesurer la hauteur du ratio H/L (Bazin, 2022)	34
Figure 23 : Explication de la démarche méthodologique	35
Figure 27 : Photo-interprétation des chutes de blocs de glace et de leur zone de départ potentielle, glacier des Oulettes (Anna Pellaers, 10 juillet 2025)	40
Figure 28 : Evolution du glacier du Petit Vignemale et des Oulettes de Gaube entre 1890 (Carte postale, source inconnue) et 2025 (Anna Pellaers, 10 juillet 2025)	41
Figure 29 : Photo-interprétation de l'aléa glaciaire du Petit Vignemale, glacier des Oulettes (Anna Pellaers, 10 juillet 2025)	42
Figure 30 : Glacier du Taillon, Parc national des Pyrénées (P. Meyer), date approximative : 2020	43
Figure 31 : Glacier de Pailla est, Association Moraine, septembre 2023	44
Figure 32 : Glacier de Pailla ouest, Association Moraine, septembre 2023	46
Figure 33 : Glacier de Las Néous, Association Moraine, septembre 2023	47
Figure 34 : Glacier d'Ossoue, Association Moraine, septembre 2023	49
Figure 35 : Glacier d'Ossoue en 1911 et 2021, Association Moraine	50
Figure 36 : Glacier d'Astazou, Association Moraine (2023)	51
Figure 37 : Glacier de la Munia, Association Moraine (2023)	52
Figure 38 : Glacier de Barroude, Association Moraine (2023)	53
Figure 39 : Glacier d'Arcouzan, Association Moraine (2023)	54
Figure 41 : Ligne d'énergie des avalanches de glace de 2007 et 2009 et ligne d'énergie atteignant le refuge des Oulettes de Gaube	59
Figure 42 : Coefficient H/L en fonction du volume pour des avalanches de glace (adapté de Thibert et al., 2021). En violet figure les événements recensés (2007 et 2009), en rose le scénario pour atteindre le refuge des Oulettes	60
Figure 43 : Cartographie des risques glaciaires dans les Pyrénées françaises	62
Figure 44 : bilan des missions effectuées et non-effectuées au cours du stage	64
Figure 45 : crue torrentielle de la Bérarde, village à 10h29 (source : Sécurité Civile, repris de la rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024, ONF-RTM)	65
Figure 46 : Cartographie des lacs proglaciaires dans les Pyrénées françaises	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les quatre risques d'origine glaciaire et périglaciaire et l'avancée de leur étude	8
Tableau 2 : Inventaire des glaciers pyrénéens français (Association Moraine, 2023)	11
Tableau 3 : Chronologie de l'événement glaciaire au lac des Bossons	22
Tableau 4 : Classification des glaciers blancs selon la présence ou non d'une barre rocheuse	30
Tableau 5 : Aléa glaciaire, du plus fort au plus faible	30
Tableau 6 : Sensibilité des glaciers blancs avec barre rocheuse à engendrer un aléa glaciaire dans les Pyrénées	31
Tableau 7 : Sensibilité des glaciers blancs sans barre rocheuse à engendrer un aléa glaciaire dans les Pyrénées	32
Tableau 8 : Aléa glaciaire, du plus fort au plus faible	33
Tableau 9 : Bilan des zones sources potentielles des glaciers avec barre rocheuse, à régime tempéré avec forte fonte estivale	45

Tableau 10 : Bilan des zones sources potentielles des glaciers sans barre rocheuse, tempérés et soumis à une forte fonte estivale	55
Tableau 11 : Niveau d'aléa des glaciers blancs dans les Pyrénées françaises	58
Tableau 12 : Mesure du H/L pour le glacier des Oulettes supérieur	59
Tableau 13 : Liste des glaciers blancs pyrénéens, de leur probabilité de rupture et du niveau de risque relatif.	61

Table des matières

Liste des sigles	5
Introduction	1
Partie 1 : Contexte et missions du stage	3
1.1 La Restauration des Terrains de Montagne : un service dédié à la maîtrise des risques naturels en montagne	3
1.1.1 Histoire et origines de la Restauration des Terrains en Montagne	3
1.1.2 Contexte institutionnel et fonctionnement actuel	5
1.2 Présentation des missions du stage	7
1.2.1 Commande ministérielle dans le cadre du Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG)	7
1.2.2 Objectifs du stage	8
1.3 Présentation du territoire d'étude : les glaciers blancs pyrénéens	11
Partie 2 : Cadre théorique et enjeux du stage	13
2.1 Définition et fonctionnement des glaciers blancs : concepts de glaciologie	13
2.1.1 Naissance et vie d'un glacier	13
2.1.2 Les paysages glaciaires	14
2.1.3 Les paysages périglaciaires	16
2.2 Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire	17
2.2.1 Définitions et typologie	17
2.2.2 État des connaissances scientifiques sur les dynamiques glaciaires et leur instabilité dans le monde	19
2.2.3 Les glaciers blancs et les risques qui leur sont associés	20
2.2.4 Prévenir les risques liés aux glaciers blancs	21
2.3 Connaissances des risques glaciaires dans les Pyrénées face au changement climatique	23
2.3.1 Historique des études des formes glaciaires dans les Pyrénées	23
2.3.2 Sensibilité des glaciers pyrénéens au changement climatique	24
2.3.3 Répercussions du changement climatique sur les dynamiques glaciaires : des risques émergents	26
2.4 Problématique	27
Partie 3 : Démarche méthodologique	28
3.1 Travail bibliographique, appropriation du sujet et acquisition des données	28
3.2 Typologie des glaciers blancs instables dans les Pyrénées françaises	29
3.3 Identification des zones sources potentielles	29
3.4 Estimation des risques d'origine glaciaire et périglaciaire à partir de la méthode de la ligne d'énergie	32
Partie 4 : Résultats	36

4.1 Proposition d'une typologie prenant en compte le contexte pyrénéen	36
4.2 Analyse de l'aléa glaciaire	38
4.2.1 Glaciers avec barre rocheuse	38
4.2.1.1 Oulettes supérieur	38
4.2.1.2 Petit Vignemale	41
4.2.1.3 Taillon supérieur	43
4.2.1.4 Pailla est	44
4.2.1.5 Bilan de l'aléa glaciaire pour les glaciers avec barre rocheuse	45
4.2.2 Glaciers tempérés sans barre rocheuse	46
4.2.2.1 Pailla ouest 1 et 2	46
4.2.2.2 Las Néous	47
4.2.2.3 Ossoue, lambeau inférieur et sud	48
4.2.2.4 Astazou	50
4.2.2.5 Munia	51
4.2.2.6 Barroude	53
4.2.2.7 Arcouzan	54
4.2.2.8 Bilan de l'aléa glaciaire	55
4.2.3 Bilan global des aléas glaciaires dans les Pyrénées françaises	57
4.3 Evaluation des risques glaciaires dans les Pyrénées à court et moyen terme	58
4.3.1 Méthode d'analyse de la propagation d'avalanche de glace à partir de la méthode de la ligne d'énergie	58
4.3.2 Bilan des risques glaciaires potentiels dans les Pyrénées	60
Partie 5 : Discussion, mise en perspective et retour d'expérience	63
5.1 Retour sur les résultats obtenus	63
5.1.1 Intérêt scientifique et opérationnel du travail	63
5.1.2 Limites du travail réalisé	63
5.2 De nouvelles perspectives : les risques associés aux lacs proglaciaires	64
5.2.1 Contexte et problématique	64
5.2.3 Résultats de l'analyse de sensibilité	66
5.3 Retour d'expérience	67
5.4.1 Articulation avec la formation de Master	67
5.4.2 Apports personnels	68
Conclusion	69
Bibliographie	70
Liste des figures	73
Liste des tableaux	74
Table des matières	75
Liste des annexes	77
Annexes	77

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartographie des quatre risques d'origine glaciaire et périglaciaire à l'échelle des cinq départements pyrénéens (64, 65, 31, 09, 66).

Annexe 2 : Critère topographique : les zones aux pentes supérieures à 25°.

Annexe 3 : Catalogue des zones sources d'avalanche de glace issues de glaciers blancs, et des enjeux au sein des bassins versant à risque potentiel, dans les Pyrénées françaises.

Annexe 4 : Fiches synthétiques pour les bassins versants présentant un niveau de risque moyen à élevé (1 ou 2).

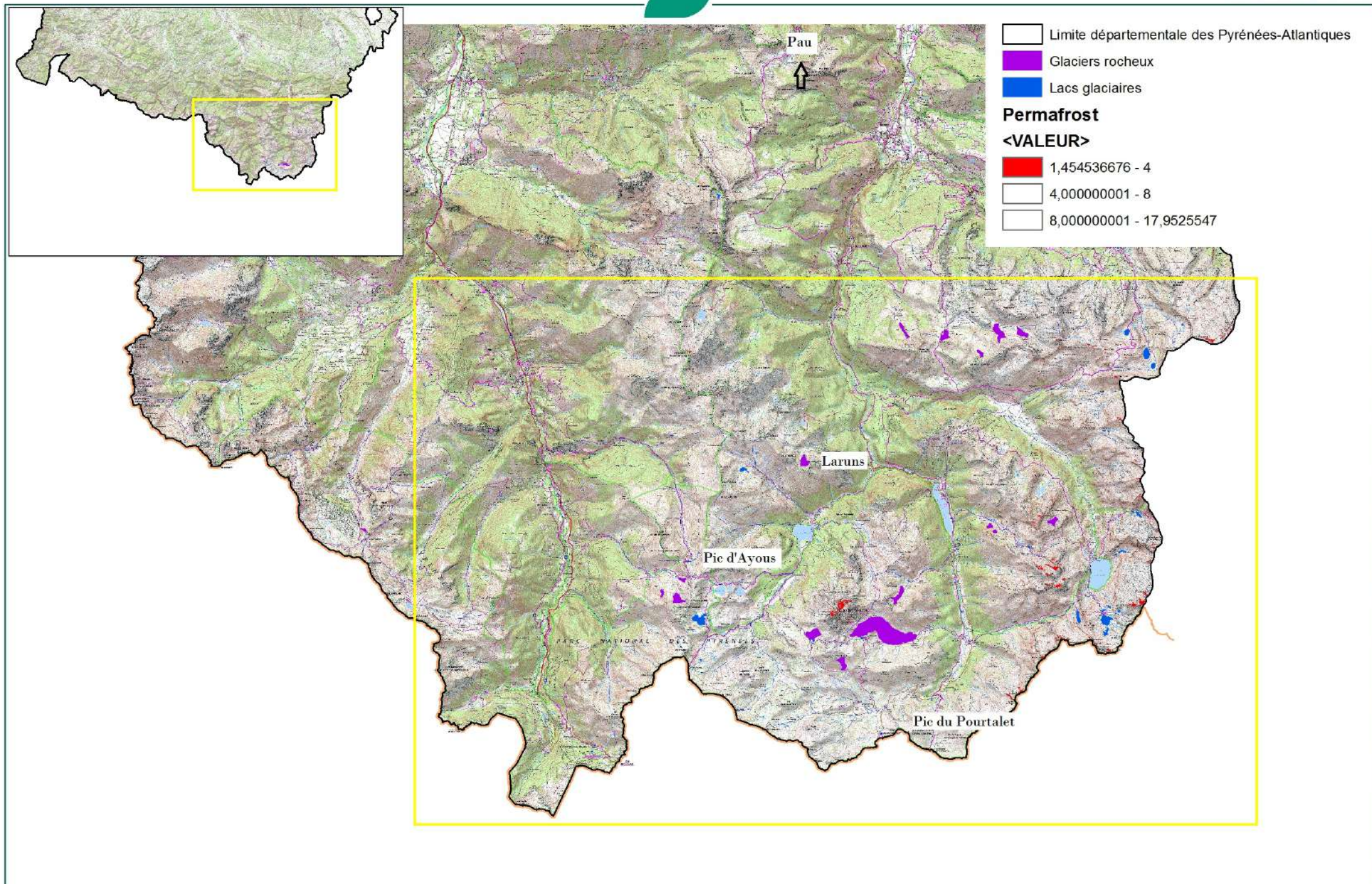
Annexe 5 : Typologie des glaciers instables (sujets à ruptures glaciaires) et des zones sources associées, en vue de la cartographie des avalanches de glace prévisibles dans les Alpes françaises (ONF-RTM – Juliette BAZIN et Stéphane ROUDNITSKA - juillet 2022).

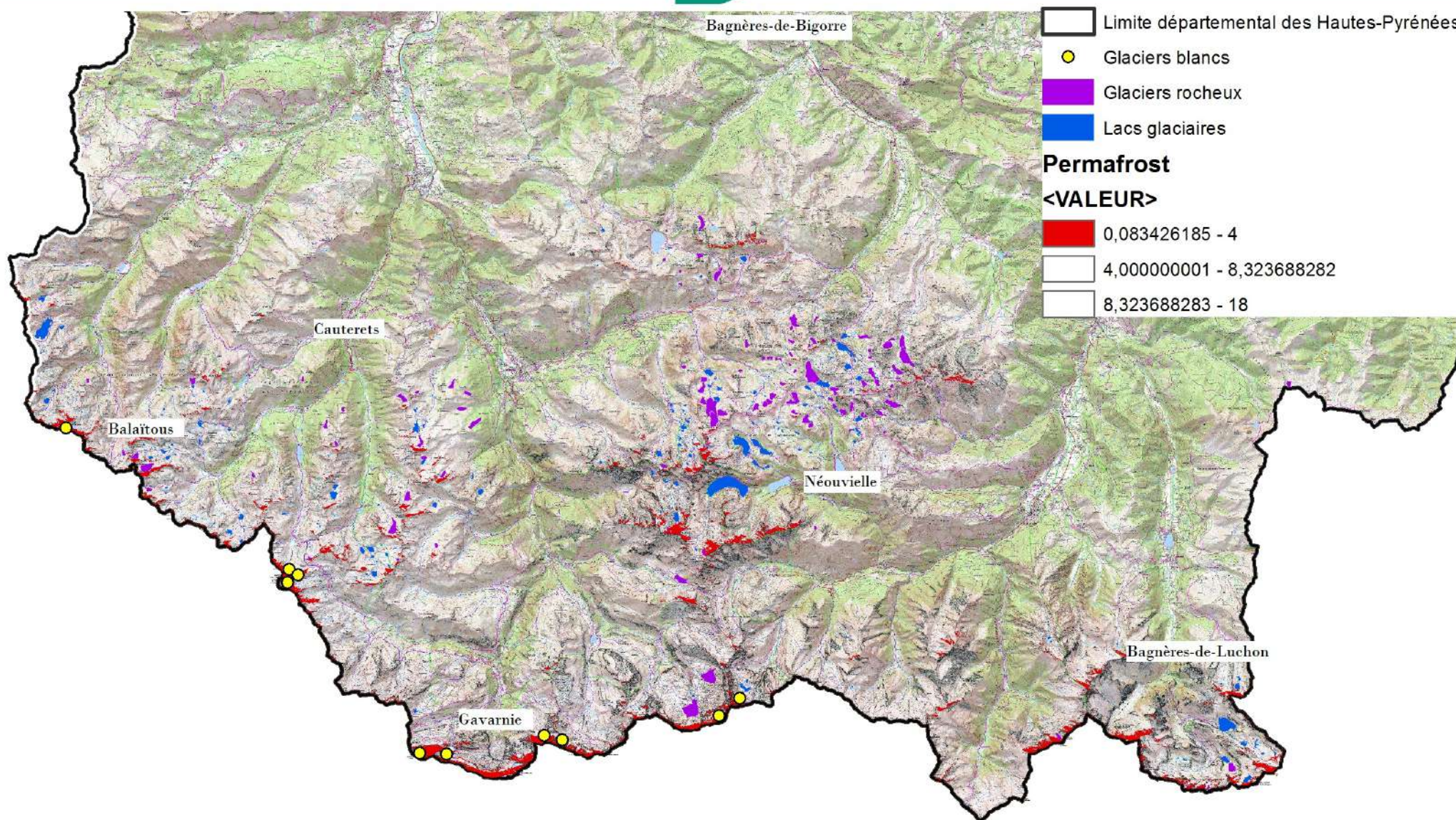
Annexe 6 : Analyse de risque des lacs proglaciaires susceptibles de générer un aléa crue torrentielle dans les Pyrénées françaises.

