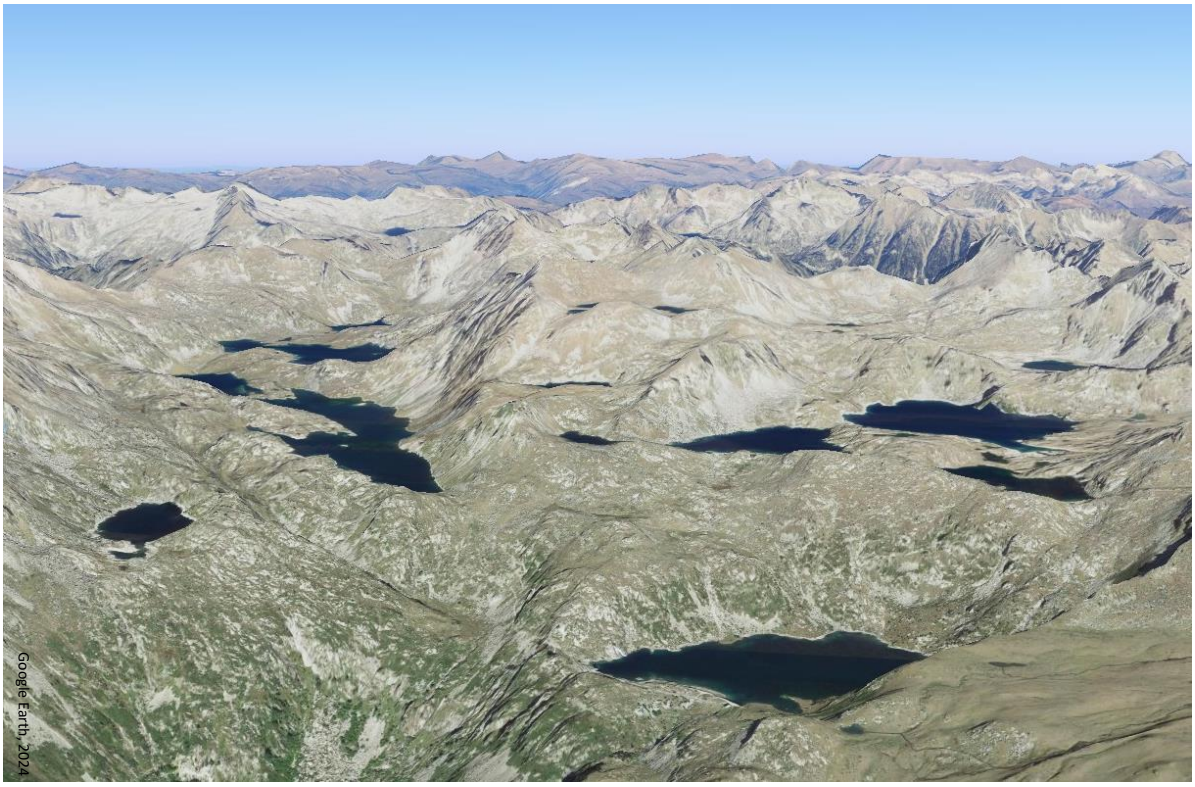
Inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées françaises et estimation de leur risque de vidange



Livia LAURENT

Master 1 Gestion et Évaluation des Environnements Montagnards

2024

Maître de stage : Nadia Hassine

Enseignant référent : Emmanuel Chapron

« *Combien y a-t-il de lacs dans les Pyrénées ? Qui les a tous vus ?* » H. Russell (1878)

Résumé

Le changement climatique exerce une pression croissante sur les écosystèmes montagnards, rendant les phénomènes naturels plus imprévisibles et menaçants. A cela, s'ajoute le retrait des glaciers et la fonte du pergélisol qui peuvent créer de nouvelles formations comme des lacs glaciaires mais aussi être synonyme d'instabilités et de risques. Les Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP) - ayant pour zone source des zones couvertes de glace, récemment déglacées, ou les abords directs de ces zones influencées par la présence de glaciers ou de pergélisol - sont de plus en plus présents dans nos montagnes. Cependant, ils sont encore aujourd'hui trop peu connus et nécessitent d'être pris en compte dans les différents programmes de prévention des risques. C'est dans cette optique que le PAPROG (Plan d'Actions pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire) a été lancé en 2019. Le but est d'améliorer les connaissances des ROGP pour ensuite déterminer des actions à effectuer pour la prévention de ces derniers.

C'est dans le cadre de ce plan que ce stage s'inscrit. La mission confiée par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) des Pyrénées est de réaliser l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées françaises afin de contribuer à la connaissance des formes glaciaires et périglaciaires pour ensuite estimer le risque de vidange de tous ces lacs. Cet inventaire permet d'avoir une base informatique pour tous les agents du RTM.

La conclusion est qu'il y a un risque de vidange de lacs glaciaires dans les Pyrénées qui est faible à négligeable, tous ont des barrages stables ou des petits volumes et ils ne se situent pas à proximité d'enjeux (infrastructures ou populations). La surveillance des lacs glaciaires n'est donc pas nécessaire en l'état, bien qu'il soit essentiel de réévaluer ce risque régulièrement.

Mots clés : Pyrénées – lacs glaciaires – risque de vidange – inventaire – changement climatique

Summary

Climate change increases the pressure on mountain ecosystems, making natural phenomena more unpredictable and threatening. Alongside this, the retreat of glaciers and the melting of permafrost are leading to the formation of new features such as glacial lakes, which also bring instability and risks. Glacial and periglacial hazards —which occurs in areas covered by ice, recently deglaciated zones, or the immediate surroundings impacted by glaciers or permafrost—are becoming more prevalent in our mountains. However, these hazards remain insufficiently understood and need to be integrated into various risk prevention programs. In response to this need, the PAPROG (Action Plan for the Prevention of Glacial and Periglacial Hazards) was launched in 2019. The aim is to improve the understanding of glacial and periglacial hazards in order to develop appropriate prevention measures.

This internship is part of that plan. The mission assigned by the *Restauration des Terrain en Montagne* (RTM) of the Pyrennees, responsible of risk prevention in the French mountains, is to conduct an inventory of the glacial lakes in the French Pyrenees to contribute to the knowledge of glacial and periglacial forms and subsequently estimate the risk of Glacial Lakes Outburt Floods (GLOF) of all these lakes. This inventory provides a database for all RTM agents.

It is possible to conclude that the risk of GLOF in the Pyrenees is low to nonexistent, as all the lakes have stable dams or small volumes and are not located near significant issues (infrastructures or populations). Therefore, monitoring of glacial lakes is currently not necessary, although it is crucial to regularly evaluate this risk.

Keywords : Pyrenees – glacial lakes – GLOF – inventory – climate change

Remerciements

Avant de commencer ce mémoire, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce stage ainsi qu'à l'écriture de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie ma tutrice, Nadia, pour son accompagnement, son investissement et son intérêt pour un sujet qui n'est au départ pas sa spécialité. Merci aussi d'avoir partagé avec moi ses connaissances sur le risque avalanche.

Je voudrais également remercier Emmanuel Chapron, mon tuteur de stage, d'avoir partagé avec moi son œil d'expert et sa passion pour les lacs.

Je remercie chaleureusement tout le service du RTM 64-65, Alain, Claire, Chloé, Laurent, Marine, Nadia, Viviane et Xavier, de m'avoir si bien accueillie et d'avoir partagé avec moi leur quotidien. Merci de m'avoir permis de vous accompagner dans toutes ces sorties de terrain.

Merci à Laurent, pour le prêt de plusieurs livres sur le sujet et pour le partage de toutes les missions du RTM. Merci beaucoup Anouk, d'avoir partagé le bureau des stagiaires avec moi pendant ces trois mois. Merci d'avoir toujours été disponible pour discuter et pour son regard avisé sur tous les conseils demandés. Merci également à Chloé de m'avoir aidée sur les SIG et de s'être démenée à trouver les meilleures solutions à mes (petits) problèmes.

Je souhaite également remercier Antoine, qui depuis les Alpes m'a aidé à cadrer la méthodologie et a toujours été très réactif pour répondre à mes diverses interrogations.

Merci à mes parents qui font toujours preuve d'un grand intérêt pour mes travaux. Merci d'être présents et de me soutenir au quotidien. Merci infiniment à Célian de me soutenir sans limites et de partager la vie avec moi. Merci aussi à Zoé et Lucy d'avoir relu ce mémoire avec attention et merci pour votre joie.

Sommaire

Liste des sigles 7

Introduction 8

Partie 1 : Contexte et missions du stage 10

1.1. L'histoire de la Restauration des Terrains en Montagne 10

1.2. Le service RTM aujourd'hui 14

1.3. Un programme spécial pour les risques émergents 16

1.4. Les missions et l'organisation du stage 18

Partie 2 : Comprendre les phénomènes liés aux lacs glaciaires dans le contexte de changement climatique 20

2.1. Le changement climatique en montagne 20

2.2. Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire 24

2.3. Lacs glaciaires et risques liés 26

2.4. Les études lacustres dans les Pyrénées françaises 33

Partie 3 : Identifier les lacs glaciaires des Pyrénées françaises 36

3.1. Méthodologie 36

3.2. Résultats de l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées 46

3.3. Comparaison avec l'inventaire réalisé dans les Alpes 49

Partie 4 : Estimer le risque de vidange dans les Pyrénées françaises 52

4.1. Méthodologie 52

4.2. Estimation du risque de vidange dans les Pyrénées françaises 54

Partie 5 : Discussion et retour d'expérience 58

5.1. Discussion 58

5.2. Retour d'expérience 62

Conclusion 64

Bibliographie 65

Annexes 70

Liste des illustrations 85

Liste des annexes 88

Table des matières 89

Résumé 92

Liste des sigles

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques Naturels

EBR : Étude de Bassin de Risque

GES : Gaz à Effet de Serre

GLOF : Glacial Lake Outburst Floods

IGN : Institut Géographique National

LiDAR : Light Detection And Ranging

MIG : Mission d'Intérêt Général

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ONF : Office National des Forêts

PAG : Petit Age Glaciaire

PAPROG : Plan National d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire

ROGP : Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire

RTM : Restauration des Terrains en Montagne

SAR : Radar à synthèse d'ouverture

SIG : Système d'Information Géographique

Introduction

Une vallée peut être ravagée par une lave torrentielle dont l'origine provient de la vidange brutale d'un lac glaciaire en altitude. Un refuge peut se retrouver emporté par les eaux d'un lac sous glaciaire. Ces phénomènes, entraînés par la pente, concernent directement la sécurité des populations de montagne. Le changement climatique peut provoquer des modifications quant à leur fréquence et leur intensité. Dans les montagnes, partout à travers le monde, ces risques existent et ne doivent pas être négligés. Les Alpes, avec leurs nombreux glaciers, sont fréquemment touchées. Mais qu'en est-il des Pyrénées ? Comprendre et anticiper ce danger est essentiel pour assurer la protection des populations de montagne exposées. Ce travail s'inscrit dans cette démarche, en se questionnant sur la présence d'un risque de vidange dans les Pyrénées françaises.

Ce mémoire s'appuie sur un stage de trois mois réalisé dans le service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Office National des Forêts des Pyrénées. C'est un service qui s'occupe de la prévention des risques naturels en montagne par la mise en place d'outils de protection mais aussi en apportant un œil d'expert sur des évènements. La mission première de ce stage est de réaliser l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées françaises. Il s'inscrit dans le cadre d'un plan dont le but est d'améliorer la connaissance des risques d'origine glaciaire et périglaciaire pour pouvoir, par la suite, mettre les actions les plus appropriées en place. Ainsi, en plus de la mission principale, ce stage apporte une réflexion et une estimation du risque de vidange dans les Pyrénées françaises.

Ce mémoire s'attache à répondre à la problématique suivante : **est-il pertinent de surveiller les lacs glaciaires des Pyrénées françaises par rapport au risque de vidange ?** Afin de répondre à cette problématique, il est tout d'abord nécessaire de connaître le sujet en consultant la bibliographie existante et l'état des recherches effectuées. Puis, il faut inventorier tous les lacs pour avoir une base de travail et dans un second temps pouvoir estimer le risque de vidange dans les Pyrénées françaises.

Ce travail est divisé en cinq parties. La première partie présente le contexte ainsi que les missions du stage. Ensuite, la deuxième partie présente un état de l'art sur tous les sujets liés à ce stage. La troisième expose la méthodologie et les résultats de la réalisation de l'inventaire. La quatrième partie propose une estimation du risque de vidange et enfin, la cinquième partie fournit des éléments de discussion ainsi qu'un bilan personnel.

Partie 1 : Contexte et missions du stage

1.1. L'histoire de la Restauration des Terrains en Montagne

Le couvert forestier en France au XVII^{ème} siècle est marqué par une politique de défrichement. Le besoin de la ressource en bois est très fort pour le fonctionnement des manufactures et de la marine. A cela s'ajoute l'importance des espaces défrichés pour le pâturage, ces zones étant considérées comme une richesse. Puis, à la fin du siècle, l'attitude des citoyens et des politiques change progressivement avec pour but de mettre en place une forêt de protection.

Dans les années 1840, l'analyse de plusieurs catastrophes naturelles (glissements de terrain, crues et inondations) va convaincre les forestiers et les responsables politiques qu'il est nécessaire de limiter ces phénomènes, notamment en contrôlant l'érosion via des actions de boisement ou de reboisement. De plus, à cette période, la France est beaucoup touchée par des crues générales et localisées. Les fréquences de retour de ces crues sont très élevées et dépassent parfois la référence centennale. Ces catastrophes permettent de relancer le débat sur l'érosion des montagnes et sur la nécessité du reboisement. Cela permet aussi aux politiques de s'affirmer davantage face aux lobbies agropastoraux qui avaient mis en échec les projets de reboisement précédents. La photographie ci-dessous (*figure 1*) a été prise par les agents des Eaux et Forêts afin de montrer l'état d'un terrain marqué par l'érosion.

Figure 1 : Exemple d'un cas marqué par l'érosion avec le village de Guil au bord du gouffre, Hautes Alpes, s.d. (Brugnot et al., 2004, p.86).

Entre 1860 et 1882, plusieurs lois sont promulguées en faveur de l'élaboration et de la mise en place d'une politique de Restauration des Terrains en Montagne (RTM). La première, en faveur de la diminution de l'érosion fut votée en 1860 : loi de boisement, dont l'objectif était de reboiser 1,3 millions d'hectares. Elle a cependant été abrogée en 1876 d'une part car elle était trop coûteuse et d'autre part car il y a eu une prise de conscience sur le fait que le boisement n'est pas suffisant dans certains cas d'érosion extrêmes. Les projets de reboisement ont également rencontré la résistance des populations de montagne qui souhaitaient garder les paysages ouverts pour le pâturage. Ensuite, en 1864, la loi pour le « ré-engazonnement » des montagnes a été adoptée. Elle vise à la reconstitution du couvert végétal dans son ensemble, c'est-à-dire pas uniquement forestier. Cette loi permet d'être plus conciliant avec les éleveurs tout en montrant l'intérêt et l'utilité de la lutte contre l'érosion. Il y a à cette période de nombreux conflits entre forestiers, politiques, éleveurs et populations locales. Ces deux lois permettent de s'intéresser au sujet et de fournir une base à la politique RTM.

La loi de « Restauration des Terrains de Montagne » (ou loi RTM) de 1882 marque un tournant. C'est avec cette loi que des agents RTM sont nommés. Cette loi est une évolution incontestable par rapport au concept de boisement. De plus, elle prend en compte la présence d'une population de montagne et s'intéresse aux phénomènes qui s'y déroulent dans un champ plus large. Cette loi institue les « périmètres » RTM, des zones expropriables par l'Etat ainsi que les « séries domaniales RTM », des zones réellement expropriées. Ces zones sont des lieux où des ouvrages ou du reboisement vont être réalisés pour limiter les risques naturels et l'érosion.

Ainsi, l'Âge d'Or de la politique RTM commence. Elle s'étend de 1882 à 1914. C'est durant cette période que vont être mis en place la plupart des ouvrages. Ils sont coûteux et nécessitent beaucoup de main d'œuvre. C'est plus de 1000 torrents, 100 couloirs d'avalanches et 100 glissements de terrains qui sont traités. La photographie ci-dessous (*figure 2*) montre l'exemple d'ouvrages mis en place pour limiter le risque torrentiel. Vient ensuite l'Âge de la Gestion, entre 1914 et 1940, la politique connaît un essoufflement dû à la guerre et il faut entretenir les ouvrages existants. Les moyens financiers sont donc consacrés à cela et peu de nouveaux périmètres sont acquis et traités. L'entretien est un travail considérable et coûteux. Après la seconde guerre mondiale, les bilans sont dressés notamment grâce à des photographies avant/après comme le montre la figure 3.

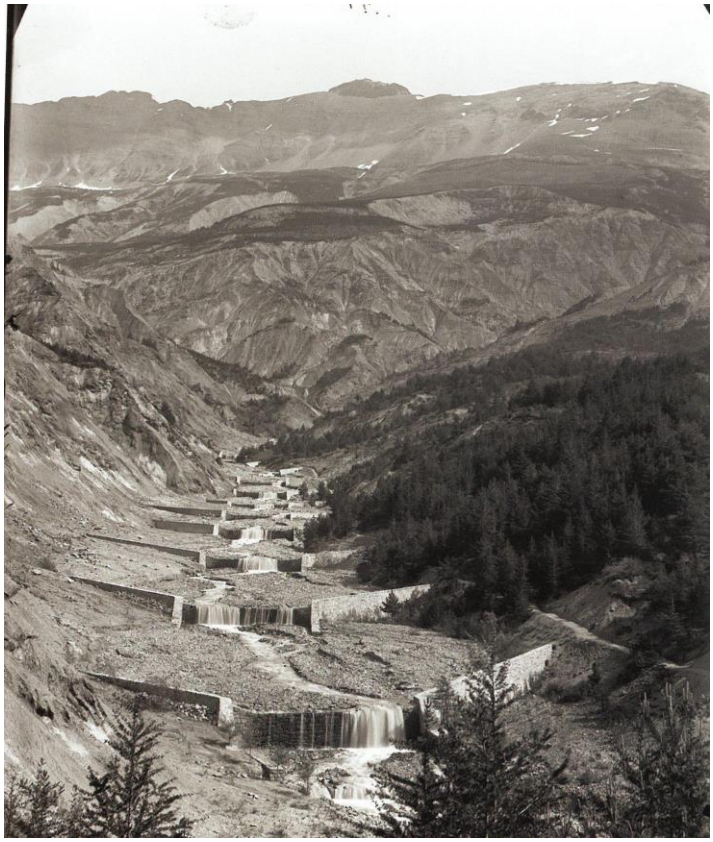


Figure 2 : Exemple d'ouvrages mis en place pour corriger le risque torrentiel à Saint-Pons dans les Alpes de Haute-Provence, 1904. (Brugnot et al., 2004, p.102).

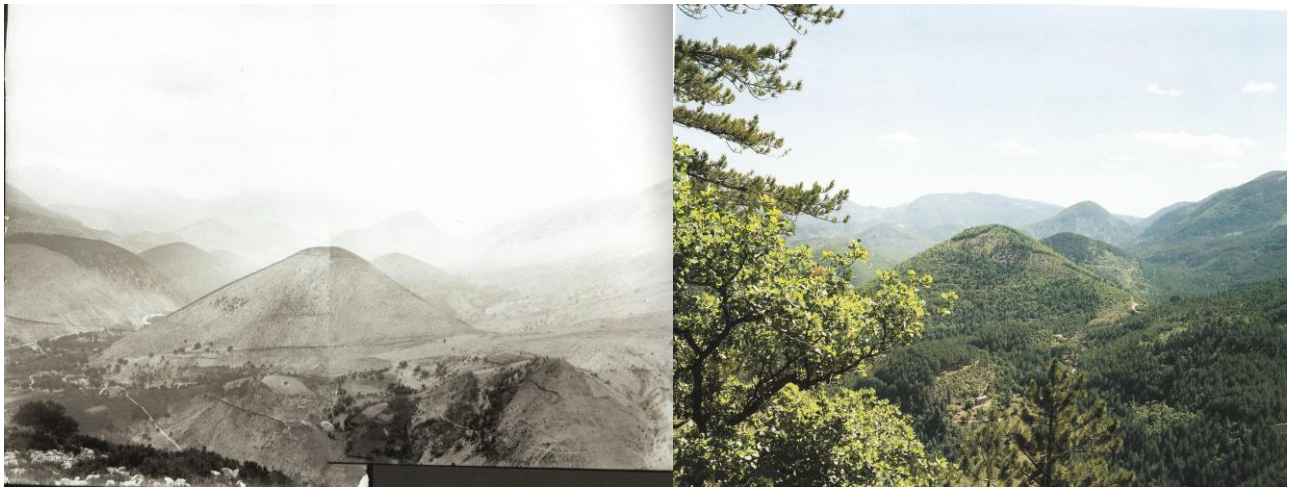


Figure 3 : Effets du reboisement dans la vallée du Toulourenc (Vaucluse) entre 1889 et 2004. (Brugnot et al., 2004, p. 154-155).

La politique RTM connaît un temps plus calme entre 1940 et 1980. L'État octroie moins de moyens, les ouvriers refusent de travailler dans des conditions si difficiles (relief, pente, accès, climat, etc.). De plus, la montagne devient très touristique et les visions changent, ce n'est plus la protection des risques naturels qui prime mais plutôt l'attractivité économique.