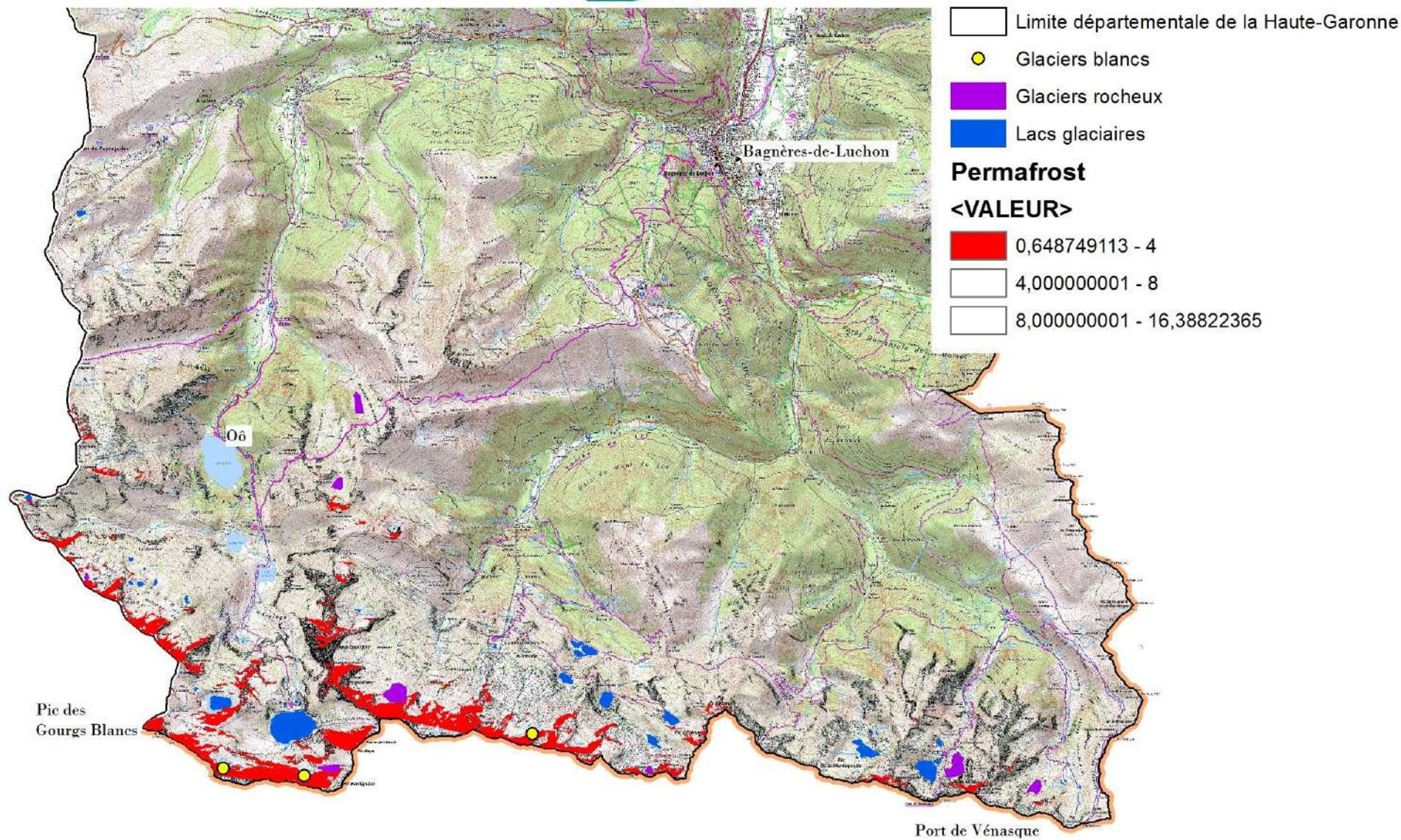
Annexes

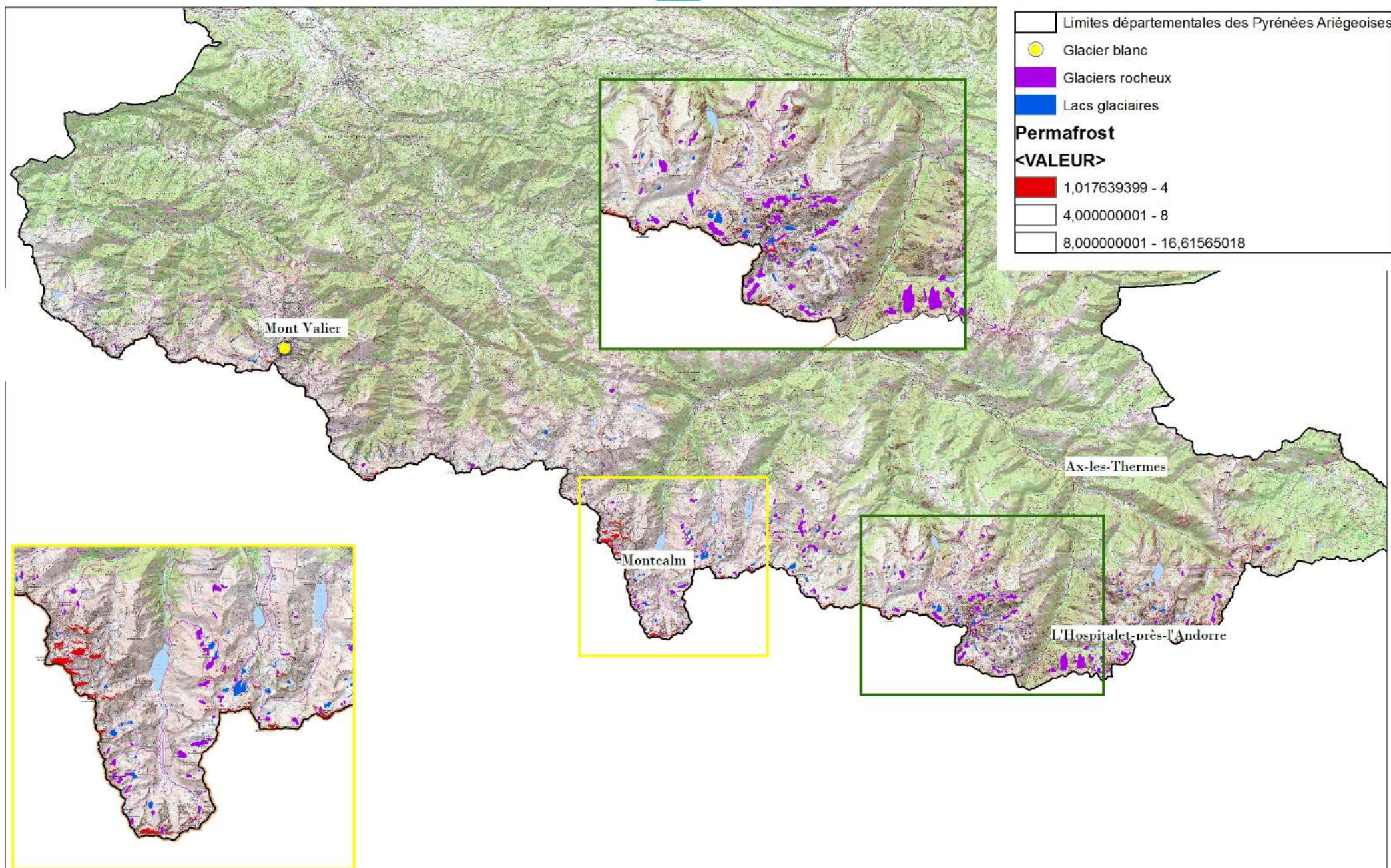
Annexe 1

Cartographie des quatre risques d'origine glaciaire et périglaciaire à l'échelle des cinq départements pyrénéens (64, 65, 31, 09, 66)











Annexe 2 : Critère topographique : les zones aux pentes supérieures à 25°

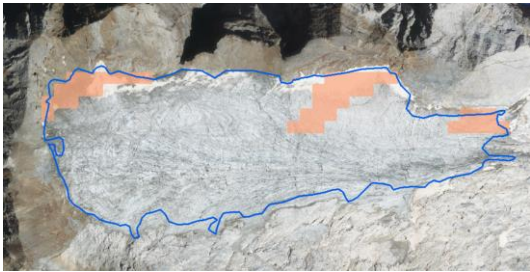
Les pixels représentés en orange sont ceux où la pente est supérieure ou égale à 25°. Cette valeur permet d’identifier les secteurs de départ potentiels pour les avalanches de glace.

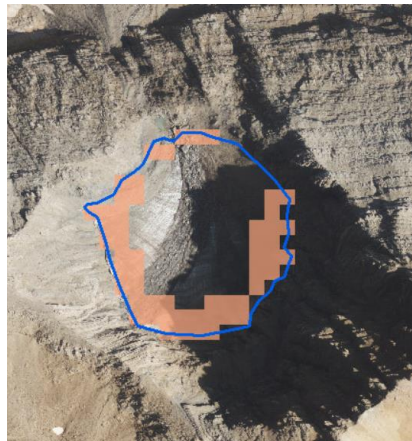
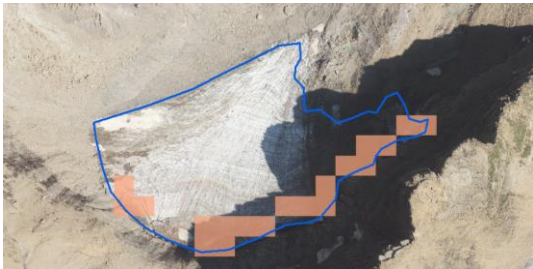
Les photographies mobilisées proviennent principalement de l’association Moraine, prises au cours de l’année 2023. Celles des Oulettes et du Petit Vignemale sont des photos prises par A. Pellaers (juillet 2025). Lorsque certains glaciers n’avaient pas été documentés, des images issues de Google Earth (2021) ont été mobilisées pour compléter l’analyse.

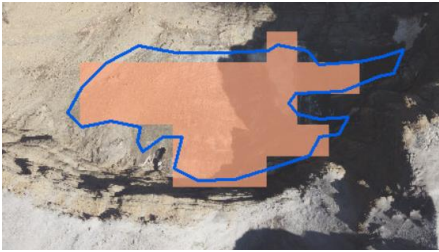
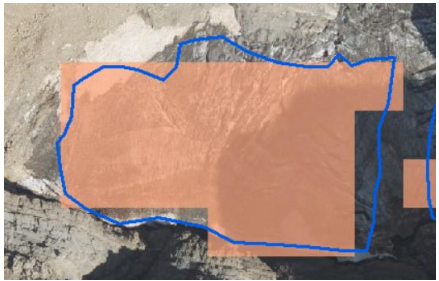
Tableau 1 : Pentes supérieures à 25° sur les glaciers blancs

Glacier Blanc par entité	Photographies		Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m²)	Pentes supérieures à 25°	
01. Las Néous				Balaïtous	3037 - 2832	Est	23424	
02. Oulettes inférieur				Vignemale	2406-2314	Nord	24541	

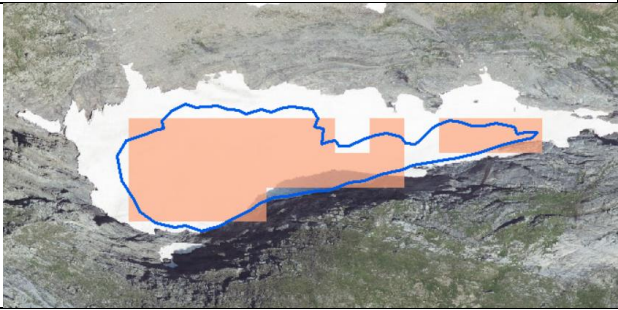
Glacier Blanc par entité	Photographies	Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m ²)	Pentes supérieures à 25°
03. Oulettes supérieur		Vignemale	2659 - 2460	Nord	31032	
04. Petit Vignemale		Vignemale	2901 - 2703	Nord	13857	

Glacier Blanc par entité	Photographies	Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m ²)	Pentes supérieures à 25°
05. Ossoue		Vignemale	3213 - 2982	Est	217686	
06. Ossoue lambeau inf		Vignemale	2939 - 2806	Est	7766	
07. Ossoue lambeau Sud		Vignemale	3034 - 2948	Est	11967	

Glacier Blanc par entité	Photographies	Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m ²)	Pentes supérieures à 25°
08. Gabiétous		Gavarnie	2837 - 2677	Nord	81449	
09. Taillon		Gavarnie - Monte Perdido	2679 - 2573	Nord	57670	

Glacier Blanc par entité	Photographies	Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m ²)	Pentes supérieures à 25°
10. Taillon sup		Gavarnie - Monte Perdido	2788 - 2709	Nord	16651	
11. Pailla E		Gavarnie - Monte Perdido	2601 - 2500	Nord	29171	
12. Pailla O - 1		Gavarnie - Monte Perdido	2502 - 2414	Nord	14151	

Glacier Blanc par entité	Photographies	Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m²)	Pentes supérieures à 25°
13. Pailla O - 2		Gavarnie - Monte Perdido	2489 - 2429	Nord	3042	
14. Astazou		Gavarnie - Monte Perdido	2571 - 2418	Nord est	46410	
15. Munia		Munia	2842 - 2746	Nord ouest	25889	

Glacier Blanc par entité	Photographies	Massif	Altitude extrêmes (m)	Orientation	Surface (m²)	Pentes supérieures à 25°
16. Barroude		Munia	2530 – 2403	Nord est	24160	
17. Seil de la Baque		Luchonnais	3019 - 2832	Nord	44556	
18. Arcouzan		Mont Vallier	2539 - 2357	Nord	13602	

Annexe 3

Catalogue des zones sources d'avalanche de glace issues de glaciers blancs, et des enjeux au sein des bassin versant à risque potentiel, dans les Pyrénées françaises

Avant-propos

Les informations suivantes sont issues des *Cartes des zones sources d'avalanche de glace issues de glaciers blancs « ZS_GB (expert) », au sein des périmètres à risque potentiel, dans les Alpes françaises (Bazin Juliette, Roudnitska Stéphane, 2022).*

Les zones sources représentent les portions de glacier considérées comme potentiellement instables. Cela ne signifie pas pour autant que l'ensemble de ces zones est susceptible de se rompre simultanément lors d'un événement donné. Leur délimitation repose sur un diagnostic morphologique, établi à dire d'expert, et tient compte de l'évolution prévisible du glacier dans les prochaines années (horizon 2025–2030).

Dans le cas des Pyrénées, l'application de cette méthode a permis d'identifier deux zones sources susceptibles de générer un phénomène d'instabilité glaciaire : le glacier des Oulettes supérieur et celui du Petit Vignemale. Les autres cartes produites dans ce travail ont un rôle principalement informatif : elles permettent de visualiser l'environnement glaciaire, les bassins versants associés, ainsi que la localisation éventuelle d'enjeux en aval. Elles viennent appuyer l'analyse experte, qui a conduit, pour les autres glaciers étudiés, à écarter toute zone source, notamment en raison de conditions topographiques ou thermiques peu propices aux phénomènes de rupture.

En complément, chaque bassin versant a fait l'objet d'une évaluation du niveau de risque global (faible, moyen ou fort), déterminé par le croisement du niveau d'aléa (probabilité de rupture glaciaire) avec la présence des enjeux situés en aval.

- **Un risque faible** signifie qu'il est fortement improbable qu'un phénomène atteigne un enjeu, soit parce que les enjeux sont absents, soit parce que la dynamique du phénomène reste très limitée.
- **Un risque moyen** correspond à une situation où une atteinte des enjeux est envisageable, notamment si ceux-ci se trouvent à proximité d'un front glaciaire instable ou dans une zone topographiquement exposée.

- **Un risque fort** désigne les cas où une atteinte directe d'enjeux identifiés est jugée probable, en cas de déclenchement d'une avalanche de glace ou d'un autre processus glaciaire instable.

Sens de lecture

Les cartes sont présentées dans un ordre géographique allant de l'ouest vers l'est, pour suivre la distribution des glaciers blancs tout au long de la chaîne pyrénéenne.

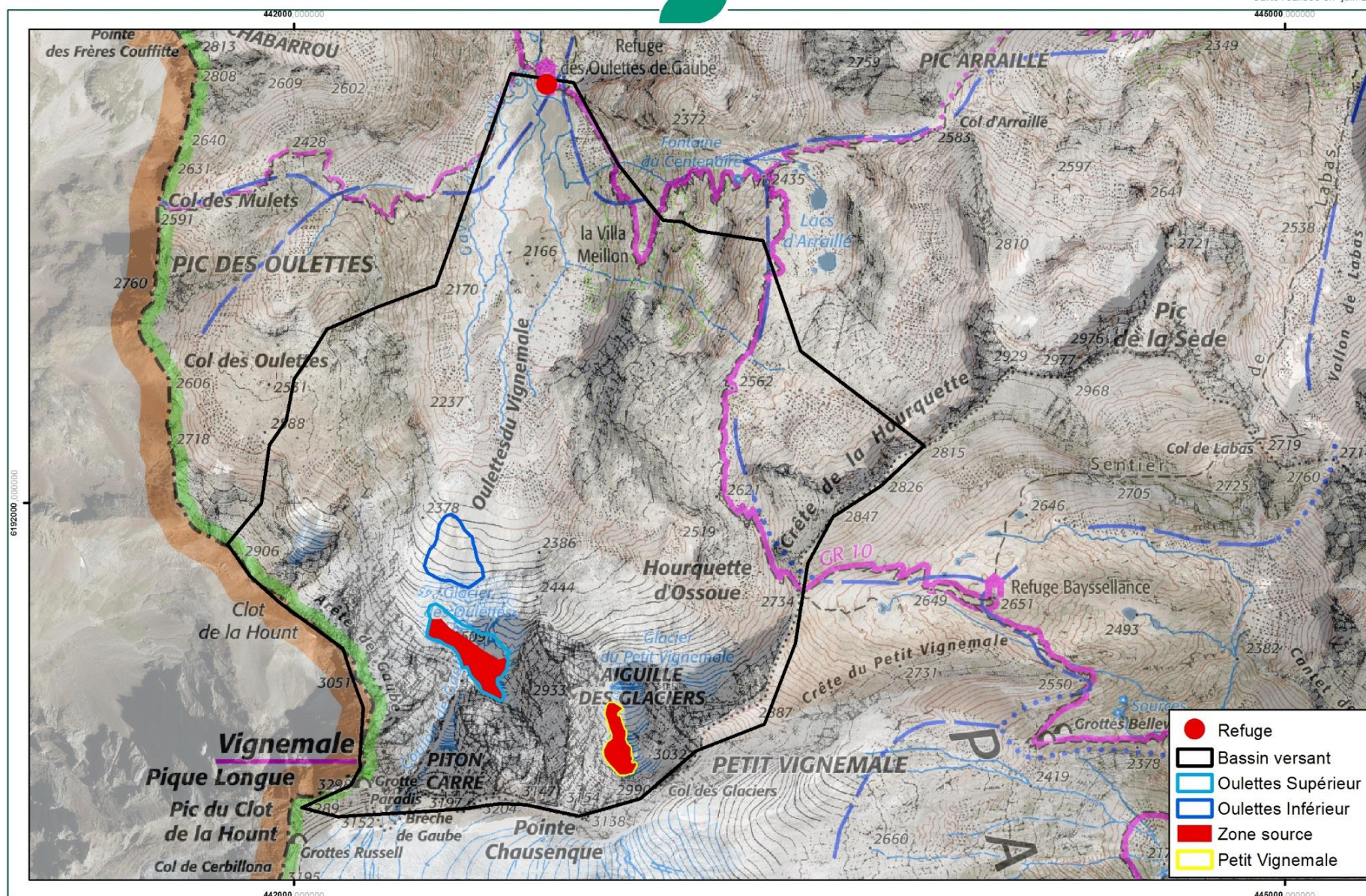
Aléa = fort (Oulettes), moyen (Petit Vignemale)
 Risque = faible

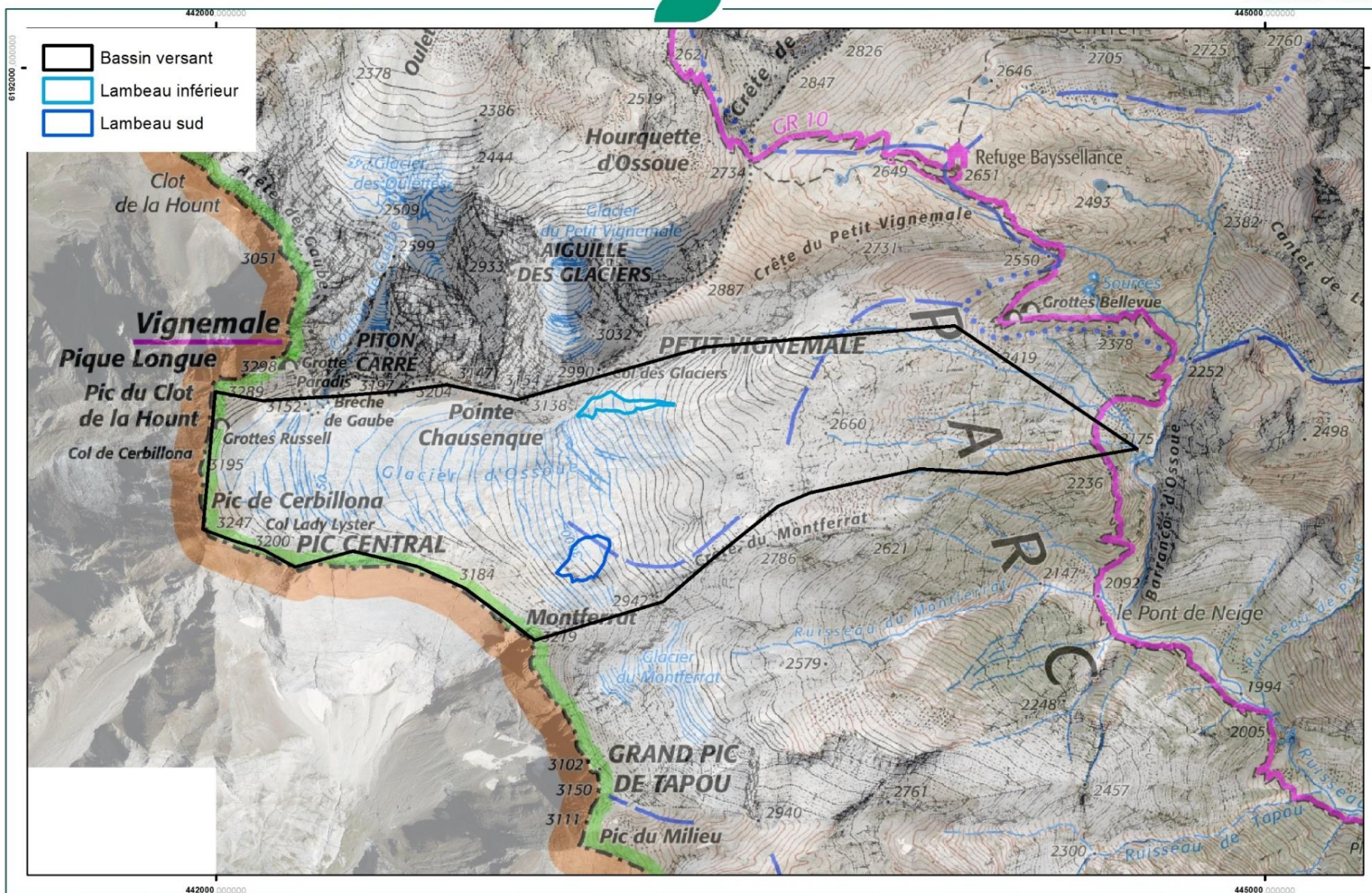
Identification des zones sources de rupture glaciaire

Glacier blanc des Oulettes et du Petit Vignemale

1:14 856
 0 100 200 300 400 m


Carte réalisée en juin 2025





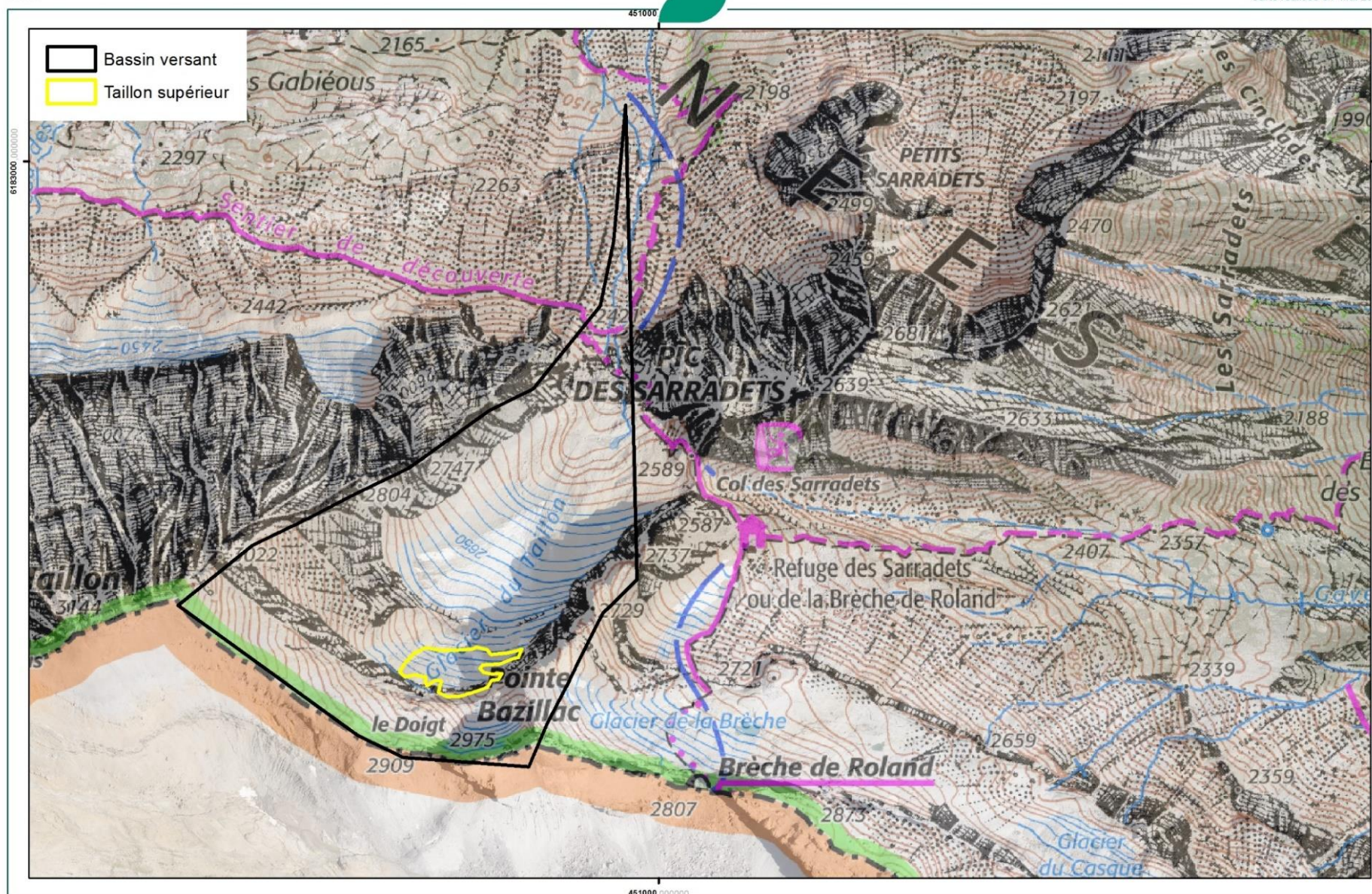
Identification des zones sources de rupture glaciaire

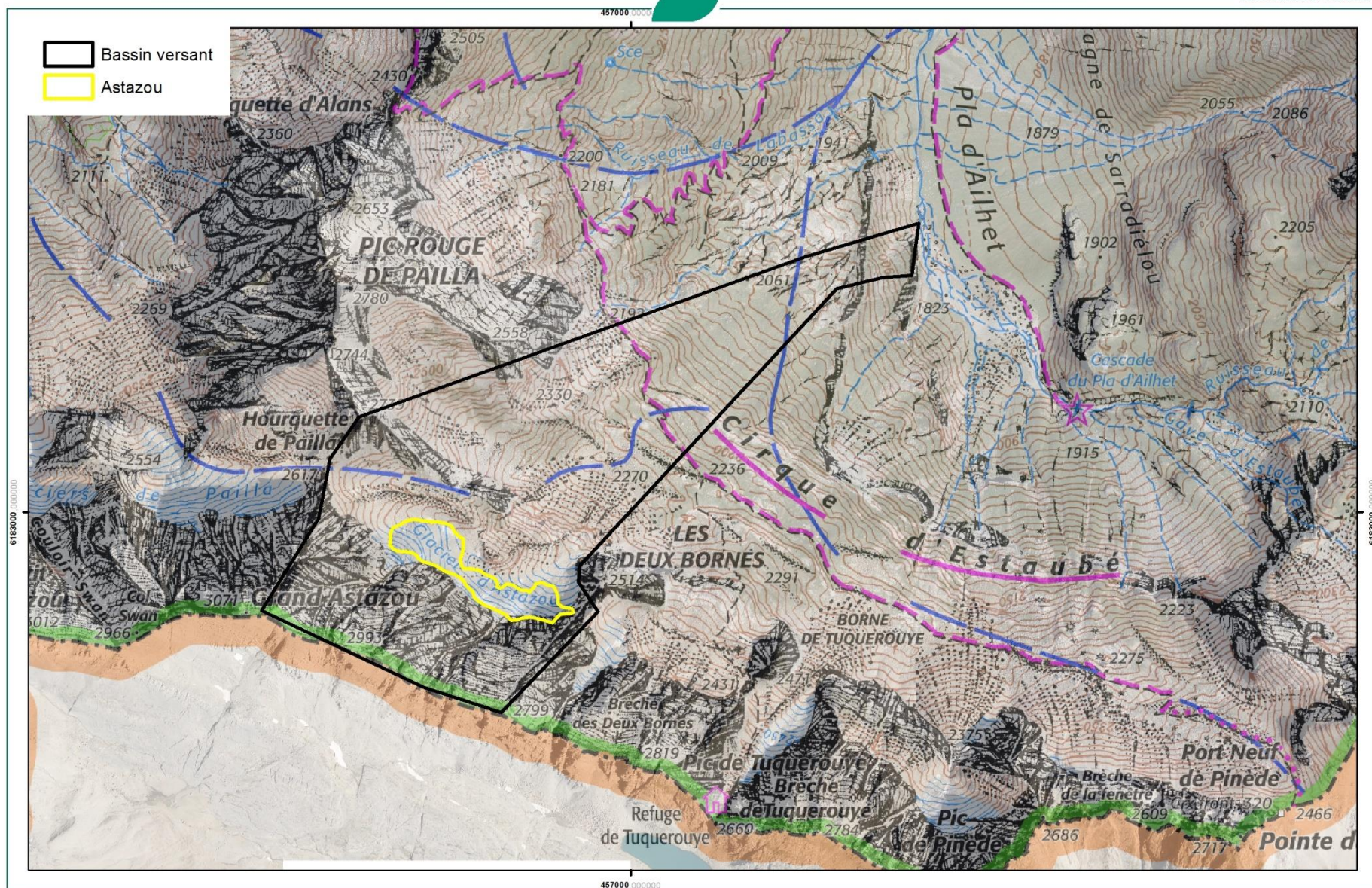
Glacier blanc du Taillon supérieur

Aléa = faible
 Risque = faible

1:10 808
 0 75 150 225 300 m

Carte réalisée en mai 2025





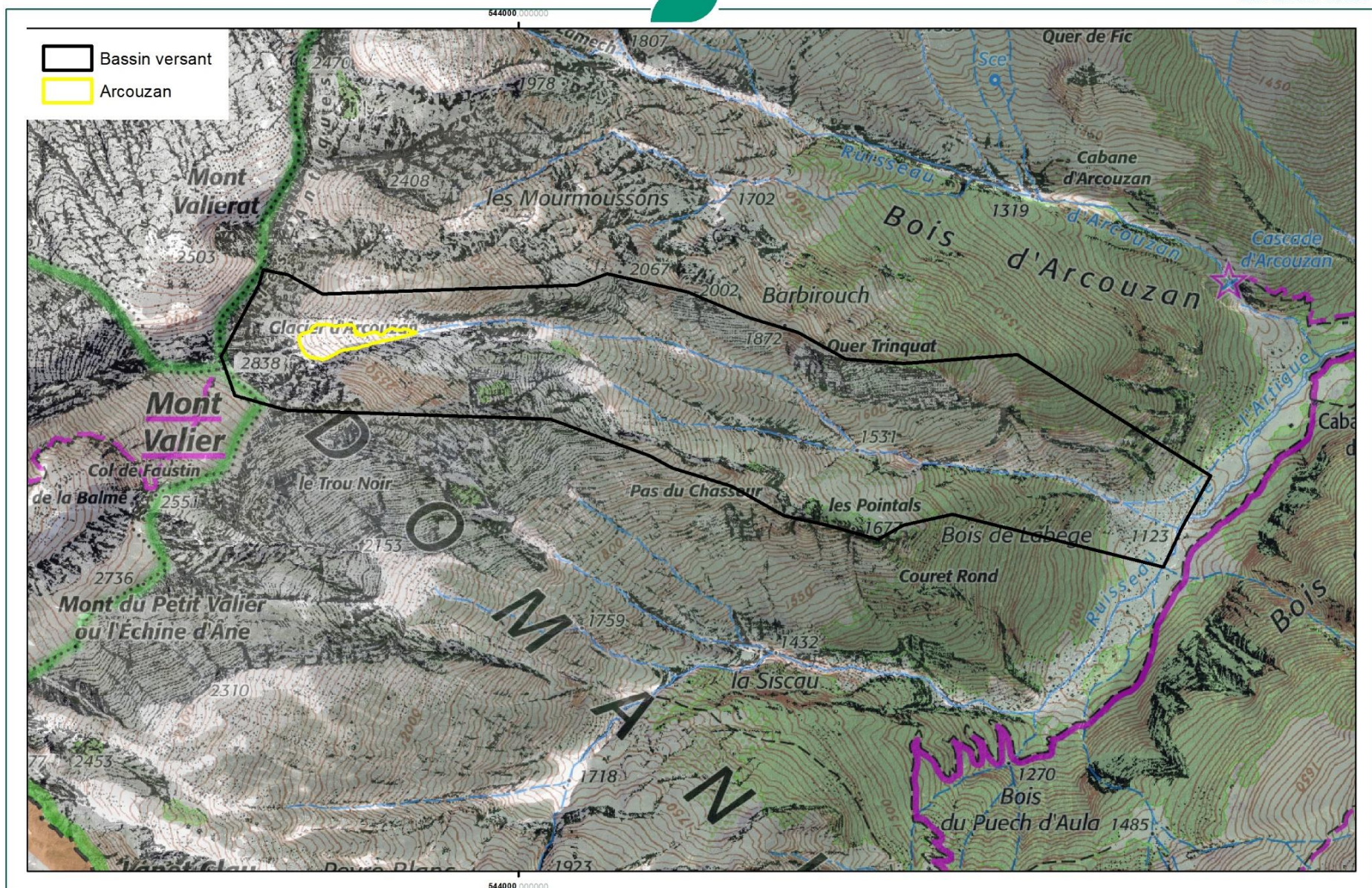
Identification des zones sources de rupture glaciaire Glacier blanc d'Arcouzan

Aléa = faible

 Risque = faible



Carte réalisée en mai 2025



Annexe 4

Fiches synthétiques pour les bassins versants présentant un niveau de risque moyen à élever (1 ou 2)

Glacier des Oulettes supérieur - Massif du Vignemale

A) Caractéristiques

Type : Glacier de cirque avec barre rocheuse

Altitudes extrêmes : 2280 - 2550 m

Orientation : Nord est

Surface : 31 032 m² (2023)

Longueur : 173 m

⇒ Scénario probable : chute de séracs

⇒ Scénario (moins probable) : glissement de toute la masse glaciaire depuis la barre rocheuse.

Aléa estimé : fort (2)

Enjeux : faible (0)

B) Historique

- 22 juillet 2007 : chute d'un bloc de plusieurs milliers de m³ (environ 2000), parcourant 300 m.
- 18 juillet 2009 : un bloc de 2 m³ retrouvé à 400 m en aval.

C) Morphologie et dynamique glaciaire

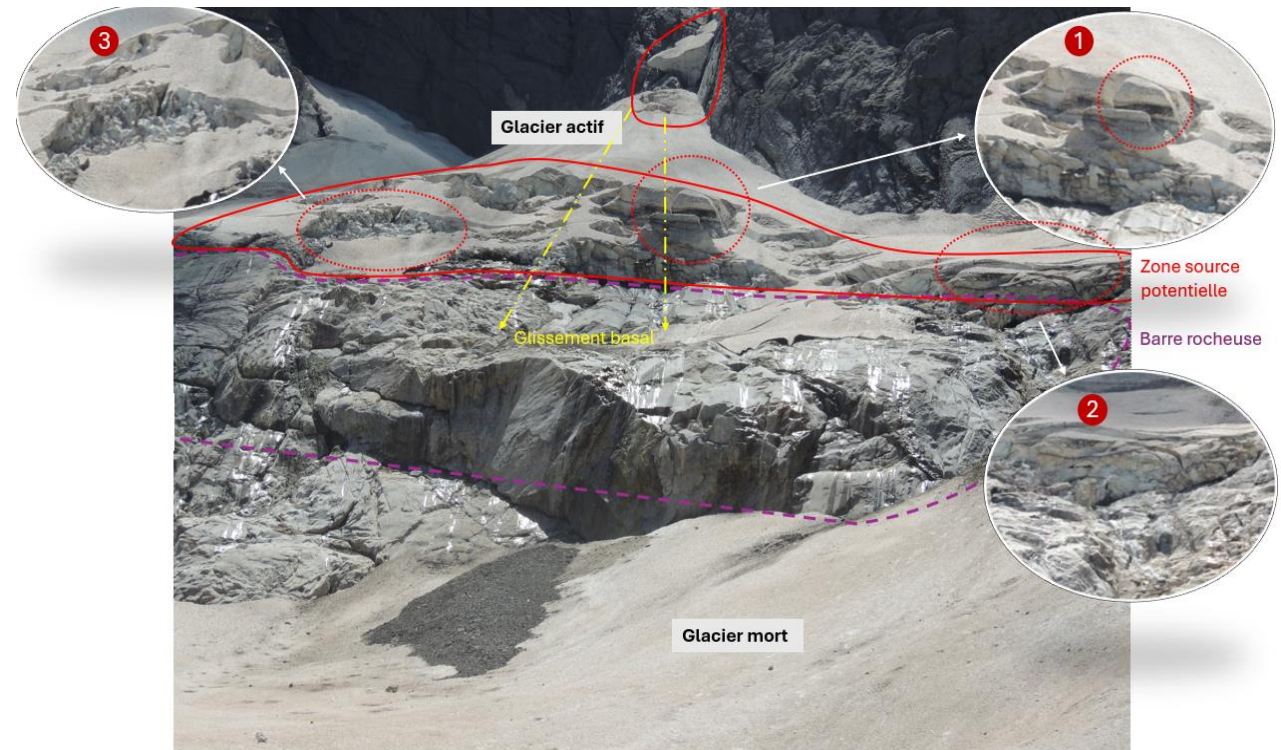
Partie supérieure : crevasses (jusqu'à 20 m), barre de séracs sur une pente de 25 à 30°.

En aval : barre rocheuse apparue en 2007 → rupture du profil → séparation du glacier en deux entités

D) Aléa et risque glaciaire

1. Blocs suspendus, dont un estimé à 30 m³, prêts à se décrocher (n°1).
2. Zones crevassées actives : plusieurs blocs récemment tombés (n°2 et 3)

Terrain (juillet 2025) : 8 blocs de glace observés sur la langue morte (0,5 à 1,5 m³) → activité de rupture toujours en cours.



Glacier du Petit Vignemale

A) Caractéristiques

Type : Glacier suspendu avec barre rocheuse

Altitudes extrêmes : 2280 - 2550 m

Orientation : Nord

Surface horizontale : 14 000 m²

Longueur max horizontale : 250 m

⇒ Scénario probable : glissement basal et rupture potentielle de la partie suspendue du glacier

⇒ Scénario (moins probable) : glissement de toute la masse glaciaire depuis la barre rocheuse.