Mais les tristement célèbres accidents de Passy (glissement de terrain ; 71 morts) et de Val d'Isère (avalanche ; 46 morts et 37 blessés) en 1970 relancent la question de la sécurité des personnes et des biens vis à vis des risques naturels. C'est à partir de 1980, que le service RTM est refondé en lien avec ces accidents (RTM, 2022). Le service est rattaché à l'Office National des Forêts (ONF) et il est présent dans les départements qui présentent *« une érosion active et à haut risque »* (Brugnot et al., 2004, p. 21).

1.2. Le service RTM aujourd'hui

Aujourd'hui, le service RTM est toujours rattaché à l'ONF. A titre informatif, l'ONF est un organisme public à caractère commercial. Il a pour objectif la gestion, la protection et la valorisation des forêts publiques, c'est-à-dire domaniales, départementales, communales et sectionales. Pour ce faire, il a quatre grandes missions : la gestion de la forêt, la protection des espaces forestiers, l'accueil et la sensibilisation du public et la valorisation de la ressource en bois via la vente. C'est l'ONF qui anime de manière importante la filière bois en France. Ces missions sont mises en place de sorte à gérer durablement les forêts et relever les différents défis du siècle actuel pour préserver et adapter les espaces boisés au changement climatique (ONF, s.d.).

Le RTM est réparti en trois agences (Alpes du Nord, Alpes du Sud et Pyrénées) qui sont chacune déclinées en trois services départementaux ou bi-départementaux. Le RTM est ainsi présent dans onze départements de montagne dans les Alpes et les Pyrénées pour un effectif total d'une centaine d'agents. Le budget annuel est de 10 millions d'euros.

Le service RTM a plusieurs missions. Tout d'abord, il a des Missions d'Intérêt Général (MIG) confiées par l'État. La première MIG est financée par le ministère en charge des forêts (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire en 2024). Comme le montre le schéma ci-dessous (*figure 4*), cette MIG occupe la moitié du calendrier annuel du RTM (*MIG DGPE*). Les objectifs sont d'assurer la gestion des dispositifs de protection dans les séries domaniales RTM, d'établir et de mettre en œuvre un programme annuel de travaux et de maintenir et conforter les compétences techniques des métiers de la RTM. De manière

concrète, cela se traduit entre autres par la mise en place d'ouvrages et l'entretien des ouvrages existants ou bien par la réalisation d'Études de Bassin de Risques (EBR). Chaque série domaniale doit avoir un EBR qui est un document permettant d'estimer le niveau de risque de la zone, de faire l'état des ouvrages (si existants) et de proposer des perspectives.

Ensuite, la seconde MIG est financée par le ministère en charge des risques naturels (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires en 2024). Elle représente 37% de l'activité du RTM (*MIG DGPR - Appui aux territoires et MIG DGPR - Autres actions).* C'est la Direction Générale de la Prévention des Risques Naturels (DGPR) qui confie cette mission à l'ONF-RTM. Son objectif est d'améliorer la prévention des risques naturels en observant les phénomènes naturels pour améliorer la connaissance du risque. Cela en fournissant un appui technique et méthodologique aux services de l'Etat et des collectivités territoriales, notamment pour la prise en compte et la gestion des risques naturels dans l'aménagement.

Enfin, le RTM a des missions complémentaires. Ces dernières peuvent être confiées par l'Etat au niveau local, c'est l'équivalent des MIG décrites plus haut mais pour une zone ou un phénomène précis, par exemple, la surveillance des risques menaçant une route nationale. Mais elles peuvent également s'inscrire dans des prestations relevant du régime concurrentiel c'est-à-dire des maîtrises d'œuvre, des études ou des expertises pour le compte d'une collectivité territoriale (RTM, 2022).

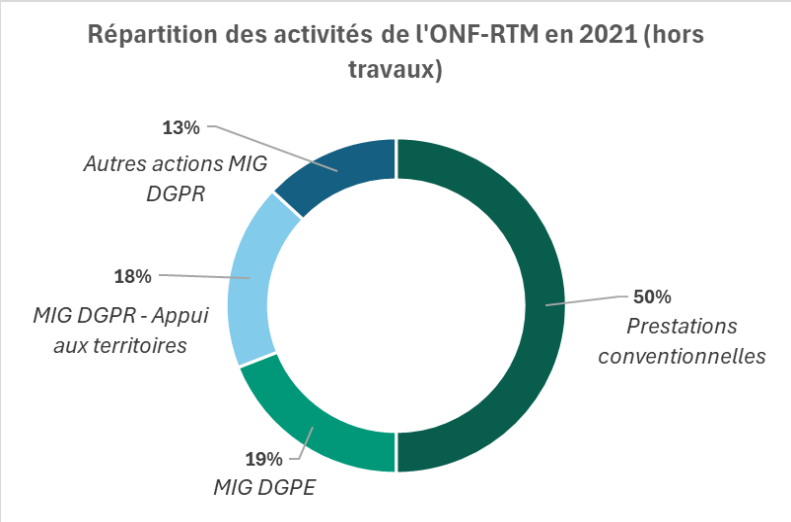


Figure 4 : Répartition des activités du RTM en 2021. (L. Laurent, 2024 à partir de RTM, 2022).

L'agence RTM des Pyrénées, dans laquelle ce stage a été effectué, couvre les six départements pyrénéens (Ariège (09), Aude (11), Haute-Garonne (31), Hautes-Pyrénées (65), Pyrénées-Atlantiques (64) et Pyrénées-Orientales (66)), répartis en trois services bi-départementaux : Perpignan (11 ; 66), Saint-Gaudens (09 ; 31) et Tarbes (64 ; 65). Ce stage s'est déroulé dans les locaux de l'ONF au sein du service RTM de Tarbes. L'agence compte environ 25 personnes (2022) et le service de Tarbes compte 9 agents (2023) aux profils divers (RTM Pyrénées, 2022 ; RTM Pyrénées, 2023).

1.3. Un programme spécial pour les risques émergents

Le contexte actuel du changement climatique et de la hausse des températures qui en résulte, provoque dans les montagnes la fonte rapide des zones englacées, que ce soit la glace des glaciers, où le phénomène est particulièrement visible, ou bien la glace contenue dans le sol ou dans les massifs rocheux, appelée pergélisol. Cette fonte entraîne l'émergence de phénomènes gravitaires qui peuvent être dangereux pour les zones situées en aval. Il s'agit par exemple de chutes de séracs ou encore de vidanges brutales de poches d'eau provoquant une crue torrentielle. Ces risques qualifiés de « nouveaux » ne sont pas véritablement pris en compte dans la prévention des risques naturels. C'est dans ce contexte que la DGPR, sous l'égide du ministère de l'Écologie, a lancé en 2019, le Plan National d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG).

Le premier objectif de ce plan est d'améliorer la compréhension des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP). Dans la continuité, le but est d'estimer les sensibilités des territoires aux ROGP pour fixer un cadre et prioriser les actions à mener si nécessaire. Aujourd'hui, ce plan n'est pas encore validé définitivement mais une action dédiée à la caractérisation du risque et à l'identification des zones à risques a été lancée. Le but est d'avoir une vision globale de ces risques particuliers pour développer une doctrine nationale concernant leur prévention. La première étape est donc de disposer d'un inventaire complet des systèmes glaciaires et périglaciaires concernés, afin de pouvoir ensuite évaluer le niveau de sensibilité aux risques glaciaires des sites à enjeux. Le tableau suivant (*tableau 1*) présente les quatre formes glaciaires ou périglaciaires qui ont été identifiées comme pouvant générer du risque et potentiellement toucher des enjeux humains ou matériels (Serrano, 2019).

Tableau 1 : Les quatre formes glaciaires ou périglaciaires, les risques associés et l'état d'avancée de leur identification en France (L. Laurent, 2024 d'après Serrano, 2019).

	Définition	**Phénomènes générés**	**État de l'inventaire dans les Alpes**	**État de l'inventaire dans les Pyrénées**
Glaciers blancs	Stock d'eau solide permanent à l'échelle humaine	Chutes de séracs et avalanches	Fait	Fait
Glaciers rocheux	Ensemble de débris rocheux assemblés par de la glace, se déplaçant lentement vers l'aval	Chutes de blocs et laves torrentielles	Fait	Fait
Parois à permafrost	Paroi dont la structure est caractérisée par une température négative pendant au moins deux années consécutives	Chutes de blocs et effondrements	Fait	Objectif de l'année 2024 pour l'agence RTM des Pyrénées
Lacs glaciaires	Lac situé dans un surcreusement suite au retrait progressif d'un glacier	Laves torrentielles et crues torrentielles	Fait	**Objectif de ce stage**

1.4. Les missions et l'organisation du stage

Ce stage s'inscrit donc dans le cadre du PAPROG afin de contribuer à la série d'inventaires nécessaires à une meilleure connaissance des risques glaciaires et périglaciaires. La commande du service RTM dans lequel ce stage a été effectué était la suivante : **réaliser l'inventaire des lacs glaciaires de la chaîne des Pyrénées françaises**. C'est un travail qui est réalisé grâce à la télédétection et traité dans un Système d'Information Géographique (SIG). L'inventaire est nécessaire pour ensuite caractériser le risque de vidange et éventuellement prendre des mesures de prévention. Dans le temps imparti, j'ai essayé d'estimer ce risque afin de fournir une base à de futurs travaux. Le mémoire s'attache à répondre à la problématique suivante : **est-il pertinent de surveiller les lacs glaciaires des Pyrénées françaises par rapport au risque de vidange ?**

Ce stage a duré trois mois, du 8 avril au 28 juin 2024. Il s'est déroulé en plusieurs étapes, comme illustré sur la frise chronologique ci-dessous (*figure 5*). Tout d'abord, il y a eu un temps qui a permis de mieux connaître le sujet via des recherches bibliographiques ainsi que la préparation d'un cadre méthodologique pour la réalisation de l'inventaire. Ensuite, l'inventaire a été réalisé, un mois a été nécessaire pour cette mission principale en suivant ce cadre méthodologique. Les missions ont ensuite été réparties dans le temps, il a fallu compléter la table attributaire, analyser les résultats et réaliser une note de synthèse et une présentation orale pour partager ce travail. En parallèle, des recherches ont été menées pour approfondir le sujet. Toutes ces missions seront expliquées plus en détail dans les parties suivantes.

Il est aussi important de mentionner le nombre de sorties de terrains auxquelles j'ai participé avec le service RTM 64-65. Environ une sortie par semaine m'était proposée, sur divers sujets comme la visite d'ouvrages, le suivi d'un chantier ou l'apport d'expertise après un évènement. Cela m'a permis de connaître toutes les missions du service RTM et d'observer des zones sujettes aux risques ainsi que les ouvrages mis en place pour les réduire. Enfin, la participation à un atelier de trois jours sur le calcul du risque était très enrichissante pour mettre en perspective les travaux réalisés dans le cadre du stage.

Figure 5 : Répartition des tâches réalisées pendant le stage (L. Laurent, 2024)

Partie 2 : Comprendre les phénomènes liés aux lacs glaciaires dans le contexte de changement climatique

Cette seconde partie fournit un état de l'art concernant les notions abordées pendant ce stage. La première sous-partie présente le changement climatique en montagne de manière générale. La deuxième sous-partie fournit des éléments sur les risques naturels dans ce milieu et en particulier les ROGP. Ensuite, tous les sujets relatifs aux lacs glaciaires et les risques liés sont abordés. Enfin, le périmètre d'étude étant les Pyrénées françaises, les recherches limnologiques et les inventaires des lacs déjà réalisés dans cette zone sont présentés.

2.1. Le changement climatique en montagne

2.1.1. Le changement climatique est-il plus important en montagne ?

La montagne est un milieu particulier où la topographie et le climat entraînent des modifications de températures, de précipitations et de biodiversité. Elle a des caractéristiques qui lui sont propres (pente, climat) qui vont fortement influencer son organisation (peuplement, cultures). C'est un milieu rude qui était autrefois redouté mais qui a ensuite gagné en popularité pour les ressources qu'elle possède. Des ressources aussi bien naturelles comme le bois que créées par l'homme dont l'exemple le plus flagrant est le tourisme hivernal. Aujourd'hui la montagne est un lieu de vie et de loisirs essentiel à l'homme (Francou & Mélières, 2021).

Le terme de changement climatique n'est plus inconnu ni à prouver et l'activité humaine a aujourd'hui *« un tel impact qu'elle modifie l'ensemble de la planète dans ses différents compartiments physiques et biologiques »* (Francou & Mélières, 2021, p.46). La Terre connaît de nombreux changements dont un réchauffement global de ses températures lié à la libération de gaz à effet de serre (GES) provenant des activités humaines. La température globale à la surface de la Terre a augmenté de plus d'un degré Celsius entre 1880

et 2020. Ce réchauffement n'est pas uniforme sur l'ensemble de la planète, il est deux fois plus fort sur les continents que dans les océans et il est aussi plus fort dans les zones polaires. L'évolution de la température en France est également hétérogène : si à la fin du siècle dernier la partie sud se réchauffait plus, aujourd'hui c'est la France dite « continentale » qui subit les hausses de températures les plus importantes. Il est souvent dit que la montagne subit plus le changement climatique et que c'est une sentinelle des changements à venir. Il est difficile d'affirmer cela de manière certaine et globale car c'est un milieu accidenté où la topographie et le relief créent une diversité de zones différentes. De plus, c'est un territoire où les mesures sont difficiles à réaliser, il y a peu de stations météorologiques au-dessus de l'habitat permanent et quand il y en a elles sont souvent récentes (manque de données historiques) ou peu fiables (conditions météorologiques difficiles). Malgré ces incertitudes et les grandes variabilités suivant les massifs, plusieurs éléments peuvent expliquer que le réchauffement climatique et les effets du changement climatique soient particulièrement marqué en montagne. Tout d'abord, le déneigement des surfaces révèle des espaces où l'albédo (de 0 à 1, énergie réfléchie par une surface) va être plus faible. Ces surfaces dont la couleur va être plus foncée vont davantage absorber les rayons solaires et donc être plus chauds contrairement à des espaces enneigés de couleur blanche où l'albédo est fort (l'énergie solaire réfléchie est plus importante). De plus, l'augmentation de l'humidité dans l'atmosphère, due à la fonte des neiges et à la présence d'un air plus chaud qui peut contenir plus d'humidité, renforce l'effet de serre. Dans certains cas, les régions basses, les vallées et les plaines sont recouvertes lors des périodes chaudes d'un voile de pollution qui a un effet refroidissant puisqu'il filtre l'énergie solaire. Les hautes altitudes ne bénéficient pas de ce voile.

Dans les Alpes, un réchauffement généralisé de 2°C a été mesuré entre la fin du XIX^{ème} siècle et le début du XXI^{ème} siècle. Ce réchauffement est encore plus important entre 1 500 mètres et 2 000 mètres d'altitude puisque c'est là que la neige a le plus reculé ces dernières années laissant des espaces à l'albédo faible. A ce réchauffement s'ajoute une diminution des précipitations sur l'année, particulièrement visible dans les Pyrénées et dans les Alpes du Sud. Les averses sont cependant plus intenses car la pression de vapeur saturante c'est-à-dire la quantité maximale que peut contenir un volume d'air augmente du fait de la température

(Francou & Mélières, 2021). Ces changements ont des effets très visibles sur les milieux de montagne.

2.1.2. Comment se manifeste le changement climatique en montagne ?

Le changement climatique et la hausse des températures ont de nombreux effets sur les milieux montagnards : le recul des glaciers, la diminution de l'enneigement, la fonte du pergélisol, les variations de débits et les changements au niveau de la biodiversité. Cette partie abordera uniquement les effets qui ont un lien avec le thème de ce stage soit les lacs glaciaires et leur risque de vidange.

Le point le plus important et le plus souvent mentionné car très visible concerne le recul des glaciers. Pour rappel, un glacier est une masse de neige permanente à l'échelle humaine « *qui se déforme avec la pente sous l'effet de son propre poids* » (Francou & Mélières, 2021, p.72). Il est composé d'une zone d'accumulation où il tombe plus de neige qu'il n'en fond et d'une zone d'ablation où au contraire le glacier perd de la masse. Ces deux zones sont séparées par la ligne d'équilibre. Quand le bilan de masse est négatif (plus d'ablation que d'accumulation, réalisé chaque année) le glacier recule. Il faut préciser que la taille et la pente d'un glacier jouent sur sa vitesse de recul ou sur son avancée (Francou & Mélières, 2021). Selon une étude de M. Zemp et al., basée sur l'observation de 25 000 glaciers dans le monde, tous, hormis quelques exceptions, perdent de plus en plus de masse depuis quelques décennies. Ces pertes de masse s'accélèrent partout depuis l'an 2000 (Hugonnet et al., 2021). De manière naturelle, il y a des années où le bilan de masse est positif car le changement climatique n'est pas linéaire. Les années de fortes précipitations sous forme de neige peuvent aider à diminuer l'ablation. Cependant, la tendance est à des étés plus chauds ainsi qu'à un déneigement précoce des surfaces. Cela peut parfois entraîner de la fonte jour et nuit (Francou & Mélières, 2021).

Le recul des glaciers est au cœur de problématiques sociales et environnementales puisqu'ils sont un réservoir naturel d'eau douce : leur disparition rapide pourrait entraîner des pénuries d'eau (IPCC, 2019 ; Cazenave et al., 2015). Leur disparition participe également à l'élévation du niveau des mers et des océans (Kulp et al., 2019). Mais ce recul entraîne aussi

des conséquences sur les lacs glaciaires notamment par la modification des débits d'eau. Ce sujet sera abordé dans la partie suivante.

D'autres effets du changement climatique en montagne doivent également être mentionnés, particulièrement la fonte du pergélisol. Il s'agit d'espaces où la température est inférieure à 0°C pendant au minimum deux années consécutives (Mercier & Cossart, 2021). Les glaciers rocheux peuvent être considérés comme du pergélisol puisqu'il s'agit d'un mélange de glace et de roches. La fonte du pergélisol crée des sols ou des parois instables qui menacent de s'écrouler car elles ne sont plus maintenues par la glace. Si l'écroulement d'une paroi rocheuse est quasiment impossible à prévoir, certains indices permettent de présager l'effondrement d'un glacier rocheux comme l'accélération de sa vitesse dans les années précédentes. Dans le cas des Pyrénées, même si l'inventaire des parois à permafrost n'a pas encore été réalisé, il s'agit d'un pergélisol dit « tempéré » dont la température se situe entre 0 et -2°C (Francou et Mélières, 2021).

La chaîne des Pyrénées dans son ensemble est impactée par le changement climatique, notamment au niveau du recul de ses glaciers. Même si les Pyrénées n'ont pas connu de mesures aussi intensives que dans les Alpes, les relevés topographiques ponctuels et les cartographies réalisées au milieu du XX^{ème} siècle par les agents des Eaux et Forêts *(aujourd'hui ONF)* ont permis d'apporter quelques conclusions (René, 2013). Depuis la fin du Petit Age Glaciaire (PAG, de 1300 à 1850, faible refroidissement du climat sur Terre) la surface englacée est passée de 23 km² à seulement 2,3 km² en 2020. La chaîne compte aujourd'hui 23 glaciers d'une surface supérieure à 2 hectares dont 15 véritables. L'association *Moraine,* qui se charge de l'étude des glaciers dans les Pyrénées, a classé cette forme glaciaire en deux catégories : les glaciers véritables et les glaciers résiduels. Tous deux sont permanents à l'échelle humaine. Cependant, le premier possède la présence d'éléments caractéristiques d'un écoulement glaciaire comme des crevasses tandis que le deuxième en est dépourvu. La disparition totale des glaciers dans les Pyrénées est prévue pour 2050 selon l'Association *Moraine* (s.d.). Il est cependant important de rappeler que le changement climatique est l'addition d'éléments anthropiques mais aussi naturels. P. René affirme que plusieurs glaciers étaient condamnés au sortir du PAG même sans l'influence humaine du fait du réchauffement naturel du climat ainsi que de leur petite taille et épaisseur. Les glaciers pyrénéens se trouvent

à une latitude, des altitudes et un climat régional qui font qu'ils sont à la limite de leurs conditions d'existence (René, 2013).

La montagne est connue pour être dangereuse, elle a longtemps été crainte car c'est un milieu où des événements mystérieux et violents se produisent. Au-delà des mythes et des légendes, certains phénomènes sont explicables. Ce sont les risques naturels, très présents en montagne. Ils feront l'objet de la partie suivante.

2.2. Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire

2.2.1. Quelles sont les spécificités des risques naturels en montagne ?

Un risque est la combinaison d'un aléa et d'une vulnérabilité. L'aléa est une probabilité qu'un phénomène d'une intensité donnée se produise. La vulnérabilité correspond à la sensibilité des activités humaines (biens et personnes) à ce phénomène. La montagne connaît des risques naturels qui lui sont propre du fait de son caractère particulier (climat, pente) comme les avalanches ou les chutes de séracs. C'est un milieu qui connaît également les mêmes risques qu'en plaine mais ces derniers peuvent être aggravés par l'effet de la pente. Plusieurs facteurs sont importants dans la compréhension des risques en montagne : l'altitude, qui influe le régime thermique, la pente, qui détermine notamment les conditions de départ du phénomène, et le dénivelé, c'est-à-dire l'écart entre l'altitude maximale et minimale de la formation ou du phénomène. Ainsi, un phénomène peut s'amplifier (forte pente, entrainement d'autres matériaux) ou bien s'atténuer (réduction de la pente, obstacles). Certains phénomènes peuvent en entraîner d'autres, on parle alors de phénomènes « en cascade ». Par exemple, un éboulement qui tombe dans un lac et crée une vague peut provoquer la surverse de ce dernier et une crue en aval. Toutes les spécificités de la montagne rendent les risques naturels très dangereux car imprévisibles et pouvant acquérir très rapidement une forte puissance (Lacroix et al., 2022). Si les risques naturels ont toujours existé, le contexte actuel apporte des modifications dans leur fréquence et dans leur intensité.