Aléa estimé : fort (1)

Enjeux : faible (0)

B) Historique

Jusqu'au milieu du XIXe siècle, formé en continuité avec le glacier des Oulettes, couvrant ensemble environ 60 ha.

Depuis l'été 2007, une barre rocheuse sépare la partie inférieure du glacier du compartiment supérieur.

Aucun événement glaciaire majeur recensé dans la littérature ou archives locales.

C) Morphologie et dynamique glaciaire

En juillet 2025 : pas de séracs visibles, mais présence de crevasses.

La barre rocheuse crée un « appel au vide » renforçant la vulnérabilité de la partie suspendue.

D) Aléa et risque glaciaire

Facteurs favorisant le risque de rupture dans la partie amont :

- Pente marquée au-dessus de la barre rocheuse.
- Présence de crevasses visibles et actives.
- Circulation hydrologique intense, infiltration d'eau de fonte favorisant la lubrification à la base.



Annexe 5

Typologie des glaciers instables (sujets à ruptures glaciaires) et des zones sources associées, en vue de la cartographie des avalanches de glace prévisibles dans les Alpes françaises

(ONF-RTM – Juliette BAZIN et Stéphane ROUDNITSKA - juillet 2022)



Sur la base des publications de référence suivantes :

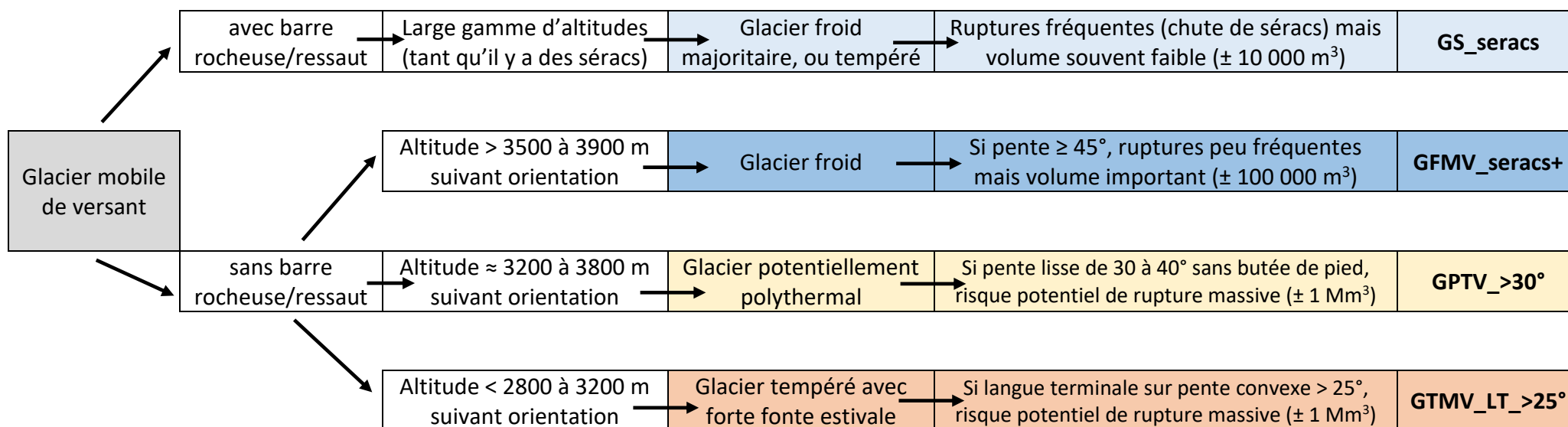


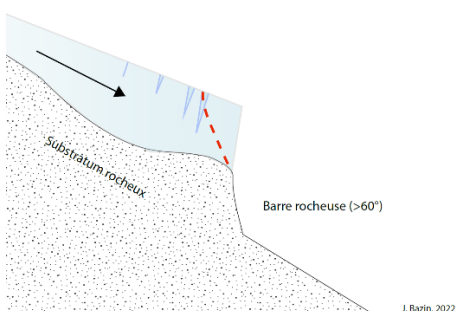
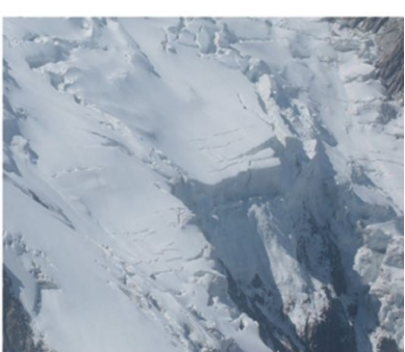
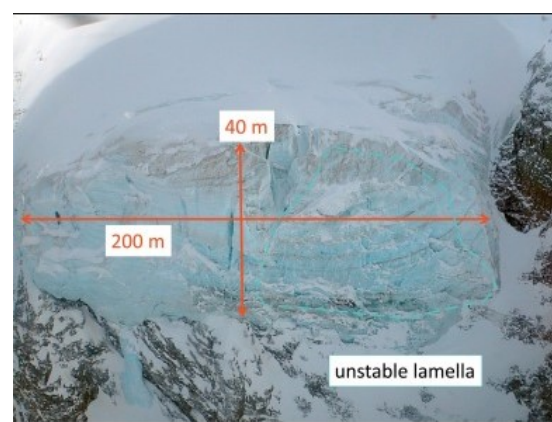
Alean J. (1985). Ice avalanches : some empirical information about their formation and reach. *Journal of Glaciology*, Vol 31, No 109, 1985: 324 -333.

Pralong A., Funk M. (2006). On the instability of avalanching glaciers. *Journal of Glaciology*, 52: 31-48. <https://doi.org/10.3189/172756506781828980>

Faillottaz J., Funk M., Vincent C. (2015). Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Review of Geophysics*, 53(2): 203-224. <https://doi.org/10.1002/2014RG000466>

Résumé en arbre fonctionnel :



Type de glacier instable :	Glacier mobile, suspendu sur barre rocheuse	Caractéristiques générales :	- Le plus souvent zone d'accumulation glaciaire (bilan de masse +) ; des barres de séracs en ablation aussi - fluage souvent dynamique du glacier - épaissement et avancée du bas du glacier conduisant irrémédiablement à une rupture (géométrie critique)	Distribution altitudinale majoritaire dans les Alpes françaises (en 2022) :	Vaste amplitude altitudinale N : ≥ 3200 m E et O : ≥ 3400 m S : ≥ 3500 m
Localisation zone source :	Barre de séracs (mode de rupture la plus fréquente parmi les glaciers instables)		Réf. : GS_seracs		
Type de rupture :	- Fracture en biseau dans la glace, au niveau de la rupture de pente (contrainte de cisaillement) - gamme de volume assez faible et calibrée, de 1000 à 100 000 m3 (exceptionnellement plus). Dépend de la largeur / épaisseur du glacier suspendu et de la désagrégation + ou – forte des séracs				
Indices précurseurs :	- Accélération des déplacements de la falaise de glace quelques jours avant rupture (si suivi instrumenté), de l'ordre de 40 cm/jour (Eigergletscher) - chutes de séracs souvent annuelles au niveau de la falaise de glace permanente				
Exemples historiques de ce type de rupture :					
 9 August 2010		 13 August 2010		 40 m 200 m unstable lamella	
Glacier de Taconnaz (France) : rupture de séracs du 11 août 2010 (278 000 m3) Altitude 3300 m, orientation N.		Eigergletscher (Suisse) : (photo 2016). Glacier entre 3500 et 3200 m, rupture max de 100 000 m3 (été 1990), pente de 20° en surface du GS, 45° au substrat, front froid mais se réchauffant -> déstabilisation massive à l'avenir ?		 Séracs du glacier suspendu de la face nord du Mt Blanc (France), dominant le Gd Plateau (2021).	

Illustrations de zones sources de ce type (GS_seracs) identifiées dans les Alpes françaises (RTM, 2022) :



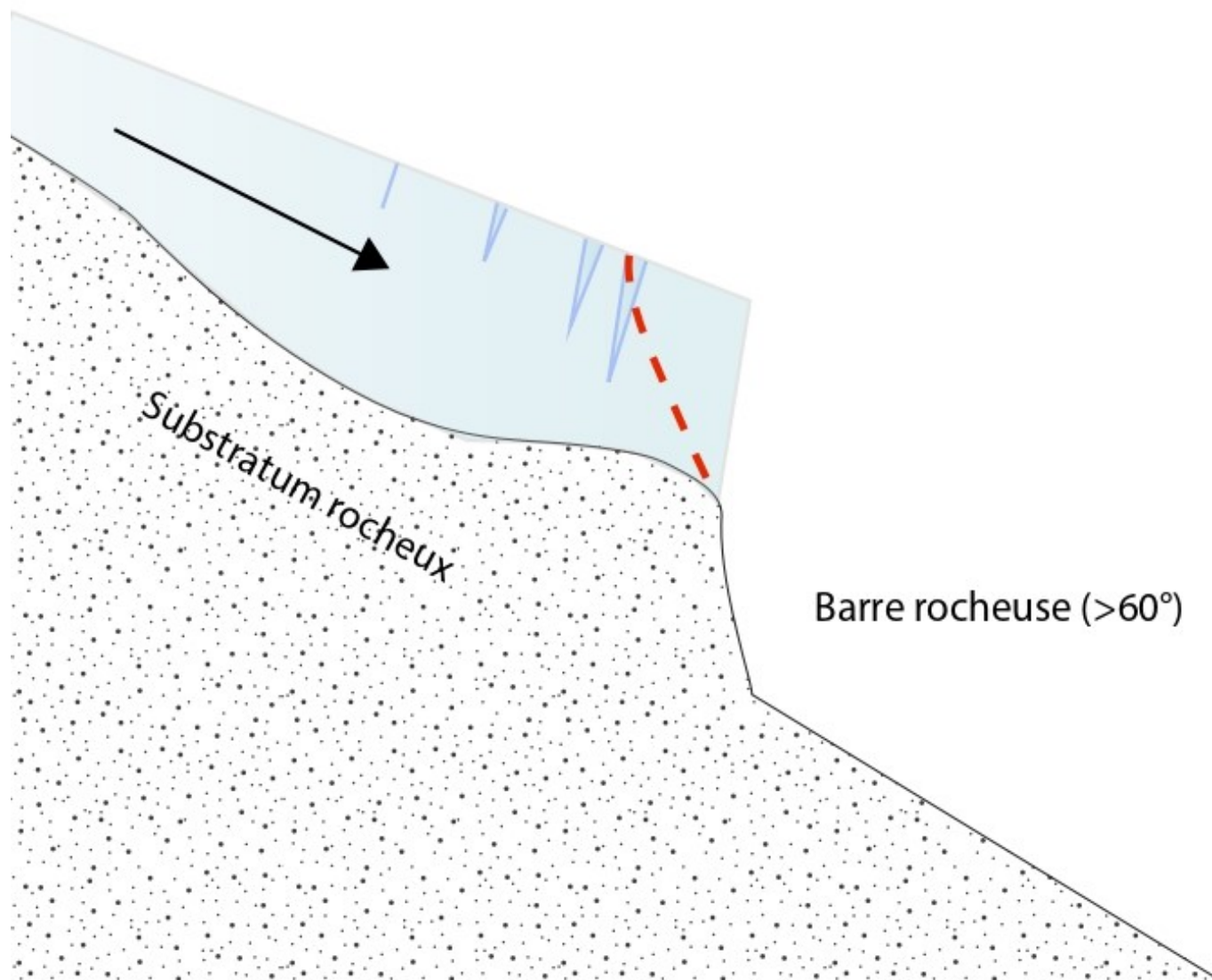
ID BV 203, massif du Mont-Blanc, liaison entre Petit Plateau et Grand Plateau (photo 04/2022), 3900 m d'altitude, orientation N.
 Epaisseur moy. : 80m. Volume total ZS : 2,3 Mm3. Probabilité de départ forte.
 Gamme de volume avalanche de glace max : 500 000 m3.

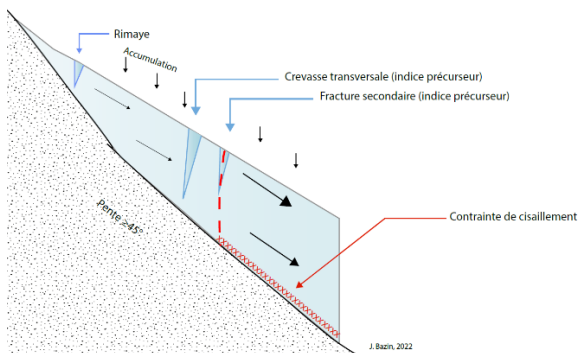
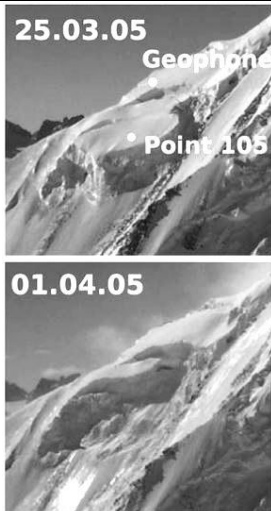
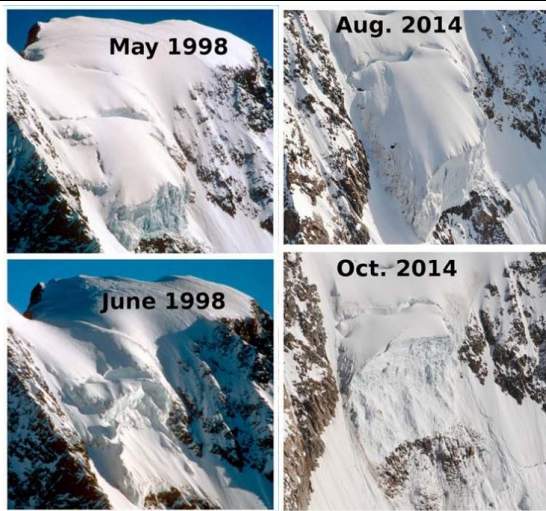
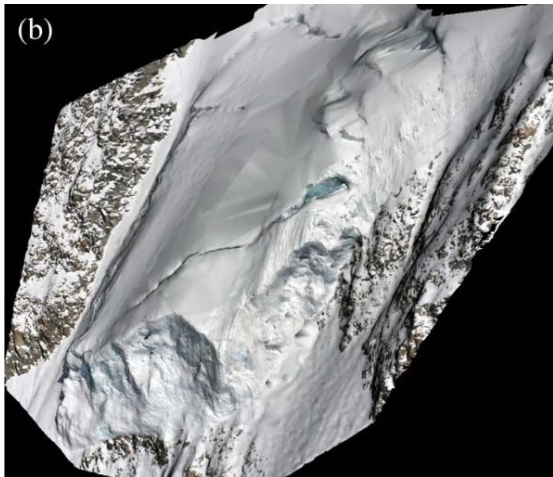


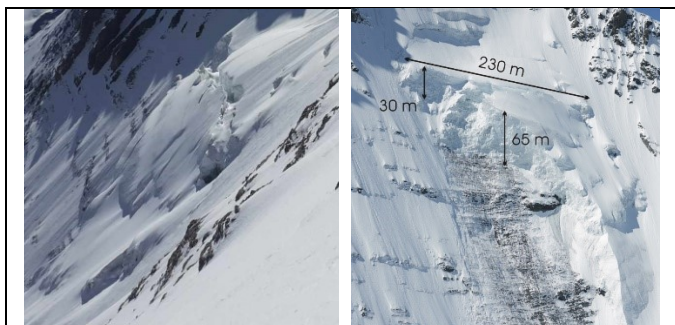
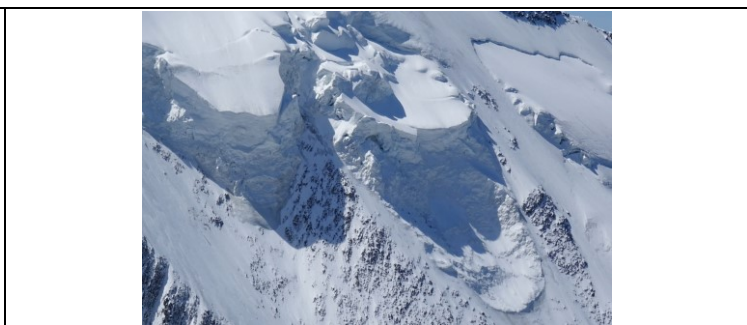
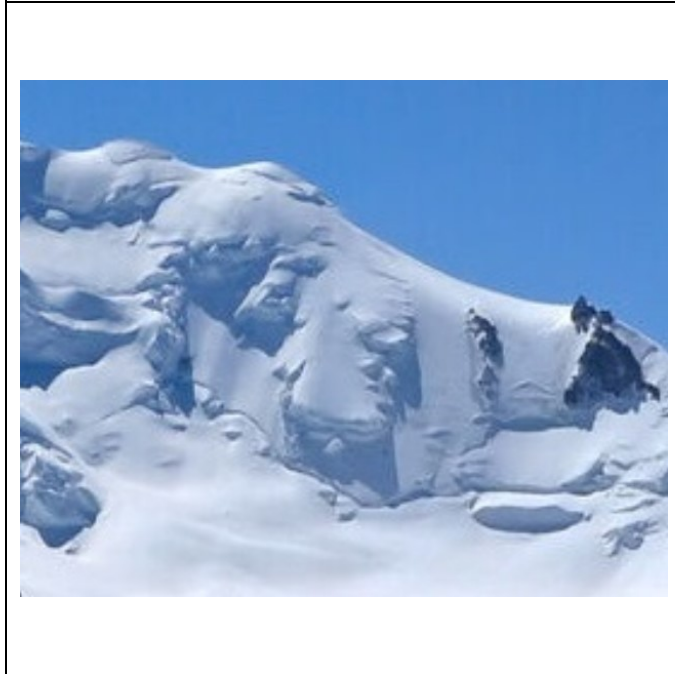
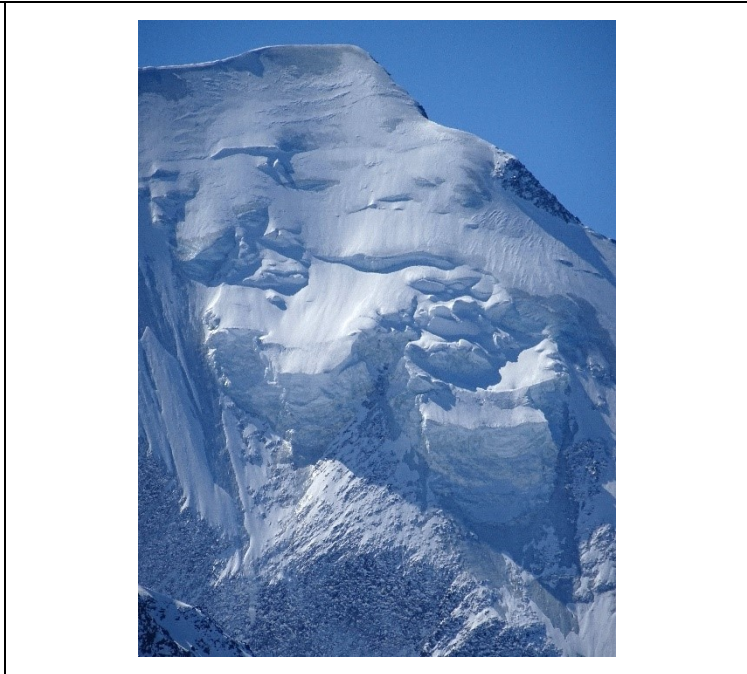
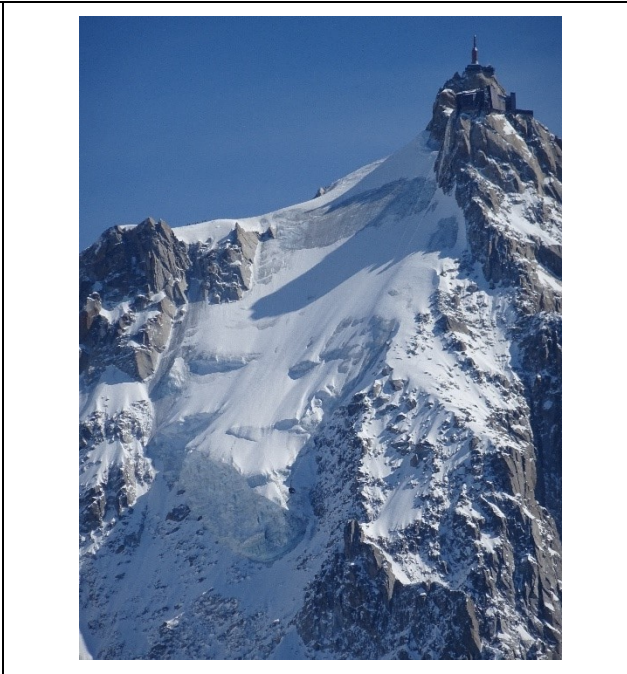
ID BV 203, massif du Mont-Blanc, sous le col Maudit (photo 04/2022), 3750m d'altitude, orientation NO.
 Epaisseur moy. 70m. Volume total ZS : 2 Mm3. Probabilité de départ forte.
 Gamme de volume avalanche de glace max : 500 000 m3.