2.2.2.De nouveaux risques émergent ?

Aujourd'hui, *« dans un contexte de changement climatique, les spécialistes anticipent une augmentation de l'occurrence et/ou de l'intensité de certains phénomènes voire l'émergence de nouveaux »* (Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, 2023). Les risques naturels en montagne préoccupent de plus en plus à tous les niveaux. Apparaît alors un nouveau terme employé dans l'administration française et au RTM notamment : les Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP). Les ROGP relèvent de la cryosphère (toutes zones où l'eau est présente à l'état solide). Il s'agit de risques naturels en montagne ayant pour zone source des zones couvertes de glace, englacées, récemment déglacées, ou les abords directs de ces zones influencées par la présence de glaciers ou de pergélisol. « Glaciaire » fait référence aux glaciers blancs et aux risques liés qui sont des chutes de séracs, des avalanches de glace ou de neige et des vidanges de lacs ou de poches d'eau. « Périglaciaire » correspond aux risques liés aux glaciers rocheux et aux parois à permafrost, soit des éboulements, écroulement et chutes de blocs mais aussi des vidanges ou des surverses de lacs glaciaires.

219 événements glaciaires ou périglaciaires ont été recensé en France entre 1640 et 2022 (inventaire non exhaustif avant 1850). Parmi eux, une faible part seulement représente un risque pour les vallées, peuplées et urbanisées. Les aléas glaciaires sont caractérisés par une « *basse fréquence et une grande intensité »* (Lacroix et al., 2022, p27). Les ROGP en France sont considérés comme limités mais loin d'être négligeables. Les pronostics quant à leur évolution sont unanimes dans la communauté de glaciologues, les aléas d'origine glaciaire et périglaciaire devraient augmenter du fait du changement climatique.

Cependant, à long terme, les ROGP seront voués à se réduire du fait de l'épuisement des volumes mobilisables et de la potentielle absence de zones instables liées à la cryosphère (Lacroix et al., 2022). C'est une supposition sur du très long terme notamment dans les massifs encore très englacés, mais les Pyrénées sont peut-être plus proches de ce terme. Parmi cette diversité de risques, se trouvent ceux liés aux lacs glaciaires, point central de ce stage. La partie suivante présente les caractéristiques d'un lac glaciaire et décrit les phénomènes qui y sont liés.

2.3. Lacs glaciaires et risques liés

2.3.1. Qu'est-ce qu'un lac glaciaire ?

La définition d'un lac varie suivant le domaine et l'utilisation. En écologie, un lac est une surface en eau d'au moins 0,5 ha ou 1 ha suivant les auteurs. Une taille minimale est nécessaire pour qu'un fonctionnement lacustre existe donc « *qu'il présente des caractéristiques physico-chimiques et biologiques variables au fil des saisons* » (Gréger & René, 2021 p. 11). L'altitude va aussi déterminer deux types de lacs. En dessous de 1 500 mètres il s'agit de lacs de plaine où les variations saisonnières sont moindres. Au-delà de cette altitude, ce sont des lacs de montagne.

Les lacs de montagne peuvent être divisés en quatre catégories suivant l'altitude et les spécificités du bassin versant, qui leur confèrent des caractéristiques particulières notamment leur période d'englacement ou la couleur des eaux. Ces points peuvent être très importants suivant les recherches mais ces distinctions n'ont pas été prises en compte dans le cadre de ce travail. La typologie des lacs de montagne est exposée dans un tableau en annexe 4.

Ces lacs de montagne se sont formés de différentes manières. La majorité sont d'origine glaciaire, résultant de l'action d'un glacier. Une petite partie des lacs ont une origine tectonique car les mouvements tectoniques créent des espaces creux qui seront par la suite occupés par de l'eau. Enfin, il existe des cas plus rares comme un mouvement de terrain qui crée un barrage, l'espace en amont de ce barrage se remplit d'eau ensuite ou bien l'usure de la roche par l'eau qui crée une dépression (Gréger & René, 2021). Notre travail s'intéresse uniquement aux lacs d'origine glaciaire : les lacs glaciaires.

Un lac glaciaire peut se former de deux façons comme le montre la figure 6. Le lac va occuper un surcreusement qui résulte de l'érosion d'un glacier (lac de verrou) ou bien un espace délimité par une moraine laissée par le glacier (lac de moraine). Ce qui empêche les eaux du lac de s'écouler s'appelle un barrage. La même figure en présente deux : verrou rocheux et moraine. Le troisième barrage existant est composé de glace (ou d'un mélange de roches et de glace). Les Pyrénées ne possèdent aucun lac avec ce dernier type de barrage. Les

barrages ont des stabilités différentes suivant le matériau qui les compose ce qui va rendre le lac intéressant pour l'étude du risque de vidange (Serrano, 2019). Le tableau 2 synthétise les trois types de barrage et leur degré de stabilité.

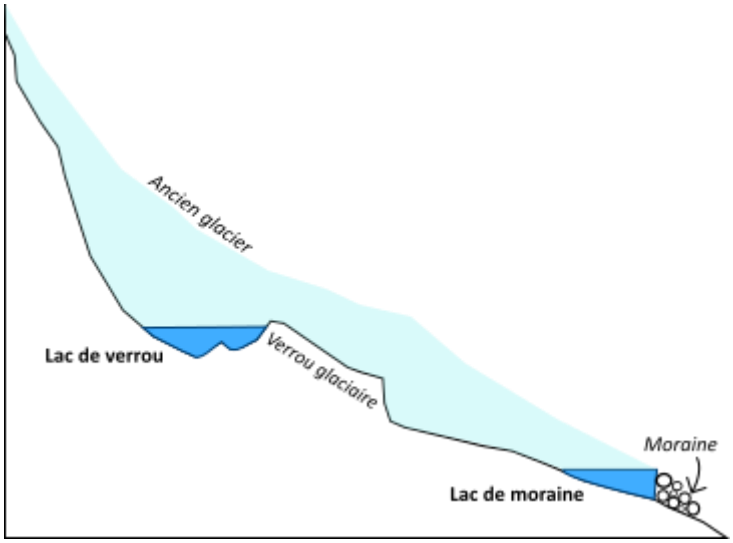


Figure 6 : Les deux types de lacs glaciaires : lacs de verrou et lacs morainiques (L. Laurent, 2024 d'après Lacs des Pyrénées, s.d.).

Tableau 2 : Les différents types de barrage pour un lac glaciaire (L. Laurent, 2024 d'après Serrano, 2019).

Composition	Caractéristiques	Stabilité
Glace	Constitué directement par le glacier ou par le dépôt d'une avalanche de séracs	Très peu stable
Moraine	Moraine laissée par le glacier, matériaux hétérométriques et peu consolidés	Peu stable
Verrou rocheux	Constitué directement du seuil rocheux	Stable

Il est possible de préciser plus la nature des lacs glaciaires en analysant leur position par rapport au glacier. Voici les quatre principaux lieux où peut se situer un lac glaciaire :

- Les lacs proglaciaires se forment en avant du glacier avec son retrait et ils sont alimentés par ce dernier.
- Les lacs juxtaglaciaires se situent le long de la marge externe du glacier ou entre deux langues glaciaires
- Les lacs supraglaciaires sont localisés à la surface des glaciers. Ils sont rarement pérennes et peuvent apparaitre et disparaitre très rapidement.
- Les lacs sous glaciaires ou poches d'eau intraglaciaires se forment à l'intérieur du glacier entre la glace et la roche. Ce sont des lacs très difficiles à repérer puisqu'invisible à l'œil nu et évoluant très rapidement.

La chaîne des Pyrénées, du fait du recul avancé de ses glaciers, ne possède pas les trois derniers types de lacs cités ci-dessus.

Les glaciers rocheux peuvent aussi être à l'origine de la création de nouveaux lacs. Un glacier rocheux est composé de glace et de débris rocheux entremêlés qui se déplace dans le sens de la pente à une vitesse très faible. Avec la fonte de cette glace, les débris rocheux peuvent se retrouver déstabilisés et ainsi créer des dépressions à leur surface. Le lac sera alors de type « thermokarstique » et il se situe sur ou aux abords directs d'un glacier rocheux.

Le recul actuel des glaciers laisse place à de nouveaux espaces où peuvent se former de nouveaux lacs (ou néolacs). Ce sont des lacs qui peuvent apparaitre et augmenter de volume de manière très rapide (Lacroix et al., 2022). Dans les Pyrénées, en 2020, A. Gréger et P. René ont recensé 7 néolacs étant apparus depuis la fin du PAG, soit 1850. Quatre sont en France. Parmi ceux en Espagne, deux se trouvent adossés à la glace et sont donc susceptible d'évoluer. Mais alors pourquoi est-il important de connaitre tous ces lacs ? Quels risques peuvent-ils générer ?

2.3.2. Quels sont les risques liés aux lacs glaciaires ?

Les lacs glaciaires sont susceptibles de générer du risque, un risque parfois peu prévisible mais surtout évoluant très rapidement. Le risque de vidange (GLOF en anglais pour « Glacial Lake Outburst Floods ») de lac glaciaire peut survenir de plusieurs façons. Il peut y avoir une surverse et/ou une brèche dans le barrage. La surverse signifie que l'eau va passer au-dessus

du barrage retenant les eaux du lac, c'est-à-dire qu'une ou plusieurs vagues vont créer des mouvements suffisamment importants pour cela. Les vagues peuvent provenir de mouvements de terrain, d'avalanches de neige ou de glace ou encore dans des cas très rares du vent. La surverse peut entraîner une rupture du barrage en augmentant fortement la pression de l'eau sur ce dernier. Les mécanismes de vidange étant complexes et très variés, chaque cas sera « unique ». Cependant, certaines actions demeurent les mêmes. Les ruptures de barrage ont lieu lorsque le barrage se trouve trop déstabilisé soit par un mouvement brusque soit via l'infiltration et l'écoulement des eaux du glacier. Un barrage peu stable, de glace ou morainique, va augmenter le risque de vidange (RTM, 2022 ; Clague & O'Connor, 2021).

Une vidange de lac glaciaire peut être très soudaine si la brèche dans le barrage est profonde et large ou bien si elle se développe rapidement mais cela peut aussi être plus lent lorsque l'eau traverse la moraine via de petits chenaux d'écoulement. Ce sont des événements difficiles à repérer et dont la puissance est également difficile à prévoir puisque de nombreux paramètres vont entrer en jeu (obstacles, matériaux, volume, débit, pente, etc.). J. Clague et J. O'Connor (2021) ont décrit le processus de rupture de barrage selon cinq étapes dont la durée et la puissance peuvent varier :

1. Le débit sortant du lac augmente lorsqu'un cours d'eau commence à s'enfoncer dans le barrage.

2. L'augmentation du débit sortant incise davantage le chenal, entrainant une augmentation de ce débit.

3. La brèche s'agrandit et s'élargit

4. Le niveau du lac baisse jusqu'à un niveau dit « critique »

5. L'écoulement se poursuit à un rythme décroissant jusqu'à ce que le lac descende au niveau de l'exutoire stable.

Le risque principal de ces vidanges est la transformation du flux en crue voire en lave torrentielle pouvant atteindre de manière violente les enjeux en aval. En effet, l'eau va dans sa course amasser un grand nombre de sédiments et de matériaux ce qui lui confère une puissance plus forte. C'est cet effet cascade (une rupture ou surverse entraîne une crue ou lave torrentielle) qui rend ce risque encore plus dangereux.

Il est compliqué de faire l'inventaire de toutes les vidanges de lacs étant donné qu'elles sont souvent observées sous la forme d'une crue ou d'une lave dont l'origine n'est pas forcément précisée et/ou uniquement lorsque des enjeux sont atteints. Le phénomène ayant lieu en haute montagne, il peut passer inaperçu. Cependant, J. L. Carrivick et F. Tweed, ont présenté une étude compilant des données sur les dix derniers siècles et dans vingt pays. Ils ont ainsi répertorié 1348 inondations dont la source était un lac glaciaire provenant de seulement 332 sites. 36% de ces inondations ont eu un impact sur les sociétés (décès, évacuations, destructions, perturbations). Au total, il y aurait eu plus de 10 000 morts dont 393 dans les Alpes (Carrivick & Tweed, 2016). Dans cette chaîne, la catastrophe la plus connue est celle du Giétro (Suisse) en 1818. Il s'agit d'un barrage de glace qui bloque le cours d'eau de la Drance et qui crée un lac dont le niveau augmente d'un mètre par jour. Malgré des tentatives pour abaisser le niveau du lac, le barrage de ce dernier se rompt. Toute la vallée se trouve inondée et la crue atteint Martigny, à environ 25 km, en seulement 90 minutes. C'est un évènement qui a eu lieu plusieurs fois au même endroit, bien que de manière moins intense (Coutterand, 2018). Le dernier GLOF le plus puissant a eu lieu en 2013 en Inde à Kedarnath, où les fortes pluies ont rompu le barrage du lac faisant plus de 4000 morts. Sur la photographie suivante (*figure 7*), l'emplacement du lac est indiqué par la flèche blanche. Le chemin suivi par les eaux et ensuite bien visible et détruit le village en aval.

Figure 7 : La vidange d'un lac glaciaire détruisant la ville touristique de Kedarnath en Inde en 2013 (Kaul & Negi, 2013).

Ainsi, tous les lacs requièrent à priori notre attention mais davantage ceux s'étant formé rapidement ou récemment, ceux près d'un glacier (blanc ou rocheux) ou ceux ayant un barrage morainique ou de glace. *« Avec le recul accéléré des glaciers, des situations peuvent évoluer très rapidement sur les marges glaciaires […] Un lac anodin récemment apparu peut devenir en quelques mois une bombe à retardement »* (Francou & Mélières, 2021, p 164). Les enjeux sont plus ou moins importants selon les massifs. En France, les Alpes sont beaucoup plus impactées par ce risque que les Pyrénées, les vallées alpines étant plus urbanisées et à proximité des glaciers. Les Pyrénées n'ont a priori connu aucune vidange de lac glaciaire.

Dans le contexte actuel, il est intéressant de se demander si le risque de vidange va évoluer avec le recul des glaciers. Plusieurs auteurs ont essayé d'apporter des réponses à cette question. Selon S. Harrison et al. (2018) et J. L. Carrivick et F. Tweed (2016), la fréquence des GLOF aurait augmenté entre les années 30 et 70, puis décru jusqu'à nos jours. Cette augmentation est interprétée comme une réponse différée de la décrue glaciaire qui a suivi le PAG. Cette diminution peut sembler paradoxale dans le contexte actuel de retrait accéléré des glaciers. Les auteurs de cette première étude ont estimé qu'il devrait y avoir une reprise des GLOF car le recul des glaciers aura multiplié le nombre de lacs de barrage morainique. Cependant, B. Francou et M. A. Mélières estiment qu'il n'y en aura pas forcément plus, en

tout cas lié à des ruptures de barrages morainiques, car pour qu'un lac proglaciaire se forme il faut un vallum morainique volumineux. Ce dernier se forme si le glacier « stagne » pendant longtemps dans un petit périmètre et ce n'est pas le cas aujourd'hui. Par exemple, le PAG a duré 6 siècles donc les moraines ont eu le temps de se mettre en place ce qui explique l'apparition de lac proglaciaires lors de la déglaciation.

Afin de limiter les évènements liés au GLOF et protéger au mieux les enjeux, plusieurs méthodes ont été développées.

2.3.3. Comment prévenir ce risque ?

Il est important de développer des méthodes pour prévoir la formation de nouveaux lacs ou pour estimer la sensibilité d'un lac au risque de vidange.

Dans les Alpes, une modélisation a été développée en 2012 pour déterminer des sites de futurs lacs potentiels. Nommée GlabTop (Glacier-bed Topography), le but est de calculer l'épaisseur du glacier et d'estimer les surcreusements en analysant sa morphologie actuelle (crevasses, verrous rocheux, angle de pente, etc.). Chaque potentiel surcreusement se voit ensuite attribuer un niveau de confiance suivant plusieurs critères. Cette méthode a été testée dans les Alpes et 139 potentiels futurs lacs ont été prédits. Cependant, l'incertitude de l'épaisseur de la glace nécessite de combiner GlabTop avec d'autres méthodes comme des analyses morphologiques poussées. De plus, il est difficile d'avoir une échéance pour leur formation et le changement climatique renforce cette incertitude. C'est une méthodologie pertinente à appliquer dans les Alpes où un risque de vidange peut rapidement devenir une catastrophe du fait des pentes raides donnant directement sur des vallées très peuplées (Cathala et al., 2021). Les Pyrénées ne connaissent pas de vallées exposées aussi peuplées que dans les Alpes. Des modélisations semblables à celles-ci ont été réalisées à travers le monde dans les différents contextes glaciaires (Linsbauer et al., 2012 (Suisse) ; Linsbauer et al., 2016 (Himalaya) ; Colonia et al., 2017 (Andes Péruviennes) ; Kapitsa et al., 2017 (Asie centrale)).

Ces modélisations constituent de bonnes bases en amont pour prévoir la formation de futurs lacs mais il est aussi nécessaire de réaliser une estimation du risque sur les lacs existants. Pour donner suite à l'inventaire des lacs glaciaires réalisé par C. Serrano dans les Alpes en 2022, le service RTM de l'Isère a tenté de déterminer pour chaque lac une sensibilité au risque de rupture de barrage et de surverse. Trois niveaux de sensibilité ont été définis (faible, moyenne, forte) en fonction de l'environnement et des caractéristiques connues du lac. Sur les 1400 lacs étudiés, 50 ont une sensibilité moyenne et 20 ont une sensibilité forte. Pour ces lacs, des modélisations ont été réalisées sur FlowR, modèle qui permet de montrer la propagation et la divagation d'écoulement grâce à un Modèle Numérique de Terrain (MNT). C'est un modèle empirique qui permet de voir de manière simple si les enjeux seraient touchés. Cela a mis en évidence 11 lacs où le risque de vidange est présent et où il y a des enjeux. Cela permet ensuite de prioriser d'éventuelles actions de prévention (RTM, 2024).

Dans les Pyrénées, aucun travail de ce type n'a été réalisé tout d'abord faute d'inventaire complet des lacs et aussi du fait qu'aucun phénomène ne s'est produit, ne motivant pas une nécessité urgente de réaliser ce type de travail.

2.4. Les études lacustres dans les Pyrénées françaises

Les études portées sur les lacs sont assez limitées dans les Pyrénées. La frise chronologique ci-dessous (*figure 8)* présente les différents acteurs ayant contribué à la connaissance des lacs des Pyrénées. Du fait de la proximité de certains lacs avec des glaciers (ou ex-glaciers), il est également possible d'obtenir des informations de manière indirecte via des rapports et des cartographies des glaciers dont les données sont plus fournies.

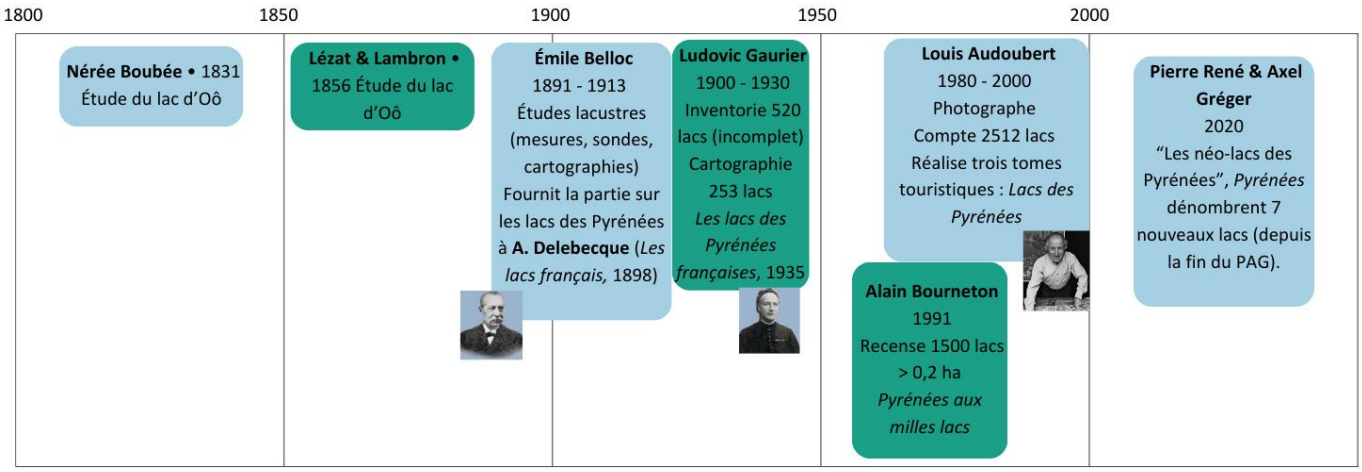


Figure 8 : Frise présentant les différents travaux menés sur les lacs des Pyrénées (L. Laurent, 2024).

Boubée, Lézat et le docteur Lambron ouvrent la porte à la limnologie dans les Pyrénées en étudiant le lac d'Oô entre 1830 et 1860. L'intérêt pour les lacs croît alors et E. Belloc effectue des études lacustres plus poussées en mettant notamment au point le « sondeur Belloc » qui permet de sonder le fond des lacs. Il fournit ainsi la bathymétrie de plusieurs lacs dans le luchonnais. Il est aussi lié à A. Delebecque qui a écrit un livre sur les lacs dans tous les massifs français, E. Belloc a rédigé la partie Pyrénéenne.

Cependant, le personnage le plus célèbre dans l'étude des lacs est l'Abbé Gaurier. Au début du XX^{ème} siècle, il va inventorier 520 lacs et faire la cartographie de 253 d'entre eux. Il affirme lui-même que cet inventaire est incomplet car il se base sur les cartes de l'Etat Major et tous n'y figurent pas. Son livre publié en 1935 consigne toutes ses observations lac par lac. Il est d'ailleurs critique quant à l'origine de certains lacs, il ne pense pas que leur formation résulte le plus souvent de l'action des glaciers. Selon lui, certains lacs sont trop profonds et trop grands pour avoir été créés par des glaciers comme le Portillon d'Oô. Il ne donne pas d'estimation quant à leur nombre, mais ce seraient donc des lacs d'origine tectonique (Gaurier, 1935). De manière plus récente, L. Audoubert, alpiniste et photographe, réalise des clichés de nombreux lacs et écrit trois tomes proposant des randonnées pour s'y rendre. Bien que ce soient des ouvrages plutôt à vocation touristique, cela permet de recenser de nombreux lacs et de profiter de photographies de ces derniers. L. Audoubert a compté 2512 lacs (Audoubert, 1991). A la même époque, A. Bourneton recense 1500 lacs de plus de 0,2 ha (Bourneton, 1991). Ces deux travaux ne sont pas considérés comme des inventaires très

précis, il s'agit plutôt d'estimations. Depuis les années 2000, aucun inventaire n'a été réalisé. L'article de A. Gréger et P. René de 2020 présente des lacs ayant apparus depuis la dernière déglaciation en se basant sur les travaux de L. Audoubert et A. Bourneton.

Le travail réalisé durant ce stage s'inscrit dans la continuité de ces travaux afin d'apporter un inventaire le plus exhaustif possible des lacs des Pyrénées françaises. Il faut noter que les travaux précédents (sauf ceux de L. Gaurier) ne se limitent pas à la partie française de la chaine.

Cet état de l'art montre que les risques liés aux lacs glaciaires sont présents et non négligeables dans certains massifs. Dans les Pyrénées, aucun travail n'a été mené pour essayer d'estimer ce risque. C'est ce que ce stage et ce mémoire ont cherché à faire en se demandant s'il est pertinent de surveiller les lacs glaciaires des Pyrénées françaises par rapport au risque de vidange. Pour ce faire, le travail a été réalisé en trois étapes. Tout d'abord, il a fallu voir ce qui existait dans ce domaine et maitriser le sujet, c'est le but de cet état de l'art. Ensuite, l'inventaire permet de fournir une base SIG de tous les lacs afin d'améliorer la connaissance de ces derniers. Puis la troisième étape s'attache à estimer le risque de vidange via des recherches diverses.

Partie 3 : Identifier les lacs glaciaires des Pyrénées françaises

Avant de savoir s'il est pertinent de surveiller le risque de vidange, il faut connaitre les lacs. Comme vu précédemment, aucun inventaire récent, précis et sous forme informatique n'existait jusqu'à présent. C'est dans le cadre du PAPROG que cette mission a été réalisée au cœur de ce stage. Cette partie présente la méthodologie employée ainsi que les résultats obtenus.

3.1. Méthodologie

3.1.1. Méthodologies d'identification des lacs via la télédétection

La télédétection est une technique de collecte et d'analyse de données qui détecte les formes d'énergies émises ou réfléchies par un objet, naturel ou anthropique, à la surface de la Terre. Les capteurs qui permettent d'enregistrer cela sont embarqués à des distances variées sur des drones, avions ou satellites par exemple. Dans le contexte de ce stage, trois méthodes existent pour identifier les lacs.

En premier lieu, il est possible de réaliser cette identification de manière « manuelle ». Cette méthode se base sur des photographies aériennes. Il s'agit donc de repérer visuellement et de manière entièrement manuelle les lacs puis de tracer les polygones en suivant les contours du lac.

Il existe également deux méthodes semi-automatiques. La première, mise au point par Météo France, utilise les images radar InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Ce sont des images obtenues grâce à l'utilisation des ondes radio qui vont permettre de détecter et imager des objets et des surfaces. Les images radar peuvent être acquises indépendamment des conditions météorologiques et de l'éclairage. Les radars à synthèse

d'ouverture (SAR) sont des types de radar qui permettent de fournir l'élévation du terrain (InSAR, 2023).

Avec ces données, Météo France a développé un indice qui se base sur la réflectivité d'une surface, c'est-à-dire les ondes qui vont être réfléchies par une surface. Chaque matériau ou type de surface ne réagira pas de la même manière. Le but est donc de trouver quelle est la réflectivité des lacs pour ensuite pouvoir les isoler. Cependant, elle n'est pas pertinente pour les zones glaciaires car la réflectivité d'un lac et celle d'un glacier sont sensiblement similaires. L'indice ne permet pas toujours de faire la différence entre les deux éléments. Or, c'est un point essentiel car il est important de pouvoir distinguer les lacs aux abords ou sur un glacier blanc. La méthode est encore en cours d'amélioration pour permettre d'avoir un résultat plus précis.

La seconde méthode semi-automatique consiste à utiliser un Modèle Numérique de Terrain généré grâce aux données LiDAR (Light Detection And Ranging) Haute Définition de l'Institut Géographique National (IGN). Les données LiDAR sont obtenues grâce à une technique très précise qui consiste à envoyer des lasers en direction du sol et à mesurer le temps de retour de l'onde. Ces temps de retour permettent de mesurer des distances. L'analyse de ces données, en regroupant les distances en classes et en attribuant des objets ou types de couvertures à chacune de ces classes va permettre de produire des représentations de la topographie. Un MNT en fait notamment partie, c'est une représentation numérique en trois dimensions de la surface topographique de la Terre (IGN, 2022).

La détection des lacs glaciaires se fait dans ce cas en réalisant des traitements sur un MNT. Il s'agit de calculer un indice de rugosité. L'indice de rugosité (entre 0 et 1) calcule la différence d'altitude maximale entre un pixel et ses huit voisins. Les lacs étant considérés comme des surfaces lisses, il suffit d'appliquer un certain seuil pour les isoler. Lors d'un stage dans les Alpes, Aziliz Garnier a défini des seuils de rugosité à utiliser dans le cadre de l'identification des lacs glaciaires (Garnier, 2023). C'était dans un premier temps la méthode privilégiée dans l'élaboration de cet inventaire. Mais pour les raisons exposées ci-dessous, nous n'avons pu effectuer que des tests et la généralisation de cette méthode n'a pas pu être appliquée.

L'inventaire a été réalisé sur le logiciel ArcMap et l'indice de rugosité se calcule grâce à un outil sur le logiciel QGIS, l'équivalent n'a pas été trouvé. Les tests ont été effectués sur un ordinateur personnel, le service RTM 64-65 ne possédant pas QGIS, mais le transfert de données entre deux ordinateurs et deux logiciels de SIG est compliqué, lourd et risqué. De plus, après de nombreux essais, les résultats n'ont pas été entièrement satisfaisants. La présence de faux-positifs (zone étant identifiée comme étant un lac mais qui n'en est pas un) est le principal problème, il est visible sur la carte ci-dessous (*figure 9*). Même en réglant le seuil choisi, la problématique n'est jamais entièrement résolue et cela nécessiterait des traitements postérieurs pour obtenir une couche shapefile (format de fichier qui contient des données vectorielles et qui s'utilise dans un SIG) propre afin de servir de base à l'inventaire. C'est une méthode longue et qui nécessite de nombreux ajustements avant d'avoir un résultat satisfaisant.

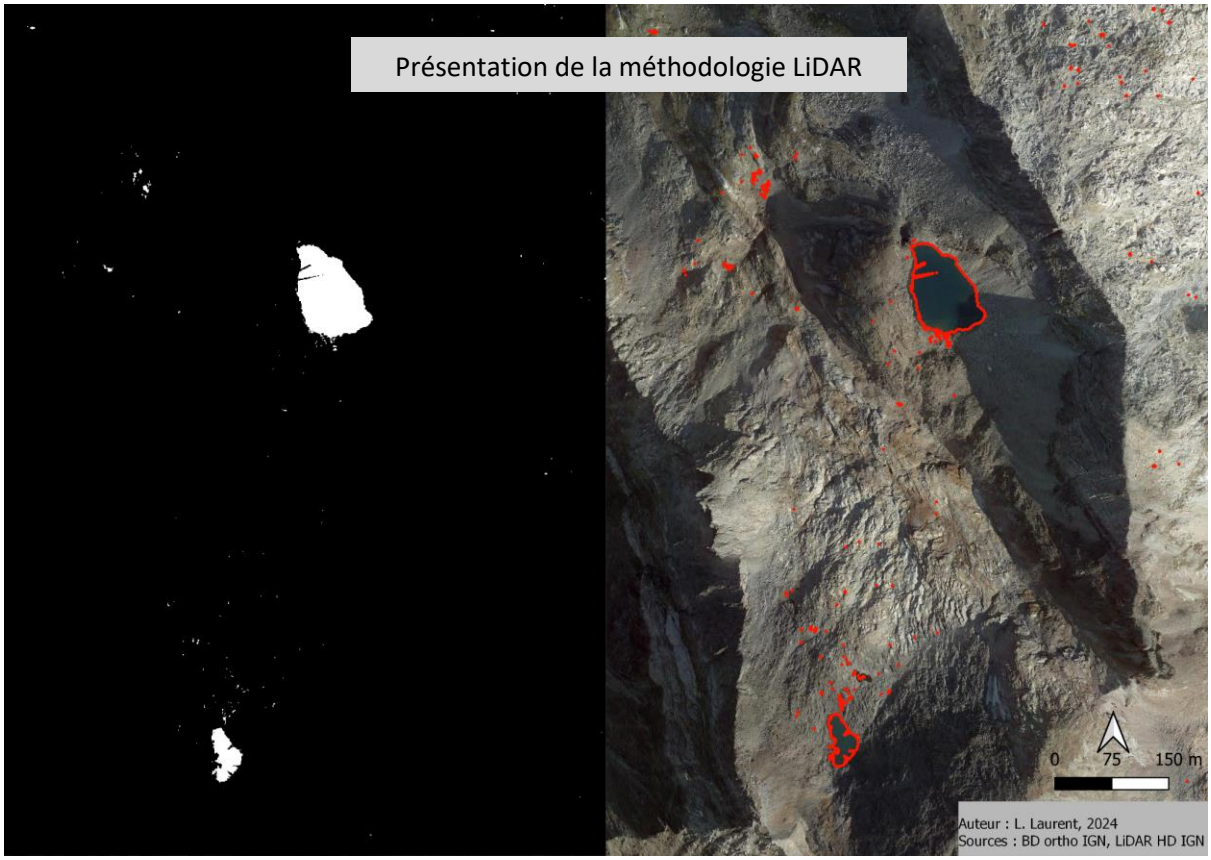


Figure 9 : Présentation de la méthodologie LiDAR. A droite, raster de rugosité avec un seuil à 0,1 (toutes les valeurs en dessous de ce seuil sont en blanc et sont théoriquement des lacs). A gauche, les polygones des « lacs » définis grâce à ce seuil, montrant la présence notable de faux positifs. L. Laurent, 2024.

Le choix pour la réalisation de cet inventaire s'est donc porté sur la première méthode. La couche shapefile nommée "PLAN_D_EAU", issue de la BD TOPO de l'IGN recense les *« étendues d'eau continentale de surface, d'origine naturelle ou anthropique, possédant un toponyme ou identifiées par un code hydrographique »* (IGN, 2024). Cette couche a servi de base à la réalisation de cet inventaire puisque 40% à 50% des lacs y sont référencés. Ainsi, la construction de cet inventaire s'est faite manuellement avec la vérification de chaque lac un par un. Le repérage des lacs se faisait grâce aux images aériennes (BD ORTHO) sur lesquelles était superposé les plans d'eau (BD TOPO). Trois actions étaient possibles lorsqu'un lac était observé sur la BD ORTHO, elles sont illustrées sur la carte suivante (*figure 10)* :

- Soit le plan d'eau existe et ses limites correspondent à celles de l'image aérienne, auquel cas aucune action n'est nécessaire sur le polygone, il faut juste compléter la table attributaire avec la catégorie, l'identifiant et la date de cartographie (cas 1).

- Soit le plan d'eau existe mais ses limites ne sont pas justes, il faut alors modifier les points ou de retracer le polygone puis d'ajouter les mêmes informations (cas 2).

- Soit le plan d'eau n'est pas répertorié dans la BD TOPO (entre 50 et 60% des cas). Dans cette configuration, il faut créer un polygone à partir de l'image aérienne (cas 3).

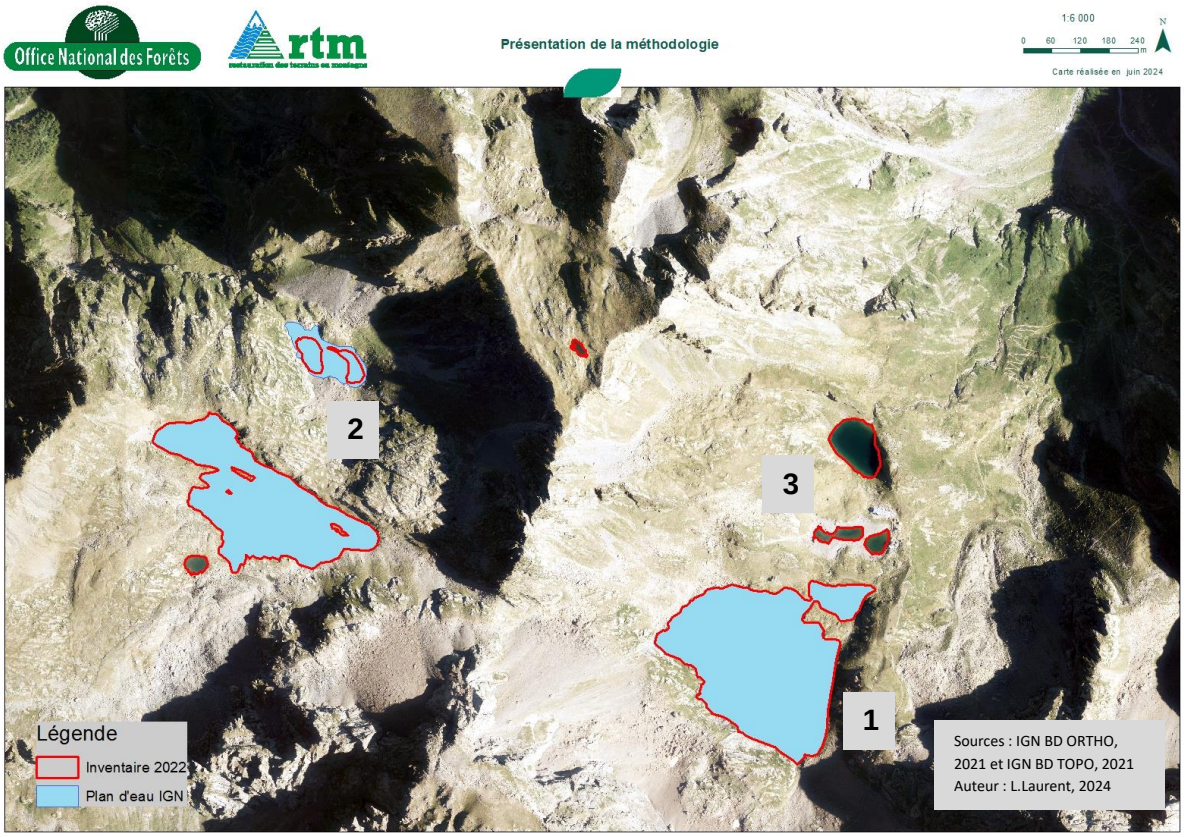


Figure 10 : Présentation des différentes actions à réaliser lors de la construction de l'inventaire réalisé pendant ce stage. L. Laurent, 2024.

3.1.2. Données utilisées

La délimitation des lacs ainsi que tous les traitements postérieurs ont été réalisés sur le logiciel SIG ArcMap (ancienne composante principale d'ArcGIS développée par ESRI). Le tableau ci-dessous (*tableau 3*) récapitule les données utilisées pour la construction de l'inventaire. Un tableau détaillé est disponible en annexe 2.

Tableau 3 : Données utilisées pour la construction de l'inventaire (L. Laurent, 2024).

Donnée utilisée	**Fournisseur**	**Année(s) de production**	**Utilisation**
Inventaire des glaciers blancs des Pyrénées	RTM	2020	Identification des lacs proglaciaires
Inventaire des glaciers rocheux des Pyrénées	RTM	2023	Identification des lacs thermokarstiques
BD TOPO (Plan d'eau, commune, département)	IGN	2021	Utilisation des plans d'eau et enrichissement de la table attributaire
BD ORTHO	IGN	2019, 2021 ou 2022 (suivant les départements)	Identification des lacs grâce aux images aériennes
MNT généré grâce au LiDAR HD	IGN	2021, 2022, 2023 (suivant les secteurs)	Ajout de l'altitude et essai de la méthodologie avec le LiDAR
SCAN 25	IGN	2021	Toponymie des lacs
Massif	Météo France	Inconnue	Ajout des massifs
Google Earth (vue 3D)	Google	2017 et après	Aide pour repérer les lacs et déterminer leur catégorie

3.1.3. Présentation des critères et de la table attributaire

Un inventaire des lacs glaciaires a déjà été réalisé dans les Alpes, dans un souci d'uniformisation des données, nous avons utilisé la même méthodologie pour réaliser l'inventaire des Pyrénées. L'inventaire dans les Alpes a été réalisé par C. Serrano en 2022. Pour une meilleure compréhension, lorsque le texte fera référence à cet inventaire il sera nommé inventaire « Serrano », et toutes les autres mentions à des inventaires fera référence à l'inventaire réalisé pour les Pyrénées dans le cadre de ce stage. C. Serrano a mis au point

des critères et une table attributaire précise qu'il convient de reproduire pour la potentielle mise à disposition des données au grand public dans les prochaines années. Ce choix comporte des limites qui seront exprimées dans la dernière partie de ce travail.

L'inventaire ne répertorie que les lacs situés à plus de 2000 mètres d'altitude. Cette limite a été choisie par C. Serrano par rapport à l'emplacement des glaciers alpins. Elle a été conservée dans les Pyrénées et a posteriori ce n'est peut-être pas le choix le plus pertinent. Une étude de la géomorphologie et de l'emplacement des glaciers des Pyrénées aurait permis d'avoir l'altitude la plus pertinente. Au-dessus de cette altitude les lacs sont considérés comme glaciaires car leur apparition est généralement associée au retrait glaciaire suivant le PAG (autour de 1850) ou au retrait glaciaire depuis le dernier maximum glaciaire (Würm, - 12 000 ans).

Les limites cartographiées des lacs, correspondant à la date précise de la prise de vue utilisée, peuvent évoluer selon les saisons ou les années. Le marnage (différences de niveau d'eau dues aux variations saisonnières) par exemple n'est pas pris en compte dans l'inventaire et nécessiterait de disposer d'orthophotographies à différentes dates pour une même année. Pour certains lacs, l'eau peut avoir complètement disparue au cours d'une année mais être présente une autre. Les surfaces enregistrées restent donc indicatives et ne sont valables que pour la date de l'image sur laquelle repose la cartographie. Dans un premier temps, aucun filtre de surface n'a été appliqué afin d'avoir l'inventaire le plus précis possible.

Le tableau suivant présente tous les champs présents dans la table attributaire.

Tableau 4 : Table attributaire de l'inventaire des lacs glaciaires 2024, Pyrénées françaises (L. Laurent, 2024).

Nom du champ	Type	Format	Description
ID_GLIMS	Chaîne de caractère	GLxxxxxxEyyyyyN	Combinaison de la longitude (x) et la latitude (y) du centroïde du lac. GL = Glacial Lake ; E = East ; N = North

ID_RTM	Entier	Numéro	Un identifiant par lac
NOM	Chaîne de caractère	Texte	Nom du lac (si nom il y a) (Source : Scan 25 IGN, Google Earth, BD TOPO IGN)
MASSIF	Chaîne de caractère	Texte	Massif dans lequel se trouve le lac (Source : Météo France)
DEPT	Chaîne de caractère	Texte	Nom du département dans lequel se trouve le lac (Source : BD TOPO IGN)
COMMUNE	Chaine de caractère	Texte	Nom de la commune dans laquelle se trouve le lac (Source : BD TOPO IGN)
INSEE_COM	Entier	Nombre	Code INSEE de la commune dans laquelle se trouve le lac (Source : BD TOPO IGN)
X_4326	Chaîne de caractère	DMS (Degrés Minutes Secondes)	Longitude du centroïde du lac (EPSG : 4326)
Y_4326	Chaîne de caractère	DMS	Latitude du centroïde du lac (EPSG : 4326)
CATÉGORIE	Chaîne de caractère	Texte	Catégorie du lac (*cf tableau 5*) - "G" = Glaciaire - "P" = Proglaciaire - "A" = Anthropique - "T" = Thermokarstique - "O" = Autre
SURFACE	Flottant	m^2	Surface du lac en calculant la surface du polygone
VOLUME_CAL	Flottant	m^3	Volume théorique du lac d'après la relation de Huggel *et al.*, 2004
ALTITUDE	Entier	m	Altitude du centroïde du lac (Source : MNT IGN)
DATE_CARTO	Entier	Nombre	Année de l'image aérienne d'après laquelle les contours du lac ont été cartographiés (Source : BD ORTHO IGN)

Dans cette table attributaire, les bassins versants n'apparaissent pas alors que cela serait pertinent pour des analyses complémentaires d'hydrologie. Dans le cadre du PAPROG, les bassins versants sont définis d'une manière précise et la délimitation se fait manuellement pour chacun d'entre eux. Ce travail a été fait dans les Alpes mais pas encore dans les Pyrénées.