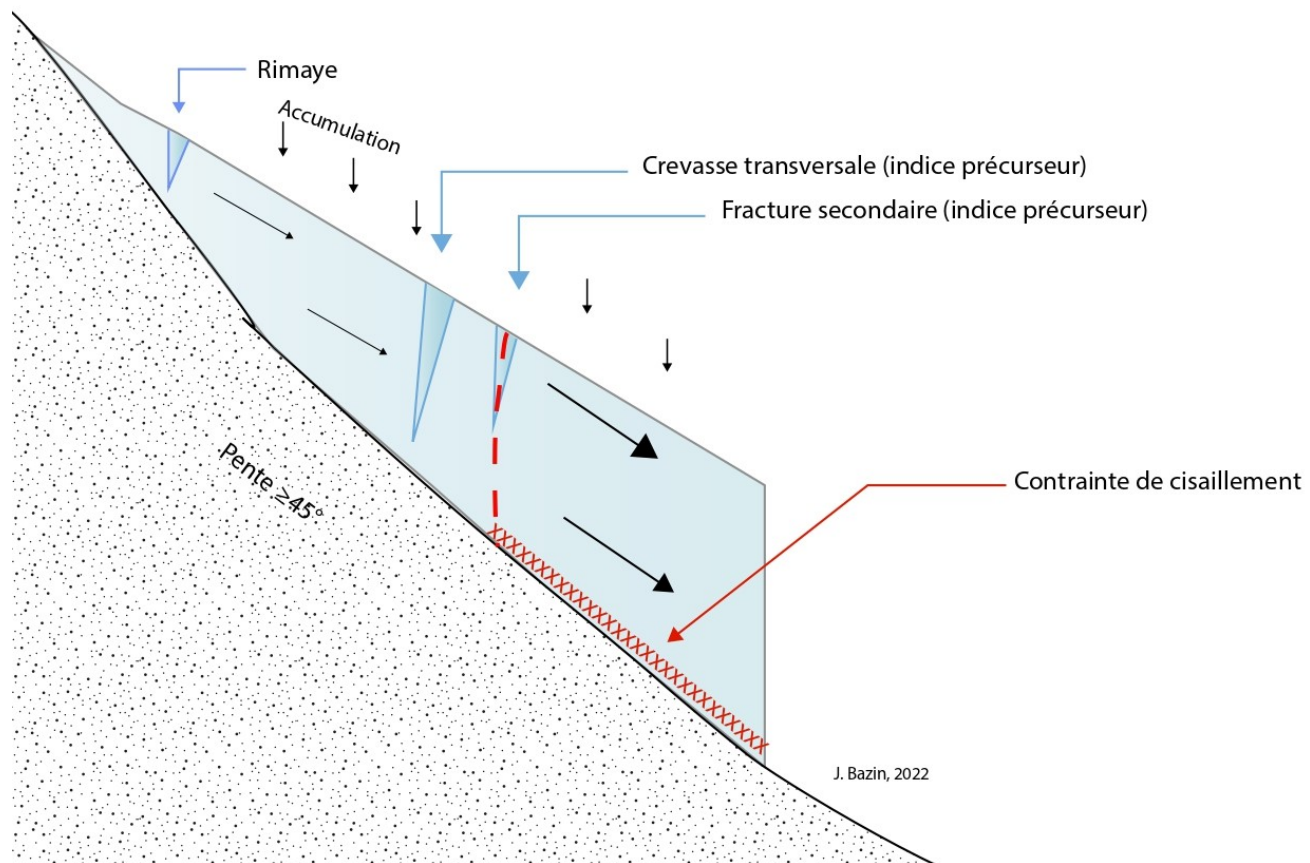


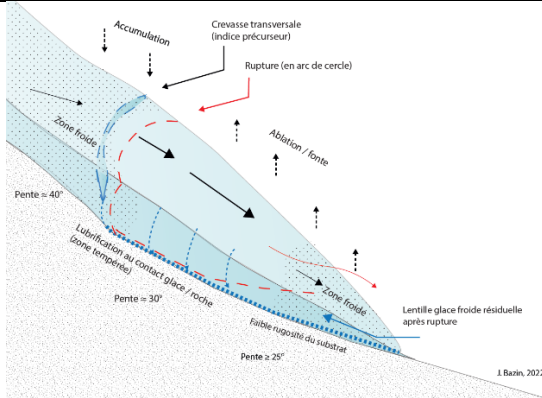
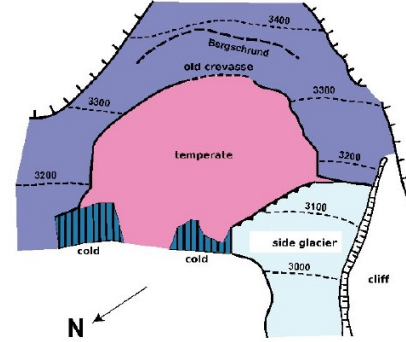
ID BV 512, massif du Mont-Blanc, sous l'Aiguille du Midi (photo 10/2021), 3200m d'altitude, orientation NO.
 Epaisseur moy. 25m. Volume total ZS : 76 000 m3. Probabilité de départ forte.
 Gamme de volume avalanche de glace max : 50 000 m3.



Type de glacier instable :	Glacier froid, mobile et de versant, sur pente forte (≥ 45°) et régulière	Caractéristiques générales :	- zone d'accumulation glaciaire (bilan de masse +) - fluage dynamique/rapide du glacier - absence d'infiltration d'eau de fonte - formation de zones suspendues par surépaisseur de glace - épaissement du bas du glacier conduisant irrémédiablement à une rupture (géométrie critique)	Distribution altitudinale majoritaire dans les Alpes françaises (en 2022) :	N : ≥ 3500 m E et O : ≥ 3700 m S : ≥ 3900 m
Localisation zone source :	Barre de séracs + masse glaciaire amont, ayant subi une accélération, des cisaillements et des ruptures internes		Réf. : GFMV_seracs+		
Type de rupture :	- Rupture dans la glace (contrainte de cisaillement), typiquement quelques mètres au-dessus du substrat -> jonction avec crevasse à l'amont - mobilisation d'une tranche quasi-complète de glacier (et pas seulement de la barre de séracs) - volume mobilisé important, de l'ordre de 100 000 m3 - pas de période très préférentielle (cause mécanique mais pas ou peu hydraulique)				
Indices précurseurs :	- ouverture d'une ou plusieurs crevasses transversales, parfois des années avant - possible désolidarisation d'une lame de glace au front - accélération du fluage et de l'activité sismique (si suivi instrumenté) durant la semaine précédente - après rupture (massive), une à deux décennies sont nécessaires pour retrouver un profil instable.				
Exemples historiques de ce type de rupture :					
					
Weisshorn (Suisse) : 19 août 1973 (200 000 m3 - village de Randa menacé), accélération de la masse instable 5 ans plus tôt ; nouvelle rupture en mai 2005. Altitude 4100 m, orientation E, pente du substrat 45-50°.		Grandes Jorasses (Italie) : 1997 ouverture d'une crevasse transversale en partie sup. du glacier, ouverture d'une crevasse secondaire et rupture de la partie aval le 30 mai 1998 (150 000 m3). Altitude 3950 m, orientation S.		Grandes Jorasses (Italie) : fissure apparue en juillet 2010, précédant une rupture en 2 fois fin septembre 2014 (150 000 m3)	

		
Glacier face nord Grande Casse (France) : 2020 (plusieurs chutes de séracs < 50 000 m³ chacune), accélération de la masse instable (500 000 m³) un an plus tôt avec affaissement de la rimaye et apparition d'une crevasse transversale. Altitude 3600 m, orientation N, substrat à 45-50°. Glacier a priori encore froid mais déstabilisé.	Glacier face nord Aiguille de Bionnassay (France) : 2022 (deux ruptures totalisant environ 180 000 m³, dont la seconde d'environ 150 000 m³), sur le lobe ouest de ce glacier suspendu. Altitude 3800 m, orientation N, pente du substrat 45-50°. Ruptures typiques glacier froid.	
Illustrations de zones sources de ce type (GFMV_seracs+) identifiées dans les Alpes françaises (RTM, 2022) :		
		
ID BV 203. Massif du Mont-Blanc, sous l'arête des Bosses (photo 04/2022). Face NE, 4300 m d'altitude. Plusieurs langues s'écoulant sur la couverture glacio-nivale. Epaisseur moy : 30 m. Volume total ZS : 1,3 Mm³. Probabilité de départ moyen. Vol. avalanche : 300 000 m³.	ID BV 404. Massif du Mt Blanc, Aiguille de Bionnassay (photo 04/2022). Face N, 3800 m d'altitude. Cas typique sur substrat régulier >45°, avec séracs épais et évolutifs. Epaisseur moy. : 25m. Volume total ZS : 1 Mm³. Probabilité de départ forte. Volume avalanche de glace max : 400 000 m³.	ID BV 390. Massif du Mt Blanc, Aiguille du Midi (photo 04/2022). Face N, 3500 m d'altitude. Epaisseur : 35m. Volume total ZS : 600 000 m³. Probabilité de départ forte. Volume avalanche de glace max : 250 000 m³.



Type de glacier instable :	Glacier polythermal de versant, sur pente assez forte (30 – 40°)	Caractéristiques générales :	- Zone de transition entre régime froid et tempéré - fonte estivale de surface (bilan de masse ≈ 0) - infiltration d'eau dans le glacier par les replats -> regel en profondeur-> chaleur latente -> perte d'adhérence entre glace et substrat - présence d'une zone tempérée de taille suffisante - pente régulière ou irrégulière mais > 25° en pied - faible rugosité du substrat rocheux	Distribution altitudinale majoritaire dans les Alpes françaises (en 2022) :	N : ≈ 3200 à 3400 m E et O : ≈ 3400 à 3600 m S : ≈ 3600 à 3800 m
Localisation zone source :	Partie centrale et aval du glacier (grande surface), sous une rupture en arc de cercle.		Réf. : GPTV_>30°		
Type de rupture :	- Glissement à l'interface glacier/substrat rocheux sur la zone tempérée (lubrification par eau de fonte) puis rupture dans la glace jusqu'en surface, ainsi qu'à l'aval et sur les bords (zones encore froides et adhérentes au substrat) - pendant la phase active du glacier (été – début d'automne) où l'eau de fonte est présente - perturbation du réseau de drainage sous-glaciaire par glissement, formation de cavités sous-glaciaires, fracturations, mise en charge (quelques jours avant), soulèvement et rupture - volume mobilisé très important (de l'ordre de 100 000 à 1 000 000 m3)				
Indices précurseurs :	- formation d'une crevasse transversale - accélération des mouvements du glacier (si suivi instrumenté) dans sa partie la plus raide (glissement) puis propagation rapide vers le bas - souvent pas de précédent historique (déstabilisation récente) - peu de signes visuels précurseurs et seulement qques jours avant -> connaître l'état thermique				
Exemples historiques de ce type de rupture :					
1894	1895				
Altelsgletscher : 11 septembre 1895 (4 Mm3). Altitude 3000 m, orientation O, sur une pente décroissante de 40 à 35°. Epaisseur de la cassure max 40 m, moy. 25m. Partie centrale du glacier devenue tempérée (infiltrations d'eau de fonte) et dégradation de lenticilles de glace froide faisant verrou au front du glacier, après plusieurs étés consécutifs très chauds.		Altelsgletscher : schéma des conditions thermales supposées au contact du substrat et dans le glacier avant sa rupture en 1895 (in Failletaz et al., 2011)		Glacier de la Gde Motte (France) : 17 septembre 2008 (≈200 000 m3). Altitude 3300 m, orientation N, pente substrat d'environ 40°. Lenticilles de glace froide restant adhérentes au substrat, en pied de glacier, après rupture. Événement similaire en septembre 1996.	



Marmolada : 03 juillet 2022 (65 000 m³). Altitude 3200 m, orientation N, sur pente localement autour de 30° au niveau de la rupture, en dalles rocheuses lisses. Epaisseur de la cassure max 25 m. Probable accumulation d'eau de fonte (iso 0° vers 4700 m) dans le fond d'une crevasse, avec poche d'eau (?), retenue par base encore froide et adhérente au substrat ? Mise en pression et rupture avec de l'eau dans l'écoulement de glace.



Marmolada : 03 juillet 2022 (65 000 m³). Glacier polytherme avec poche d'eau, type Tête Rousse ?



Marmolada : 03 juillet 2022 (65 000 m³). Localisation du boyau en fond de crevasse, qui a pu se remplir d'eau de fonte et provoquer la rupture au contact du substrat.

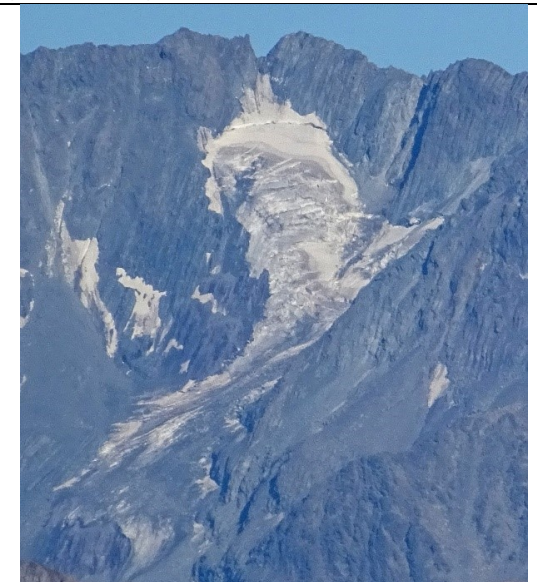
Illustrations de zones sources de ce type (GPTV_>30°) identifiées dans les Alpes françaises (RTM, 2022) :



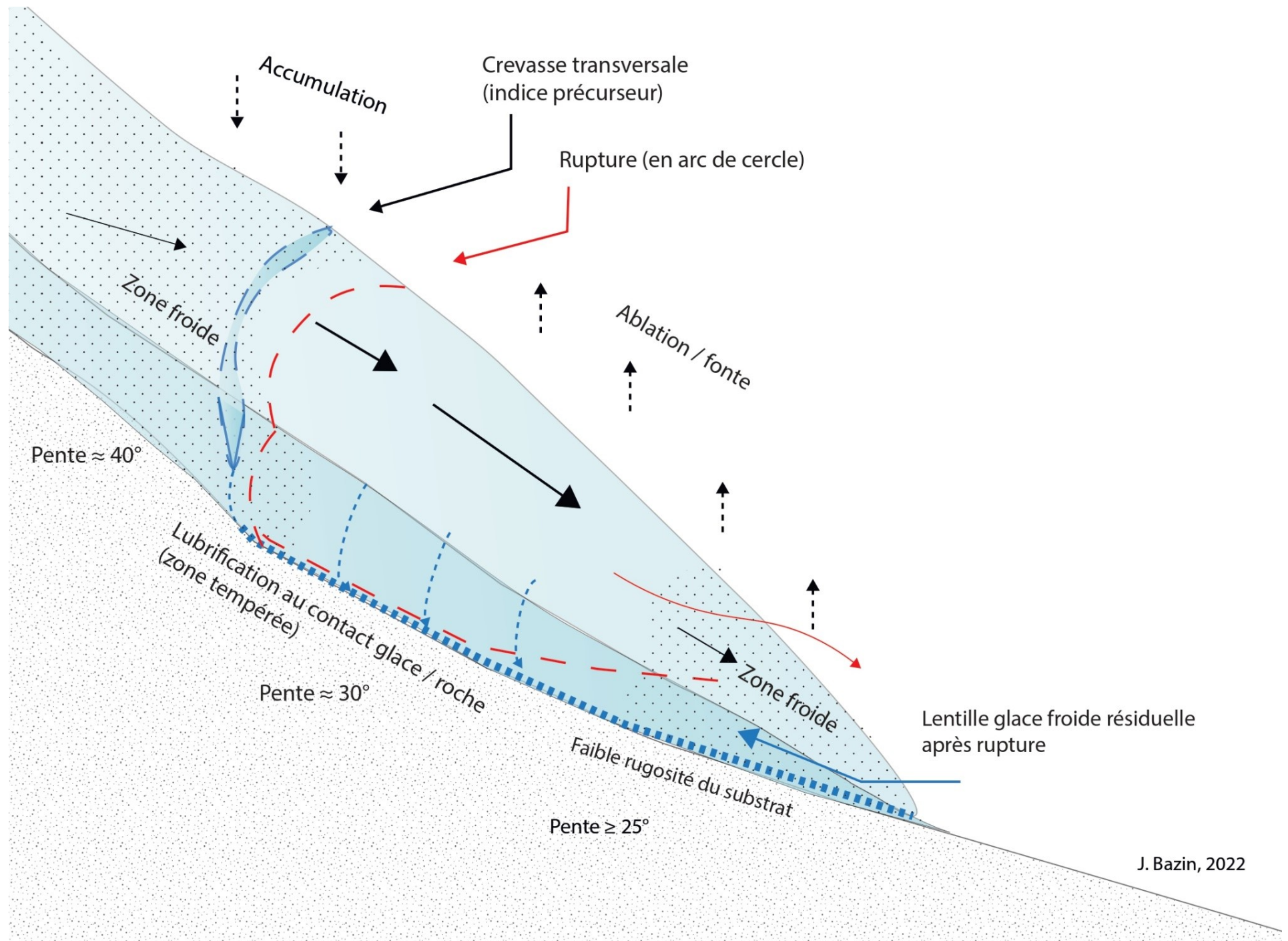
ID BV 533. Haute-Maurienne (Savoie), sous la Pointe de Charbonnel (comparaison avec rupture Altels 1895). 3400 m d'altitude, orientation N. Partie inférieure de la calotte suspendue sur barre rocheuse et pente > 30°, avec lubrification par l'amont. Epaisseur moy. : 25m. Volume total ZS : 4 Mm³. Probabilité de départ moyenne. Volume avalanche de glace max : 2 Mm³.