Le champ « VOLUME_CAL » correspond au volume théorique du lac qui résulte d'une relation empirique entre la surface et le volume, développée par Huggel et al. (2004). Cette relation revient à dire que plus le lac est grand plus il est profond, elle s'appuie sur un coefficient de relation élevé (r^2 = 0,916) entre volume et surface. La fiabilité de l'estimation est considérée comme moyenne : *« les valeurs ont tendance à être surestimées dans un intervalle allant de 16% à 80% »* (Serrano, 2019).

Le tableau ci-dessous présente les différentes catégories qu'il est possible d'attribuer à chaque lac suivant ses spécificités. Ce champ a été rempli manuellement pour chaque lac. A noter que, en l'absence de caractéristiques spécifiques, les lacs sont « glaciaires ».

Tableau 5 : Les différentes catégories de lacs, champ « CATÉGORIE ». L. Laurent, 2024.

Catégorie	**Abréviation**	**Description**
Glaciaire	G	Lac formé par la présence passée d'un glacier et se situant au-dessus de 2000m d'altitude
Proglaciaire	P	Lac se trouvant dans la marge proglaciaire à l'aval d'un glacier. La distance est fixée à 1000 m depuis les limites du glacier
Thermokarstique	T	Lac se trouvant sur ou aux abords directs d'un glacier rocheux, qu'il soit "actif", "inactif" ou "fossile"
Anthropique	A	Lac de retenu ou bassine
Autre	O	Névé, marais, lac sec

3.1.4. Difficultés rencontrées

Les principales difficultés rencontrées ont été des problématiques d'exposition (surexposition ou sous-exposition) ou bien la présence d'une couverture neigeuse. Dans ce cas, l'utilisation d'images aériennes plus anciennes a été nécessaire, en l'occurrence celles contenus dans la BD ORTHO de 2019. La carte ci-dessous (*figure 11*) présente un cas de figure où la couverture neigeuse empêchait de tracer les contours du lac.

Figure 11 : Exemple de difficulté rencontrée : présence de neige. A gauche : orthophotographie de 2022 et à droite : orthophotographie de 2019, utilisée pour pallier à la problématique de couverture neigeuse. L.Laurent, 2024.

La réalisation de cet inventaire conduit à des résultats statistiques présentés dans la partie suivante.

3.2. Résultats de l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées

Cette partie présente les résultats statistiques de l'inventaire réalisé lors de ce stage. Plusieurs phénomènes sont visibles et intéressants à observer.

3.2.1. Présence importante de lacs mais diversité de surfaces

Au total, **1184 lacs** ont été inventoriés pour des surfaces allant de 0,0015 hectares (soit 15m²) à plus de 153 hectares. Cette différence importante s'explique par deux facteurs. Tout d'abord, l'inventaire a été construit sans limite minimale de surface afin d'être le plus complet possible. C'est pourquoi beaucoup de très petits plans d'eau apparaissent. De plus, on observe dans les Pyrénées la présence de grands lacs anthropiques c'est-à-dire avec un barrage artificiel et dont l'utilisation est dédiée à la production d'énergie. Ainsi, les huit premiers lacs en termes de surface sont anthropiques. La médiane (1847 m²) et la moyenne sont très différentes (14261 m²) du fait de ces deux facteurs.

Le tableau ci-dessous (*tableau* 6) illustre bien la forte présence de lacs très petits puisque le nombre de lacs est divisé par deux dès 2500 m².

Tableau 6 : Répartition des lacs suivant la surface (L. Laurent, 2024).

Surface	Nombre de lacs
Toutes surfaces	1184
>= 2500 m²	520

3.2.2. Prédominance des lacs glaciaires

La répartition par catégorie est présentée dans le diagramme ci-dessous (*figure 13*). Dans ce travail, par défaut, tous les lacs sont glaciaires car situés au-dessus de 2000m. La

catégorie change si le lac présente d'autres spécificités comme présenté dans le tableau 5 dans la partie précédente. Il est donc logique de retrouver une majorité de lacs glaciaires. En effet, le graphique ci-dessous montre que 472 lacs appartiennent à cette catégorie soit plus de 82 %. C'est d'ailleurs un point qui présente une limite, l'hypothèse de dire que tous les lacs au-dessus de 2000m sont glaciaires est réductrice et n'apporte pas forcément d'éléments pertinents. L'analyse statistique perd ici de son sens. Mais, il y a tout de même la présence de lacs thermokarstiques et proglaciaires, ce qui est très intéressant. Il s'agit de lacs qu'il est pertinent d'observer car ils sont en lien direct avec la glace et sa fonte. De ce fait, ils peuvent être plus enclins à connaître des modifications de surface mais également des instabilités. Ce sont ces lacs qui feront l'objet de recherches complémentaires permettant d'estimer le risque de vidange dans la partie suivante.

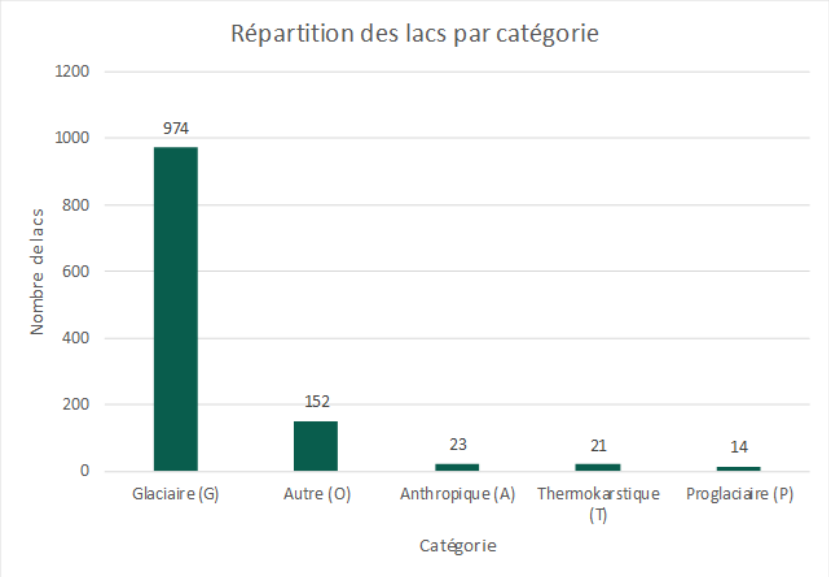


Figure 12 : Répartition des lacs par catégorie (L. Laurent, 2024).

3.2.3. Répartition latitudinale et longitudinale

Au niveau de l'altitude, les 1184 lacs ont une répartition qui se rapproche d'une distribution en cloche, c'est-à-dire avec une moyenne et une médiane dont les valeurs sont proches, respectivement de 2329 m et 2310 m. L'altitude maximale du plus haut lac est de 2922 m. Le graphique ci-dessous rend compte de cette répartition. Il présente le nombre de lacs dans chaque classe d'altitude soit tous les 100 mètres.

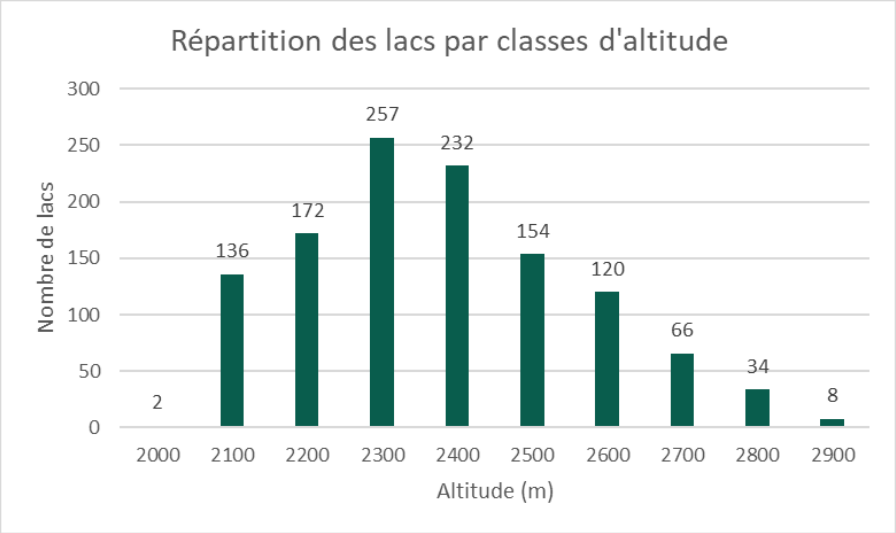


Figure 13 : Répartition des lacs par classes d'altitude (100m) (L. Laurent, 2024).

La répartition des lacs par département montre deux départements qui se démarquent en ayant une quantité de lacs bien supérieure aux trois autres (*figure 14*). Ainsi, les Hautes-Pyrénées et l'Ariège regroupent environ 70 % des lacs. Cela s'explique facilement : ce sont les départements qui comptent le plus de surface supérieure à 2000m.

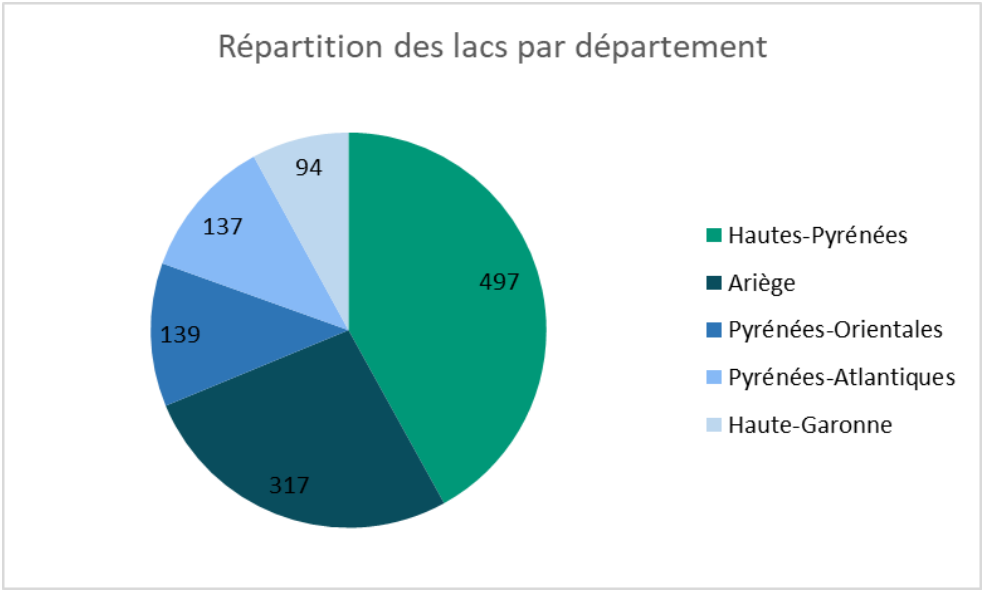


Figure 14 : Répartition des lacs par département (L. Laurent, 2024).

Il est possible d'associer ces résultats à la répartition des lacs par massif (*figure 15*). Les massifs renseignés dans l'inventaire proviennent de Météo France, il s'agit par exemple

des massifs utilisés dans les bulletins de risque avalanche. La Haute-Bigorre est majoritaire, ce massif se situe dans les Hautes-Pyrénées.

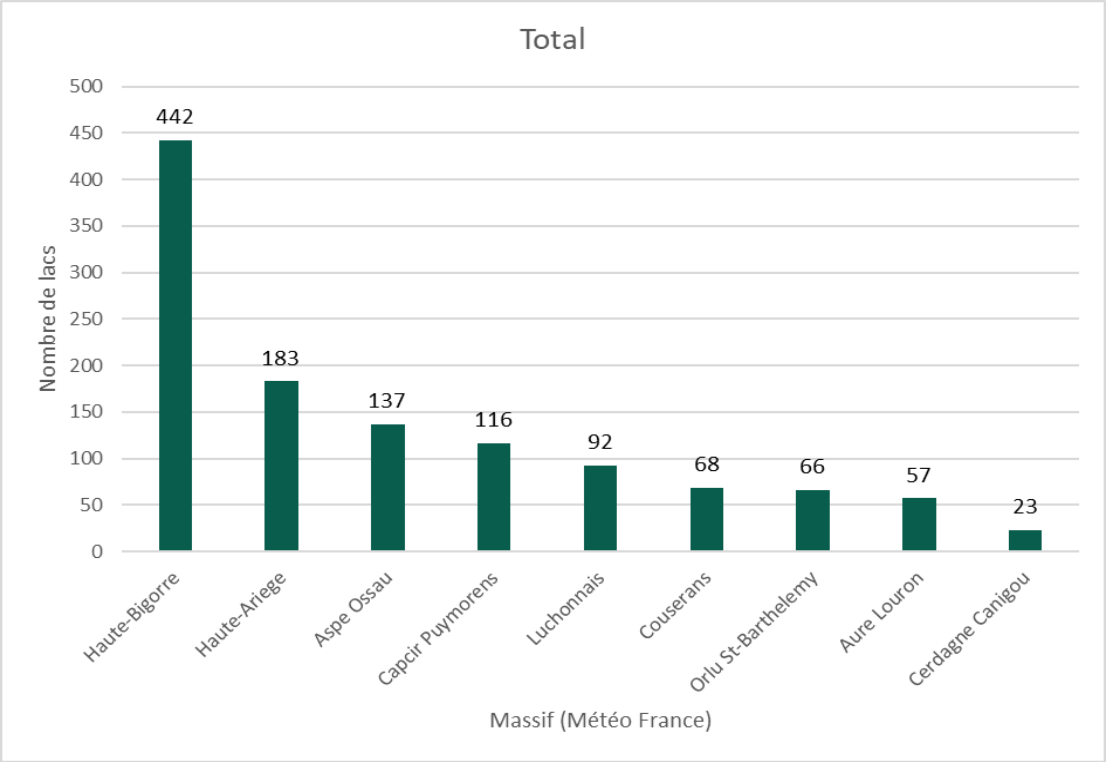


Figure 15 : Répartition des lacs par massif, d'après les massifs définis par Météo France (L. Laurent, 2024).

Un inventaire ayant été réalisé dans les Alpes récemment, il est intéressant de comparer mes résultats pour voir si des tendances apparaissent.

3.3. Comparaison avec l'inventaire réalisé dans les Alpes

L'inventaire « Serrano » a été réalisé en 2022 sur une zone couvrant toutes les Alpes françaises. Il est important de noter que ces deux chaînes sont très différentes sur de nombreux points : climat, altitude ou encore degré d'anthropisation. Les résultats qui vont être présentés s'appuient sur deux inventaires (inventaire « Serrano » et inventaire réalisé lors de ce stage) sur lesquels un filtre de surface a été appliqué. Les inventaires traités ne comptent que les lacs dont la surface est égale ou supérieure à 2500 m² ou bien dont les catégories sont "thermokarstiques" ou "proglaciaires" (sans notion de surface dans ces cas-là). C. Serrano a décidé d'appliquer ce filtre car il s'agit de lacs plus pertinents à étudier :

surface ou volume suffisamment importants ou lacs pouvant évoluer rapidement. Pour que la comparaison fasse sens, le même tri a été réalisé pour l'inventaire des Pyrénées. L'inventaire alpin compte ainsi 1348 lacs et celui des Pyrénées en compte 542.

La première différence notable s'observe au niveau des catégories des lacs, présentées dans la figure 16. En effet, les Alpes comptent 706 lacs proglaciaires contre seulement 14 pour les Pyrénées. Il est nécessaire de ramener ce chiffre en pourcentage pour faciliter la comparaison : 52% contre moins de 3%. Cela s'explique par la présence importante de zones englacées dans les Alpes.

Il y a également une différence sur la quantité de lacs catégorisés « autre » : 7% pour les Pyrénées et seulement 0,4% pour les Alpes. La classification s'est faite différemment dans les deux inventaires. Dans les Pyrénées tous les lacs secs, très peu profonds ou ressemblant plus à des marais se trouvent dans cette catégorie. Il peut être intéressant de noter que plus de la moitié de ces lacs (21 sur 41) se trouvent dans le département des Pyrénées-Orientales qui est un département victime de sécheresse depuis plusieurs années.

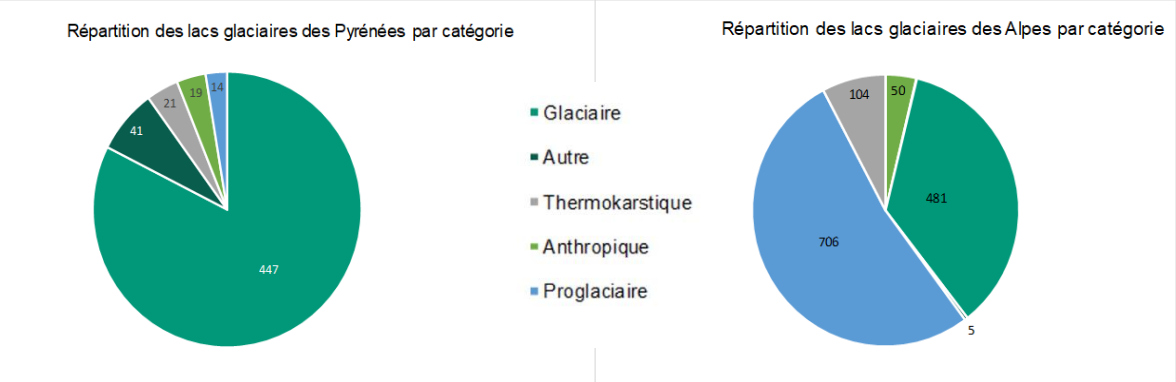


Figure 16 : Répartition des lacs de plus de 2500 m² ou de catégorie "T" ou "P" par catégorie. A gauche, dans les Pyrénées et à droite dans les Alpes (L. Laurent, 2024).

Le tableau ci-dessous (*tableau 7*) permet de comparer les différences de surface et d'altitude des lacs entre les deux chaînes. Ceux des Pyrénées ont une surface moyenne plus de deux fois plus importante que les Alpes. Cela s'explique par la forte présence de lacs à vocation énergétique dans les Pyrénées. Les Alpes possèdent également de grands lacs anthropiques mais ces derniers se trouvent à plus basse altitude.

L'altitude maximale est plus élevée dans les Alpes puisque le lac le plus haut culmine à 3521 m. Dans les Pyrénées, le lac le plus haut est à 2922 m. La différence de topographie

explique cela. Le point culminant des Pyrénées françaises se trouve à 3298 m (Vignemale) tandis que le point culminant des Alpes françaises est le Mont-Blanc (4809 m).

Tableau 7 : Comparaison des surfaces et des altitudes des lacs entre les Alpes et les Pyrénées (L. Laurent, 2024).

	Alpes	**Pyrénées**
Surface moyenne (en ha)	1,18	3
Surface maximale (en ha)	60	153
Altitude maximale (en m)	3521	2922

Ainsi, les lacs des Pyrénées et ceux des Alpes ont des caractéristiques très différentes. Leur nombre, leur surface, leur altitude et leurs types ne sont pas similaires. C'est en grande partie explicable du fait que les deux chaines n'ont que peu de points communs. De plus, la sélection des critères faite pour l'inventaire « Serrano » est réductrice pour les Pyrénées et le filtre appliqué pour cette partie n'est peut-être pas non plus le plus adapté. Nous reviendrons sur ces limites dans la discussion

En se concentrant de nouveau sur les Pyrénées, la dernière étape de ce travail est d'estimer le risque de vidange par des observations et des recherches bibliographiques.

Partie 4 : Estimer le risque de vidange dans les Pyrénées françaises

La problématique soulevée au cours de ce travail est de savoir s'il est pertinent ou non d'observer et de surveiller les lacs glaciaires des Pyrénées françaises par rapport au risque de vidange. La dernière étape est d'estimer le risque de vidange pour voir comment ce dernier peut être caractérisé et donc s'il est pertinent de mettre en place des actions de surveillance. Cette partie présente donc la méthodologie et les résultats de cette troisième étape.

4.1. Méthodologie

Une fois l'inventaire terminé, une méthodologie d'identification de lacs considérés comme « intéressants » a été mise en place puis l'analyse de chacun d'entre eux a permis d'estimer le risque de vidange dans les Pyrénées françaises. Il est important de noter qu'il s'agit d'une estimation réalisée à partir d'un échantillon de lacs choisis pour leurs caractéristiques. Le risque de vidange ne peut être déterminé de manière certaine que si tous les lacs sont observés.

Cette étape de travail se divise en trois temps : (1) critères de sélection et identification des lacs ; (2) analyse de ces lacs et (3) estimation de l'enjeu global grâce à cet échantillon.

4.1.1. Critères de sélection et identification des lacs

Tout d'abord, il est nécessaire de définir les lacs qui sont les plus propices à générer du risque. Dans un premier temps, un travail bibliographique a été réalisé afin de connaître les prédispositions des Pyrénées en matière de risque de vidange. Le but était notamment de savoir si la chaîne avait déjà connu des phénomènes liés aux lacs et/ou si certains lieux étaient mentionnés comme à surveiller ou à risque. L'inspection de la Base de Données Événements du RTM (base de données publique recensant tous les événements naturels en montagne : rtm-onf.ign.fr), ainsi que la recherche et la lecture d'ouvrages et d'articles scientifiques ou de

la presse ont permis de réaliser ce premier travail. La conclusion est donc que les Pyrénées n'ont connu aucune rupture de barrage ou surverse. N'ayant pas pu mettre en lumière certains lacs ou certaines zones de cette manière, il a été décidé dans un second temps de se focaliser sur les lacs proglaciaires, thermokarstiques ou des lacs étant apparus depuis la fin du PAG. La bibliographie indique que ce sont les plus enclin à avoir un barrage ou des berges instables. L'identification de ces lacs est importante car ils sont propices à des changements rapides du fait de leur proximité avec de la glace et sa fonte. Puisque l'inventaire faisait déjà état des différentes catégories, leur identification fut simple.

Pour les lacs étant apparus ou ayant évolués depuis la fin du PAG, nous n'avions pas le temps de les observer un à un. Il n'a pas non plus été possible de réaliser un inventaire des lacs d'après les photographies aériennes des années 1950 ce qui aurait simplifié la comparaison. Nous avons donc réalisé un travail de bibliographie et d'archives. De nombreuses sources ont été utilisées dans cette recherche, elles sont consignées dans le tableau ci-dessous (*tableau 8*).

Tableau 8 : Bibliographie et données utilisées pour l'identification et l'analyse de certains lacs (L. Laurent, 2024).

Donnée ou référence	**Fournisseur (*le cas échéant)***	**Utilisation**
Google Earth	Google	Observation 3D des lacs
Géoportail (remonter le temps, Scan 25, cartes de l'État-Major)	IGN	Observation de changements dans le temps à partir de plusieurs sources
Images Sentinel 2	Agence Spatiale Européenne	Observation plus récente des lacs
Les lacs des Pyrénées, L. Audoubert, 1991		Inventaire touristique des lacs
Les lacs des Pyrénées françaises, L. Gaurier, 1935		Inventaire ancien des lacs
"Les nouveaux lacs des Pyrénées", A. Gréger et P. René, 2020		Article identifiant 7 néo-lacs dans les Pyrénées
Archives glaciologiques du RTM 64/65		Relevés et photographies des glaciers et parfois des lacs alentours

L'utilisation des archives glaciologiques mises à disposition par le RTM 64-65 ont été très utiles. Ce dossier regroupe de nombreuses photographies et relevés effectués par les agents des Eaux et Forêts dans les années 40-50. Il y a aussi quelques mesures plus anciennes effectuées par l'Abbé Gaurier entre 1900 et 1920.

4.1.2. Analyse des lacs

Une fois les lacs identifiés, une fiche a été réalisée pour chacun d'entre eux contenant :

- Caractéristiques : la localisation, la surface, l'altitude, le volume théorique, la catégorie et le barrage ;
- Historique : l'apparition ou l'évolution documentée ;
- Estimation de l'enjeu en aval : l'identification des enjeux.

L'exemple d'une fiche type, celle du lac Tourrat dans les Hautes-Pyrénées est disponible en annexe 3.

4.1.3. Estimation de l'enjeu global

Même si tous les lacs n'ont pas été étudiés, il est possible d'estimer le risque global de vidange dans les Pyrénées françaises en se basant sur la bibliographie et sur l'échantillon des lacs analysés. Les résultats sont présentés dans la sous-partie suivante.

4.2. Estimation du risque de vidange dans les Pyrénées françaises

L'estimation du risque n'est pas complète mais elle permet de fournir une tendance. En effet, les 1184 lacs n'ont pas tous été observés, certains ont été mis en priorité suivant leurs caractéristiques ou leur historique, comme expliqué précédemment. Cette partie fournit les résultats de ces recherches pour les lacs proglaciaires, thermokarstiques et pour les lacs dit évolutifs (c'est-à-dire étant apparus ou ayant évolués de manière considérable depuis la dernière déglaciation). Treize nouveaux lacs ont été identifiés dont certains se situent dans une même zone. Parmi eux, quatre seulement possèdent un nom et ont une histoire documentée.

4.2.1. Lacs proglaciaires

Parmi les quatorze lacs proglaciaires recensés, aucun n'est collé à un glacier encore existant. Il s'agit uniquement de lacs se trouvant à moins de 1 000 m en aval d'un glacier. De plus, tous ont des surfaces inférieures à 1 400m² hormis les lacs de Barroude (Haute-Bigorre) présentés ci-dessous (*figure 17*). Le recul important du glacier permet d'affirmer que le lac ne devrait pas connaître de variations futures.

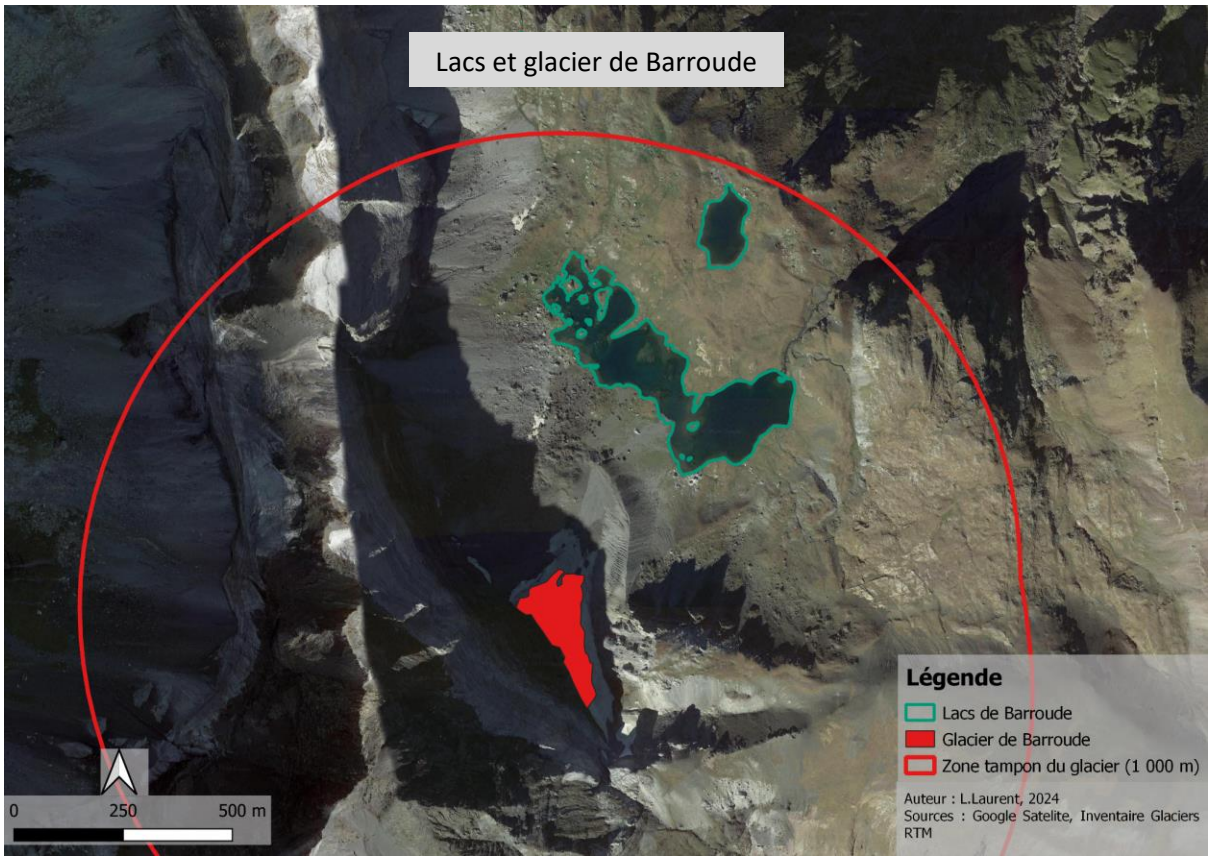


Figure 17 : Lacs de Barroude et emplacement par rapport au glacier du même nom. L. Laurent, 2024.

Concernant les autres lacs proglaciaires, tous ont été étudiés mais il s'agit plutôt de laquets voire de « flaques ». Des fiches ont été réalisées pour les plus importants d'entre eux mais dans chaque cas il n'y a pas d'enjeux à proximité. Ainsi, aucun lac proglaciaire dans les Pyrénées ne génère de risque de vidange, d'autant plus que les barrages sont a priori stables. Comme vu dans la première partie, le recul des glaciers est très important dans les Pyrénées mais il est déjà trop avancé dans la majorité des cas pour entraîner la formation de nouveaux lacs. C'est une des distinctions majeures avec la chaîne des Alpes, qui possède beaucoup de lacs proglaciaires car beaucoup de glaciers avec une forte activité depuis la fin du PAG.

4.2.2. Lacs thermokarstiques

Les lacs thermokarstiques sont situés sur ou aux abords directs d'un glacier rocheux. Dans les Pyrénées françaises, ces lacs sont au nombre de 21 mais il n'est pas assuré qu'ils soient tous réellement thermokarstiques. Un document les recensant a été réalisé dans l'éventualité de les vérifier. Ces lacs thermokarstiques sont en général petits en termes de surface et très peu profonds. De plus, en se basant sur l'inventaire des glaciers rocheux réalisé en 2023 par le RTM, la plupart sont fossiles (ne contenant plus de pergélisol (SSGm, s.d.)) ou en cours de fossilisation. Aucun lac proglaciaire n'a connu de changement depuis au minimum 1950 - 1965 selon les photographies aériennes anciennes disponibles sur *Géoportail.*

La conclusion est similaire aux lacs proglaciaires, aucun lac thermokarstique ne semble dangereux du fait de leur surface réduite, de l'absence de pergélisol et de l'absence d'enjeux à proximité.

4.2.3. Lacs évolutifs

Les lacs dits « évolutifs » sont les lacs dont la catégorie est glaciaire mais dont la surface a beaucoup évolué depuis la fin du PAG. Ils peuvent s'être formés à la suite du recul d'un glacier aujourd'hui disparu, ils ne sont alors pas considérés comme proglaciaires. Ce sont des lacs intéressants pour notre recherche car ils sont plus grands en termes de surface et ils sont de ce fait généralement mieux documentés. Ainsi, 12 lacs ont été repérés. La moitié d'entre eux se situent vers la Brèche de Roland (Hautes-Pyrénées) dans une zone restreinte. Ces lacs sont tous apparus à des périodes différentes depuis 1850.

Tous ces lacs semblent à priori stables si ce n'est le cas du lac de Pays Baché dont le sujet sera abordé dans la suite de ce mémoire. De plus, aucun enjeu ne semble être menacé par une potentielle vidange.

4.2.4. Estimation du risque de vidange

Ainsi cet échantillon d'observation permet d'apporter une conclusion sur le risque de vidange de lacs glaciaires dans les Pyrénées françaises. Il s'agit ici d'estimer ce risque, c'est une conclusion qui est donnée à titre indicatif à partir de différentes observations explicitées

depuis le début de ce mémoire. L'absence d'événements couplée à la présence de barrages stables pour les lacs proglaciaires ou de volumes faibles pour les lacs thermokarstiques ainsi que l'absence d'enjeux directs amènent à conclure que le risque de vidange est **faible à négligeable**. Même si certains lacs évoluent, cela ne semble pas problématique.

Tableau 9 : Résumé des caractéristiques des lacs analysés (L. Laurent, 2024).

Lacs proglaciaires	**Lacs thermokarstiques**	**Lacs évolutifs**
Barrages stables	Barrages stables	Barrages à priori stables
Surfaces faibles	Surfaces faibles	Grandes surfaces
Aucun enjeu à proximité	Aucun enjeu à proximité	Aucun enjeu à proximité

Partie 5 : Discussion et retour d'expérience

5.1. Discussion

Je voudrais approfondir ici trois points soulevés lors de la réalisation de ce stage et de ce mémoire.

5.1.1. Quels sont les risques de surverse et/ou de rupture de barrage dus aux avalanches ?

A.Gréger & P. René mentionnent dans un article paru en 2020 la présence d'un néo-lac à l'emplacement de l'ancien glacier de Pays-Baché. Il serait apparu entre 1995 et 2019, soit très récemment, et aurait une surface comprise entre 0,4 ha et 0,7 ha. Cette différence s'explique par la présence fréquente de névés. La photographie ci-dessous (*figure 18*) montre le lac en 2017.

Figure 18 : Lac de Pays Baché en 2017 (Google Earth, 2017).

Nous avons fait part de ce cas intéressant à E. Chapron, mon tuteur de stage, qui nous a informé que ce lac n'existait plus lorsqu'il s'est rendu sur place en 2021 pour effectuer des relevés. A l'emplacement du lac se trouvait uniquement de la neige et des sédiments récents expulsés sur celle-ci. La figure 19 présente le lac de Pays Baché en août 2021. E. Chapron a formulé l'hypothèse suivante : une avalanche de neige lourde a touché le lac et l'a en grande partie recouvert, créant un névé « permanent ». De plus, l'hypothèse qu'une surverse au moins partielle puisse avoir été déclenchée par cette avalanche est imaginable car le chercheur a sondé sous la neige sans trouver de présence d'eau et l'expulsion de sédiments montre une certaine violence dans l'évènement.

Figure 19 : Photographie du reste d'eau dans le lac de Pays Baché en août 2021 (E. Chapron, 2021).

Ce cas d'étude était très intéressant puisqu'il relançait la possibilité de surverse via un facteur peu pris en compte jusqu'à présent : les avalanches. Émerge alors une piste de réflexion : les Pyrénées connaissent un recul avancé de leurs glaciers et probablement peu de pergélisol ce qui rend le risque de vidange faible, comme nous l'avons exposé dans la partie précédente. En revanche, c'est un massif qui connait des avalanches : est-il possible qu'il y ait des risques de surverse à cause d'avalanches ?

Pour valider l'hypothèse de la surverse, il serait nécessaire de se rendre sur le terrain. Malheureusement le lac reste gelé jusqu'aux mois de juillet voire d'août. Quelques

recherches ont tout de même été menées. Le lac de Pays Baché se situe en amont du lac de Cap de Long, grand lac artificiel de 110 ha, géré par EDF. S'il y a eu une surverse il pourrait être possible d'observer une modification du débit dans ce grand lac. Cependant, après avoir eu accès et observé les débits de Cap de Long, il est impossible de distinguer des fluctuations dues à la potentielle surverse pour plusieurs raisons :

- Les débits sont calculés horairement et il y a des fluctuations toutes les heures,
- La date de l'avalanche est inconnue (2019, 2020 ou 2021),
- Le volume du Pays Baché (bien que non mesuré) est plutôt faible.

Depuis août 2022, le lac est de nouveau entièrement en eau et a retrouvé la forme qu'il avait en 2017, d'après les images Sentinel-2 disponibles. Bien que l'hypothèse n'ai pu être confirmée, cette possibilité soulève des interrogations, d'autant plus que le risque d'avalanche peut connaitre des modifications avec le changement climatique notamment sur les espaces libérés par les glaciers, comme dans le cas de Pays Baché. Un article de S. Margreth et M. Schaer paru en 2023 à la suite de l'International Snow Science Workshop de la même année, se questionne sur l'évolution du risque d'avalanche sur les refuges du club alpin suisse. Il y est écrit que la réduction du volume et de la surface d'un glacier peut modifier la topographie rendant le terrain plus pentu ou plus plat. De plus, « *les caractéristiques d'une avalanche et son chemin peuvent être modifiés pour le meilleur ou pour le pire* » (Margreth & Schaer, 2023, p8.). Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des avalanches est observée (Université de Genève, 2018). Ainsi, le futur des avalanches est incertain, mais la libération d'espaces auparavant englacés peut modifier les conditions d'une avalanche. C'est un travail qu'il pourrait être intéressant d'approfondir.

5.1.2. Est-ce pertinent de créer un indicateur du risque de vidange et de réaliser des modélisations ?

Durant ce stage, j'ai pu participer à un atelier organisé par le RTM regroupant des membres de plusieurs services des Alpes et des Pyrénées ainsi que le docteur Robert Bolognesi, expert en avalanches dans le Valais en Suisse. Le but de cet atelier était que chacun partage ses méthodes pour calculer le risque, c'est-à-dire la probabilité à un endroit de se retrouver dans une avalanche. C'était trois jours très instructifs, d'échanges et de retour

d'expérience. Nadia Hassine y a partagé la méthode qu'elle a utilisé lors d'un travail précédent. Il s'agissait de créer un Coefficient de Risque d'Accident (C.R.A) : la probabilité sous forme d'indicateur qu'un véhicule soit pris dans une avalanche. Ce coefficient se calcule avec une formule qui regroupe différents critères : fréquence de l'avalanche, longueur moyenne de route coupée, largeur de chaussée atteinte, trafic, vitesse moyenne du véhicule. Le calcul de ce type de coefficient permet de prioriser les travaux dans des zones où ce dernier est élevé. Nous avions alors pensé à réaliser quelque chose de similaire pour le risque de vidange de lacs dans les Pyrénées en incluant notamment : la distance entre les enjeux et le lac, le volume du lac, la pente, le débit potentiel lors d'une vidange ou encore le type d'enjeux. Cependant, nous savions déjà que le risque de vidange dans les Pyrénées est faible et ce travail était colossal à réaliser pour un intérêt restreint. En effet, il nécessite une méthodologie très précise avec tous les critères et leur calcul. Puis, il est nécessaire de trouver une manière de les regrouper et de pouvoir ainsi attribuer une valeur à chaque lac. L'idée de réaliser ce type de travail était attirante, mais le temps restant et l'intérêt pratique limité ont amené à ne pas poursuivre.

La réflexion de réaliser une estimation de la sensibilité de chaque lac puis de réaliser des modélisations comme le RTM l'a fait dans les Alpes à la suite de l'inventaire « Serrano » s'est posée. Cependant, une fois de plus, le manque de pertinence s'est imposé.

5.1.3. Que conclure de l'évolution du risque de vidange dans les Pyrénées ?

La conclusion est sans équivoque : le risque de vidange est faible voire négligeable. On peut se questionner sur l'évolution de ce risque notamment dans le contexte de changement climatique. Comme vu dans l'état de l'art, certains auteurs estiment que le nombre de GLOF va augmenter dans les prochaines années dû au recul rapide des glaciers qui pourrait engendrer la formation de lacs peu stables (Carrivick & F. Tweed, 2016). Mais dans le cas des Pyrénées, le recul des glaciers est déjà tellement important que les surfaces et les volumes ne semblent pas susceptibles de créer de nouveaux lacs. Il est important de rester tout de même vigilant et de refaire des analyses à intervalles réguliers dans les zones proches des glaciers encore existants.

5.2. Retour d'expérience

5.2.1. Limites du travail réalisé

Réaliser cet inventaire était un travail très enrichissant et nécessaire pour avoir connaissance des lacs des Pyrénées et le faire sous format SIG permet de le rendre accessible et utilisable facilement par les agents du RTM au besoin. Cela permet de représenter les lacs spatialement mais aussi, grâce à la table attributaire, d'avoir des informations sur ces derniers. Cependant, copier la méthodologie de l'inventaire « Serrano » a quelques limites. Pour rappel, l'altitude minimale de l'inventaire ainsi que la catégorie par défaut attribuée aux lacs ont été choisis pour les Alpes et transposés aux Pyrénées. Par manque de temps et de recul au début de cette mission, j'ai sous-estimé les limites que cela pouvait avoir. L'hypothèse selon laquelle tous les lacs au-dessus de 2000m sont glaciaires s'ils ne comportent pas d'autres caractéristiques est réductrice. Cela exclue tous les lacs ayant une autre origine, tectonique par exemple. La manière dont s'est formé un lac est parfois difficile à connaître, ce qui pourrait rendre ce travail long et nécessiterait un travail de terrain. Mais adapter et affiner les critères pour les Pyrénées permettrait de rendre cet inventaire plus précis et juste. Cela pourrait faire l'objet d'un prochain travail. Il y a aussi la question des barrages, il serait intéressant de renseigner le type de barrage de chaque lac puisque la stabilité de ce dernier est liée au matériau qui le compose.

L'absence de travail de terrain est la seconde limite à ce travail. Par manque de temps mais aussi du fait de la présence d'un manteau neigeux lors de la réalisation de ce stage, il n'a pas été possible de se rendre sur les sites. Le but de ces sorties serait d'observer le type de barrage et de vérifier la stabilité des berges. Cela permettrait une estimation du risque de vidange plus fiable qu'une observation sur les images aériennes.

5.2.2. Bilan personnel

Ce stage a été bénéfique en de nombreux points. Tout d'abord il m'a permis d'appliquer mes compétences en SIG avec un logiciel sur lequel j'avais moins pratiqué. Ce fut un travail majoritairement en autonomie, ce qui nécessite d'organiser le temps de travail et d'être méthodique, ce qui me plait. Ce stage au sein du RTM m'a confirmé mon attirance pour

le domaine de la prévention et de la gestion des risques naturels en montagne. Même si je n'ai pas pu effectuer de travail de terrain dans la thématique de mon stage, j'ai pu accompagner les membres du service de nombreuses fois. J'ai ainsi constaté que le partage de l'emploi du temps entre bureau et terrain me convenait puisque chaque membre du service a au minimum une journée de terrain par semaine.

Le thème ainsi que les missions du stage entrent parfaitement avec les cours dispensés dans le Master Gestion et Évaluation des Environnements Montagnards. C'était bénéfique de pouvoir appliquer rapidement les compétences acquises lors de cette première année.