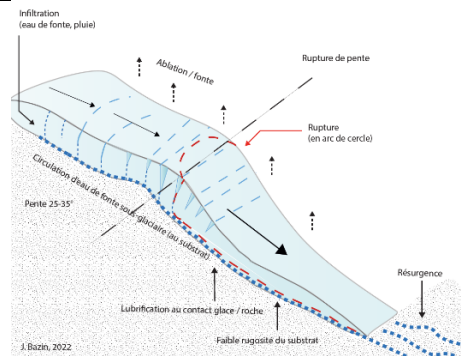
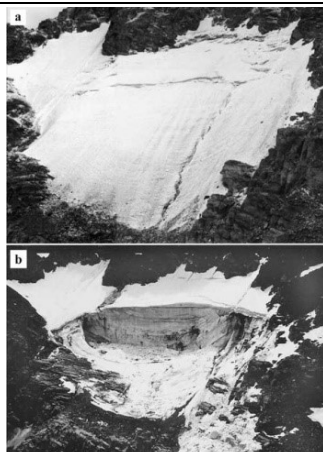
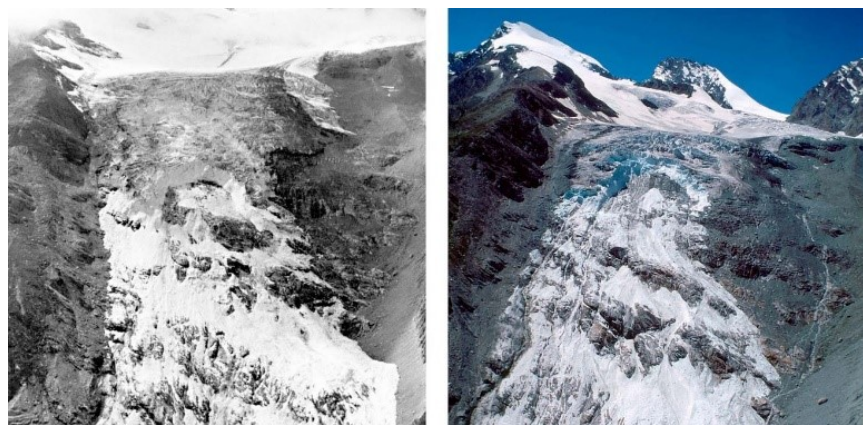
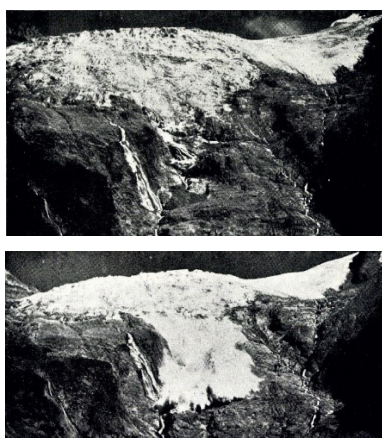


ID BV 197. Massif de la Vanoise, versant nord de la Gde Motte (photo 08/2018). 3300 m d'altitude. Surépaisseur crevascée sur dalles lisses ≥ 35°, en marge de la rupture de 2008. Epaisseur moy. : 40 m. Volume total ZS : 2 Mm³. Probabilité de départ moyenne. Volume avalanche de glace max : 1 Mm³.



ID BV 365. Massif de la Vanoise, face ouest de l'Aiguille de Peclet (photo 09/2019). 3380 m d'altitude. Glacier en retrait rapide sur pente forte ≥ 35° et lisse. Epaisseur moy. : 10 m. Volume total ZS : 400 000 m³. Probabilité de départ moyenne. Volume avalanche de glace max : 200 000 m³.



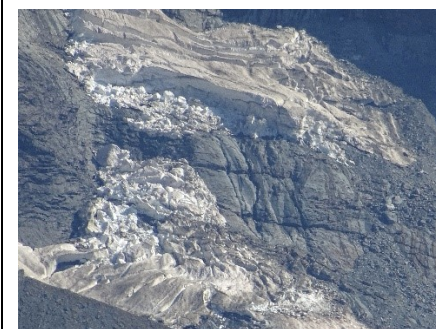
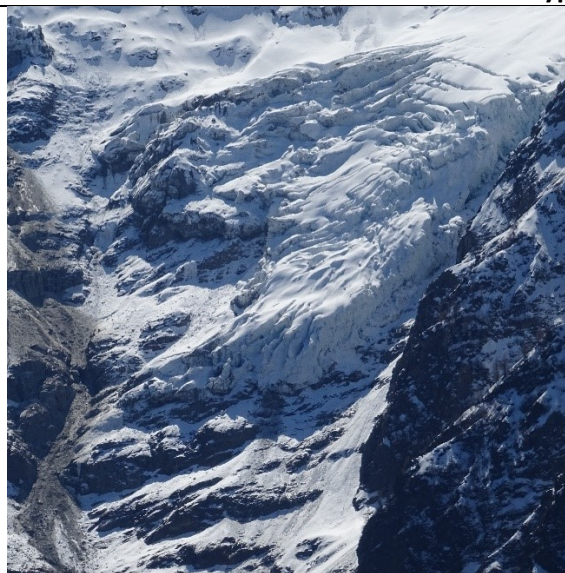
Type de glacier instable :	Glacier tempéré, mobile et de versant, sur pente modérée (25 – 35°)	Caractéristiques générales :	- zone d'ablation glaciaire (bilan de masse -) - fonte estivale généralisée (+ fortes pluies ?) - circulations d'eau diffuses (et non chenalisées) au contact glace/substrat rocheux, réduisant l'adhérence sur de grandes surfaces - une accélération du glacier ne se traduit pas souvent par une rupture (cause multifactorielle)	Distribution altitudinale majoritaire dans les Alpes françaises (en 2022) : N : < 2800 m E et O : < 3000 m S : < 3200 m	
Localisation zone source :	Langue terminale du glacier, sous la rupture de pente crevassée (pente convexe, voir régulière) - Facteur aggravant : dalles rocheuses lisses (faible rugosité) - Facteur stabilisant : butée de pied avec pente aval (< 25°)	Réf. : GTMV_LT_>25°			
Type de rupture :	- Rupture à l'interface glacier/substrat rocheux (glissement de plaque) - pendant la phase active du glacier (été – début d'automne) où l'eau de fonte est abondante, ablation - perturbation du réseau de drainage sous-glaciaire par glissement accru, formation de cavités sous-glaciaires, fracturations du glacier, mise en charge (quelques jours avant), soulèvement et rupture - fracture en arc de cercle, au droit de la plus forte zone de contrainte (convexité) - volume mobilisé très important (de l'ordre de 100 000 à 1 000 000 m3)				
Indices précurseurs :	- Accélération du glacier (plusieurs m/jour) quelques semaines avant, mise en charge et rupture en quelques heures (ex. Coolidge et Allalin lors de fortes pluies) - récurrence longue (dizaines d'années) et irrégulière -> importance de l'historique, de la géométrie/position de la langue (zone source très sensible au recul glaciaire)				
Exemples historiques de ce type de rupture :					
					
Glacier sup. du Coolidge (Italie) : 9 juillet 1989 (200 000 m3). Rupture lors de pluies torrentielles avec brusque hausse de pression sous-glaciaire. Epaisseur de rupture de 35m. Altitude 3000 m, orientation NE.		Allalingletscher (Suisse) : 30 août 1965 (2 Mm3 – 88 victimes) et 31 juillet 2000 (1 Mm3). Langues et fractures similaires. Altitude 2500m, orientation E, sur une pente de 27° en dalles rocheuses.		Glacier du Tour (France) : 14 août 1949 (500 000 m3). Altitude 2200 m, orientation O.	



Glacier des Bossons (France) : 24 juin 2015 ($\approx 150\,000\text{ m}^3$). Epaisseur de rupture de 50 m. Faciès de rupture en arc de cercle et en biseau, à la rupture de pente. Altitude 1700 m, orientation NO, pente de 45° au ressaut rocheux.

Glacier de la Charpoua (France) : 09 septembre 2018 ($> 50\,000\text{ m}^3$). Altitude 2700m, orientation SO, sur une pente de 30° régulière en dalles rocheuses.

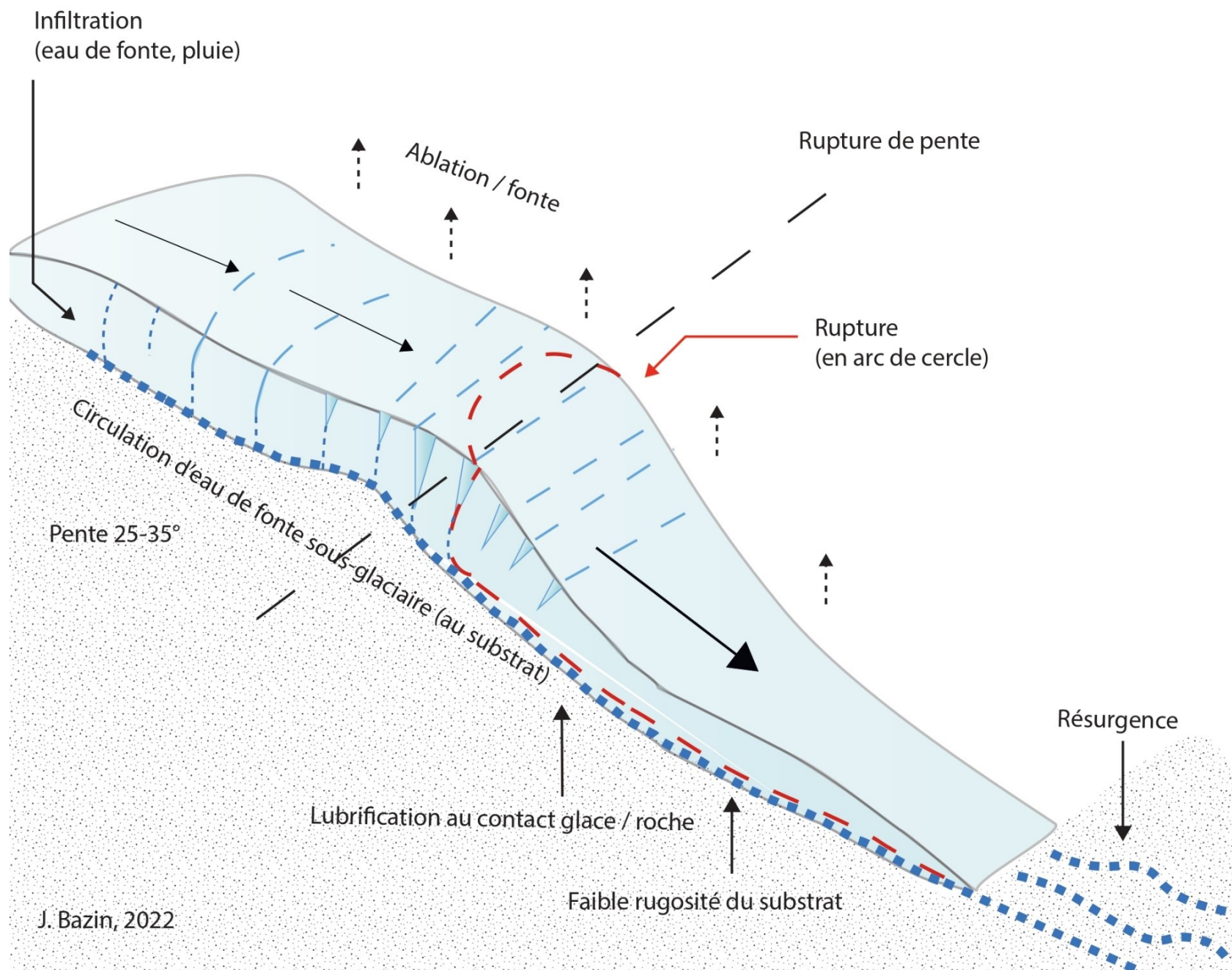
Illustrations de ce type de zones sources (GTMV_LT_>25°) identifiées dans les Alpes françaises (RTM, 2022) :



ID BV 203. Massif du Mt Blanc, langue terminale du glacier de Taconnaz (photo 04/2022). Orientation N, 2200 m d'altitude. LT très crevassée, sur substrat $\geq 30^\circ$. Epaisseur moy. : 35 m. Volume total ZS : 2,2 Mm³. Probabilité de départ moy. Volume avalanche de glace max : 500 000 m³.

ID BV 174. Massif de la Vanoise, langue terminale du glacier de la Gurráz (photo 08/2020). Orientation NE, 2700 m d'altitude. Langue terminale crevassée, sur substrat $\geq 25^\circ$ mais en gradins. Epaisseur moy. : 15 m. Volume total ZS : 1,5Mm³. Proba. de départ faible. Volume avalanche de glace max : 1,5 Mm³.

ID BV 470. Massif de la Vanoise, en pied face sud du Mt Pourri (photo 09/2019). Orientation SO, 2900 m d'altitude. Glacier résiduel sur dalles lisses, se disloquant. Epaisseur moy. 10 m. Volume total ZS : 145 000 m³.



Annexe 6

Analyse de risque des lacs proglaciaires susceptibles de générer un aléa
crue torrentielle dans les Pyrénées françaises.

Document interne au RTM



Analyse de risque des lacs proglaciaires susceptibles de générer un aléa crue torrentielle dans les Pyrénées françaises

*Plan d'actions et de prévention des risques
d'origines glaciaires et périglaciaires*

Août 2025

Avant-propos

Cette étude a été menée au sein de l'Agence RTM des Hautes-Pyrénées et Pyrénées-Atlantiques, dans le cadre du Plan d'Actions et de Prévention des Risques d'origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG), financé par le ministère de la transition écologique, DGPR/SRNH/BRNT (Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels et Hydrauliques, Bureau des Risques Naturels Terrestres).

Le projet a été coordonné par Nadia Hassine, ingénieur géologue spécialisée en nivologie à l'ONF-RTM. Il a été réalisé par Anna Pellaers, stagiaire au sein de l'agence, entre mars et août 2025.

Photo en couverture : Lacs de Barroude
© septembre 2018 (site internet : Lacs des Pyrénées)



Table des matières

1. Problématique	4
2. Les crues torrentielles	6
3. Typologie des lacs selon la nature de leur barrage et risques associés dans les Pyrénées	6
4. Mécanismes de déstabilisation des lacs glaciaires	8
5. Déroulé méthodologique	9
6. Données mobilisées	10
7. Quels sont les lacs proglaciaires pyrénéens ?	11
8. Analyse de la sensibilité à la surverse ou à la rupture brutale des barrages morainiques 13	
8.1 Analyse de la sensibilité à la surverse	13
8.2 Analyse de la sensibilité à la rupture ou à la vidange brutale	17
9. Modélisation de la propagation d'une surverse à l'aide de Flow-R	19
9.1 Principes et fondements	19
9.2 Application du modèle sur les lacs de Barroude	20

1. Problématique

Ce travail s'inscrit dans le cadre du Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG), un programme national porté par le ministère de la Transition écologique, visant à approfondir la connaissance risques d'origine glaciaire et périglaciaire (ROGP) dans les massifs montagneux français. Les impacts du changement climatique sur les glaciers de montagne sont de plus en plus visibles et les risques associés restent encore partiellement appréhendés.

Parmi les aléas identifiés, les crues liées à la vidange brutale de lacs glaciaires ou périglaciaires – appelées glacial lake outburst floods (GLOFs) – constituent un phénomène destructeur, difficile à anticiper. Ces crues résultent de la rupture ou de la surverse d'un barrage naturel, constitué de glace, de moraines ou de roche, retenant un volume d'eau plus ou moins important. Lorsqu'elles surviennent, elles peuvent provoquer des crues torrentielles, emportant sédiments, blocs rocheux et débris sur leur passage.

À l'échelle mondiale, l'étude de Taylor et al. (2023), publiée dans Nature Communications, souligne que près de 15 millions de personnes sont aujourd'hui exposées au risque de GLOFs, en particulier dans les régions glaciaires telles que l'Himalaya, les Andes ou l'ouest de la Chine.

Si les Pyrénées n'ont, à ce jour, enregistré aucun événement de ce type, les conséquences de ces phénomènes sont connues dans les Alpes. L'un des exemples les plus marquants est la vidange brutale du lac sous le glacier de la Tête Rousse en 1892 faisant 175 morts.

Plus récemment, la crue torrentielle de la Bérarde (Isère, juin 2024), bien que d'origine partiellement météorologique, a mis en évidence la contribution d'un processus glaciaire : la vidange du lac supraglaciaire de Bonne Pierre. L'événement a généré un important transport solide (environ 200 000 m³ de matériaux déposés) et des transformations géomorphologiques importantes. Ces épisodes montrent que les interactions entre processus glaciaires et torrentiels peuvent conduire à des événements extrêmes, d'autant plus marqués que la connectivité sédimentaire est forte entre les zones glaciaires et les vallées habitées en aval.



Illustration 1 : Crue torrentielle de la Bérarde, village à 10h29 (source : Sécurité Civile, replit de la rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024, ONF-RTM)



Illustration 2 : Lac supraglaciaire de Bonne Pierre le 13 juin 2024 (gauche, source : Camp2Camp) et le 22 juin 2024 (droite)

Dans ce contexte de recul accéléré des glaciers lié au réchauffement climatique, les conditions de formation, d'évolution et de déstabilisation des lacs glaciaires évoluent rapidement. Cette dynamique impose une actualisation des connaissances pour mieux anticiper les risques associés.

Ce rapport s'inscrit dans la continuité des travaux menés dans les Alpes en 2022. Il vise à appliquer une démarche similaire aux Pyrénées, à travers une analyse des lacs glaciaires et périglaciaires. 1184 lacs glaciaires (c'est-à-dire au-dessus de 2000m d'altitude sont répertoriées, L. Laurent, 2024). L'étude ici se concentre uniquement sur les lacs proglaciaires (à moins d'un kilomètre d'un glacier blanc). Le reste des lacs devra être abordé dans un second temps.