La principale difficulté pendant ce stage a été de trouver une problématique et de réussir à étoffer la mission principale. Beaucoup de pistes ont été pensées, dont la plupart ont été expliquées dans la partie précédente de la discussion. Cependant, ses pistes s'arrêtaient rapidement car les Pyrénées n'offraient pas matière à les développer plus notamment pour créer un indicateur ou pour réaliser des modélisations. C'était donc frustrant de se retrouver confronté plusieurs fois à la fin d'une thématique. La durée du stage n'a pas permis de réaliser une estimation plus précise du risque de vidange en observant tous les lacs comme ce fut le cas dans les Alpes, c'est aussi un peu frustrant de ne pas avoir une estimation vraiment fiable.

Réaliser mon stage de première année de Master au sein du RTM était un vrai choix et je suis heureuse d'avoir pu découvrir ce domaine. Cette expérience me donne envie d'aller plus loin et de découvrir les autres massifs français dans le même cadre.

Conclusion

Ce stage avait pour but premier de réaliser l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées françaises. A cette mission principale s'est ajouté une volonté d'estimer le risque de vidange dans ce même espace afin de savoir s'il est **pertinent de surveiller les lacs glaciaires des Pyrénées françaises par rapport au risque de vidange**. A l'issue d'une recherche bibliographique, il s'est avéré que les Pyrénées n'ont a priori jamais connu de vidange de lac glaciaire. La seconde étape était la réalisation de l'inventaire afin de pouvoir ensuite estimer le risque. Pour cette étape, tous les lacs proglaciaires, thermokarstiques et néo-lacs ont été analysés. La conclusion est donc que tous les lacs observés sont sans risques car les barrages sont stables ou les volumes sont faibles (cas de Pays Baché). De plus, aucun enjeu n'a été observé à proximité de ces lacs. Cela a permis de conclure que le risque de vidange dans les Pyrénées est faible à négligeable.

Le changement climatique a déjà eu de grandes conséquences dans les Pyrénées, le recul des glaciers y est très avancé. La formation de nouveaux lacs dû au retrait glaciaire semble très limitée. Le niveau de risque ne devrait donc pas augmenter.

En l'état, il est possible d'affirmer **qu'il n'est pas pertinent de surveiller les lacs glaciaires des Pyrénées françaises par rapport au risque de vidange**. Le changement climatique intervient de manière rapide et peut bouleverser nos connaissances. C'est pourquoi il est tout de même important de refaire des analyses régulièrement pour prévenir d'éventuels changements.

Des suites peuvent être données à ce travail. Pour l'inventaire, les critères méthodologiques peuvent être affinés pour correspondre parfaitement à la chaîne des Pyrénées. En ce qui concerne le risque de vidange, il serait pertinent de réaliser des sorties de terrain afin de vérifier que ce risque est faible.

Bibliographie

Articles scientifiques

Carrivick J.L., Tweed, F.S., 2016. « A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods », *Global and Planetary Change,* 144. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001.

Cathala M., Magnin F., Linsbauer A., Haeberli W., 2021. « Modelling and characterizing glacier-bed overdeepenings as sites for potential future lakes in the deglaciating French Alps », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 27 - n° 1. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15255.

Cazenave A., Berthier E., Le Cozannet G., Masson-Delmotte V., Meyssignac B., Salas, Mélia D., 2015. « Le niveau de la mer : variations passées, présentes et futures ». *La Météorologie*, 88, pp 69-82.

Clague J., O'Connor J., 2021. « Glacier-related outburst floods ». *Snow and Ice-Related Hazards, Risks ans Disasters,* pp 467-499. DOI : 10.1016/B978-0-12-817129-5.00019-6.

Colonia D., Torres J., Haeberli W., Schauwecker S., Braendle E., Giraldez C., Cochachin A., 2017. « Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in De-Glaciating Areas of the Peruvian Andes : Approach, First Results, and Perspectives for Adaptation to Climate Change ». *Water*, 9 (5), 336. DOI : 10.3390/w9050336.

Gréger A., René P., 2020. « Les nouveaux lacs des Pyrénées ». *Pyrénées*, 284, pp 5-27.

Harrison S., Kargel J. S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D. H., Betts R. A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U. K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilímek V., 2018. « Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods ». *The Cryosphere*, 12, 1195–1209. https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018.

Huggel C., Kääb A., Haeberli W., Bieri D., Richardson S., 2004. « An assesment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps ». *Canadian Geotechnical Journal.* DOI : 10.1139/t04-053.

Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A., 2021. « Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century ». *Nature*, 592. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z.

Kapitsa V., Shahgedanova M., Machguth H., Severskiy I., Medeu A., 2017. « Assessment of evolution and risks of glacier lake outbursts in the Djungarskiy Alatau, Central Asia, using Landsat imagery and glacier bed topography modelling ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17 (10), 1837-1856. DOI : 10.5194/nhess-17-1837-2017.

Kulp S.A., Strauss B.H., 2019. « New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding ». *Nat. Commun*., 10, 1-12. DOI : 10.1038/s41467- 019-12808-z.

Linsbauer A., Paul F., Haeberli W., 2012. « Modelling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop : Application of a fast and robust approach ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117 (F3), 17. DOI : 10.1029/2011JF002313.

Linsbauer A., Frey H., Haeberli W., Machguth H., Azam M. F., Allen S., 2016. « Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya – Karakoram region ». *Annals of Glaciology*, 57 (71), 119-130. DOI : 10.3189/2016AoG71A627.

Mercier D., Cossart E., 2021. « Les impacts spatiaux du changement climatique sur les environnements périglaciaires ». *Les impacts spatiaux du changement climatique*, ISTE éditions, pp. 121-143. DOI : 10.1002/9781119817925.ch6.

Pörtner H. O., Roberts D. C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N. M., 2019. « IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate ». *Cambridge University Press*, 755 p. DOI : 10.1017/9781009157964.

Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McRabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. G., 2019. « Global glacier mass changes and their contribution to sea-level rise from 1961 to 2016 ». *Nature*, 568. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0.

Ouvrages

Audoubert L., 1991. *Lacs des Pyrénées.* Éditions Libris Glenat, 144 p.

Audoubert L., 1993. *Lacs des Pyrénées, Tome 2.* Éditions Libris Glenat, 144 p.

Audoubert L., 1996. *Lacs des Pyrénées, Tome 3.* Éditions Libris Glenat, 175 p.

Bourneton A., 1991. *Pyrénées aux milles lacs*. Editions Glénat.

Brugnot G., Cassayre Y., Coutancier B., David F., Guyard P., Huguenin D., Lebart L., Pommet B., Thouzery G, Vauterin P., 2004. *Restaurer la montagne, photographies des Eaux et Forêts du XIXe siècle.* Éditions Somogy Éditions d'Art et Museon Arlaten, 188 p.

Coutterand S., 2017. *Atlas des glaciers disparus.* Éditions Paulsen, 269 p.

Francou B., Mélières M. A., 2021. *Coup de chaud sur les montagnes*. Éditions Paulsen, 237 p.

Gaurier L., 1935. *Les lacs des Pyrénées françaises.*

René P., 2013. *Glacier des Pyrénées, Le réchauffement climatique en images.* Éditions Cairn, 192 p.

Russell H., 1878. *Souvenirs d'un montagnard.* Pau, 416 p.

Documents institutionnels et rapports

Lacroix D., Mayet L., Roche P.A., 2022. *Risques d'origine glaciaire et périglaciaire, éléments en soutien à un plan d'action.* Rapport de IGEDD, IGA et IGÉSR, 140 p.

Margreth S., Schaer M., 2023. *Avalanche risk of high mountain huts in Switzerland and its evolution due to climate change.* International Snow Science Workshop, Bend, Oregon, 8 p.

Serrano C., 2019. *Évaluation de l'aléa de lave torrentielle et du risque engendré liés aux ruptures de lacs glaciaires et périglaciaires.* IRSTEA, 25 p.

Université de Genève, 2018. *Global warming increases the risk of avalanches.* Science Daily.

Liens informatiques

InSAR. *Monitoring satellite de la déformation du sol.* https://www.sixense-group.com/offre/monitoring/surveillance-par-satellite-atlas-insar.

Société Suisse de Géomorphologie (SSGm), s.d. *Glacier rocheux fossile.* https://geomorphologie-montagne.ch/glossaire/glacier-rocheux-fossile/.

IGN, 2024. *BD TOPO, descriptif de contenu*. https://geoservices.ign.fr/bd-topor-explorer-descriptif-de-contenu.

IGN, 2022. *Cartographie 3D : à la découverte du LiDAR. https://www.ign.fr/reperes/cartographie-3d-la-decouverte-du-lida.*

Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, 2023. *Risques naturels en montagne. https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/risques-naturels-montagne.*

Moraine, s.d. *Les glaciers des Pyrénées.* Association Moraine. http://asso.moraine.free.fr/index.php/les-glaciers-des-pyrenees/.

ONF, s.d. *L'ONF agit. https://www.onf.fr/onf/lonf-agit/.*

Documents internes

Garnier A., 2023. *Aléa de vidange de lacs glaciaires dans les Alpes françaises.* Stage au service RTM de la Savoie, 29 p.

RTM, 2022. *Présentation de la Restauration des Terrains en Montagne (rtm) et des services ONF-RTM.* 16 p.

RTM Pyrénées, 2022. *Rapport d'activité du service RTM des Hautes-Pyrénées et des Pyrénées Atlantiques en 2022.*

RTM Pyrénées, 2023. *Rapport d'activité du service RTM des Hautes-Pyrénées et des Pyrénées Atlantiques en 2023.*

RTM, 2024. *Critères sensibilité lacs et modélisations flowR.*

Annexes

Annexe 1 : Note de synthèse

Cette note de synthèse a été réalisée dans le cadre du stage afin de partager aux agents du service RTM 64-65 ainsi qu'aux agents spécialisés sur le PAPROG les travaux réalisés pendant ce dernier.

2024

INVENTAIRE ACTUEL DES LACS GLACIAIRES DANS LES PYRÉNÉES FRANÇAISES

Livia LAURENT, Master 1 Gestion et Évaluation des Environnements Montagnards (Toulouse)
Stage du 8 avril au 28 juin 2024 au RTM 64/65

I. Contexte et objectifs

L'ONF-RTM est investi dans le Plan d'Action pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (PAPROG) lancé en 2019 par le Ministère en charge de l'Écologie. Ce plan possède plusieurs objectifs :

- Améliorer la compréhension des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP),
- Estimer la sensibilité des territoires à ces risques,
- Constituer une communauté de partage et de travail afin de construire un programme d'actions.

Dans le cadre de ce plan, quatre formes périglaciaires ont été identifiées comme pouvant générer des risques et donc toucher des enjeux : les glaciers blancs, les glaciers rocheux, les parois à permafrost et les lacs glaciaires.

Le présent stage **s'intéresse uniquement aux lacs glaciaires.** Cette forme est très évolutive en raison du retrait glaciaire (apparition de nouveaux lacs dans des surcreusements, augmentation de la taille et du volume des lacs existants). Les lacs glaciaires peuvent représenter des menaces pour les vallées. En effet, si leurs berges sont instables (barrage de glace, barrage morainique) cela peut générer une vidange rapide et être à l'origine de crues/laves torrentielles en aval.

La première étape dans l'estimation de ce risque est de réaliser **l'inventaire le plus exhaustif possible de ces lacs.** Plusieurs actions ont ainsi été menées dans les Alpes afin de recenser tous les lacs glaciaires (inventaire des années 1950, inventaire actuel (2022), développement de programmes automatiques pour la détection des lacs). Pour les Pyrénées, l'agence RTM m'a confié ce travail.

II. Constitution de l'inventaire

La méthodologie utilisée pour réaliser cet inventaire est sensiblement la même que celle employée dans les Alpes par C. Serrano (2022). Voici les principales informations à noter :

- L'inventaire a été réalisé sur ArcMap avec comme support la BD ORTHO de l'IGN (2021 ou 2022 suivant les départements) et les contours des « plans d'eau » extraits de la BD TOPO de l'IGN (2021).

- Seuls les lacs situés au-dessus de 2000m ont été inventoriés. Ce seuil choisi par C. Serrano a été conservé pour les Pyrénées. Ce sont des lacs qui sont considérés comme « glaciaires ». Ils

peuvent être associés au retrait glaciaire depuis le Petit Age Glaciaire (autour de 1850) ou celui ayant débuté après le Dernier Maximum Glaciaire (Würm, -12 000 ans).

- Aucun filtre de surface n'a été appliqué lors de la réalisation de l'inventaire. Tous les lacs ont été inventoriés.

- Les champs de la table attributaire sont composés de : identifiant, nom, catégorie, date de l'image aérienne utilisée, surface, coordonnées, massif, département, commune, altitude et volume théorique.

- Difficultés rencontrées : présence parfois de neige ou de zones sous/sur-exposées. Utilisation de Google Earth, Géoportail ou d'anciennes BD ORTHO (2019) pour palier à ces difficultés.

III. Résultats

1. Résultats de l'inventaire

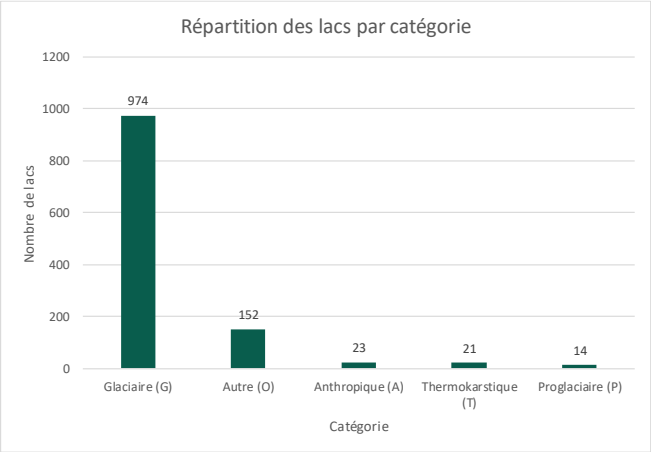
La réalisation de l'inventaire aura duré un peu plus d'un mois. Au total, **1184 lacs** ont été inventoriés pour des surfaces allant de 0,0015 ha (15m²) à plus de 153 hectares. Cette différence importante s'explique par la présence de beaucoup de petits lacs et de quelques lacs anthropiques avec une surface très grande

Surface	Nombre de lacs
Toutes surfaces	1184
>= 2500 m²	520
>= 2500m² ou P ou T	542

Tableau 10 : Nombre de lacs inventoriés dans les Pyrénées françaises.

N.B. : « P » = proglaciaire et « T » = thermokarstique

Au niveau de la répartition des lacs par rapport à l'altitude, le lac le plus haut se trouve à **2922 m** et la médiane se situe à 2310 m. La catégorie « glaciaire » est majoritaire. Mais on retrouve aussi des lacs comportant d'autres spécificités comme visible sur l'histogramme ci-dessous *(pour plus d'informations lire mémoire de stage Livia Laurent).*



Les différentes catégories de lacs glaciaires

- Lacs glaciaires : lacs supérieurs à 2 000m
- Lacs proglaciaires : se situant à moins de 1 000 m en aval d'un glacier blanc
- Lacs thermokarstiques : se situant sur ou aux abords directs d'un glacier rocheux
- Lacs anthropiques : retenues d'eau artificielles ou barrages
- Autres : névés, lacs secs, marais

Figure 1 : Répartition des lacs par catégorie. Source : L. Laurent, 2024

2. Comparaison avec les Alpes

Ce travail ayant été initialement réalisé dans les Alpes, il peut être pertinent de comparer rapidement les résultats. C. Serrano a inventorié 1348 lacs glaciaires de plus de 2500 m² (ou bien « T » ou « P »), contre 542 pour les Pyrénées.

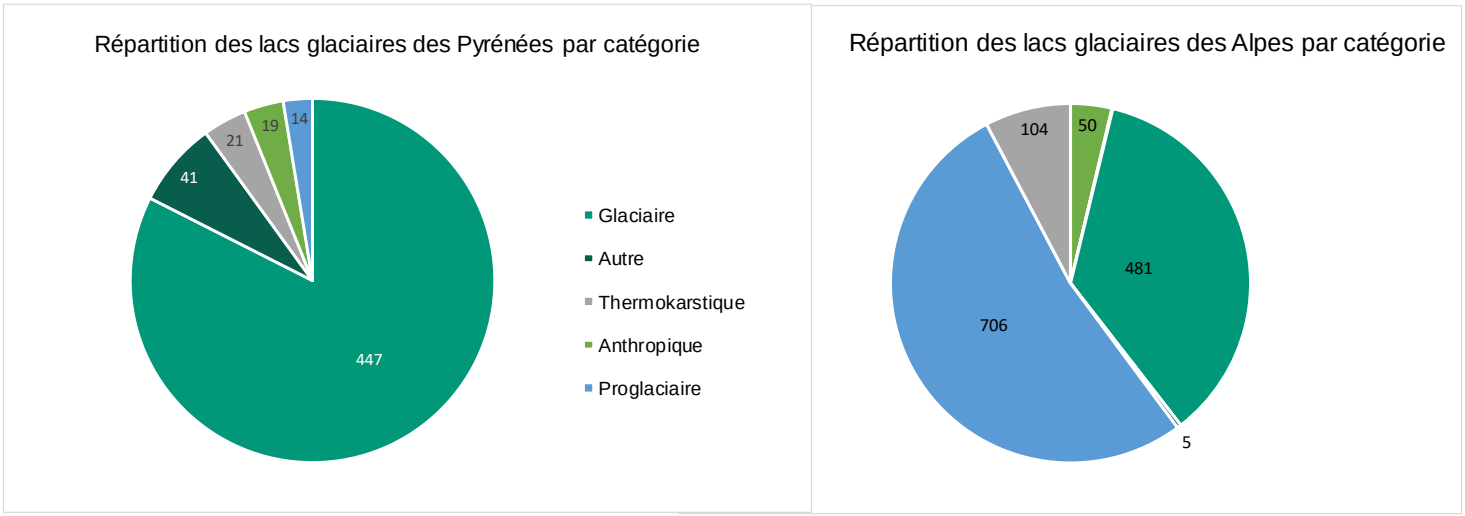


Figure 2 : Répartition des lacs par catégorie. Source : L. Laurent, 2024

La répartition des lacs selon les catégories est très différente surtout au niveau de la quantité de lacs proglaciaires. Les Alpes possèdent beaucoup plus de lacs proglaciaires. Il faut noter que les lacs « autre » n'ont pas été classés de la même façon. Dans les Pyrénées tous les lacs secs ou avec très peu de profondeur ont été catégorisés ainsi. Cette différence peut aussi s'expliquer par le climat : 21 des 41 lacs « autre » se trouvent dans les Pyrénées-Orientales, département au climat méditerranéen.

	Alpes	Pyrénées
Surface moyenne (en ha)	1,18	3
Surface maximale (en ha)	60	153
Altitude maximale (en m)	3521	2285

Tableau 3 : Comparaison des surfaces et des altitudes entre les Alpes et les Pyrénées.

En ce qui concerne les surfaces, les Pyrénées semblent avoir des lacs beaucoup plus grands. Comme précisé précédemment, c'est dû aux grands lacs anthropiques. La chaîne des Alpes possède des grands lacs à vocation énergétique également mais ces derniers ne se situent pas au-dessus de 2000m. L'écart d'altitude maximale s'explique par les différences topographiques entre les deux chaînes.

IV. Estimation du risque de vidange dans les Pyrénées

En parallèle de la réalisation de cet inventaire, un travail bibliographique et d'analyse a été effectué. Les Pyrénées n'ont, à notre connaissance, connus aucun évènement de vidange de lacs glaciaires en France ou en Espagne. L'intérêt était donc d'identifier des lacs potentiellement « à risque » afin d'analyser leur évolution, leur barrage et les enjeux en aval. Une dizaine de lacs ont attiré notre attention et ont été analysé (*cf document focus_lacs)*. A priori, aucun ne présente une probabilité de vidange forte et une présence d'enjeux de proximité en aval.

Cette mission complémentaire nous amène à conclure que le risque de vidange dans les Pyrénées françaises est très faible voire inexistant.

Annexe 2 : Tableau détaillé des données utilisées pour la réalisation de l'inventaire

Donnée utilisée	**Nom des couches**	**Fournisseur**	**Date**	**Format**	**Donnée publique /privée**	**Lieu de téléchargement** (URL)	**Description**
Inventaire des glaciers blancs des Pyrénées	glacier_ply_2020_comp	RTM	2020	Shape file	Privée	Ø	Couche recensant tous les glaciers blancs des Pyrénées
Inventaire des glaciers rocheux des Pyrénées	2023_glaciers_rocheux_Pyr	RTM	2023	Shape file	Privée	Ø	Couche recensant tous les glaciers rocheux des Pyrénées françaises
BD TOPO	COMMUNE, DEPARTEMENT, PLAN_D_EAU	IGN	2021	Shape file	Publique	BD TOPO® | Géoservices (ign.fr)	Ensemble de couches SIG par département
BD ORTHO		IGN	2019, 2021 ou 2022	Raster	Publique	BD ORTHO® | Géoservices (ign.fr)	Images aériennes
LiDAR HD	MNT	IGN		Raster	Publique	LiDAR HD | Géoservices (ign.fr)	Modèle Numérique de terrain généré grâce au LiDAR Haute Définition
SCAN 25		IGN	2021	Shape file	Nécessite une demande de téléchargement	SCAN 25® | Géoservices (ign.fr)	Carte topographique précise

Massif	Massifs_py	Météo France		Shape file		Ø	Massifs des Pyrénées françaises
BD HISTO		IGN	1950-1965	Raster	Publique	BD ORTHO® Historique | Géoservices (ign.fr)	Images aériennes anciennes

N. B. : Les données provenant de l'IGN sont découpées par départements. Les données utilisées proviennent des départements suivants : Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne, Ariège, Aude et Pyrénées- Orientales.