L'objectif principal est de lever le doute quant à leur capacité à générer, en cas de rupture ou de surverse, une crue torrentielle susceptible d'avoir des conséquences dommageables. En particulier, il s'agit d'évaluer si ces phénomènes peuvent atteindre des enjeux humains ou matériels situés en aval.

Pour répondre à cette problématique, plusieurs objectifs sont poursuivis :

- Evaluer le niveau de sensibilité de chacun des lacs proglaciaires vis-à-vis d'un aléa de rupture ou de surverse.
- Identifier les conditions de déclenchement d'un scénario de crue torrentielle, à partir des caractéristiques topographiques, hydrologiques et géomorphologiques.
- Modéliser des scénarios de propagation à partir des zones sources en utilisant l'outil Flow-R.
- Croiser ces analyses avec la cartographie des enjeux situés en aval

L'enjeu final de ce travail est d'obtenir une **hiérarchisation des lacs proglaciaires selon leur niveau de sensibilité**, croisé avec l'exposition des enjeux.

Afin d'évaluer la sensibilité des lacs glaciaires à générer des crues, il est nécessaire dans un premier temps de définir les mécanismes susceptibles de générer une vidange (partielle ou totale) de ces lacs. La partie suivante présente les principaux processus pouvant entraîner des ruptures ou surverses pouvant générer une crue torrentielle.

2. Les crues torrentielles

Les informations présentées sont principalement issues de *l'Inventaire des lacs glaciaires – analyse de la sensibilité des lacs à engendrer des crues torrentielles liées à des débâcles*, (ONF-RTM, Demolis Bruno, Roudnitska Stéphane, Geay Thomas, mars 2023).

Les crues dites « torrentielles » sont des phénomènes parmi les plus dévastateurs en milieu de montagne. Elles se produisent généralement dans des bassins versants de forte pente et sont des écoulements riches en sédiments, roches, débris ligneux ou même organiques.

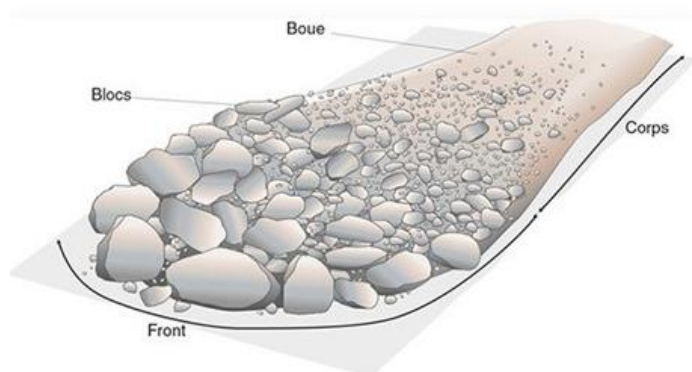


Illustration 3 : Composition et aspect d'une crue torrentielle (ResearchGate, M. Garcin, 2017).

Leur origine peut être météorologique (fortes pluies), gravitaire (éboulis, glissement de terrain), ou glaciaire (vidange de lac). Ces écoulements sont différents des crues « classiques » : leur **viscosité est élevée**, leur **pouvoir est érosif** et leur **capacité à obstruer des infrastructures** en font des risques majeurs dans les vallées de montagne.

D'après Iverson (1997), la concentration en matériaux solides peut dépasser 50 % du volume total, donnant à l'écoulement une texture de « *béton naturel en mouvement* ».

On distingue généralement les laves cohésives, riches en particules fines (limon, argile), avec un comportement viscoplastique ; les laves granulaires, composées essentiellement de matériaux grossiers et les flux organiques, incluant une charge en bois mort ou végétation, pouvant jouer un rôle dans la formation d'embâcles.

Dans le cadre de cette étude, les crues torrentielles d'origine glaciaire sont principalement déclenchées par la rupture ou la surverse d'un lac de barrage naturel. Il est donc essentiel de caractériser la nature de ces barrages pour mieux comprendre leur sensibilité à la vidange.

3. Typologie des lacs selon la nature de leur barrage et risques associés dans les Pyrénées

3.1 Lacs à barrage morainique

Ces lacs se forment lors du recul des glaciers, dans des dépressions topographiques situées en arrière de moraines latérales ou frontales, déposées lors des dernières phases d'avancée

glaciaire. Les barrages morainiques sont généralement constitués de matériaux meubles, peu cohésifs, parfois instables, et peuvent contenir des lentilles de glace morte, ce qui accroît leur fragilité (Demolis, 2023).

Dans ce contexte, les mécanismes de vidange susceptibles de générer une crue torrentielle sont variés :

- La **surverse**, due à une pluie intense ou une fonte rapide ;
- Une **rupture brutale** du barrage, pouvant survenir soudainement par un apport brutal (chute de blocs, avalanche, glissement de terrain).
- Un **processus progressif**, tel qu'un renard hydraulique, la fonte d'une lentille de glace ou une incision lente du barrage.

La probabilité de rupture augmente avec l'angle des pentes et la distance de retrait du glacier vis-à-vis du barrage (facteur influençant la fréquence des phénomènes gravitaires).

3.2 Lacs à barrage de glace

Les lacs à barrage de glace se rencontrent principalement dans les régions de haute montagne où subsistent des glaciers actifs. Ils se forment soit directement à la surface du glacier (lacs supraglaciaires), soit en bordure de celui-ci, dans des cuvettes de surcreusement mises à nu par le recul glaciaire (lacs proglaciaires). Dans ces configurations, la digue retenant l'eau est constituée de glace, parfois mélangée à des débris morainiques (Demolis, 2023).

Les vidanges brutales de ces lacs s'effectuent majoritairement par la formation de chenaux sous-glaciaires ou intra-glaciaires, souvent initiés lorsque la pression hydrostatique du plan d'eau devient supérieure à la résistance mécanique du barrage de glace. Ces chenaux peuvent se former à l'interface entre le glacier et le substratum rocheux ou directement dans la masse glaciaire, provoquant une érosion interne du barrage et une déstabilisation rapide. Dans certains cas, la surverse du lac par-dessus la glace peut également entraîner une incision progressive et l'effondrement du verrou. Plus rarement, des ruptures mécaniques soudaines peuvent survenir à la base du glacier (Demolis, 2023).

Dans les Pyrénées, aucun lac à barrage de glace n'est recensé (2023), d'après l'inventaire réalisé par Laurent. Ce type de configuration n'est plus présent aujourd'hui, en raison du retrait glaciaire important. Les glaciers pyrénéens restants sont désormais trop petits et trop peu mobiles pour bloquer un écoulement et former une retenue d'eau significative. Les conditions géomorphologiques actuelles ne sont pas favorables à la formation de barrages de glace.

Il en résulte que le risque de vidange brutale liée à la rupture d'un barrage de glace est aujourd'hui considéré comme nul dans les Pyrénées.

3.3 Lacs à barrage rocheux

Il s'agit de lacs formés par le retrait des glaciers, occupant des cuvettes rocheuses stables (bedrock). Ces lacs sont globalement considérés comme peu sensibles à une vidange soudaine. Les débordements restent rares, mais peuvent être déclenchés par un apport massif d'eau ou de matériaux (avalanches, glissements), provoquant une surverse.

4. Mécanismes de déstabilisation des lacs glaciaires

4.1 Surverse

La surverse regroupe l'ensemble des scénarios où l'eau dépasse le niveau du barrage sans l'endommager immédiatement. Elle est généralement provoquée par des vagues générées par des phénomènes gravitaires (éboulement rocheux, avalanche de glace, vêlage glaciaire), mais peut aussi résulter d'une élévation rapide du niveau du lac, par exemple lors d'un événement pluvieux intense ou d'une fonte accélérée.

Ce mécanisme est commun à tous les types de lacs, mais son impact potentiel dépend de la topographie et des matériaux composant le barrage.

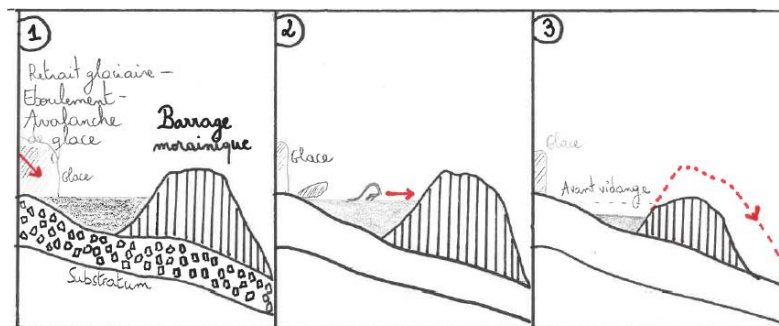


Illustration 4 : Schéma illustratif du mécanisme de surverse

4.2 Rupture

Ce mécanisme correspond aux situations où une défaillance structurelle du barrage permet l'écoulement rapide du contenu du lac.

Elle peut se produire par :

- Incision progressive ou brutale ;
- Renard hydraulique ;
- Fonte d'une lentille de glace (dans le cas de barrage morainique)

Même si certains cas ne relèvent pas d'une rupture franche (ex. écoulement progressif), les conséquences hydrologiques peuvent s'apparenter à une crue torrentielle. Ce mécanisme concerne principalement les lacs à barrage morainique ou glaciaire.

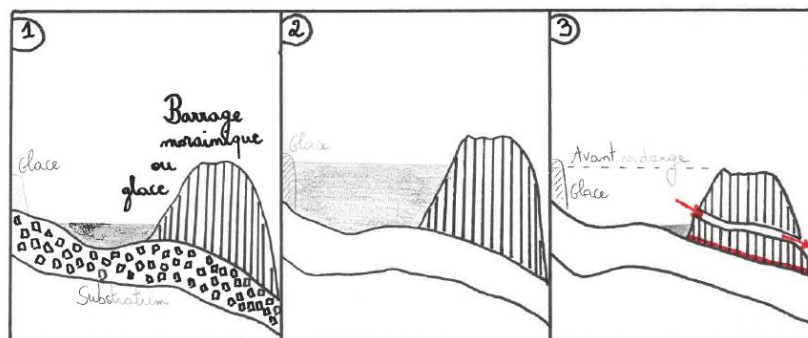


Illustration 5 : Schéma illustratif du mécanisme de rupture

4.3 Sensibilité globale des lacs à engendrer des crues

La capacité d'un lac à engendrer une crue dépend en grande partie de la nature du barrage qui le retient. Selon Demolis (2023), les barrages de glace présentent la plus forte sensibilité, tant au phénomène de surverse (débordement) qu'à la rupture brutale. Viennent ensuite les barrages morainiques, également très sensibles à la surverse en raison de leur composition meuble et hétérogène, mais avec une probabilité de rupture considérée comme modérée. À l'opposé, les barrages rocheux sont les moins vulnérables : s'ils peuvent connaître des phénomènes de surverse à un niveau modéré, ils ne présentent en revanche aucun risque de rupture.

Les barrages de glace étant absents dans les Pyrénées, l'analyse de sensibilité portera essentiellement sur les barrages morainiques, plus fragiles que les barrages rocheux.

5. Déroulé méthodologique

L'évaluation de la sensibilité des lacs glaciaires susceptibles de générer une crue torrentielle repose sur une approche combinant des observations géomorphologiques et une modélisation à l'aide du modèle Flow-R. La méthodologie s'articule en quatre phases principales :

Phase 1: Sélection des lacs à analyser

Cette première étape repose sur les résultats de l'inventaire des lacs d'origine glaciaire réalisé par Livia Laurent (2024), qui a recensé 1 184 plans d'eau répartis sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne, de superficies variant de 0,0015 hectare à 153 hectares.

Parmi ceux-ci, nous nous concentrerons uniquement sur les lacs **dont leur volume est supérieur à 2500 m³ et leur altitude supérieure à 2000 m.**

Au vu du nombre conséquent de ces lacs, il a été choisi pour cette étude de se concentrer uniquement sur les lacs proglaciaires (à moins d'un kilomètre d'un glacier).

Phase 2: Analyse experte

Chaque lac proglaciaire fait l'objet d'une d'analyse, inspirée d'une grille d'évaluation alpine (Annexe 1). Cette analyse qualitative repose sur des critères géomorphologiques, hydrologiques et glaciologiques permettant d'évaluer la sensibilité du lac à deux types de phénomènes : la surverse et la rupture.

Cette analyse repose sur les images satellites (orthophotos IGN, Google Earth) et des données SIG (altitude, topographie, géologie). Une note de sensibilité est proposée (de la plus faible, moyenne à la plus forte).

Phase 3: Simulation des scénarios de propagation (modèle Flow-R)

Une fois les lacs identifiés comme à sensibilité forte, une **simulation de propagation** pourra être réalisée à l'aide du **modèle Flow-R**, outil de modélisation spatiale des écoulements

gravitaires. Cette étape vise à **délimiter les zones potentiellement impactées** en aval du lac.

Phase 4 : Croisement avec les enjeux et cartographie

Enfin, les zones potentiellement impactées par une crue torrentielle sont croisées avec les enjeux présents en aval : infrastructures, habitations, routes, zones touristiques, etc pour donner un avis d'expert sur le risque potentiel.

6. Données mobilisées

L'analyse repose sur un ensemble de données permettant d'appréhender à la fois la morphologie des lacs glaciaires, leur dynamique potentielle, et l'évolution des paysages.

Sources de données principales :

- Inventaire des lacs glaciaires (2023) : fourni sous forme de fichier vectoriel (shapefile), cet inventaire réalisé par Livia Laurent constitue la base du travail. Il recense l'ensemble des lacs d'origine glaciaire identifiés dans les Pyrénées.
- Carte de distribution potentielle du permafrost : utilisée pour repérer les zones à forte probabilité de présence, notamment dans les parois rocheuses surplombant les lacs. Elle permet d'identifier les secteurs susceptibles d'être affectés par des instabilités gravitaires liées au dégel du permafrost.
- Cartes topographiques de l'IGN (Scan25) : ces cartes servent à la localisation précise des lacs et à l'analyse du terrain.
- Google Earth : les vues 3D permettent de mieux appréhender la configuration géomorphologique globale des lacs (encaissement, exposition, pentes environnantes) et d'observer certains éléments non visibles sur les couches classiques.
- Photographies de terrain disponibles en ligne : en complément, des images disponibles sur Google Images ou d'autres plateformes sont consultées afin de visualiser des éléments morphologiques (barrages morainiques, contact avec un glacier, végétation, etc.) difficilement interprétables par télédétection seule.
- Couches SIG des glaciers blancs et des glaciers rocheux : ces données permettent d'identifier les contacts potentiels entre un lac et un glacier actif, qu'il soit de type blanc ou rocheux. Cette information est essentielle pour évaluer les risques de vêlage, d'avalanches de glace ou d'écoulement brutal.
- Portail IGN "Géoportail" et l'outil "Remonter le temps" : utilisés pour comparer les configurations anciennes et actuelles des lacs, à travers des séries historiques de cartes et de photos aériennes. Cela permet d'évaluer l'évolution de certains lacs, l'apparition de nouveaux plans d'eau ou la disparition d'anciens, en lien avec la dynamique glaciaire et climatique.

7. Quels sont les lacs proglaciaires pyrénéens ?

Pour rappel, l'étude de la sensibilité des lacs porte uniquement sur des lacs dont leur altitude est supérieure à 2000 m d'altitude.

Au vu du nombre conséquent de ces lacs, il a été choisi pour cette étude de se concentrer uniquement sur les lacs proglaciaires (à moins d'un kilomètre d'un glacier). Leur nombre est de 14 au total, dont 12 en Haute-Garonne et 2 dans les Hautes-Pyrénées.

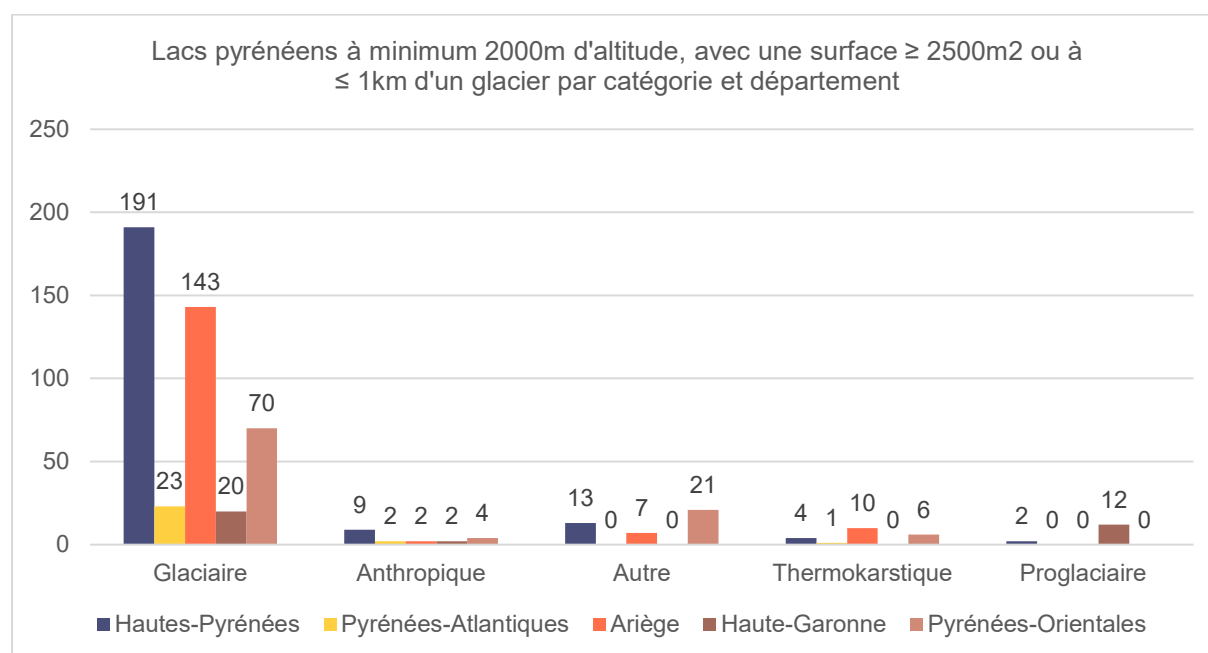


Illustration 6 : Répartition par catégorie et par département des lacs pyrénéens supérieur à 2000m d'altitude avec une surface supérieure à 2500m² ou à moins d'un kilomètre d'un glacier

Voici les informations principales des lacs proglaciaires à connaître pour une bonne compréhension de l'étude de risque.

Tableau 1 : Principales informations concernant les lacs proglaciaires pyrénéens

Nom	ID_RTM	Massif	Commune	Altitude (m)	Surface	Volume (m3)
Barroude 1	389	Haute-Bigorre	Aragnouet	2358	96233,9	1239820
Barroude 2	390	Haute-Bigorre	Aragnouet	2370	14897,8	87673,2
-	677	Luchonnais	Oô	2563	1433,34	3155,36
-	679	Luchonnais	Oô	2567	524,352	756,655
-	692	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2722	696,366	1132,04
-	693	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2771	220,971	221,814
-	694	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2771	51,0946	27,7285
-	695	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2779	53,9451	29,9506
-	696	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2724	104,055	76,1284
-	697	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2724	85,4076	57,512
-	698	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2706	135,813	111,125
-	699	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2719	36,5577	17,2371
-	700	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2696	233,282	239,566
-	701	Luchonnais	Castillon-de-Larboust	2409	352,508	430,54

Une cartographie des lacs proglaciaires est proposée à la page suivante. A noter que le lac de Barroude (65) représente en réalité deux entités (d'où le nombre de deux lacs dans les Hautes-Pyrénées).

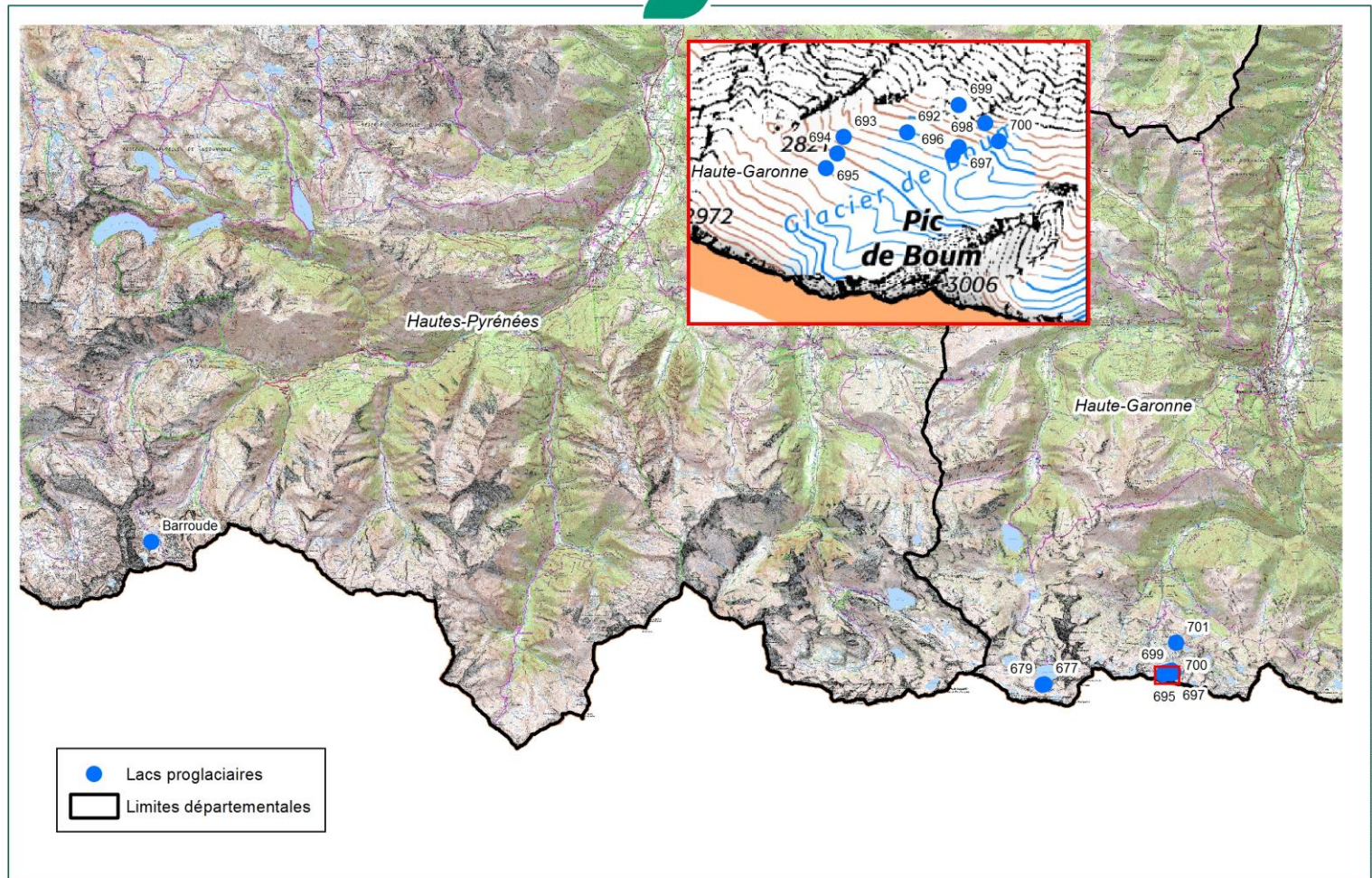


Illustration 7 : Cartographie des lacs proglaciaire dans les Pyrénées françaises

8. Analyse de la sensibilité à la surverse ou à la rupture brutale des barrages morainiques

En réalisant une analyse de la sensibilité, nous cherchons l'aléa des lacs proglaciaires à la surverse et à la rupture.

Le niveau de sensibilité globale est qualifié en croisant les analyses de surverse et de rupture et est classé tel qui suit :

Sensibilité négligeable à faible : la probabilité et l'intensité d'un aléa de crue, par vidange partielle ou totale du lac, est considérée comme négligeable à faible.

Sensibilité moyenne : l'aléa est considéré comme probable mais modérée en intensité et/ou en occurrence/probabilité.

Sensibilité forte : l'aléa de crue torrentielle à l'aval du lac est considéré comme important (probabilité de vidange et intensité de crue forte).

8.1 Analyse de la sensibilité à la surverse

Elle prend en compte la possibilité de débordement lié à des événements gravitaires ou des interactions directes avec des éléments instables à proximité.

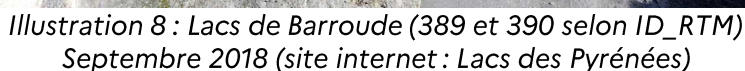
Voici certains éléments précurseurs qui peuvent mener à ce type de phénomène :

- Phénomènes éloignés en amont :
 - Présence de parois rocheuses instables potentiellement affectées par la dégradation du permafrost ;
 - Glaciers suspendus ou situés en amont immédiat pouvant provoquer des avalanches de glace dans le lac.
- Phénomènes proches du plan d'eau :
 - Rives morainiques récentes non stabilisées, sujettes à des effondrements ;
 - Contact direct avec un glacier rocheux actif ou un glacier blanc, sources possibles de vêlage ou d'éboulement.

Tableau 2 : Analyse de la sensibilité à la surverse des lacs proglaciaires pyrénéens

Noms	389	390	677	679	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701
1. Parois rocheuse avec probabilité de permafrost dominant le lac	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
2. Glacier blanc dominant le lac	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3. Berge morainique non végétalisée et non stabilisée, susceptible de générer un glissement/éboulement directement dans le lac	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4. Front de glacier rocheux actif susceptible de générer un glissement/éboulement directement dans le lac	X	X	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5. Glacier blanc en contact direct du lac, susceptible de générer un vêlage massif dans le lac	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6. Barrage constitué de matériaux meubles (pas de substratum visible)	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7. Lac avec déversoir ou franc bord < 2 à 3m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Lac sans déversoir évolutif, reposant sur un glacier (blanc, noir ou rocheux), susceptible de générer une vidange par siphonnage dans la glace	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sensibilité à la surverse 0 -> faible à négligeable 1 -> moyenne 2 -> forte	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ainsi, parmi les quatorze lacs étudiés, seuls les lacs **389** et **390** (Barroude) présentent une sensibilité moyenne à la surverse.



1:10 000

0 75 150 225 300

Carte réalisée en août 2005

Légende

- Inventaire_lacs_proglaciaires
- MARST_pyrénées_vf.tif
- <VALEUR>
- 0.083426185 - 4
- 4.000000001 - 8
- 8.000000001 - 18.56291252

Parois permafrost- lac de Barrode

Illustration 9 : Lacs de Barroude (389 et 390 selon ID_RTM) et parois permafrost

Les berges morainiques sont végétalisées, et donc a priori stables.

Les deux lacs possèdent un déversoir non évolutif, c'est-à-dire qu'il ne repose pas sur un glacier susceptible de provoquer une vidange par siphonnage de la glace.

Le glacier blanc dominant les lacs, recensé dans l'inventaire de Pierre René (2023), présente désormais davantage les caractéristiques d'un glacier rocheux. Entièrement recouvert de débris, il constitue la dernière phase de son existence en tant que « glacier » avant extinction. Sa disparition est donc probable dans la prochaine décennie. Quelques crevasses subsistent au centre, mais son activité reste résiduelle. **Il n'est donc pas envisageable que ce glacier entraîne un quelconque phénomène d'intensité relativement forte pour que le lac connaisse un phénomène de surverse.**



Illustration 10 : glacier de Barroude (Association Moraine, 2023)

Les deux lacs de Barroude présentent un aléa moyen de surverse, car plusieurs critères sont remplis : présence de parois en permafrost sur les versants alentour, susceptibles de générer des chutes de blocs dans les lacs ; proximité du glacier blanc de Barroude, bien qu'il soit en phase terminale et en voie de transformation en glacier rocheux. Toutefois, la stabilité apparente des berges morainiques végétalisées contribue à limiter le risque, justifiant ainsi la classification en aléa moyen.

Les autres lacs proglaciaires présentent tous une sensibilité faible à négligeable (classe 0), principalement en raison :

- de l'absence de glacier blanc actif en contact,
- de berges morainiques stables et végétalisées,
- de l'absence de déversoirs évolutifs sur substrat glaciaire,
- et de l'inexistence de fronts de glacier rocheux actifs susceptibles de générer un volume de débris significatif.

8.2 Analyse de la sensibilité à la rupture ou à la vidange brutale

L'analyse se concentre ici sur la nature du barrage et les conditions susceptibles de provoquer une rupture :

- Absence de déversoir, associé à un fond de lac reposant sur un glacier ou un socle instable, pouvant entraîner une vidange brutale par fonte ou siphonnage ;
- Présence de matériaux meubles en fermeture aval (moraine récente, éboulis, glacier rocheux), potentiellement sensibles à la pression hydrostatique ;
- Présence de glace ou de permafrost dans le substrat du barrage, accentuant l'instabilité ;
- Modification du talweg par fonte glaciaire en rive, pouvant changer le point de sortie des eaux et créer un nouveau cheminement brutal.

Tableau 3 : Analyse de la sensibilité à la rupture des lacs proglaciaires pyrénéens

Noms	389	390	677	679	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701
1. Lac sans déversoir, évolutif, reposant sur un glacier blanc ou sur un glacier noir ou rocheux (thermokarstique)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2. Même type de lac fermé côté aval par des matériaux meubles pouvant contenir de la glace et susceptibles de rompre par dégradation du permafrost	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3. Lac sans déversoir, fermé côté aval par une moraine encore non ou peu végétalisée mais a priori sans glace et susceptible de rompre par pression hydrostatique en cas de montée des eaux	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4. Lac avec déversoir, évolutif, dont une partie des berges est constituée d'un glacier (blanc ou noir)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sensibilité à la rupture 0 -> faible à négligeable 1 -> moyenne 2 -> forte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L'analyse montre qu'aucun des quatorze lacs proglaciaires étudiés ne présente de sensibilité notable à la rupture ou à la vidange brutale (tous classés en aléa 0). Aucun cas de barrage instable reposant sur un glacier actif, sur un socle thermokarstique, ou constitué de matériaux meubles non stabilisés n'a été observé.

La majorité des lacs disposent d'un déversoir, excluant les conditions favorables à une rupture soudaine par siphonnage, fonte du permafrost ou surpression hydrostatique.

Ces résultats s'expliquent également par l'état avancé de retrait des glaciers pyrénéens. Si cette fonte rapide entraîne aujourd'hui une forte circulation d'eau sous-glaciaire, celle-ci ne semble plus directement en contact avec les structures de barrage des lacs étudiés, limitant ainsi le risque de rupture brutale.

En résumé, le recul glaciaire et la stabilisation progressive des barrages morainiques placent actuellement la totalité des lacs proglaciaires pyrénéens dans une situation structurellement stable vis-à-vis de l'aléa à la rupture de barrage.

9. Modélisation de la propagation d'une surverse à l'aide de Flow-R

9.1 Principes et fondements

Compte tenu de la faible sensibilité des lacs inventoriés à l'aléa de rupture, l'analyse de risque se concentre exclusivement sur les lacs de Barroude (ID_RTM 389 et 390), seuls classés en aléa moyen pour la surverse.

Afin d'évaluer la zone d'impact potentielle en cas de surverse, une modélisation est réalisée à l'aide de l'outil Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale).

Il s'agit d'un modèle empirique conçu pour simuler la propagation de phénomènes gravitaires tels que les laves torrentielles, chutes de blocs, coulées de débris ou glissements. Développé par l'Université de Lausanne, il est particulièrement adapté à des analyses à moyenne ou grande échelle, grâce à son fonctionnement basé sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Le principe repose sur la détermination des trajectoires potentielles d'un flux à partir d'un point d'initiation, en tenant compte de la pente et de la direction du flux sur chaque cellule du MNT. Le modèle applique des critères de seuil d'énergie et de frottement (angle de friction, perte d'altitude minimale) pour définir la distance et l'extension de la propagation.

Pour l'application aux lacs de Barroude, le modèle est utilisé afin de simuler la propagation par une surverse.

L'objectif est double :

1. Délimiter les secteurs potentiellement atteints par les écoulements issus d'une surverse.
2. Identifier les enjeux situés en aval (infrastructures, zones de fréquentation, milieux sensibles) susceptibles d'être impactés.

Les résultats de cette modélisation permettent d'apporter une estimation spatialisée du risque.

9.2 Application du modèle sur les lacs de Barroude

A réaliser.

Biblio :

ONF-RTM (2025, avril). *Prévenir les crues torrentielles à Chamonix : travaux de vidange du lac glaciaire des Bossons*. Office national des forêts – Restauration des terrains en montagne. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/raconte-moi-la-foret/comprendre-la-foret/restauration-des-terrains-en-montagne/+2793::prevenir-les-crues-torrentielles-chamonix-travaux-de-vidange-du-lac-glaciaire-des-bossons.html> (consulté en mai 2025).

RADIO MONT BLANC (2023, août). *Chamonix : le lac glaciaire des Bossons n'est plus*. Radio Mont Blanc. [En ligne]. Disponible sur : <https://radiomontblanc.fr/article/chamonix-le-lac-glaciaire-des-bossons-nest-plus-52565> (consulté en mai 2025).

CNRS TERRE ET UNIVERS (2025, 13 février). *Vidange d'un lac glaciaire : inondation catastrophique du Sikkim (Inde) en 2023*. CNRS. [En ligne]. Disponible sur : <https://lejournel.cnrs.fr/articles/vidange-dun-lac-glaciaire-inondation-catastrophique-du-sikkim-inde-en-2023> (consulté en mai 2025).

THIBERGE C. (2023, 7 février). *Réchauffement climatique : 15 millions de personnes menacées par des crues de lacs glaciaires*. Le Monde. [En ligne]. Disponible sur : https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/02/07/rechauffement-climatique-15-millions-de-personnes-menacees-par-des-crues-de-lacs-glaciaires_6160885_3244.html (consulté en mai 2025).

CHEN M., CHEN Y., FANG G. *et al.* (2024). *Risk assessment of glacial lake outburst flood in the Central Asian Tianshan Mountains*. *npj Climate and Atmospheric Science*, vol. 7, art. 209. DOI : <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00755-6> (consulté en mai 2025).

IVERSON R. M. (1997). *The physics of debris flows*. *Reviews of Geophysics*, vol. 35, n° 3, p. 245-296. DOI : <https://doi.org/10.1029/97rg00426> (consulté en mai 2025).

BLANC A., MISSET C., MAINIERI R., LLAMAS B. (2024, décembre). *Rapport de rétro-analyse de l'événement de la Bérarde*. ONF-RTM. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/%2B/246e::rapport-de-retro-analyse-de-levenement-de-la-berarde.html> (consulté en mai 2025).

LAJOURNADE C., LALANNE-BERDOUTICQ G. (1997). « *Les crues torrentielles dans les Pyrénées occidentales : contexte pluviométrique, géomorphologique et anthropique des événements extrêmes* », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 3, n° 2, p. 111-120. DOI : <https://doi.org/10.3406/morfo.1997.908> (consulté en mai 2025).

ONF-RTM (s.d.). *Intervention du service RTM de l'ONF après les crues dans les Pyrénées*. Office national des forêts – Restauration des terrains en montagne. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/raconte-moi-la-foret/comprendre-la-foret/restauration-des-terrains-en-montagne/%2B/23ba::importants-degats-causes-par-les-pluies-dans-les-pyrenees.html> (consulté en mai 2025).

Taylor, C., Robinson, T.R., Dunning, S. *et al.* Glacial lake outburst floods threaten millions

globally. *Nat Commun* 14, 487 (2023). <https://www.nature.com/articles/s41467-023-36033-x#citeas>

Demolis, Roudnitska, Geay, Inventaire des lacs glaciaires – analyse de la sensibilité des lacs à engendrer des crues torrentielles liées à des débâcles, 2023 (ONF-RTM).

Résumé

Ce rapport de stage de Master II porte sur l'analyse des risques glaciaires et périglaciaires à l'échelle des Pyrénées françaises. Il a été réalisé au sein du service de la Restauration des Terrains de Montagne (RTM), à l'agence de Tarbes, qui couvre les départements des Pyrénées-Atlantiques et des Hautes-Pyrénées. Commandée par le Ministère de la Transition écologique dans le cadre du Plan d'Action de Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG), l'étude dresse un état des lieux de la situation actuelle des glaciers blancs pyrénéens et propose une typologie des glaciers blancs instables spécifique à ce massif. Pour conduire l'analyse de risque, des critères ont été établis afin d'identifier les zones sources, c'est-à-dire des secteurs instables susceptibles de générer un aléa. Parmi les phénomènes étudiés figurent la chute de séracs, le glissement basal de glace et les vidanges de poches d'eau sous-glaciaire. Un niveau de risque a été attribué pour chaque bassin versant regroupant des glaciers blancs. Ce travail vise à apporter des connaissances sur les dynamiques glaciaires pyrénéennes et à contribuer à la prévention des risques dans un contexte de changement climatique.

Mots-clés : Glacier blanc, risque, changement climatique, zone source, Pyrénées

This Master II internship report focuses on the analysis of glacial and periglacial risks across the French Pyrenees. It was carried out within the Mountain Terrain Restoration (RTM), at the Tarbes agency, which covers the Pyrénées-Atlantiques and Hautes-Pyrénées departments. Commissioned by the Ministry of Ecological Transition as part of the Action Plan for the Prevention of Risks of Glacial and Periglacial Origin (PAPROG), the study provides an overview of the current situation of Pyrenean white glaciers and proposes a typology of unstable white glaciers specific to this massif. To conduct the risk analysis, a set of criteria were established to identify source areas, unstable sectors likely to generate a hazard. The phenomena investigated include serac falls, basal ice sliding, and the sudden drainage of subglacial water pockets. Each watershed containing clean-ice glaciers was assigned a hazard level. This work aims to provide knowledge on Pyrenean glacial dynamics and to contribute to risk prevention in the context of climate change.

Keywords: White glacier, hazard, climate change, source area, Pyrenees