N. B. 2 : Toutes les couches ont le système de projection Lambert 93, EPSG 2154.

Annexe 3 : Exemple d'une fiche réalisée pour l'analyse d'un lac, le lac Tourrat

Lac Tourrat - ID 400

Illustration 1 : Le lac Tourrat en vue 3D, 2017.
Source : Google Earth

Fiche technique :

Nom : Tourrat, signifie « gelé », toponyme donné car il est souvent gelé jusqu'au mois de juillet/août

Localisation : 42°48'30" lat N & 00°05'55" long E, Massif de Pic Long (commune de Luz-Saint Sauveur)

Carte IGN, SCAN 25 : 1748 OT **(**Gavarnie - Luz-Saint Sauveur)

Altitude : 2620 m

Surface : 9,8 ha (2022)

Volume théorique : 1279070 m^3 **(**formule de Heggel 2002, relation entre surface et volume)

Catégorie : lac glaciaire

Barrage : *rocheux, verrou glaciaire*

Historique :

Le lac Tourrat est apparu de manière progressive pendant la première moitié du XX^{ème} siècle pour atteindre aujourd'hui une surface de 9,8 ha. Avant cela, lors de l'extension maximale du glacier lors du Petit Age Glaciaire (PAG), une surface d'environ 1,5 ha était en eau libre. Cette affirmation est possible du fait de la présence d'une moraine latérale datée du PAG.

Illustration 2 : La moraine latérale datant du Petit Âge Glaciaire, 2017.
Source : Google Earth

L'histoire de la formation de ce lac est directement liée à la régression du glacier du lac Tourrat situé en amont. Il est intéressant de se pencher sur les différentes cartographies à disposition afin d'observer ce lien étroit. Ainsi, en 1906, Eydoux et Maury vont relever la surface de ce glacier : environ 30 ha (illustration 3). Surface égale à celle connue à la sortie du PAG soit en 1850. Le lac Tourrat, collé au glacier, a une surface beaucoup plus petite que l'actuelle. Puis, les Eaux et Forêts, en charge des relevés glaciologiques, vont faire un relevé plus précis car réalisé au tachéomètre en 1933. L'illustration 4 montre le résultat de ce relevé.

Le glacier connaît une régression rapide puisqu'il diminue de 12 ha entre 1906 et 1933, ne mesurant donc plus que 18 ha. C'est lors de cette période que les principaux changements au niveau du lac s'opèrent. En effet, comme visible sur cette même illustration, en 1933, la forme du lac est à peu près semblable à l'actuelle. Il n'est pas possible de mesurer avec précision la différence de surface puisque le tracé d'Eydoux et Maury n'est pas parfait, mais il semble tout de même avoir au moins doublé de surface.

Si depuis 1933 le glacier continue de régresser de manière importante (1985 : 7 ha ; 2000 : 3,5 ha) et est aujourd'hui considéré comme un glacier résiduel, c'est-à-dire qui est dépourvu de signes d'écoulements, le lac Tourrat lui, n'a que très peu changé. Le recul du glacier ne semble pas avoir apporté davantage d'eau dans ce dernier.

A titre informatif, avant 1985, le glacier s'est séparé en deux parties : une au contact du lac et une seconde sur le versant nord du Pic Long dans un endroit moins exposé. Aujourd'hui, ces deux parties sont encore existantes, la première est couverte d'éboulis et la seconde, bien que plus petite, est toujours visible. Cependant, les résidus du glacier du lac Tourrat sont voués à disparaître prochainement.

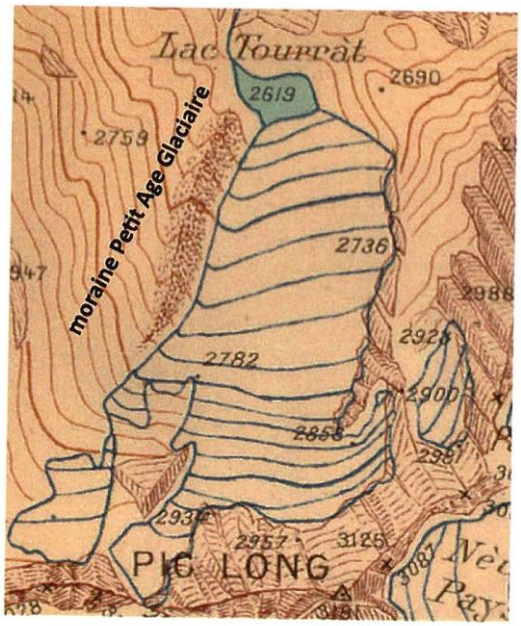


Illustration 3 : Glacier du lac Tourrat et lac du même nom, relevé effectué par Eydoux et Maury en 1905 ou 1906.

Source : Les nouveaux lacs des Pyrénées, 2020

Illustration 4 : Glacier et lac Tourrat en 1933. Relevé effectué par les Eaux et Forêts.
Source : Les nouveaux lacs des Pyrénées, 2020

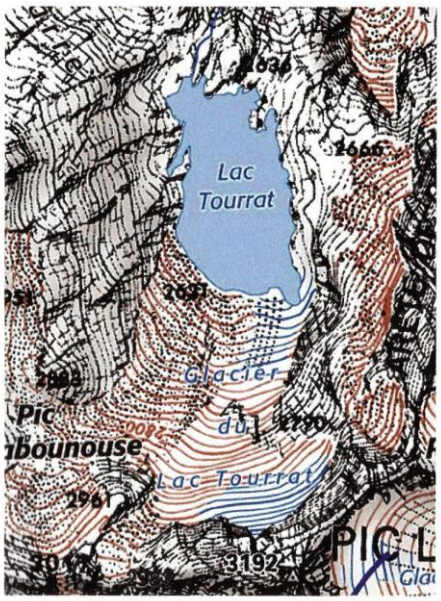


Illustration 5 : Le glacier et le lac Tourrat en 2000. Il est possible d'observer les deux parties du glacier (courbes de niveaux en bleu).
Source : carte topographique IGN, 2000

Illustration 6 : photo du glacier se jetant dans le lac Tourrat en 1933
Source : cliché réalisé par les Eaux et Forêts, septembre 1933

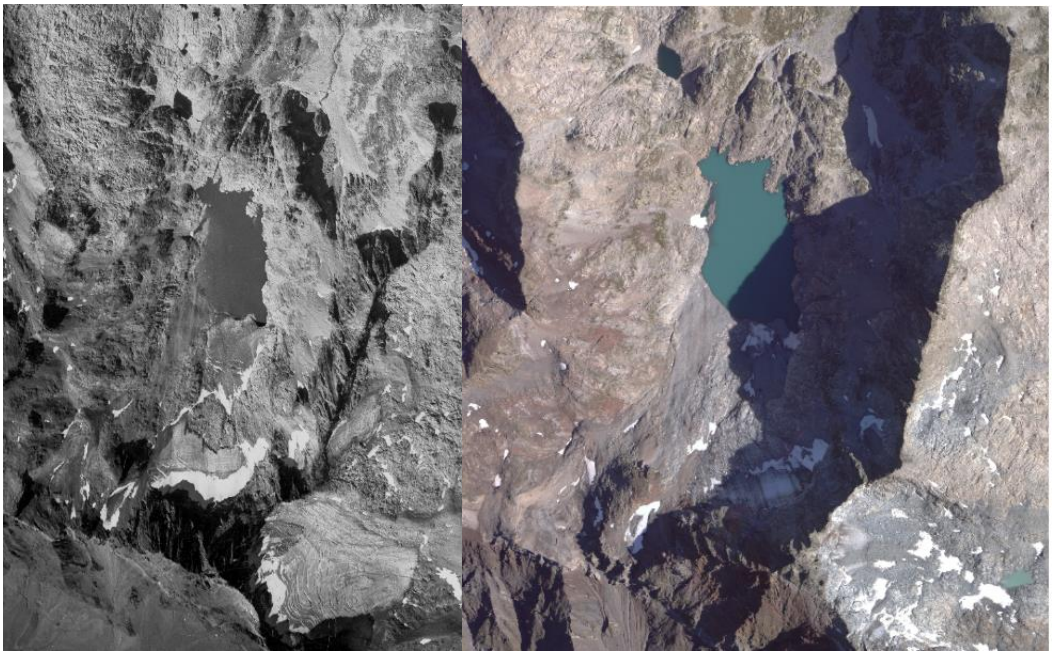


Illustration 7 : photo aérienne du glacier du lac Tourrat et du lac en 1948 (à gauche) et en 2006. Cette comparaison permet de rendre compte du recul du glacier.
Source : Remonter le temps

Risques, enjeux et perspectives d'évolutions :

L'Abbé Gaurier écrit en 1935 dans *Les Lacs des Pyrénées Françaises* à propos du lac Tourrat que les "*moraines tombent directement dans le lac et activent son comblement*". C'est effectivement, une piste probable d'avenir pour ce lac : un apport de sédiments et de matériaux du versant qui peuvent tendre vers le comblement du lac.

Le risque de vidange du lac semble très faible car le barrage semble rocheux et donc stable (*à vérifier sur le terrain).* De plus, les enjeux en aval sont très éloignés : entre 8 et 9 kilomètres en suivant le fond du talweg, ce qui semblerait être le chemin logique de l'eau. Sur le parcours que suivrait cette potentielle masse d'eau se trouvent un ruisseau et d'autres petits lacs.

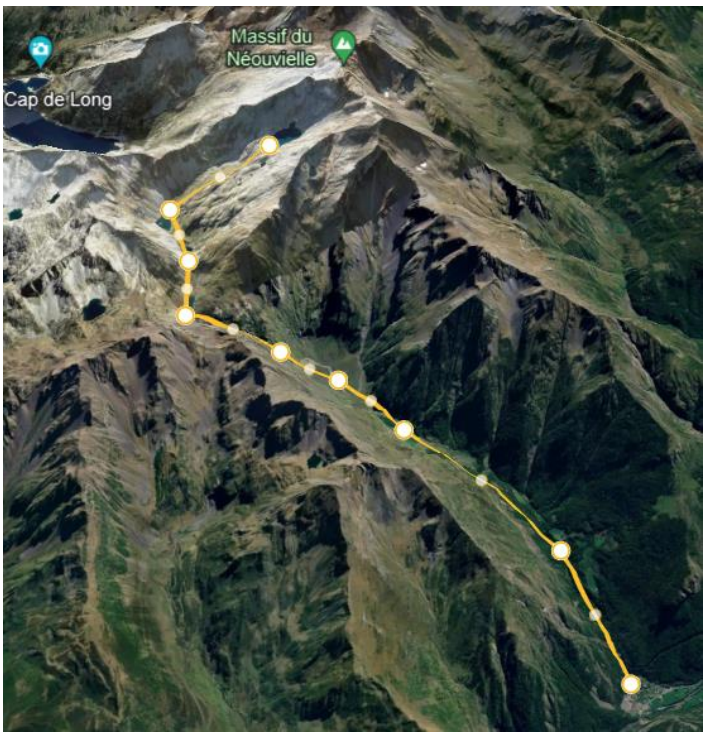


Illustration 8 : Tracé suivi par l'eau en cas de vidange du lac Tourrat. Longueur : 9,1 km
Enjeux sur le parcours : quelques fermes et maisons isolées, centrale électrique EDF au niveau de Pragnères et route d'accès à Gavarnie.
Source : Google Earth

Conclusion et prise de recul :

Ainsi, le lac Tourrat à un processus de formation très intéressant puisque directement lié au recul d'un glacier sur une durée d'un siècle. Cependant, en termes de risque de vidange, ce phénomène semble écarté du fait du barrage *a priori* stable et de l'absence d'enjeux à proximité. Même si l'effet d'une vidange glaciaire est dur à visualiser sans modélisation.

Une visite de terrain pourrait être pertinente pour confirmer la nature du barrage, observer la régression du glacier, observer l'apport de sédiments dans le lac et enfin observer l'environnement alentour afin de mieux caractériser le risque sur cette zone.

Notes :
Les surfaces du glacier ne sont pas vérifiées, dans un document d'archive RTM, les surfaces indiquées sont différentes de celles de l'article sur les néo-lacs.
Ainsi, les archives disent ceci à propos des surfaces du glacier du lac Tourrat :

- *Eydoux et Maury : 58,75 ha*
- *Gaurier : 32,5 ha*
- *Eaux et Forêts (1935) : 22 ha*

Si ces valeurs sont justes, cela signifierait que le recul du glacier a été très important dans ce premier tiers de siècle. Cependant, cela paraît un peu extrême.

Annexe 4 : Typologie des las de montagne, d'après Gréger et René, 2021

Type	Altitude	Bassin versant	Caractéristiques
Lacs verts	1800 m	- 2000-2300 m - Composé d'arbres	- Englacé 6 à 7 mois - Température estivale ≈ 15°C - Nombreuses matières organiques en suspension - « lac noir »
Lacs de pelouse	2100 m	- 2300-2700 m - Composé de pelouse	- Englacé 7 à 8 mois - Température estivale ≈ 12°C - Nombreux éléments minéraux - « lac vert » ou « lac rouge » (présence d'algues)
Lacs froids	2400 m	- 2600-2900 m - Composé de roches nues	- Englacé 8 à 9 mois - Température estivale ≈ 9°C - Eaux limpides faiblement minéralisées - « lac bleu »
Lacs polaires	2600 m	- 2800-3400 m - Composé de roches nues et de glaciers	- Englacé 10 mois et plus - Température estivale ≈ 5°C - Matière minérale en suspension - « lac blanc » = matières en suspension

Liste des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'un cas marqué par l'érosion avec le village de Guil au bord du gouffre, Hautes Alpes, s.d. 11

Figure 2 : Exemple d'ouvrages mis en place pour corriger le risque torrentiel à Saint-Pons dans les Alpes de Haute-Provence, 1904 13

Figure 3 : Effets du reboisement dans la vallée du Toulourenc (Vaucluse) entre 1889 et 2004. 13

Figure 4 : Répartition des activités du RTM en 2021. 15

Figure 5 : Répartition des tâches réalisées pendant le stage 19

Figure 6 : Les deux types de lacs glaciaires : lacs de verrou et lacs morainiques. 27

Figure 7 : La vidange d'un lac glaciaire détruisant la ville touristique de Kedarnath en Inde en 2013 31

Figure 8 : Frise présentant les différents travaux menés sur les lacs des Pyrénées 34

Figure 9 : Présentation de la méthodologie LiDAR 38

Figure 10 : Présentation des différentes actions à réaliser lors de la construction de l'inventaire réalisé pendant ce stage 40

Figure 11 : Exemple de difficulté rencontrée 45

Figure 12 : Répartition des lacs par catégorie 47

Figure 13 : Répartition des lacs par classes d'altitude 48

Figure 14 : Répartition des lacs par département 48

Figure 15 : Répartition des lacs par massif 49

Figure 16 : Répartition des lacs de plus de 2500 m² ou de catégorie "T" ou "P" par catégorie 50

Figure 17 : Lacs de Barroude et emplacement par rapport au glacier du même nom 55

Figure 18 : Lac de Pays Baché en 2017 58

Figure 19 : Photographie du reste d'eau dans le lac de Pays Baché en août 2021. 59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les quatre formes glaciaires ou périglaciaires, les risques associés et l'état d'avancée de leur identification en France 17

Tableau 2 : Les différents types de barrage pour un lac glaciaire 27

Tableau 3 : Données utilisées pour la construction de l'inventaire. 41

Tableau 4 : Table attributaire de l'inventaire des lacs glaciaires 2024, Pyrénées françaises..42

Tableau 5 : Les différentes catégories de lacs, champ « CATÉGORIE ».....44

Tableau 6 : Répartition des lacs suivant la surface.....46

Tableau 7 : Comparaison des surfaces et des altitudes des lacs entre les Alpes et les Pyrénées.....51

Tableau 8 : Bibliographie et données utilisées pour l'identification et l'analyse de certains lacs 53

Tableau 9 : Résumé des caractéristiques des lacs analysés 57

Liste des annexes

Annexe 1 : Note de synthèse 70

Annexe 2 : Tableau détaillé des données utilisées pour la réalisation de l'inventaire.....75

Annexe 3 : Exemple d'une fiche réalisée pour l'analyse d'un lac, le lac Tourrat.....77

Annexe 4 : Typologie des las de montagne, d'après Gréger et René, 2021 84

Table des matières

Résumé **3**

Summary **4**

Remerciements **5**

Sommaire **6**

Liste des sigles **7**

Introduction **8**

Partie 1 : Contexte et missions du stage **10**

1.1. L'histoire de la Restauration des Terrains en Montagne 10

1.2. Le service RTM aujourd'hui 14

1.3. Un programme spécial pour les risques émergents 16

1.4. Les missions et l'organisation du stage 18

Partie 2 : Comprendre les phénomènes liés aux lacs glaciaires dans le contexte de changement climatique **20**

2.1. Le changement climatique en montagne 20

2.1.1. Le changement climatique est-il plus important en montagne ? *20*

2.1.2. Comment se manifeste le changement climatique en montagne ? *22*

2.2. Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire 24

2.2.1. Quelles sont les spécificités des risques naturels en montagne ? *24*

2.2.2.De nouveaux risques émergent ? *25*

2.3. Lacs glaciaires et risques liés 26

2.3.1. Qu'est-ce qu'un lac glaciaire ? *26*

2.3.2. Quels sont les risques liés aux lacs glaciaires ? *28*

2.3.3. Comment prévenir ce risque ? *32*

2.4. Les études lacustres dans les Pyrénées françaises 33

Partie 3 : Identifier les lacs glaciaires des Pyrénées françaises 36

3.1. Méthodologie.....36

3.1.1. Méthodologies d'identification des lacs via la télédétection.....36

3.1.2. Données utilisées.....40

3.1.3. Présentation des critères et de la table attributaire.....41

3.1.4. Difficultés rencontrées 45

3.2. Résultats de l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées 46

3.2.1. Présence importante de lacs mais diversité de surfaces 46

3.2.2. Prédominance des lacs glaciaires 46

3.3. Comparaison avec l'inventaire réalisé dans les Alpes 49

Partie 4 : Estimer le risque de vidange dans les Pyrénées françaises 52

4.1. Méthodologie.....52

4.1.1. Critères de sélection et identification des lacs.....52

4.1.2. Analyse des lacs 54

4.1.3. Estimation de l'enjeu global.....54

4.2. Estimation du risque de vidange dans les Pyrénées françaises 54

4.2.1. Lacs proglaciaires.....55

4.2.2. Lacs thermokarstiques 56

4.2.3. Lacs évolutifs.....56

4.2.4. Estimation du risque de vidange.....56

Partie 5 : Discussion et retour d'expérience 58

5.1. Discussion.....58

5.1.1. Quels sont les risques de surverse et/ou de rupture de barrage dus aux avalanches ? 58

5.1.2. Est-ce pertinent de créer un indicateur du risque de vidange et de réaliser des modélisations ?.....60

5.1.3. Que conclure de l'évolution du risque de vidange dans les Pyrénées ?.....61

5.2. Retour d'expérience 62

5.2.1. Limites du travail réalisé 62

5.2.2. Bilan personnel 62

Conclusion 64

Bibliographie 65

Articles scientifiques 65

Ouvrages 67

Documents institutionnels et rapports 67

Liens informatiques 68

Documents internes 68

Annexes 70

Annexe 1 : Note de synthèse 70

Annexe 2 : Tableau détaillé des données utilisées pour la réalisation de l'inventaire 75

Annexe 3 : Exemple d'une fiche réalisée pour l'analyse d'un lac, le lac Tourrat 77

Annexe 4 : Typologie des las de montagne, d'après Gréger et René, 2021 84

Liste des illustrations 85

Liste des figures 85

Liste des tableaux 87

Liste des annexes 88

Table des matières 89

Résumé 92

Résumé

Le changement climatique exerce une pression croissante sur les écosystèmes montagnards, rendant les phénomènes naturels plus imprévisibles et menaçants. A cela, s'ajoute le retrait des glaciers et la fonte du pergélisol qui peuvent créer de nouvelles formations comme des lacs glaciaires mais aussi être synonyme d'instabilités et de risques. Les Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP) - ayant pour zone source des zones couvertes de glace, récemment déglacées, ou les abords directs de ces zones influencées par la présence de glaciers ou de pergélisol - sont de plus en plus présents dans nos montagnes. Cependant, ils sont encore aujourd'hui trop peu connus et nécessitent d'être pris en compte dans les différents programmes de prévention des risques. C'est dans cette optique que le PAPROG (Plan d'Actions pour la Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire) a été lancé en 2019. Le but est d'améliorer les connaissances des ROGP pour ensuite déterminer des actions à effectuer pour la prévention de ces derniers.

C'est dans le cadre de ce plan que ce stage s'inscrit. La mission confiée par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) des Pyrénées est de réaliser l'inventaire des lacs glaciaires des Pyrénées françaises afin de contribuer à la connaissance des formes glaciaires et périglaciaires pour ensuite estimer le risque de vidange de tous ces lacs. Cet inventaire permet d'avoir une base informatique pour tous les agents du RTM.

La conclusion est qu'il y a un risque de vidange de lacs glaciaires dans les Pyrénées qui est faible à négligeable, tous ont des barrages stables ou des petits volumes et ils ne se situent pas à proximité d'enjeux (infrastructures ou populations). La surveillance des lacs glaciaires n'est donc pas nécessaire en l'état, bien qu'il soit essentiel de réévaluer ce risque régulièrement.